

# **Metsän optimaalinen kiertoaika: Lähestymistavat ja niiden talousteoreettinen perusta**

Esa-Jussi Viitala

VANTAAN TUTKIMUSKESKUS



11.06.02

**METSÄNTUTKIMUSLAITOKSEN TIEDONANTOJA 848, 2002**

# Metsän optimaalinen kiertoaika: Lähestymistavat ja niiden talousteoreettinen perusta

Esa-Jussi Viitala

VANTAAN TUTKIMUSKESKUS

METSÄNTUTKIMUSLAITOS  
TAMPERE

Esa-Jussi Viitala 2002. Metsän optimaalinen kiertoaika: Lähestymistavat ja niiden talousteoreettinen perusta. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 848. 128 s. ISBN 951-40-1828-1.

Milloin metsässä kannattaa tehdä päätehakkuu, on yksi metsätalouden keskeisimmistä kysymyksistä, jota on pohdittu jo vuosisatojen ajan. Aiheen tärkeys johtuu siitä, että päätehakkuun edullisin ajankohta – metsän taloudellisesti optimaalinen kiertoaika – vaikuttaa periaatteessa kaikkeen metsänkäsitteeseen ja on siten läheisessä yhteydessä myös metsätalouden harjoittamisen kannattavuuteen, metsämaan arvoon ja raakapuun tarjontaan.

Tässä tutkimuksessa luodaan kattava ja systemaattinen kokonaiskuva siitä, millaisten teorioiden pohjalta metsävarojen optimaalista käyttöä voidaan lähestyä. Erityisen tarkkaan selvitetään, miten metsän kiertoaajan erilaiset määrittämisperiaatteet ovat historiallisesti syntyneet ja kehittyneet, sekä millaisia talousteoreettisia perusteita ja oletuksia niiden taustalta on. Lisäksi johdetaan ns. rajakannattavuuden periaatetta hyväksi käyttäen talousteoreettisesti johdonmukainen tapa laskea normaalimetsän optimaalinen kiertoaika ja osoitetaan sen vastaavan Faustmannin mallia.

Viimeisten vuosikymmenien aikana tehdyt tutkimukset ovat osoittaneet, että Faustmannin malli on talousteoreettisesti oikea tapa laskea metsän optimaalinen kiertoaika. Suomessa vallinnutta metsäekonomista ajattelua on kuitenkin hämärtänyt Nyyssösen vuonna 1958 esittämä rajakannattavuuden laskentatapa, jota soveltamalla on pyritty välttämään pitkäaikainen korkoa korolle laskenta. Ajattelua on hämärtänyt myös epätietoisuus ns. näyttäjäprosentin, v-arvon ja Faustmannin mallin kiinteästä yhteydestä toisiinsa. Tässä tutkimuksessa osoitetaan analyttisesti, että Nyyssösen esittämä laskentatapa johtaa lyhyempiin kiertoaikoihin kuin Faustmannin malli, ja että talousteoreettisesti oikein sovellettuna rajakannattavuuden määrittämisessäkin tulee soveltaa korkoa korolle laskentaa.

Metsäekonomisen ajattelun hämartyminen on heijastunut myös yksityismetsätalouden organisaatioiden antamiin metsänkäsitteelyohjeisiin ja -suosituksiin. Jatkossa olisikin tarpeen, että niitä perusteltaisiin nykyistä huomattavasti johdonmukaisemmin ja läpinäkyvämmiin. Jos suositukset eivät kaikilta osin perustu yleisesti hyväksytyihin taloudellisuuden kriteereihin, tämä tulisi myös selkeästi kertoa metsänomistajille ja metsäammattilaisille. Samalla olisi myös perusteltava, miksi näistä kriteereistä on poikettu.

**Julkaisija:**

METLA, Vantaan tutkimuskeskus. Hanke 3318.  
Hyväksytty 12.3.2002, Kari Mielikäinen, tutkimusjohtaja.

**Tilaukset:**

Metsäntutkimuslaitos, kirjasto, PL 18, 01301 Vantaa.  
Puhelin: (09) 8570 5580, Faksi: (09) 8570 5582  
Sähköposti: kirjasto@metla.fi

**Painopaikka:**

Vammalan Kirjapaino Oy 2002

# Esipuhe

Tämä liseniaattitutkimus käsittelee yhtä Suomen metsätalouden keskeisimmistä kysymyksistä eli metsän optimaalista kiertoaikaa. Vaikka aihetta on pohdittu Keski-Euroopassa ainakin 250 vuotta ja Suomessakin yli 150 vuotta, siihen liittyy edelleen runsaasti avoimia kysymyksiä. Tämän tutkimuksen tarkoitus on esittää systemaattisesti ja analyttisesti metsän kiertoaikaa koskevat teoriat sekä niiden talousteoreettinen perusta.

Tutkimustyön kuluessa olen saanut arvokkaita neuvoja ja kommentteja useilta eri henkilöiltä. Erityisen suuren kiitoksen ansaitsevat tutkimukseni ohjaajat professori Olli Tahvonen ja professori Jari Kuuluvainen. Heidän lisäksi haluan kiittää professori Markku Ollikaista ja professori Timo Pukkalaa, samoin kuin Ph.D. Anni Huhtalaa, MMM Kari Hyytiäistä, MMM Harri Hännistä, MMT Heimo Karppista, MMM Jussi Leppästä, VTM Jarmo Mikkolaa, FT Pekka Ripattia, MML Yrjö Sevola ja professori Lauri Valstaa käsikirjoitukseen tehdyistä lukuisista arvokkaista parannusehdotuksista. Kiitän lämpimästi myös muita tutkimuksen syntymiseen myötävaikuttaneita henkilöitä, ja toivon tutkimukseni omalta osaltaan edistävän ja selkeyttävän keskustelua metsän optimaalisesta kiertoajasta.

Helsingissä huhtikuussa 2002

Esa-Jussi Viitala

# Sisällys

<b>1. Johdanto</b> .....	<b>7</b>
<b>2. Keskeiset käsitteet: kiertoaika, kestävyys ja normaalimetsä</b> .....	<b>13</b>
<b>3. Varhaiset tutkimukset kiertoajasta</b> .....	<b>16</b>
3.1 Merkantilismin aikakausi .....	16
3.2 Ensimmäiset taloudelliset harvennushakku- ja kiertoaikalaskelmat .....	20
3.3 Reventlow ja metsänkasvatuksen kannattavuus .....	21
3.4 Taloudellisen liberalismien vaikutus kiertoaikalaskelmiin .....	24
3.5 Maankorkoteorian synty Saksassa .....	26
3.6 Kysymys metsämaan arvosta .....	31
<b>4. Kiertoajan erilaiset määrittämisperiaatteet</b> .....	<b>34</b>
4.1 Biologiset kiertoajat .....	35
4.2 Suurimman puuntuotannon kiertoaika .....	35
4.3 Teknilliset kiertoajat.....	37
4.4 Suurimman metsänkoron kiertoaika.....	38
4.5 Yhden kiertoajan malli .....	40
4.6 Maankorkoteoria .....	41
4.6.1 Faustmannin malli .....	41
4.6.2 Preßlerin ratkaisu optimointiongelmaan.....	45
4.6.3 Ohlinin vaihtoehtoinen ratkaisutapa .....	50
4.7 Sisäisen koron menetelmä .....	54
4.8 Rajakannattavuuden periaate .....	55
4.9 Eri kiertoaikaperiaatteiden tulosten vertailu .....	63
<b>5. Maankorkoteorian oletukset</b> .....	<b>65</b>
5.1 Tasaikäinen metsä .....	65
5.2 Täydellinen kilpailu ja ennakkotietämys.....	66
5.3 Täydelliset pääoma- ja maamarkkinat.....	66
5.4 Oletusten realistisuus .....	67
<b>6. Faustmannin mallin komparatiivinen statiikka ja raakapuun tarjonta ....</b>	<b>69</b>
6.1 Samuelsonin ja Hartmanin havainnot .....	69
6.2 Faustmannin mallin komparatiivinen statiikka .....	70
6.3 Faustmannin malli ja raakapuun tarjonta .....	73

<b>7. Faustmannin mallin laajennukset.....</b>	<b>76</b>
7.1 Ei-autonomiset kiertoaikamallit.....	77
7.2 Epävarmuus .....	78
7.2.1 Epävarmuuden mallintaminen.....	79
7.2.2 Suhtautuminen riskiin ja päätöksentekoprosessin luonne .....	82
7.2.3 Epävarmuutta koskevat empiiriset kiertoaikasovellukset .....	84
7.3 Epätäydelliset pääomamarkkinat .....	91
7.3.1 Varhaiset tutkimukset epätäydellisten pääomamarkkinoiden vaikutuksista kiertoaikaan.....	92
7.3.2 Kiertoaika- ja elinkaarimallien yhdistäminen .....	93
7.3.3 Normaalimetsän optimaalisuus .....	95
7.4 Metsän muut kuin puuntuotannolliset hyödyt.....	99
<b>8. Päätelmät .....</b>	<b>103</b>
<b>Kirjallisuus .....</b>	<b>106</b>
<b>Liitteet .....</b>	<b>121</b>
Liite 1. Rajakannattavuuden analyttinen tarkastelu, kun uudistamiskustannukset otetaan huomioon. ....	121
Liite 2. Paljaan maan arvon riippuvuus kantohinnasta $p$ , korosta $r$ ja uudistamiskustannuksista $c$ . ....	127
Liite 3. Hartmanin (1976) malli. ....	128



# I Johdanto

Milloin metsässä kannattaa tehdä päätehakkuu, on yksi metsätalouden keskeisimmistä kysymyksistä, jota on pohdittu jo vuosisatojen ajan. Aiheen tärkeys johtuu siitä, että päätehakkuun edullisin ajankohta – metsän taloudellisesti optimaalinen kiertoaika – vaikuttaa periaatteessa kaikkeen metsänkäsittelyyn ja on siten läheisessä yhteydessä myös metsätalouden harjoittamisen kannattavuuteen, metsämaan arvoon ja raakapuun tarjontaan.

Nykyisen näkemyksen mukaan nuori saksalainen metsänhoitaja Martin Faustmann (1849) muotoili kiertoaikaongelman taloustieteellisessä mielessä oikein jo 150 vuotta sitten. Tästä huolimatta kysymys näyttää edelleen olevan vaikea sekä metsäntutkijoille että taloustieteilijöille. Metsäntutkijat ovat tyypillisesti painottaneet kiertoajan määrittämisessä kestävyuden, tasaisten hakkuiden ja normaalimetsän tavoittelun tärkeyttä. Näkemyksen taustalla on usein ollut metsäteollisuuden oletettu puuntarve tai muuten ”sopivaksi” katsottu puuntuotos ja sen rakenne. Samalla osa metsäntutkijoista on vältellyt korkoa korolle laskelmien käyttöä, koska ne voivat johtaa epärealistisen lyhyiksi koettuihin kiertoaikoihin, negatiivisiin maanarvoihin ja metsänkasvatuksen heikkoon kannattavuuteen. Koron jättäminen pois laskelmista merkitsee kuitenkin sitä, että metsään sidotulla pääomalla ei katsota olevan vaihtoehtoiskustannusta, mikä ei ole talousteoreettisesti perusteltu näkemys.

Taloustieteilijät taas ovat tyypillisesti korostaneet resurssien tehokkaan allokaation ja diskonttauksen merkitystä. Useat maineikkaat ekonomistit ovat kuitenkin erehtyneet selvittäessään puuston edullisinta hakkuuajankohtaa, koska he eivät ole ottaneet huomioon, että metsä on samaan aikaan sekä tuote, tuotantoväline että varasto, ts. metsän arvokasvu on koko ajan sidottu maapohjaan, eikä maa-ala vapaudu uuteen käyttöön ennen päätehakkuuta.

## *Metsät taloustieteellisenä tutkimuskohteena*

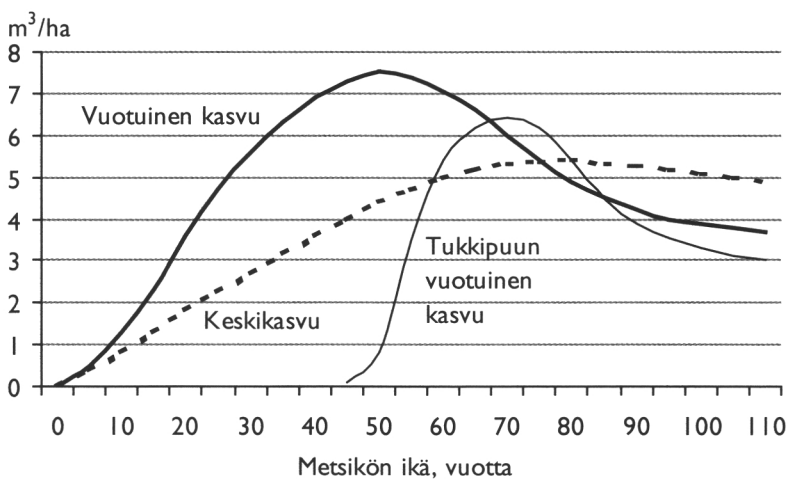
Periaatteessa metsien taloudellisesti optimaalinen hakkuuajankohta voidaan määrittää samalla tavalla kuin muidenkin uusiutuvien luonnonvarojen optimaalinen käyttö. Luonnonvaran sisäistä tuottoastetta verrataan muiden sijoituskohdeiden tuottoon, jota kuvaa korko. Mikäli vaihtoehtoisen sijoituksen korko on suurempi kuin metsästä pääomalle saatava tuotto, puusto kannattaa hakata ja siihen sitoutunut pääoma sijoittaa tuottavampiin kohteisiin. Jos näin ei ole, puustoa kannattaa edelleen kasvattaa.

Puuston kasvuun ja metsävarojen käyttöön liittyy kuitenkin eräitä piirteitä, jotka hankaloittavat taloudellisesti optimaalisen kiertoajan käytännön määrittämistä. Ensinnäkin metsien tuotantokausi on pitkä: Etelä-Suomessa havupuiden päätehakkuuikä on tyypillisesti 70–120 vuotta ja lehtipuiden 50–90 vuotta. Pohjois-Suomessa metsiköiden päätehakkuuikä on vieläkin korkeampia. Pitkän tuotantoajan seurauksena metsäudistamisen jälkeisistä hakkuutuloista pääsevät

monesti hyötymään vasta myöhemmät omistajapolvet, joiden preferenssit voivat poiketa edellisen sukupolven vastaavista. Pitkä tuotantoaika lisää epävarmuutta myös tulevaisuuden kantohinnoista, korosta, metsänkasvatuksen kustannuksista ja muista taloudellisista tekijöistä, joiden arvioiminen on kuitenkin ratkaisevaa määritettäessä edullisinta kiertoaikaa ja kannattavinta metsänkäsittelytapaa ylipäänsä.

Optimaalisen kiertoajan määrittämistä hankaloittaa myös se, että puuston tilavuus- ja arvokasvu vaihtelevat hyvin paljon iän mukaan. Taimivaiheessa vuotuinen (absoluuttinen) tilavuuskasvu on pieni, mutta se suurenee nopeasti puuston vanhetessa. Etelä-Suomessa kuivahkolla kankaalla kasvavassa hoidetussa männikössä absoluuttinen tilavuuskasvu on suurimmillaan puuston ollessa noin 40–60 vuoden ikäinen, minkä jälkeen kasvu alkaa vähitellen hidastua (kuva 1). Samalla arvokkaan tukin osuus puuston tilavuudesta nousee selvästi. Tätä kehitystä yritetään yleensä vielä vauhdittaa harvennushakkuilla, mikä yhdessä muiden metsänkäsittelytoimenpiteiden kanssa edelleen monimutkaistaa optimaalisen kiertoajan määrittämistä.

Mahdollisuus erilaisiin luonnontuhoihin samoin kuin metsien ei-puuntuotannon arvostukset monimutkaistavat taloudellisesti optimaalisen kiertoajan analyysia entisestään. Bioottiset ja abioottiset tuhot ovat merkittävä riskitekijä etenkin metsänuudistamisessa, mutta myös harvennushakkuissa ja päätehakkuuikää lähestyvässä puustossa. Metsään liittyvillä ympäristö- ja tunnearvoilla (biologinen monimuotoisuus, maisema, virkistys, riista, marjat, sienet jne.) taas ei yleensä ole selvää markkinahintaa. Lisäksi ne ovat osin julkishyödykkeitä eivätkä välttämättä riipu metsikön maastossa helposti mitattavissa olevista tun-



Kuva 1. Puuston vuotuinen kasvu, keskikasvu ja tukkipuun vuotuinen kasvu Etelä-Suomen kuivahkon kankaan hoidetussa männikössä (Kuusela 1967).

nuksista, kuten puuston iästä, keskiläpimitasta tai kasvusta. Kuitenkin juuri näiden tunnusten avulla joudutaan yleensä käytännössä määrittämään metsikön uudistuskypsyys.<sup>1</sup>

### *Kiertoaikatutkimus Suomessa*

Suomessa metsän taloudellisesti optimaaliseen kiertoaikaan on kiinnitetty yllättävän vähän huomiota. Sitä ovat pohtineet laajemmin lähinnä P.W. Hannikainen (1885, 1896), A.G. Blomqvist (1893), Bernhard Ericsson (1903, 1906), Toivo Heikkilä (1930) ja Kustaa Kallio (1957). Metsähallituksen ylitirehtööriksi (pääjohtajaksi) kohonneen Hannikaisen ja Evon metsäopiston johtajana lyhyen aikaa toimineen Ericssonin saksalaisiin lähteisiin perustuvat, aikanaan ansiokkaat oppikirjat ovat kuitenkin osin vanhentuneita. Samaa voidaan sanoa Rovaniemen metsäopiston johtajan Heikkilän lähinnä metsänomistajille ja metsäammattilaisille suunnatusta artikkelista *Maa ja Metsä* -kirjasarjassa.

Viimeisin tutkimus, jossa käytiin kattavasti läpi uudistuskypsyyden erilaisia määrittämisperiaatteita, tehtiin maassamme yli 40 vuotta sitten. Nyssösen (1958) muuten perusteellisessa tutkimuksessa kiertoajan erilaiset määrittämisperiaatteet ja niihin liittyvät oletukset esitettiin kuitenkin suppeasti ilman analyytisiä ratkaisuja. Lisäksi tutkimuksessa esitettiin yhdysvaltalaisen esimerkkien johdattamana, että taloudellisesti edullisin kiertoaika tulisi laskea niin sanotun rajakannattavuuden periaatteen pohjalta. Rajakannattavuuteen perustuvan menetelmän vahvuutena pidettiin sitä, ettei siinä tarvitse käyttää korkoa korolle laskentaa, kun kiertoaika lasketaan ns. normaalimetsälle, jossa kaikkia puuston ikäluokkia on yhtä suuri osuus pinta-alasta ja maapohja on homogeenista.

Nyssösen saamat empiiriset tulokset ovat vaikuttaneet merkittävästi Suomessa viimeisten vuosikymmenien aikana annettuihin metsän kiertoaikaa koskeviin ohjeisiin ja suosituksiin, joita on noudatettu yksityismetsien lisäksi valtion ja yhtiöiden metsissä. Esimerkiksi Keskusmetsälautakunta Tapio perusteli 1970-luvulla ohjekiertoaikojaan nimenomaan rajakannattavuudella (Mietola 1975 s. 135, 1976, 1978 s. 150). Rajakannattavuuden laskentamenetelmän perusteella on tehty myös tulkintoja siitä, minkä ikäinen metsikkö voidaan yksityismetsälain (vuodesta 1996 lähtien metsälain) mukaan päätehakata.

Myöhemmin on kuitenkin katsottu, että Nyssösen tutkimuksessa sovellettiin talousteoriaa virheellisesti: metsään sitoutunut pääoma laskettiin väärin (Tahvonon 1999a). Vaikka tällä virheellä ei välttämättä ole kovin suurta vaikutusta

---

<sup>1</sup> Julkishyödykkeillä on kaksi ominaispiirrettä: yhden kuluttajan kulutus ei estä muiden kulutusta, eikä ketään voida sulkea kulutuksen ulkopuolelle. Yleisesti käytetty esimerkki puhtaasta julkishyödykkeestä on majakka. Metsiin liittyviä julkishyödykkeitä ovat mm. jokamiehen oikeus ja kansallispuistot. Niitä ei voida kuitenkaan pitää puhtaina julkishyödykkeinä, koska esimerkiksi suuri kävijämäärä saattaa haitata luonnonrauhasta nauttimista, marjastusta tai metsästystä. Käytännössä julkis- ja yksityishyödykkeiden välinen ero on liukuva. Julkishyödykkeet ovat yksi tärkeä syy markkinoiden epäonnistumiseen (ks. esim. Sandmo 1987).

optimaalista kiertoaikaa koskeviin tuloksiin, kyse on periaatteellisesti merkittävästä asiasta, koska erhettä ei ole sittemmin korjattu Suomen metsäntutkimuksessa. Tosin Kilkki (1985 s. 93) viittasi jo yli 15 vuotta sitten englanninkielisessä oppikirjassaan lyhyesti Metsäntutkimuslaitoksen tutkija Juha Lapilta saamaansa suulliseen tietoon, jonka mukaan Nyysösen esittämä rajakannattavuuden laskentatapa on virheellinen.<sup>2</sup> Kovin laajalti tätä ei ole kuitenkaan ilmeisesti tiedostettu, koska jotkut metsäntutkijatkin käyttivät vielä 1990-luvulla virheellistä rajakannattavuuden laskentatapaan vertaillessaan erilaisten metsänkäsitteilymenetelmien edullisuutta.<sup>3</sup>

Yksi merkittävä seuraus rajakannattavuuden virheellisestä laskentatavasta on ollut se, että koko metsäekonominen ajattelu on osin hämärtynyt Suomessa. On muun muassa syntynyt käsitys, jonka mukaan ei olisi olemassa teoreettisesti yksiselitteistä tapaa määrittää metsän taloudellisesti optimaalinen kiertoaika. Kuvaavaa on, että jotkut metsäntutkijat ovat tulleet puoltaneeksi niin sanotun näyttäjäprosentin (*Weiserprozent*) tai v-arvon (*visareprocent*) käyttöä määritettäessä metsän taloudellisesti optimaalista kiertoaikaa kertomatta selkeästi tai huomauttamatta, että talusteoreettisesti oikein sovellettuna niissäkin käytetään korkoa korolle laskentaa, ja että ne voidaan suoraan johtaa Faustmannin mallista.

Epäselvyys edullisimman kiertoajan laskentatavasta ja perusteista johtunee osin siitä, että Ericssonin oppikirjojen jälkeen Suomessa on tehty vain yksi tutkimus, jossa on käyty analyttisesti läpi erilaisia tapoja määrittää metsän taloudellisesti optimaalinen kiertoaika. Ollikaisen (1984) katsauksessakin metsän kiertoajan osuus jäi suhteellisen suppeaksi, koska hän keskittyi tarkastelemaan uusiutuvien ja uusiutumattomien luonnonvarojen taloudellisesti optimaalisen käytön yleisiä periaatteita. Kyseistä luonnonvarataloustieteellisessä mielessä ansiokasta katsausta voidaan pitää nykyään riittämättömänä myös siksi, että siinä ei käsitelty käytännössä lainkaan epävarmuuden, epätäydellisten pääomamarkkinoiden tai metsien muiden kuin puuntuotannollisten hyötyjen vaikutusta optimaaliseen kiertoaikaan. Tämä ei tuohon aikaan ollut oikeastaan mahdollista-

---

<sup>2</sup> Kilkki (1985 s. 92–93) vertaa Faustmannin kaavaa (*single stand approach*) Nyysösen malliin (*traditional use of the fully regulated forest model*) ja toteaa: "Considering the decreasing role of the traditional planning models and the increasing importance of logging costs, it seems appropriate to use only the single stand approach whenever traditional planning models are needed. This choice also has the merit that the methodology is exactly the same as in general investment calculations. Theoretically, the traditional use of the fully regulated forest model is incorrect. Only if the fully regulated model is constructed with an eye to the maximisation of the net present value of the future revenues, it yields correct results, i.e. the same results as the Faustmann formula. Then no gains in the form of more simple calculations are achieved (Personal communication from Juha Lappi)."

<sup>3</sup> "Puuston hakkuukypsyttä arvioitiin vertaamalla puuston ikää ja järeyttä Tapion metsänhoitosuositukseen (Kml. Tapio 1989). Tämän lisäksi käsitteilyjä verrattiin toisiinsa laskemalla metsiköille kasvattamisen rajakannattavuus. ... Nyysösen (1958) esittämällä menetelmällä koemetsiköille laskettiin myös puuston kasvatuksen/uudistamisen edullisuutta kuvaava rajakannattavuus." (Mielikäinen ja Valkonen 1991 s. 16, 18)

kaan, koska suurin osa näistä Faustmannin mallin tärkeistä yleistyksistä on tehty vasta viimeisen 15 vuoden kuluessa.

Suomessa vallinnutta metsäekonomista ajattelua on epäilemättä ollut omiaan hämärtämään myös se, että Ericssonin 1900-alussa ilmestyneiden teosten jälkeen maassamme julkaistuissa metsänarvioimistieteen ja metsäekonomian oppikirjoissa metsän taloudellisesti optimaalista kiertoaikaa on käsitelty huomiota herättävän yleisellä tasolla ilman analyttisiä ratkaisuja tai perusteluja (Ilvessalo 1965, Holopainen 1976, Vuokila 1980, 1987, Poso 1990, 1994, 1997, Pukkala 1994). Näin siitä huolimatta, että kiertoaikapäätös on kytköksissä kaikkeen muuhunkin metsänkäsitelyyn: metsikön perustamistapaan ja -tiheyteen, taimikonhoitoon, harvennushakkuiden lukumäärään, voimakkuuteen, ajoitukseen ja tapaan sekä sekapuuston määrään, pystykarsintaan, lannoitukseen, ojitukseen jne.

Kiertoaikaa koskevat virheelliset käsitykset eivät toisaalta ole estäneet sitä, että Suomessa metsän uudistuskypsyys on määritelty puulajeittain ja kasvupaikoittain hyvinkin tarkkaan erilaisissa metsänkäsitelyohjeissa ja -suosituksissa viimeisen 30 vuoden aikana. Näiden metsänkäsitelynormeiksi muodostuneiden ohjeiden taloudelliset perusteet ovat kuitenkin jääneet epäselviksi, koska niitä ei ole oikeastaan koskaan kunnolla julkisesti perusteltu tai kyseenalaistettu.

Vielä nykyäänkin uudistuskypsyyttä koskevien suositusten perusteluksi näyttää riittävän ”hyvä metsänhoito”, ”puuntuotannollinen ja taloudellinen tarkoituksenmukaisuus”, ”järkevyys” tai mahdollisimman suuret puunmyyntitulot (Hyvän metsänhoidon... 2001). Suositusten kerrotaan perustuvan tutkimustietoon, käytännön kokemukseen ja nykynäkemykseen hyvästä metsänhoidosta, mikä on ainakin kiertoaikojen kohdalla hämmentävää, kun otetaan huomioon viimeisen kahden vuosikymmenen aikana tehtyjen tutkimusten tulokset. Ne viittaavat siihen, että nykyiset uudistuskypsyyttä koskevat metsänhoitosuositukset ja metsälain valvontaohjeet (maa- ja metsätalousministeriön päätökset) eivät välttämättä johda edullisimpaan taloudelliseen tulokseen metsänomistajan kannalta (Valsta 1982, 1986, 1992a, 1993, 1997, Pesonen ja Hirvelä 1992a, b, Salminen 1993, Miina 1996, Vettenranta ja Miina 1999, Hyytiäinen ja Tahvonen 2001a, b, c).

### *Tutkimuksen tarkoitus*

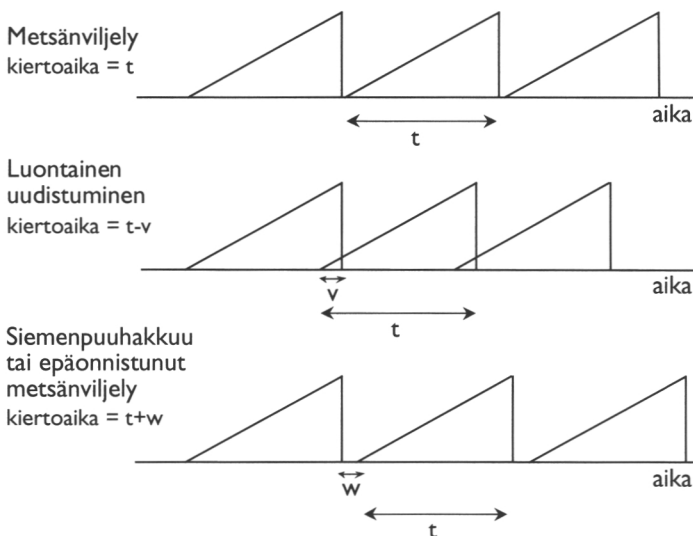
Tämän tutkimuksen tavoitteena on luoda kattava ja systemaattinen kokonaiskuva siitä, millaisten teorioiden pohjalta metsävarojen optimaalista käyttöä voidaan lähestyä. Erityisen tarkkaan selvitetään, miten metsän kiertoajan erilaiset määrittämisperiaatteet ovat historiallisesti syntyneet ja kehittyneet, sekä millaisia talusteoreettisia perusteita ja oletuksia niiden taustalla on. Lisäksi johdetaan rajakannattavuuden periaatetta hyväksi käyttäen talusteoreettisesti validi tapa laskea normaalimetsän optimaalinen kiertoaika ja osoitetaan sen vastaavan Faustmannin mallia.

Tutkimus etenee siten, että aluksi selvitetään, miten metsän kiertoaika liittyy kahteen muuhun metsätalouden järjestelyn keskeiseen käsitteeseen, kestävyyteen ja normaalimetsään. Tämän jälkeen tarkastellaan varhaisia kiertoaikatutkimuksia, esitetään analyyttisesti erilaiset kiertoajan määrittämisperiaatteet ja vertaillaan niiden antamia tuloksia toisiinsa. Erityisen seikkaperäisesti selvitetään, miten metsän taloudellisesti optimaalisen kiertoajan laskentatapa eli Faustmannin malli syntyi, mitä oletuksia se sisältää ja millaisia komparatiivis-staattisia sekä pitkän ja lyhyen aikavälin puuntarjontaa koskevia tuloksia siitä voidaan johtaa. Tämän jälkeen selvitetään, miten Faustmannin mallia on viime vuosina yleistetty ottamalla huomioon muun muassa kantohintoihin ja puuston kasvuun liittyvä epävarmuus, luonnontuhojen mahdollisuus, epätäydelliset pääomamarkkinat ja metsien muut kuin puuntuotannolliset hyödyt. Lopuksi pohditaan, millaisia ongelmia, rajoituksia ja tutkimustarpeita Faustmannin mallin käytännön soveltamiseen liittyy.

## 2 Keskeiset käsitteet: kiertoaika, kestävyys ja normaalimetsä

Metsän kiertoajalla (*Umtriebszeit*, *rotation period*, *rotation cycle*, *rotation age*, *rotation length*) on kaksi yleisesti käytettyä määritelmää. Toisinaan kiertoajalla tarkoitetaan tasaikäisessä metsässä sitä ajanjaksoa, joka kuluu metsikön perustamisesta sen päätehakkaukseen (esim. Ericsson 1903 s. 130, Heikkilä 1930 s. 764, Kallio 1957 s. 104, Lihtonen 1959, Kuusela 1964, Vuokila 1980 s. 26), toisinaan taas kahden päätehakuun välistä aikaa (esim. Petrini 1946 s. 16, Stridsberg 1956 s. 2–6, Dickson 1956 s. 7–8, Pukkala 1994 s. 27, Poso 1997 s. 32, Nyssönen 1999). Jälkimmäistä määritelmää voidaan ehkä pitää metsänkasvatusta koskevien taloudellisten analyysien kannalta täsmällisempänä, koska tällöin tullaan suoraan ottaneeksi huomioon mahdolliset uudistamisviiveet.

Kiertoajan pituus riippuu osin metsän uudistamismenetelmästä. Jos metsikkö avohakataan ja ala kylvetään heti tai istutetaan parin vuoden aikana yksi- tai kaksivuotisilla taimilla, kiertoaika on käytännössä sama kuin metsikön ikä päätehakuun hetkellä (kuva 2). Vastaavasti mikäli taimikko on syntynyt esimerkiksi väljennyshakkuiden ansiosta luontaisesti jo edellisen puusukupolven alle, kiertoaika on taimien iän ( $v$ ) verran metsikön päätehakuuikää lyhyempi. Kolmannessa vaihtoehdossa luontainen taimiaines syntyy vasta siemenpuuhakuun jälkeen tai metsänviljely epäonnistuu taikka viivästyy, minkä seurauksena kiertoaika on viivästymisen ( $w$ ) verran puuston päätehakuuikää pitempi.



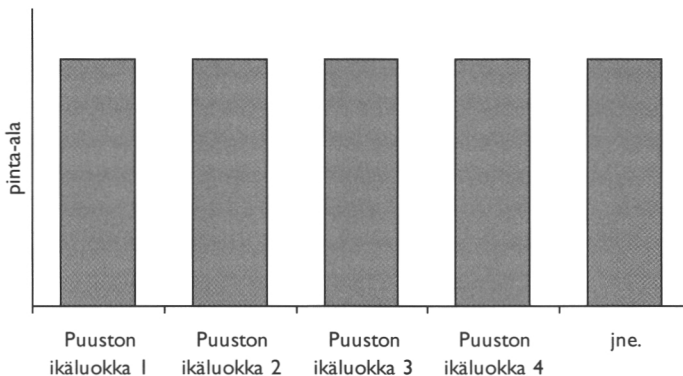
Kuva 2. Kiertoajan pituuden riippuvuus metsikön syntytavasta.

## Kestävyys, tasaisuus ja normaalimetsä

Kiertoaika liittyy läheisesti toiseen metsien käytön keskeiseen käsitteeseen eli kestävyteen (*Nachhaltigkeit, sustainability*).<sup>4</sup> Se esiintyi ensimmäisen kerran tiettävästi luostarimetsien hoidossa 1100-luvulla Saksassa (Ericsson 1903 s. 1–2). Kestävyuden avulla oli tarkoitus turvata rakennus- ja polttopuun sekä puuhii- len saanti kyläyhteisöjen päivittäisiin tarpeisiin. Omavaraisuus ja metsävarojen tasainen käyttö oli suotavaa, koska kaupankäynti oli tuohon aikaan vielä vähäis- tä ja yhteiskunnalliset olot epävarmoja.

Tasaisuus puolestaan liittyy kiinteästi normaalimetsän (*Normalwald, fully re- gulated forest, synchronized forest*) käsitteeseen. Normaalimetsä koostuu useista pinta-alaltaan samansuuruisista metsiköistä siten, että kullakin kasvaa yksi tasa- ikäinen puuston ikäluokka (kuva 3). Joka vuosi hakataan vanhin metsikkö, ja seuraavana vuonna toiseksi vanhin metsikkö saavuttaa uudistuskypsyyden ja joutuu hakattavaksi. Näin jatkuu ikuisesti, joten puun ja metsän muiden hyödyk- keiden tuotanto on vakio ja puuston ikärakenne säilyy vuodesta toiseen muuttu- mattomana. Ensimmäisen kerran normaalimetsän käsite tiettävästi esiintyi itä- valtalaisessa metsäohjesäännössä vuonna 1788 (Ericsson 1903 s. 150).

Normaalimetsää on perinteisesti pidetty metsätalouden ihannelatana. Sen ta- voittelun edullisuus perustuu kuitenkin varsin vahvoille oletuksille: maapohja on homogeenista, kaikki puuston ikäluokat kehittyvät vuosien kuluessa samalla tavalla ja päätöksentekijän tarpeet säilyvät vuodesta toiseen muuttumattomina. Jos näin ei ole, metsän jakaminen yhtä suuriin puuston ikäluokkiin pinta-alan perusteella ei johdakaan parhaaseen mahdolliseen tulokseen. Koska täydellistä



Kuva 3. Perinteinen käsitys normaalimetsästä.

<sup>4</sup> Kestävyydelle on esitetty lukuisia määritelmiä. Saksalaisen Friedrich Judeichin (1904) esittämän klassisen mutta väljän määritelmän mukaan metsätalous on kestävä, jos metsä- maa säilyy jatkuvasti metsää kasvavana.

normaalimetsää on käytännössä vaikea saavuttaa, Suomen metsätieteessä ”riittävää” normaalitilan astetta ryhdyttiin metsänarvioimistieteen professorin Erik Lönnrothin (1930) aloitteesta kutsumaan *reaalinormaalimetsäksi*.

Suomessa (reaali)normaalimetsä on ollut keskeinen tavoite jo yli 100 vuotta laskettaessa erilaisia hakkuusuunnitteita. Kun puuntuotannon kohottaminen nousi toisen maailmansodan jälkeen entistäkin tärkeämmäksi tavoitteeksi metsäpolitiikassa, staattisena pidetyn normaalimetsän rinnalle kehitettiin edistyvän metsätalouden hengessä uusi käsite, *tavoitemetsä*. Käytännössä tällä tarkoitettiin sitä, että normaalimetsän tilasta voitiin väliaikaisesti poiketa, jotta vajaatuottoisiksi katsotut alueet saatiin nopeasti uudistettua, puulajisuhteet muutettua taloudellisesti edulliseksi, suot ojitettua ja yleistyvät harvennushakkuut tehtyä.

Nykyisissä hakkuulaskelmissa normaalimetsän käsitettä ei enää yleensä suoraan mainita, mutta (puuntuotannon) kestävyydellä, tasaisuudella ja puuston eri kehitysluokkien tavoitepinta-alaosuuksilla tarkoitetaan käytännössä samaa asiaa. Normaalimetsään pyrkiminen on ollut vuosikymmeniä eräänlainen kirjoittamaton sääntö myös tilakohtaisessa metsäsuunnittelussa, joissa on tyypillisesti pyritty tasaisiin hakkuisiin. Tätä on kutsuttu ”tilakohtaiseksi kestävyudeksi”. Vielä nykyäänkin tilakohtaisissa metsäsuunnitelmissa keskeiseksi tavoitteeksi mainitaan tasaiset hakkuut.<sup>5</sup>

On kuitenkin selvää, ettei tasaisten hakkuiden tavoittelu ole välttämättä kannattavaa metsänomistajalle, jos hän joutuu vastapainoksi poikkeamaan metsiköiden (Faustmannin kaavalla lasketuista) taloudellisesti optimaalisista kiertoajoista. Niissäkin tilanteissa, joissa normaalimetsän tavoittelua voidaan pitää taloudellisesti perusteltuna, on syytä kysyä, miten nopeasti normaalimetsään tulisi pyrkiä, jos metsän ikäluokkajakautta ei ole alunperin tasainen. Tähän metsän kiertoajan kannalta keskeiseen kysymykseen palataan Faustmannin mallin laajennusten yhteydessä.

---

<sup>5</sup> ”Jotta puuntuotanto ja hakkuutulosten saanti olisi jatkuvasti mahdollisimman tasaista, metsässä tulisi olla eri kehitysluokkia suunnilleen saman verran. Metsäsuunnitelman laskennassa kehitysluokkien tavoitepinta-alaosuuksiin ovat vaikuttaneet metsälön maantieteellinen sijainti sekä eri kasvupaikkojen ja puulajien osuudet. Mikäli metsänomistaja ei ole esittänyt muita tavoitteita, suunnittelija pyrkii toimenpide-ehdotuksilla ohjaamaan kehitysluokkien jakaumaa niin, että hakkuumahdollisuuksia on tasaisesti” (Metsäsuunnitelma 2000).

## 3 Varhaiset tutkimukset kiertoajasta

### 3.1 Merkantilismin aikakausi

Metsävarojen käyttöä ryhdyttiin säätelemään todennäköisesti silloin, kun metsien väheneminen asutuksen lähistöltä alkoi aiheuttaa ongelmia kuljetusmatkojen pitenemisenä. Saksalaisessa Mauermünsterin luostarissa metsien käyttöä rajoitettiin jo 1100-luvulla ja Venetsian tasavallassa 1500-luvulla (Ericsson 1903 s. 1).

Myös 1300-luvulta lähtien julkaistuissa saksalaisissa metsäsäännöissä (*Forstordnung, Weisthum*) oli monenlaisia, osin hyvinkin seikkaperäisiä käytännön neuvoja metsänkäytöstä (Cajander 1909, Endres 1922, Laitakari 1923, Weber 1926, Mantel 1964). Pienintäkään hakkuuta ei yleensä saanut tehdä ilman asianomaisten metsävirkamiesten suostumusta. Määräykset koskivat periaatteessa kaikkia metsiä, mutta erityisen tiukasti haluttiin suojella laivanrakennukselle tärkeitä mastopuita. Säädöillä oli kuitenkin paljon etuoikeuksia – määräysten ensisijainen tarkoitus olikin suojella vallanpitäjien metsästysmaita.

Varhaisia yksityiskohtaisia mainintoja metsän kiertoajasta löytyy Saksin vaaliruhtinaskunnan vuoritoimen johtajan Hanss Carl von Carlowitzin (1645–1714) vuonna 1713 julkaisemasta teoksesta *Sylvicultura Oeconomica*. Siinä käsiteltiin metsätaloutta tietävästi ensimmäistä kertaa itsenäisenä, maanviljelyksestä ja metsästyksestä erotettuna taloutena. Carlowitz varoitti suuren puunkulutuksen ja metsien uudistamisen laiminlyöntien johtavan puupulaan ja viittasi vanhaan roomalaiseen lakiin, jonka mukaan nuorta metsää ei saa hakata niin, että sen antama hyöty alenee (Huuri ym. 1989 s. 60).

Carlowitzin mukaan metsäviranomaisen ja tilanomistaja joutuivat yleensä harkitsemaan, kumpi oli edullisempaa, ylispuiden vaiko vesakon kasvatus. Hyvä vaihtoehto oli esimerkiksi kasvattaa kymmenes- tai viidesosalla tilan metsistä järeitä runkoja, ja varata muu ala vesametsien kasvattamiseen. Polttopuuta, viinitarhasalkoja ja aidanseipäitä tuottavan vesapuuston kiertoaika oli 10, 15 tai 20 vuotta, mutta ylispuuta kannatti kasvattaa, kunnes niistä saatiin arvokasta laivanrakennuspuuta, tynnyrilautaa tai vahvaa rakennuspuuta. Ylispuu oli hakkuukypsä, kun se ei enää kasvanut, vaan pikemminkin pieneni tai ”tuli sisältä ontoksi”.

Myös muissa Keski-Euroopan valtioissa oli keskiajan jälkeen voimassa metsänkäyttöön liittyviä tiukkoja rajoituksia. Esimerkiksi Ranskassa määrättiin vuonna 1536, etteivät yksityiset maanomistajat saaneet hakata vesametsiään ennen 10:tä ikävuotta. Kun aurinkokuningas Ludvig XIV nousi valtaan vuonna 1661, hän nimitti merkantilistisen talouspolitiikan kannattajaksi tiedetyn Jean Babtiste Colbertin pääministerikseen.<sup>6</sup> Kahdeksan vuoden huolellisen valmiste-

---

<sup>6</sup> Valtioiden kehittymisen myötä 1600-luvulla tarvittiin yhä enemmän virkamiehiä hoitamaan sisä-, puolustus-, ulko- ja kauppapolitiikkaa sekä valtion raha-asioita. Englannissa ja Hollannissa makrotaloudellisia kysymyksiä ryhtyi pohtimaan ennen muuta varakas kaup-

lun ja lukuisten selvitysten jälkeen maahan säädettiin Colbertin johdolla uusi metsälaki (*Ordonnance sur le fait des forêts*), jonka on katsottu luoneen perustan kaikille sen jälkeenkin laadituille metsälaeille. Metsiä koskevia omistusoikeuksia tarkennettiin, mutta itse metsänkäsittelymenetelmien valinta jätettiin omistajien itsensä päätettäväksi. Vuotta ennen lain voimaantuloa korkea hallintovirkamies ja myöhempi Toulousen alueen ylimetsänhoitaja Louis de Froidour ehdotti, että uusien säädösten tulisi joustavasti sallia kiertoajan vaihtelu metsikön maantieteellisen sijainnin ja puuston kasvun mukaan (Mantel 1964).

Käytännössä joustavuus jäi kuitenkin useiden yksityiskohtaisten säädösten varjoon. Yksityisten maanomistajien tuli vesametsien kasvatuksessa käyttää edelleen vähintään 10 vuoden kiertoaikaa, ylispuita piti jättää hehtaarille 32 kappaletta eikä niitä saanut kaataa ennen 40 vuoden ikää. Lisäksi siemenpuuston kohdalla oli noudatettava 120 vuoden pituista kiertoaikaa (Laitakari 1923 s. 35–36). Lain valvonta oli tarkkaa ja metsävirkamiehillä tuomiovalta metsiä koskevissa asioissa, mikä sitten koitui vahingoksi, kun he alkoivat käyttää asemaansa väärin, ottaa lahjuksia ja harjoittaa mielivaltaisuutta (Laitakari 1923 s. 39, 1928). Tästä huolimatta Colbertin johdolla laadittu metsälaki oli lähes muuttumattomana voimassa 120 vuotta eli Ranskan vallankumoukseen asti.

### *Ensimmäiset varsinaiset metsänjako-opit*

Kestävyyden, tasaisuuden ja normaalimetsän ajatusten pohjalta syntyivät Saksassa ja Ranskassa 1600- ja 1700-luvulla ensimmäiset varsinaiset metsänjako-opit. Niiden mukaan joka vuosi tuli hakata vain tietty, ennalta määrätty osuus metsistä. Esimerkiksi metsäasioista ja erityisesti tammen kasvatuksesta kiinnostunut Preussin pitkäaikainen ja uudistusmielinen kuningas Fredrik Suuri (1712–1786) määräsi heti valtaan noustuaan vuonna 1740, että valtionmetsissä oli noudatettava normaalimetsätalouden tiukinta muotoa eli ns. vuosilohkomenetelmä. Siinä koko metsäalue jaettiin kiertoajan määräämiin, pinta-alaltaan yhtä suuriin lohkoihin. Jos kiertoaika oli esimerkiksi 100 vuotta, niin myös lohkoja oli 100 kappaletta. Niistä hakattiin vuosittain yksi.

Frederik Suuri täsmensi käskyään vuonna 1770 määräämällä, että kiertoajan tuli olla 70 vuotta (Ericsson 1906 s. 16, Fernow 1911 s. 72, Schwappach 1927 s. 73). Metsänjärjestelyä toteuttavat virkamiehet pitivät tätä kuitenkin liian lyhyenä aikana, minkä vuoksi he jakoivat jokaisen vuosilohkon vielä kahteen

---

piasluokka, joka oli kiinnostunut tuottavien kauppareittiensä ja monopolioikeuksiansa turvaamisesta. Se korosti omien kaupallisten etujensa ja valtion edun yhteneväisyyttä; tästä nimitys merkantilismi (*mercantile*=kaupallinen). Merkantilistit uskoivat, että talous- ja kaupapolitiikan tavoitteena tulee olla maan kulta- ja hopeavarojen lisääminen. Ranskassa ja Saksassa kauppiassääty ei ollut yhtä merkittävä, vaan talousoppeja pohtivat lähinnä valtion virkamiehet. Ranskalaista merkantilismia kutsutaankin monesti *colbertismiksi* (yli 20 vuotta pääministerinä toimineen Colbertin mukaan) ja saksalaista *kameralismiksi*. Saksankielinen nimitys juontaa siitä, että pienten ruhtinaskuntien toimintaa ohjattiin hallitsijoiden palatseista tai huoneistoista (*Kammer*) (Tribe 1984).

”työlohkoon”. Näin kuninkaan määräämä kiertoaika käytännössä kaksinkertais-tettiin. Virkamiesten menettely saattoi johtua siitä, että ennen Frederik Suuren valtaannousua yksityismetsien käsittely oli Preussissa huomattavasti vapaampaa kuin monissa muissa Saksan valtioissa, esimerkiksi Baijerissa tai Württembergissa. Metsän hävitys oli toki Preussissakin kielletty vuonna 1670 ja metsän epätaloudellinen käsittelykin vuonna 1720, mutta molemmat määräykset olivat löyhiä. Niiden tavoitteena oli lähinnä suojella kuninkaiden ja aateliston metsästysmaita sekä kaivosteollisuuden etuja (Fernow 1911 s. 55).

Myöhemmin metsänjako-oppeja kehittivät etenkin saksalaiset metsätieteen klassikot Georg Ludwig Hartig ja Heinrich von Cotta (Ericsson 1903 s. 2, 1906 s. 14–51, Martin 1910). Käytännössä he jakoivat metsän joko pinta-alan (*Flächenfachwerk*), puumäärän (*Massenfachwerk*) tai molempien (*kombinierte Fachwerk*) perusteella yhtä suuriin osiin. Metsien häviämisen estämiseksi laadittiin 1700-luvun lopulla myös ensimmäiset normaalimetsään pohjautuvat hakkuulaskelmat Itävallassa niin sanotulla kameraalitaksamenetelmällä. Siihen pohjautuvat myös Suomessa nykyisin laskettavat ”suurimmat kestävät hakkuusuunnitteet”.

Kaikkiaan voidaan sanoa, että ensimmäiset metsänjako-opit heijastelivat aikakautta, jolloin omavaraisuus oli keskeinen tavoite pieniin valtioihin pilkkoutuneessa Keski-Euroopassa. Metsäviranomaisilla oli lähes puolisoilaallinen asema hallitsijoiden toisinaan hyvinkin yksityiskohtaisten määräysten valvojana ja tasaisen puunsaannin varmistajana. Puupulan pelossa ryhdyttiin tekemään laskelmia kestävästä puuntuotannosta, mutta metsien kiertoaikaa koskeviin taloudellisiin laskelmiin suhtauduttiin epäillen, koska niiden uskottiin johtavan metsien hävitykseen.

### *Kiertoaikalaskelmat Ranskassa*

Colbertin luoma tiukka merkantilistinen järjestelmä, jonka perimmäinen tarkoitus oli turvata laivanrakennuspuun saanti kotimaasta, oli Ranskassa voimassa vuoteen 1789 asti. Kysymys metsän kiertoajasta alkoi kuitenkin kiinnostaa ranskalaisia tiedemiehiä jo tätä ennen – etenkin sen jälkeen, kun fysiokraattiset opit alkoivat 1700-luvun puolivälin jälkeen vähitellen syrjäyttää merkantilistiset ajatukset. Päinvastoin kuin merkantilistit, fysiokraatit vastustivat valtion puuttumista talouselämään, koska siinä vallitsivat heidän mukaansa parhaat mahdolliset luonnonlait (*orde nature*).<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> Fysiokraattien mukaan julkisen vallan tuli luoda vain puitteet markkinoiden toiminnalle, ei puuttua yksityiskohtaisesti niiden toimintaan (*laissez-faire*). He esittivät ensimmäisinä systemaattisen, joskin vallinaisen kuvan koko talouselämän kiertokulusta. Fysiokraattien johtohahmo oli kuningas Ludvig XV:n henkiläläkäri François Quesnay (1694–1774), jonka mukaan tulot kiertävät kansantaloudessa kuten veri ihmiskehossa. Nimityksen fysiokratia (luonnon laki) keksi oppisuunnan toinen johtohahmo, Pierre-Samuel Dupont de Nemours (1739–1817). Fysiokraatteja kutsuttiin aikanaan yleisesti myös termillä *les économistes*.

Vuonna 1721 kuuluisa luonnontieteilijä, Ranskan Tiedeakatemiaan jäseneksi vain 25-vuotiaana valittu René-Antoine Ferchault de Réaumur (1683–1757) epäili raportissaan *Réflexions sur l'état des bois du Royaume...*, että metsien kasvattaminen liian vanhoiksi aiheuttaa taloudellista tappiota (Endres 1911 s. 25, 183, Fernow 1911 s. 77, 245, Weber 1926 s. 48–51, Schüpfer 1927 s. 347, Schwappach 1927 s. 53). Tämä monipuolinen tiedemies, joka keksi muun muassa teräksen valmistuksen ja alkoholilla toimivan lämpömittarin, mutta joka oli ennen kaikkea hyönteistieteilijä, vaati, että vesametsien kiertoaika oli määrättävä kokeellisesti. Näin saataisiin selville kasvutaulukoiden avulla, miten suuri määrä puuta oli mahdollista tuottaa.

Taloudellisiin näkökohtiin kiinnitti huomiota myös lämpösumman käsitteen kehittänyt tunnettu ranskalainen luonnontieteilijä Georges Louis Leclerc (1707–1788) vuonna 1741 julkaistussa teoksessaan *Mémoires sur la conservation et le rétablissement des forêts*. Buffonin kreivinä tunnetun Leclercin mielestä metsänkasvatuksen päämääränä oli pyrkiä mahdollisimman suureen puumäärään. Tämän matemaattisesti lahjakkaan, Isaac Newtoninkin kirjoja ranskaksi kääntäneen, mutta aikanaan varsin ristiriitaisia tunteita herättäneen kuninkaan puutarhan intendentin kanta saattoi johtua siitä, että hän teki selvityksiään osin Ranskan merenkulkuministeriön tilauksesta. Paljon matkustellut tiedemies teki myös itse puunkasvatusta koskevia kokeita maatilallaan Burgundissa.

Leclercin aikalainen ja kollega Ranskan Tiedeakatemiassa, Henri Louis Duhamel du Monceau (1700–1788), sen sijaan kannatti metsän kaatamista silloin, kun sen rahallinen keskituotto (metsänkorko) oli suurin vuonna 1764 julkaisemassaan kirjassa *De l'Exploitation des Bois*. Tämän ennen muuta kasvifysiologiasta kiinnostuneen laivastotarkastajan teoksilla oli tiettävästi merkittävä vaikutus saksalaisten metsäkameralistien ajatteluun. Du Monceau lienee myös ollut ensimmäinen, joka mittasi puun rungon tilavuutta ottaen lähtökohdaksi katkaisu-  
tun parabelin (Schwappach 1927 s. 80, 83).

Raportissaan Ranskan Tiedeakatemialle maan metsätieteen neljäs merkkihenkilö, alunperin lakimiehen koulutuksen saanut Philibert Charles Marie Varenne de Fenille asettui kannattamaan du Monceaun näkemystä rahallisen keskituoton tavoittelusta. De Fenille teki myös metsien kasvatusta koskevia yksinkertaisia taloudellisia laskelmia vuonna 1792, kahta vuotta ennen giljotiiniin joutumistaan, sekä kehitti ideaa harvennushakkuista samoihin aikoihin kuin Hartig (Jean-Luc Peyron, suull. 5.10.1999, Peyron 2000).

Fysiokraattien vaikutusvalta oli suurimmillaan Ranskassa 1700-luvun lopulla. Heidän suosituksistaan Ludvig XVI:n valtionvarainministerit, alunperin sveitsiläinen pankkiiri Jacques Necker ja hänen seuraajansa Charles Alexandre de Calonne, pyrkivät 1780-luvulla lyhentämään metsätaloudessa käytettyjä kiertoaikoja (Mantel 1964). Sen sijaan Saksassa fysiokraattien vapaata kilpailua korostavilla opeilla ei ollut yhtä suurta merkitystä. Tämä oli metsätieteen kehityksen kannalta tärkeä ero, koska vuoden 1789 vallankumouksen seurauksena metsätieteiden kehittäminen hiipui Ranskassa ja jäi saksalaisten kameralistien har-

teille. Heillä oli laajan juridisen, hallinnollisen ja osin myös taloudellisen koulutuksensa takia sekä arvostetun asemansa puolesta tilaisuus luoda systemaattinen järjestelmä metsätalouteen, ja sen he myös Hartigin ja Cottan johdolla tekivät. Näiden metsätieteen kahden merkkihenkilön suurimpana ansiona on pidetty sitä, että he yhdistivät siihenastisen metsätalouden koulutuksen ja käytännön välittämän empiirisen tiedon yliopistojen luonnontieteellisiin ja kameralistisiin periaatteisiin. Samalla he loivat vahvan teoreettis-käytännöllisen perustan metsätieteiden nousulle Saksassa (Cajander 1909, Mantel 1964, Palo 1979 s. 98).

### 3.2 Ensimmäiset taloudelliset harvennushakkuu- ja kiertoaikalaskelmat

Harvennushakkuut aiheuttivat paljon kiistaa 1700-luvulla Saksassa, kun useat korkeat metsävirkamiehet asettuivat vastustamaan niitä. Hessenin valtionmetsäorganisaation johtaja von Berlepsch oli ehkä ensimmäinen, joka oivalsi harvennushakkuiden yleisen taloudellisen merkityksen. Vuonna 1761 hän perusteli niiden järkevyyttä nimenomaan aikaisin saatavilla tuloilla ja jäljelle jäävän puuston arvonnousulla (Fernow 1911 s. 67).

Kolme vuotta tämän jälkeen saksalainen ylimetsänhoitaja Hans Dietrich von Zanthier (1717–1778) suositteli teoksessaan *Kurzer systematischer Grundriss der praktischen Forstwissenschaft*, että kiertoajan kuluessa kannatti tehdä kaksi harvennushakkuuta. Ensimmäinen hakkuu tuli tehdä havumetsissä puuston ollessa 30–40 vuoden ja toinen sen ollessa 50 vuoden ikäistä. Lehtimetsissä harvennukset tuli tehdä hieman myöhemmin: ensin 45-vuotiaana ja uudestaan puuston ollessa 80–90 vuoden ikäistä. Ensimmäisen metsätalousovetukseen keskittyneen koulun (*Meisterschule*) Harz-vuoristoon perustanut von Zanthier teki tiettävästi myös ensimmäiset käyttökelpoiset taloudelliset laskelmat erilaisilla kiertoajoilla ja puulajeilla vuonna 1764 (Endres 1911 s. 183, Thomson 1942 s. 22, Speidel 1967 s. 18). Niissä hän vertaili pyökin erilaisten kiertoaikojen edullisuutta ja laski prolongointia käyttäen, millainen korko saadaan kasvatettaessa tammetsä, pyökki ja kuuset 200 vuoden ikäisiksi. Hän esitti myös ensimmäiset rahatuottotaulukot (*Geldertragstafeln*).

Vuonna 1765 weimarilainen metsänhoitaja Karl Christoph Oettelt (1730–1802), jota Cajander (1909) piti ”metsämatematiikan” perustajana, perusteli harvennushakkuuta niinkään taloudellisella edullisuudella, ja samana vuonna tuntematon kirjoittaja pohti saksalaisessa metsälehdessä (*Allgemeines oekonomisches Forstmagazin*) metsätaloudellisissa laskelmissa käytettävää korkoa. Hän tuli siihen johtopäätökseen, että tuon ajan markkinakorko, neljä prosenttia, oli tähän tarkoitukseen liian korkea (Roth 1926 s. 8). Kymmenen vuotta Oetteltin jälkeen saksalainen metsänhoitaja Leubert kirjoitti, että harvennusten avulla oli mahdollista myös lyhentää kiertoaikaa (Fernow 1911 s. 68).

### 3.3 Reventlow ja metsänkasvatuksen kannattavuus

Pohjoismaissa metsän taloudellisesti optimaaliseen kiertoaikaan kiinnitti huomiota ehkä ensimmäisenä Tanskan maatalouden uudistaja ja metsätieteiden uranuurtaja, kreivi Christian Ditlev Frederik Reventlow (1748–1829). Hän päätyi liberalististen ajatusten tahdittamana suositteluun metsien voimakkaita harvennuksia nimenomaan sen takia, että näin metsätuloja saadaan aikaisin ja metsänkasvatukselle saadaan parempi korko (Grøn 1931 s. 491, 1943 s. 85, Helles ja Linddal 1997). Tässä suhteessa hän oli selvästi eri linjoilla kuin esimerkiksi Hartig, jonka suosittelmia menetelmiä hän arvostelikin voimakkaasti.

Reventlowin aikaan Tanskan metsät olivat heikossa kunnossa epämääräisten hakkuiden, uudistamisen laiminlyöntien ja karjan laiduntamisen vuoksi. Matkustaessaan ulkomailla nuori kreivi oli tutustunut useiden maiden metsätalouteen – erityisen paljon hän arvosti ranskalaisen du Monceaun ja englantilaisen John Evelynin (1620–1706) kirjoituksia. Du Monceaun 1750-, 1760- ja 1780-luvuilla laatimia teoksia puista, ja metsänkasvatuksesta ylipäänsäkin, oli käännetty myös saksaksi. Evelyn puolestaan oli kirjoittanut jo vuonna 1664 maan niukkeudesta metsävaroista huolestuneelle Englannin kuninkaalliselle laivastolle tilausteoksen *Sylva or a Discourse of Forest-Trees*. Sitä Reventlow (1879) suositteli jokaiselle metsänomistajalle ja metsästä kiinnostuneelle.

Perittyään isältään ison maatilan Etelä-Tanskasta Lollandin saarelta vuonna 1775 Reventlow ryhtyi voimakkaasti uudistamaan hallitsemiensa paikallisten kyläyhteisöjen maa- ja metsätaloutta. Vastuu tietyn alueen viljelystä oli ennen ollut yhteisesti koko kylällä, mutta hän jakoi sen liberalististen aatteiden innoittamana talonpojille, määräsi vuokran maksettavaksi maataloustuotteiden hinnan mukaan, perusti kouluja ja palkkasi hannoverilaisen metsänhoitajan Georg Wilhelm Brüelin auttamaan metsien käsittelyssä. Göttingenin yliopistossa matemaatiikkaa, luonnontieteitä ja metsätaloutta opiskellut Brüel oli hyvin perillä Hartigin ja Cottan metsänhoito-opeista, jotka suosivat pitkiä kiertoaikoja ja harvoin, 30–40 vuoden välein toistuvia lieviä harvennuksia, joissa poistettiin vain alimman latvuskerroksen puut (Grøn 1960).

Reventlow oli hyvin kiinnostunut metsien tilan parantamisesta ja taloudellisista laskelmista. Hän istutti tammi- ja pyökkimetsiä, perusti kokeita ja sahautti puita Lollandin saarella sekä Schleswigin ja Holsteinin herttuakunnissa tutkiakseen vuosilustojen ja latvussuhteiden kehitystä eri tavoin harvennetuissa metsissä. Hän merkitsi muistiin mittaustuloksiaan ja piirsi yksityiskohtaisia karttoja koepuiden välisistä etäisyyksistä ja sijainnista toisiinsa nähden. Hänen toimintansa lienee ollut aikanaan jotakuinkin ainutlaatuisen tarkkaa ja huolellista, mikä mahdollisti puun kasvun ja sen syiden selvittämisen. Tuohon aikaan metsätieteelliset kokeet olivat yleensä hajanaisia, eikä esimerkiksi koelajien perustamiseen ollut minkäänlaisia yhtenäisiä standardeja, vaan niitä perustettiin miten milloinkin. Lisäksi lähes jokaisessa Saksan valtioissa käytettiin erilaisia mitta-, paino- ja rahayksiköitä (Cajander 1909).

Nuori kreivi oli vakuuttunut siitä, että käsittelemällä metsiä taloudellisessa mielessä oikein metsätalouden kannattavuutta voitaisiin parantaa huomattavasti, mikä sitten edistäisi metsien säilymistä. Oikea käsittely tarkoitti sitä, että suurimman kasvun sijaan maanomistajien tuli kiinnittää huomiota parhaan mahdollisen taloudellisen tuloksen aikaansaamiseen. Reventlowin mielestä Hartigin ja Cottan oppien noudattaminen johti siihen, ettei puiden latvustoille ja juuristolle ollut tarpeeksi tilaa kehittyä, minkä vuoksi puut jäivät tarpeettoman pieniksi. Tämä aiheutti maanomistajalle taloudellisia tappioita – metsänkasvatuksesta saatava voitto väheni helposti ainakin puoleen (Reventlow 1879).

Reventlow oli hyvin tietoinen tutkimustensa laadusta ja havaintojensa merkittävydestä. Sisarelleen lähettämässä kirjeessään hän kertoi, ettei ollut lukenut yhtä paljon kirjoja kuin tuon ajan kuuluisat metsätieteilijät, mutta tutkineensa heitä enemmän ”luonnon omaa kirjaa”. Hänen mielestään muidenkin olisi ennen pitkää pakko noudattaa hänen esittämiään metsänkasvatuksen taloudellisuutta korostavia periaatteita, halusivatpa he sitä tai eivät. Hän valitti myös sitä, että niin kauan kuin ranskalaiset ja englantilaiset metsäntutkijat olivat haluttomia oppimaan mitään saksalaisilta, ja päinvastoin, metsätiede ei edistynyt ja metsänkäsittelyä koskevat päätökset tehtiin vanhojen, pinttyneiden tapojen perusteella.

Reventlow arvosteli metsäntutkijoita ankarasti Hartigin oppien kritiikittömästä seuraamisesta ja osoitti useita epäjohtonmukaisuuksia tämän arvostetun metsämiehen kasvutaulukoissa ja kirjoituksissa. Hartig oli esimerkiksi esittänyt vuonna 1795 ilmestyneessä tunnetussa oppi- ja käsikirjassaan *Anweisung zur Taxation und Beschreibung der Forste*, että tammen sopiva kasvusaika on 200 vuotta, mutta Reventlowin mukaan Hartigin ehdottamat hehtaariohaiset runkoluvut ja puumäärät olivat käytännössä mahdottomia saavuttaa. Hän piti uskottomana myös sitä, että ennakkoluulot muita menetelmiä kohtaan olivat johdaneet niin monet kyvykkäät metsämiehet sokeasti uskomaan Hartigin kasvutaulukoita ja kasvatusohjeita.

Reventlow oli siinä mielessä oikeassa, että Hartigin käsikirjat yleissääntöineen (*Generalregeln, Meisterregeln*) olivat hyvin jäykkiä. Ne esittivät silloisen metsätieteen pääopit niin hyvin järjestettynä kokonaisuutena, että metsänhoitajakunnassa muodostui käsitys, että ne sisälsivät kaiken tarpeellisen (Cajander 1909 s. 5). Niistä eri maiden metsänhoitajat seuraavina vuosikymmeninä pääasiallisen oppinsa ammensivatkin – myös kiertoaikojen osalta.<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> ”Eksaktisen tutkimuksen on kuitenkin ollut kovasti vaikea raivata itselleen jalansijaa metsätieteissä. Syitä kyllä lienee useampiakin, m.m. jo metsätalouden hyvin käytännöllisessä laadussa, mutta varmaan juuri myöskin ylempänä mainitut Cotta’n ja varsinkin Hartig’in teokset ovat olleet osaltaan siihen suurena syynä... Hartigin yleissäännöt (’Generalregeln’), varsinkin metsänhoidon alalla, muodostuivat jonkunlaisiksi uskonkappaleiksi, joiden pätevyyttä ei tahdottu epäillä. Samanlainen suuri luottamus on metsänhoitajakunnassa ollut eräitä myöhempiäkin auktoireja, varsinkin Pfeil’iä kohtaan. Tuskin minkään tieteen alalla on auktoriteettiä ollut niin vahva kuin metsänhoito-opin ja yleensä metsätieteiden.” (Cajander 1909 s. 5, Ramannia mukaillen).

Kirjansa toisessa, vuoden 1804 painoksessa Hartig muuttikin hiukan suosituksiaan. Tammen kiertoajaksi hän ehdotti hyvällä ja keskinkertaisella kasvupaikalla 180 vuotta, kun tavoitteena oli kasvattaa rakennuspuuta. Ankarassa ilmastossa kiertoaikaa voitiin pidentää 200–210 vuoteen, ja silloin, kun haluttiin kasvattaa järeää puuta myllyjen ja laivojen rakentamiseen, kiertoaikaa tuli jatkaa vieläkin pidempään eli 240–270 vuoteen. Samaan aikaan Englannissa ja Ranskassa useat asiantuntijat kuitenkin arvelivat 120 vuoden riittävän isojen tammien kasvattamiseen. Reventlow tiesi englantilaisten ja ranskalaisten suosivan myös usein toistuvia harvennushakkuuta – niitä tehtiin jopa alle viiden vuoden välein.

### *Arvokasvu ja markkinakorko ohjenuoraksi*

Vuonna 1811 Reventlow julkaisi Tanskan tiedeseuran sarjassa tutkimustensa ennakkoraportin, jossa hän korosti taloudellisuuden merkitystä metsänkasvatusta koskevassa päätöksenteossa. Hänen mukaansa useimmat metsätalouden tuloja kuvaavat laskelmat eivät ottaneet huomioon sitä pitkää jaksoa, jota metsänomistajan piti odottaa saadakseen tuloja investoinnistaan. Tästä aiheutuva metsänkasvatuksen heikko kannattavuus oli hänen mukaansa yksi syy siihen, miksi ”niin monet vihasivat ja niin harvat rakastivat metsiä”.

Reventlowin mielestä päätöksenteon ohjenuoraksi tuli ottaa arvokasvu ja markkinakorko. Puustoa tuli kasvattaa, kunnes sen arvokasvu laski alle neljän prosentin; pyökin kohdalla tämä tapahtui hänen mukaansa 80 vuoden iässä ja tammella 120 vuoden iässä. Hän kuitenkin korosti kantohinnan suurta vaikutusta edullisimpaan kiertoaikaan. Jos pyökistä saataisiin polttopuun sijasta arvokkaan köli- tai tynnyripuun hinta, ja jos korkeampi hinta kattaisi tulonmenetykset aikaisemmasta hakkuusta ja myös niille lasketun korkoa korolle mukaisen lisän, niin kiertoaikaa kannattaisi vielä jatkaa. Laskelmissaan hän ei ottanut huomioon maapohjaan sitoutunutta pääomaa.

Havupuita koskevia mittaustuloksiaan Reventlow ei julkaissut, koska hänellä ei omien sanojensa mukaan ollut tarpeeksi koepuita. Hän oli kuitenkin vakuuttunut siitä, että voimakkaat harvennukset osoittautuisivat edullisiksi myös havumetsissä, vaikka niitä voitiinkin yleisesti kasvattaa tiheämpinä kuin lehtimetsiköitä.

Tammen kohdalla hän osoitti kasvulaskelmien avulla erheelliseksi johtavien saksalaisten metsäntutkijoiden väitteen, jonka mukaan englantilaisten kokeiden harvaa kasvatustiheyttä puoltavia tuloksia ei Englannin parempien kasvuolosuhteiden vuoksi voitu soveltaa Saksassa. Saarivaltakunnassa kyseisiä kokeita ja taloudellisia laskelmia, joiden perusteella oli suositeltu esimerkiksi pyökille 80 vuoden kiertoaikaa (ellei amiraliteetti nostaisi järeiden puiden hintaa), oli julkaissut vuonna 1800 muuan walesilainen Llandaffin piispa, jonka näkemyksiin palataan myöhemmin.

Reventlowin ajatukset herättivät voimakasta arvostelua Saksassa. Vastauksena siihen hän julkaisi vuonna 1811 metsänkasvatuksen 21 sääntöä, jotka sisältyvät myös hänen pääteokseensa *Forsslag til en forbedret Skovdrift grundet paa Undersøgelser over Træernes Vegetation i Danmarks og Slesvigs Skove* (engl. *Treatise on Forestry*), jonka tanskankielinen versio oli valmiina vuonna 1816. Mittavasta maaomaisuudestaan huolimatta Reventlowilla ei ollut varaa julkaista sitä, koska teos oli laaja ja sisälsi runsaasti taulukoita ja piirroksia, joiden kai-vertaminen olisi vaatinut paljon työtä. Tanskankielinen teos samoin kuin Reventlowin aloittama saksankielinen käännös ilmestyivät vasta noin 50 vuotta hänen kuolemansa jälkeen vuonna 1879.<sup>9</sup>

### 3.4 Taloudellisen liberalismien vaikutus kiertoaikalaskelmiin

Metsän kiertoaika oli 1600-luvulta lähtien merkittävä kysymys myös Englannissa, missä tarvittiin runsaasti puuraaka-ainetta maan mahtavan kauppa- ja sotalaivaston rakentamiseen, ylläpitämiseen ja laajentamiseen. Kuten Ranskassa, kysymys oli pitkälti siitä, tulisiko metsänkasvatuksessa ottaa pääoman vaihtoehtoiskustannukset huomioon.

Englantilainen merkantilisti Sir Thomas Culpeper (1578–1662) esitti jo vuonna 1623, ettei metsätaloudesta pysty saamaan kovin korkeaa tuottoa (Endres 1923 s. 28). Tämän tunnetun koronkiskonnan vastustajan mielestä tuon ajan lailistettu korkokanta, 10 prosenttia, oli muutenkin liian korkea moraalien ja talouselämän kannalta. Parantaakseen maansa kauppiaiden hintakilpailukykyä alhaisesta korosta nauttiviin hollantilaisiin verrattuna Culpeper esitti parlamentille koron laskemista kuuteen prosenttiin. Muutamaa vuotta myöhemmin parlamentti päättikin alentaa koron kahdeksaan prosenttiin.

Taloudellisen liberalismien aatesuunnan katsotaan syntyneen Englannissa sen jälkeen, kun skotlantilainen moraalifilosofi ja taloustieteilijä Adam Smith (1723–1790) julkaisi maineikkaan teoksensa *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations* vuonna 1776. Hän sai runsaasti vaikutteita ranskalaisilta fysiokraateilta ja valistusfilosofeilta – etenkin läheiseltä tuttavaltaan apotti Anne-Robert-Jacques Turgot’lta (1727–1781), jota on pidetty 1700-luvun Ranskan merkittävimpana ekonomistina. Toimiessaan Ludvig XVI:n

---

<sup>9</sup> Reventlow oli Tanskan hallituksen vaikutusvaltainen jäsen 29 vuotta (1784–1813). Tänä aikana hän ajoi muutamien muiden hallituksen jäsenten kanssa läpi maatalouden rakenteen radikaalin uudistamisen, minkä on katsottu luoneen perustan maan maataloussektorin myöhemmälle menestykselle. Vuonna 1813 hän erosi tehtävästään jouduttuaan erimielisyyksiin kuninkaan kanssa Napoleonin tukeneen Tanskan armeijan rahoituksesta. Vielä 76-vuotiaana hän leimasi tilallaan puita tutkimuksiaan varten ja teki muistiinpanoja voimakkaiden harvennusten aikaansaamista levenemisistä tammien ja pyökkien vuosilustoissa. Vaikka Reventlow oli vakuuttunut siitä, että metsänhävitys voidaan estää osoittamalla rationaalisen metsänkasvatuksen olevan taloudellisesti kannattavaa, niin hän joutui Tanskan oikeusministerinä ollessaan laatimaan vuonna 1805 metsälain, jolla rajoitettiin metsänkäsitelyä. Tämä laki oli oleellisilta osiltaan voimassa Tanskassa vielä 1960-luvun alussa (Grøn 1960).

valtionvarainministerinä vuosina 1774–1776 Turgot pyrki aktiivisesti vapauttamaan ulkomaankauppaa ja yhdenmukaistamaan maansa verotusta. Hän oli ajatuksineen varsin lähellä fysiokraatteja, joskin hänen näkemyksiään pidetään yleensä hieman kehittyneimpinä. Turgot muun muassa oivalsi pääoman merkityksen ja katsoi, että teollisuus voisi tuottaa taloudellista ylijäämää siinä missä maatalouskin.<sup>10</sup>

Liberalististen aatteiden innoittamana tunnettu englantilainen maataloustieteilijä William Marshall teki vuonna 1790 laskelmia tammen edullisimmasta kaatoista. Niissä hän otti huomioon puuston kasvun, kantohinnat ja puustopääoman – sekä ilmeisesti ensimmäisenä myös maapohjaan sitoutuneen pääoman vaihtoehtoiskustannuksen (Scorgie ja Kennedy 1996). Ilmeisesti amiraliteettiä rauhoittaakseen hän kuitenkin korosti, ettei kyseisten laskelmien tarkoitus ollut rohkaista kaatamaan puustoa ennenaikaisesti, vaan ainoastaan osoittaa metsän taloudellisesti edullisin uudistusikä.<sup>11</sup>

Tammen taloudellisesti edullisinta kiertoaikaa pohti tuohon aikaan myös Llandaffin piispa Richard Watson, joka oli merkittävä maanomistaja. Häntä askarrutti, kannattiko tammet kaataa 50–60 vuotiaina vaiko kasvattaa 80–100 vuoden ikään, jolloin ne voisi myydä laivanrakennuspuuksi. Vuonna 1794 Watson ratkaisi kysymyksen esittämällä maatalouden kehittämistä koskevan raportin esipuheessa, että puut tulee kaataa silloin, kun niiden arvokasvu vähenee samaksi kuin markkinakorko.<sup>12</sup>

Maatalousneuvoston kunniajäseneksi nimitetty Marshall tarkisti kyseisen Westmorelandin alueen maatalouden kehittämistä koskevan raportin vuonna 1808 ja lisäsi kommentin Watsonin kirjoitukseen. Siinä hän totesi nykytietämyksen valossa aivan oikein, että arvokasvuun tuli lisätä myös maapohjaan sitoutuneen pääoman korko: ”*Together with the annual value of the land it grows upon*” (James 1981 s. 177, Scorgie ja Kennedy 1996). Kommentti oli ilmeisen tarkkaan harkittu, koska Marshall mainitsi samasta asiasta (”*rental value of the land*”) raportissaan kahdesti tämän jälkeenkin.

Maatalouden kehittäminen kiinnosti 1800-luvun alussa myös kuuluisaa saksalaista taloustieteilijää Johann Heinrich von Thüneniä, joka oli tutustunut englantilaisten klassisen poliittisen taloustieteen perustajien Adam Smithin ja

---

<sup>10</sup> Merkantilistien mukaan vain maatalous oli tuottavaa ja siitä saatava ylijäämä (*produit net*) oli lahja Jumalalta. Teollisuudessa, kaupassa ja palveluissa kova kilpailu kutisti voitot nolnaan, joten kaikki rikkaus oli peräisin maataloudesta.

<sup>11</sup> Marshall totesi: ”Joidenkin mielestä totuutta ei tule sanoa aina julki, toiset taas katsovat, että tosiasiat ovat aina arvokkaita. Itse kallistun jälkimmäisen näkemyksen kannalle. Vaikka tietoa käytetään joskus väärin, suurin osa ihmisistä käyttää sitä hyvään tarkoitukseen. Jos metsät kaadetaan totuttua nuorempana, niin siitä aiheutuu haittaa ehkä vain laivanrakennuspuun saannille. Siksi kysymys edullisimmasta kiertoajasta on aivan liian tärkeä jätettäväksi tunteiden varaan.” (Scorgie ja Kennedy 1996).

<sup>12</sup> ”If profit is considered, every tree of every kind ought to be cut down and sold when the annual increase in value of the tree, by its growth, is less than the annual interest of the money it would sell for.” (James 1981 s. 176, Scorgie ja Kennedy 1996).

David Ricardon liberalistisiin ajatuksiin.<sup>13</sup> Thünen osti nuorena miehenä, vuonna 1810, maatilan syrjäiseltä ja harvaan asutulta Mecklenburgin alueelta ja teki seuraavat kymmenen vuotta yksityiskohtaisia laskelmia siitä, kuinka tilan kannattavuutta voisi parantaa erilaisilla investoinneilla (Hall 1966 s. 17). Tässä suhteessa hän siis toimi jokseenkin samalla tavalla kuin Reventlow.

Vuonna 1826 julkaistussa pääteoksessaan *Der Isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie* von Thünen esitti taloustieteessä keskeisessä asemassa olevan marginaaliteorian perusteet, mutta samalla arvosteli maansa metsätaloutta ja metsänhoidon menetelmiä vanhakantaisuudesta ja irrationaalisuudesta. Hänen mukaansa järkevässä metsätaloudessa metsiköt kannatti kasvattaa tasaikäisinä ja niiden kaatoikä tuli määrittää vertaamalla kasvua ja markkinakorkoa toisiinsa (von Thünen 1826 s. 120–121). Pitkää kiertoaikaa tuli käyttää vain siinä tapauksessa, että näin saataisiin tuotetuksi normaalia arvokkaampaa puuta esimerkiksi rakentamiseen ja puun korkea hinta kompensoisi metsään sidotun pääoman vaihtoehtokustannukset. Maapohjan arvoa von Thünen ei kuitenkaan – toisin kuin Marshall – huomannut sisällyttää laskelmiinsa.

### 3.5 Maankorkoteorian synty Saksassa

Kuten edellä mainittiin, Saksan eri kuningas- ja ruhtinaskunnissa sekä Ranskassa annettiin 1700-luvulla enemmän tai vähemmän tarkkoja metsänhoito-ohjeita. Ranskan vallankumouksen ja Napoleonin sotien jälkeen määräyksiä kuitenkin lievennettiin muun muassa maanomistusolojen muutosten takia. Seuraavien vuosikymmenien kuluessa metsävirkamiesten valta lisääntyi uudelleen, ja seikkaperäiset säädökset ja metsävirkamiesten toisinaan häikäilemätön ja omavaltainen toiminta sai talonpojat halveksumaan ja vihaamaan heitä.

Samaan aikaan puun kysyntä ja maatalouden kilpailu metsämaasta lisääntyi Keski-Euroopassa väestön ja kaupunkien kasvaessa nopeasti. Vuonna 1700 Saksan väestötiheys oli 26–28 henkilöä neliökilometriä kohti, vuonna 1800 se oli kohonnut 40–45:een, ja seuraavan vuosisadan alussa se oli jo 104 (Hall 1966 s. 42). Metsiä raivattiin kiihtyvällä tahdilla pelloiksi, jolloin syntyi tarve määritellä metsämaan arvo suhteessa peltomaahan. Lisäksi hallitsijat halusivat kätevän menetelmän metsän verottamiseksi.

Metsämaan arvoa, metsän taloudellisesti edullisinta kiertoaikaa sekä koronlaskun periaatteita pohti 1800-luvun alussa metsäntutkimuksen saksalainen voimaviisikko: Georg Ludwig Hartig (1764–1837), Heinrich von Cotta (1763–

---

<sup>13</sup> Smithin pääteos oli Englannissa suuri menestys. Sen sijaan Saksassa se ei herättänyt suurta huomiota ilmestyttyään saksaksi kahdessa osassa vuosina 1776 ja 1778 (Tribe 1984). Smithin teoreettisen työn tärkein jatkaja oli englantilainen pörssimeklari ja parlamentin jäsen David Ricardo (1772–1823), joka kehitti vuonna 1821 teorian maanvuokrasta. Se selitti luonnonvarojen hinnanmuodostusta, minkä seurauksena luonnonvaroista tuli työhön ja pääomaan verrattavia tuotannontekijöitä.

1844), Gottlob König (1776–1849), Johann Christian Hundeshagen (1783–1834) ja Friedrich Leopold Wilhelm Pfeil (1783–1859). Heidän maanmiehensä, muuten tuntemattomiksi jääneet metsänhoitajat Bein ja Eyber olivat tosin julkaisseet jo vuonna 1799 kirjeen, jossa he ehdottivat metsän arvon määrittämistä nettotulon, korkoa korolle laskujen ja 120 vuoden kiertoajan perusteella. Tätä ajatusta kehitti vuonna 1805 edelleen saksalainen Johann Wilhelm Hoßfeld (1768–1837), joka kirjoitti myöhemmin, 1810- ja 1820-lukujen vaihteessa, kirjan matematiikasta metsämiehille, kameralisteille ja kauppiaille (Fernow 1911 s. 138, Mantel 1964 s. 32).

Myös Taksin prinssin metsäkomissaarin ja tunnetun kameralistin Wilhelm Gottfried von Moserin (1729–1793) vuonna 1801 julkaistussa kirjassa esitettiin mielenkiintoisia kiertoaikatuloksia. Niiden mukaan 80 vuoden kiertoaika antoi 66 prosenttia suuremman rahatuoton kuin metsän kasvattaminen 120 vuoden ikäiseksi. Moserin mielestä 120 vuoden kiertoaika oli kuitenkin perusteltu valtion metsätaloudessa, koska sen tavoitteena oli pikemminkin puuntuotanto ja ”yleinen etu” kuin rahallinen tuotto. Samat ajatukset hän oli esittänyt jo vuonna 1757 ilmestyneessä, metsäekonomian lähes tuhatsivuisessa perusteoksessa *Grundsätze der Forstökonomie*, jossa korostettiin yhtäältä metsänkasvatuksen taloudellista merkitystä, toisaalta julkisen metsätalouden tavoitetta tuottaa mahdollisimman paljon puuta teollisuuden tarpeisiin.

Vuonna 1806 myös sveitsiläinen ylimetsänhoitaja ja vuorineuvos Johann Heinrich David Zschokke (1771–1848) rinnasti metsän pääomaan, ja kertoi koron kuvaavan metsästä puun ja muiden hyödykkeiden muodossa saatua tuottoa (Martin 1918 s. 2).

### *Yksinkertainen korko vai korkoa korolle?*

1800-luvun alussa taloudellisesti edullisimman kiertoajan määrittämistä haittasi yksimielisyyden puute koron laskentatavasta.<sup>14</sup> Vaikka Saksin metsänjärjestelyn ja Tharandtin metsäakatemian johtajaksi kohonnut Cotta tunnusti vuonna 1804 julkaistussa tunnetussa käsikirjassaan *Systematische Anleitung zur Taxation der Waldungen* korkoa korolle laskennan merkityksen metsän arvon määrittämisessä, niin myöhemmin hän ryhtyi käyttämään korkoa koron (*Zinseszins*) ja yksinkertaisen koron (*einfache Zins*) aritmeettista keskiarvoa. Endresin (1923 s. 44) mukaan tätä keskiarvoa ja 5 prosentin korkokantaa määrättiin käyttämään muun muassa Baijerissa vuodesta 1820 lähtien.

Todellisuudessa kyseinen menettely johti virheellisiin tuloksiin, koska yksinkertaisessa korossa ei oteta huomioon sitä, että alkuperäisestä sijoituksesta saadut vuotuiset korot voidaan heti sijoittaa uudelleen samalla korkoprosentilla, jolla alkuperäinen pääomakin on sijoitettuna (esim. Tarkka 1993 s. 130). Cotta

---

<sup>14</sup> Korkoa korolle laskentaa käytettiin metsätaloudessa tietävästi ensimmäistä kertaa vuonna 1764 julkaistussa lehtiartikkelissa (Schwappach 1927 s. 81, 85).

ilmeisesti tiesi tämän; hän perustelikin menettelyään sillä, ettei pääomasta vuosittain saatua korkoa voitu aina heti sijoittaa uudelleen.<sup>15</sup>

Toinen metsäntutkimuksen voimahahmo, Preussin kuningaskunnan metsähallinnon johtajaksi noussut Hartig, käytti vielä vuonna 1812 laskelmissaan yksinkertaista korkoa ja esitti muutenkin hieman sekavia päätelmiä metsän arvon laskennasta. Hän puolusti yksinkertaisen koron käyttöä hieman samaan tapaan kuin Cotta: suurin osa sijoittajista ja metsänomistajista kulutti pääomasta vuosittain saamansa koron jokapäiväiseen elämiseen, eikä sijoittanut sitä heti uudelleen.<sup>16</sup>

Hämmennystä lisäsi vielä se, että saksalaisista metsäntutkijoista von Gehren, von Moosheim ja Hierl esittivät vielä kolmannen menetelmän, jossa sovellettiin koronkoron ja yksinkertaisen koron geometrista keskiarvoa, ja Burckhardt ehdotti ”rajoitetun koron” käyttöä (Fernow 1911 s. 139, Endres 1923 s. 44, Grøn 1931 s. 518, Streiffert 1938 s. 10).<sup>17</sup>

### König, Hundeshagen ja Pfeil

Nuoremman polven saksalaiset metsäntutkijat, ennen muuta Gottlob König, Johann Christian Hundeshagen ja Friedrich Leopold Wilhelm Pfeil, korostivat metsäkasvatuksen taloudellisia näkökohtia selvästi enemmän kuin Hartig ja Cotta. Cottan oppilas ja lanko König julkaisi vuonna 1813 teoksen *Anleitung zur Holztaxation*, jossa tämä yliopistotutkintoa vailla ollut metsäammattimies ja Thüringissä sijainneen Eisenachin metsäakatemian myöhempi johtaja esitti, miten metsämaan arvo voidaan laskea nettotulojen avulla (König 1813). Vaikka König oli matemaattisesti suuntautunut ja oivalsi, että näin pystytään arvioimaan myös metsänhoitotoimenpiteiden kannattavuutta ja metsän taloudellisesti optimaalinen hakkuuajankohta, hän ei esittänyt selkeää nettonykyarvon kaavaa ongelman ratkaisemiseksi (Roth 1926 s. 8, 57, Hagfors 1936a s. 75). Tämä saattoi johtua siitä, että hän hallitsi sittenkin enemmän laskentoa kuin matematiikkaa (Heyer 1871 s. vii).

Vuonna 1835 König julkaisi kuuluisan 500-sivuisen metsästatistiikan oppikirjansa *Die Forstmatematik*. Siinä tämä harvapuheiseksi, sulkeutuneeksi ja tavattoman työteliääksi kuvattu mies kehitti edelleen metsikön arvon määrittämistä, mutta jälleen ilman selkeää tapaa maanarvon ratkaisemiseksi (König 1854,

<sup>15</sup> ”Weil man die Zinsen nicht sogleich wieder mit Sicherheit auf Zinsen ausleihen kann, aber auch niemand ein Capital hingeben wird, das lange Zeit gar nichts und zuletzt nur einfache Zinsen einbringt; so können weder die einfache noch die Zinseszinsen gelten, sondern das Wahre liegt in der Mitte.” (Cotta 1819 s. 5, Grøn 1931 s. 518–519 mukaan).

<sup>16</sup> ”Da bei weiten der grösste Teil von allen Capitalisten und Waldeigentümern die Zinsen aus ihren Capitalien jährlich oder periodisch verzehren oder zu ihrer Subsistenz verwenden müssen; so kann nur *die einfache* Zinsrechnung bei dem Verkaufe der Waldungen Statt finden, und die Berechnung der Zwischenzinsen nicht in Anwendung kommen.” (Hartig 1812 s. 11, Grøn 1931 s. 518 mukaan).

<sup>17</sup> Geometrinen keskikorko laskettiin siten, että jos yksinkertaista korko merkitään  $a$ :lla ja korkoa korolle  $b$ :llä, niin geometrinen keskikorko on  $\sqrt{ab}$  (Endres 1923 s. 44).

Hagfors 1936a s. 74). Myöhemmin on arveltu, että Königin teokset eivät saaneet aikanaan tarpeeksi huomiota, koska ne sisälsivät metsänhoitajien välttelemiä matemaattisia kaavoja (Heyer 1871 s. vii). Lisäksi teosten sisältö oli osin epäselvä ja König teki joitakin teoreettisia virheitä. Yhtäkaikki, hän kuitenkin esitti johdonmukaisesti metsän pääomaluonteen ja kehitti ensimmäisenä menetelmän, joka mahdollisti metsätalouden kannattavuuden arvioinnin pääoman tuottoasteen eli puuston arvokasvun avulla (Heyer 1871, Martin 1918 s. 4–5, Endres 1923 s. 205, Schwappach 1927 s. 71, Hagfors 1936a).

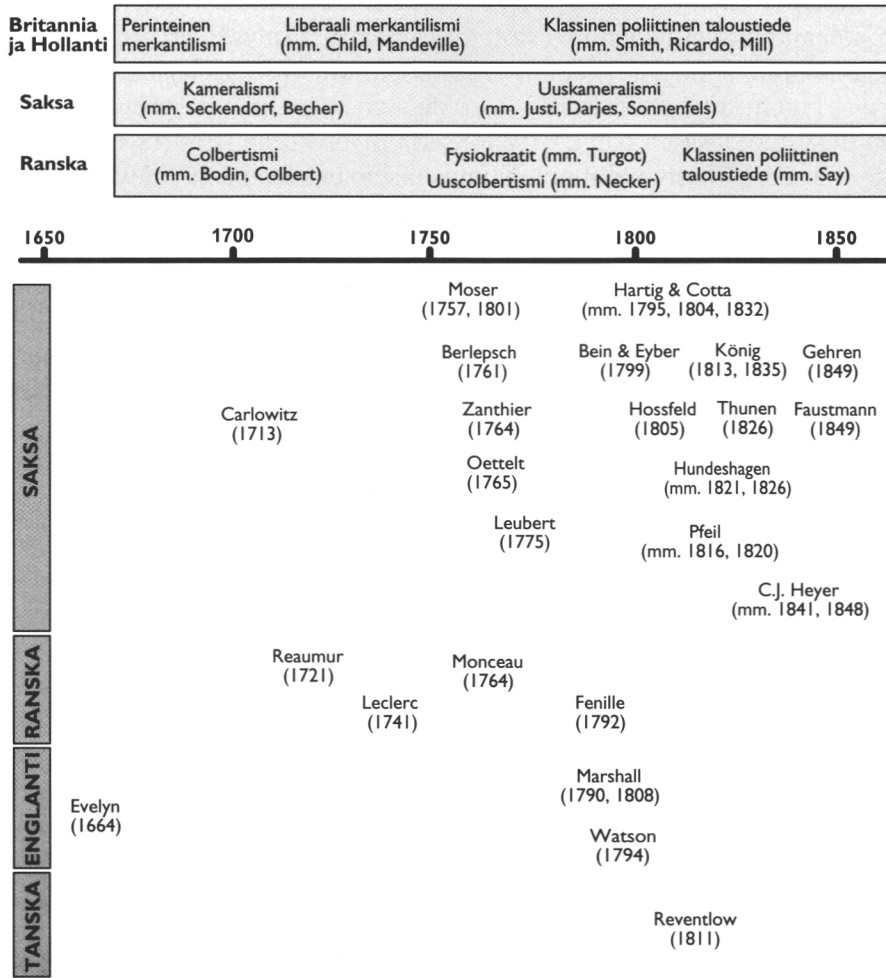
Ensimmäinen, joka pontevammin alkoi vaatia järjestelmällisen metsäntutkimuksen lisäämistä, oli englantilaisilta liberalisteilta vaikutteita saanut Hundeshagen. Tämä monipuolisen koulutuksen saanut tiedemies tarkasteli vuonna 1821 laajassa tietokirjassaan *Encyclopädie der Forstwissenschaft* kiertoajan ja puustopääoman välistä riippuvuutta sekä normaalimetsän käsittelyä. Monesti katsotaan, että nimenomaan Hundeshagen perusti metsätatistiikan sekä loi systemaattisen pohjan metsätalouden investointilaskelmille ja metsän arvonnäilytykselle. Tämä johtuu siitä, että vuonna 1826 ilmestyneessä teoksessaan *Forstabschätzung* (suom. metsänarvostelu) hän käsitteli työvoimaa ja pääomaa tuotannon tekijöinä ja otti huomioon kustannuksissa myös koron (Endres 1911 s. 1, Fernow 1911 s. 125, Martin 1918 s. 2, Thomson 1942 s. 24, Speidel 1967 s. 18).

Hundeshagen oli harvinaisen tuottelias tutkija, joka julkaisi paljon tieteellisiä artikkeleita 1820- ja 1830-luvuilla. Hän poikkesi useista muista tuon ajan metsäntutkijoista, koska ei toiminut johtopaikoilla käytännön metsäorganisaatioissa eikä opettanut metsäkouluissa, vaan oli Tübingenin ja myöhemmin Giessenin yliopiston professori ja edusti ennen muuta teoreettista ja filosofista ajattelua (Heyer 1871 s. vi, Fernow 1911 s. 100). Rohkeiden ajatustensa takia jotkut ovatkin kutsuneet häntä Saksan metsätieteen ensimmäiseksi ”spekulatiivisen näkemys” edustajaksi (Schwappach 1927 s. 63, Hagfors 1936b s. 179). Myöhemmin on arveltu, että Hundeshagenin verrattain lyhyeksi jäänyt elämäntyö oli ensimmäinen suurempi yritys murtaa metsätalouden alalla vallinnut auktoriteetti-usko ja perustaa metsätiede eksakteihin tutkimuksiin (Cajander 1909 s. 6).

Hartigin luoman preussilaisen ohjesääntökulttuurin ehkä selvimmäksi vastustajaksi kohosi kuitenkin Pfeil, jota on pidetty ekologisen, kasvupaikkaan ja sen ominaisuuksiin perustuvan metsänhoidon isänä (Hasel 1992, Leikola 1993). Tämä saksalaisilta poliittisilta taloustieteilijöiltä vaikutteita saanut Preussin Eberswalden kuuluisan metsäakatemian perustaja ja pitkäaikainen johtaja (ja Berliinin yliopiston professori) korosti aluksi useiden muiden metsäntutkijoiden tapaan, että puuntuottamisen kustannukset ja korko tulee ottaa huomioon metsätaloudellisissa laskelmissa. Vaikka hänkin totesi, että edullisimmassa kiertoajassa nettotulojen nykyarvo on suurin, niin hänkään ei esittänyt mitään tapaa maanarvon laskemiseksi (Heyer 1871 s. 68–70, Martin 1918 s. 3). Tämä saattoi johtua siitä, ettei Pfeilillä ollut yliopistotutkimusta eikä matematiikka ollut hänen vahvinta alaansa.

Pfeil oli luonteeltaan kärsimätön ja kiivas mies – ja ajattelussaan toisinaan myös sangen epäjohdonmukainen. Hän esimerkiksi suhtautui ristiriitaisesti valtion metsänomistukseen: aluksi (vuonna 1816) hän vaati niiden myymistä yksityisille, mutta kääntyi myöhemmin kannattamaan niiden säilyttämistä valtiolla – jos kohta välttämättömänä pahana (Hannikainen 1896 s. 219, Schwappach 1927 s. 55). Myöhemmin Pfeil ryhtyi monen muun arvostetun metsäntutkijan tavoin arvostelemaan maankorkoteoriaa ja kiertoajan määrittämistä nettohyötyarvon perusteella (Heyer 1871 s. 68–70, Schwappach 1927 s. 64, 86).

Kuvaan 4 on koottu yhteenvetomaisesti metsän kiertoaikaa vuosina 1650–1850 pohtineita keskeisiä henkilöitä sekä tuohon aikaan eräissä Euroopan maissa vallinneet taloudellisen ajattelun suuntaukset perinteisestä merkantilismista klassiseen poliittiseen taloustieteeseen.



Kuva 4. Metsän kiertoaikaa vuosina 1650–1850 pohtineita keskeisiä henkilöitä sekä tuohon aikaan eräissä Euroopan maissa vallinneet taloudellisen ajattelun suuntaukset.

### 3.6 Kysymys metsämaan arvosta

Vuonna 1848 Pariisissa tapahtui helmikuun vallankumous, joka johti ns. toisen tasavallan syntymiseen Ranskaan. Vallankumouksen aatteet levisivät nopeasti myös muualle Eurooppaan. Saksassa talonpoikien viha kohdistui etenkin korkeaan verotukseen, metsäviranomaisiin ja ylimystön metsästystä koskeviin etuoikeuksiin. Erityisen suurta ärtymystä aiheutti se, että ylimystöllä oli lähes rajoittamaton metsästysoikeus ja talonpojilla velvollisuus osallistua heidän jahteihinsa apumiehinä. Vallankumouksen seurauksena ylimystön etuoikeuksia vähennettiin ja useat vihatut metsävirkamiehet joutuivat eroamaan (Bus 1998).

Vallankumouksen vielä jatkuessa arvostettu 51-vuotias metsämatematiikan opettaja Edmund Franz von Gehren (1849) esitti maailman ensimmäisessä metsätieteellisessä aikakauskirjassa, vuonna 1824 perustetussa *Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung*'ssa, menetelmän metsien arvonlaskennasta. Artikkelissaan hän pyrki määrittämään, kuinka paljon metsänomistajalle tuli maksaa maapohjasta siinä tapauksessa, että hänen metsänsä muutetaan maatalousmaaksi. Gehrenin menetelmä perustui nettohyönteisten laskentaan, mutta oli osin puutteellinen. Siinä muun muassa sovellettiin epätarkkoja koronkoron kaavoja (geometrista keskikorkoa) ja arvoitettiin pieni puusto senhetkiseen eikä tulevaisuuden nettotuottoja kuvaavaan arvoonsa, kuten pääomateorian mukaan olisi tullut tehdä (Gane 1968, Samuelson 1976). Gehrenin puolustukseksi on tosin mainittava, että pienen puun arvottamisessa on erehdytty useaan kertaan tämän jälkeenkin (ks. esim. Duerr ja Bond 1952, Nyyssönen 1958, Duerr 1960, Comolli 1981, Oderwald ja Duerr 1990).

Samassa aikakauskirjassa julkaistiin vain kaksi kuukautta tämän jälkeen artikkeli, jossa 27-vuotias saksalainen metsänhoitaja Martin Faustmann (1849) arvosteli von Gehrenin esittämää laskentamenetelmää (kuva 5). Faustmannin mukaan geometristä keskikorkoa käyttämällä maanarvot muodostuivat aivan liian suuriksi. Hän esittikin uuden, korkoa korolle laskentaan pohjautuvan menetelmän määrittää metsämaan arvo sekä totesi, että hänen mallinsa avulla voidaan ratkaista myös metsikön edullisin kiertoaika ja kannattavin metsänkäsittelytapa yleisemminkin.

Lehden painatukseen tarvittiin tuolloin aikaa noin kaksi kuukautta, joten Faustmannin on täytynyt kirjoittaa artikkelinsa välittömästi von Gehrenin kirjoituksen ilmestyttyä lokakuussa. Tosin samassa lehdessä oli jo elokuussa julkaistu 15-sivuinen artikkeli metsän arvonmäärittämisestä (kuva 6). Siinä esitettiin selkeästi maankorkoteorian peruserätykset, osin matemaattisine todistuksineen, samoin kuin esimerkkilaskelmia männiköiden arvosta (*Anlösung einer Aufgabe der Waldwerthberechnung*, 1849). Artikkelin oli allekirjoittanut nimimerkki ”F.”, mutta kirjoittajan otaksutaan olleen Faustmann, joka toimi tuohon aikaan lehden toimituksessa avustajana (Brandl, suull. 5.10.1999, Peyron, suull. 5.10.1999, Peyron 2000).

Berechnung des Werthes,

Waldwirthschaft, welche nach nicht haushalt. Forstbewirtschaftung bestimme.

Der Waldwirthschaftler hat zu dem Ueberflusse dieser Zeit (Seite 10) eine halbe Acker... Berechnung des Werthes, welche nach nicht haushalt. Forstbewirtschaftung bestimme.

ist der Waldwirthschaftler sich einzufließen, und seine Mühseligkeit... Berechnung des Werthes, welche nach nicht haushalt. Forstbewirtschaftung bestimme.

Die Waldwirthschaft nach dem Zweck... Berechnung des Werthes, welche nach nicht haushalt. Forstbewirtschaftung bestimme.

Waldwirthschaft... Berechnung des Werthes, welche nach nicht haushalt. Forstbewirtschaftung bestimme.

bedauer, welche er früher in gleichen Zeiten... Berechnung des Werthes, welche nach nicht haushalt. Forstbewirtschaftung bestimme.

Man ist weniger laun als eine Fichte... Berechnung des Werthes, welche nach nicht haushalt. Forstbewirtschaftung bestimme.

Waldwirthschaft... Berechnung des Werthes, welche nach nicht haushalt. Forstbewirtschaftung bestimme.

ferner aber nur bei dieser Gelegenheit... Berechnung des Werthes, welche nach nicht haushalt. Forstbewirtschaftung bestimme.

Es enthält die Waldwirthschaft... Berechnung des Werthes, welche nach nicht haushalt. Forstbewirtschaftung bestimme.

Man kann in Waldwirthschaft... Berechnung des Werthes, welche nach nicht haushalt. Forstbewirtschaftung bestimme.

Waldwirthschaft... Berechnung des Werthes, welche nach nicht haushalt. Forstbewirtschaftung bestimme.

Kuva 5. Faustmannin (1849) artikkelin ensimmäinen ja viimeinen sivu.

255 - Waffnung einer Aufgabe der Waldwirthschaft. Berechnung... 1) Was ist die Aufgabe... 2) Was ist die Aufgabe... 3) Was ist die Aufgabe...

256 - Was ist die Aufgabe der Waldwirthschaft... Berechnung... 1) Was ist die Aufgabe... 2) Was ist die Aufgabe... 3) Was ist die Aufgabe...

Kuva 6. Nimimerkin "F." vuonna 1849 kirjoittaman artikkelin ensimmäinen ja viimeinen sivu.

Myöhemmin on arveltu, että Faustmann pystyi ensimmäisenä muotoilemaan kiertoaikaratkaisun oikein nimenomaan sen takia, että hänen matemaattinen pohjansa oli vahvempi kuin Königin tai Hundeshagenin (G. Heyer 1871 s. vii). Tämä taas johtui ainakin osittain siitä, että hän oli saanut opiskeluaikanaan Giessenin yliopistossa ilmeisen paljon vaikutteita metsästatistiikan opettajaltaan Carl Justus Heyer'ltä (1797–1856), jota pidetään yhtenä Saksan metsätieteiden viidestä suurmiehestä. Muut ovat Hartig, Cotta, Hundeshagen ja Preßler (Rozsnyay 1990 s. 16, Weimann, suull. 4.10.1999).<sup>18</sup>

C.J. Heyer, joka kirjoitti tunnetuimman oppikirjansa *Die Waldertragsregelung* vuonna 1841 toimiessaan professorina Giessenissä, puolestaan sai vaikutteita samassa yliopistossa, osin samaan aikaan, toimineelta Hundeshagenilta. Vaikka he olivat joistakin asioista eri mieltä, niin Hundeshagenin tapaan Heyerkin ponnisteli ankarasti saadakseen aikaan järjestelmällistä metsätieteellistä tutkimustyötä ja teki vuonna 1846 ehdotuksen Saksan metsäntutkimuksen järjestämiseksi. Erityisen tärkeänä hän piti luotettavien, yhteisesti sovittujen periaatteiden mukaan laadittujen kasvu- ja tuotostaulukoiden koostamista, koska nämä olisivat mahdollistaneet taloudellisesti edullisimman puulajin, istutus- ja kasvatustiheyden sekä kiertoajan määrittämisen.

Heyerin ehdotus kuitenkin raukesi eräiden vaikutusvaltaisten metsänhoitajien vastustukseen, auktoriteettiuskoon, pienten valtioiden haluttomuuteen tukea metsätieteellistä tutkimustoimintaa samoin kuin tieteellisen tutkimuksen vähätelyyn. Tämän takia järjestelmällinen metsäntutkimus pääsi Saksassa vauhtiin vasta 1860- ja 1870-luvuilla, eli suunnilleen samaan aikaan kuin Suomessa ryhdyttiin tekemään ensimmäisiä metsänviljelykokeita Evon metsäopiston johtaja A.G. Blomqvistin johdolla.

Faustmann sai kaksi vastinetta kirjoituksiinsa: von Gehren kiisti saadut tulokset, ja Oezel (1850 s. 250) neuvoi, että herra Faustmannin tulisi käyttää jatkossa matemaattisia kykyjään aikaisempaa harkitummin, koska hänen kaavansa ovat virheellisiä. Jälkikäteen arvioiden Faustmann oli kuitenkin paljon aikaansa edellä. Usein jopa katsotaan, että hänen esittämänsä laskentamenetelmä, jossa osoitetaan formaalisti, kuinka luonnonvaran arvo määräytyy siitä tulevaisuudessa saatavien nettotulojen perusteella, on vanhin edelleen paikkansapitävä osa luonnonvarojen käytön taloustiedettä. Tärkeydeltään se on rinnastettu Harold Hotelingin 1930-luvulla esittämään malliin uusiutumattomien luonnonvarojen käytöstä sekä Clarkin ja Munron 1970-luvulla esittämään dynaamiseen malliin kalavarojen optimaalisesta hyödyntämisestä (Tahvonen 1996, Hanley ym. 1997).

---

<sup>18</sup> Faustmann syntyi vuonna 1822 Giessenissä, Pohjois-Hessenissä. Hän opiskeli Giessenin yliopistossa ensin lyhyen aikaa katolista teologiaa, mutta vaihtoi sitten metsäopintoihin. Päättettyään opintonsa vuonna 1845 hän suoritti työharjoittelut ja valmistui metsänhoitajaksi vuonna 1848 (Schäfer 1990).

## 4 Kiertoajan erilaiset määrittämisperiaatteet

Viimeisen 300 vuoden aikana on esitetty ainakin yhdeksän erilaista tapaa laskea metsän kiertoaika. Jokaisen niistä voidaan katsoa heijastavan oman aikansa yleistä yhteiskunnallista ja taloushistoriallista kehitystä. Esimerkiksi 1600- ja 1700-luvuilla luonnonmetsistä hakattiin polttopuuta ja järeitä puita sota- ja kauppalaivastojen sekä muun rakentamisen tarpeisiin. Heikot liikenne- ja tietoyhteydet, korkeat tullit ja merkantilistinen talouspolitiikka jarruttivat kaupan käyntiä, minkä seurauksena kylä- ja muut pienet yhteisöt pyrkivät omavaraisuuteen. Toisaalta metsiä myös hävitettiin yleisesti, koska väestö kasvoi nopeasti ja sodat ja hallitsijoiden vaihdokset aiheuttivat epävarmuutta.

Vähitellen olot vakiintuivat, jolloin kauppa ja erilaiset investointimahdollisuudet lisääntyivät. Kivihiili ja kooksi korvasivat puun ja puuhiilen rautateollisuuden polttoaineena ja kotitalouksien lämmönlähteenä, höyrykone otettiin käyttöön ja uudet keksinnöt alensivat kirjojen ja sanomalehtien tuotantokustannuksia, mikä toi ne suurten joukkojen ulottuville ja edisti lukutaidon yleistymistä (Cameron 1995). Tämän seurauksena puunjalostusteollisuus kehittyi ja puumassa korvasi lumput paperin raaka-aineena, jolloin pienenkin puun arvo nousi ja metsätalous muuttui intensiivisemmäksi. Samalla taloudelliset periaatteet ja pääoman vaihtoehtokustannukset saivat metsänkäsittelyssä aikaisempaa suuremman painoarvon.

Vuosien varrella metsän kiertoaika on kiinnostanut tutkijoita vaihtelevasti. Suomessa erilaisia kiertoajan ja uudistuskypsyden määritelmiä ovat tarkastelleet muun muassa Ericsson (1903), Hagfors (1929), Heikkilä (1930), Kallio (1957), Nyyssönen (1958), Lihtonen (1959), Ilvessalo (1965) ja Ollikainen (1984). Ruotsissa niitä ovat selvittäneet esimerkiksi Holmerz (1876), Petrini (1937, 1946), Streyffert (1965), Dickson (1953, 1956), Stridsberg (1956) sekä Johansson ja Löfgren (1985); Tanskassa esimerkiksi Gram (1876), Grøn (1943) sekä Jørgensen ja Hermansen (1950); ja Iso-Britanniassa muun muassa Schlich (1911). Yhdysvalloissa metsän kiertoajan määrittämisperiaatteita ovat tarkastelleet lukuisat tutkijat, kuten Fernow (1902), Roth (1926), Woolsey (1923), Recknagel ym. (1926), Thomson (1942), Duerr ym. (1956), Gaffney (1957), Duerr (1960), Goundrey (1960), Bentley ja Teegarden (1965), Pearse (1967), Samuelson (1976), Hyde (1980), Chang (1984), Reed (1986) ja Newman (1988).

Uusimpia julkaisuja lukuunottamatta lähes kaikissa edellä mainituissa teoksissa nojataan saksalaiseen lähteisiin, erityisesti Münchenin metsäakatemian professoreiden Gustav Heyerin (1865) ja Max Endresin (1911) sekä Tharandtin metsäakatemian johtajan Friedrich Judeich'in (1871) klassisiin oppikirjoihin metsänjärjestelystä ja metsän arvon määrittämisestä. Tämä johtuu paitsi kyseisten teosten ansioista, myös siitä, että monet 1800-luvun lopun ja 1900-luvun alun pohjoismaiset ja pohjoisamerikkalaiset metsätieteen johtohahmot opiskelivat Saksassa tai olivat saksalaista syntyperää.

Seuraavaksi esitetään analyttisesti erilaiset metsän kiertoajan määrittämisperiaatteet ja niiden taustaoletukset. Tarkastelu aloitetaan biologisista ja puuntuotannon maksimoimiseen pohjautuvista kiertoajoista ja niiden käytön perusteista. Tämän jälkeen analysoidaan niin sanottua suurimman metsänkoron kiertoaika, jossa metsään sitoutuneen pääoman vaihtoehtoiskustannuksia ei oteta huomioon. Lopuksi esitetään investointiteoriaan joko osittain tai kokonaan perustuvat kiertoajan määrittämisperiaatteet: yhden kiertoajan malli, Faustmannin malli, sisäisen koron menetelmä ja rajakannattavuuden periaate, sekä niiden käyttöön liittyvät keskeiset taustaoletukset. Rajakannattavuuden kohdalla johdetaan myös talousteoreettisesti validi tapa laskea normaalimetsän optimaalinen kiertoaika ja osoitetaan sen vastaavan Faustmannin mallia.

## 4.1 Biologiset kiertoajat

Metsän fyysisellä kiertoajalla tarkoitetaan pisintä mahdollista aikaa, minkä metsikkö voi kokonaisuutena säilyä, ennen kuin se tuhoutuu esimerkiksi lahoamisen tai keloutumisen kautta. Mänty ja kuusi voivat saavuttaa suotuisissa olosuhteissa jopa 400–500 vuoden iän, joten tällä kiertoajalla on merkitystä lähinnä suojelualueilla sekä puistometsissä.

Toisinaan biologisella kiertoajalla tarkoitetaan myös sitä ikää, jolloin metsikön luontainen uudistaminen on suotuisin. Tämänkin kiertoajan käytännön merkitys on jäänyt vähäiseksi, koska yleensä puusto päätehakataan jo ennen kuin sen siemennyskyky alkaa oleellisesti heikentyä.

## 4.2 Suurimman puuntuotannon kiertoaika

Suurimman puuntuotannon tai keskimääräisen kasvun kiertoajalla (*maximum sustained yield, die Umtriebszeit des größten Holzmassenertrages, die Massenumtriebszeit*) pyritään mahdollisimman suureen puuntuotokseen. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että puustoa kasvatetaan, kunnes sen keskimääräinen vuotuinen kasvu saavuttaa maksiminsa. Tasaikäisessä metsikössä tämä tapahtuu silloin, kun puuston vuotuinen kasvu vähenee samaksi kuin sen keskimääräinen kasvu.

Suurimman puuntuotannon kiertoajassa maksimoidaan keskimääräistä hehtaarikohtaista vuotuista kuutiotuottoa. Metsätieteellisessä kirjallisuudessa kyseinen maksimointitehtävä on usein esitetty diskreetin ajan lausekkeena

$$Max_{\{t\}} V = \frac{M_t + \sum_{y=0}^{t-1} m_y}{t}, \quad (4.1)$$

jossa  $t$  tarkoittaa kiertoaika,  $M_t$  päätehakattavan puuston määrää vuonna  $t$  ja  $m_y$  kiertoajan kuluessa harvennushakkuissa poistettua puustoa (esim. Endres

1911 s. 262, 1923, s. 278, Nyssönen 1958 s. 10). Lauseketta (4.1) voidaan tosin pitää jossakin määrin ongelmallisena muotoiluna, koska se sisältää harvennukset, jotka kuitenkin oletetaan eksogeenisiksi.<sup>19</sup>

Jos harvennushakkuuta ei oteta huomioon, vastaava maksimointiongelma voidaan ilmaista jatkuva-aikaisen tarkastelun muodossa

$$\underset{\{t\}}{\text{Max}} V = \frac{f(t)}{t}, \quad (4.2)$$

jossa  $f(t)$  on puuston tilavuusfunktio. Näin hakkuusäänöksi saadaan ensimmäisen kertaluvun ehtona

$$f'(t) = \frac{f(t)}{t}. \quad (4.3)$$

Toisin sanoen, puusto tulee pätehtakata silloin, kun sen tilavuuden vuotuinen kasvu  $f'(t)$  vähenee samaksi kuin keskimääräinen kasvu. Suurimman puuntuotoksen kiertoajalla on siis luonnolliselta ja hyväksyttävältä tuntuva perusta: niin kauan kun metsän vuotuinen kasvu on keskimääräistä suurempi, puuston hakaamatta jättäminen lisää sen keskimääräistä kasvua.

Taloustieteilijät ovat kuitenkin arvostelleet voimakkaasti suurimman puuntuotoksen kiertoaikaa, koska siinä ei oteta huomioon kantohintaa, metsänkasvatuksen kustannuksia eikä metsään sijoitetun pääoman vaihtoehtokustannusta (korkoa). Lisäksi kaikki kasvatettu puu oletetaan samanarvoiseksi järeydestä ja laadusta välittämättä. Puutteidensa takia menetelmällä päädytään suhteellisen pitkiin kiertoaikoihin: Etelä-Suomessa suurimman puuntuotoksen kiertoajat ovat hoidetuissa istutuskusikoissa noin 95–115 vuotta ja hoidetuissa viljelymänniköissä 100–120 vuotta kasvupaikasta riippuen (Hyytiäinen ja Tahvonen 2001a).

Arvostelusta huolimatta suurimman puuntuotoksen kiertoaikaa on sovellettu yleisesti sekä Euroopassa että Pohjois-Amerikassa. Sen käyttöä on perusteltu ennen muuta metsien loppumisen uhalla ja sillä, että puuvaroja kasvattamalla yhteiskunta luo edellytykset kansantalouden kannalta tärkeän metsäteollisuuden laajentamiseen. Tämä tavoite sopi 1700-luvun ja 1800-luvun alun merkantilistiseen talouspolitiikkaan, joka korosti kansantalouksien omavaraisuutta tuotannossa, tuki halpoja tuotantopanoksia käyttävää kotimaan teollisuutta ja pyrki edistämään jalostettujen tuotteiden vientiä tuonnin kustannuksella. Puuta tarvitsivat etenkin kansantaloudelle tärkeät saha- ja vuoriteollisuus, mutta myös merenkulku ja voimakkaasti kasvanut väestö. Tilanne alkoi kuitenkin vähitellen muuttua 1800-luvun puolivälissä, kun metsäteollisuuden tuotannon laajeneminen voimisti raakapuun kysyntää, kivihiili korvasi puuta polttoaineena ja liberaalisen talouspolitiikan kannattajat nousivat yhteiskuntien johtopaikoille.

<sup>19</sup> Alkuperäisissä yhtälöissä kiertoaikaa merkittiin  $u$ :lla (*Umtriebszeit*). Yksinkertaisuuden vuoksi sitä merkitään jatkossa kuitenkin  $t$ :llä (*time*).

Toisinaan suurimman puuntuotoksen kiertoajan käyttöä näkee perusteltavan myös metsätalouden kestävyuden turvaamisella. Perustelu on kuitenkin virheelinen, koska todellisuudessa metsätalouden kestävyys – oli se sitten ekologista, taloudellista tai sosiaalista – ei edellytä puuntuotoksen maksimointia.

Suomessa kohoavan puuntuotannon merkitystä on korostettu etenkin 1930-luvulta lähtien, jolloin ”edistyvän metsätalouden” periaate luotiin. Erityisen keskeiseksi tavoitteeksi puuntuotannon lisääminen nousi niin sanotulla MERA-kaudella 1965–1975, jolloin kaikki vajaatuottoisiksi katsotut metsä- ja hakamaat haluttiin puuta kasvaviksi, ”täyteen tuotantotoimintaan”. Esimerkiksi vuonna 1966 säädetyssä Laissa metsähallinnosta (465/66) määrättiin, että metsähallinnon tehtävänä oli paitsi turvata valtakunnan metsien kestävä ja taloudellisesti edullinen, kohoava puun tuotto, myös käyttää maan tuottokyky mahdollisuuksien mukaan hyväksi ja saattaa vajaatuottoisessa tai tuottamattomassa tilassa olevat maat täyteen metsän kasvuun. Tässä yhteydessä ”kohoavalla puun tuotolla” viitattiin käytännössä suurimpaan puuntuotokseen, mikä on yleensä kuitenkin eri asia kuin liiketaloudellisesti edullisin tulos. Suomen metsätaloudessa ja -tieteessä onkin toisinaan sekoitettu keskenään käsitteet ”tuotos” ja ”tuotto” (esim. Vuokila 1956).<sup>20</sup>

Myös Yhdysvalloissa julkisia metsiä hoitavan Forest Servicen tehtävänä on ollut pyrkiä talousmetsissä suurimpaan kestäväan puuntuotokseen (Hyde 1980, Newman 1988, Klemperer 1996 s. 221). Tosin viime aikoina muiden tavoitteiden, kuten biologisen monimuotoisuuden ja virkistyskäytön edistämisen, merkitys on selvästi korostunut (A vision for the U.S. Forest Service... 2000).

### 4.3 Teknilliset kiertoajat

Teknillisellä kiertoajalla (*die technische Umtriebszeit*) tarkoitetaan sitä ajankohdtaa, jolloin suurin osa metsikön puista saavuttaa tiettyyn käyttötarkoitukseen vaaditun koon. Koska teknillisessä kiertoajassa otetaan huomioon puuston arvo (kantohinta), mutta ei metsänkasvatuksen kustannuksia tai korkoa, senkin perusteella päädytään helposti pitkiin kiertoaikoihin.

Teknillistä kiertoaikaa käytettiin ennen muuta siihen aikaan, kun ainoastaan järeällä puulla oli menekkiä ja huolenpito metsäteollisuuden kannattavuudesta katsottiin valtion velvollisuudeksi (Ericsson 1903 s. 147–148). Yleensä metsistä hakattiin vain sahapuun, pylvään, parrun, kaivospuun (proppsin) tai ratapölkyn läpimittavaatimukset täyttävät puut. Tietävästi ensimmäiset teknillisen kiertoajan käyttöä kuvaavat määräykset löytyvät feodaalijan Saksasta vuodelta 1488, kun läpimitaltaan alle 12 tuumaisten puiden hakkuita rajoitettiin (Fernow 1911 s. 36, 40). Tosin sitäkin ennen oli annettu määräyksiä mastopuiksi käytettyjen järeiden tammien säästämisestä.

<sup>20</sup> *Tuotoksella* tarkoitetaan tuotannon määrää tietyssä ajassa, esimerkiksi puumäärää tai marjasatoa. *Tuotto* puolestaan on jokin taloudellinen tulos, esimerkiksi metsään sitoutuneelle pääomalle saatu korvaus.

Suomessakin annettiin vielä 1800-luvun loppupuolella määräyksiä, joiden mukaan ainoastaan tietyn läpimitan täyttäviä puita sai hakata kruununmetsistä. Nämä puut piti luokitella vielä erikseen kahdeksi ryhmäksi: täysimittaisiksi sahapuiksi ja hirrenaiheiksi. Jälkimmäiset saivat vielä varttua muutaman vuosikymmenen saavuttaakseen täysimittaisen tukin vaatimukset. Kiertoaikana pidettiin sitä vuosimäärää, jonka kuluessa puut keskimäärin saavuttivat sahapuun paksuuden kuuden metrin korkeudella; maan eteläpuoliskossa kiertoajat olivat 100–160 vuotta ja pohjoispuoliskossa 140–300 vuotta (Lihtonen 1959 s. 27).

Sitä mukaa kun järeät luonnonmetsät hupenivat, puutuotteiden kysyntä kasvoi sekä sahojen ja paperitehtaiden tuotantoteknologia kehittyi, teknilliset kiertoajatkin muuttuivat. Esimerkiksi 1920-luvulla arvopuiden (sahapuiden) rinnankorkeusläpimitan tuli Suomessa olla vähintään 28 cm, mutta 1950-luvulla jo 20–22 cm:n läpimittaisetkin luettiin tukkipuiksi (Lakari 1930 s. 792, Lihtonen 1959 s. 312). Määrämittaharsinta jatkui Suomessa osin vielä 1950-luvulla, joten eräänlainen teknillinen kiertoaika oli maassamme käytössä varsin pitkään (Lihtonen 1959 s. 27).

#### 4.4 Suurimman metsänkoron kiertoaika

Suurimman metsänkoron (*Waldreinertrag*, *Waldrente*, *forest rent*) kiertoajassa ollaan kiinnostuneita metsästä saatavasta vuotuisesta nettotulosta. Peruseriaate on sama kuin suurimman puuntuotannon kiertoajassa, mutta nyt huomioon otetaan myös kantohinnat ja metsänkasvatuksen kustannukset.

Suurimman metsänkoron kiertoaika saadaan lausekkeesta

$$\underset{\{t\}}{\text{Max}V} = \frac{A_t + \sum_{y=0}^{t-1} D_y - c - tv}{t}, \quad (4.4)$$

joka maksimoi normaalimetsästä saatavan keskimääräisen vuotuisen nettotulon (Nyssönen 1958 s. 11, Lihtonen 1959 s. 29, Ilvessalo 1965 s. 377, Holopainen 1976 s. 98). Lausekkeessa  $A_t$  (*Abtriebsertrag*) tarkoittaa päätehakkuusta saatavia tuloja,  $D_y$  (*Durchforstungsertrag*) kasvatushakkuutuloja,  $c$  (*Kulturkosten*) metsänuudistamisen kuluja,  $t$  kiertoaikaa ja  $v$  (*Verwaltungskosten*) vuotuisia hallinto- ja hoitokuluja. Tästä saadaan hakkuuohje, jonka mukaan puusto kannattaa kaataa silloin, kun metsän rahallinen keskituotto (metsänkorko) on suurimmillaan.

Suurimman metsänkoron maksimointiongelma voidaan esittää myös jatkuva-aikaisen tarkastelun muodossa yksinkertaistetusti puuston tilavuusfunktion  $f(t)$ , kantohinnan  $p$  ja uudistamiskustannusten  $c$  avulla eli

$$\underset{\{t\}}{\text{Max}V} = \frac{pf(t) - c}{t}. \quad (4.5)$$

Kun maksimointiongelma ratkaistaan  $t$ :n suhteen, optimiehdoksi eli hakkuuohjeeksi saadaan

$$pf'(t) = \frac{pf(t) - c}{t}. \quad (4.6)$$

Puusto kannattaa siis kaataa silloin, kun sen arvokasvu  $pf'(t)$  on yhtä suuri kuin keskimääräinen nettotulo  $\frac{pf(t) - c}{t}$  kiertoajan kuluessa (Johansson ja Löfgren 1985 s. 91).

Thomsonin (1942 s. 28) mukaan suurimman metsänkoron periaate kehitettiin Saksassa merkantilismin ja nationalismin hengessä 1800-luvun puolivälissä. Sen avulla pyrittiin tarjoamaan vaihtoehto korkoa korolle laskujen tuottamille, epärealistisen lyhyiksi koetuille kiertoajoille ja negatiivisille maanarvoille, joiden katsottiin uhkaavan kotimaisen puunjalostusteollisuuden asemaa ja metsätalouden kestävyyttä. Toinen syy menetelmän kehittämiseen oli epäilemättä se, että puuta jalostavan teollisuuden laajentuessa, puun hinnan kohotessa ja tuotantopainosten kallistuessa tuli tarpeelliseksi lisätä kiertoaikalaskelmiin kantohinta ja metsänkasvatuksen kustannukset.

Tosin Endres (1923 s. 152) on esittänyt hieman erilaisen taustan metsänkorjoajatteluun synnylle. Hänen mukaansa metsänkorjo on vanhin tapa laskea metsän arvo, jonka vaaroista jo Taksin prinssin metsäkomissaari ja kameralisti Wilhelm Gottfried von Moser varoitti vuonna 1757 ilmestyneessä oppikirjassaan *Grundsätze der Forstökonomie*. Kuten aikaisemmin todettiin, myös ranskalaiset Duhamel du Monceau ja Varenne de Fenille puolsivat metsänkoron käyttöä jo 1700-luvun loppupuolella.

Keski-Euroopassa suurimman metsänkoron menetelmää on sovellettu laajalti sekä yksityismetsissä että valtionmetsissä, mutta Yhdysvalloissa sen käyttö on jäänyt vähäiseksi (Gregory 1987 s. 322, Möhring 2001). Menetelmän suosio Keski-Euroopassa johtuu osin siitä, että korkoa korolle laskien kiertoajat jäisivät metsiin sitoutuneiden suurten pääomien vuoksi helposti totuttua lyhyemmiksi. Tämä heijastuisi haitallisesti metsien markkinattomiin hyötyihin ja monikäyttöön, joilla on perinteisesti ollut tärkeä rooli keskieuropalaisessa metsätaloudessa.

Moog ja Borchert (2001) ovat esittäneet, että metsänkoron suosimisen taustalla saattaa olla myös muita syitä, kuten korkoa korolle laskujen muodostuminen metsätaloudessa eräänlaiseksi tabuksi samoin kuin metsäteollisuuden ja metsäammattikunnan vahvat ja toisinaan metsänomistajien kanssa ristiriitaiset tavoitteet. Samantapaiset institutionaaliset tekijät ja epäsymmetriseen informaatioon pohjautuvat päämies-agentti -tilanteet ovat saattaneet vaikuttaa myös Suomessa annettuihin kiertoaika- ja metsänkäsittelyohjeisiin.

Nimitys metsänkorjo on kuitenkin harhaanjohtava, koska pääoman vaihtoehtoiskustannusta ei menetelmässä oteta huomioon. Menetelmän kannattajien mu-

kaan näin voidaan tehdä, koska normaalimetsässä kustannukset katetaan suoraan samana vuonna saatavista hakkuutuloista. Tämä ajatustapa on kuitenkin aiheuttanut paljon kiistaa, ja taloustieteellisessä mielessä suurimman metsänkoron kiertoaika on pidetty yksiselitteisesti vääränä. Menetelmää voidaankin pitää pikemminkin kassavirta- kuin investointilaskelmana.

## 4.5 Yhden kiertoajan malli

Useat kuuluisat taloustieteilijät, kuten saksalainen Johann Heinrich von Thünen, englantilainen William Stanley Jevons, ruotsalainen Knut Wicksell sekä amerikkalaiset Harold Hotelling ja Irving Fisher, ovat esittäneet, että taloudellisesti optimaalinen kiertoaika tulisi laskea niin sanotulla yhden kiertoajan mallilla.<sup>21</sup> Siinä otetaan huomioon kantohinnan ja metsänhoitokustannusten ohella myös puustoon sidotun pääoman vaihtoehtoiskustannus. Taloudellisesti edullisin kiertoaika saadaan maksimoimalla *yhden* kiertoajan nettotulojen nykyarvo (*present value, PV*) eli

$$\text{Max}_{\{t\}} PV = \sum_{y=0}^t \left[ \frac{R_y - C_y}{(1+r)^y} \right]. \quad (4.7)$$

Lausekkeessa kiertoajan ( $t$ ) kuluessa saaduista puunmyyntituloista ( $R_y$ ) vähennetään metsänkasvatuksen kustannukset ( $C_y$ ). Koska tulot ja kustannukset realisoituvat eri ajanhetkillä  $y$ , ne diskontataan nykyhetkeen korolla  $r$ .

Taloustieteellisessä kirjallisuudessa oletetaan usein yksinkertaisuuden vuoksi, että puunmyyntitulot saadaan suoraan kertomalla puuston tilavuusfunktion  $f(t)$  antama puumäärä kantohinnalla  $p$ . Kun uudistamiskustannuksia merkitään  $c$ :llä, saadaan tavoitefunktioksi jatkuva-aikaisen tarkastelun muodossa

$$\text{Max}_{\{t\}} PV = pf(t)e^{-rt} - c. \quad (4.8)$$

Ratkaisemalla tämä lauseke saadaan 1. kertaluvun välttämättömäksi ehdoksi maksimille

$$pf'(t)e^{-rt} - rpf(t)e^{-rt} = 0, \quad (4.9)$$

<sup>21</sup> Von Thünen (1783–1850) esitti tietyvästi ensimmäisenä ajatuksen rajatuottavuudesta, ja myös Jevons (1835–1882) kuuluu neoklassisen matemaattisen mikrotaloustieteen ja erityisesti marginalismin tärkeimpiin kehittäjiin. Wicksell (1851–1926) kehitti mm. makrotaloustiedettä, Hotelling (1895–1973) mm. uusiutumattomien luonnonvarojen taloustiedettä ja Fisher (1869–1947) korkoteoriaa. Kahteen ensin mainittuun liittyy myös kovin inhimillisiä piirteitä: von Thünen halusi, että hänen hautakiveensä hakataan hänen johtamansa tasapainopalkan kaava, ja Jevons uskoi, että taloudelliset suhdanteet vaihtelivat auringonpilkkujen mukaan (Hall 1966, Landreth ja Colander 1994).

josta saadaan edelleen optimiratkaisuksi

$$\frac{f'(t)}{f(t)} = r. \quad (4.10)$$

Puusto tulisi siis hakata silloin, kun sen suhteellinen kasvu on yhtä suuri kuin reaalikorko. Vaikka ohje vaikuttaa intuitiivisesti oikealta, se ei ole nykyisen näkemyksen mukaan oikea ratkaisu kiertoaikaongelmaan. Virheelliseen ratkaisuun viittaa sekin, etteivät kantohinta tai metsänuudistamisen kustannukset vaikuta päätehakkuun optimaaliseen ajankohtaan.

Yhden kiertoajan mallin virheellisyys johtuu liian lyhyestä tarkasteluajasta. Mallissa ei oteta huomioon, että mitä myöhempään ensimmäisen puusukupolven hakkuita lykätään, sitä myöhemmin tulevat tulot kaikkien seuraavienkin periodien (kiertoaikojen) hakkuista. Koska paljaalle maalle (maapohjalle) ei laskeeta arvoa, yhden periodin mallilla lasketut kiertoajat muodostuvat liian pitkiksi – olettaen, että paljaan maan arvo on positiivinen. Jos paljaan maan arvo onkin negatiivinen, kiertoajat muodostuvat vastaavasti liian lyhyiksi.

## 4.6 Maankorkoteoria

Faustmannin<sup>22</sup> yli 150 vuotta sitten esittämää mallia paljaan maan arvon laske-  
miseksi pidetään taloustieteellisesti johdonmukaisena ja oikeana lähtökohtana  
ratkaista metsän optimaalinen kiertoaika. Siksi sitä tarkastellaan seuraavassa  
hieman perusteellisemmin kuin edellä esitettyjä muita kiertoajan määrittämispe-  
riaatteita.

### 4.6.1 Faustmannin malli

Faustmann oivalsi, että metsämaan arvoa määritettäessä on tarkasteltava yhden  
kiertoajan sijaan kiertoaikojen ääretöntä sarjaa. Hänen alkuperäisessä yhtälös-  
sään

---

<sup>22</sup> Vallankumousta seuranneiden epävakaiden olojen takia Faustmann ei saanut vakituista työpaikkaa, vaan joutui elättämään perheensä seuraavat kahdeksan vuotta toimimalla *Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung* -lehden avustajana, tekemällä metsäsuunnitelmia ja rakentamalla vaimonsa kanssa keittiössä ns. Faustmannin peilihypsometrejä, joilla puun pituus saatiin selville ilman työläitä trigonometrisiä laskelmia (Schäfer 1990 s. 163, Löfgren 2000). Hän kirjoitti 1850-luvulla AFJZ-lehteen viisi artikkelia, joista kolme käsitteli puuston ja metsän raha-arvon määrittämistä, yksi hypsometrin toimintaperiaatetta ja yksi metsäteiden rakentamista basalttialueelle. Maankorkoteoriaansa pohjalta Faustmann kehitti myös metsikön kustannusarvon (*Bestandskostenwert*) laskukaavan vuonna 1854 – samana vuonna kuin saksilainen ylimetsänhoitaja Georg Oetzel esitti niinikään maankorkoteorian pohjalta kehittämänsä metsikön odotusarvon (*Bestandserwartungswert*) laskukaavan (Endres 1911 s. 107, 117). Vuonna 1857 Faustmann nimettiin päämetsänhoitajaksi Babenhausenin alueelle Heseniniin, missä hän toimi kuolemaansa, vuoteen 1876, asti.

$$B = \frac{R}{0,0p} = \frac{E + rD - C(1,0p)^u}{(1,0p)^u - 1} - \frac{A}{0,0p} \quad (4.11)$$

maanarvo  $B$  (*Bodenreinertrag*, *Bodenertragswert*, *Bodenwert*) saadaan diskonttaamalla vuotuiset metsänkasvatuksen nettotulot  $R$  (*Bodenrente*) nykyhetkeen korolla  $p$ .

Lausekkeessa (4.11) kiertoajan lopussa saataviin päätehakkuutuloihin  $E$  (*Haubarkeitsertrag*) lisätään kiertoajan loppuun prolongoidut harvennustulot, joita Faustmann merkitsi termillä  $rD$ . Näin saadusta summasta vähennetään niinkään kiertoajan loppuun prolongoidut metsänuudistamisen kustannukset  $C$ . Faustmann siis käytti harvennustulojen ja uudistamiskustannusten kohdalla jostakin syystä hieman erilaista prolongoinnin merkintätapaa. Koska tarkastelun kohteena on kiertoaikojen ääretön sarja, edellä saatu lauseke täytyy kertoa termillä  $1/[(1,0p)^u - 1]$ , jolloin kaikki tulot ja menot diskontataan metsikön perustamishetkeen. Näin saadusta maanarvosta Faustmann vähensi vielä vuotuiset, nykyhetkeen diskonttatut hallintokulut  $A$  (*Ausgabe für Verwaltung*), joiden hän oletti pysyvän vuodesta toiseen saman suuruisina. Kiertoaikaa on merkitty  $u$ :lla (*Umtriebszeit*).

Diskonttaustekijää kuvattiin Faustmannin aikaan termillä  $(1,0p)^{-u}$ , mutta nykyään sitä merkitään tavallisesti termillä  $(1+r)^{-t}$ . Termistä  $(0,0p)^{-1}$  taas käytetään nykyään merkintää  $r^{-1}$ . Näin ollen Faustmannin alkuperäinen kaava voidaan ilmaista lausekkeena

$$B = \frac{E + D(1+r)^{t-y} - C(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} - \frac{A}{r}, \quad (4.12)$$

missä  $y$  on metsikön ikä harvennushakkuussa. Nykyisin Faustmannin kaava kirjoitetaan diskreetissä muodossa usein myös seuraavasti:

$$L_e = \frac{\sum_{y=0}^t (R_y - C_y)(1+r)^{t-y}}{(1+r)^t - 1}, \quad (4.13)$$

jossa maan arvoa merkitään lyhenteellä  $L_e$  (*land expectation value*, *LEV*) ja kiertoaikaa  $t$ :llä (*time*).<sup>23</sup> Maan arvo lasketaan aikaisempaan tapaan vähentämällä puunmyyntituloista ( $R_y$ ) kustannukset ( $C_y$ ). Koska tulot ja kustannukset realisoituvat eri ajanhetkillä  $y$ , ne prolongoidaan päätehakkuuajankohtaan korolla  $r$ . Tämän jälkeen kaikkien kiertoaikojen nettotulot diskontataan metsikön perustamishetkeen käyttämällä päättymättömän sarjan diskonttaustekijää  $1/[(1+r)^t - 1]$  aivan kuten Faustmannkin teki. Yhtälössä voidaan esittää Faustmannin tapaan

<sup>23</sup> Maan arvosta käytetään myös nimityksiä *soil expectation value (SEV)*, *site expectation value* ja *bare land value*.

vielä vuotuiset hallintokulut, joskaan niillä ei ole eksogeenisesti määräytyvinä vaikutusta kiertoaikaan.

Usein näkee Faustmannin kaavan esitettävän hieman yksinkertaisemmassa muodossa siten, että puunmyyntitulot ja metsänkasvatuksen kustannukset diskontataan suoraan ensimmäisen kiertoajan alkuun. Tällöin maan arvoa kuvaava lauseke supistuu muotoon

$$L_e = \frac{\sum_{y=0}^t (R_y - C_y)(1+r)^{-y}}{1 - (1+r)^{-t}}. \quad (4.14)$$

On helppo huomata, että Faustmannin kaava on hyvin lähellä yhden kiertoajan mallia. Jos yhden kiertoajan mallin yhteydessä esitetty lauseke (4.7) kerrotaan päättymätöntä sarjaa kuvaavalla termillä  $(1+r)^t / [(1+r)^t - 1]$  tai termillä  $1/[1 - (1+r)^{-t}]$ , päädytään Faustmannin kaavan edellä esitettyihin muotoihin (4.13) ja (4.14).

Faustmannin malli johtaa maksimoimaan paljaan maan arvoa ja teoriaa nimitetään maankorkoteoriaksi, koska maapohjan ajatellaan olevan niukka tuotantontekijä. Ajatus on sama kuin jo aikanaan taloustieteen klassisen koulukunnan ensimmäisillä edustajilla 1700-luvun lopussa ja 1800-luvun alussa: niukkojen tuotantovälineiden omistajat saavat taloudellisen ylijäämän, jota kutsutaan tuotantoon sitoutuneen pääoman luonteen mukaan joko voitoksi tai maankoroksi (*Bodenrente, land rent*). Maapohja luettiin tuohon aikaan erilliseksi pääomäkäsitteeksi ja maapohjalle saatava korko rinnastettiin voittoon.

Metsätieteessä nimitys maankorkoteoria on kuitenkin aiheuttanut paljon sekaannusta. Osa siitä on johtunut väärinkäsityksestä, jonka mukaan maankorkoteoriaa ja siten myös Faustmannin mallia voitaisiin soveltaa vain paljaaseen metsämaahan. Todellisuudessa maankorkoteoriassa on kyse metsänkasvatuksen tuottaman voiton maksimoinnista ja Faustmannin mallia voidaan käyttää täysin riippumatta siitä, onko kyseessä paljas metsämaa vaiko kasvuisa metsä. Kummassakin tapauksessa tavoite on sama: maksimoida nettotulojen nykyarvo kiinteälle tuotantontekijälle eli maalle.

### *Faustmannin mallin jatkuva-aikainen muoto*

Faustmannin malli asettaa varsin mittavia vaatimuksia tarvittavalle informaatiolle. Jos taloudellisesti optimaalinen kiertoaika lasketaan sen perusteella, on tiedettävä tulevaisuuden hakkuumäärät, hakkuiden ajoittuminen, poistumiin puutavaralajirakenne, puun laatu ja kantohinnat puutavaralajeittain ikuisuuteen asti. Lisäksi tarvitaan täydelliset tiedot metsänhoitotöiden määristä, niiden ajoit-

tumisesta ja kustannuksista sekä metsälön hallintomenoista, kuten veroista, metsänhoitomaksuista ja vakuutuksista.<sup>24</sup>

Taloustieteellisessä kirjallisuudessa Faustmannin kaava esitetään yleensä yksinkertaistetussa, jatkuva-aikaisen tarkastelun muodossa

$$Max_{\{t\}} PV = [pf(t)e^{-rt} - c](1 + e^{-rt} + e^{-r2t} + e^{-r3t} + \dots). \quad (4.15)$$

Lausekkeessa  $p$  kuvaa aikaisempaan tapaan kantohintaa,  $r$  korkokantaa ja  $f(t)$  puuston tilavuutta ajan funktiona. Puunmyyntitulot saadaan yksinkertaisesti kertomalla puuston tilavuus  $f(t)$  kuutiohinnalla  $p$ . Termi  $c$  kuvaa uudistamiskustannuksia. Koska kyseessä on suppeneva geometrinen sarja, saadaan

$$\sum_{i=0}^{\infty} e^{-rit} = \frac{1}{1 - e^{-rt}},$$

jolloin lauseke (4.15) voidaan esittää muodossa

$$Max_{\{t\}} PV = \frac{pf(t)e^{-rt} - c}{1 - e^{-rt}}. \quad (4.16)$$

Tästä saadaan 1. kertaluvun ehdoksi

$$[pf'(t)e^{-rt} - rpf(t)e^{-rt}](1 - e^{-rt})^{-1} - re^{-rt}(1 - e^{-rt})^{-2}[pf(t)e^{-rt} - c] = 0, \quad (4.17)$$

joka voidaan edelleen kirjoittaa muotoon

$$pf'(t) - rpf(t) - r[pf(t)e^{-rt} - c](1 - e^{-rt})^{-1} = 0 \quad (4.18)$$

$$\Rightarrow pf'(t) = rpf(t) + rV^F, \text{ jossa } V^F = \frac{pf(t)e^{-rt} - c}{1 - e^{-rt}}. \quad (4.19)$$

Termi  $f'(t)$  tarkoittaa puuston vuotuista kasvua; kun se kerrotaan kantohinnalla, saadaan  $pf'(t)$ , joka kuvaa arvokasvua. Termi  $rpf(t)$  on puustoon sidotun pääoman vaihtoehtoiskustannus: sijoittamalla puuston arvo  $pf(t)$  muualle saadaan pääomalle vuotuinen tuotto  $rpf(t)$ . Viimeinen termi eli  $V^F$  on maapohjan eli paljaan maan arvo. Pääomateorian mukaan minkä tahansa varallisuusmuodon arvo on yhtä kuin sen tarjoamien palvelusten kapitalisoitu arvo ajan kuluessa. Näin ollen maapohjan arvo saadaan laskemalla yhteen kaikkien sen tuottamien puusukupolvien nettotulon nykyarvo ikuisuuteen asti.

<sup>24</sup> Osa näistä tietovaatimuksista koskee myös edellä esitettyjä kiertoajan muita määrittämisperiaatteita.

Yhtälöstä (4.19) saadaan seuraava hakkuuohje: kaada puusto silloin, kun sen arvokasvu  $pf'(t)$  on yhtä suuri kuin puustoon sidotun pääoman vaihtoehtoiskustannuksen  $rpf(t)$  ja maapohjaan sidotun pääoman vaihtoehtoiskustannuksen  $rV^F$  summa. Tätä ohjetta kutsutaan Faustmannin säännöksi. Koska kyseessä on pitkän aikavälin analyysi, jossa kaikkien muuttujien, kuten kantohintojen, koron ja puuston kasvattamisen kulujen, oletetaan pysyvän vakioina, ja metsä uudistetaan aina välittömästi päätehakkuun jälkeen, saadaan peräkkäiset kiertoajat aina yhtä pitkiksi.

Lausekkeesta (4.19) saadaan edelleen yhtälö

$$\frac{f'(t)}{f(t)} = r + r \frac{V^F}{pf(t)}, \quad (4.20)$$

josta nähdään selvästi ero yhden kiertoajan mallin mukaiseen optimitulokseen. Ei siis olekaan optimaalista hakata puustoa silloin, kun sen suhteellinen kasvu  $f'(t)/f(t)$  vastaa korkotasoa  $r$ . Oikeassa ratkaisussa korkoon on vielä lisättävä paljaan maan arvon ja puuston arvon suhteen avulla laskettu vaihtoehtoiskustannus

$$r \frac{V^F}{pf(t)}.$$

Yhtälöstä (4.20) on helppo huomata, että jos maapohjan arvo  $V^F$  on positiivinen, metsikkö kannattaa hakata aikaisemmin kuin yhden kiertoajan mallissa. Jos taas paljaan maan arvo on negatiivinen, päätehakkuuta kannattaa hieman lykätä yhden kiertoajan mallin tuloksiin verrattuna, eikä uutta metsää kannata perustaa, ellei laki tai muut syyt sitä vaadi. Jos paljaan maan arvo on sattumalta nolla, päädytään samaan tulokseen kuin yhden kiertoajan mallilla.<sup>25</sup>

Usein on esitetty, että maapohjan arvo  $V^F$  voidaan jättää pois laskelmista, koska paljaalla metsämaalla ei ole etenkin syrjäisillä seuduilla vaihtoehtoista käyttömuotoa. Tämä on kuitenkin virheellinen päätelmä: jos metsätalouden harjoittamista aiotaan jatkaa päätehakkuun jälkeen, paljaan maan vaihtoehtoinen käyttömuoto on tietenkin seuraavan puusukupolven kasvatus. Toisinaan maapohjalla saattaa olla vaihtoehtoinen arvo myös esimerkiksi virkistys- tai luonnonsuojelualueena, joskus myös maatalousmaana.

#### 4.6.2 Preblerin ratkaisu optimointiongelmaan

Faustmannin jälkeen maankorkoteoriaa kehitti etenkin hovineuvos Max Robert Prebler, joka toimi Saksissa, Dresdenin lähistöllä sijaitsevan kuuluisan Tharandtin metsäakatemian maatalous- ja metsätekniiikan professorina. Hän oli erittäin tuottelias ja arvostettu tutkija, joka kirjoitti paljon rationaalista metsätaloudesta.

<sup>25</sup> Hyytiäisen ja Tahvosen (2001b) mukaan paljaan maan arvo voi olla negatiivinen etenkin karuilla ja karuhkoilla mäntymailla, jos käytetään keinollista uudistamista ja laskentakorko on yli 4 prosenttia.

ta, metsänkasvatuksen kannattavuudesta ja metsien taloudellisesta hyödyntämisestä ylipäänsä (esim. Preßler 1860).<sup>26</sup>

Saksalaisten metsäalan oppikirjojen mukaan nimenomaan Preßlerin vuosina 1858–1885 laatimat lukuisat teokset, joissa hän kiivaasti puolusti nettonykyarvon käyttöä kiertoajan määrittämisessä, loivat pohjan metsäekonomian myöhemmälle kehitykselle. Esimerkiksi Gustav Heyerin (1871 s. vii–viii) mukaan insinöörin koulutuksen saaneen, mutta metsätalouteen jo nuorena perehtyneen Preßlerin teokset olivat aikanaan lähes vallankumouksellisia ja herättivät syvää epäluuloa korkea-arvoisten metsävirkamiesten keskuudessa. Tietävästi Preßler sai paljon vaikutteita Königin teoksesta *Forstmatematik*, esimerkiksi niin sanotun näyttäjäprosentin laskentatavan hän ilmeisesti kehitti Königin esittämästä puuston arvokasvun (*Werthszunahmeprozent*) määrittämismallista (Heyer 1871, Thomson 1942 s. 24).

### Näyttäjäprosentti

Preßler johti Faustmannin kaavasta ns. näyttäjäprosentin (*Weiserprozent, indicating per cent*), joka ilmoittaa, miten suuri korko puustoon ja maapohjaan sidotulle pääomalle saadaan, kun metsän kasvatusta jatketaan. Vuosien varrella on esitetty hieman erilaisia tapoja laskea näyttäjäprosentti, mutta peruseriaate on niissä kaikissa sama. Friedrich Judeich ja Gustav Heyer esittivät näyttäjäprosentille  $p$  lausekkeen

$$p = 100 \left( \sqrt[n]{\frac{A_{x+n} + M + V}{A_x + M + V}} \right) - 1, \quad (4.21)$$

jossa  $A_{x+n}$  on  $x+n$  -ikäisen metsikön arvo,  $M$  maapohjan arvo ja  $V$  metsänhoitokustannusten nykyarvo (Ericsson 1903 s. 93–101). Kyseinen lauseke on saatu ratkaisemalla korkokanta  $p$  koronkorkolaskun peruskaavasta

$$K_n = \left(1 + \frac{p}{100}\right)^n k,$$

jossa  $k$  on alkuperäinen pääoma ja  $K_n$  kasvanut pääoma  $n:n$  jakson kuluttua. Suomen metsätieteellisessä kirjallisuudessa näyttäjäprosentti on usein esitetty hieman yksinkertaisemmin lausekkeella

$$p = \frac{100 \cdot I_a}{A_{maa} + A_{puusto}}, \quad (4.22)$$

<sup>26</sup> Preßler (1815–1886) syntyi Dresdenissä ja valmistui sen teknillisestä korkeakoulusta vuonna 1835. Hänet nimitettiin vain 25-vuotiaana Tharandtin metsäakatemian metsämatematiikan professoriksi, josta hän jäi eläkkeelle vuonna 1883 (Schwappach 1927 s. 67, Johansson ja Löfgren 1985 s. 74).

jossa  $I_a$  on puuston vuotuinen arvokasvu,  $A_{maa}$  maapohjan arvo ja  $A_{puusto}$  puuston arvo (esim. Kilkki 1963, Pukkala 1994 s. 39, Poso 1997 s. 39). Samalla ei ole kuitenkaan aina ilmaistu selkeästi, että näyttäjäprosentti voidaan suoraan johtaa Faustmannin kaavasta. Tämä on helppo osoittaa: Faustmannin sääntö (4.19) voidaan esittää muodossa

$$r = \frac{pf'(t)}{pf(t) + V^F}, \quad (4.23)$$

jossa  $V^F$  on paljaan maan eli maapohjan arvo. Lausekkeen (4.23) sisältö on täsmälleen sama kuin edellä esitettyjen näyttäjäprosentin kaavojen (4.21) ja (4.22). Kaikki yhtälöt ilmoittavat, kuinka suuri korko ( $p$  tai  $r$ , lausekkeesta riippuen) puustoon ja maapohjaan sidotulle pääomalle saadaan, jos metsän kasvatusta jatketaan.

Jotkut suomalaiset metsäntutkijat (esim. Nyysönen 1996, 1999, Lappi 1999) ovat esittäneet, että käytännön metsätaloudessa metsiköiden edullisin uudistamisjärjestys voidaan määrittää ns.  $v$ -arvolla (*visareprocent*). Sen lauseke on esitetty muodossa

$$v = I_a - p(B + A), \quad (4.24)$$

jossa  $I_a$  on puuston vuotuinen arvokasvu (mk/ha),  $p$  korko,  $B$  maapohjan arvo (mk/ha) ja  $A$  puuston arvo (mk/ha). Täällöinkin on yleensä jäänyt eksplisiittisesti mainitsematta, että myös  $v$ -arvo voidaan johtaa suoraan Faustmannin mallista. Näyttäjäprosentti ja  $v$ -arvo kuvaavat samaa asiaa hieman eri yksiköin: jos näyttäjäprosentti on suurempi kuin vaihtoehtoisen sijoituskohteen tuotto,  $v$ -arvo on positiivinen ja metsän kasvatusta kannattaa vielä jatkaa. Jos taas näyttäjäprosentti on vaihtoehtoisen sijoituskohteen tuottoa pienempi ja  $v$ -arvo negatiivinen, metsikkö kannattaa päätehakata.

$V$ -arvon käyttö levisi Suomeen muista Pohjoismaista 1960-luvun alussa. Laskentamenetelmän yhteyttä Faustmannin malliin on meillä kuitenkin jossain määrin hämärtänyt se, että  $v$ -arvo on toisinaan esitetty muodossa

$$v = w - i(A - c) - i \left[ B - \frac{c}{(1+i)^u - 1} \right], \quad (4.25)$$

jossa  $w$  on puuston vuotuinen arvokasvu (mk/ha),  $i$  laskentakorkokanta,  $A$  puuston hakkuuarvo (mk/ha),  $c$  uudistamiskustannus (mk/ha),  $B$  metsitetyn maan arvo (mk/ha) ja  $u$  kiertoaika (Poso 1965, 1990, 1994, 1997). Kyseinen lauseke on voinut johtaa jotkut päätelemään, että uudistamiskustannukset voitaisiin suoraan vähentää edellisen päätehakkuun tuloista, ts. uudistamiskustannuksille ei

tarvitsisi laskea vaihtoehtoiskustannusta.<sup>27</sup> Tämä on kuitenkin virheellinen päätelmä, koska hieman erilaisesta muotoilusta huolimatta (4.25) vastaa lauseketta (4.24) ja näin ollen myös Faustmannin mallin mukaista ratkaisua.

### *Maankorkoteoriaa arvostellaan voimakkaasti*

Julkistamisestaan lähtien maankorkoteoria kohtasi ankaraa vastustusta, eikä sitä tunnustettu metsänjärjestelyn ohjeeksi esimerkiksi Preussin valtionmetsissä (Cajanus 1914, Thomson 1942 s. 28, Möhring 2001). Varsinkin julkisen hallinnon metsäviranomaiset ja metsänhoitoa painottavat ammattihenkilöt asettuivat vastustamaan teoriaa. Eryitysen kriittisesti suhtauduttiin Faustmannin ja Preßlerin ajatukseen siitä, että jokaisen metsikön hakkuukypsyysttä tuli tarkastella erikseen vertaamalla näyttäjäprosenttia vaadittuun korkokantaan (Endres 1911). Arvostelijoiden mukaan tällainen metsikkötason tarkastelu johti harhaan: todellisuudessa metsien käsittelyssä tuli ottaa huomioon koko metsälö, sen tuottamat tasaiset työ- ja hakkuumahdollisuudet sekä poltto- ja kotitarvepuun saanti.

Maankorkoteorian arvostelijat väittivät edelleen, että puustoon sidotulle pääomalle ei tarvitse laskea korkoa, kun lähtökohtana ovat luonnonmetsät, jotka on saatu ilmaiseksi (esim. Lönnroth 1919 s. 297–298, Roth 1926 s. 9, 57–58, Chapman 1935 s. 76–78). Lisäksi esitettiin virheellisesti, että Faustmannin malli soveltuisi vain sellaiseen tilanteeseen, jossa maa todellakin oli paljas – ja jos maa oli paljas, se ei teknisesti ottaen ollut enää metsää. Edelleen väitettiin, ettei Faustmannin kaavalla kannata tehdä tarkkoja laskelmia, koska puun arvo ei ole vakio, vaan nousisi jo lähitulevaisuudessa.

Neljäs peruste maankorkoteorian hylkäämiselle olivat totutusta poikkeavat tulokset. Heti kun kaavassa käytettiin markkinoilla vallitsevaa tai muuten ”järkevää” korkoa, päädyttiin arvostelijoiden mielestä ”epärealistisiin” kiertoaikeisiin ja negatiivisiin maanarvoihin. Johtopäätöstä, jonka mukaan metsänkasvatus oli tappiollista toimintaa, pidettiin jotakuinkin mahdottomana. Jotkut maankorkoteorian arvostelijat väittivät myös, ettei pelkällä maapohjalla voi olla mitään ennalta tai erikseen laskettavissa olevaa hintaa (Chapman 1935 s. 78). Toiset taas pitivät käsittämättömänä sitä, että puusto tulisi hakata juuri siinä vaiheessa, kun sen arvo vielä kasvaa selvästi joka vuosi.

Myöhemmin maankorkoteorian kannattajat – mm. Münchenin yliopiston metsäprofessori Max Endres, jota on pidetty viimeisenä merkittävänä saksalaisena maankorkoteorian kehittäjänä (Möhring 2001) – ottivat käyttöön niin sanotun ”metsätaloudellisen korkokannan”, joka oli markkinakorkoa jonkin verran alhaisempi. Sen käyttöä perusteltiin muun muassa metsänkasvatuksen riskittömyydellä ja nousevilla kantohinnoilla, mutta tämäkin aiheutti runsaasti erimieli-

---

<sup>27</sup> ”Uudistamiskustannukset on erotettu kokonaan omaksi laskentaryhmäksi, eivätkä ne vaikuta B:n arvoon. Tässä on selvä ero klassilliseen König–Faustmannin maan arvon laskentamenetelmään.” (Poso 1965 s. 263)

syöttä. Samoja osin kyseenalaisia perusteluja käytetään metsätaloudessa toisinaan vieläkin.

Jälkikäteen arvioiden varauksellinen suhtautuminen maankorkoteoriaan oli ymmärrettävää ainakin kahdesta syystä. Ensinnäkin Faustmannin mallilla saadut tulokset olivat selvästi ristiriidassa vallitsevien metsänkäsitteilytapojen kanssa; metsien käsittelyssä suosittiin Hartigin ja Cottan oppien mukaisesti pitkiä kiertoaikoja sekä lieviä ja harvoin toistuvia harvennuksia. Tuolloin ei myöskään välttämättä ymmärretty, että Faustmannin mallin käyttöön liittyy vahvoja oletuksia muun muassa pääoma- ja maamarkkinoiden toiminnasta sekä täydellisestä informaatiosta, jotka eivät ehkä olleet voimassa 1800-luvulla.

1800-luvulla ei myöskään vielä ollut teoreettista perustetta sille, miksi juuri nettohyötymaksimointi olisi ollut taloudellisesti oikea kriteeri. Lisäksi kiertoaikaan liittyvän optimointiongelman ratkaiseminen olisi edellyttänyt erittäin hyvää taloustieteellistä vaistoa tai differentiaalilaskennan hallitsemista, joista jälkimmäinen lienee 1800-luvulla rajoittunut vain matemaatikoiden ja joidenkin luonnontieteilijöiden piiriin. Kansantaloustieteeseenkin Isaac Newtonin ja Gottfried Wilhelm Leibnitzin 1660- ja 1670-luvuilla toisistaan tietämättä kehittämä differentiaalilaskenta tuli yleisesti vasta vuoden 1870 jälkeen rajahyötyteorian myötä (Matematiikan... 1994). Suomeen differentiaalilaskenta levisi Pietarista ja Uppsalasta jo 1700-luvulla (Pihkala 2000 s. 546), mutta maamme talous- tai metsätieteessä sitä ei omaksuttu vielä pitkään aikaan.

### *Maankorkoteorian leviäminen*

1800-luvun loppupuolella maankorkoteoriaa kehittivät ja systematisoivat ennen muuta Preblerin oppilaat Friedrich Judeich ja Gustav Heyer.<sup>28</sup> Heidän tunnettujen oppikirjojensa välityksellä teoria levisi myös muihin maihin. Pohjoismaissa Faustmannin säännön esittivät tietävästi ensimmäisinä Ruotsin metsäopiston johtaja C.G. Holmertz ja tanskalainen Jörgen Pedersen Gram vuonna 1876. Holmerzin kirjan *Studier i skogstaxation* vaikutus jäi kuitenkin vähäiseksi, koska hyvin harva metsäntutkija ymmärsi kirjan sisältämää taloustieteellistä perustelua (Stridsberg 1956 s. 26, Löfgren 1989, 1995, Löfgren ja Mattsson 1995).<sup>29</sup>

---

<sup>28</sup> Judeich (1828–1894) toimi Tharandtin metsäakatemian johtajana ja hänet tunnetaan metsänjärjestelyä koskevista kirjoistaan. Gustav Heyer (1826–1883) puolestaan toimi metsätalouden liiketieteen professorina mm. Giessenin ja Münchenin yliopistoissa sekä Preussin metsäakatemian ensimmäisenä johtajana Mündenissä (Mantel ja Pacher 1990).

<sup>29</sup> Tanskalaisten tutkijoiden mukaan heidän maanmiehensä, metsätieteen professori J.F. Hansen esitti taloudellisesti optimaalisen kiertoajan ratkaisun idean maatalouskokoukselle pitämässään esitelmässään vuonna 1852 (Helles ja Linddal 1997). Täydellisenä ratkaisuna kuitenkin julkaistiin vasta Hansenin kuoleman jälkeen, vuonna 1877, ja silloinkin kustannusten minimointiongelmana. Näin ollen ei ole varmaa, mikä oli Hansenin alunperin kirjoittama osuus. Myös Brazee ja Amacher (2000) ovat esittäneet Faustmannin mallin dualin eli kustannusten minimointiongelman ratkaisuihin – yli sata vuotta Hansenin jälkeen.

Suomeen maankorkoteoria levisi 1850- ja 1860-luvuilla, kun Saksissa sijaitsevaan Tharandtin metsäakatemiaan metsänhoitajakoulutukseen lähetetyt ja muun muassa Preßlerin johdolla opiskelleet henkilöt palasivat kotimaahansa. Eräistä heistä, kuten Jacob Henrik Alexander af Forsellesta (joka toimi myöhemmin Metsähallituksen ylitirehtöörinä), Johan Emil Furuhjelmista ja Anton Gabriel Blomqvistista tuli sittemmin Suomen ensimmäisiä metsätalouden opettajia ja johtajia vuonna 1858 perustettuun Evon metsäopistoon. Se vastasi maamme metsänhoitajien koulutuksesta ja metsäntutkimuksesta vuoteen 1908 asti. Yhtenä kauan käytettynä oppikirjana siellä oli Cottan laatima ja Tharandtin metsäakatemian johtajan Edmund von Bergin vuonna 1849 uusima metsänhoidon klassikko *Anweisung zum Waldbau* (Leikola 1988). Näin Saksan metsätieteen keskeisten henkilöiden vaikutus ulottui Suomeen asti.

Maankorkoteorian soveltuvuudesta käytännön metsätalouteen ryhdyttiin Suomessa keskustelemaan laajemmin vasta 1900-luvun alussa. Tällöin metsätieteellinen tutkimus alkoi kehittyä maassamme – paljolti A.K. Cajanderin määrätietoisten ponnistelujen ansiosta. Kuten monissa muissakin maissa, maankorkoteoria kohtasi meillä voimakasta vastustusta, mikä johtui ainakin osaksi metsien häviämisen pelosta ja Faustmannin mallin tuottamista negatiivisista maanarvoista. Eräs keskeinen seuraus tästä oli se, että Suomessa metsän arvo ryhdyttiin laskemaan *metsitetylle* maalle.

#### 4.6.3 Ohlinin vaihtoehtoinen ratkaisutapa

Vuosina 1907–1917 Ruotsissa käytiin kiivas väittely (*räntabilitetsstriden, lönsamhetsstriden*) kiertajoista, kun useat metsätalouden alalla toimivat vaikutusvaltaiset henkilöt asettuivat vastustamaan maankorkoteoriaa. Erimielisyyttä aiheuttivat ennen muuta Faustmannin kaavalla saadut, totuttua lyhyemmät kiertajat ja negatiiviset maanarvot (Cajanus 1914, Streyffert 1938, Dickson 1956, Löfgren 1990).

Väittelyä käytiin itse asiassa neljän eri lähestymistavan kannattajien kesken. Monet johtavat ruotsalaiset metsänhoitajat puolsivat perinteistä, suurimman puuntuotoksen tavoittelua, toiset taas pitivät Faustmannin mallia oikeana lähestymistapana. Kolmas ryhmä kannatti metsänkoron soveltamista ja neljäs ryhmä metsäekonomian professori Tor Jonsonin vuonna 1917 esittämää ”suurimman voiton” periaatteen soveltamista metsänkasvatukseen. Väittely oli osin kiivasta, ja etenkin Jonson pyrki useissa yhteyksissä osoittamaan maankorkoteorian vääräksi (Ohlin 1921).<sup>30</sup>

Sekaannusta lisäsi vielä se, että Tukholman kauppakorkeakoulun arvostettu professori Eli Heckscher (1912) kannatti yhden kiertajan mallia. Jälkikäteen on arveltu, että Heckscher päätyi harhapoluille, koska hän erehtyi seuraamaan maanmiehensä, tunnetun taloustieteilijän Knut Wicksellin 1900-luvun alussa

<sup>30</sup> Jonson tutki mm. puun tilavuuden määrittämistä runkomuotolukujen avulla ja hänen tuloisiaan on käytetty yleisesti puutavaralaji- ja kasvunlaskentataulukoissa.

esittämää ajatusta viinintuotannon ja metsänkasvatuksen samankaltaisuudesta. Tässä tapauksessa Heckscher kuitenkin luotti liikaa taloustieteelliseen vaistonsa; hänen tietonsa matematiikasta eivät tiettävästi olleet kovin vahvat (Löfgren 1983). Wicksell puolestaan oli seurannut Stanley Jevonsin jo vuonna 1876 esittämää erheellistä ajatusta.<sup>31</sup>

Kukaan näistä kuuluisista kansantaloustieteilijöistä ei kuitenkaan huomannut, että viinin kypsymistä ja metsänkasvatusta ei voida suoraan verrata toisiinsa. Sadonkorjuun jälkeen viini varastoidaan kellariin, missä kypsyminen eli arvokasvu tapahtuu ilman maa-alaan sitoutunutta pääomaa (kellarin rajallista kokoa lukuunottamatta). Metsän arvokasvu sen sijaan on koko ajan sidottu maapohjaan, eikä maa-ala vapaudu uuteen käyttöön ennen kuin metsä päätehakataan. Saman ajatusvirheen teki tunnetuista taloustieteilijöistä myöhemmin myös muun muassa Kenneth Boulding (1935, 1948 s. 813), joka samaisti metsänkasvatuksen paitsi viinin- myös juustontuotantoon. Vielä nykyäänkin yhdessä tunnetussa ja laajalti käytetyssä mikrotaloustieteen oppikirjassa (Varian 1996 s. 206–211) esitetään virheellisesti, että yhden kiertoajan malli olisi taloustieteen ratkaisu metsänkasvatukseen.

Ruotsissa oikean kiertoaikaratkaisun johti Lundin yliopistosta valmistunut taloustieteilijä Bertil Ohlin ollessaan vain 18-vuotias. Hän halusi osallistua Tukholmassa Heckscherin seminaariin, mutta Heckscher ei aluksi aikonut hyväksyä häntä, koska arveli tämän kiertoaikaa koskevien tietojen olevan riittämättömät. Lopulta hän kuitenkin suostui Ohlinin pyyntöön.<sup>32</sup>

Myöhemmin Nobelin taloustieteen palkinnon saanut Ohlin esitti seminaarissa, kuinka hänen opettajansa optimaalista kiertoaikaa koskeva ratkaisu oli väärä. Hän päätyi esityksessään samaan lopputulokseen kuin Faustmann runsaat 70 vuotta aikaisemmin tarkastelemalla yhden kiertoajan ratkaisua ja lisäämällä siihen maankorko. Samalla hän arvosteli voimakkaasti professori Jonsonin maankorkoteoriaa koskevia väitteitä, joita hän piti paitsi taloustieteellisesti virheellisinä, myös moraalisesti arveluttavina, koska ne perustuivat hänen mielestään yksipuolisiin oletuksiin (Ohlin 1921).

Ohlin ei käyttänyt tyylielityssä esityksessään puuston kasvufunktiota, vaan puuston arvofunktiota. Hän päätteli, että diskonttaamalla kaikki maan antamat tulot nykyhetkeen saadaan maan arvolle ( $M$ ) yhtälö

---

<sup>31</sup> Myöhemmin on käynyt ilmi, että Wicksell esitti julkaisemattomissa papereissaan myös oikean ratkaisun kiertoaikaongelmaan (Löfgren 1990, 1995, 1999).

<sup>32</sup> Ohlin (1899–1979) opiskeli Lundin yliopistossa ja valmistui kahden vuoden jälkeen taloustieteestä erinomaisin arvosanoin. Luettuaan lehdestä Heckscherin kirjoittaneen kirjan sota-ajan taloustieteestä hän päätti osallistua tämän luennoille Tukholman kauppakorkeakoulussa. Vaikka he aluksi kiistelivät metsän kiertoajasta, niin Heckscher oli Ohlinin mukaan häntä kohtaan aina auttavainen ja ystävällinen. Ohlin sai paljon vaikutteita myös Wickselliltä, jota hän kuvasi vaatimattomaksi ja asioita kyseenalaistavaksi mieheksi (Ohlin 2000).

$$M = \frac{f(n)}{e^{pn} - 1}, \quad (4.26)$$

jossa  $f(n)$  kuvaa metsikön hakkuuarvoa (*bestånds avverkningsvärde på rot*) kiertoajan  $n$  funktiona ja  $p$  korkoa. Kun kyseinen lauseke derivoidaan kiertoajan  $n$  suhteen maksimin löytämiseksi, saadaan 1. kertaluvun optimiehdoksi

$$\frac{f'(n)(e^{pn} - 1) - f(n)pe^{pn}}{(e^{pn} - 1)^2} = 0, \quad (4.27)$$

josta saadaan edelleen yhtälöt

$$f'(n)(e^{pn} - 1) = f(n)pe^{pn} \quad (4.28)$$

$$\Leftrightarrow f'(n) = f(n) \frac{pe^{pn}}{e^{pn} - 1} = \frac{pf(n)}{1 - e^{-pn}}, \quad (4.29)$$

joissa  $f'(n)$  kuvaa metsikön hakkuuarvon muutosta. Yhtälöstä (4.29) saadaan edelleen

$$f'(n) - pf(n) = \frac{pf(n) - [pf(n)(1 - e^{-pn})]}{1 - e^{-pn}} \quad (4.30)$$

$$\Leftrightarrow f'(n) = pf(n) + \frac{pf(n)e^{-pn}}{1 - e^{-pn}} \quad (4.31)$$

$$\Leftrightarrow f'(n) = pf(n) + pV(n), \text{ jossa } V(n) = \frac{f(n)e^{-pn}}{1 - e^{-pn}}. \quad (4.32)$$

On helppo huomata, että hakkuusääntö (4.32) on sama kuin Faustmannin kaavan aikaisemmin esitetty tyylitelty muoto (4.19) uudistamiskustannuksia lukuunottamatta (huom!  $p$  on nyt korko).

Monesti Ohlinin ratkaisu esitetään hieman toisessa muodossa. Siinä jatkuvan puun tuotannon vaatimuksen sijaan maapohjan käyttöön liittyvä kustannus otetaan huomioon tavallisena maankorkona. Näin voidaan menetellä, kun oletetaan, että on olemassa täydelliset maamarkkinat ja maalla on vaihtoehtoisia käyttömuotoja (Samuelson 1976). Metsästä saatavia tuloja voidaan nyt maksimoida yhden kiertoajan kuluessa, kunhan niistä vähennetään paljaan maan korkovaatimus  $R$ . Näin saadaan maksimointiongelma

$$\text{Max}_{\{T\}} PV = pf(T)e^{-rT} - c - R \int_0^T e^{-rt} dt, \quad (4.33)$$

jossa  $T$  kuvaa kiertoaikaa ja  $t$  juoksevaa aikaa. Tästä saadaan 1. kertaluvun ehdoksi

$$pf'(T)e^{-rT} - rpf(T)e^{-rT} - Re^{-rT} = 0 \quad (4.34)$$

$$\Leftrightarrow pf'(T) - rpf(T) - R = 0$$

$$\Leftrightarrow pf'(T) = rpf(T) + R$$

$$\Leftrightarrow \frac{f'(T)}{f(T)} = r + \frac{R}{pf(T)}. \quad (4.35)$$

Kun  $R = rV^F$ , lausekkeen (4.35) antama hakkuuohje on sama kuin alkuperäisen Faustmannin kaavan: puusto kannattaa päätehakata, kun sen arvokasvu on yhtä suuri kuin puustoon ja maapohjaan sidotun pääoman vaihtoehtoiskustannusten summa.

#### *Faustmannin vai König–Faustmannin kaava?*

Hieman monipolvisen syntyhistoriansa takia maankorkoteorian antamaan kiertoaika ratkaisuun viitataan useilla eri nimillä. Tavallisesti sitä kutsutaan Faustmannin, König–Faustmannin tai Faustmann–Preßler–Ohlinin (FPO) kaavaksi. Varsinkin ruotsalaiset tutkijat liittävät kaavaan mielellään Ohlinin nimen, koska hän käytti edeltäjistään poiketen jatkuvaa diskonttaustekijää diskreetin tilalla, muotoili kiertoaika ratkaisun tarkasti ja esitti maankoron maksimoinnin vaatimuksen. Saksalaisessa kirjallisuudessa ratkaisua kutsutaan tavallisesti kuitenkin pelkäksi Faustmannin kaavaksi, koska Faustmann ei tiettävästi ollut selvillä Königin laskelmista (Gane 1968 s. 5, Speidel 1967 s. 95). Englantilaisen William Marshallin ajatusten tultua laajemmin esille kiertoaika ratkaisuun on ryhdytty viittaamaan myös Faustmann–Marshall–Preßlerin kaavana (esim. Aronsson ja Löfgren 1999).

Suomessa ratkaisua nimitetään yleensä Faustmannin tai König–Faustmannin kaavaksi, joskin myös Preßlerin ja Gustav Heyerin rooleja on korostettu (esim. Hagfors 1929). Heyerin nimen liittäminen kaavaan johtuu siitä, että Carl Justus Heyerin poika Gustav Heyer kirjoitti vuonna 1865 metsämaan arvon määrittämisestä koskevan laajan ja perusteellisen oppikirjan *Anleitung zur Waldwertrechnung*. Siinä hän tosin antaa kunnian maankoron kaavan kehittämisestä Faustmannille.

## 4.7 Sisäisen koron menetelmä

Sisäisen koron menetelmässä pyritään löytämään se korkokanta (*internal rate of return, interne Zinsfuß*), jolla laskien investoinnin eri ajankohtina realisoituvat menot ja tulot muodostuvat korkoa korolle laskien yhtä suuriksi. Investoinnista aiheutuvat menot ja siitä saatavat tulot toisin sanoen prolongoidaan tai diskontataan sellaisella korkokannalla, että nettotulojen pääoma-arvoksi tai nykyarvoksi tulee nolla. Mikäli investoinnin sisäinen korko on suurempi kuin pääoman vaihtoehtoinen tuotto, investointi kannattaa tehdä.

Johanssonin ja Löfgrenin (1985 s. 90) mukaan metsän kiertoajan sisäinen korko  $r_B$  voidaan implisiittisesti määrittää jatkuva-aikaisessa tarkastelussa yhtälöllä

$$pf(t)e^{-r_B t} = c, \quad (4.36)$$

jossa diskontatut tulot on asetettu yhtä suuriksi kuin uudistamiskustannukset  $c$ . Tästä saadaan ratkaistua sisäiselle korolle lauseke

$$r_B = \frac{1}{t} \left[ \log \frac{pf(t)}{c} \right], \quad (4.37)$$

jolloin 1. kertaluvun optimiehto on

$$\frac{f'(t)}{f(t)} = \frac{1}{t} \left[ \log \frac{pf(t)}{c} \right]. \quad (4.38)$$

Lausekkeen (4.38) vasen puoli kuvaa aikaisempaan tapaan puuston suhteellista (arvo)kasvua. Siinä yksittäisessä tapauksessa, että lausekkeiden (4.37) tai (4.38) oikea puoli vastaa markkinakorkoa, sisäinen korko johtaa samaan tulokseen kuin yhden kiertoajan malli. Lähestymistapojen välillä on kuitenkin selvä periaatteellinen ero. Yhden kiertoajan mallissa haetaan maksimituottoa annettulle tuotantotekijälle eli metsämaalle valitsemalla ensin korkotaso, minkä jälkeen saadaan edullisin kiertoaika ja sitä vastaava maanarvo. Sisäisessä korossa taas etsitään se  $r_B$ , jolla lausekkeen  $pf(t)e^{-r_B t} - c$   $t$ :n suhteen maksimoitu arvo on nolla; maanarvoa menetelmällä ei saada.

Koska maanarvoa ei sisäisen koron laskennassa oteta huomioon, menetelmällä päädytään virheellisiin tuloksiin.<sup>33</sup> Toisinaan maapohjan arvo on pyritty ottamaan huomioon likimääräisesti, kun on tulkittu sisäisellä korolla saatuja tuloksia. Tällöin on kuitenkin syytä kysyä, miten maapohjan arvo on saatu. Talusteorian mukaan se tulisi määrittää Faustmannin kaavalla, mutta näin saadun arvon käyttöä sisäisen koron yhteydessä voidaan pitää epäjohdonmukaisena rat-

---

<sup>33</sup> Jos maapohjan arvo otetaan sisäisen koron laskennassa huomioon, päädytään samaan tulokseen kuin näyttäjäprosentilla (Kilkki 1968, Saari 1968).

kaisuna – tällöinhän oletettaisiin tunnetuksi juuri se suure (pääoman tuotto eli korko), jota etsitään. Toinen vaihtoehto on ottaa paljaan maan arvo kauppatilastoista, mutta tähänkin liittyy omat hankaluutensa: maapohjat ovat erilaisia, paljaan maan kauppoja on vähän ja markkinat eivät ehkä ole kilpailullisia. Kolmas vaihtoehto on arvioida paljaan maan arvo jollakin muulla tavalla, mutta tällöin voidaan tietenkin kysyä, mihin arvio perustuu – odotettuihin tuottoihinko niin kuin Faustmannin kaavassa?

Joskus ongelma on kierretty olettamalla paljaan maan arvoksi nolla (esim. Metsänviljelykustannusten... 1971, Hannelius 1989). Tämä johtaa kuitenkin virheellisiin tuloksiin, koska todellisuudessa paljasta maata ei saa ilmaiseksi ja talousteoriankin mukaan paljaan maan arvo on nolla vain sattumalta. Suurta virhettä tästä yksinkertaistuksesta ei kuitenkaan aina välttämättä aiheudu, koska maapohjan arvo voi olla etenkin heikohkoilla kasvupaikoilla ja käytettäessä suhteellisen korkeaa laskentakorkokantaa lähellä nollaa (Hyytiäinen ja Tahvonen 2001c).<sup>34</sup>

Sisäisen koron käyttöön liittyy myös muutamia yleisiä piirteitä, joiden takia menetelmän antaman ratkaisun katsotaan olevan perinteistä nettohyötyä heikommalla pohjalla (esim. Brealey ja Myers 1996 s. 85–108). Toisinaan sisäisen koron menetelmällä voidaan myös päätyä erikoisiin lopputuloksiin. Jos esimerkiksi metsän uudistamisen kustannukset lähestyvät nollaa, kuten luontaisessa uudistamisessa saattaa joskus tapahtua, metsän tuotto saadaan äärettömän suureksi (Samuelson 1976).

## 4.8 Rajakannattavuuden periaate

Muutamit metsäntutkijat ovat esittäneet, että taloudellisesti edullisin kiertoaika tulisi laskea niin sanotun rajakannattavuuden periaatteen avulla (esim. Duerr ja Bond 1952, Nyssönen 1958, 1996, 1999, Duerr 1960, Oderwald ja Duerr 1990). Näkemystä on perusteltu sillä, että näin voidaan välttää pitkäaikainen ja epärealistiseksi koettu korkoa korolle laskeminen. Koska rajakannattavuusperiaatteen lähtökohtana on normaalimetsä, sen avulla on katsottu myös voitavan irtautua Faustmannin kaavan mukaisesta ja epärealistiseksi koetusta metsikköajattelusta kohti kokonaista metsälöä.<sup>35</sup>

---

<sup>34</sup> Helsingin yliopiston pitkäaikainen metsäpolitiikan professori Eino Saari (1968) esitti aikanaan, että jos metsänkasvatukseen liittyvän investoinnin kannattavuus lasketaan ilman maapohjan arvoa, lopputulosta ei tulisi nimittää sisäiseksi koroksi, vaan ”sisäiseksi osittaiskoroksi”. Hän käytti sisäisestä korosta myös nimitystä ”keskimääräinen metsäsadannes”, mikä oli suora käänös 1920-luvun amerikkalaisista metsäekonomian oppikirjoista, joissa siihen viitattiin käsitteellä *mean annual forest per cent*.

<sup>35</sup> Entinen Metsäntutkimuslaitoksen ylijohtaja ja metsätalouden liiketieteen professori Viljo Holopainen (1976 s. 103) toteaa laajalti käytetyssä oppikirjassaan seuraavasti: ”Suomalaisen kiertoajan määritysmenetelmänä esitettäköön ns. *rajakannattavuuteen* perustuvat kiertoaikalaskelmat (Nyssönen 1958). Niiden perustana on maankorkoajattelu, sillä kasvavalle puustolle asetetaan niissä korkovaatimus. Laskelmat poikkeavat klassisista maankorkolas-

Rajakannattavuuden laskennan perusajatus tuntuu vakuuttavalta: taloudellisesti optimaalisen päätehakkuujankohdan löytämiseksi verrataan kiertoajan pidentämisestä saatavaa rajatuottoa siitä aiheutuviin rajakustannuksiin. Tämän perusteella saadaan tulos, jonka mukaan puusto kannattaa päätehakata silloin, kun metsään sidotun pääoman rajakustannus on sama kuin sen rajatuotto (nettotulojen lisäys). Periaate on siis sama kuin taloustieteessä yleensäkin – oikein sovellettuna rajakannattavuuden laskentaperiaate tuottaakin samat tulokset kuin Faustmannin malli.

Suomen metsäekonomisessa kirjallisuudessa rajakannattavuuden laskentayhtälöä ei ole yleensä esitetty, vaikka periaatetta on muuten kerrottu laskelmissa käytettävän. Poikkeus on metsätalouden liiketieteen ensimmäinen ja pitkäaikainen professori Valter Keltikangas (1962 s. 10), joka esitti sen yksinkertaisena diskreetin ajan muotoiluna

$$\frac{p_r}{100}(N_{t+1} - N_t) = R_{t+1} - R_t, \quad (4.39)$$

jossa

$p_r$  = sijoitetun pääoman tuottovaatimus (rajakannattavuussadannes),

$N_t$  = normaalimetsän puuston hakkuuarvo kiertoajalla  $t$ ,

$N_{t+1}$  = normaalimetsän puuston hakkuuarvo kiertoajalla  $t+1$ ,

$R_t$  = rahallinen keskituotto (metsänkorko) kiertoajalla  $t$ ,

$R_{t+1}$  = rahallinen keskituotto (metsänkorko) kiertoajalla  $t+1$ .

Tästä saadaan ratkaistua sijoitetun pääoman tuottovaatimukselle eli ”rajakannattavuussadannekselle”  $p_r$  lauseke

$$p_r = \frac{100(R_{t+1} - R_t)}{(N_{t+1} - N_t)}. \quad (4.40)$$

Toisin sanoen rajakannattavuussadannes saadaan, kun rahallisen keskituoton (metsänkoron) muutos jaetaan normaalimetsän puuston hakkuuarvon muutoksella. Tämä on sama yhtälö, minkä jo Gustav Heyer (1871 s. 28) aikanaan esitti Faustmannin kaavan yhteydessä; periaatteessa kysymys onkin samasta asiasta.

Oderwald ja Duerr (1990 s. 171) ovat esittäneet, että optimaalinen kiertoaika tulisi määrittää lausekkeella

---

kelmista kuitenkin siinä, että lähtökohtana on normaalimetsä eikä yksittäinen metsikkö. Lähtökohdan erilaisuudesta johtuen ovat Nyyssösen menetelmällä saatavat kiertoajat yleensä 0–10 vuotta lyhyempiä kuin Faustmannin kaavalla saadut kiertoajat.” Holopainen ei esittänyt muuta perustelua tulosten erilaisuudelle.

$$i = \left( \frac{r_{t+1}}{t+1} - \frac{r_t}{t} \right) / \left( \frac{\sum_{j=s}^{t+1} r_j}{t+1} - \frac{\sum_{j=s}^t r_j}{t} \right), \quad (4.41)$$

jossa

$i$  = sijoitetun pääoman tuottovaatimus,

$r_t$  = nettotulot kiertoajalla  $t$ ,

$r_{t+1}$  = nettotulot kiertoajalla  $t+1$ ,

$r_j$  = yhden metsikön (ikäluokan) puuston arvo,

$s$  = ikä, jolloin puusto saavuttaa myyntikelpoisuuden.

Tämä lauseke vastaa Keltikankaan esityksestä johdettua yhtälöä (4.40) paitsi, että nyt puuston arvon oletetaan olevan sama kuin *myyntikelpoisten* metsiköiden nettohakkuarvojen summa. Tiettyä ikää  $s$  nuoremmat metsät oletetaan siis arvottomiksi. Näinhän ei toki todellisuudessa ole, vaan myös esimerkiksi taimikoilla on aina jokin arvo, vaikka niiden puusto ei olisikaan vielä saavuttanut myyntikelpoisuuden rajaa.

Seuraavaksi Oderwaldin ja Duerrin esittämiä kaavoja analysoidaan hieman tarkemmin, koska Suomessa mm. Nyysönen (1958, 1999) on käyttänyt heidän ehdottamaansa laskentatapaa. Tosin Nyysönen ei ole esittänyt eksplisiittisesti käyttämiään laskukaavoja, vaan on laskenut rajakannattavuutta koskevat tulokset erityisen laskentataulukon avulla samaan tapaan kuin muun muassa Duerr ja Bond (1952) ja Duerr (1960).

Olderwaldin ja Duerrin mukaan yhtälöstä (4.41) voidaan johtaa tavoitefunktio,

$$\underset{\{t\}}{\text{Max } V} = \frac{r_t - i \sum_{j=0}^{t-1} r_j}{t}, \quad (4.42)$$

jossa maksimoidaan vuotuisen nettotulon ja normaalimetsään sitoutuneen pääoman vuotuisen vaihtoehtoiskustannuksen välistä erotusta.

Todellisuudessa kyseinen tavoitefunktio ei kuitenkaan vastaa yhtälöä (4.41), vaan Faustmannin kaavan mukaista maksimointitehtävää. Erona on ainoastaan se, että Faustmannin esittämässä lähestymistavassa maksimoidaan maan nykyarvoa, kun taas lausekkeella (4.42) maksimoidaan normaalimetsästä saatavaa maankorkoa. Molemmilla tavoilla päädytään samaan lopputulokseen. Sen sijaan lauseketta (4.41) käyttämällä päädytään maankorkoteoriaa lyhyempiin kiertoaikoihin, kuten esimerkiksi Chang (1990) on numeerisesti osoittanut.

## Rajakannattavuuden analyttinen tarkastelu

Koska rajakannattavuuden laskentatavan taloustieteellisistä perusteista on esitetty vaihtelevia käsityksiä, on syytä tarkastella analyttisesti, miten Faustmannin malli ja rajakannattavuuden yhteydessä käytetty laskentatapa eroavat toisistaan. Tämä tehdään osoittamalla, (i) kuinka talousteoreettisesti validi kiertoaikamalli voidaan muotoilla rajakannattavuuden tapaan ottamalla lähtökohdaksi normaalimetsä, (ii) esittämällä Duerrin ja Bondin (1952), Nyysösen (1958) sekä Oderwaldin ja Duerrin (1990) käyttämä laskentatapa analyttisesti, sekä (iii) vertaamalla saatuja tuloksia toisiinsa.

Oletetaan, että taloudenpitäjä haluaa koostaa normaalimetsän ja että hän ostaa sen velaksi. Päätöksentekijän ongelma voidaan nyt muotoilla seuraavasti: mikä on vanhin ikäluokka, joka hänen kannattaa vielä ostaa, jotta metsästä saatava vuotuinen voitto maksimoituu lainan korkokustannusten jälkeen. Päätöksentekijän ongelmaa kuvaa maksimointitehtävä

$$\underset{\{t\}}{\text{Max}} V_f = \frac{pf(t)}{t} - r \int_0^t (V/t) e^{rb} db, \quad (4.43)$$

jossa  $p$  on kantohinta,  $f(t)$  koko metsän puuston tilavuus,  $t$  kiertoaika (ja samalla myös normaalimetsän ikäluokkien määrä),  $r$  korko ja  $V$  koko metsän paljaan maan markkinahinta, jonka päätöksentekijä ottaa annettuna. Uudistamiskustannuksia ei ole mukana, koska uudistumisen oletetaan tapahtuvan luontaisesti reunametsän siemennyksen avulla eli samalla tavalla kuin Nyysösen (1958) tutkimuksessa. Lausekkeen (4.43) ensimmäinen termi  $pf(t)/t$  kuvaa vuotuista nettotuloa ja integraalitermi metsään sitoutunutta pääomaa, koska maankorkoteorian mukaan  $b$ -ikäisen metsän arvo on  $Ve^{rb}$  (esim. Johansson ja Löfgren 1985 s. 86).

Kun maamarkkinat oletetaan täydellisiksi ja paljaan maan markkinahinta annetuksi, lausekkeen (4.43) maksimointitehtävä voidaan kirjoittaa muotoon

$$\underset{\{t\}}{\text{Max}} V_f = \frac{pf(t)}{t} - r(V/t) \int_0^t e^{rb} db. \quad (4.44)$$

Tästä saadaan 1. kertaluvun ehdoksi optimille

$$\frac{pf'(t)t - pf(t)}{t^2} + \frac{rV}{t^2} \int_0^t e^{rb} db - \frac{rV}{t} e^{rt} = 0 \quad (4.45)$$

$$\Leftrightarrow \frac{pf'(t)t - pf(t)}{t^2} + \frac{V}{t^2} (e^{rt} - 1) - \frac{rV}{t} e^{rt} = 0$$

$$\Leftrightarrow pf'(t)t - pf(t) + V(e^{rt} - 1) - rtVe^{rt} = 0. \quad (4.46)$$

Maankorkoteorian mukaan paljaan maan markkinahinta  $V = pf(t)/(e^{rt} - 1)$ , kun uudistamiskustannuksia ei oteta huomioon. Sijoitetaan tämä yhtälöön (4.46), jolloin saadaan

$$pf'(t)t = pf(t) - \frac{pf(t)}{(e^{rt} - 1)}(e^{rt} - 1) + rt \frac{pf(t)}{(e^{rt} - 1)}e^{rt}$$

$$\Leftrightarrow pf'(t) = r \frac{pf(t)}{(e^{rt} - 1)}e^{rt} = r \frac{pf(t)}{(1 - e^{-rt})} = rVe^{rt}. \quad (4.47)$$

Taloudenpitäjän kannattaa siis hankkia sellainen normaalimetsä, jonka vanhimman ikäluokan  $t$  arvokasvu eli rajatuotto  $pf'(t)$  vastaa siihen sitoutuneen pääoman vaihtoehtokustannusta (rajakustannusta)  $rVe^{rt}$ . Ratkaisu on ekvivalentti kaikkien aikaisemmin esitettyjen, Faustmannin kaavasta johdettujen tulosten kanssa. Voidaan osoittaa, että optimiratkaisu on yksikäsitteinen ainakin, jos  $f(t) = 0$ , kun  $0 \leq t \leq \underline{t}$ ; ja jos  $f(t) > 0$ ,  $f'(t) > 0$  ja  $f''(t) < 0$ , kun  $t > \underline{t}$ . Tahvonon ym. (2001) ovat esittäneet vieläkin yleisemmät ehdot optimiratkaisun yksikäsitteisyydelle.

Seuraavaksi esitetään Duerrin, Bondin, Oderwaldin ja Nyysösen rajakannattavuuden yhteydessä käyttämä laskentatapa jatkuva-aikaisen tarkastelun muodossa. Päätöksentekijän ongelmaa kuvaa nyt maksimointitehtävä

$$\underset{\{t\}}{\text{Max}} V_d = \frac{pf(t)}{t} - r \int_0^t [pf(b)/t] db, \quad (4.48)$$

jossa  $pf(t)/t$  tarkoittaa metsästä saatavaa vuotuista nettotuloa (metsänkorkoa). Ero maankorkoteorian mukaiseen maksimointitehtävään on lausekkeen toisessa termissä, joka kuvaa metsään sitoutuneen pääoman vaihtoehtokustannusta. Nyt sitoutunutta pääomaa ei lasketa paljaan maan arvon avulla, vaan  $b$ -ikäisen metsän arvoksi katsotaan suoraviivaisesti sen hakkuuarvo  $pf(b)$ . Näin tehdään järjestelmällisesti kaikille ikäluokille, mikä johtaa virheelliseen ratkaisuun, kuten seuraavaksi huomataan.

Koska kantohinta ja korko ovat vakioita, maksimointitehtävä voidaan kirjoittaa muotoon

$$\underset{\{t\}}{\text{Max}} V_d = \frac{pf(t)}{t} - \frac{rp}{t} \int_0^t f(b) db, \quad (4.49)$$

josta saadaan 1. kertaluvun ehdoksi optimille

$$\frac{pf'(t)t - pf(t)}{t^2} + \frac{rp}{t^2} \int_0^t f(b)db - \frac{rp}{t} f(t) = 0 \quad (4.50)$$

$$\Leftrightarrow pf'(t)t - pf(t) + rp \int_0^t f(b)db - rpf(t)t = 0 \quad (4.51)$$

$$\Leftrightarrow pf'(t)t = pf(t) - rp \int_0^t f(b)db + rpf(t)t$$

$$\Leftrightarrow pf'(t) - \frac{pf(t)}{t} = r \left[ pf(t) - \frac{p \int_0^t f(b)db}{t} \right]. \quad (4.52)$$

Tulos siis näyttäisi poikkeavan selvästi edellä esitetystä maankorkoteorian mukaisesta ratkaisusta (4.47).

Duerrin, Bondin, Oderwaldin ja Nyysösen laskentamenetelmällä saatu optimiratkaisu on yksikäsitteinen, kun  $f'(t) > 0$ ,  $f''(t) < 0$  ja  $r > 0$ , koska lauseketta (4.51) hyväksi käyttäen saadaan

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left[ pf'(t)t - pf(t) + rp \int_0^t f(b)db - rpf(t)t \right] \\ &= pf''(t)t + pf'(t) - pf'(t) + \frac{\partial}{\partial t} \left[ rp \int_0^t f(b)db \right] - rpf'(t)t - rpf(t) \\ &= \frac{f''(t)t}{r} + \frac{\partial}{\partial t} \left[ \int_0^t f(b)db \right] - f'(t)t - f(t) \\ &= \frac{f''(t)t}{r} + f(t) - f'(t)t - f(t) \\ &= \left[ \frac{f''(t)}{r} - f'(t) \right] t < 0, \text{ kun } f'(t) > 0, f''(t) < 0 \text{ ja } r > 0. \end{aligned}$$

*Kumpi ratkaisu johtaa pitempään kiertoaikaan?*

Selvitetään seuraavaksi, kumpi ratkaisu – Duerrin, Bondin, Oderwaldin ja Nyysösen vaiko Faustmannin – johtaa pitempään kiertoaikaan. Toteuttakoon maankorkoteorian mukaan laskettu kiertoaika  $t_f$  ehdon (4.45) ja Duerrin, Bondin, Oderwaldin ja Nyysösen esittämällä tavalla laskettu kiertoaika  $t_d$  ehdon (4.50). Merkitään näitä ehtoja  $A(t)$ :llä ja  $B(t)$ :llä eli

$$\begin{cases} A(t) \equiv \frac{pf'(t)t - pf(t)}{t^2} + \frac{rV}{t^2} \int_0^t e^{rb} db - \frac{rV}{t} e^{rt} \text{ ja } A(t)|_{t=t_f} = 0 \\ B(t) \equiv \frac{pf'(t)t - pf(t)}{t^2} + \frac{rp}{t^2} \int_0^t f(b) db - \frac{rp}{t} f(t) \text{ ja } B(t)|_{t=t_d} = 0. \end{cases}$$

Maankorkoteorian mukaan laskettu kiertoaika on pitempi kuin Duerrin, Bondin, Oderwaldin ja Nyysösen esittämä kiertoaika, jos  $-A(t_f) + B(t_f) < 0$  eli jos

$$g \equiv \frac{-pf'(t)t + pf(t)}{t^2} - \frac{rV}{t^2} \int_0^t e^{rb} db + \frac{rV}{t} e^{rt} + \frac{pf'(t)t - pf(t)}{t^2} + \frac{rp}{t^2} \int_0^t f(b) db - \frac{rp}{t} f(t) < 0,$$

jossa yksinkertaisuuden vuoksi merkitään  $t=t_f$ . Tästä saadaan lauseke

$$g = -\frac{rV}{t^2} \int_0^t e^{rb} db + \frac{rV}{t} e^{rt} + \frac{rp}{t^2} \int_0^t f(b) db - \frac{rp}{t} f(t), \quad (4.53)$$

joka voidaan edelleen kirjoittaa muotoon

$$-\frac{gt^2}{r} = \int_0^t V e^{rb} db - V e^{rt} t - \int_0^t pf(b) db + pf(t)t.$$

Kun otetaan huomioon, että  $V = pf(t)/(e^{rt} - 1)$ , saadaan

$$-\frac{gt^2}{r} = \int_0^t \left[ \frac{pf(t)}{e^{rt}(1 - e^{-rt})} e^{rb} \right] db - \frac{pf(t)}{e^{rt}(1 - e^{-rt})} e^{rt} t - \int_0^t pf(b) db + pf(t)t$$

ja positiivisella termillä  $\frac{1 - e^{-rt}}{p}$  kertomalla edelleen

$$\int_0^t f(t) e^{-rt} e^{rb} db - f(t)t - \int_0^t f(b) db (1 - e^{-rt}) + f(t)(1 - e^{-rt})t \equiv u. \quad (4.54)$$

Osoitetaan seuraavaksi, että  $u$  on positiivinen, jos  $f''(t) \leq 0$ . Kun lauseke (4.54) kirjoitetaan muotoon

$$u = \int_0^t f(t)e^{-rt}e^{rb}db - f(t)e^{-rt}t - \int_0^t f(b)db(1 - e^{-rt})$$

$$= \int_0^t [f(t)e^{-rt}e^{rb} - f(t)e^{-rt}]db - \int_0^t [f(b)(1 - e^{-rt})]db,$$

voidaan päätellä  $u$ :n olevan positiivinen ainakin, jos

$q \equiv f(t)e^{-rt}e^{rb} - f(t)e^{-rt} - f(b)(1 - e^{-rt}) \geq 0$ , kun  $0 \leq b \leq t$  ja  $q$  on positiivinen ainakin jollain  $0 \leq b \leq t$ .

Lisäksi havaitaan, että

$$q|_{t=b} = f(t)e^{-rt}e^{rt} - f(t)e^{-rt} - f(t)(1 - e^{-rt}) = 0.$$

Kun  $t$  toteuttaa maankorkoteorian mukaisen ratkaisun eli  $f(t) = \frac{f'(t)}{r}(1 - e^{-rt})$ , saadaan

$$q = \frac{f'(t)}{r}(1 - e^{-rt})e^{-rt}e^{rb} - \frac{f'(t)(1 - e^{-rt})}{r}e^{-rt} - f(b)(1 - e^{-rt}).$$

Ottamalla tästä lausekkeesta osittaisderivaatta  $b$ :n suhteen saadaan

$$\frac{\partial q}{\partial b} = f'(t)(1 - e^{-rt})e^{-rt}e^{rb} - f'(b)(1 - e^{-rt})$$

$$= (1 - e^{-rt})[f'(t)e^{r(b-t)} - f'(b)] < 0,$$

kun  $0 \leq b < t$ , koska tällöin  $0 < e^{r(b-t)} < 1$  ja koska on oletettu, että  $f'' \leq 0$ .

Voidaan siis päätellä, että koska  $q = 0$ , kun  $t = b$ , ja  $\frac{\partial q}{\partial b} < 0$ , niin  $q > 0$  kun  $b < t$ .

Tällöin  $u > 0$  ja edelleen  $g < 0$ , josta seuraa, että  $t_d < t_f$ .

Analyttisen tarkastelun perusteella näyttäisi siis siltä, että Duerrin, Bondin, Oderwaldin ja Nyysösen esittämä rajakannattavuuden laskentatapa johtaisi lyhyempään kiertoaikaan kuin maankorkoteoria ja Faustmannin malli, kun  $f''(t) \leq 0$ ,  $0 \leq b \leq t$  ja  $r > 0$ . Tässä valossa Nyysösen (1958 s. 21) saama tulos, jonka mukaan ”*rajakannattavuuden tietä saatu kiertoaika on n. 5 v. lyhempi*

kuin maankorkolaskelman osoittama”, vaikuttaa oikeansuuntaiselta.<sup>36</sup> Johtopäätös ei muutu, vaikka uudistamiskustannukset otetaan huomioon (liite 1):

## 4.9 Eri kiertoaikaperiaatteiden tulosten vertailu

Kuten aikaisemmin mainittiin, rajakannattavuuden periaate ja sisäisen koron menetelmä antavat oikein laskettuna samat kiertoaikatulokset kuin Faustmannin malli. Yhden kiertoajan mallilla sen sijaan päädytään hieman maankorkoteorias- ta poikkeaviin kiertoaikoihin, koska yhden kiertoajan mallissa ei oteta huomi- oon maapohjaan sitoutuneen pääoman vaihtoehtoiskustannusta. Poikkeaman suunta riippuu paljaan maan arvosta. Jos se on positiivinen, päädytään Faust- mannin sääntöä pitempään kiertoaikaan; paljaan maan negatiivisuus taas johtaa Faustmannin sääntöä lyhyempään kiertoaikaan.

Usein luullaan, että maankorkoteorialla laskettu kiertoaika olisi aina lyhyem- pi kuin suurimman puuntuotoksen kiertoaika. Aivan näin suoraviivaista johto- päätöstä ei kuitenkaan voida tehdä, vaan kiertoaikojen pituuden järjestys riippuu laskentakorosta, metsänkasvatuksen kustannuksista ja kantohinnasta. Binkley (1987) on osoittanut, että mitä alhaisempaa korkokantaa käytetään ja mitä suu- remmat ovat metsänkasvatuksen kustannukset suhteessa kantohintaan, sitä to- dennäköisemmin Faustmannin kaava johtaa pitempään kiertoaikaan kuin puun- tuotoksen maksimointi. Hyytiäisen ja Tahvosen (2001a) empiiristen tulosten mukaan suurimman puuntuotoksen kiertoaika vastaa viljellen perustetuissa ja hoidetuissa havumetsissä – Faustmannin kaavalla laskettuna – noin yhden pro- sentin tuottoa sijoitetulle pääomalle.

Suurinta puuntuotostakin pitempään kiertoaikaan päädytään silloin, kun ta- voitellaan suurinta rahallista keskituottoa eli metsänkorkoa. Tämä johtuu siitä, että laskentakorkokannan ollessa nolla kannattaa tavoitella puiden järeytymisen täysimääräistä hyödyntämistä. Etelä-Suomessa rahallisen keskituoton maksi- moiva kiertoaika nousee kolmesti harvennetussa VT-kylvömännikössä yli sa- taan vuoteen, MT-istutuskuusikossa yli 110 vuoteen ja istutetussa MT-raudus- koivikossakin 75 vuoteen asti (Valsta 1997 s. 33–34). Luontaisesti syntyneissä metsissä ja niissä metsissä, joita ei ole säännöllisesti harvennettu, suurimman keskituoton kiertoajat voivat olla vieläkin pitempiä. Teknillisen kiertoajan pi- tuus taas riippuu täysin läpimitta-, pituus- tai muista korjattavan puutavaran ar- voon vaikuttavista vaatimuksista.

Kiertoajan erilaisten määrittämisperusteiden tuottamia tuloksia ovat tarkem- min vertailleet esimerkiksi Gaffney (1957), Samuelson (1976), Ollikainen (1984), Johansson ja Löfgren (1985), Newman (1988), Tahvonen (1999b) sekä

---

<sup>36</sup> Nyysösen (1958) ”kokeellisissa laskelmissa” rajakannattavuuden periaate johti jopa 10–12 vuotta lyhyempiin kiertoaikoihin maankorkoteoriaan verrattuna. Tästä huolimatta hän päätyi siihen, että maankorkoteoria ja rajakannattavuuden periaate johtavat ”likimain samoi- hin” kiertoaikoihin (Nyysönen 1958 s. 20–24, 64–66). Tämän jälkeen rajakannattavuudella ja maankorkoteorialla saatuja kiertoaikatuloksia ei ole Suomessa tietävästi verrattu.

Hyttiäinen ja Tahvonen (2001a, c). Taulukkoon 1 on koottu eri kiertoaikakriteereihin sisältyvät taloudelliset muuttujat.

Taulukko 1. Metsän kiertoajan eri määrittämisperusteet ja niihin sisältyvät taloudelliset muuttujat.

Kiertoajan määrittämisperuste	Kantohinta	Metsänkasvatuksen kustannukset	Korko	Muut huomiot
Fyysinen ikä	Ei	Ei	Ei	
Suurin puuntuotos	Ei	Ei	Ei	
Puuntuotoksen arvo	Kyllä	Ei	Ei	
Suurin metsänkorko	Kyllä	Kyllä	Ei	
Yhden kiertoajan malli	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Maapohjan arvoa ei oteta huomioon.
Maankorkoteoria (Faustmannin malli)	Kyllä	Kyllä	Kyllä	
Sisäinen korko	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Teoreettisia puutteita.
Rajakannattavuus	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Oikein laskettuna tuottaa samat tulokset kuin maankorkoteoria.

## 5 Maankorkoteorian oletukset

Vaikka Faustmannin sääntöä pidetään taloustieteellisessä mielessä kiertoaikaongelman oikeana ratkaisuna, sitä ei ole käytännön metsätaloudessa läheskään aina sovellettu. Jotta pystyisimme ymmärtämään, miksi näin on menetelty, on syytä tarkastella Faustmannin mallin oletuksia hieman tarkemmin. Mainittakoon kuitenkin jo tässä yhteydessä, että valtaosa niistä liittyy nettonykyarvon käyttöön intertemporaalisten hyötyjen laskentaperusteena, joten ne koskevat taloustieteellistä analyysia laajemminkin.

### 5.1 Tasaikäinen metsä

Klassista Faustmannin mallia voidaan käyttää yksittäisen puun tai tasaikäisen metsikön optimaalisen kiertoajan määrittämiseen. Tasaikäisessä metsikössä puusto on kauttaaltaan samanikäistä ja kaadetaan heti sen saavutettua hakkukypsyyden T-vuoden ikäisenä. Tämän jälkeen maa-ala taimitetaan heti. Näin ollen metsikkö tuottaa puuta epäjatkuvasti, vain hetkillä T, 2T, 3T jne. Toisinaan tasaikäisestä metsästä käytetäänkin nimitystä kiertävä metsä (*rotating forest*) ja Faustmannin sääntöä kutsutaan vastaavasti optimirotaatio- tai optimikiertoaika-malliksi (*optimal rotation model*).

Faustmannin malli soveltuu erityisen hyvin pohjoiselle havumetsävyöhykkeelle, missä metsiköt ovat yleensä tasaikäisiä ja voidaan suhteellisen selvästi erottaa iän tai kehitysluokan perusteella. Lisäksi metsänkäsitely perustuu tasaisen ikärakenteen syntymistä edistäviin alaharvennuksiin; erityisesti kuusella biologiset ominaisuudet johtaisivat helposti eri-ikäiseen metsikkörakenteeseen. Eri-ikäisrakenteisen metsän kasvatusmenetelmiä on Suomessa käytetty lähinnä vain kalliomailla, rämeillä, tietynlaisissa korvissa, maisemallisesti aroilla alueilla ja lakimetsissä. Käytännössä tasaikäisen ja eri-ikäisen metsän raja on kuitenkin liukuva.<sup>37</sup>

Entä voidaanko Faustmannin mallia käyttää myös *normaalimetsän* optimaalisen kiertoajan määrittämiseen? Tämä on mielenkiintoinen kysymys, koska normaalimetsää on pidetty kestäväen metsätalouden tavoitetilana ja monet metsätalouden järjestelyn teoreettiset perusteet, kuten hakkuiden tasaisuus, on johdettu siitä. Jos normaalimetsä on jo valmiina olemassa, pääoma- ja maamarkkinat ovat täydelliset ja muutkin Faustmannin mallin oletukset ovat voimassa, niin metsänomistajan kannattaa hakata Faustmannin säännön mukaan. Ongelmana on vain se, että luonnossa puuston ikäluokat ovat vain harvoin tasaisesti järjes-

---

<sup>37</sup> Keski-Euroopassa eri-ikäisyyteen perustuvia metsänkasvatusmenetelmiä on käytetty etenkin viljavilla kasvupaikoilla ja vuorten rinteillä, joissa viihtyvät sellaiset varjoa sietävät puulajit kuin pyökki, saksanpihta ja kuusi (Lihtonen 1959, Parviainen ja Seppänen 1994). Eri-ikäisessä metsässä Faustmannin mallin tulokset hieman muuttuvat, esimerkiksi hintojen muutos ei vaikuta kiertoaikaan (Chang 1981).

tettynä, ja jotta normaalimetsä saataisiin aikaan, joudutaan tekemään taloudellisia uhrauksia (ks. Hultkranz 1982, 1991). Normaalimetsän tavoittelun optimaalisuuteen palataan Faustmannin mallin laajennusten yhteydessä. Mainittakoon kuitenkin jo tässä yhteydessä, että normaalimetsän optimaalisuus näyttäisi liittyvän ainakin pääomamarkkinoiden luonteeseen, taloudenpitäjän hyötyfunktion muotoon ja maan vaihtoehtoihin käyttömuotoihin.

## 5.2 Täydellinen kilpailu ja ennakkotietämys

Klassisessa Faustmannin mallissa oletetaan, että kantohinta ja korkokanta ovat vakioita ja niistä vallitsee täydellinen ennakkotietämys. Myös puun tuottamisen edellyttämät toimenpiteet, kuten metsän uudistamiset ja harvennukset sekä niistä aiheutuvat kustannukset, ovat vakioita ja tiedetään ikuisuuteen asti. Lisäksi puun hinta määräytyy täydellisen kilpailun markkinoilla, eli mikä tahansa määrä puuta voidaan myydä ilman, että kantohinta muuttuu. Puun kysyntä on siis täysin joustavaa.

Myös metsikön kasvu ja eri puutavaralajien tuotos osataan ennustaa täydellisesti. Käytännössä tämä tarkoittaa muun muassa sitä, että maan tuotoskyky säilyy vakiona, tulevat luonnontuhot tiedetään etukäteen eikä puunkasvatuksen teknologia muutu (esimerkiksi metsänjalostus ei pysty jatkossa tuottamaan nykyistä parempia lajikkeita). Lisäksi oletetaan, että ulkoisvaikutuksia tai julkishyödykkeitä ei ole, metsien muut kuin puuntuotannolliset hyödyt eivät vaikuta metsänomistajan tai hänen jälkeläistensä päätöksentekoon ja verotus kohtelee metsää ja muita varallisuusmuotoja tasapuolisesti.

## 5.3 Täydelliset pääoma- ja maamarkkinat

Klassinen Faustmannin malli olettaa täydelliset pääomamarkkinat, eli anto- ja ottolainausta voidaan harjoittaa rajattomasti korkokannan muuttumatta. Anto- ja ottolainauksen korot eivät myöskään poikkea toisistaan. Erittäin vahva ja keskeinen oletus, joka seuraa täydellisistä pääomamarkkinoista ja täydellisestä informaatiosta, on se, että taloudenpitäjä pystyy lainaamaan pääomamarkkinoilta rajatta rahaa elinkaarensa tuloja vastaan, koska hänen tulevaisuuden tulonsa oletetaan tiedetyiksi.

Näiden varsin rajoittavien oletusten seurauksena metsänomistajan muu talous tai subjektiivinen aikapreferenssi<sup>38</sup> ei vaikuta hänen hakkuupäätöksiinsä, vaan suoraviivainen suurimman nykyarvon tavoittelu maksimoi metsänomistajan käytettävissä olevien tulojen nykyarvon ja johtaa myös mahdollisimman suureen hyötyyn. Tätä tulosta kutsutaan taloustieteessä Fisherin separaatioteoree-

---

<sup>38</sup> Subjektiivinen aikapreferenssi (korkokanta) ilmoittaa, kuinka paljon kuluttaja tarvitsee lisäkulutusta tulevalla periodilla kompensoimaan yhden yksikön menetyksen nykyisellä periodilla. Preferenssi on subjektiivinen, koska se riippuu kuluttajan omista preferensseistä, ei havaituista markkinailmiöistä (Gravelle ja Rees 1992 s. 406–410).

maksi. Metsäekonomiassa se kulminoituu usein kysymykseen siitä, pitäisikö metsäinvestointien kannattavuutta tutkia metsikkötasolla, metsälötasolla vaiko ottaen huomioon päätöksentekijän koko talous. Jos Fisherin separaatioteoreema on voimassa, eivätkä eri metsiköiden käsittelyt ole muutenkaan sidoksissa toisiinsa esimerkiksi puunkorjuussa tai metsäluonnon hoidossa saavutettavien skaalaetujen takia (ns. *linear forest*), yksittäisen metsikön arvon maksimoiva hakkuuohjelma maksimoi myös metsänomistajan metsästään saaman hyödyn.

Klassisessa Faustmannin mallissa myös maamarkkinat ovat täydelliset, eli metsää voidaan vapaasti ostaa, myydä ja vuokrata, ja kilpailulliset markkinat löytävät sille aina ”oikean” arvon. Siten esimerkiksi onnistunut metsäinvestointi on milloin tahansa mahdollista hyödyntää täysimääräisesti tilan kohonneena vaakuus- tai myyntiarvona. Näiden oletusten ansiosta yksittäisen metsänomistajan ei tarvitse uskoa elävänsä ikuisesti, vaikka hänen oletetaankin harjoittavan metsätalouden suunnittelua ikuisuuteen ulottuvalla aikahorisontilla. Oletus äärettömästä aikahorisontista vastaakin tilannetta, jossa metsämaasta perittäisiin kilpailullisten markkinoiden sille asettama vuokra. Toinen äärettömän aikahorisontin perustelu on altruistinen<sup>39</sup> perinnönjättömotiivi – metsänomistaja pitää jälkipolviensa hyötyä yhtä tärkeänä kuin omaa hyötyään. Lisäksi hän olettaa kaikilla jälkipolvillaan olevan täsmälleen samanlaiset preferenssit kuin hänellä itsellään. Tämänkaltainen oletus, jonka mukaan päätöksentekijöiden tavoitteet ja arvotukset eivät muutu ajan kuluessa (*habit persistence*), on varsin yleinen taloustieteessä.

## 5.4 Oletusten realistisuus

Faustmannin mallin oletukset ovat siis vahvoja ja sellaisenaan paikkansapitämättömiä. Todellisuudessa esimerkiksi maamarkkinat tuskin toimivat Suomessa täydellisen kilpailun olosuhteissa, koska peräti 80 prosenttia metsänomistajista perii metsänsä sukulaisiltaan tai saa sen lahjana. Lisäksi metsämaan hankinta oli pitkään osittain luvanvaraista, ja myös verotus ja transaktiokustannukset näyttelevät metsäkaupoissa tärkeää osaa. Myöskään yksittäiset metsiköt eivät ole markkinoilla tavallisesti kaupan kohteena, vaan pikemminkin useista metsiköistä koostuvat kokonaisuudet, metsälöt.

Myöskään pääomamarkkinat eivät ole täydelliset. Tämän vuoksi metsänomistaja ei ehkä pystykään lainaamaan elinkaarensa tuloja vastaan, vaan joutuu hakeamaan metsiään saadakseen rahaa kulutukseen, huomattaviin investointeihin tai verojen maksuun. Myös metsänomistajan halu saada työtuloa metsästään voi

---

<sup>39</sup> Altruistiseksi määritellään toiminta, joka edistää toisen yksilön hyvinvointia, mutta ei lisää toimijan omaa (materiaalista) hyötyä tai tuottaa hänelle jopa haittaa. Altruismi samaistetaan usein epäitsekkyyteen tai hyväntahtoisuuteen. Ensimmäisen kerran termiä *altruisme* käytti kuuluisa ranskalainen sosiologi Auguste Comte (1798–1857), joka tarkoitti sillä omistautumista toisten ihmisten hyvinvoinnin lisäämiseen (Hammond 1987 s. 85–86, Howard 1992 s. 85–86).

heikentää täydellisten pääoma- ja maamarkkinoiden oletusten perusteella tehtävien laskelmien käyttökelpoisuutta.

Markkinoiden epätäydellisyyksien, epävarmuuden ja muiden edellä esitettyjen seikkojen takia korko ei välttämättä olekaan vaihtoehtoiskustannusten riittävä osoitin, eikä investoinnin nettonykyarvoa voida samaistaa metsänomistajan hyötyyn. Käytännössä tämä tarkoittaa asetelman huomattavaa monimutkaistamista, koska metsänomistajan preferenssit ja muu taloudellinen päätöksenteko (hyötyfunktio) pitäisi tavalla tai toisella sisällyttää Faustmannin malliin. Raakapuumarkkinoiden toimintaa analysoitaessa kysymys on periaatteessa samasta asiasta: voidaanko puun tarjontaa selittää pelkästään klassisessa Faustmannin mallissa olevilla tekijöillä (kantohinta, korko), vai onko myös metsänomistaja-kohtaisilla tekijöillä vaikutusta hakkuupäätöksiin.

## 6 Faustmannin mallin komparatiivinen statiikka ja raakapuun tarjonta

### 6.1 Samuelsonin ja Hartmanin havainnot

Kiinnostus maankorkoteorian kehittämiseen hiipui Ohlinin jälkeen lähes 50 vuodeksi. Tämä johtui paljolti siitä, että Faustmannin kaavan tuloksia ja oletuksia pidettiin epärealistisina ja käytännön päätöksentekoon soveltumattomina (esim. Möhring 2001). Erityisen paljon arvosteltiin tulosten herkkyyttä kantohintojen ja koron suuruudelle – verrattain pienetkin muutokset niissä kun voivat muuttaa optimaalista kiertoaikaa merkittävästikin.

Suomessa maankorkoteoriaa kritisoi erityisen voimakkaasti Helsingin yliopiston metsätalouden liiketieteen pitkäaikainen professori Valter Keltikangas. Hän esitti esimerkin koron vaikutuksesta Faustmannin kaavalla laskettuihin paljaan maan maanarvoihin: jos kiertoaika on 100 vuotta, niin päätehakkuutulojen diskonttaustekijä on neljän prosentin korolla 0,0202 ja viidellä prosentilla 0,0077. Yhden prosenttiyksikön ero korossa aiheuttaa siis noin 260 prosentin eron paljaan maan arvossa.<sup>40</sup>

Mielenkiinto maankorkoteoriaan heräsi uudelleen oikeastaan vasta 1970-luvun puolivälissä, kun uusiutuvien luonnonvarojen käyttöä ryhdyttiin pohtimaan laajemmin Yhdysvalloissa. Kiertoaikaa koskevaan keskusteluun pyydettiin kannanottoa Massachusetts Institute of Technology -korkeakoulun professori Paul Samuelsonilta, joka oli saanut ensimmäisenä amerikkalaisena taloustieteen Nobelpalkinnon vuonna 1970.<sup>41</sup> Hän kävi läpi vuosien varrella esitettyjä erilaisia kiertoaikaratkaisuja ja päätyi siihen, että Faustmannin kaava on niistä taloustieteellisessä mielessä ainoa oikea (Samuelson 1976). Lisäksi hän osoitti, että optimaalinen kiertoaika voidaan edellä mainittujen oletusten (*heroic assumptions*) vallitessa ratkaista normaalina voitonmaksimointiongelmana ja nimesi löytönsä Faustmann–Ohlin–Preinrich–Samuelsonin yhtälöksi. Tosin Kööpenhaminan yliopistossa opettajana toiminut lahjakas tanskalainen matemaatikko Jørgen Pedersen Gram (1850–1916) oli tiettävästi todennut saman asian jo vuonna 1876 (Helles ja Linddal 1997). Hän julkaisi artikkelinsa kuitenkin vain tanskaksi.

Samana vuonna kun Samuelsonin tutkimus ilmestyi, yhdysvaltalainen tutkija Richard Hartman (1976) esitti, kuinka metsän muut kuin puuntuotannosta saata-

---

<sup>40</sup> On epäselvää, miten Keltikangas (1947 s. 39) laski tuloksensa, koska todellisuudessa diskonttaustekijät ovat 0,0198 (Neperin luvulla laskien 0,0183) ja 0,0076 (0,0067). Ero paljaan maan arvossa on kyllä Keltikankaan ilmoittama 260 prosenttia (270 prosenttia).

<sup>41</sup> Paul Samuelson (1915–) on kehittänyt etenkin taloustieteen matemaattista esitystapaa. Hän osoitti, että taloustieteessä on pohjimmiltaan kyse tasapainon ja sen stabiilisuuden määrittämisestä käyttäen hyväksi matemaattisen optimoinnin periaatteita. Hän kehitti myös ns. paljastettujen preferenssien teorian, jonka mukaan taloudenpitäjien tekemät valinnat paljastavat heidän preferenssinsä *ceteris paribus*.

vat hyödyt voidaan sisällyttää Faustmannin malliin, kun niiden oletetaan lisääntyvän monotonisesti (koko ajan) puuston ikääntyessä. Samuelsonin ja Hartmannin esitysten innoittamina etenkin pohjoisamerikkalaiset ja ruotsalaiset metsäekonomistit ryhtyivät uudelleen tutkimaan metsän taloudellisesti optimaalista kiertoaikaa sekä sen vaikutusta raakapuun pitkän ja lyhyen aikavälin tarjontaan.

## 6.2 Faustmannin mallin komparatiivinen statiikka

Taloudellisesti optimaalisen kiertoaikaratkaisun herkkyyttä koron, puun hinnan, verotuksen ja metsänhoidon kustannusten suhteen tarkastelivat 1970- ja 1980-luvuilla esimerkiksi Clark (1976), Chang (1982, 1983) sekä Johansson ja Löfgren (1985). He osoittivat analyttisesti, että mitä korkeampaa korkokantaa tai kantohintaa Faustmannin mallissa käytetään, sitä lyhyempään kiertoaikaan päädytään, *ceteris paribus*. Kantohinnan nousun vaikutus johtuu siitä, että puustoon ja maahan sijoitetun pääoman vaihtoehtoiskustannus nousee. Metsänuudistamisen kallistumisen vaikutus on päinvastainen: metsämaan arvo ja siihen liittyvä vaihtoehtoiskustannus laskee, minkä seurauksena kiertoaikaa kannattaa pidentää. Varsinaisesti kyseessä eivät olleet uudet löydökset, sillä samat tulokset tiedettiin jo 1800-luvulla (Heyer 1871, Dickson 1953, Stridsberg 1956, Gaffney 1957).

Faustmannin mallin komparatiivis-staattiset ominaisuudet voidaan esittää analyttisesti ottamalla aikaisemmin esitetystä lausekkeesta (4.19) kokonaisdiferentiaali, jolloin saadaan

$$\begin{aligned} [pf''(t) - rpf'(t)]dt &= -[f'(t) - rf(t) - rf(t)e^{-rt}(1 - e^{-rt})^{-1}]dp \\ &- [r(1 - e^{-rt})^{-1}]dc + \left[ pf(t) + \frac{d}{dr}rV(t) \right]dr. \end{aligned} \quad (6.1)$$

Siitä saadaan edelleen yhtälö

$$\frac{dt}{dp} = \frac{\left[ f'(t) - rf(t) - rf(t)e^{-rt}(1 - e^{-rt})^{-1} \right]}{\underbrace{pf''(t) - rpf'(t)}} , \quad (6.2)$$

joka kuvaa kantohinnan  $p$  muutoksen vaikutusta kiertoaikaan  $t$ . Lausekkeen nimittäjä on negatiivinen, jos oletetaan  $p > 0$ ,  $r \geq 0$  ja

$$f(t) = 0, \text{ kun } 0 \leq t \leq \underline{t}; \text{ ja jos } f(t) > 0, f'(t) > 0 \text{ ja } f''(t) < 0, \text{ kun } t > \underline{t}.$$

Hyödynnetään osoittajan merkin määrittämisessä aikaisemmin esitettyä 1. kertaluvun ehtoa (4.20), jolloin saadaan

$$f'(t) - rf(t) - rf(t)e^{-rt}(1 - e^{-rt})^{-1} = \frac{rc}{p}(1 - e^{-rt})^{-1} > 0. \quad (6.3)$$

Tästä voidaan päätellä, että  $\frac{dt}{dp} < 0$ , eli kantohinnan nousu lyhentää kiertoaikaa.

Vastaavasti uudistamiskustannusten muutosten vaikutusta kiertoaikaan voidaan tarkastella lausekkeella

$$\frac{dt}{dc} = \frac{\overbrace{-r(1 - e^{-rt})^{-1}}}{\underbrace{pf''(t) - rpf'(t)}} > 0, \quad (6.4)$$

jonka perusteella voidaan suoraan päätellä, että uudistamiskustannusten nousu pidentää kiertoaikaa.

Koron muutoksen vaikutusta kuvaa lauseke

$$\frac{dt}{dr} = \frac{pf(t) + \frac{d}{dr}rV(t)}{\underbrace{pf''(t) - rpf'(t)}} , \quad (6.5)$$

jonka osoittaja voidaan kirjoittaa muotoon

$$pf(t) + V(t) + r \frac{\partial V(t)}{\partial r}. \quad (6.6)$$

Toisaalta yhtälön (4.19) mukaan paljaan maan arvo on  $V(t)^F = \frac{pf(t)e^{-rt} - c}{1 - e^{-rt}}$ ,

jossa yläindeksi  $F$  viittaa Faustmannin kaavan mukaiseen optimiratkaisuun. Sijoittamalla paljaan maan arvo edellä esitetyn lausekkeen (6.6) derivaattaan saadaan

$$pf(t) + V^F + r \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{pf(t)e^{-rt} - c}{1 - e^{-rt}} \right] \quad (6.7)$$

$$= pf(t) + V^F + r \left\{ -tpf(t)e^{-rt}(1 - e^{-rt})^{-1} - te^{-rt}(1 - e^{-rt})^{-2} [pf(t)e^{-rt} - c] \right\}$$

$$= pf(t) + V^F + \left[ -rtpf(t)e^{-rt} - rte^{-rt}V^F \right] (1 - e^{-rt})^{-1}.$$

Näin ollen koron muutoksen vaikutusta kuvaava lauseke voidaan kirjoittaa muotoon

$$\begin{aligned} \frac{dt}{dr} &= \left[ pf(t) + V^F - \frac{rtpf(t)e^{-rt}}{1 - e^{-rt}} - \frac{rte^{-rt}V^F}{1 - e^{-rt}} \right] / [pf''(t) - rpf'(t)] \\ &= \left\{ [pf(t) + V^F] - \frac{rte^{-rt}}{1 - e^{-rt}} [pf(t) + V^F] \right\} / [pf''(t) - rpf'(t)] \\ &= [pf(t) + V^F] \left( 1 - \frac{rte^{-rt}}{1 - e^{-rt}} \right) / [pf''(t) - rpf'(t)] \\ &= \frac{[pf(t) + V^F] \overbrace{\left( 1 - \frac{rt}{e^{rt} - 1} \right)}^{\dagger}}{\underbrace{[pf''(t) - rpf'(t)]}_{-}}. \end{aligned}$$

Osoittajan jälkimmäinen termi  $\left( 1 - \frac{rt}{e^{rt} - 1} \right)$  on positiivinen, kun  $rt > 0$ . Näin ollen saadaan kaksi tapausta:

$$\frac{dt}{dr} < 0, \text{ kun } pf(t) + V^F > 0 \text{ ja } rt > 0;$$

$$\frac{dt}{dr} > 0, \text{ kun } pf(t) + V^F < 0 \text{ ja } rt > 0.$$

Toisin sanoen koron nousu lyhentää kiertoaikaa, jos  $pf(t) + V^F > 0$  ja korko on positiivinen. Jos tilanne onkin se, että  $pf(t) + V^F < 0$  eli paljaan maan arvo on negatiivinen ja itseisarvoltaan suurempi kuin päätehakkuusta saatavat tulot, niin koron nousu pidentää kiertoaikaa. Jälkimmäinen tilanne lienee kuitenkin varsin poikkeuksellinen.

Kantohinnan, koron ja uudistamiskustannusten muutosten vaikutukset paljaan maan arvoon on esitetty liitteessä 2.

### 6.3 Faustmannin malli ja raakapuun tarjonta

Faustmannin mallissa kiertoaika riippuu kantohinnasta, korosta ja uudistamiskustannuksista, joten myös puun tarjonnan on oltava niiden funktio. Pohjois-amerikkalainen matemaatikko Colin W. Clark (1976) esitti tiettävästi ensimmäisenä, että kiertoajan muutoksilla on sekä lyhyen että pitkän aikavälin vaikutuksia puun tarjontaan. Jos kiertoaikaa pidennetään (esim. kantohintojen laskun takia), hakkuita tehdään aikaisempaa harvemmin, mutta toisaalta hakattavaa puustoa on enemmän. Voidaan kuitenkin osoittaa, että puuston suurempi määrä ei riitä korvaamaan harventuneita hakkuita, minkä seurauksena puun tarjonta vähenee *lyhyellä* aikavälillä. *Pitkällä* aikavälillä kiertoajan pitenemisen vaikutus on kuitenkin päinvastainen niin kauan, kun kiertoaika on suurimman puuntuotoksen kiertoaikaa lyhyempi: metsiin kerääntyy vuosien mittaan yhä enemmän puuta, mikä lisää raakapuun tarjontaa (Clark 1976 s. 262–263, 1990 s. 272–274, Binkley 1987).

Kaikkiaan klassinen Faustmannin malli siis ennustaa, että raakapuun lyhyen aikavälin tarjontakäyrä on normaaliin tapaan nouseva, mutta pitkällä aikavälillä se kaartuu taaksepäin. Koska tätä tulosta on toisinaan pidetty vaikeasti uskottavana, klassisen Faustmannin mallin ja raakapuun tarjonnan yhteyttä on syytä tarkastella hieman lähemmin.

Clark (1990) ymmärsi puun pitkän aikavälin tarjonnan  $S$  seuraavasti:

$$S(p) = f[t(p)],$$

jossa  $f(t)$  on puuston tilavuusfunktio,  $t$  kiertoaika ja  $p$  kantohinta. Teoreettisesti perustellumpaa on kuitenkin ottaa lähtökohdaksi normaalimetsä, jolloin raakapuun keskimääräinen vuotuinen tarjonta hehtaaria kohti saadaan lausekkeesta

$$S(p) = \frac{f[t(p)]}{t(p)}. \quad (6.8)$$

Tarkastellaan seuraavaksi, miten puun tarjonta riippuu kantohinnan muutoksesta. Saadaan

$$\frac{\partial S}{\partial p} = \frac{f'[t(p)]t'(p)t(p) - f[t(p)]t'(p)}{[t(p)]^2} \quad (6.9)$$

$$= \frac{t'(p)\{f'[t(p)]t(p) - f[t(p)]\}}{[t(p)]^2}. \quad (6.10)$$

Faustmannin mallin komparatiivisen statiikan yhteydessä esitettyjen lausekkeiden (6.2) ja (6.3) perusteella tiedetään, että  $t'(p) < 0$ . Tästä voidaan edelleen

päätellä, että  $\frac{\partial S}{\partial p} = 0$ , kun  $f'[t(p)]t(p) - f[t(p)] = 0$ . On helppo havaita kyseisen ehdon vastaavan aikaisemmin esitettyä suurimman puuntuotoksen hakkuusääntöä (4.3) eli  $f'(t) = \frac{f(t)}{t}$ . Merkitään sitä vastaavaa kantohintaa  $p_{msy}$ :llä.

Luvussa 6.2 esitetyn Faustmannin mallin komparatiivisen statiikan perusteella voidaan päätellä edelleen, että kun  $p$  alenee kohti nollaa, kiertoaika pitenee ja  $f'(t)$  lähenee nollaa, jos oletetaan

$$f(t) = 0, \text{ kun } 0 \leq t \leq \underline{t}; \text{ ja jos } f(t) > 0, f'(t) > 0 \text{ ja } f''(t) < 0, \text{ kun } t > \underline{t}.$$

Näin ollen  $\frac{\partial S}{\partial p} > 0$ , eli raakapuun tarjontakäyrä on nouseva. Toisaalta, kun  $p$  kasvaa rajatta, voidaan osoittaa, että kiertoaika lähestyy lopulta tasoa, jossa  $f(t)=0$ , jolloin  $\frac{\partial S}{\partial t} < 0$ . Näin ollen raakapuun pitkän aikavälin aggregoitu tarjontakäyrä kaartuu taaksepäin (*backward bending supply curve*).

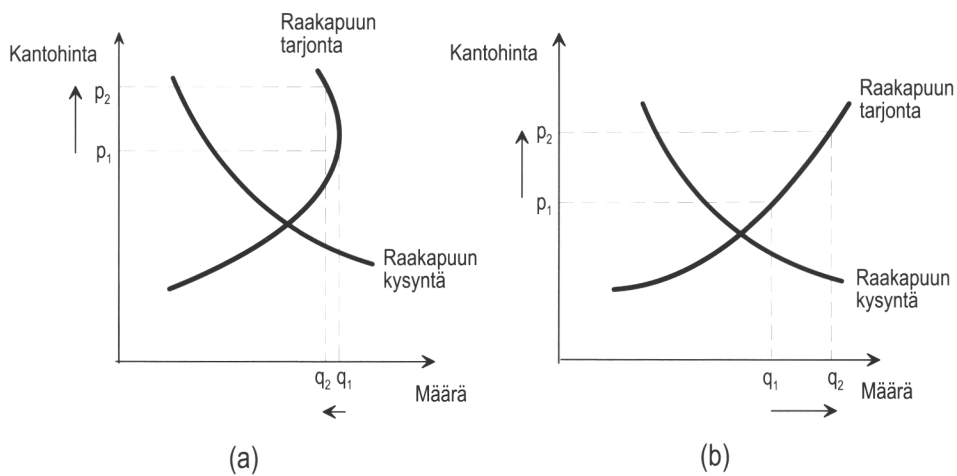
Raakapuun tarjontakäyrän kaartuminen taaksepäin johtuu klassisen Faustmannin mallin yksinkertaisuudesta: mallissa ei oteta huomioon sitä, että raakapuun tarjontaan voidaan vaikuttaa myös tuotantopanoksia muuttamalla. Esimerkiksi metsäala oletetaan vakioiseksi, vaikka todellisuudessa kantohinnan kohominen tekee metsätalouden kannattavaksi uusilla alueilla. Puun tarjontakäyrää siirtävät myös mm. harvennushakkuut, metsänjalostus, ojitus ja lannoitus, jotka niinikään puuttuvat klassisesta Faustmannin mallista.

Voidaan osoittaa, että pitkällä aikavälillä ja aggregaattitasolla raakapuun tarjontakäyrä muodostuu tavanomaisen nousevaksi (kuva 7), kun otetaan huomioon, että kantohintojen kohotessa metsänomistajat lisäävät panostustaan metsänhoitoon ja uusia alueita tulee puuntuotannon piiriin (Hyde 1980 s. 60–68, Jackson 1980 s. 22–25).

Faustmannin mallin puuntarjontaa koskevia hypoteeseja on testattu empiirisesti hyvin vähän. Kuuluvaisen ja Tahvosen (1999) mukaan lyhyellä aikavälillä – esimerkiksi suhdannekierron aikana – metsänomistajat lisäävät puun tarjontaa, kun kantohinnat nousevat tai heidän metsätalouden ulkopuoliset tulonsa laskevat. Pitkällä aikavälillä riippuvuus kuitenkin muuttuu päinvastaiseksi. Kaikkiaan tulokset siis viittaavat siihen, että raakapuun lyhyen aikavälin tarjontakäyrä on normaaliin tapaan nouseva, mutta pitkällä aikavälillä se kaartuu jonkin taitekohdan jälkeen taaksepäin niin kuin klassinen Faustmannin malli ennustaa.<sup>42</sup> Taite-

<sup>42</sup> Tutkimuksen teoreettisessa osassa oletettiin, että metsänomistajalla on vain yksi metsikkö, pääomamarkkinat ovat täydelliset ja metsään liittyy ympäristö- ja tunnearvoja. Empiirisessä osassa metsän pinta-ala oli kiinnitetty. Ks. myös Hyberg ja Holthausen (1989).

kohdassa toteutuu suurimman puuntuotannon kiertoaika ja näin ollen myös  $p_{msy}$  (esim. Binkley 1987).



Kuva 7. Raakapuun pitkän aikavälin aggregoitu tarjontakäyrä klassisen Faustmannin mallin (a) ja kaikki tuotantopanokset huomioon ottavan Faustmannin mallin (b) mukaan.

## 7 Faustmannin mallin laajennukset

Kuten aikaisemmin mainittiin, klassinen Faustmannin malli ja nettonykyarvon samaistaminen hyötyyn rakentuu paljolti Fisherin separaatioteoreeman varaan. Teoreema ei kuitenkaan pidä paikkaansa, jos pääoma- tai maamarkkinat ovat epätäydelliset, tulevaisuus on epävarma tai metsään liittyy ei-rahallisia *in situ* -arvostuksia taikka ulkoisvaikutuksia. Tällöin metsänkäsittelyä koskevat päätökset eivät enää olekaan itsenäisiä, vaan riippuvat taloudenpitäjän preferensseistä, hänen muuta taloudenpitoa koskevista päätöksistään ja muiden taloudenpitäjien toimista.

Separation rikkoutumisen mahdollisuuden esitti metsäekonomisissa tutkimuksissa ensimmäisenä tiettävästi Clark Binkley (1981) tarkastellessaan staatista puuntarjontamalliaan. Tosin tietyllä tapaa koko metsätalouden suunnittelun ja metsäekonomian historian, erityisesti metsikkö- ja metsälötarkasteluun liittyvine kiistoinen, voidaan katsoa implisiittisesti käsitelleen Fisherin separaatioteoreeman rikkoutumista.

Sittemmin useissa muissakin empiirisissä tutkimuksissa on osoitettu, että metsänomistajakohtaiset tekijät (mm. ikä ja varallisuus) vaikuttavat puun tarjontaan, mikä käytännössä tarkoittaa separaation rikkoutumista. Tämän takia etenkin ruotsalaiset ja suomalaiset tutkijat ryhtyivät 1980-luvulla käyttämään puuntarjontatutkimuksissaan niin sanottua kahden periodin mallia, jossa aika jaetaan kahteen diskreettiin osaan: nykyhetkeen ja tulevaisuuteen. Kahden periodin mallin etu on se, että siihen on Faustmannin mallia helpompaa sisällyttää epätäydelliset pääomamarkkinat, epävarmuus ja metsien monikäyttöhyödyt (esim. Johansson ja Löfgren 1985, Koskela 1989a,b, Kuuluvainen 1989, Ovaskainen 1992, Ollikainen 1996). Metsän kuvaukseen diskreetti kahden periodin malli kuitenkin soveltuu Faustmannin mallia huonommin, koska siinä puuston ajatellaan olevan homogeenista biomassaa ilman ikäluokkia. Siksi kahden periodin mallilla ei voida määrittää esimerkiksi metsän optimaalista kiertoaikaa.<sup>43</sup>

Viimeisen parikymmenen vuoden aikana Faustmannin malliakin on pyritty yleistämään tilanteeseen, jossa pääomamarkkinat ovat epätäydelliset, metsiin liittyy muita kuin puuntuotannollisia arvostuksia, eikä puuston kasvua, kanto hintoja, korkotasoa ja metsanhoidon kustannuksia osata ennustaa täydellisesti. Oletus täydellisistä maamarkkinoista taas on pyritty korvaamaan metsänomistajan perinnönjättömotiivilla: metsänomistajan aikahorisontti ei päätykään omis-

---

<sup>43</sup> Luonnonvarataloustieteessä kahden periodin mallia on käytetty muun muassa optimaalisen kalakannan ja kalansaaliin määrittämiseen. Tällöin on oletettu, että tuleva kalakanta riippuu nykyisen kalakannan (biomassan) suuruudesta. Oletus pitää usein paikkansa nopeasti uusiutuvissa kalapopulaatioissa, mutta metsän kasvuprosessia mallinnettaessa puuston ikäluokkien merkitystä ei voida sivuuttaa yhtä helposti. Ikäluokilla on merkitystä myös mallinnettaessa korjuuteknologiaa: biomassakuvaus synnyttää tiettyjen oletusten vallitessa jatkuvan korjuun, jonka on tulkittu vastaavan eri-ikäisen metsikön kasvatusta eli käytännössä ns. jatkuvaa kasvatusta (esim. Kuuluvainen 1989, Montgomery ja Adams 1995).

tuskauden loppuun, vaan hän pyrkii maksimoimaan samanaikaisesti sekä oman että jälkipolviensa hyödyn. Näin tarkasteltava aikajänne pitenee ikuisuuteen asti.

Ennen kuin siirrytään tarkastelemaan klassisen Faustmannin mallin laajenuksia, on syytä tehdä tärkeä raja. Faustmannin mallissa puuntuotanto riippuu ainoastaan ajasta, mutta todellisuudessa puun tilavuus- ja arvokasvuun voidaan vaikuttaa myös erilaisilla metsänhoitotoimenpiteillä. Siksi suurimman maanarvon tuottavia ratkaisuja etsittäessä tulisikin periaatteessa ottaa huomioon kaikki kiertoajan kuluessa toteutettavat metsänhoitotoimenpiteet. Tämän seurauksena päätösmuuttujien (optimoitavien muuttujien) määrä laajenisi kattamaan paitsi kiertoajan, myös metsikön perustamistavan ja -tiheyden, taimikonhoidon, harvennushakkuut (lukumäärä, voimakkuus, ajoitus ja tapa), sekapuuston määrän, pystykarsinnan, lannoituksen, ojituksen jne. Näihin Faustmannin mallin laajenuksiin ei tässä tutkimuksessa kuitenkaan puututa, koska niitä on esitelty tarkemmin Valsta (1993) ja koska niiden käsittely ja ajantasaistaminen vaatisi aihepiiriin laajuuden takia aivan oman tarkastelunsa.

Mainittakoon kuitenkin, että käytettävissä olevien aineistojen rajallisuuden takia empiirisissä tutkimuksissa on yleensä tyydytty optimoimaan kiertoajan lisäksi samanaikaisesti vain harvennushakkuuta ja toisinaan myös istutustiheyttä. Optimointiongelmat on tavallisesti ratkaistu käyttäen numeerisia menetelmiä (dynaamista tai epälineaarista ohjelmointia), koska esimerkiksi harvennusten mukaan ottaminen johtaa helposti siihen, että analyttinen tarkastelu tulee liian monimutkaiseksi.

Faustmannin mallin laajennusten esittely aloitetaan suhteellisen yksinkertaisista, niin sanotuista ei-autonomisista kiertoaikamalleista. Tämän jälkeen siirrytään tarkastelemaan matemaattisesti monimutkaisempaa tilannetta, jossa muuttujien tuleviin arvoihin liittyy satunnaisuutta (epävarmuutta) eikä muuttujien kehitystä pystytä ennustamaan täydellisesti. Ennen kuin ryhdytään tarkastelemaan näitä Faustmannin mallin laajennuksia, esitetään yleisesti epävarmuuden ja päätöksentekoprosessin erilaisia mallintamistapoja, koska ne ovat keskeisiä seikkoja laajennusten ymmärtämisen kannalta. Lopuksi selvitetään epätäydellisten pääomamarkkinoiden ja metsien muiden kuin puuntuotannollisten hyötyjen vaikutusta metsän taloudellisesti optimaaliseen kiertoaikaan.

## 7.1 Ei-autonomiset kiertoaikamallit

Kuten aikaisemmin mainittiin, Faustmannin klassisessa mallissa mm. taloudellisten parametrien oletetaan pysyvän vakioina. Todellisuudessa näin ei tietenkään välttämättä ole, vaan puun kantohintojen tai metsänkasvatuksen kustannusten pitkän aikavälin trendi voi olla esimerkiksi nouseva tai laskeva. Tilanteita, joissa taloudellisten parametrien arvot muuttuvat eksogeenisesti ajan kuluessa, mutta niihin ei liity varsinaista epävarmuutta, on tutkittu ns. ei-autonomisilla kiertoaikamalleilla.

McConnell ym. (1983) päättelivät, että kantohintojen ja uudistamiskustannusten trendinomaiset muutokset voivat vaikuttaa metsän optimaaliseen kiertoaikaan merkittävästikin. Jos esimerkiksi metsänuudistamiskustannukset nousevat laskentakorkokannan arvoa nopeammin ajan kuluessa (ja kantohinnan reaaliarvo ei muutu), optimaalinen kiertoaika pitenee, koska metsänomistaja pyrkii lykkäämään metsänsä uudistamista. Jos taas kantohinnat ja uudistamiskustannukset muuttuvat suhteellisesti samalla vauhdilla ja kyseinen muutosvauhti vastaa laskentakorkokantaa, optimaalinen kiertoaika ei muutu. Jos taloudellisten parametrien muutosvauhti poikkeaa laskentakorkokannasta, asetelma yleensä monimutkaistuu huomattavasti (ks. myös Hardie ym. 1984).

Newman ym. (1985) tutkivat samaa asiaa olettaen kantohintojen nousevan eksponentiaalisesti. Analyysia yksinkertaistettiin olettamalla, että Faustmannin malliin sisältyvät muut tekijät (korko, kustannukset ja puuston kasvu) säilyvät vakioina ja ottamalla huomioon vain päätehakkuut. Tulostensa perusteella he päättelivät, että jos kantohinnat nousevat, mutta kyseinen nousu on laskentakorkokannan arvoa hitaampaa, kiertoaikaa kannattaa lyhentää ajan kuluessa. Näin kannattaa tehdä, kunnes kiertoaika saavuttaa pitkän aikavälin tasapainon, joka voi olla klassista (staattista) Faustmannin kiertoaikaa pitempi tai lyhyempi – lopputulos riippuu kustannustasosta ja kantohinnan nousuvauhdista (ks. myös Yin ja Newman 1995a).

Metsänjalostuksen vaikutusta optimaaliseen kiertoaikaan ovat tarkastelleet mm. Johansson ja Löfgren (1985), Löfgren (1985, 1988) sekä Wagner ja Holmes (1999). Heidän tuloksensa viittaavat siihen, että metsänjalostuksen johdosta kiertoaikaa kannattaa yleensä lyhentää, koska näin päästään nopeammin hyödyntämään seuraavien puusukupolvien oletettavasti parempi kasvu ja laatu. Kiertoaika ei kuitenkaan ole välttämättä vakio, vaan lopputulos riippuu siitä, millä tavalla bioteknologian oletetaan parantavan puuston kasvua, laatua ja vastustuskykyä erilaisille eläin-, sieni- tai abioottisille tuhoille. Erityisen keskeinen kysymys on se, lisääntyykö kasvu (ja paraneeko laatu) suhteellisesti yhtä paljon kaikissa puuston ikäluokissa.

## 7.2 Epävarmuus

Todellisuudessa metsäinvestointeihin ja siten myös taloudellisesti optimaaliseen kiertoaikaan liittyy melkoisesti epävarmuutta. Se voi koskea taloudellisia tekijöitä, kuten tulevaa korkotasoa tai kantohintoja, puuston nykyistä tai tulevaa tilavuutta, erilaisten metsänhoitotoimenpiteiden tai luonnontuhojen vaikutuksia metsän tilaan taikka metsätalouden tavoitteiden mahdollista muutosta tulevaisuudessa. Tavoitteet voivat muuttua omistajan oman elämäntilanteen mukaan, mutta muutos voi olla yhtäläillä seurausta jälkipolvien erilaisista preferensseistä tai julkisen vallan asettamista odottamattomista rajoitteista, veroista tai tukiaisista.

## 7.2.1 Epävarmuuden mallintaminen

Yksittäiseen muuttujaan liittyvää epävarmuutta voidaan mallintaa usealla eri tavalla. Erityisen keskeinen seikka mallinnuksessa on se, miten muuttujan tulevan arvon katsotaan riippuvan sen aikaisemmista arvoista, ja ajatellaanko aika jatkuvaksi vaiko diskreetiksi. Suhteellisen yksinkertainen tapa mallintaa epävarmuutta on olettaa, että tarkasteltavat suureet ovat staattisessa mielessä satunnaismuuttujia. Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi puun hinnan kohdalla sitä, että eri ajankohtina realisoituvat kantohinnat eivät riipu toisistaan. Tätä oletusta (*random draw*) on käytetty varsin yleisesti 1990-luvulla tehdyissä metsäekonomisissa tutkimuksissa.

Tilastotieteellisesti kehittyneempi tapa on tarkastella tilannetta ns. stokastisilla prosesseilla, joilla tarkoitetaan satunnaismuuttujien jonoa. Stokastiset prosessit voidaan edelleen luokitella usealla eri tavalla; varsin yleinen tapa on jakaa ne jatkuva-aikaisiin ja diskreetteihin. Jatkuva-aikaisissa prosesseissa mahdollisia tapahtumahetkiä on periaatteessa ääretön (ylinumeroituva) määrä, mutta diskreeteissä tapahtumat ilmenevät vain tietyin aikavälein.

### *Jatkuva-aikaiset stokastiset prosessit*<sup>44</sup>

Monesti mallinnuksessa oletetaan, että epävarman muuttujan arvo tulevalla periodilla ei riipu lainkaan sen aikaisemmasta kehityksestä (historiasta), vaan ainoastaan muuttujan nykyisestä arvosta. Tällaista tilannetta voidaan mallintaa Brownin liikkeellä (*Brownian motion*) tai sen diskreetillä vastineella, satunnaiskululla (*random walk*).<sup>45</sup> Brownin liikkeessä tarkasteltavan muuttujan hetkellinen odotusarvo vaihtelee prosessin tason mukaan, mutta hetkellinen varianssi pysyy koko ajan samana. Sen sijaan muuttujan ennustevarianssi kasvaa lineaarisesti tarkasteltavan ajanjakson pidentyessä (Dixit ja Pindyck 1994).

Brownin liike on yleinen tapa mallintaa epävarmuutta muun muassa rahoitusmarkkinoilla, koska liike ilmentää markkinoiden tehokkuutta informaation suhteen. Taustalla on ajatus siitä, ettei hyödykkeen hinnan aikaisempaa kehitystä tarvitse lainkaan tarkastella, koska se (historia) on jo otettu huomioon täydellisesti hyödykkeen nykyisessä hinnassa. Toisin sanoen kaikki markkinoilla oleva informaatio tiivistyy hyödykkeen nykyiseen hintaan. Brownin liikkeen tekee

<sup>44</sup> Kappale perustuu pääosin Dixit ja Pindyckin (1994) ja Shimkon (1992) teoksiin. Matemaattisesti huomattavasti formaalimpi esitys löytyy esimerkiksi teoksesta Øksendal (1995).

<sup>45</sup> Skotlantilainen kasvitieteilijä Robert Brown havaitsi vuonna 1827 mikroskooppillaan, että nesteeseen sekoitettujen siitepölyhiukkasten liike vaikuttaa kovin säännöttömältä. Tämä oli toki havaittu aikaisemminkin, mutta hän oli tiettävästi ensimmäinen, joka todella ryhtyi tutkimaan ilmiötä. Vuonna 1905 Albert Einstein kutsui tätä liikettä, joka aiheutui nestemolekyylien törmäyksistä siitepölyhiukkasiin, ”mikroskooppiseksi satunnaiskävelyksi”. Amerikkalainen Norbert Wiener mallinsi ilmiön ensimmäisenä matemaattisesti vuonna 1923. Synthyistoriansa takia ilmiötä kutsutaan sekä Brownin liikkeeksi että Wiener-prosessiksi (Dixit ja Pindyck 1994 s. 63, Øksendal 1995 s. 9).

mallinnuksen kannalta houkuttelevaksi se, että estimoitavien parametrien määrä on yleensä vähäinen. Tosin tämä ei välttämättä tee estimointia helpoksi.

Usein Brownin liikkeeseen liitetään vielä determinististä aikatrendiä kuvaava tekijä (*drift*). Tällaista yleistettyä Brownin liikettä voidaan kuvata stokastisella differentiaaliyhtälöllä

$$dx = a(x,t)dt + b(x,t)dz, \quad (7.1)$$

jossa  $x$  on tarkasteltava muuttuja,  $a(x,t)$  ja  $b(x,t)$  ovat tunnettuja (ei-satunnaisia) funktioita,  $t$  on aika ja  $dz$  on satunnaisuutta ilmentävä niin sanottu Wiener-lisä (*Wiener-increment*), jolle voidaan kirjoittaa jatkuva-aikaisena yhtälö  $dz = \varepsilon_t \sqrt{dt}$ ,  $\varepsilon_t \sim N(0,1)$ . Lausekkeen (7.1) oikean puolen ensimmäinen termi kuvaa prosessin determinististä osaa ja jälkimmäinen termi satunnaisvaihtelua deterministisen osan ympärillä. Pitkällä aikavälillä tarkasteluissa prosessin deterministinen osa on usein ratkaisevassa asemassa.

Yleistetyn Brownin liikkeen teoreettisesti ja empiirisesti tärkeä erikoistapaus on geometrinen Brownin liike trendillä (*geometric Brownian motion with drift*). Sen avulla on mallinnettu muun muassa sijoitusten tuottoihin ja hyödykkeiden hintoihin liittyvää epävarmuutta. Tällöin stokastinen differentiaaliyhtälö saa muodon

$$dx = \alpha x dt + \sigma x dz, \quad (7.2)$$

jossa  $\alpha$  on *drift*-parametri,  $\sigma$  tarkasteltavan muuttujan  $x$  hetkellistä hajontaa kuvaava parametri (*volatility*),  $t$  aika, ja  $dz$  Wiener-lisä. Parametrit  $\alpha$  ja  $\sigma$  ovat vakioita.

Vaikka Brownin liikettä on käytetty empiirisissä tutkimuksissa varsin paljon, sen soveltamiseen liittyy ainakin kaksi merkittävää ongelmaa. Ensinnäkin ennustevarianssi kasvaa lineaarisesti tarkasteltavan aikajakson pidentyessä, minkä seurauksena pitkiä ajanjaksoja tarkasteltaessa muuttujan luottamusväleistä tulee helposti erittäin suuria. Toiseksi, Brownin liikkeessä ei oteta huomioon sitä, että monilla taloudellisilla muuttujilla, kuten koroilla ja inflaatiolla, on taipumus hakeutua pitkän ajanjakson tasapainoon tai keskiarvoon. Tällaista *mean reverting* -ominaisuutta voidaan verrata kierrejousen käyttäytymiseen: mitä kauempana tasapainosta tai pitkän aikavälillä keskihinnasta ollaan, sitä nopeammin hakeudutaan takaisin sitä kohti. Kyseisen ominaisuuden aiheuttaa markkinatalouden hintamekanismi ja mahdollisuus korvata kallistuvia raaka-aineita ja palveluita halvemmilla (substituutio).<sup>46</sup>

<sup>46</sup> Mikrotalousteorian mukaan täydellisen kilpailun oloissa hyödykkeen hinta vastaa sen tuotannon pitkän aikavälillä rajakustannuksia. Epätäydellisen kilpailun oloissa tämä ei välttämättä pidä paikkaansa, vaan esimerkiksi kartellit pyrkivät asettamaan pitkän aikavälillä keskihinnan sellaiselle tasolle, että niiden yhteenlasketut voitot maksimoituvat.

Yksinkertaisin *mean reverting* -prosessi on niin sanottu Ornstein–Uhlenbeck -prosessi (Dixit ja Pindyck 1994). Siinä stokastisen differentiaaliyhtälön trenditermiin on lisätty palautumisnopeutta kuvaava termi  $\eta$  ja tarkasteltavan muuttujan pitkän aikavälin tasapainoa tai keskiarvoa kuvaava termi  $\bar{x}$ . Tällaista prosessia voidaan kuvata differentiaaliyhtälöllä

$$dx = \eta(\bar{x} - x)dt + \sigma dz . \quad (7.3)$$

Mitä suurempi on palautumisnopeutta kuvaava termi  $\eta$ , sitä vähemmän tarkasteltavalla muuttujalla on taipumusta poiketa keskiarvosta tai pitkän aikavälin tasapainosta. On helppo huomata, että jos  $\eta=0$ , kyseessä on yksinkertainen (aritmeettinen) Brownin liike ilman determinististä osaa. Vaikka myös *mean reverting* on lognormaali diffuusioprosessi, niin siinä ennustevarianssi ei kasva lineaarisesti tarkasteltavan aikajakson pidentyessä niin kuin tavallisessa Brownin liikkeessä. *Mean reverting* -prosessissa ennustevarianssi kasvaa aluksi, mutta stabiloituu tasapainoon hakeutumisen takia jonkin ajan kuluttua tietylle tasolle.

Useiden taloudellisten muuttujien kohdalla on myös mahdollisuus voimakkaisiin ja äkillisiin tasoheilahduksiin (*jumps*). Niitä tapahtuu tyypillisesti silloin, kun markkinoille leviää nopeasti uutta ja odottamatonta tietoa. Tällaisia ennalta arvaamattomia tasoheilahduksia voidaan mallintaa erilaisilla diskreeteillä tai jatkuva-aikaisilla Poisson-prosesseilla. Perusajatus on yleensä se, että jonkin tapahtuman todennäköisyys on kullakin yksittäisellä ajanhetkellä erittäin pieni, mutta tapahtumahetkiä voi olla erittäin paljon, jopa ääretön määrä. Jos yksittäiset tapahtumat ovat toisistaan riippumattomia, kuten monesti oletetaan, tasoheilahduksen todennäköisyys kasvaa suoraan ajan kuluessa.

Ennalta arvaamattomiin tasoheilahduksiin liittyvää epävarmuutta voidaan kuvata jatkuva-aikaisen tarkastelun mukaisilla stokastisilla prosesseilla (*mean reverting with jumps*). Differentiaaliyhtälö

$$dx = \eta(\bar{x} - x)dt + \sigma dz + dq \quad (7.4)$$

on muuten samanlainen kuin edellä paitsi, että nyt sen loppuun on lisätty tasoheilahduksia kuvaava jatkuva-aikainen Poisson-prosessi  $dq$ . Empiirisessä mallinnuksessa asetelma on yleensä sellainen, että Poisson-prosessin arvon oletetaan olevan suurimman osan ajasta nolla, mutta jollakin tietyllä hetkellä se saa arvon yksi, jolloin muuttujan  $x$  arvo ”hyppää”.

### *Stationaariset autoregressiiviset prosessit*

Varsin yleinen tapa mallintaa yksittäiseen muuttujaan liittyvää epävarmuutta on olettaa, että muuttujan tuleva arvo riippuu lineaarisesti sen aikaisemmista arvoista. Tällöin mallinnuksessa voidaan käyttää erilaisia diskreettejä stationaarisia autoregressiivisiä prosesseja. Niistä yksinkertaisin eli ensimmäisen asteen autoregressiivinen prosessi, AR(1)-prosessi, voidaan esittää lausekkeella

$$x_t = \alpha + \beta x_{t-1} + \varepsilon_t, \quad (7.5)$$

jossa  $\alpha$  ja  $\beta$  ovat vakioparametreja,  $-1 < \beta < 1$  ja  $\varepsilon_t$  on normaalisti jakautunut satunnaismuuttuja, jonka odotusarvo on nolla. Autoregressiivisten malleja sovellettaessa oletetaan yleensä, että aikasarja on vähintään heikosti stationaarinen.<sup>47</sup>

## 7.2.2 Suhtautuminen riskiin ja päätöksentekoprosessin luonne

Epävarmuuden vaikutus metsän taloudellisesti optimaaliseen kiertoaikaan riippuu myös päätöksentekijän suhtautumisesta riskiin. Riskineutraali taloudenpitäjä pyrkii aina maksimoimaan *odotetun* hyötynsä riippumatta riskin suuruudesta. Riskinkaihtaja on sen sijaan valmis hieman tinkimään odotetusta voitostaan (hyödystään), mikäli päätökseen, kuten investointiin, liittyvä riski vastaavasti pienenee. Tätä voitosta luopumista kutsutaan riskin kustannukseksi. Riskin suosijalla tilanne on luonnollisesti päinvastainen: hän arvostaa investointia sen odotettua hyötyä enemmän ja on valmis maksamaan siitä, että saa kasvattaa riskiään. Tavallisesti taloudellisissa tutkimuksissa oletetaan, että yksittäiset ihmiset kaihtavat riskiä ja yritykset toimivat riskineutraalisti.<sup>48</sup> Suhtautuminen riskiin riippuu paitsi henkilökohtaisista preferensseistä, myös päätöksentekijän muusta taloudesta: varakkaan metsänomistajan valmius kantaa samansuuruisia riskiä on yleensä vähävaraista suurempi.

Faustmannin mallin laajennuksissa on olennaista myös se tapa, jolla metsänomistajan oletetaan tekevän metsänkasvatusta koskevat päätöksensä ajan kuluessa. Mallinnuksessa voidaan käyttää ainakin kolmea erilaista lähestymistapaa. Ennakoivassa päätöksenteossa (*anticipative management*) metsänomistajan oletetaan noudattavan tiettyä etukäteen päätettyä, odotusarvoestimaatteihin perustuvaa toimintavaihtoehtoa, vaikka hän tietääkin sen tuottavan epävarman tuloksen. Hän toisin sanoen tekee metsän kasvatusta koskevat päätöksensä välittämättä esimerkiksi kantohinnan lyhyen aikavälin vaihteluista tai niiden arvoista päätöshetkellä, ja luottaa siihen, että etukäteen valittu toimintavaihtoehto, esimerkiksi kiertoaika, tuottaa pitkällä aikavälillä optimaalisen (odotetun) taloudellisen tuloksen.

<sup>47</sup> Edellä esitetty epävarmuuden mallinnustapojen ryhmittely jatkuva-aikaisiin ja diskreetteihin on vain eräs mahdollinen. Esimerkiksi AR(1)-prosessi voidaan ilmaista myös jatkuva-aikaisena, jolloin se vastaa edellä esitettyä mean-reverting -prosessia (Dixit ja Pindyck 1994 s. 74–77). AR(1)-prosessille ja satunnaiskululle taas on yhteistä se, että molemmat ovat niin sanottuja Markov-prosesseja, joissa kaikki informaatio tiivistyy tarkasteltavan muuttujan nykyiseen arvoon.

<sup>48</sup> Talousteoriassa päätöksentekijän riskipreferenssejä kuvataan yleensä hyötyfunktion muodolla. Riskinkaihtajalla se on aidosti konkaavi, riskineutraalilla lineaarinen ja riskiä suosivalla aidosti konveksi. Mitä konkaavimpi on hyötyfunktio, sitä voimakkaammin riskiä kaihdetaan ja sitä suurempi uhraus joudutaan varmuudesta tekemään.

On kuitenkin selvää, että ennakoivaan päätöksentekoprosessiin sitoutumisesta saattaa koitua metsänomistajalle taloudellisia tappiota, jos relevanttien muuttujien arvot vaihtelevat paljon ajan kuluessa. Kun metsikkö saavuttaa tietyn etukäteen määritetyn uudistuskypsyysien tai -järeyden, esimerkiksi kantohinnat saattavat olla huomattavasti alhaisemmat kuin mitä alunperin otaksuttiin, jolloin kiertoaikaa kannattaisikin ehkä vielä jatkaa. Tilanne voi tietysti olla päinvastainenkin: odotettua korkeampien kantohintojen vuoksi metsikkö kannattaisi päätehakata, vaikka etukäteen päätettyä kiertoaikaa ei olisi vielä saavutettukaan.

Toinen päätöksenteon mallinnustapa (*adaptive management*) lähteekin siitä, että metsänomistajan käytettävissä oleva informaatio lisääntyy ajan myötä, ja että hänellä on kiertojen kuluessa mahdollisuus päivittää tietojaan ja sen perusteella tekemiään ennusteitaan esimerkiksi kantohinnoista. Kiertoaikatutkimuksissa onkin käytetty varsin yleisesti oletusta, jonka mukaan metsänomistaja toimii joustavasti. Hän ei sitoudu mihinkään etukäteen päätettyyn toimintavaihtoehtoon, vaan seuraa säännöllisesti tai epäsäännöllisesti kantohintojen, markkina-koron, puuston arvokasvun, siemen- ja myyrävuosien sekä muiden kiertoaikaa vaikuttavien tekijöiden kehitystä. Niitä koskevien aikaisempien ennusteidensa ja niiden oikeellisuuden perusteella hän tekee sitten päätöksen metsänkasvatuksen jatkamisen edullisuudesta.

Adaptiivisiin odotuksiin perustuva joustava päätöksentekomalli voidaan ilmaista yhtälöllä (Attfield ym. 1991)

$$Y_t^e = \alpha Y_{t-1} + (1 - \alpha) Y_{t-1}^e, \quad (7.6)$$

jossa

$Y_t^e$  = muuttujan  $Y$  odotettu arvo periodilla  $t$ ,

$Y_{t-1}$  = muuttujan  $Y$  todellinen arvo periodilla  $t-1$ ,

$Y_{t-1}^e$  = muuttujan  $Y$  odotettu arvo periodilla  $t-1$ ,

$\alpha \in [0, 1]$ .

Jos  $\alpha=1$ , metsänomistaja ei ota lainkaan huomioon edellistä ennustettaan. Tällöin kysymys on niin sanotuista naiveista odotuksista (*naive expectations, myopic expectations*), joissa muuttujan arvon oletetaan pysyvän koko ajan ennallaan.

Adaptiivisten odotusten mukaan toimiessaan päätöksentekijä saattaa kuitenkin tehdä systemaattisia virheitä. Tämä johtuu siitä, että hän ei välttämättä käytä täysimääräisesti hyväkseen kaikkea saatavilla olevaa informaatiota. Näin tapahtuu esimerkiksi silloin, kun tarkasteltava muuttuja (esim. kantohinta tai korko) on trendinomaisesti laskemassa tai nousemassa. Systemaattisten virheiden välttämiseksi mallinnuksessa on mahdollista käyttää ns. rationaalisten odotusten hypoteesia (*rational expectations*), jonka mukaan päätöksentekijän ennusteet ovat keskimäärin oikeita.

Päätöksentekotavan mallinnustavan valinnassa on kysymys pitkälti siitä, kenen kannalta asiaa tarkastellaan. Koko yhteiskuntaa koskevassa suunnittelussa on usein luontevaa noudattaa odotusarvoihin perustuvaa ennakoivaa lähestymistapaa, mutta yksittäisen taloudenpitäjän kannattaa monesti käyttää hyväksi ajan kuluessa lisääntyvä informaatio ja toimia joustavasti tilanteen mukaan. Toisaalta myös metsänomistajan kokonaistaloudellinen tilanne (esim. metsätulojen ajallinen joustovara ja varallisuus) samoin kuin päätöksenteon kannalta merkityksellisten tekijöiden seurannan kustannukset vaikuttavat päätöksentekotapaan. Esi-merkiksi kantohintojen seuranta on suhteellisen vaivatonta ja tarkkaa, puuston arvokasvun taas kallista ja epätarkkaa.

### 7.2.3 Epävarmuutta koskevat empiiriset kiertoaikasovellukset

Empiirisissä kiertoaikatutkimuksissa joustavaa päätöksentekoa on tyypillisesti mallinnettu ns. *reservation price* -lähestymistavalla. Siinä ajatellaan, että myyntiä harkitseva metsänomistaja seuraa kantohintojen kehitystä, kunnes joku hänen etukäteen asetettamansa vähimmäishinta rikkoutuu. Tällöin hän tekee myyntipäätöksen tai päätehakkuun. Reservaatiohinta kuvaa alinta hintaa, jolla metsänomistaja on valmis myymään puunsa. Se, kuinka suureksi reservaatiohinta kannattaa asettaa, riippuu puuston määrästä ja arvokasvusta, joten se on erilainen jokaiselle metsikölle.<sup>49</sup>

Monien joustavaa päätöksentekoa koskevien tutkimusten mukaan etukäteen asetetun reservaatiohinnan (vähimmäishinnan) käyttö lisää metsänkasvatuksen odotettuja nettotuottoja merkittävästi (esim. Norström 1975, Brazee ja Mendelsohn 1988, Lohmander 1987, 1988, Gong 1991, 1998a,b, Haight ja Holmes 1991, Haight ja Smith 1991, Thomson 1992, Platinga 1998, Brazee ja Bulte 2000). Kiertoaikaan reservaatiohinnan vaikutus on kuitenkin suhteellisen vähäinen. Tulos vaikuttaa intuitiivisesti järkevältä: metsänomistajan ei kannata hakata laskusuhdanteessa, kun kantohinnat ovat alhaiset, vaan hänen kannattaa odottaa, kunnes ne ylittävät tietyn ennalta päätetyn vähimmäishinnan. Tutkimusten mukaan tämänkaltainen metsänkäsittelytapa kannattaa, olipa metsänomistaja riskineutraali tai riskinkaihtaja.

Vähimmäishintojen käytön seurauksena nettotulot lisääntyvät ja kiertoajat pitenevät klassiseen Faustmannin malliin verrattuna sitä enemmän, mitä suurempia kantohintojen vaihtelut ovat. Periaate on tuttu rahoitusteoriasta: option arvo kasvaa omaisuusmuodon hintavaihtelun (volatiliteetin) lisääntyessä, mikäli optio voidaan muuttaa rahaksi milloin tahansa (ns. amerikkalainen optio). Minimi-

---

<sup>49</sup> *Reservation price* -nimitystä käytettiin alunperin huutokaupoissa. Myyjä varasi (*reserve*) itselleen oikeuden lunastaa kaupattava hyödyke itselleen, jos korkein tarjottu hinta jäi minimihintaa alhaisemmaksi (Varian 1996 s. 109).

hintojen käytöstä johtuvan odotetun hyödyn onkin osoitettu vastaavan hakkuupäätökseen liittyvän option arvoa (Platinga 1998).<sup>50</sup>

Volatiliteetin ja option arvon välisestä riippuvuudesta seuraa toinenkin mielenkiintoinen päätelmä. Jos kantohinnan oletetaan noudattavan geometristä Brownin liikettä, option arvo kasvaa ajan kuluessa, koska volatilitteettikin lisääntyy tarkastelujakson pituuden kasvaessa. Tässä yksinkertaisessa tapauksessa epävarmuus tekee siis odottamisen arvokkaaksi.

On kuitenkin tärkeä huomata, että tulokset riippuvat erittäin paljon kantohintojen epävarmuutta kuvaavan prosessin luonteesta. Jos se on *random draw* eli muuttujan arvo voidaan aina poimia tietystä päätöksentekijän tiedossa olevasta todennäköisyysjakaumasta eivätkä eri ajankohtien kantohinnat riipu toisistaan – niin kuin useissa edellä mainituissa tutkimuksissa on oletettu – metsänomistajan kannattaa käyttää päätöksenteossaan vähimmäishintoja. Toisaalta jos kantohintaprosessi onkin esimerkiksi *random walk* tai Brownin liike eikä uudistamishakkuun lykkäämisestä aiheudu kiinteitä kustannuksia, vähimmäishintojen käyttö näyttäisi olevan turhaa (Clarke ja Reed 1989, Thomson 1992, Yin ja Newman 1995).

Valitettavasti empiiriset tulokset kantohintaprosessin luonteesta ovat vaihtelevia: esimerkiksi Hultkranzin (1995) mukaan kantohintojen vaihtelu Ruotsissa jaksolla 1909–1990 oli stationaarista, mutta päinvastaisiakin tuloksia on saatu (ks. Haight ja Holmes 1991, Yin ja Newman 1996). Tulokset näyttäisivätkin riippuvat osin siitä, minkä tyyppistä aikasarjaa analyysissä käytetään. Yhtäkaikki, monet tutkijat ovat päätyneet siihen, että kantohinnat ovat stationaarisia ja noudattavat jotakin autoregressiivistä prosessia. Tällaisten ”tehottomien raaka-puumarkkinoiden” oloissa autokorrelaatiokertoimen vaikutus kiertoaikaan voi olla merkittävä (esim. Haight ja Holmes 1991, Brazee ym. 1999, Gong 1999).

Edellä mainituissa tutkimuksissa oletettiin tyyppillisesti, että metsiköstä saadaan vain yhtä lopputuotetta, tukkipuuta. Todellisuudessa tilanne on yleensä huomattavasti monimutkaisempi: tukin (kuitupuun) korkea hinta voi johtaa siihen, että metsikkö kannattaa päätehakata, vaikka pelkän kuitupuun (tukkipuun) hinnan perusteella näin ei vielä kannattaisikaan tehdä. Tilanteen dynaamisuutta lisää vielä se, että puuston arvokasvu siirtää koko ajan yhä suuremman osan kuitupuusta tukiksi ja eri puutavaralajien hintojen korrelaatiot voivat vaihdella ajan kuluessa.

---

<sup>50</sup> Samanlaista optioajattelua voidaan soveltaa myös vaikkapa metsikön puulajikoostumukseen. Sekametsien kasvattamisen odotettua kannattavuutta lisää se, että puulajikoostumusta voidaan kiertoajan kuluessa muokata sitä mukaa, kun informaatio eri puutavaralajien kantohinnoista lisääntyy (Lohmander 1992, 1993). Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että vaikka joku puulaji olisi tällä hetkellä teollisuuspuuna lähes arvotonta, sitä ei ensiharvennuksessa kannata välttämättä kaataa pois, koska kyseisen puulajin arvo voi olla päätehakkuun tapahtuessa jo merkittävä. Hyviä esimerkkejä tämantapaisesta arvonnoususta viimeisten vuosikymmenten aikana ovat rauduskoivu ja haapa.

Forboseh ym. (1996) olettivat tutkimuksessaan, että lopputuotteita on kaksi – tukkipuu ja kuitupuun – ja molempien hinnat ovat epävarmoja. Mallissa otettiin huomioon vain päätehakkuut ja kantohintojen epävarmuutta kuvaava prosessin oletettiin olevan *random draw*. Tutkijat päättelivät tulostensa perusteella, että pelkästään yhden lopputuotteen sisältämän mallin käyttäminen voi johtaa metsän tuoton aliarvioon ja epäedulliseen kiertoaikaan, jos toisen lopputuotteen hinta vaihtelee samaan aikaan paljon. Tulokset riippuvat kuitenkin oleellisesti siitä, miten paljon tukin (kuitupuun) kantohinta vaihtelee suhteessa kuitupuun (tukkipuun) hintavaihteluun, ja mikä on tukin ja kuitupuun hintavaihtelujen riippuvuus toisistaan.

### *Puuston kasvun ja arvokasvun stokastisuus*

Puuston kasvun epävarmuutta on tutkittu huomattavasti kantohintojen stokastisuutta vähemmän. Tämä johtunee siitä, että puuston kasvu voidaan yleensä ennustaa kantohintoja tarkemmin eikä kasvu yleensä vaihtelee niin paljon kuin kantohinnat. Kasvun epävarmuutta on mallinnettu muun muassa geometrisen Brownin liikkeen ja stokastisen simulaation avulla. Esimerkiksi Valstan (1992b) odotusarvoihin ja yksittäisen puun kasvusimulaattorilla tuotettuihin skenaarioihin perustuvat tulokset viittaavat siihen, että kuusikon kasvun stokastisuus (ja luonnontuhojen mahdollisuus) pidentää sekä riskineutraalin että riskiä kaihtavan metsänomistajan optimaalista kiertoaikaa ja voimistaa harvennushakkuuta. Ero deterministiseen kiertoaikaan on kuitenkin melko vähäinen ja riippuu ennen muuta puiden kuolemismallista.

Puuston arvokasvuun liittyvän epävarmuuden vaikutusta ovat tutkineet muun muassa Lembersky ja Johnson (1975), Kaya ja Buongiorno (1987), Lohmander (1987), Morck ym. (1989) sekä Reed ja Haight (1996). Tosin esimerkiksi viimeksi mainitussa tutkimuksessa käytettiin yhden kiertoajan mallia ja oletettiin, että paljaan maan arvo on vakio ja tiedetään varmasti jo etukäteen.

Kenties tunnetuimmat arvokasvun epävarmuutta koskevat tutkimukset tekivät Clarke ja Reed (1989) ja Reed ja Clarke (1990). He olettivat kantohinnan noudattavan jatkuva-aikaista satunnaiskulkua (geometristä Brownin liikettä). Myös puuston kasvun epävarmuutta kuvattiin lognormaalilla diffuusioprosessilla, mutta toisin kuin useimmissa aikaisemmissa tutkimuksissa, puuston kasvu riippui myös sen iästä, tai vaihtoehtoisesti sen tilavuudesta tai tiheydestä. Korke oli vakio ja metsien kasvatukseen ei liittynyt mitään kustannuksia. Viimemainittua oletusta perusteltiin sillä, että kun kantohinnat ovat tarpeeksi korkealla tasolla, kustannukset eivät vaikuta merkittävästi hakkuupäätöksiin.

Tulokset eivät olleet yllättäviä: optimaalinen kiertoaika riippuu suuresti metsänomistajan suhtautumisesta riskiin sekä kantohinta- ja kasvudynamiikkaa koskevista oletuksista. Jos kantohinnat noudattavat satunnaiskulkua, ne eivät vaikuta odotettuun hakkuuajankohtaan. Toisin sanoen metsänomistaja voi käyttää klassisen Faustmannin kaavan mukaista determinististä kiertoaikaa, koska seuraavan periodin kantohintaa on mahdotonta ennustaa.

Puuston arvokasvuun liittyvän epävarmuuden vaikutusta optimaaliseen kiertoaikaan ovat selvittäneet myös Miller ja Voltaire (1983) sekä Yin ja Newman (1995b, 1997). Hekin kuvasivat arvokasvun epävarmuutta lineaarisella ja geometrisellä Brownin liikkeellä. Yin ja Newman pyrkivät toisessa tutkimuksessaan ottamaan huomioon myös sen, että kiertoaajan pidentämisestä aiheutuu jaksottain toistuvia deterministisiä kustannuksia, jotka koituvat muun muassa metsäpalojen ja hyönteistuhojen torjunnasta sekä metsäteiden kunnossapidosta.

Edellä esitetyissä tutkimuksissa ei kuitenkaan kyetty tuottamaan yksiselitteisiä ratkaisuja matemaattisesti hyvin vaikeisiin stokastisiin dynaamisiin optimointiongelmiin. Norjalaisen Willassenin (1998) mukaan tämä johtui siitä, että tutkijat yrittivät ratkaista kiertoaikakysymystä optimaalisten pysäytysehtojen avulla (*optimal stopping rules*), vaikka heidän olisi pitänyt käyttää impulssikontrolliteoriaa. Willassen itse käytti kolmea erilaista stokastista prosessia kuvaamaan puuston arvokasvun epävarmuutta:

$$\text{i) } \quad dX_t = \alpha dt + \sigma dz \quad (7.7)$$

(lineaarinen stokastinen arvokasvu),

$$\text{ii) } \quad dX_t = \alpha X_t dt + \sigma X_t dz \quad (7.8)$$

(geometrinen stokastinen arvokasvu) ja

$$\text{iii) } \quad dX_t = \rho X_t (1 - \gamma X_t) dt + \sigma X_t dz \quad (7.9)$$

(logistinen stokastinen arvokasvu),

joissa

$X_t$  = metsän arvo,

$\alpha(\cdot)$  = trendi,

$\sigma(\cdot)$  = hajonta,

$\rho$  = metsän luontainen kasvuvauhti (*intrinsic growth rate*),

$1/\gamma$  = luonnon deterministinen kantokyky (*deterministic environmental carrying capacity*),

$dz$  = yksiulotteinen Brownin liike.

Näistä viimeistä stokastista prosessia (iii) voidaan ehkä pitää realistisimpana, koska siinä otetaan huomioon puuston kasvukäyrän logistinen luonne: puuston kasvulla on tietty biologinen raja. Willassenin päätyi siihen, että metsän arvo jokaisena hetkenä ja näin ollen myös kiertoaika, riippuu etenkin diffuusiosta eli

hajonnasta ja korkokannasta, mitä ei voida pitää kovinkaan yllättävänä tuloksena. Harvennushakkuita hänkään ei ottanut huomioon.

### *Arvokasvun ja uudistamistuloksen epävarmuus*

Taylor ja Fortsonin (1991) odotusarvoihin perustuvassa tutkimuksessa epävarmuus liitettiin puuston arvokasvun ohella istutustaimien eloonjäämiseen. Tämä on realistinen ja käytännöllinen lähestymistapa, koska metsänuudistamisen onnistumisen todennäköisyys, ja siten myös kustannukset, liittyvät kiinteästi kiertoaikapäätökseen. Kun otetaan huomioon ennustetut siemenvuodet, myyrä- ja hirvikantojen kehitys, hyönteis- ja sienituhot sekä muut uudistamistulokseen tai taimikon varhaiskehitykseen vaikuttavat tekijät, metsikön edullisin uudistamiskä saattaa helposti vaihdella useita vuosia suuntaan tai toiseen klassisen Faustmannin mallin optimista.

Taylor ja Fortson käyttivät Monte Carlo -simulaatiota taimien eloonjäämiselle, kantohinnalle ja puuntuotokselle, mallinsivat riskiä hajonnalla ja olettivat, että eri puutavaralajien kantohintojen muutokset ovat toisistaan riippumattomia. Tulosten mukaan riskinkaihtaja käyttää korkeaa istutustiheyttä ja lyhyttä kiertoaikaa, riskineutraali taas korkeaa istutustiheyttä ja hieman pitempää kiertoaikaa. Tosin tulokset riippuivat osin kasvupaikan viljavuudesta, eikä harvennuksia otettu huomioon.<sup>51</sup>

### *Luonnontuhojen mahdollisuus*

Tehdessään kiertoaikoja koskevia päätöksiä metsänomistaja joutuu ottamaan huomioon myös erilaisten luonnontuhojen riskin. Yksittäisen metsänomistajan todennäköisyys joutua tämänkaltaisten tuhojen kärsijäksi on pieni, mutta toisaalta tuhojen osuessa omalle kohdalle vahingot voivat olla erittäin suuria. Ymmärrettävästi etenkin pohjoisamerikkalaiset tutkijat ovat pyrkineet sisällyttämään luonnontuhojen mahdollisuuden Faustmannin malliin.

Reed (1984) oletti tutkimuksessaan, että metsänomistaja on riskineutraali, metsäpalo tuhoaa metsän täysin, eikä palaneilla puilla ole arvoa. Metsäpalon todennäköisyys oli jokaisena ajan hetkenä yhtä suuri; sen oletettiin noudattavan jatkuva-aikaista Poisson-prosessia siten, että puiden ikä ei vaikuta palon todennäköisyyteen. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että metsäpalon todennäköisyys kasvaa suoraan verrannollisesti tarkasteltavan aikavälin pituuteen.

Tulosten mukaan metsänomistajan kannattaa lisätä metsäpalon todennäköisyyttä kuvaava riskilisä (*risk premium*) Faustmannin kaavan sisältämään laskentakorkoon, minkä seurauksena kiertoaika lyhenee. Riskilisä vastaa suoraan metsäpalon keskimääräistä todennäköisyyttä. Monimutkaisemmissa tapauksissa,

---

<sup>51</sup> Ks. myös Teeter ja Caulfield (1991). He selvittivät suhteellisen yksinkertaisella mallilla, kuinka epävarmuus tukin tulevasta hinnasta vaikuttaa optimaaliseen istutustiheyteen.

joissa tuli esimerkiksi tuhoaa puuston vain osittain tai metsänomistaja ei olekaan riskineutraali, näin selkeitä päätelmiä ei pystytty tekemään.

Myös muissa tutkimuksissa on päädytty samaan johtopäätökseen: paloriskin takia kiertoaikaa kannattaa lyhentää, jos metsäpalo alentaa palaneen puuston arvoa (Martell 1980, Routledge 1980, Caulfield 1988). Tulokset kuitenkin riippuvat suuresti metsänomistajan suhtautumisesta riskiin ja palaneen puuston myyntiarvosta: lyhintä kiertoaikaa käyttää riskiä kaihtava metsänomistaja, ja mitä vähäisempi on palaneen puun myyntiarvo, sitä enemmän kiertoaikaa kannattaa lyhentää.

Todellisuudessa metsäpalojen todennäköisyys ei ole jokaisena ajan hetkenä sama, vaan siihen vaikuttavat ainakin sääolot, puulaji, puuston ikä, kasvupaikka, harvennushakkuut ja joissakin tapauksissa myös metsän sijaintipaikkakunnan sosioekonomiset tekijät. Reed ja Errico (1985) esittivät, kuinka mallinnuksessa voidaan ottaa huomioon puuston iän vaikutus paloriskiin. He olivat, että metsäpalon todennäköisyys oli yli 70 vuoden ikäisessä kuusikossa 0,005 ja alle 70-vuotiaassa kolminkertainen eli 0,015. Nämä oletukset eivät johtaneet aivan yhtä merkittävään kiertoajan lyhentämiseen (klassiseen Faustmannin sääntöön verrattuna) kuin käytettäessä samaa metsäpalon todennäköisyyttä 0,01 kaikissa ikäluokissa. Tosin tulokset riippuivat suuresti mallien parametrien arvoista.

Reed ja Apaloo (1990) tutkivat vielä tilannetta, jossa metsäpalon todennäköisyys lisääntyy hypähdyksenomaisesti heti ensiharvennusten jälkeen, mutta palautuu vähitellen entiselle tasolle. Esimerkkilaskelman mukaan metsäpaloriski voi vaikuttaa oleellisesti metsikön nettonykyarvoon, joskin tulokset riippuvat paljon paloriskin mallinnuksesta. Tutkijat tarkastelivat paloriskin vaikutusta metsikön nettonykyarvoon ja optimaaliseen kiertoaikaan myös myöhemmissä harvennuksissa. Jos metsäpalon todennäköisyys riippuu ainoastaan metsikön iästä, päädytään samaan tulokseen kuin edellä: metsäpalon todennäköisyyttä kuvaava riskilisa tulee lisätä Faustmannin kaavan sisältämään laskentakorkoon, jolloin optimaalinen kiertoaika lyhenee ja harvennushakkuut voimistuvat. Toisaalta jos metsäpalon todennäköisyys lisääntyy heti harvennusten jälkeen samaan tapaan kuin ensiharvennustenkin kohdalla, tilanne monimutkaistuu huomattavasti. Näin käy myös siinä tapauksessa, että metsäpalojen todennäköisyyttä pyritään etukäteen vähentämään jollakin kustannuksia aiheuttavalla tavalla (Reed 1987).

Edellä mainituissa tutkimuksissa luonnontuhot oletettiin yleensä eksogeeniksi, vaikka käytännössä esimerkiksi harvennushakkuiden voimakkuus ja ajoitus vaikuttavat ainakin tuuli- ja lumituhojen todennäköisyyteen. Thorsenin ja Hellesin (1998) mukaan tulokset muuttuvat, kun luonnontuhot ovat mallissa endogeenisiä ja harvennushakkuut otetaan huomioon: kuusikon kiertoaika ei enää välttämättä lyhene kovin paljon luonnontuhoihin takia. Lisäksi harvennusten määrä lisääntyy ja ne tehdään entistä lievempänä, koska näin voidaan vähentää luonnontuhojen riskiä. Tosin heidän mallissaan paljaan maan arvo oli nolla.

## Suomessa tehdyt empiiriset tutkimukset

Suomessa epävarmuuden vaikutusta metsän optimaaliseen kiertoaikaan on tutkittu melko vähän. Ringbom (1992) on selvittänyt, miten epävarmuus tulevista kantohinnoista vaikuttaa eteläsuomalaisten kuusikoiden harvennushakkuisiin ja optimaaliseen kiertoaikaan, kun kantohinta noudattaa autoregressiivistä AR(1)-prosessia. Metsänomistaja oli joko riskineutraali tai riskinkaihtaja, ja laskentakorko oli kolme prosenttia. Pienin mahdollinen harvennuskertymä oli 35 m<sup>3</sup>/ha ja suurin 250 m<sup>3</sup>/ha, uudistamiskustannus oli 4 000 mk/ha ja hakkuukertymän oletettiin koostuvan vain yhdestä puutavaralajista, havutukista. Tulokset olivat varsin karkeita monien yksinkertaistusten takia, mutta viittasivat siihen, että riskinkaihtaja tekee selvästi voimakkaampia harvennushakkuita ja käyttää pitempää kiertoaikaa kuin riskineutraali metsänomistaja.

Tämän ja edellä esitetyn Valstan (1992b) tutkimuksen lisäksi epävarmuuden vaikutusta metsän taloudellisesti optimaaliseen kiertoaikaan ei ole Suomessa juurikaan tutkittu. Tosin Pukkala ja Miina (1997) ovat esittäneet, kuinka puuston kasvuun, kantohintoihin ja päätöksentekijän preferensseihin liittyvä riski voidaan ottaa huomioon metsäsuunnittelussa erilaisten skenaarioiden avulla. Lisäksi Penttinen (2000) on selvittänyt kantohinnan ja uudistamiskustannusten ei-autonomisten muutosten vaikutusta metsän optimaaliseen kiertoaikaan.

## Epävarmuuden vaikutus metsälötasolla

Kaikissa edellä mainituissa epävarmuustutkimuksissa tarkasteltiin vain yhtä metsikköä. Saadut tulokset pätevät *metsälöön* vain siinä tapauksessa, että eri metsiköiden kehitys ja käsittely eivät riipu toisistaan (ns. lineaarinen metsä). Reed ja Erricon (1986) mukaan stokastiset ja deterministiset kiertoaikatratkaisut eivät kuitenkaan metsälötasolla välttämättä eroa toisistaan kovin paljon ainakaan luonnontuhojen kohdalla, kun tarkastellaan laajoja metsäalueita. Syynä lie-nee mahdollisuus riskin hajauttamiseen ja eräänlaisen portfolion muodostamiseen, joskaan tätä kirjoittajat eivät suoraan maininneet.<sup>52</sup>

Arvioitaessa epävarmuuden vaikutuksia kiertoaikaan on tärkeää ottaa huomioon myös metsänomistajan mahdollisuus riskin hajauttamiseen. Jos metsänomistajalla on hallussaan paljon tasaikäisiä ja muutenkin samanlaisia metsiköitä, ne muodostavat tuottojen ajallisen jakaantumisen kannalta varsin riskipitoisen sijoitussalkun, portfolion. Metsänomistaja voi kuitenkin hajauttaa riskiään hakkaamalla metsiköt eri aikoina. Tällöin nettotuloihin liittyvä varianssi vähenee, eikä riskinkaihtamisen voimakkuudella enää välttämättä olekaan suurta vaikutusta metsän optimaaliseen kiertoaikaan. Tutkimusten mukaan hakkuiden ajallinen hajauttaminen on sitä kannattavampaa, mitä suurempi on metsikkö, mitä parempi on kasvupaikka, mitä alhaisempi on korkokanta ja mitä pienem-

---

<sup>52</sup> Epävarmuuden vaikutusta metsälötasolla on tutkittu hyvin vähän, ks. kuitenkin Hoganson ja Rose (1987), Gassmann (1989), Gong (1994).

mät ovat puunkorjuun kiinteät kustannukset (Gong 1999). Riskinkarttamisen vaikutus optimaaliseen kiertoaikaan voi siis olla epäsuora – metsänomistaja siirtää hakkuitaan luodakseen optimaalisen portfolion.

Vastaava vaikutus on puunmyyntitulojen verotuksen progressiivisuudella. Jos progressio on kovin jyrkkä, metsänomistajan kannattaa ehkä ajallisesti tasoittaa hakkuitaan alhaisemman veroprosentin saavuttamiseksi, vaikka hänen puunmyynnistään saamansa bruttotulot tämän vuoksi hieman laskisivatkin (Thorsen 1999).

Riskin hajauttamisen ei tietenkään tarvitse rajoittua pelkkään metsään, vaan se voi koskea päätöksentekijän koko taloutta. Tällöin tilanne monimutkaistuu entisestään siinä mielessä, että yksittäisten metsiköiden hakkuut ovat yhteydessä paitsi toisiinsa, myös metsänomistajan muuhun talouteen ja muihin sijoituskohteisiin. Tämäntyyppisiä tilanteita ovat tutkineet rahoitusteoriassa keskeisellä sijalla olevalla portfoliomalleilla muun muassa Mills ja Hoover (1982), Thomson (1991, 1997) ja Heikkinen (2001).

### 7.3 Epätäydelliset pääomamarkkinat

Klassinen Faustmannin malli perustuu täydellisiin pääomamarkkinoihin, joiden vallitessa metsänomistajan kulutus- ja hakkuupäätökset separoituvat. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että metsänomistajan muulla taloudella, tuloilla, iällä, varallisuudella tai henkilökohtaisilla preferensseillä ei ole vaikutusta hakkuupäätöksiin. Kuten aikaisemmin mainittiin, empiirisissä tutkimuksissa on kuitenkin havaittu, että todellisuudessa tämä ei pidä paikkaansa, vaan metsänomistajakohdittaiset tekijät vaikuttavat hakkuisiin (esim. Binkley 1981, Kuuluvainen ja Salo 1991, Kuuluvainen ym. 1996).

Epätäydelliset pääomamarkkinat voivat ilmetä usealla eri tavalla: metsänomistaja ei saa lainkaan lainaa, hänellä on jokin absoluuttinen tai varallisuuteen sidottu suhteellinen lainarajoite, anto- ja otolainakorot eroavat toisistaan, lainan saamiseen ja pääoman sijoittamiseen liittyy välitys- ja informaatiokustannuksia, metsä tai muut sijoitukset eivät kelpaa lainan vakuudeksi koko arvostaan jne. Tällaisessa tilanteessa metsänomistajan kannattaa ehkä hieman tinkiä voitostaan (klassisella Faustmannin mallilla lasketusta kiertoaajasta) saadakseen kuluustaan ja muita ajan kuluessa muuttuvia tarpeitaan paremmin vastaavat tulot metsästään. Toisaalta mitä tiukempia vaatimuksia maanomistaja asettaa metsätulojensa ajoittumiselle, sitä enemmän hän joutuu luopumaan suurimmasta mahdollisesta voitosta (nettonykyarvosta).

Epätäydelliset pääomamarkkinat asettavatkin varallisuudeltaan erilaiset metsänomistajat helposti eri asemaan. Jos kantohinnat ovat matalalla, varakas metsänomistaja voi helposti lykätä uudistuskypsyttä lähentelevän puustonsa hakkuuta, koska hän voi turvautua pankista omaisuuttaan vastaan saatavaan lainaan. Noususuhdanteessa hän sitten hakkaa runsaasti. Vähän varallisuutta omistava metsänomistaja ei näin välttämättä voi tehdä, vaan hän joutuu myymään puuta

metsästään suhteellisen tasaisesti kulutuksensa turvaamiseksi. Niinpä metsä muodostuukin epätäydellisillä pääomamarkkinoilla helposti varakkaalle metsänomistajalle arvokkaammaksi tuotantovälineeksi kuin sellaiselle, joka on ostanut metsätilansa velkapääomalla (Ahonen 1959, Ilvessalo 1965 s. 389).

Empiirisissä tutkimuksissa epätäydellisten pääomamarkkinoiden vaikutus metsänomistajien käyttäytymisen on havaittu ns. Volvo-efektinä (von Malmberg 1967, Johansson ja Löfgren 1985). Metsänomistaja ei maksimoikaan voittoa, vaan käyttää metsäänsä ikään kuin pankkina ja myy puuta silloin, kun on aika tehdä jokin huomattava investointi tai kulutuspäätös, kuten ostaa uusi auto. Jos hän pyrki ainoastaan suurimpaan voittoon, hänen kannattaisi hakata metsä heti sen saavutettua taloudellisesti edullisimman iän, eikä sitoa hakkuupäätöstä ajallisesti uuden auton hankintaan.<sup>53</sup>

### 7.3.1 Varhaiset tutkimukset epätäydellisten pääomamarkkinoiden vaikutuksista kiertoaikaan

Epätäydelliset pääomamarkkinat vaikeuttavat metsän taloudellisesti optimaalisen kiertoajan määrittämistä Faustmannin mallilla, minkä vuoksi tämäntyyppistä analyysia on tehty suhteellisen vähän. Ensimmäisten joukossa asiaa selvitti ruotsalainen taloustieteilijä Harald Dickson (1953), joka päätteli, että metsänomistajan kannattaa epätäydellisten pääomamarkkinoiden oloissa ehkä lyhentää kiertoaika.

Myöhemmin Murphy ym. (1977) ovat tutkineet luottorajoitteiden vaikutusta metsän optimaaliseen kiertoaikaan. Tulokset viittasivat siihen, että epätäydellisillä pääomamarkkinoilla optimaalinen kiertoaika ei ole vakio, vaan vaihtelee ajan kuluessa. Tämä johtuu metsänomistajan varallisuuden muutoksista – varallisuuden kasvaessa luottorajoitteiden merkitys vähenee.<sup>54</sup> Tosin tuloksiin kannattaa suhtautua varauksella, koska tutkijat pystyivät ratkaisemaan mallinsa vain numeerisesti ja ratkaisut olivat sidoksissa sovellettuun äärelliseen aikahorisonttiin.

Lappi ja Siitonen (1985) puolestaan kehittivät ”hyötymallin”, jossa otettiin huomioon sekä pääoman käytön tehokkuus että puunmyyntitulojen tasaisuus. Mallissa metsänomistajan hyötyfunktioita maksimoitiin yli äärellisen aikahorisontin (100 vuotta) olettaen, että sijoitus- ja lainakorot ovat keskenään erisuuruisia. Tulosten mukaan metsäpääomalle saatava sisäinen korko voi olla joko sijoituskoron suuruinen, lainakoron suuruinen tai jotakin niiden välillä, jolloin metsä on omistajalleen edullisin ”pankki” (Kilki 1985 s. 131).

---

<sup>53</sup> Joskus on jopa esitetty, että metsänomistaja hakkaa kolmen a:n säännön mukaan: ”kun on aika vaihtaa autoa, asuntoa tai akkaa”.

<sup>54</sup> Murphy ym. (1977) vertailivat viittä erilaista tilannetta: 1) pääomamarkkinat ovat täydelliset, 2) metsänomistaja ei saa lainkaan lainaa, 3) metsänomistajalla on jokin nollasta poikkeava absoluuttinen lainarajoite, 4) metsänomistajalla on varallisuuteen sidottu suhteellinen lainarajoite ja 5) anto- ja ottolainakorot eroavat toisistaan.

Tutkijat päättelivät lineaarisella ohjelmoinnilla ratkaistujen esimerkkitapausten perusteella edelleen, että epätäydellisten pääomamarkkinoiden oloissa metsänomistajan kannattaa ehkä tasoittaa hakkuutaan ajan mittaan. Näin he päätyivät samaan johtopäätökseen kuin metsänhoitajat ja metsäekonomistit ovat usein tulleet intuitiivisesti (vrt. tilakohtainen kestävyys ja kehitysluokkien tavoitepinta-alaosuudet tilakohtaisessa metsäsunnittelussa). Lapin ja Siitosen mallia on kuitenkin pidetty puutteellisena, koska siinä käytettiin lineaarista hyötyfunktioita ja maxmin-tyyppistä intertemporaalista tavoitefunktioita. Ne johtavat väistämättä ratkaisuihin, joissa kulutus (tai hyöty) pysyy koko ajan tasaisena (Tahvonen ym. 2001).

Myös Ollonqvist ja Kajanus (1992) ovat selvittäneet epätäydellisten pääomamarkkinoiden vaikutusta eteläsuomalaisen, päätehakkuuikää lähestyvän puolukkatyyppin männikön metsänuudistamistapaan ja kiertoaikaan. Tulokset laskettiin käyttäen kymmentä erilaista metsänkäsittelyvaihtoehtoa: kiertoaajat vaihtelivat 74 vuodesta 91 vuoteen uudistamistavasta (istutus, kylvö, luontainen) riippuen. Tulosten mukaan metsikkökohtaiset nettohyötylaskelmat antavat harhaisia tuloksia edullisimmasta uudistamismenetelmästä ja kiertoajasta, kun metsänomistajan käytössä ei ole täydellisiä pääomamarkkinoita (sijoitus- ja velkakorot poikkeavat toisistaan). Tutkijat päättelivät edullisimman metsänuudistamisvaihtoehdon olevan epätäydellisten pääomamarkkinoiden vallitessa tapauskohtainen ja riippuvan metsänomistajan tulotavoitteista ja subjektiivisesta aikapreferenssistä.

### 7.3.2 Kiertoaika- ja elinkaarimallien yhdistäminen

Sittemmin Tahvonen (1998) ja Tahvonen ym. (2001) ovat jatkaneet Faustmannin mallin yleistämistä epätäydellisten pääomamarkkinoiden suuntaan. He sisällyttivät metsänomistajan lainarajoitteen malliin, joka yhdistää toisaalta klassisen kiertoaikamallin ja toisaalta Yaarin (1964) mallin kotitalouden säästämistä ja kulutusta koskevasta intertemporaalisesta päätöksenteosta.<sup>55</sup> Tässä niin sanotussa elinkaarimallissa (*life-cycle model*) taloudenpitäjä valitsee kulutuksensa ja säästämisen tason jatkuvasti niin, että hänen elinikäinen hyvinvointinsa maksimoituu. Perusajatus on se, että kulutuksen nykyinen taso ei määräydy pelkästään nykyisten tulojen perusteella, vaan tunnetuiksi oletettujen elinaikaisten tulojen perusteella. Mallin lähtökohta on siis täydellinen ennakkotietämys tulevaisuuden tuloista.

Malleissa lainarajoite otettiin käytännössä huomioon estämällä metsänomistajan rahavarojen muuttuminen negatiiviseksi. Tämän katsottiin kuvaavan myös yleisempää tilannetta, jossa anto- ja ottolainauksen korot eroavat toisistaan ja ottolainan korko on niin korkea, että se käytännössä vastaa lainarajoitetta. Tarkastelun kohteena oli yksi metsikkö ja metsänomistajan hyötyfunktion oletettiin

---

<sup>55</sup> Intertemporaalisessa päätöksenteossa on kysymys siitä, kuinka taloudenpitäjät allokoivat tuloja kulutukseen ja säästämiseen ajan kuluessa.

olevan kulutuksen suhteen kasvava ja konkaavi. Metsänomistajan altruistisen perinnönjättömotiivin katsottiin kuvaavan ääretöntä aikahorisonttia.<sup>56</sup>

Tulosten mukaan klassinen Faustmannin malli voi antaa virheellisiä tuloksia epätäydellisten pääomamarkkinoiden oloissa. Kun luotonsaanti on rajoitettua, optimaalinen kiertoaika ei olekaan vakio, joskin se ajan kuluessa lähestyy stationaarista ratkaisua. Lainarajoitteen takia metsänomistajan ei myöskään välttämättä kannata istuttaa uutta metsää päätehakatun tilalle, vaikka tämä olisi klassisen Faustmannin mallin mukaan taloudellisesti järkevää. Jos istutusta halvempien metsänuudistamismenetelmien käyttö ei olisi esimerkiksi kasvupaikan biologisten ominaisuuksien takia mahdollista eikä metsälaki velvoittaisi uudistamaan, tilanne johtaisi metsän hävitykseen.

Kun metsänomistaja ei saa lainaa, kiertoajan pituus riippuu kantohinnan, uudistamiskustannusten ja markkinakoron ohella myös metsänomistajakohtaisista tekijöistä: subjektiivisesta aikapreferenssistä, metsätalouden ulkopuolisista tuloista ja alkuvarallisuudesta (taulukko 2). Fisheriläinen separaatio-oletus ei siis enää pidäkään paikkaansa. Mitä suuremmat ovat metsänomistajan tulot ja varallisuus, sitä pitempää kiertoaikaa hän käyttää. Näin varakas metsänomistaja tavallaan tuhlaa omaisuuttaan vähävaraisen kasvattaessa sitä, minkä seurauksena molemmat päätyvät ajan mittaan samaan varallisuuteen. Yhtäläillä hieman yllätyksellisesti, tai ainakin toisin kuin klassisessa Faustmannin mallissa, markkinakoron nouseminen johtaakin aikaisempaa *pitempään* kiertoaikaan.

Taulukko 2. Eri tekijöiden vaikutus optimaaliseen kiertoaikaan täydellisillä ja epätäydellisillä pääomamarkkinoilla (metsänomistaja ei saa lainaa).

Tekijä	Täydelliset pääomamarkkinat, (klassinen Faustmannin malli)	Epätäydelliset pääomamarkkinat, (Tahvonen ym. 2001)
Kantohinta	-	-
Uudistamiskustannukset	+	+
Markkinakorko	-	+
Metsänomistajan subjektiivinen aikapreferenssi	0	-
Metsänomistajan metsätalouden ulkopuoliset tulot ja varallisuus	0	+

<sup>56</sup> Metsänomistajan hyötyfunktio oli  $U(c)=c^{1-\alpha}/(1-\alpha)$  tai  $U(c)=(c^{1-\alpha}-1)/(1-\alpha)$ , joissa  $\alpha \in (0,1)$  on suhteellinen riskinkaihtamisen mitta ja sen käänteisluku on intertemporaalinen substituutiojousto; käytännössä molemmat mittaavat hyötyfunktion konkaavisuutta. Kyseiset hyötyfunktiot luetaan ns. CRRRA-hyötyfunktioihin (*constant relative risk aversion*), joissa riskinkarttamisen aste pysyy samana, vaikka varallisuus muuttuu.

Lainarajoite selittää sen, miksi ”lyhytnäköinen ja kärsimätön” (korkean subjektiivisen aikapreferenssin omaava) metsänomistaja hakkaa metsänsä nuorempa-  
na kuin muuten samanlainen, pitkän aikavälin hyvinvointia painottava metsän-  
omistaja. Klassinen Faustmannin mallihan ennustaa, että kaikki metsänomistajat  
käyttävät täsmälleen samanpituista kiertoaikaa samanlaisissa metsiköissä.

### 7.3.3 Normaalimetsän optimaalisuus

Normaalimetsää on yleensä pidetty metsätalouden ihannelilana siihen liittyvän  
tasaisuuden ja (puuntuotannollisen) kestävyuden takia. Se on ollut myös vahvas-  
ti taustalla metsätalouden suunnittelussa laskettaessa valtakunnallisia, alueellisia  
tai tilakohtaisia hakkuusuunnitteita ja puuston ikäluokittaisia tavoiteosuuksia.

Mutta kannattaako metsänomistajan pyrkiä normaalimetsään riippumatta  
metsänsä alkuperäisestä ikäluokkakajakaumasta? Tätä kysymystä on pidetty eräänä  
metsäekonomin monimutkaisimmista, eikä sitä ole kovin paljon analyyt-  
tisesti tutkittukaan. Periaatteessa kysymys on kuitenkin yksinkertaisesta vaihto-  
kaupasta: normaalimetsään pyrkiminen aiheuttaa kustannuksia, koska hakkuissa  
joudutaan poikkeamaan Faustmannin kaavan mukaisesta optimaalisesta kierto-  
ajasta. Toisaalta kun normaalimetsä on lopulta saatu aikaan, sen mahdollistamat  
tasaiset hakkuut ja metsätulot voivat olla hyödyllisiä epätäydellisillä pääoma-  
markkinoilla tai epätäydellisen informaation varassa toimivalle metsänomista-  
jalle.

Viimeaikaiset tutkimustulokset osoittavat analyytisesti, että epävarmuuden,  
epätäydellisten pääomamarkkinoiden ja muiden Faustmannin mallin realisti-  
suutta lisäävien laajennusten huomioon ottamisen seurauksena metsikkökohtai-  
nen analyysi ei ole riittävä, vaan tarkastelu täytyy ulottaa koko metsän ikäluok-  
karakenteeseen ja metsänomistajan koko talouteen. Tällöin normaalimetsän op-  
timaalisuus tai puuntuotannon tasaisuus nousee keskeiseksi kysymykseksi niin  
teoreettisissa malleissa kuin käytännön metsäsuunnittelussakin.

Metsäsuunnittelun tutkimuksessa eri metsiköiden hakkuupäätösten riippu-  
vuus toisistaan on tiedetty jo kauan. Alan tutkimuksesta on kuitenkin vaikea  
löytää analyytisiä tuloksia metsälön ikäluokkarakenteen pitkän aikavälin tasa-  
painosta (ks. esim. Johnson ja Scheurman 1977, Davis ym. 2001). Esimerkiksi  
Suomen metsätaloudessa laajasti käytössä oleva MELA-ohjelmisto nojaa klassi-  
seen Faustmannin malliin ja eksogeeniseen puun hintaan, mikä johtaa helposti  
hakkuumäärän suureen vuosittaiseen vaihteluun, alkupuustosta riippuen. Tämän  
estämiseksi vuotuisia hakkuuta joudutaan tyyppillisesti rajoittamaan keinotekoi-  
sesti niin, että samalla tullaan implisiittisesti olettaneeksi tasaisen puuntuotan-  
non optimaalisuus.<sup>57</sup>

---

<sup>57</sup> Toinen vaihtoehto olisi endogenisoida raakapuun tarjonta tai käyttää metsälaskelmissa  
konkaavia hyötyfunktioita, jolloin hyötyfunktion muoto implikoisi puun markkinahintoja  
(ks. Lyon ja Sedjo 1983, Sedjo ja Lyon 1990, Adams ym. 1996).

Heaps (1984) tutki normaalimetsän optimaalisuutta ottamalla huomioon, että puunmyynnistä saatavat nettotulot riippuvat metsikön iän ohella hakkuun yksikkökustannuksista. Klassisessa Faustmannin mallissa hakkuun yksikkökustannukset ovat vakioiset, mutta Heaps oletti niiden riippuvan epälineaarisesti hakkuumäärästä. Lisäksi hän oletti, että aika ja metsämaa ovat jatkuvia muuttujia. Vaikka Heaps ei pystynyt osoittamaan normaalimetsän olevan stabiili tasapaino hakkuun yksikkökustannuskäyrän ollessa aidosti konvekksi, hän kuitenkin arveli, että normaalimetsä voi hyvinkin olla käytännöllinen ja hyväksyttävä päämäärä, kun epävarmuus otetaan huomioon.

Tahvonen (1998) puolestaan päätteli, että kun metsänomistaja ei saa luottoa elinkaarensa tuloja vastaan, hänelle syntyy taloudellinen kannustin pyrkiä kohti tasaisia hakkuuta. Tämä saattaa ilmetä käytännössä esimerkiksi siten, että metsänomistaja päätehakkaa tietyllä hetkellä kahdesta täsmälleen samanlaisesta metsiköstä vain toisen. Näin eri metsiköiden hakkuut ovat riippuvaisia toisistaan, kun klassisessa Faustmannin mallissa niiden oletettiin olevan toisistaan riippumattomia. Jotta metsänomistaja pystyisi tasoittamaan puunmyyntitulojaan, hänen kannattaisi muokata metsänsä ikärakennetta kohti normaalimetsää.

### *Metsän ikäluokkamalli*

Mitra ja Wan (1985, 1986) ja Mitra ym. (1991) selvittivät normaalimetsän optimaalisuutta olettaen, että puun käyttö voidaan suoraan samaistaa hyötyyn. Mallin oletukset olivat varsin vahvoja: metsänomistaja käyttää puunsa tai puunmyyntitulonsa välittömästi hakkuun jälkeen, harvennushakkuuta ei tehdä, hakkuun yksikkökustannukset eivät riipu hakattavien metsiköiden koosta, metsänhoidosta ei aiheudu mitään kustannuksia (ei edes uudistamiskustannuksia), maa-ala metsitetään (kylvetään) heti päätehakkuun jälkeen, metsämaalla ei ole vaihtoehtoisia käyttömuotoja, ja metsiköt eroavat toisistaan ainoastaan iän suhteen. Jokaisella diskreetillä ajanjaksolla voitiin päätehakata mielivaltainen osa kustakin metsiköstä, koska maapinta-ala oli jatkuva muuttuja. Kyseisen asetelman on katsottu kuvaavan joko omavaraista (autarkiassa toimivaa) metsälöä, monopoli-metsänomistajan voitonmaksimointiongelmää, suunnittelijan yhteiskunnallisen hyödyn maksimointiongelmää tai hyvin toimivia metsämarkkinoita (Tahvonen ja Salo 2000).

Tulokset riippuvat muun muassa päätöksentekijän hyötyfunktion muodosta ja diskonttaamisesta. Kun hyötyfunktio on lineaarinen, päädytään aina sykliseen ratkaisuun, jossa metsälön alkuperäinen ikäluokkarakenne toistuu määrävällein. Aidosti konkaavin hyötyfunktion kohdalla diskonttauksen vaikutus sen sijaan on ratkaiseva: jos tulevaisuuden hyötyjä ei diskontata, kannattaa aina pyrkiä kohti normaalimetsää, mutta kun ne diskontataan positiivisella korolla, normaalimetsäkonvergenssiä ei synny kuin sattumalta (taulukko 3). Tosin Mitra ja Wan (1985) esittivät ainoastaan kaksi numeerista esimerkkiä jälkimmäisestä tapauksesta. Myöhemmin Wan (1994) osoitti analyttisesti syklin olemassaolon positiivisen koron ja kahden puuston ikäluokan tapauksessa, ja Tahvonen ja Salo

Taulukko 3. Yhteenvedo normaalimetsän optimaalisuutta koskevien tutkimusten tuloksista.

Tutkimus	Aika	Metsäala	Hyötyfunktio	Korko	Paljaalla metsämaalla vaihtoehtoisia käyttömuotoja	Onko normaali-metsä optimaalinen pitkällä aikavälillä?
Heaps (1984)	jatkuva	jatkuva	lineaarinen/ epälineaarinen	positiivinen/ nolla	ei	?
Mitra ja Wan (1985)	diskreetti	jatkuva	lineaarinen aidosti konkaavi	positiivinen/ nolla positiivinen/ nolla	ei ei	ei ei välttämättä
Mitra ja Wan (1986)	diskreetti	jatkuva	lineaarinen aidosti konkaavi	nolla nolla	ei ei	ei kyllä
Wan (1994)	diskreetti	jatkuva	aidosti konkaavi	positiivinen/ nolla	ei	ei <sup>1</sup>
Tahvonen ja Salo (2000)	jatkuva	diskreetti	aidosti konkaavi	positiivinen/ nolla	ei	kyllä <sup>2</sup>
Salo ja Tahvonen (2001a)	diskreetti	jatkuva	aidosti konkaavi	positiivinen/ nolla	ei kyllä	ei <sup>3</sup> kyllä <sup>3,4</sup>
Salo ja Tahvonen (2001b)	diskreetti	jatkuva	aidosti konkaavi	nolla positiivinen	ei ei	ei <sup>5,6</sup> ei <sup>5</sup>
Salo ja Tahvonen (2001c)	diskreetti	jatkuva	aidosti konkaavi	positiivinen/ nolla	kyllä	kyllä <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Metsässä on vain kaksi puuston ikäluokkaa. Myöhemmin Salo ja Tahvonen (2000) osoittivat tuloksen pätevän myös siinä tapauksessa, että metsässä on mielivaltainen määrä puuston ikäluokkia.

<sup>2</sup> Jos laskentakorkokanta on "riittävän pieni" ja puuston alkuperäinen ikäluokkarakenne ei ole "liian kaukana" normaalimetsästä.

<sup>3</sup> Metsässä on vain kaksi puuston ikäluokkaa.

<sup>4</sup> Jos paljaan metsämaan siirtäminen vaihtoehtoiseen käyttömuotoon (esim. maatalous, luonnonsuojelu) ei aiheuta kustannuksia.

<sup>5</sup> Kun metsässä on mikä tahansa määrä puuston ikäluokkia ja boniteetteja.

<sup>6</sup> Millekään yksittäiselle boniteetille ei yleensä muodostu normaalimetsää. Kokonaishakkuut kuitenkin tasoittuvat, koska eri boniteeteilla tehtävät hakkuut korvaavat toisiaan.

(2000) positiivisen koron ja minkä tahansa puuston ikäluokkamäärän tapauksessa.

Tahvosen ja Salon (2000) mukaan Mitra–Wan -mallin tulokset kuitenkin muuttuvat, kun mallissa käytetään diskreetin ajan sijaan jatkuvaa aikaa ja jatkuvan maapinta-alan tilalla diskreettiä maapinta-alaa niin, että pienin käsittely-yksikkö on yksi puu. Lisäksi he hyväksyivät aikaisemmasta poiketen varastojen olemassaolon, eli hakattu puutavara tai siitä saatu tulo voitiin kuluttaa milloin

tahansa päätehakkuun jälkeenkin. Heidän mukaansa kyseinen malli voi kuvata lainarajoitteista metsänomistajaa tai yhteiskunnallisen suunnittelijan ongelmaa. Kolmas tulkinta on metsänomistaja, joka käyttää kaiken puun omassa tuotantoprosessissaan tai myy tuotteensa markkinoilla. Näin ollen malli soveltuu myös metsää omistavalle puunjalostusyriykselle.

Vaikka Tahvosen ja Salon (2000) jatkuva-aikaisen tarkastelun mallissa normaalimetsä osoittautui optimiratkaisuksi (ainakin ”riittävän” alhaisilla diskonttokoroilla ja metsän alkuperäisen ikäluokkajakauman ollessa ”riittävän” lähellä normaalimetsää), niin sen saavuttaminen saattoi edellyttää metsän pirstomista pieniksi, jopa yksittäisen puun kokoisiksi ikäluokiksi. Tulos oli siinä mielessä odotettu, että diskreetin ajan malleissa ikäluokkarakenteen tasoittamisen marginaalikustannukset ovat aina positiivisia, mutta jatkuva-aikaisen tarkastelun malleissa ne lähestyvät nolaa, minkä seurauksena syklistyys voi hävitä ja normaali-metsä muodostua optimaaliseksi.

Se, kuinka pitkä optimaalinen kiertoaika on ja kuinka lähelle normaalimetsää kannattaa edetä, riippuu päätöksentekijän lainarajoitteista, hyötyfunktion muodosta ja subjektiivisesta aikapreferenssistä samoin kuin markkinakorosta, puuston eri ikäluokkien kasvufunktioista ja metsälön alkuperäisestä ikäluokkajakau-masta. Jos metsänomistajalla on lainarajoite, mutta hänen varallisuutensa, metsätalouden ulkopuoliset tulonsa tai subjektiivinen aikapreferenssinsä on tarpeeksi suuri, normaalimetsään ei ehkä kannata pyrkiä lainkaan. Selitys on järjekenkää: kun metsänomistaja on tarpeeksi varakas tai metsätulojen osuus kokonaistuloista on tarpeeksi pieni, hänellä ei ole tarvetta tasoittaa ajallisesti metsätulojaan. Tarpeeksi korkean subjektiivisen aikapreferenssin omaavan metsänomistajan taas ei kannata tehdä normaalimetsän muodostamiseen tarvittavia ajallisia allokaatioita – tähän hän on liian ”lyhytnäköinen ja kärsimätön”.

Kaikissa edellä mainituissa Faustmannin mallin laajennuksissa metsämaa oletettiin laadultaan ja puuntuottokyvyltään homogeeniseksi. Salo ja Tahvonen (2001b) ovat osoittaneet, että realistisemmassa tapauksessa, jossa puuston kasvu vaihtelee metsämaan viljavuuden eli boniteetin mukaan (ja aika on diskreetti ja maa-ala jatkuva muuttuja), normaalimetsä ei välttämättä enää olekaan optimaalinen. Tosin tulos riippuu jälleen siitä, onko korko positiivinen (taulukko 3). Jos diskonttausta ei tehdä, hakkuut tasoittuvat, mutta millekään yksittäiselle boniteetille ei välttämättä synny normaalimetsää. Eri boniteeteilla tehtävät hakkuut kuitenkin korvaavat toisiaan siten, että lopputuloksena saadaan tasainen hakkuumäärä. Jos tulevat nettotulot diskontataan, normaalimetsän sijasta syntyy sykli, jonka rakenne riippuu metsän alkuperäisestä ikäluokkajakaumasta.

Viimeksi Salo ja Tahvonen (2001a, c) ovat laajentaneet Mitra–Wan -mallia ottamalla huomioon paljaan metsämaan vaihtoehtoiset käyttömuodot. Normaali-metsä näyttäisi olevan positiivista korkokantaa sovellettaessa optimaalinen ratkaisu, jos paljaan maan käyttömuotoa voidaan vaihdella metsätalouden ja maatalouden välillä ilman kustannuksia. Tulos johtuu siitä, että metsiköt on mahdollista aina jättää hakkuun jälkeen tarvittavaksi ajaksi maatalouskäyttöön, kunnes

niiden metsätaloustalouteen ottaminen palvelee taas normaalimetsän saavuttamista. Jos maankäyttömuodon muutoksesta sen sijaan aiheutuu kustannuksia, normaalimetsä ei ole yleensä optimaalinen, vaan syklisyys säilyy ja maan optimaalinen kohdentaminen metsä- ja maataloustalouteen kesken riippuu metsän alkutilasta ja maan alkuallokaatiosta.

Normaalimetsän optimaalisuus näyttäisi siis riippuvan varsin paljon siitä, mitä malli tarkasti ottaen kuvaa. Erityisen keskeisellä sijalla ovat hyötyfunktion muoto, korko, maan vaihtoehtoiset käyttömuodot ja ajan mallinnustapa. Metsänkäsittelyä koskevilla analyyseillä aika oletetaan usein diskreetiksi, koska tällöin ongelmien matemaattinen ratkaiseminen helpottuu. Puuston voidaan kuitenkin ajatella kasvavan myös jatkuvasti, vaikka kasvu tapahtuukin pääosin keväällä ja kesällä. Myös metsänomistajan voidaan ajatella tekevän päätöksiään jatkuvasti. Sen sijaan maa-alan kohdalla diskreettiä oletusta voidaan ehkä pitää jatkuvaa realistisempänä, koska pienin käsittely-yksikkö on yleensä yksi metsikkö, tai ainakin yksi puu.

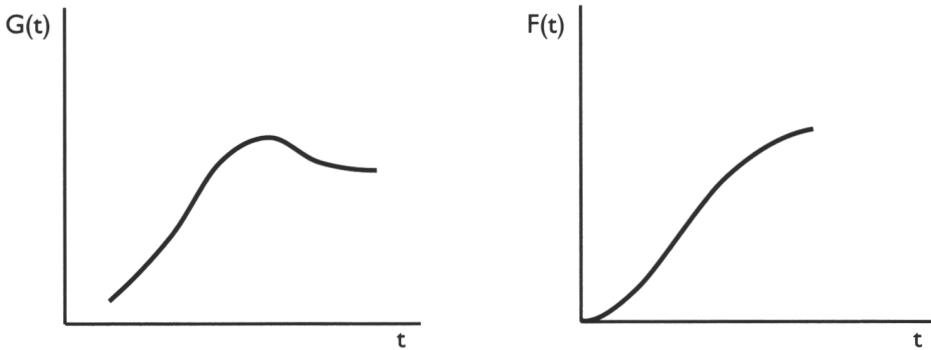
## 7.4 Metsän muut kuin puuntuotannolliset hyödyt

Klassisessa Faustmannin mallissa oletetaan, että metsästä saadaan vain puunmyyntituloja. Todellisuudessa metsänomistaja voi arvostaa niiden ohella esimerkiksi runsaita marja- ja sienisatoja, paikalliset asukkaat kauniita maisemia ja monipuolisia riistasaaliita, ja yhteiskunta ekologisesti arvokkaita luontokohteita, erämaita ja metsien hiilensitomiskykyä.

Viimeisten vuosikymmenien aikana Faustmannin mallia onkin pyritty laajentamaan niin, että siinä voitaisiin ottaa huomioon puunmyyntitulojen ohella myös metsän tuottamat muut hyödyt. Hartmanin (1976) tutkimus on tässä suhteessa klassinen. Hän oletti, että metsän virkitys- ja muut arvot lisääntyvät monotonisesti puuston ikääntyessä (kuva 8), ja että ne voidaan yhteismitallistaa puunmyyntitulojen kanssa.

Optimaaliseksi kiertoajaksi saadaan nyt se puuston ikä, joka maksimoi sekä puunmyyntituloista että metsän muista hyödyistä saatavan diskontatun nykyarvon. Mitä suurempi osa hyödyistä on peräisin muista kuin puunmyyntituloista, sitä enemmän puuston kiertoaika kannattaa pidentää. Ääritapauksessa puustoa ei kannata hakata lainkaan. Tosin tulos riippuu täysin siitä, millaiseksi metsän muiden hyötyjen ja puuston iän välinen riippuvuus oletetaan. Hartmannin malli on esitetty formaalisti liitteessä 3.

Myöhemmin samantyyppistä analyysia ovat tehneet muun muassa Calish ym. (1978), Nguyen (1979), Hyde (1980), Strang (1983), Bowes ja Krutilla (1985), Clark (1990), Englin ja Klan (1990), Snyder ja Bhattacharayya (1990), Swallow ym. (1990) sekä Koskela ja Ollikainen (2001). Lisäksi Swallow ja Wear (1993) ovat tutkineet maisemallisten ja ekologisten hakkuurajoitteiden vaikutuksia kiertoaikoihin. Kaikkien näiden muuten ansiokkaiden tutkimusten puutteena



Kuva 8. Hartmanin oletus puuston hakkuuarvon  $G(t)$ , metsän virkistys- ja muiden arvojen  $F(t)$  sekä puuston iän  $t$  välisestä riippuvuudesta.

voidaan pitää sitä, että niissä oletettiin suoraviivaisesti Fisherin separaatioteoreeman pitävän paikkansa.

#### *In situ -arvostukset rikkovat separaation*

Tahvonen (1998, 1999b) on selvittänyt markkinattomien ympäristö- ja tunnearvojen (ns. *in situ* -arvostusten) vaikutusta kiertoaikaan yhdessä tasaikäisessä metsikössä. Hän oletti, että pääomamarkkinat ovat täydelliset ja metsänomistajalla on altruistinen perinnönjättömotiivi. Toisin kuin Hartman, Tahvonen maksimoi päätöksentekijän hyötyä – ei puunmyyntitulojen ja muiden rahassa mitattavien hyödykkeiden ja palvelusten summaa.

Hartmanin (ja Faustmannin) mallissa kantohinnan tai koron nousu lyhentää kiertoaikaa ja uudistamiskustannusten nousu pidentää sitä, mutta Tahvosen tutkimusten mukaan kyseisten tekijöiden vaikutukset riippuvat tulo- ja substituoivaikutusten voimakkuudesta (taulukko 4). Tahvosen mallissa myös separaatio-oletus rikkoutuu, eli optimaalinen kiertoaika riippuu metsänomistajakohtaisista tekijöistä, joita ei ole mukana Hartmannin mallissa. Koska esimerkiksi metsänomistajan ikä, tulot ja varallisuus muuttuvat ajan myötä, optimikiertoajan pituuskaan ei ole vakio.

Metsänomistajan subjektiivisen aikapreferenssin, varallisuuden ja iän vaikutukset ovat monitahoisia ja riippuvat osin toisistaan. Esimerkiksi nuori ja ”kärsvällinen” metsänomistaja, jonka subjektiivinen aikapreferenssi on siis markkinakorkoa pienempi, käyttää lyhyempää kiertoaikaa kuin vastaavalla aikapreferenssilla toimiva vanha metsänomistaja. Toisaalta jos ikäryhmien subjektiiviset aikapreferenssit ovatkin markkinakorkoa suurempia, muuttuvat tulokset päinvastaisiksi.

Taulukko 4. Eri tekijöiden vaikutus optimaaliseen kiertoaikaan, kun *in situ* -arvostusten oletetaan pidentävän kiertoaikaa ja pääomamarkkinat ovat täydelliset.

Tekijä	Hartman (1976)	Tahvonon (1998)	Tahvonon & Salo (1999c)
Kantohinta	–	+/- <sup>1</sup>	+/- <sup>1</sup>
Uudistamiskustannukset	+	+/- <sup>1</sup>	+/- <sup>1</sup>
Markkinakorko	–	+/- <sup>2</sup>	+/- <sup>2</sup>
Metsänomistajan subjektiivinen aika- preferenssi	0	+/- <sup>2</sup>	+/- <sup>2</sup>
Metsänomistajan metsätalouden ulko- puoliset tulot ja varallisuus	0	+	+
Metsänomistajan ikä	0	+/- <sup>2</sup>	+/- <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tulos riippuu tulo- ja substituutiovaikutusten suuruudesta.

<sup>2</sup> Tulos riippuu päätöksentekijän subjektiivisen korkokannan suuruudesta markkinakorkoon nähden.

Toinen mielenkiintoinen tulos koskee metsänomistajan varallisuuden vaikutusta: vähävarainen metsänomistaja käyttää lyhyempää kiertoaikaa kuin muuten samanlainen, varakas metsänomistaja. Tulokset viittaavat myös siihen, että jos metsänomistajan subjektiivinen aikapreferenssi on markkinakorkoa pienempi, hän ei varallisuutensa kasvettua tarpeeksi suureksi enää lainkaan hakkaa metsäänsä.

### ”Metsädynastia”

Myöhemmin Tahvonon ja Salo (1999c) liittivät Faustmannin malliin ympäristö- ja tunnearvojen lisäksi myös hieman kehittyneemmän altruistisen perinnönjättömotiivin olettamalla, että metsänomistajan perinnönjättöfunktio vastaa hänen jälkipolviensa epäsuoraa hyötyfunktioita. Tällöin metsänomistajan voidaan tavallaan ajatella elävän ikuisesti, koska kaikkien sukupolvien preferenssit ovat samanlaisia. Asetelmaa on kutsuttu ”metsädynastiaksi” (Tahvonon ym. 2001), koska siinä maksimoidaan oman suvun hyvinvointia ikuisuuteen asti.

Käytännössä Tahvonon ja Salo (1999c) maksimoivat metsänomistajan kulutuksesta ja *in situ* -arvostuksista saamien hyötyjen summaa budjetirajoitteen vallitessa. Pääomamarkkinat olivat täydelliset, metsänomistaja sai tuloja metsätalouden ulkopuolelta ja *in situ* -arvostusten oletettiin riippuvan konkaavisti puuston iästä tai usean puuston tapauksessa metsän ikärakenteesta. Metsän *in situ* -hyötyjen ja kulutuksen hyötyjen oletettiin separoituvan, eli ne eivät riippuneet toisistaan. Tutkijoiden mukaan malli soveltuu mielivaltaiselle määrälle tassaikäisiä metsiköitä, mutta tulokset laskettiin analyyttisesti vain yhdelle metsikölle.

Keskeiset tulokset olivat samoja kuin aikaisemmassakin tutkimuksessa: optimaalisen kiertoajan pituus riippuu kantohinnan, uudistamiskustannusten ja koron lisäksi metsänomistajakohtaisista tekijöistä (taulukko 4). Metsätalouden ulkopuolisen varallisuuden ja tulojen lisääntyminen pidentää kiertoaikaa, mutta kantohinnan, uudistamiskustannusten ja metsänomistajan subjektiivisen korkokannan vaikutukset ovat epäselviä. Kiertoaika on vakio ainoastaan siinä tapauksessa, että metsänomistajan subjektiivinen aikapreferenssi on sama kuin markkinakorko.

Numeerinen kahden eri-ikäisen metsikön kehityksen simulointi viittasi siihen, että metsänomistajan kannattaisi tässäkin tapauksessa muuttaa metsänsä alkupestä ikäluokkajakaumaa kohti normaalimetsää. Taloudellisten menetysten välttämiseksi se tulisi kuitenkin tehdä hitaasti, useiden kiertoaikojen aikana. Samaa seikkaa on korostettu useaan otteeseen käytännön metsäsuunnittelussa viimeisen 150 vuoden kuluessa – tosin perustelu on ollut lähinnä intuitiivinen.

## 8. Päätelmät

Viimeisten vuosikymmenien aikana tehdyt tutkimukset ovat osoittaneet, että Faustmannin malli on talousteoreettisesti oikea tapa laskea metsän optimaalinen kiertoaika. Yhdysvalloissa tämä myönnettiin pääosin jo 1960-luvulla, mutta Suomessa näkemyksen hyväksyminen on kestänyt huomattavasti kauemmin. Esimerkiksi metsänkorkoa puolustettiin meillä pitkään julkisessa keskustelussa väittämällä, että rahat uudistamiseen on saatu jo edellisestä päätehakkuusta ja että metsään sijoitetulle pääomalle ei tarvitse laskea vaihtoehtoiskustannusta. Voidaan kuitenkin osoittaa, että tämänkaltainen ajattelu johtaa yleisten talousteoreettisten oletusten vallitessa resurssien tuhlaukseen ja hyvinvoinnin väheneemiseen. Vaihtoehtoiskustannusten sivuuttaminen johtaa myös metsätalouden kannattavuuden heikkenemiseen, mikäli taloudellisesti kyseenalaiset metsänhoitomenetelmät yleistyvät kannattavampien kustannuksella.

Suomessa vallinnutta metsäekonomista ajattelua hämärsi pitkään sisäisen koron virheellinen käyttö sekä epätietoisuus näyttäjäprosentin,  $v$ -arvon ja Faustmannin mallin kiinteästä yhteydestä toisiinsa. Metsäekonomiseen ajatteluun on vaikuttanut myös Nyssösen (1958) esittämä rajakannattavuuden laskentatapa, jota soveltamalla on pyritty välttämään pitkäaikainen korkoa korolle laskenta, negatiiviset maanarvot ja maankorkoteorialla (Faustmannin mallilla) saadut ”liian lyhyet” kiertoajat. Tässä tutkimuksessa on kuitenkin analyttisesti osoitettu, että Nyssösen esittämä laskentatapa johtaa lyhyempiin kiertoaikoihin kuin Faustmannin malli, ja että talousteoreettisesti oikein sovellettuna rajakannattavuuden määrittämisessäkin tulee soveltaa korkoa korolle laskentaa.

Metsäekonomisen ajattelun hämärtyminen, joka johtui paljolti metsätieteellisen tutkimuksen ja opetuksen puutteista, on heijastunut myös yksityismetsätalouden organisaatioiden antamiin metsänkäsittelyohjeisiin ja -suosituksiin. Vielä 1970-luvulla metsikön uudistuskypsyysikärajaa perusteltiin metsänkäsittelyohjeissa puuston arvokasvulla ja 3–4 prosentin rajakannattavuudella, mutta 1980-luvulla perusteluissa ryhdyttiin painottamaan puuntuotannon maksimointia. Vuonna 1989 yksityismetsälain valvontaohjeet ja metsänhoitosuosituksot eriytettiin ja uudistuskypsyysikärajaa määrittämiseen annettiin jälleen selkeä taloudellinen yleisohje: ”*Metsikkö suosittelaa uudistettavaksi silloin, kun uudistaminen tulee puuston edelleen kasvattamista edullisemmaksi*” (Metsänhoitosuosituksot 1989 s. 5). Viisi vuotta myöhemmin julkaistuissa metsänhoitosuosituksissa ilmaisu ”edullisemmaksi” kuitenkin korvattiin termillä ”tuottavammaksi” (Luonnonläheinen... 1994 s. 20). Sanamuodon muutosta voidaan pitää erikoisena ottaen huomioon, että Suomen metsätaloudessa käsitteet ”tuotto” ja ”tuottavuus” on usein sekoitettu keskenään ja ilmaisulla ”tuottavampi” voidaan itse asiassa tarkoittaa kumpaa tahansa.

Uusimpia, vuonna 2001 ilmestyneitä ”Hyvän metsänhoidon suosituksia” on pyritty perustelemaan aikaisempaa enemmän nimenomaan taloudellisella kannattavuudella. Lopputulos on kuitenkin osin hämmäntävä: toisinaan suositusten

kerrotaan perustuvan taloudellisesti kannattavaan puuntuotantoon, toisinaan taas suurimman puuntuotoksen tavoitteluun tai kantorahatulosten maksimointiin eli metsänkorkoon (Hyvän metsänhoidon... 2001 s. 7, 13, 16, 26–27). Viimeisen 30 vuoden aikana annetut metsänkäsittelyohjeet ja -suositukset sekä niiden osin epäjohdonmukaiset perustelut nostavatkin esiin kysymyksen siitä, mikä painoarvo metsäekonomialla on ylipäänsä ollut Suomen metsäpolitiikassa ja metsien käsittelyperiaatteissa.

### *Jatkotutkimuksen tarve*

Hyvinvointiteorian mukaan markkinoiden epätäydellisyydet, epävarmuus, ulkoisvaikutukset ja julkishyödykkeet voivat aiheuttaa sen, ettei yksittäisten taloudenpitäjien päätösten seurauksena päästä tehokkaaseen ratkaisuun koko yhteiskunnan kannalta.<sup>58</sup> Tässä mielessä olisi tärkeää, että Faustmannin mallin laajennuksia ryhdyttäisiin tutkimaan aikaisempaa enemmän. Esimerkiksi koron stokastisuuden vaikutusta kiertoaikaan ei ole tiettävästi tutkittu vielä lainkaan, vaikka metsän taloudellisesti optimaalinen kiertoaika riippuu merkittävästi juuri laskentakorkokannasta. Lisäksi Faustmannin mallin stokastisissa laajennuksissa on yleensä tarkasteltu vain yhtä tai kahta epävarmuustekijää kerrallaan ja oletettu, etteivät stokastisen prosessin parametrit muutu ajan kuluessa, mikä voi olla etenkin pitkien aikavälien tarkastelussa liian yksinkertainen oletus.

Myös metsien monikäyttöä koskevissa tutkimuksissa on vielä huomattavasti laajentamisen varaa. Yleensä metsän ympäristö- ja tunnearvojen on oletettu lisääntyvän monotonisesti puuston iän tai tilavuuden kasvaessa, mutta todellisuudessa näin yksinkertaisten riippuvuuksien esittäminen voi olla harhaanjohtavaa. Toisaalta monien ympäristöhyötyjen luotettava mallintaminen ja arvottaminen on hankalaa – esimerkiksi biodiversiteettiin liittyy keskeisesti kysymys optioarvoista ja muutosten lopullisuudesta.

Lopuksi on syytä korostaa, että vaikka klassista Faustmannin mallia ei välttämättä voida pitää uudistamiskypsyyttä koskevien metsänhoitosuosituksen ainoana perusteena, se on kuitenkin talousteoreettisesti johdonmukainen tapa tarkastella eri metsänkäsittelyvaihtoehtojen kannattavuutta – olipa kyseessä sitten metsän taloudellisesti optimaalinen kiertoaika, harvennushakkuut, metsänuudistaminen tai muu metsänkäsittelytoimenpide. Siksi olisi tarpeen, että yksityismetsätaloudessa annettuja metsänhoitosuosituksia perusteltaisiin jatkossa tähänastista huomattavasti johdonmukaisemmin ja läpinäkyvämmiin. Ja jos suositukset eivät kaikilta osin perustu maankorkoteorian tai nettonykyarvon kaltaisiin yleisesti hyväksytyihin taloudellisuuden kriteereihin, tämä tulisi myös selkeästi kertoa metsänomistajille ja metsäammattilaisille. Samalla olisi myös perustelta-

---

<sup>58</sup> Ulkoisvaikutuksilla tarkoitetaan sitä, että taloudenpitäjän hyöty- tai tuotantofunktion sisältäytyä muuttujia, jotka saavat arvonsa toisten taloudenpitäjien päätöksissä. Esimerkiksi metsää omistamattomien taloudenpitäjien hyötyfunktion voi sisältäytyä muuttujia (biodiversiteetti, maisema, jne.), joiden määristä ja arvoista päättävät metsänomistajat.

va, miksi näistä kriteereistä on poikettu, koska useiden tutkimusten mukaan suurimman puuntuotoksen tai metsänkoron tavoittelu voi johtaa metsänomistajien kannalta huomattaviin taloudellisiin tappioihin.

# Kirjallisuus

- Adams, D.M., Alig, R.J., McCarl, B.A., Callaway, J.M. & Winnett, S.M. 1996. An analysis of the impacts of public timber harvest policies on private forest management in the United States. *Forest Science* 42(3): 343–358.
- Ahonen, L. 1959. Metsän raha-arvon määrittäminen. Tapion taskukirja. 14. painos. Keskusmetsäseura Tapio, Helsinki. ss. 213–229.
- Anlösung einer Aufgabe der Waldwerthberechnung. 1849. *Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung* 15: 285–299.
- Aronsson, T. & Löfgren, K-G. 1999. Renewable resources: forestry. Teoksessa: van den Bergh, J.C.J.M. (ed.). 1999. *Handbook of environmental and resource economics*. Edward Elgar, Cheltenham, UK. ss. 122–140.
- Attfield, C.L.F., Demery, D. & Duck, N.W. 1991. Rational expectations in macroeconomics. An introduction to theory and evidence. Second edition. Basil Blackwell, Oxford, UK. 243 s.
- A vision for the U.S. Forest Service. Goals for its next century. 2000. Sedjo, R. (ed.). *Resources for the Future*, Washington, DC. 273 s.
- Bentley, W.R. & Teeguarden, D.E. 1965. Financial maturity: a theoretical review. *Forest Science* 11(1): 76–87.
- Binkley, C.S. 1981. Timber supply from private nonindustrial forests. A microeconomic analysis of landowner behavior. Bulletin No. 92, Yale University, School of Forestry and Environmental Studies, New Haven. 97 s.
- 1987. When is the optimal economic rotation longer than the rotation of maximum sustained yield? *Journal of Environmental Economics and Management* 14: 152–158.
- Blomqvist, A.G. 1893. Skogshushållningens nationalekonomi och synpunkter i forstpolitik. Helsingfors. 230 s. (Ilmestyi suomeksi vuonna 1897 nimellä Metsänhoidon kansallistalous ja näkökohtia metsäpolitiassa.)
- Boulding, K.E. 1935. The theory of a single investment. *Quarterly Journal of Economics* 49: 475–494.
- 1948. *Economic analysis*. Revised edition. Harper & Brothers, New York. 884 s.
- Bowes, M.D. & Krutilla, J.V. 1985. Multiple use management of public forestlands. Teoksessa: A.V. Kneese and J.L. Sweeney (eds.). *Handbook of natural resource and energy economics*. Volume II. North-Holland, Amsterdam. ss. 531–569.
- Braze, R.J. & Mendelsohn, R. 1988. Timber harvesting with fluctuating prices. *Forest Science* 34(2): 359–372.
- , Amacher, G.S. & Conway, M.C. 1999. Optimal harvesting with autocorrelated stumpage prices. *Journal of Forest Economics* 5(2): 201–216.
- , Amacher, G.S. 2000. Duality and Faustmann: implications for the evaluation of landowner behavior. *Forest Science* 46(1): 132–138.
- & Bulte, E. 2000. Optimal harvesting and thinning with stochastic prices. *Forest Science* 46(1): 23–31.
- Brealey, R.A. & Meyers, S.C. 1996. *Principles of corporate finance*. 5th edition. McGraw-Hill, New York. 998 s.
- Bus, E. 1998. Jagd und Wald in der Revolution von 1848/1849. Teoksessa: Museum Jagdschloß Kranichstein Wiedereröffnung 1998. Stiftung Hessischer Jägerhof, Darmstadt. ss. 65–75.

- Cajander, A.K. 1909. Metsätieteellinen tutkimustoiminta ulkomailla ja ehdotus sen järjestämiseksi Suomessa. Liite Metsähallituksen vuosikertomukseen vuonna 1907. 138 s.
- Cajanus, W. 1914. Muutampia metsätalouden järjestelyä koskevia mietteitä. Metsätaloudellinen aikakauskirja 1: 277–282.
- Calish, S., Fight, R.D. & Teeguarden, D.E. 1978. How do nontimber values affect Douglas-fir rotations? *Journal of Forestry* 76(April): 217–221.
- Cameron, R. 1995. Maaailman taloushistoria. WSOY, Porvoo. 544 s.
- Caulfield, J.P. 1988. A stochastic efficiency approach for determining the economic rotation of a forest stand. *Forest Science* 34(2): 441–457.
- Chang, S.J. 1981. Determination of the optimal growing stock and cutting cycle for an uneven-aged stand. *Forest Science* 27(4): 739–744.
- 1982. An economic analysis of forest taxation's impact on optimal rotation age. *Land Economics* 58(3): 310–323.
- 1983. Rotation age, management intensity, and the economic factors of timber production: Do changes in stumpage price, interest rate, regeneration cost, and forest taxation matter? *Forest Science* 29(2): 267–277.
- 1984. Determination of the optimal rotation age: a theoretical analysis. *Forest Ecology and Management* 8(2): 137–147.
- 1990. Comment II. *Forest Science* 36(1): 177–179.
- Chapman, H.H. 1935. *Forest finance*. Second edition. J.B. Lyon Company, Albany, NY. 352 s.
- Clark, C.W. 1976. *Mathematical bioeconomics*. John Wiley & Sons, New York. 352 s.
- 1990. *Mathematical bioeconomics. The optimal management of renewable resources*. Second edition. John Wiley & Sons, New York. 286 s.
- Clarke, H.R. & Reed, W.J. 1989. The tree-cutting problem in a stochastic environment. The case of age-dependent growth. *Journal of Economic Dynamics and Control* 13: 569–595.
- Comolli, P.M. 1981. Principles and policy in forestry economics. *Bell Journal of Economics* 12: 300–309.
- Davis, L.S., Johnson, K.N., Bettinger, P.S. & Howard, T.E. 2001. *Forest management: to sustain ecological, economic, and social values*. 4th edition. McGraw-Hill, Boston. 804 s.
- Dickson, H. 1953. Forest rotation – a contribution to the theory of the optimum investment period. *Weltwirtschaftliches Archiv, Band 70*. ss. 205–240.
- 1956. *Ekonomiska principer bakom svensk skogsvårdslagstifning*. Svenska Skogsvårdsföreningens Förlag, Stockholm. 189 s.
- Dixit, A.K. & Pindyck, R.S. 1994. *Investment under uncertainty*. Princeton University Press, Princeton, NJ. 468 s.
- Duerr, W.A. 1960. *Fundamentals of forestry economics*. McGraw-Hill, New York. 579 s.
- & Bond, W.E. 1952. Optimum stocking of a selection forest. *Journal of Forestry* 50: 12–16.
- , Fedkiw, J. & Guttenberg, S. 1956. *Financial maturity: a guide to profitable timber growing*. Technical Bulletin No. 1146. USDA, Washington. 74 s.
- Endres, M. 1911. *Lehrbuch der Waldwertrechnung und Forststatik*. Zweite, vollständig neu bearbeitete Auflage. Julius Springer, Berlin. 308 s.
- 1922. *Handbuch der Forstpolitik*. Zweite, neubearbeitete Auflage. Julius Springer, Berlin. 905 s.

- 1923. Lehrbuch der Waldwertrechnung und Forststatik. Vierte verbesserte Auflage. Julius Springer, Berlin. 326 s.
- Englin, J.E. & Klan, M.S. 1990. Optimal taxation: timber and externalities. *Journal of Environmental Economics and Management* 18: 263–275.
- Ericsson, B. 1903. Oppi- ja käsikirja metsätalouden järjestelyssä. Ensimmäinen osa. Metsänarvioiminen. Weilin & Göös, Helsinki. 207 s.
- 1906. Oppi- ja käsikirja metsätalouden järjestelyssä. Toinen osa. Metsänjako-oppi. Weilin & Göös, Helsinki. 125 s.
- Faustmann, M. 1849. Berechnung des Wertes welchen Waldboden, sowie noch nicht haubare Holzbestände für die Waldwirtschaft besitzen. *Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung* 25: 441–455. [Englanninkielinen käännös: Calculation of the value which forest land and immature stands possess for forestry. Teoksessa: Gane, M. (ed.). 1968. Martin Faustmann and the evolution of discounted cash flow. Commonwealth Forestry Institute Paper No. 42, University of Oxford, Oxford. ss. 19–26. Uudempi englanninkielinen käännös vuodelta 1995: Calculation of the value which forest land and immature stands possess for forestry. *Journal of Forest Economics* 1(1): 7–44.]
- Fernow, B.E. 1902. *Economics of forestry*. Thomas Y. Crowell, New York. 520 s.
- 1911. *A brief history of forestry in Europe, the United States and other countries*. Revised and enlarged edition. University Press, Toronto; and *Forestry Quarterly*, Cambridge, MA. 506 s.
- Forboseh, P.F., Brazee, R.J. & Pickens, J.B. 1996. A strategy for multiproduct stand management with uncertain future prices. *Forest Science* 42(1): 58–66.
- Gaffney, M.M. 1957. Concepts of financial maturity of timber and other assets. Department of Agricultural Economics Information Series No. 62, North Carolina State College, Raleigh, NC. 105 s.
- Gane, M. 1968. Introduction. Teoksessa: Gane, M. (ed.). Martin Faustmann and the evolution of discounted cash flow. Commonwealth Forestry Institute Paper No. 42, University of Oxford, Oxford. ss. 5–18.
- Gassmann, H.I. 1989. Optimal harvest of a forest in the presence of uncertainty. *Canadian Journal of Forest Research* 19: 1267–1274.
- von Gehren, E.F. 1849. Über Geldwerthbestimmung des Holzleeren Waldbodens. *Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung* 25: 361–366. [Englanninkielinen käännös: On determination of the money value of bare forest land. Teoksessa: Gane, M. (ed.). 1968. Martin Faustmann and the evolution of discounted cash flow. Commonwealth Forestry Institute Paper No. 42, University of Oxford, Oxford. ss. 19–26.]
- Gong, P. 1991. Optimal harvest of industrial forests. *Journal of Environmental Management* 33(3): 269–283.
- 1994. Adaptive optimization for forest-level timber harvest decision analysis. *Journal of Environmental Management* 40: 65–90.
- 1998a. Determining the optimal planting density and land expectation value – a numerical evaluation of decision model. *Forest Science* 44(3): 356–364.
- 1998b. Risk preferences and adaptive harvest policies for even-aged stand management. *Forest Science* 44(4): 496–506.
- 1999. Diversification of harvest decisions for even-aged stand management. *Journal of Forest Economics* 5(2): 123–138.
- Goundrey, G.K. 1960. Forest management and the theory of capital. *Canadian Journal of Economics and Political Science* 26: 439–451.

- Gram, J.P. 1876. Om modenhedsalderens bestemmelse efter den største entrepreneurfortjeneste. *Tidskrift for Skovbrug* 1: 85–105, 246–261.
- Gravelle, H. & Rees, R. 1992. *Microeconomics*. Second edition. Longman, London. 752 s.
- Gregory, G.R. 1987. *Resource economics for foresters*. John Wiley & Sons, New York. 477 s.
- Grøn, A.H. 1931. *Den almindelige skovøkonomis teori*. Levin & Munksgaards, København. 630 s.
- 1943. *Skovbrugets driftsøkonomi I: Skovbrugets teoretiske driftsøkonomi*. Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskoles skovbrugsafdeling i kommission hos G.E.C. Gads forlag, København. 286 s.
  - 1960. *The work and influence of Christian Ditlev Frederik Viscount Rewentlow*. Teoksessa: Rewentlow, C.D.F. *A treatise on forestry*. Society of Forest History, Hørsholm. ss. 13–35.
- Hagfors, E.A.M. 1929. Über die ökonomischen Ziele bei der Bewirtschaftung der Wälder. *Selostus: Metsäliikkeen taloudellisista päämääristä*. *Acta Forestalia Fennica* 35.3. 190 s.
- 1936a. *Monographische Studien zur Ökonomik der Waldwirtschaft*. 1. Teil: G. König. *Selostus: Monograafisia tutkimuksia metsätalouden teoriasta*. 1. osa: G. König. *Acta Forestalia Fennica* 42.7. 76 s.
  - 1936b. *Katsaus kestävyuden käsitteen syntyyn ja olemukseen*. *Metsätaloudellinen aikakauskirja*. ss. 178–182.
- Haight, R.G. & Holmes, T.P. 1991. Stochastic price models and optimal tree cutting: results for loblolly pine. *Natural Resource Modeling* 5(4): 423–443.
- & Smith, W.D. 1991. Harvesting loblolly pine plantations with hardwood competition and stochastic prices. *Forest Science* 37(5): 1266–1282.
- Hall, P. 1966. Introduction. Teoksessa: Hall, P. (ed.). *Von Thünen's isolated state*. An English edition of *Der Isolierte Staat* by Johann Heinrich von Thünen. Pergamon Press, Oxford. ss. 1–47.
- Hammond, P.J. 1987. Altruism. Teoksessa: Eatwell, J., Milgate, M. & Newman, P. (eds.). *The new Palgrave: A dictionary of economics*. Volume I. Macmillan, London. ss. 85–86.
- Hanley, N., Shogren, J.F. & White, B. 1997. *Environmental economics in theory and practice*. Macmillan, Lontoo. 464 s.
- Hannelius, S. 1987. *Korkokanta metsätaloudellisissa sijoituksissa*. Teoksessa: Suomen kiinteistöarviointiyhdistys ry:n 10-vuotisjuhlajulkaisu. Rakentajain kustannus Oy, Mänttä. ss. 48–55.
- Hannikainen, P.W. 1885. *Metsien hoidosta metsän ystäville*. Toinen vihko: *Metsätalouden järjestämisestä eli metsänjaosta*. Suomalaisen Kirjallisuuden Seuran Kirjapaino, Helsinki. 145 s.
- 1896. *Suomen metsät kansallis-omaisuutenamme*. Otava, Helsinki. 273 s.
- Hardie, I.W., Daberkow, J.N. & McConnell, K.E. 1984. A timber harvesting model with variable rotation lengths. *Forest Science* 30(2): 511–523.
- Hartman, R. 1976. Harvesting decision when a standing forest has value. *Economic Inquiry* 14(1): 52–58.
- Hasel, K. 1992. *W.L. Pfeil aus heutiger Sicht*. Teoksessa: *W.L. Pfeil Biographie*. Finow, Eberswalde. ss. 155–167.
- Heaps, T. 1984. The forestry maximum principle. *Journal of Economic Dynamics and Control* 7: 131–151.

- Heckscher, E.F. 1912. Skogsbrukets räntabilitet. *Ekonomisk Tidskrift* 14: 139–156, 253–276.
- Heikkilä, T. 1930. Kiertoaika. Teoksessa: Ilvessalo, L. & Ilvessalo, Y. (toim.). *Maa ja metsä IV. Metsätalous III*. WSOY, Porvoo. ss. 764–778.
- Heikkinen, V-P. 2001. Modelling timber harvesting decisions as a part of the management of a mixed asset portfolio. Helsinki School of Economics, *Acta Universitatis Oeconomicae Helsingiensis*, A-195.
- Helles, F. & Linddal, M. 1997. Early Danish contributions to forest economics. *Journal of Forest Economics* 3(1): 87–103.
- Heyer, G. 1865. *Anleitung zur Waldwertrechnung*. B.G. Teubner, Leipzig. 267 s.
- 1871. *Handbuch der forstlichen Statik. Erste Abtheilung. Die Methoden der forstlichen Rentabilitätsrechnung*. B.G. Teubner, Leipzig. 163 s.
- Hoganson, H.M. & Rose, D.W. 1987. A model for recognizing forestwide risk in timber management scheduling. *Forest Science* 33(2): 268–282.
- Holmerz, C.G. 1876. *Studier i skogstaxation (del 1)*. Norstedts, Stockholm.
- Holopainen, V. 1976. *Metsätalouden liikeoppi. Johdatusta metsätalouslyrityksen ekonomiin*. Otava, Keuruu. 232 s.
- Howard, J.A. 1992. Altruism. Teoksessa: Borgatta, E. & Borgatta, M.L. (eds.). *Encyclopedia of sociology. Volume I*. Macmillan, New York. ss. 62–65.
- Hultkranz, L. 1982. *Skog för nutid och framtid – en samhällsekonomisk analys av det lämpliga virkesuttaget*. Ekonomiska Forskningsinstitutet vid Handelshögskolan i Stockholm (EFI), Stockholm. 230 s.
- 1991. A note on the optimal rotation period in a synchronized normal forest. *Forest Science* 37(4): 1201–1206.
- 1995. The behaviour of timber rents in Sweden 1909–1990. *Journal of Forest Economics* 1(2): 165–180.
- Huuri, O., Huuri, L. & Oja, S. 1989. Selostus vuonna 1713 julkaistusta Hanns Carl von Carlowitzin teoksesta *Sylvicultura Oeconomica* (eli taloudellinen opetus ja luonnonmukainen johdatus villipuiden hoitamiseen sekä perusteellinen esitys siitä, miten Sallimuksen avulla voitaisiin torjua kaikkialla uhkaavaa suurta puun puutetta). *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 323. 140 s.
- Hyberg, B.T. & Holthausen, D.M. 1989. The behavior of nonindustrial private forest landowners. *Canadian Journal of Forest Research* 19(8): 1014–1023.
- Hyde, W. 1980. *Timber supply, land allocation, and economic efficiency. Resources for the Future*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore. 224 s.
- Hyvän metsänhoidon suositukset. 2001. *Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio, julkaisusarja* 13/2001. Helsinki. 95 s.
- Hyytiäinen, K. & Tahvonon, O. 2001a. The effects of legal limits and recommendations on timber production: the case of Finland. *Forest Science* 47(4): 443–454.
- 2001b. Economics of forest thinnings and rotation periods in the Finnish conifer cultures. *Scandinavian Journal of Forest Research*, painossa.
- 2001c. MSY, forest rent or Faustmann, does it really matter? *Käsikirjoitus*. 26 s.
- Ilvessalo, Y. 1965. *Metsänarvioiminen*. WSOY, Porvoo. 400 s.
- Jackson, D. 1980. *The microeconomics of the timber industry*. Westview Press, Boulder, Colorado. 136 s.
- James, N.D.G. 1981. *A history of English forestry*. Basil Blackwell, Oxford. 339 s.

- Johansson, P-O. & Löfgren, K-G. 1985. The economics of forestry and natural resources. Basil Blackwell, Oxford. 292 s.
- Johnson, K.N. & Scheurman, H.L. 1977. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives — discussion and synthesis. *Forest Science*, monograph 18. 31 s.
- Jørgensen, F. & Hermansen, N.K. 1950. Skovøkonomiske beregninger II. Omdriftsbestemmelse. *Dansk Skovforenings Tidsskrift*. ss. 352–385.
- Judeich, F. 1871. *Die Forsteinrichtung*. Paul Parey, Berlin.
- 1904. *Die Forsteinrichtung*. Paul Parey, Berlin. 575 s.
- Kallio, K. 1957. Käenkaali-mustikkatyyppin kuusikoiden kehityksestä Suomen lounaisosissa. Taksatoris-liiketaloudellinen tutkimus. *Acta Forestalia Fennica* 66.3.
- Kaya, I. & Buongiorno, J. 1987. Economic harvesting of uneven-aged northern hardwood stands under risk: a Markovian decision model. *Forest Science* 33(4): 889–907.
- Keltikangas, V. 1947. Metsänarvonlaskennan luennot. *Moniste*. 87 s.
- 1962. Normaalmetsän kannattavuussadannes ja finanssinen kiertoaika. *Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja* 55.24. 16 s.
- Kilkki, P. 1963. Erilaisten metsiköiden kasvatuksen suhteellinen edullisuus. *Metsätaloudellinen aikakauslehti* 80(12): 498–500.
- 1968. Some economic aspects of growing forest stands. *Silva Fennica* 2(4): 225–234.
- 1985. Timber management planning. *Silva Carelica* 5. University of Joensuu, Joensuu. 160 s.
- Klemperer, W.D. 1996. *Forest resource economics and finance*. McGraw-Hill, New York. 551 s.
- Koskela, E. 1989a. Forest taxation and timber supply under price uncertainty: perfect capital markets. *Forest Science* 35(1): 137–159.
- 1989b. Forest taxation and timber supply under price uncertainty: credit rationing in capital markets. *Forest Science* 35(1): 160–172.
- & Ollikainen, M. 2001. Optimal private and public harvesting under spatial and temporal interdependence. *Forest Science* 47(4): 484–496.
- Kuuluvainen, J. 1989. Nonindustrial private timber supply and credit rationing. *Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsekonomi. Rapport* 85. Umeå. 244 s.
- & Salo, J. 1991. Timber supply and life cycle harvest of nonindustrial private forest owners: an empirical study of the Finnish case. *Forest Science* 37(4): 1011–1029.
- & Tahvonen, O. 1999. Testing the forest rotation model: evidence from panel data. *Forest Science* 45(4): 539–551.
- , Karppinen, H. & Ovaskainen, V. 1996. Landowner objectives and nonindustrial private timber supply. *Forest Science* 42(3): 300–309.
- Kuusela, K. 1964. Metsikön kiertoajan muuttamisen vaikutus puun tuotantoon. *Suomen Puutalous* no 3: 98–101, 131.
- 1967. Kiertoaika tuotannollista pohjaansa laajentavassa metsätaloudessa. *Alustus Suomen Metsänhoitajaliiton XI Oppituolipäivillä Tampereella 8.5.1967*. 24 s.
- König, G. 1813. *Anleitung zur Holztaxation, ein Handbuch für jeden Forstmann und Holzhändler*. Becker, Gotha. 152 s.
- 1854. *Die Forst-Matematik*. Vierte Ausgabe. Becker, Gotha. 688 s.
- Laitakari, E. 1923. Katsaus eri maiden metsälainsäädäntöön. *Suomen metsänhoitoyhdistyksen julkaisuja*. Erikoistutkimuksia 12. Kuopio. 83 s.

- 1928. Metsälainsäädäntö. Teoksessa: Ilvessalo, L. & Ilvessalo, Y. (toim.). Maa ja metsä IV. Metsätalous I. WSOY, Porvoo. ss. 148–158.
- Lakari, O.J. 1930. Metsätalouden järjestely. Teoksessa: Ilvessalo, L. & Ilvessalo, Y. (toim.). Maa ja metsä IV. Metsätalous III. WSOY, Porvoo. ss. 790–810.
- Laki metsähallinnosta. 1966. Suomen säädöskokoelma 465/66.
- Landreth, H. & Colander, D.C. 1994. History of economic thought. Third edition. Houghton Mifflin, Boston. 538 s.
- Lappi, J. 1999. Kiertoajasta ja metsätalouden suunnittelusta. Metsätieteen aikakauskirja 4/1999: 748–752.
- & Siitonen, M. 1985. A utility model for timber production based on different interest rates for loans and savings. *Silva Fennica* 19(3): 271–280.
- Leikola, M. 1988. Edmund von Berg ja hänen kertomuksensa Suomenmaan metsistä. Esipuhe teoksessa: Edmund von Berg, kertomus Suomenmaan metsistä 1859. Helsingin yliopiston metsänhoitotieteen laitoksen tiedonantoja N:o 63.
- 1993. Luonnonmukainen metsänhoito aikojen saatossa. *Luonnon Tutkija* 3/1993: 120–126.
- Lembersky, M.R. & Johnson, K.N. 1975. Optimal policies for managed stands: an infinite horizon Markov decision process approach. *Forest Science* 21(2): 109–122.
- Lihtonen, V. 1959. Metsätalouden suunnittelu ja järjestely. WSOY, Porvoo. 355 s.
- Lohmander, P. 1987. The economics of forest management under risk. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för Skogsekonomi. Rapport 79. Umeå. 316 s.
- 1988. Pulse extraction under risk and a numerical forestry application. *Systems Analysis – Modelling – Simulation* 5: 339–354.
- 1992. The multi species forest stand, stochastic prices and adaptive selective thinning. *Systems Analysis – Modelling – Simulation* 9: 229–250.
- 1993. Economic two stage multi species management in a stochastic environment: the value of selective thinning options and stochastic growth parameters. *Systems Analysis – Modelling – Simulation* 11: 287–302.
- Luonnonläheinen metsänhoito. Metsänhoitosuosituksset. 1994. Metsäkeskus Tapion julkaisu 6/1994. 72 s.
- Lyon, K.S. & Sedjo, R.A. 1983. An optimal control theory model to estimate the regional long run timber supply. *Forest Science* 29: 798–812.
- Löfgren, K-G. 1983. The Faustmann-Ohlin theorem: A historical note. *History of Political Economy* 15(2): 261–264.
- 1985. Effects on the socially optimal rotation period in forestry of biotechnical improvements in the growth function. *Forest Ecology and Management* 10(3): 233–249.
- 1988. On the economic value of genetic progress in forestry. *Forest Science* 34(3): 708–723.
- 1989. Skogshushållning och nationalekonomer – en rättvis betraktelse? Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift 1/1989: 31–41.
- 1990. The use and non-use of economics and mathematics in forest economies. The Swedish experience 1876-1976. *Scandinavian Journal of Forest Research* 5(4): 551–561.
- 1995. Knut Wicksell on the optimal rotation problem in forestry. *Journal of Forest Economics* 1(2): 153–163.
- 1999. Ohlin versus Heckscher and Wicksell on forestry. One win (points) and one draw. Umeå Economic Studies No. 513. Umeå University, Umeå. 9 s.

- 2000. Faustmann and the invention of das Spiegel-hypsometer. *Journal of Forest Economics* 6(3): 151–152.
- & Mattsson, L. 1995. Thorsten Streyffert (1892–1983) – economist and forester. *Journal of Forest Economics* 1(3): 395–407.
- Lönnroth, E. 1919. Ohjeita metsätalouden järjestelyssä I. Yliopistolliset metsänarvioimis-harjoitustyöt. 309 s.
- 1930. Normaalmetsä. Teoksessa: Ilvessalo, L. & Ilvessalo, Y. (toim.). *Maa ja metsä IV. Metsätalous III*. WSOY, Porvoo. ss. 753–763.
- von Malmborg, G. 1967. *Ekonomisk planering av lantbruksföretaget*. Jordbrukets Utredningsinstitut, Stockholm.
- Mantel, K. 1964. History of the international science of forestry with special consideration of Central Europe. Teoksessa: Romberger, J.A. & Mikola, P. (eds.). *International review of forestry research, Vol. I*. Academic Press, New York. ss. 1–37.
- & Pacher, J. 1990. Gustav Friedrich Casimir Heyer. Teoksessa: *Biographien bedeutender hessischer Forstleute*. Georg-Ludwig-Hartig-Stiftung, Wiesbaden. ss. 323–326.
- Martell, D.L. 1980. The optimal rotation of a flammable forest stand. *Canadian Journal of Forest Research* 10: 30–34.
- Martin, H. 1910. *Die Forsteinrichtung*. Dritte, erweiterte Auflage. Julius Springer, Berlin. 281 s.
- 1918. *Die Forstliche Statik*. Ein Handbuch für leitende und ausführende Forstwirte sowie zum Studium und Unterricht. Zweite Auflage. Julius Springer, Berlin. 486 s.
- Matematiikan käsikirja. 1994. Thompson, J. (toim.). 2., täydennetty ja korjattu painos. Tammi, Helsinki. 431 s.
- McConnell, K.E., Daberkow, J.N. & Hardie, I.W. 1983. Planning timber production with evolving prices and costs. *Land Economics* 59(3): 292–299.
- Metsänhoitosuosituksset. 1989. Keskusmetsälautakunta Tapio. Helsinki. 55 s.
- Metsänviljelykustannusten toimikunnan mietintö. 1971. Komiteamietintö 1970:B 91. *Folia Forestalia* 109. 160 s.
- Metsäsuunnitelma. 2000. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio.
- Mielikäinen, K. & Valkonen, S. 1991. Harvennustavan vaikutus varttuneen metsikön tuotokseen ja tuottoihin Etelä-Suomessa. *Folia Forestalia* 776. 22 s.
- Mietola, T. 1975. Metsien käsittely. Teoksessa: *Tapion taskukirja*. 17., uudistettu painos. Kirjayhtymä, Helsinki. ss. 128–139.
- 1976. Lisätietoa harvennusmalleista ja uudistuskypsyiden määrittämisestä. *Metsälautakuntien tiedote N:o 2/1976*. Keskusmetsälautakunta Tapio. ss. 8–11.
- 1978. Metsien käsittely. Teoksessa: *Tapion taskukirja*. 18., uudistettu painos. Kirjayhtymä, Helsinki. ss. 143–154.
- Miina, J. 1996. Optimizing thinning and rotation in a stand of *Pinus sylvestris* on a drained peatland site. *Scandinavian Journal of Forest Research* 11(2): 182–192.
- Miller, R. & Voltaire, K. 1983. A stochastic analysis of the tree paradigm. *Journal of Economic Dynamics and Control* 6: 371–386.
- Mills, W.L. & Hoover, W.L. 1982. Investment in forest land: aspects of risk and diversification. *Land Economics* 58(1): 33–50.
- Mitra, T. & Wan, H.Y. 1985. Some theoretical results on the economics of forestry. *Review of Economic Studies* LII: 263–282.

- & Wan, H.Y. 1986. On the Faustmann solution to the forest management problem. *Journal of Economic Theory* 40: 229–249.
- , Ray, D. & Roy, R. 1991. The economics of orchards: an exercise in point-input, flow-output capital theory. *Journal of Economic Theory* 53: 12–50.
- Montgomery, C.A. & Adams, D.A. 1995. Optimal timber management policies. Teoksessa: Bromley, D.W. (ed.). *Handbook of environmental economics*. Basil Blackwell, Oxford. ss. 379–404.
- Moog, M. & Borchert, H. 2001. Increasing rotation periods during a time of decreasing profitability of forestry – a paradox? *Forest Policy and Economics* 2: 101–116.
- Morck, R., Schwartz, E. & Stangeland, D. 1989. The valuation of forestry resources under stochastic prices and inventories. *Journal of Financial and Quantitative Analysis* 24(4): 473–487.
- Murphy, P.A., Fortson, J.C. & Bethune, J.E. 1977. Timber management decision making under imperfect capital markets. *American Journal of Agricultural Economics* 59(2): 302–310.
- Möhring, B. 2001. The German struggle between the ‘Bodenreinertragslehre’ (land rent theory) and ‘Waldreinertragslehre’ (theory of the highest revenue) belongs to the past – but what is left? *Forest Policy and Economics* 2: 195–201.
- Newman, D.H. 1988. The optimal forest rotation: A discussion and annotated bibliography. USDA Forest Service, Southeastern Experiment Station, General Technical Report SE-48. Asheville, NC. 47 s.
- , Gilbert, C.E. & Hyde, W.F. 1985. The optimal forest rotation with evolving prices. *Land Economics* 61(4): 357–394.
- Nguyen, D. 1979. Environmental services and the optimum rotation problem in forest management. *Journal of Environmental Management* 8: 127–136.
- Norström, C.J. 1975. A stochastic model for the growth period decision in forestry. *Swedish Journal of Economics* 77(3): 329–337.
- Nyysönen, A. 1958. Kiertoaika ja sen määrittäminen. *Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja* 49.6. 87 s.
- 1996. Assessment of the rotation and relative maturity of forest stands in Finland. IUFRO, Planning and decision making for sustainable forest uses. Moscow, 23–29 September 1996. ss. 175–180.
- 1999. Kiertoaikamalli Suomen metsätaloudessa. *Metsätieteen aikakauskirja* 1999(3): 540–543.
- Oderwald, R.G. & Duerr, W.A. 1990. König-Faustmannism: a critique. *Forest Science* 36(1): 169–174.
- Oezel. 1850. Über Berechnung des Werthes welchen Waldboden, sowie noch nicht haubare Holzbestände für die Waldwirthschaft besitzen. *Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung* 26: 243–250.
- Ohlin, B. 1921. Till frågan om skogarnas omloppstid. *Ekonomisk Tidskrift* 22: 89–113. [Englanninkielinen käännös vuonna 1995: Concerning the question of the rotation period in forestry. *Journal of Forest Economics* 1(1): 89–114.]
- 2000. Autobiography of Bertil Ohlin. <http://www.nobel.se/economics/laureates/1977/ohlin-autobio.html> (lokakuu 2001).
- Øksendal, B. 1995. *Stochastic differential equations. An introduction with applications*. Fourth edition. Springer, Berlin.

- Ollikainen, M. 1984. Metsien ja muiden luonnonvarojen käytön taloustieteellistä analyysia. Elinkeinoelämän tutkimuslaitos, sarja C 34. 115 s.
- 1996. Essays on timber supply and forest taxation. Valtion taloudellinen tutkimuskeskus, VATT-tutkimuksia 33. Helsinki. 33 s. ja tutkimusartikkelit.
- Ollonqvist, P. & Kajanus, M. 1992. Metsänomistajien taloudellisten tavoitteiden merkitys metsänuudistamistavan valinnassa. *Folia Forestalia* 798. 71 s.
- Ovaskainen, V. 1992. Forest taxation, timber supply, and economic efficiency. *Acta Forestalia Fennica* 233. 88 s.
- Palo, M. 1979. Metsätieteiden edistymisen ongelmia. Teoksessa: Löppönen, P. (toim.). Suomen Akatemian julkaisuja 6: 94–117.
- Parviainen, J. & Seppänen, P. 1994. Metsien ekologinen kestävyys ja metsänkasvatusvaihtoehdot. Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja 511. 110 s.
- Pearse, P.H. 1967. The optimum forest rotation. *Forestry Chronicle* 43: 178–195.
- Penttinen, M. 2000. Timber harvesting with variable prices, costs and interest rates. Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja 785. 38 s.
- Pesonen, M. & Hirvelä, H. 1992a. Harvennusten liiketaloudellinen edullisuus. Teoksessa: Harvennushakkuiden taloudellinen merkitys ja toteuttamismahdollisuudet. Maa- ja metsätalousministeriö, Helsinki. ss. 77–106.
- Pesonen, M. & Hirvelä, H. 1992b. Liiketaloudelliset harvennusmallit Etelä-Suomessa. *Folia Forestalia* 800. 35 s.
- Petrini, S. 1937. Skogsuppskattning och skogsekonomi. Lars Hökerberg, Stockholm.
- 1946. Skogsekonomiens grunder. Lars Hökerberg, Stockholm. 207 s.
- Peyron, J-L. 2000. Origins of Faustmann's formula. <http://its2.ocs.lsu.edu/guests/sjchang/abs068.htm> (lokakuu 2001).
- Pihkala, E. 2000. Taloustieteet. Teoksessa: Suomen tieteen historia 2. Humanistiset ja yhteiskuntatieteet. WSOY, Porvoo. ss. 538–611.
- Platinga, A.J. 1998. The optimal timber rotation: an option value approach. *Forest Science* 44(2): 192–202.
- Poso, S. 1965. Metsiköiden uudistamisjärjestyksen määrittäminen v-arvon avulla. *Metsätaloudellinen aikakauskirja* 82(8): 263–264, 281–282.
- 1990. Metsätalouden suunnittelun perusteet. Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteen laitoksen tiedonantoja N:o 24. 126 s.
  - 1994. Metsätalouden suunnittelun perusteet. Toinen painos. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 5. 155 s.
  - 1997. Metsätalouden suunnittelun perusteet. Kolmas painos. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 5. 152 s.
- Preßler, M.R. 1860. Aus der Holzzuwachslehre. *Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung* 36: 173–191. [Englanninkielinen käännös vuonna 1995: For the comprehension of net revenue silviculture and the management objectives derived thereof. *Journal of Forest Economics* 1(1): 45–87.]
- Pukkala, T. 1994. Metsäsuunnittelun perusteet. Gummerus, Jyväskylä. 242 s.
- & Miina, J. 1997. A method for stochastic multiobjective optimization of stand management. *Forest Ecology and Management* 98: 189–203.
  - , Miina, J., Kurttila, M. & Kolström, T. 1998. A spatial yield model for optimizing the thinning regime of mixed stands of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 13: 31–42.

- Recknagel, A.B., Bentley, J. & Guise, C.H. 1926. Forest management. Second edition. John Wiley, New York. 329 s.
- Reed, W.J. 1984. The effects of the risk of fire on the optimal rotation of a forest. *Journal of Environmental Economics and Management* 11: 180–190.
- 1986. Optimal harvesting models in forest management – a survey. *Natural Resource Modeling* 1(1): 55–79.
  - 1987. Protecting a forest against fire: optimal protection patterns and harvest policies. *Natural Resource Modeling* 2(1): 23–53.
  - & Errico, D. 1985. Assessing the long-run yield of a forest stand subject to the risk of fire. *Canadian Journal of Forest Research* 15: 680–687.
  - & Errico, D. 1986. Optimal harvest scheduling at the forest level in the presence of the risk of fire. *Canadian Journal of Forest Research* 16: 266–278.
  - & Apaloo, J. 1990. Evaluating the effects of risk on the economics of juvenile spacing and commercial thinning. *Canadian Journal of Forest Research* 21(9): 1390–1400.
  - & Clarke, H.R. 1990. Harvest decisions and asset valuation for biological resources exhibiting size-dependent stochastic growth. *International Economic Review* 31(1): 147–169.
  - & Haight, R.G. 1996. Predicting the present value distribution of a forest plantation investment. *Forest Science* 42(3): 378–388.
- Reventlow, C.D.F. 1879. Forsslæg til en forbedret skovdrift grundet paa undersøgelser over træernes vegetation i Danmarks og Slesvigs skove. (Englanninkielinen käännös vuonna 1960: A treatise on forestry. Society of Forest History, Hørsholm. 142 s.)
- Ringbom, S. 1992. The optimal management of even-aged forest stands under risk; an application of stochastic dynamic programming. Licentiatavhandling i statistik vid Svenska Handelshögskolan. Helsingfors. 82 s.
- Roth, F. 1926. Forest valuation. Volume II of Michigan manual of forestry. Second revised edition. Georg Wahr Publishers, Ann Arbor, Michigan. 176 s.
- Routledge, R.D. 1980. The effect of potential catastrophic mortality and other unpredictable events on optimal forest rotation policy. *Forest Science* 26(3): 389–399.
- Rozsnyay, Z. 1990. Carl Justus Heyer. Teoksessa: Biographien bedeutender hessischer Forsteute. Georg-Ludwig-Hartig-Stiftung, Wiesbaden. ss. 311–318.
- Saari, E. 1968. Sisäisen korkokannan käsite metsätaloudessa. *Silva Fennica* 2(4): 267–290.
- Salminen, O. 1993. Dynaamiseen ohjelmointiin perustuva viljelymetsiköiden harvennusten ja kiertoajan optimointi. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 480. 48 s.
- Salo, S. & Tahvonen, O. 2000. On the economics of forest vintages. *Journal of Economic Dynamics and Control*, painossa.
- 2001a. On equilibrium cycles and normal forests in optimal harvesting of tree vintages. *Journal of Environmental Economics and Management*, painossa.
  - 2001b. On the optimality of a normal forest with multiple land classes. *Forest Science*, painossa.
  - 2001c. Optimal evolution of forest age-classes and land allocation between forestry and agriculture. Helsinki School of Economics and Business Administration. Working papers W-286. 31 s.
- Samuelson, P. 1976. Economics of forestry in an evolving society. *Economic Inquiry* 14: 466–492.

- Sandmo, A. 1987. Public goods. Teoksessa: Eatwell, J., Milgate, M. & Newman, P. (eds.). The new Palgrave: A dictionary of economics. Volume 3. Macmillan, London. ss. 1061–1066.
- Schlich, W. 1911. Manual of forestry. Volume III. Forest management. Fourth revised edition. Bradbury, Agnew & Co, Lontoo. 403 s.
- Schüpfer, V. 1927. Forsteinrichtung. Teoksessa: Weber, H. (toim.). Handbuch der Forstwissenschaft. Dritter Band. Vierte, verbesserte und erweiterte Auflage. Verlag der H. Laupp'schen Buchhandlung, Tübingen. ss. 323–418.
- Schwappach, A. 1927. Forstgeschichte. Teoksessa: Weber, H. (toim.). Handbuch der Forstwissenschaft. Vierter Band. Vierte, verbesserte und erweiterte Auflage. Paul Parey, Berlin. ss. 1–97.
- Schäfer, K. 1990. Martin Faustmann. Teoksessa: Biographien bedeutender hessischer Forstleute. Georg-Ludwig-Hartig-Stiftung, Wiesbaden. ss. 161–164.
- Scorgie, M. & Kennedy, J. 1996. Who discovered the Faustmann condition? History of Political Economy 28(1): 77–80.
- Sedjo, R.A. & Lyon, K.S. 1990. The long-term adequacy of world timber supply. Resources for the Future, Washington, DC.
- Snyder, D.L. & Bhattacharayya, R.N. 1990. A more general dynamic economic model of the optimal rotation of multiple-use forests. Journal of Environmental Economics and Management 18(2): 168–175.
- Speidel, G. 1967. Forstliche Betriebswirtschaftslehre. Paul Parey, Hampuri. 289 s.
- Strang, W.J. 1983. On the optimal forest harvesting decision. Economic Inquiry 21: 576–583.
- Streyffert, T. 1938. Den skogsekonomiska teorien. Svenska skogsvårdföreningens förlag, Stockholm. 240 s.
- 1965. Handbok i skogsekonomi. Almqvist & Wiksell, Stockholm. 399 s.
- Stridsberg, E. 1956. Prisförändringarnas inverkan på omloppstiden. Kungl. Skogshögskolans institutioner Skogsekonomi – Skogsuppskattning med skogsindelning. Uppsatser Nr. 1. Stockholm. 124 s.
- Swallow, S., Parks, P. & Wear, D. 1990. Policy-relevant nonconvexities in the production of multiple forest benefits. Journal of Environmental Economics and Management 19(3): 264–280.
- & Wear, D. 1993. Spatial interactions in multiple-use forestry and substitution and wealth effects for the single stand. Journal of Environmental Economics and Management 25(2): 103–120.
- Tahvonen, O. 1996. Uusi ympäristötaloustieteen professuuri Metsäntutkimuslaitoksessa. Haussa kokonaiskuva luonnonvarojen käytöstä. Metsänhoitaja 4/1996.
- 1998. Bequests, credit rationing and in situ values in the Faustmann–Pressler–Ohlin forestry model. Scandinavian Journal of Economics 100(4): 781–800.
- 1999a. Faustmannin kiertoaikamallista ja sen yleistyksistä. Metsätieteen aikakauskirja 1999(3): 544–548.
- 1999b. Forest harvesting decisions: the economics of household forest owners in the presence of in situ benefits. Biodiversity and Conservation 8: 101–117.
- & Salo, S. 1999c. Optimal forest rotation with in situ preferences. Journal of Environmental Economics and Management 37(1): 106–128.
- & Salo, S. 2000. On Faustmann rotation and normal forest convergence. Helsinki School of Economics and Business Administration. Working papers W-243. 35 s.

- , Salo, S. & Kuuluvainen, J. 2001. Optimal forest rotation and land values under a borrowing constraint. *Journal of Economic Dynamics and Control* 25: 1595–1627.
- Tarkka, J. 1993. Raha ja rahapolitiikka. Gaudeamus, Jyväskylä. 384 s.
- Taylor, R.G. & Fortson, J.C. 1991. Optimum plantation planting density and rotation age based on financial risk and return. *Forest Science* 37(3): 886–902.
- Teeter, L.D. & Caulfield, J.P. 1991. Stand density management strategies under risk: effects of stochastic prices. *Canadian Journal of Forest Research* 21(9): 1373–1379.
- Thomson, R.B. 1942. An examination of basic principles of comparative forest valuation. Duke University School of Forestry, Bulletin 6. Durham, NC. 99 s.
- Thomson, T.A. 1991. Efficient combinations of timber and financial market investments in single-period and multiperiod portfolios. *Forest Science* 37(2): 461–480.
- 1992. Optimal forest rotation when stumpage prices follow a diffusion process. *Land Economics* 68(3): 329–342.
- 1997. Long term portfolio returns from timber and financial assets. *Journal of Real Estate Portfolio Management* 3(1): 57–73.
- Thorsen, B.J. 1999. Progressive income taxes and option values: the case of a farmer who owns a forest. *Journal of Forest Economics* 5(2): 217–234.
- & Helles, F. 1998. Optimal stand management with endogenous risk of sudden destruction. *Forest Ecology and Management* 108: 287–299.
- von Thünen, J.H. 1826. *Der Isolierte Staat*. Teoksessa: Hall, P. (ed.). 1966. Von Thünen's isolated state. An English edition of *Der Isolierte Staat* by Johann Heinrich von Thünen. Pergamon Press, Oxford. 299 s.
- Tribe, K. 1984. Cameralism and the science of government. *Journal of Modern History* 56: 263–284.
- Valsta, L. 1982. Iustuskuusikon kasvatustiheyksien liiketaloudellinen vertailu. *Folia Forestalia* 504. 33 s.
- 1986. Mänty-rauduskoivusekametsikön hakkuuohjelman optimointi. *Folia Forestalia* 666. 23 s.
- 1992a. An optimization model for Norway Spruce management based on individual tree growth models. *Acta Forestalia Fennica* 232. 20 s.
- 1992b. A scenario approach to stochastic anticipatory optimization in stand management. *Forest Science* 38(2): 430–447.
- 1993. Stand management optimization based on growth simulators. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 453. 51 s. ja tutkimusartikkelit.
- 1997. Metsän uudistaminen. Teoksessa: Mielikäinen, K. & Riikilä, M. (toim.). *Kannattava puuntuotanto*. Metsälehti, Jyväskylä. ss. 27–34.
- Varian, H.R. 1996. *Intermediate microeconomics. A modern approach*. 4th edition. W.W. Norton & Company, New York. 650 s.
- Vettenranta, J. & Miina, J. 1999. Optimizing thinnings and rotation of Scots pine and Norway spruce. *Silva Fennica* 33(1): 73–84.
- Vuokila, Y. 1956. Etelä-Suomen hoidettujen kuusikoiden kehityksestä. *Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja* 48.1. 138 s.
- 1980. Metsänkasvatuksen perusteet ja menetelmät. WSOY, Porvoo. 256 s.
- 1987. Metsänkasvatuksen perusteet ja menetelmät. Toinen painos. WSOY, Porvoo. 258 s.

- Wagner, J.E. & Holmes, T.P. 1999. Estimating economic gains for landowners due to time-dependent changes in biotechnology. *Forest Science* 45(2): 163–170.
- Wan, H. 1994. Revisiting the Mitra-Wan tree farm. *International Economic Review* 35(1): 193–198.
- Weber, R. 1926. Die Bedeutung des Waldes und die Aufgaben der Forstwirtschaft. Teoksessa: Weber, H. (toim.). *Handbuch der Forstwissenschaft*. Erster Band. Vierte, verbesserte und erweiterte Auflage. Verlag der H. Laupp'schen Buchhandlung, Tübingen. ss. 43–187.
- Willassen, Y. 1998. The stochastic rotation problem: a generalization of Faustmann's formula to stochastic forest growth. *Journal of Economic Dynamics and Control* 22: 573–596.
- Woolsey, T.S. 1923. *American forest regulation*. The Tuttle, Morehouse and Taylor Company, New Haven. 217 s.
- Yaari, M.E. 1964. On consumer's lifetime allocation process. *International Economic Review* 5(3): 304–317.
- Yin, R. & Newman, D.H. 1995a. Optimal timber rotations with evolving prices and costs revisited. *Forest Science* 41(3): 477–490.
- 1995b. A note on the tree-cutting problem in a stochastic environment. *Journal of Forest Economics* 1(2): 181–190.
  - 1996. Are markets for stumps informationally efficient? *Canadian Journal of Forest Research* 26(6): 1032–1039.
  - 1997. When to cut a stand of trees? *Natural Resource Modeling* 10(3): 251–261.

## Haastattelut

- Prof. Helmut Brandl, Forstliche Versuchs und Forschungsanstalt, Freiburg: 5.10.1999, Darmstadt, Saksa
- Jean-Luc Peyron, Laboratoire de Recherches en Sciences Forestières, Nancy: 5.10.1999, Darmstadt, Saksa
- Prof. Hans-Joachim Weimann, Universität Giessen: 4.10.1999, Darmstadt, Saksa



## Liite I. Rajakannattavuuden analyyttinen tarkastelu, kun uudistamiskustannukset otetaan huomioon.

Maankorkoteorian mukaan päätöksentekijän ongelmaa kuvaa maksimointitehtävä

$$\text{Max}_{\{t\}} V_f = \frac{pf(t) - c}{t} - r \int_0^t [(V + c)/t] e^{rb} db,$$

jossa  $c$  tarkoittaa uudistamiskustannuksia.

Kun maamarkkinat oletetaan täydellisiksi ja paljaan maan markkinahinta an-  
netuksi, kyseinen maksimointitehtävä voidaan kirjoittaa muotoon

$$\text{Max}_{\{t\}} V_f = \frac{pf(t) - c}{t} - \frac{r(V + c)}{t} \int_0^t e^{rb} db,$$

josta saadaan 1. kertaluvun ehdoksi optimille

$$\frac{pf'(t)t - [pf(t) - c]}{t^2} + \frac{r(V + c)}{t^2} \int_0^t e^{rb} db - \frac{r(V + c)}{t} e^{rt} = 0 \quad (1)$$

$$\Leftrightarrow \frac{pf'(t)t - [pf(t) - c]}{t^2} + \frac{(V + c)}{t^2} (e^{rt} - 1) - \frac{r(V + c)}{t} e^{rt} = 0$$

$$\Leftrightarrow pf'(t)t - [pf(t) - c] + (V + c)(e^{rt} - 1) - rt(V + c)e^{rt} = 0.$$

Maankorkoteorian mukaan paljaan maan markkinahinta  $V = \frac{pf(t)e^{-rt} - c}{1 - e^{-rt}}$ . Si-  
joitetaan tämä edelliseen yhtälöön, jolloin saadaan

$$pf'(t)t = [pf(t) - c] - \left\{ \frac{pf(t)e^{-rt} - c}{1 - e^{-rt}} + c \right\} (e^{rt} - 1) + rt \left\{ \frac{pf(t)e^{-rt} - c}{1 - e^{-rt}} + c \right\} e^{rt}$$

$$\Leftrightarrow pf'(t)t = [pf(t) - c] - [pf(t) - c] + rt \left\{ \frac{pf(t)e^{-rt} - c}{1 - e^{-rt}} + c \right\} e^{rt}$$

$$\Leftrightarrow pf'(t) = r \left\{ \frac{pf(t)e^{-rt} - c}{1 - e^{-rt}} + c \right\} e^{rt}$$

$$\Leftrightarrow pf'(t) = r(V + c)e^{rt}. \quad (2)$$

Taloudenpitäjän kannattaa siis hankkia sellainen normaalimetsä, jonka vanhimman ikäluokan  $t$  arvokasvu eli rajatuotto  $pf'(t)$  vastaa siihen sitoutuneen pääoman vaihtoehtokustannusta (rajakustannusta)  $r(V + c)e^{rt}$ . Voidaan osoittaa, että optimiratkaisu on yksikäsitteinen ainakin, jos

$$f(t) = 0, \text{ kun } 0 \leq t \leq \underline{t}; \text{ ja jos } f(t) > 0, f'(t) > 0 \text{ ja } f''(t) < 0, \text{ kun } t > \underline{t}.$$

Seuraavaksi esitetään Duerrin, Bondin, Oderwaldin ja Nyysösen rajakannattavuuden yhteydessä käyttämä laskentatapa jatkuva-aikaisen tarkastelun muodossa, kun uudistamiskustannukset otetaan huomioon. Päätöksentekijän ongelmaa kuvaa nyt maksimointitehtävä

$$\underset{\{t\}}{\text{Max}} V_d = \frac{pf(t) - c}{t} - r \int_0^t [pf(b)/t] db.$$

Koska kantohinta ja korko ovat vakioita, kyseinen maksimointitehtävä voidaan kirjoittaa muotoon

$$\underset{\{t\}}{\text{Max}} V_d = \frac{pf(t) - c}{t} - \frac{rp}{t} \int_0^t f(b) db,$$

josta saadaan 1. kertaluvun ehdoksi optimille

$$\frac{pf'(t)t - [pf(t) - c]}{t^2} + \frac{rp}{t^2} \int_0^t f(b) db - \frac{rp}{t} f(t) = 0 \quad (3)$$

$$\Leftrightarrow pf'(t)t - [pf(t) - c] + rp \int_0^t f(b) db - rpf(t)t = 0 \quad (4)$$

$$\Leftrightarrow pf'(t)t = [pf(t) - c] - rp \int_0^t f(b) db + rpf(t)t$$

$$\Leftrightarrow pf'(t) - \left[ \frac{pf(t) - c}{t} \right] = r \left[ pf(t) - \frac{p \int_0^t f(b) db}{t} \right]. \quad (5)$$

Tulos siis näyttäisi poikkeavan selvästi edellä esitetystä maankorkoteorian mukaisesta ratkaisusta (2).

Duerrin, Bondin, Oderwaldin ja Nyysösen laskentamenetelmällä saatu optimiratkaisu on yksikäsitteinen, kun  $f'(t) > 0$ ,  $f''(t) < 0$  ja  $r > 0$ , koska lauseketta (4) hyväksi käyttäen saadaan

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial t} \left[ pf'(t)t - [pf(t) - c] + rp \int_0^t f(b)db - rpf(t)t \right] \\
 &= pf''(t)t + pf'(t) - pf'(t) + \frac{\partial}{\partial t} \left[ rp \int_0^t f(b)db \right] - rpf'(t)t - rpf(t) \\
 &= \frac{f''(t)t}{r} + \frac{\partial}{\partial t} \left[ \int_0^t f(b)db \right] - f'(t)t - f(t) \\
 &= \frac{f''(t)t}{r} + f(t) - f'(t)t - f(t) \\
 &= \left[ \frac{f''(t)}{r} - f'(t) \right] t < 0, \text{ kun } f'(t) > 0, f''(t) < 0 \text{ ja } r > 0.
 \end{aligned}$$

Selvitetään seuraavaksi, kumpi ratkaisu johtaa pitempään kiertoaikaan. To-  
teuttakoon maankorkoteorian mukaan laskettu kiertoaika  $t_f$  ehdon (1) ja Duerrin,  
Bondin, Oderwaldin ja Nyysösen esittämällä tavalla laskettu kiertoaika  $t_d$  eh-  
don (3). Merkitään näitä ehtoja  $A(t)$ :llä ja  $B(t)$ :llä eli

$$\begin{cases}
 A(t) \equiv \frac{pf'(t)t - [pf(t) - c]}{t^2} + \frac{r(V+c)}{t^2} \int_0^t e^{rb} db - \frac{r(V+c)}{t} e^{rt} \text{ ja } A(t)|_{t=t_f} = 0 \\
 B(t) \equiv \frac{pf'(t)t - [pf(t) - c]}{t^2} + \frac{rp}{t^2} \int_0^t f(b)db - \frac{rp}{t} f(t) \text{ ja } B(t)|_{t=t_d} = 0.
 \end{cases}$$

Maankorkoteorian mukaan laskettu kiertoaika on pidempi kuin Duerrin,  
Bondin, Oderwaldin ja Nyysösen esittämä kiertoaika, jos  $-A(t_f) + B(t_f) < 0$   
eli jos

$$\begin{aligned}
 g &\equiv \frac{-pf'(t)t + [pf(t) - c]}{t^2} - \frac{r(V+c)}{t^2} \int_0^t e^{rb} db + \frac{r(V+c)}{t} e^{rt} + \frac{pf'(t)t - [pf(t) - c]}{t^2} \\
 &+ \frac{rp}{t^2} \int_0^t f(b)db - \frac{rp}{t} f(t) < 0,
 \end{aligned}$$

jossa yksinkertaisuuden vuoksi merkitään  $t=t_f$ . Tästä saadaan lauseke

$$g = -\frac{r(V+c)}{t^2} \int_0^t e^{rb} db + \frac{r(V+c)}{t} e^{rt} + \frac{rp}{t^2} \int_0^t f(b) db - \frac{rp}{t} f(t),$$

joka voidaan edelleen kirjoittaa muotoon

$$-\frac{gt^2}{r} = \int_0^t (V+c)e^{rb} db - (V+c)e^{rt} t - \int_0^t pf(b) db + pf(t)t.$$

Kun otetaan huomioon, että  $V = \frac{pf(t)e^{-rt} - c}{1 - e^{-rt}}$ , saadaan

$$-\frac{gt^2}{r} = \int_0^t \left\{ \left[ \frac{pf(t)e^{-rt} - c}{1 - e^{-rt}} + c \right] e^{rb} \right\} db - \left[ \frac{pf(t)e^{-rt} - c}{1 - e^{-rt}} + c \right] e^{rt} t - \int_0^t pf(b) db + pf(t)t$$

ja positiivisella termillä  $\frac{1 - e^{-rt}}{p}$  kertomalla edelleen

$$\begin{aligned} & \int_0^t \left\{ \left[ f(t)e^{-rt} - \frac{c}{p} + \frac{c(1 - e^{-rt})}{p} \right] e^{rb} \right\} db - \left\{ \left[ f(t)e^{-rt} - \frac{c}{p} + \frac{c(1 - e^{-rt})}{p} \right] e^{rt} t \right\} - \int_0^t f(b) db (1 - e^{-rt}) \\ & + f(t)(1 - e^{-rt})t \\ & = \int_0^t \left\{ \left[ f(t)e^{-rt} - \frac{ce^{-rt}}{p} \right] e^{rb} \right\} db - \left\{ \left[ f(t)e^{-rt} - \frac{ce^{-rt}}{p} \right] e^{rt} t \right\} - \int_0^t f(b) db (1 - e^{-rt}) \\ & + f(t)(1 - e^{-rt})t \equiv u. \end{aligned} \tag{6}$$

Osoitetaan seuraavaksi, että  $u$  on positiivinen, jos  $f''(t) \leq 0$ . Kun lauseke (6) kirjoitetaan muotoon

$$u = \int_0^t \left\{ \left[ f(t)e^{-rt} - \frac{ce^{-rt}}{p} \right] e^{rb} \right\} db + \frac{ct}{p} - \int_0^t f(b)db(1 - e^{-rt}) - f(t)e^{-rt}t$$

$$= \int_0^t \left\{ \left[ f(t) - \frac{c}{p} \right] e^{-rt} e^{rb} + \frac{c}{p} - f(t)e^{-rt} \right\} db - \int_0^t f(b)(1 - e^{-rt})db,$$

voidaan päätellä  $u$ :n olevan positiivinen ainakin, jos

$$q \equiv \left[ f(t) - \frac{c}{p} \right] e^{-rt} e^{rb} + \frac{c}{p} - f(t)e^{-rt} - f(b)(1 - e^{-rt}) \geq 0, \text{ kun } 0 \leq b \leq t \text{ ja } q \text{ on}$$

positiivinen ainakin jollain  $0 \leq b \leq t$ .

Lisäksi havaitaan, että

$$q|_{t=b} = \left[ f(t) - \frac{c}{p} \right] e^{-rt} e^{rt} + \frac{c}{p} - f(t)e^{-rt} - f(t)(1 - e^{-rt}) = 0.$$

Kun  $t$  toteuttaa maankorkoteorian mukaisen ratkaisun eli

$$\left[ f(t) - \frac{c}{p} \right] = \frac{f'(t)}{r}(1 - e^{-rt}), \text{ saadaan}$$

$$q = \frac{f'(t)}{r}(1 - e^{-rt})e^{-rt} e^{rb} + \frac{c}{p} - \left[ \frac{f'(t)}{r}(1 - e^{-rt}) + \frac{c}{p} \right] e^{-rt} - f(b)(1 - e^{-rt}).$$

Ottamalla tästä lausekkeesta osittaisderivaatta  $b$ :n suhteen saadaan

$$\frac{\partial q}{\partial b} = f'(t)(1 - e^{-rt})e^{-rt} e^{rb} - f'(b)(1 - e^{-rt})$$

$$= (1 - e^{-rt})[f'(t)e^{r(b-t)} - f'(b)] < 0,$$

kun  $0 \leq b < t$ , koska tällöin  $0 < e^{r(b-t)} < 1$  ja koska on oletettu, että  $f'' \leq 0$ .

Voidaan siis päätellä, että koska  $q = 0$ , kun  $t = b$ , ja  $\frac{\partial q}{\partial b} < 0$ , niin  $q > 0$  kun  $b < t$ .

Tällöin  $u > 0$  ja edelleen  $g < 0$ , josta seuraa, että  $t_d < t_f$ .

Analyttisen tarkastelun perusteella näyttäisi siis siltä, että Duerrin, Bondin, Oderwaldin ja Nyysösen esittämä rajakannattavuuden laskentatapa johtaisi lyhyempään kiertoaikaan kuin maankorkoteoria ja Faustmannin malli, kun  $f''(t) \leq 0$ ,  $0 \geq b \leq t$ ,  $r > 0$  ja uudistamiskustannukset otetaan huomioon.

**Liite 2. Paljaan maan arvon riippuvuus kantohinnasta  $p$ , korosta  $r$  ja uudistamiskustannuksista  $c$ .**

Lausekkeen (4.19) mukaisesti paljaan maan arvon ( $V^F$ ) yhtälö on

$$V^F = \frac{pf(t)e^{-rt} - c}{1 - e^{-rt}} = \frac{pf(t)e^{-rt}}{1 - e^{-rt}} - \frac{c}{1 - e^{-rt}}.$$

Tästä saadaan kokonaisdifferentiaaliksi

$$dV^F = \left[ \frac{f(t)e^{-rt}}{1 - e^{-rt}} \right] dp + \left[ \frac{-tpf(t)e^{-rt}(1 - e^{-rt}) - pf(t)e^{-rt}te^{-rt}}{(1 - e^{-rt})^2} \right] dr + \left[ \frac{-1}{1 - e^{-rt}} \right] dc$$

ja edelleen

$$(i) \quad \frac{dV^F}{dp} = \frac{f(t)e^{-rt}}{1 - e^{-rt}} > 0,$$

$$(ii) \quad \frac{dV^F}{dr} = \left[ \frac{-tpf(t)e^{-rt}(1 - e^{-rt}) - pf(t)e^{-rt}te^{-rt}}{(1 - e^{-rt})^2} \right] < 0,$$

$$(ii) \quad \frac{dV^F}{dc} = \frac{-1}{1 - e^{-rt}} < 0.$$

Toisin sanoen kantohinnan nousu lisää paljaan maan arvoa, mutta koron tai uudistamiskustannusten nousu vähentää sitä.

### Liite 3. Hartmanin (1976) malli.

$$\text{Max}_{\{t\}} U(t) = G(t) \left[ e^{-rt} + e^{-2rt} + e^{-3rt} + \dots \right] + \int_0^t e^{-rx} F(x) dx \left[ 1 + e^{-rt} + e^{-2rt} + e^{-3rt} + \dots \right]$$

$$= \frac{G(t)e^{-rt} + \int_0^t e^{-rx} F(x) dx}{1 - e^{-rt}},$$

jossa  $U(t)$  kuvaa hyötyfunktiota,  $G(t)$  nettopuunmyyntituloja,  $r$  korkoa,  $t$  kiertoaikaa ja  $F(x)$  metsän rahassa mitattavia monikäyttöhyötyjä. Ensimmäisen kertaluvun ehto maksimille on

$$U'(t) = \frac{\left[ -re^{-rt}G(t) + e^{-rt}G'(t) + e^{-rt}F(t) \right]}{1 - e^{-rt}} - \frac{\left[ G(t)e^{-rt} + \int_0^t e^{-rx} F(x) dx \right] re^{-rt}}{\left( 1 - e^{-rt} \right)^2} = 0,$$

josta saadaan hakkuuohjeeksi

$$\frac{G'(t)}{G(t)} = r \left[ \frac{1}{1 - e^{-rt}} + \frac{\int_0^t e^{-rx} F(x) dx}{G(t)(1 - e^{-rt})} \right] - \frac{F(t)}{G(t)}.$$

Koska  $0 < (1 - e^{-rt}) < 1$ , niin  $1/(1 - e^{-rt}) > 1$ . Jos  $G(t) > 0$  ja  $\int_0^t e^{-rx} F(x) dx > 0$ , niin

hakusulkujen sisällä oleva lauseke on suurempi kuin yksi. Klassisesta Faustmanin mallista poiketen optimaalinen kiertoaika riippuu siis koron ja nettopuunmyyntitulojen lisäksi metsän rahassa mitattavissa olevista monikäyttöhyödyistä.



**ISBN 951-40-1828-1**  
**ISSN 0358-4283**