

FOLIA FORESTALIA 666

METSÄNTUTKIMUSLAITOS · INSTITUTUM FORESTALE FENNIAE · HELSINKI 1986

LAURI VALSTA

MÄNTY-RAUDUSKOIVUSEKAMETSIKÖN
HAKKUUOHJELMAN OPTIMOINTI

OPTIMIZING THINNINGS AND ROTATION
FOR MIXED, EVEN-AGED PINE-BIRCH
STANDS



METSÄNTUTKIMUSLAITOS
THE FINNISH FOREST RESEARCH INSTITUTE

Osoite: Unioninkatu 40 A
Address: SF-00170 Helsinki, Finland

Puhelin: (90) 661 401
Phone:

Ylijohtaja: Director:	Professori Professor	Aarne Nyysönen
Julkaisujen jakelu: Distribution of publications:	Kirjastonhoitaja Librarian	Liisa Ikävalko-Ahvonen
Julkaisujen toimitus: Editorial office:	Toimittajat Editors	Seppo Oja Tommi Salonen

Metsäntutkimuslaitos on maa- ja metsätalousministeriön alainen vuonna 1917 perustettu valtion tutkimuslaitos. Sen päätehtävänä on Suomen metsätaloutta sekä metsävarojen ja metsien tarkoituksenmukaista käyttöä edistävä tutkimus. Metsäntutkimustyötä tehdään lähes 800 hengen voimin yhdeksällä tutkimusosastolla ja kymmenellä tutkimus- ja koeasemalla. Tutkimus- ja koetoimintaa varten laitoksella on hallinnassaan valtion-metsiä yhteensä n. 150 000 hehtaaria, jotka on jaettu 17 tutkimusalueeseen ja joihin sisältyy kaksi kansallis- ja viisi luonnonpuistoa. Kenttäkokeita on käynnissä maan kaikissa osissa.

The Finnish Forest Research Institute, established in 1917, is a state research institution subordinated to the Ministry of Agriculture and Forestry. Its main task is to carry out research work to support the development of forestry and the expedient use of forest resources and forests. The work is carried out by means of 800 persons in nine research departments and ten research stations. The institute administers state-owned forests of over 150 000 hectares for research purposes, including two national parks and five strict nature reserves. Field experiments are in progress in all parts of the country.

FOLIA FORESTALIA 666

Metsäntutkimuslaitos. Institutum Forestale Fenniae. Helsinki 1986

Lauri Valsta

MÄNTY-RAUDUSKOIVUSEKAMETSİKÖN HAKKUUOHJELMAN OPTIMOINTI

Optimizing thinnings and rotation for mixed,
even-aged pine-birch stands

Approved on 29.8.1986

SISÄLLYS

1. JOHDANTO	3
11. Sekametsikön kasvatus liiketaloudellisena ongelmana	3
12. Aiemmat tutkimukset	4
13. Tutkimusongelma	5
2. OPTIMOINTIMALLI	6
21. Metsikön kehitysmalli	6
22. Hinta- ja kustannustiedot	7
23. Optimointimenetelmän valinta	11
24. Dynaaminen ohjelmointi	12
3. TULOKSET	13
31. Yleistä	13
32. Optimaaliset hakkuuohjelmat 40-vuotiaalle metsiköille	14
33. Koko kiertoaikaa koskevat hakkuuohjelmat	16
4. TARKASTELU	17
KIRJALLISUUS — REFERENCES	19
SUMMARY	21
LIITTEET — APPENDICES	23

VALSTA, L. 1986. Mänty-rauduskoivusekametsikön hakkuuohjelman optimointi. Summary: Optimizing thinnings and rotation for mixed, even-aged pine-birch stands. *Folia Forestalia* 666. 23 p.

Dynaamista ohjelmointia käyttäen on laadittu optimointimalli rinnankorkeudelta tasaikäisen, hoidetun mänty-rauduskoivusekametsikön harvennuksille ja kiertoajan pituudelle. Malli määrittää harvennusten optimaaliset ajankohdat, voimakkuudet ja puulajisuhteet. Optimoinnin kriteerinä on hakkuuohjelman antama nykyarvo.

Mallin syöttötietoina tarvitaan optimoitavan metsikön ikä, runkotilavuus ja runkoluku sekä puutavara-lajeittaiset yksikköhinnat, metsikön perustamiskustannukset ja laskentakorkokanta. Koivun osuus puuston tilavuudesta voidaan antaa syöttötietona tai vaihtoehtoisesti malli etsii optimaalisen koivuosuuden myös alkupuustolle. Harvennusvoimakkuudelle voidaan lisäksi asettaa yläraja ja koivun osuudelle vähimmäisvaatimus. Malli soveltuu 30—80 -vuotiaille tuoreen ja lehtomaisen kankaan metsiköille maan keski- ja itäosissa. Metsänomistajan oletetaan myyvän puut pystykaupoin.

Tyypillisten hintasuhteiden vallitessa edullisin rauduskoivun osuus on kiertoajan alkupuolella 20—40 prosenttia. Kiertoajan loppua kohden on optimaalista poistaa koivut kokonaan. Hoidetuissa sekametsiköissä laskelmia vastaavissa olosuhteissa on mahdollista ylläpitää 50 prosenttia rauduskoivuosuus läpi kiertoajan vain vähäisin taloudellisin tappioiden puhtaaseen männikköön verrattuna.

Discrete-time, discrete-state dynamic programming is used to optimize thinnings and rotation for mixed, even-aged stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and birch (*Betula pendula* Roth). The optimal timing, intensity and species composition of thinnings is also determined. The optimality criterion is soil expectation value, based on an infinite series of equal rotations. The state variables of the model are stand volume, birch percentage of volume and the total number of trees.

Pulpwood and sawtimber are priced individually for each tree species. Stumpage prices are dependent on the average stem size and the volume removed in any one cut. Thinning intensity may be constrained and a lower bound may be imposed for the birch percentage of the growing stock.

The results are applicable to properly managed stands with neither tree species overtopping in the canopy. Typical optimal management regimes include 20—40 percent birch in the growing stock during the first half of the rotation. Later, the birches are removed and a pure pine stand is final harvested at stand age 60—80, depending on the interest rate.

Keywords: forest economics, mixed-species stand, optimal thinning, dynamic programming
ODC 624.3 + 228.3/.5 + 174.7 *Pinus sylvestris* + 176.1 *Betula pendula*

Author's address: The Finnish Forest Research Institute, Department of Forest Economics, PL 37, SF-00381 Helsinki, Finland.

ISBN 951-40-0751-4
ISSN 0015-5543

Helsinki 1986. Valtion painatuskeskus

1. JOHDANTO

11. Sekametsikön kasvatus liiketaloudellisenä ongelmana

Havumetsiköiden koivusekoitus vaikuttaa sekä puuston kasvuun että raakapuumarkkinoiden kautta syntyneeseen metsikön puuston arvoon puulajien hintasuhteiden välityksellä. Jos puulajisuhteet vaikuttavat metsien moninaiskäyttöliikkeen arvoon, metsänomistajan saama hyöty tai metsän arvo kiinteistömarkkinoilla riippuu koivusekoituksen määrästä puuston rahallisen arvon ohella. Yleisesti oletetaan koivusekoituksen vaikuttavan myös metsikön tuhon- ja saasteidenkestävyyteen, joilla on luonnollisesti taloudellisia seurannaisvaikutuksia. Edellä mainittujen epäsuorien tai ei-rahallisten tekijöiden sisällyttäminen liiketaloudellisiin laskelmiin ei ole mahdollista toistaiseksi käytettävissä olevan tiedon pohjalta. Päätöksentekijä voinee silti hyödyntää kvalitatiivisten kriteerien ohella laskelmia, jotka ilmaisevat eriaistisen koivusekoituksen vaikutuksen hakkuutulojen perusteella määritettyyn metsikön käsittelyohjelman arvoon.

Vaikka mänty ja koivu ovat molemmat ns. pioneeri-puulajeja ja siten nuorena nopeakasvuisia, on koivun kasvu kuitenkin selvästi nopeampaa ensimmäisinä vuosikymmeninä (Mielikäinen 1980, s. 26). Kahden kasvurytmiltään jossain määrin poikkeavan puulajin kasvatus sekametsikkönä tarjoaa mahdollisuuden hyödyntää molempien puulajien parhaan kasvun ajanjaksoja. Ongelmaksi muodostuu tällöin, kuinka hyvin puulajien rinnakkaiselo voidaan toteuttaa. Mänty-rauduskoivusekametsikön tapauksessa tärkeä kysymys on, voidaanko koivun nopeaa kasvua hyödyntää siten, että nuorella iällä metsikön tilavuudesta on merkittävä osa koivua, ilman että mäntyn kehitys hidastuu liiaksi. Metsikön myöhemmällä iällä kasvutilaa voitaisiin järjestellä vastaavasti mäntyn eduksi.

Mielikäisen (1980) tutkimuksen yksi päätulos on, että sopivan suuruinen rauduskoivusekoitus lisää metsikön kiertoajan kokonaiskasvua puhtaaseen männikköön verrattuna. Sekametsikön parempi kasvu koituu tällöin sekä männyn että koivun hyväksi.

Suurin kasvu saadaan nuorella iällä n. 50 prosentin koivusekoituksella ja metsikön varttuessa vähenevällä koivusekoituksella. Sekametsiköiden kasvu- ja tuotoskysymyksiä on käsitelty laajasti Mielikäisen (1980, 1985) tutkimuksissa.

Sekametsikön kehitys perustamisvaiheesta nuoreksi harvennusmetsäksi on edelleen puutteellisesti tunnettu. Metsänuudistamisen ja taimikonhoidon yhteydessä tehtyä puulajisuhteiden järjestelyä on vaikea ottaa huomioon metsikön kehityssuhteissa ja metsänhoidon kustannuksia tarkasteltaessa.

Metsikön liiketaloudellisesti edullisimpaan puulajisuhteeseen vaikuttaa puumäärien ohella puulajien kantohintojen suhde. Männyn ja koivun kantohintojen suhde vaihtelee huomattavasti maamme eri osien välillä. Taloudelliselta kannalta keskeinen on tukkipuun kantohintojen suhde, johon puolestaan vaikuttaa etenkin koivun kysyntä, ja siis koivua käyttävän teollisuuden sijainti. Pelkästään hintasuhdetta tarkastelemalla voisi arvioida, että runsas koivusekoitus männikössä on taloudellisesti mielekäs lähinnä Järvi-Suomen piirimetsälautakuntien alueella (Itä-Hämeen, Etelä-Savon, Etelä-Karjalan, Itä-Savon, Pohjois-Savon ja Pohjois-Karjalan piirimetsälautakunnat). Männyn ja koivun kantohintojen ajallista ja alueellista vaihtelua tarkastellaan luvussa 22.

Metsikön kasvatus on ajan mukana etenevää pitkäaikaista tuotannon ohjausta, jossa prosessia koskevia päätöksiä tehdään tuotannon eri vaiheissa. Metsikön kasvatuksen optimointi on siten luonteeltaan dynaamista optimointia (vrt. Jääskeläinen ja Kuusi 1974, s. 202—209).

Sekametsikön kasvatuksen optimointi on liiketaloudellisenä ongelmana pääpiirteissään samanlainen kuin puhtaan metsikön kohdalla. Jälkimmäistä ovat käsitelleet esim. Einola (1964, s. 45—53), Gregory (1972) ja Hämäläinen (1973a). Yhteinen tärkeä ongelma on, kuinka paljon puustoa sidotaan metsikön kasvun ylläpitämiseen ja kuinka paljon sitä realisoidaan kulutusta tai sijoituskohteita varten. Sekametsikön tapauksessa on lisäksi tarkasteltava puulajien osuuksia kiertoajan

eri vaiheissa ottaen huomioon puulajien kasvunopeudet ja keskinäiset vaikutukset sekä toisaalta erilaiset arvot.

12. Aiemmat tutkimukset

Ensimmäinen yleisesti tiedossa oleva dynaamisen optimoinnin sovellutus harvennusten optimointiin on Arimizun (1958, viitt. Hool 1966) tutkimus. Siinä käytettiin dynaamista ohjelmointia, jonka Richard Bellman kehitti 1950-luvulla (Bellman 1954, 1957). Chappelle ja Nelson (1964) määrittivät marginaalianalyysin avulla optimaalisen puustopääomatason ja kiertoajan loblollymännylle (*Pinus taeda* L.). Tutkimuksessa ei sen sijaan selvitetty, mikä on optimaalinen hakkuuohjelma metsikölle, jonka puusto lähtötilanteessa ei ole optimaalisella tasolla. Hool (1966) yhdisti dynaamisen ohjelmoinnin Markovin ketjuja käyttävään kasvumalliin. Metsikön mahdolliset tilat määritettiin joukkona erillisiä tiloja ja kasvun sekä hakuiden vaikutus metsikön kehitykseen ilmaistiin todennäköisyyksinä transiitiomatriiseissa. Myöhemmin Lembersky ja Johnson (1975) laajensivat analyysiä kattamaan ikuisuuteen ulottuvan aikahorisontin, todellisuutta paremmin vastaavat hinta- ja kustannustekijät sekä stokastisen kantohintatason.

Joukko dynaamista ohjelmointia harvennusten optimointiin soveltavia tutkimuksia ilmestyi 1960-luvun lopussa (Amidon ja Akin 1968, Kilkki ja Väisänen 1969, Risvand 1969). Kahdessa ensin mainitussa metsikköä kuvattiin pelkästään puuston hehtaarikohtaisella tilavuudella, kun taas Risvandin (1969) tutkimuksessa tilamuuttajat olivat puuston tilavuus ja keskiläpimitta. Suomessa julkaistiin 1970-luvun alussa Kilkin (1972) ja Siitosen (1972) tutkimukset, joissa tilamuuttujina olivat metsikön ikä, puuston tilavuus ja keskirungon koko.

Uusi aalto dynaamista ohjelmointia käyttäviä tutkimuksia alkoi 1970-luvun lopulta lähtien Brodien ym. (1978) aloittamana. Dynaamisen ohjelmoinnin käyttöä erilaisissa metsikön käsittelyn optimointitehtävissä on esitelty Brodien ja Haightin (1985) tutkimuksessa. Dynaamista ohjelmointia on sovellettu tasaikäisiin metsiköihin käyttäen erityyppisiä kasvumalleja: metsikön kasvumalli ilman lä-

pimittajakaumaa (esim. Brodie ja Kao 1979), metsikön kasvumalli läpimittajakauman kanssa (Riitters ym. 1982), puun kasvumalli (esim. Haight ym. 1985b) ja puun kasvumalli, jossa puun sijainti vaikuttaa kasvuun (Reich ja Dippon 1986). Kiertoajan ja puustopääoman ohella on optimoitu metsikön istutustiheyttä ja taimikon harvennusta (esim. Hann ym. 1983), kasvua haittaavan lehti-puuston käsittelyä (Valsta ja Brodie 1986), harvennustapaa (Haight ym. 1985b), lannoitusta (Kao 1979), sienitautien torjuntaa (Reich ja Dippon 1986) sekä yhdistettyä puuntuotantoa ja karjan laiduntamista (Riitters ym. 1982).

Taloustieteessä on sovellettu optimiohjausteoriaa laajasti dynaamisen optimoinnin ongelmiin. Näslund (1969) esitti ohjausteoreettisen formuloinnin tasaikäisen metsikön kiertoajan ja harvennusten samanaikaiseksi optimoimiseksi. Probleema on laadittu jatkuvan ajan muotoon eikä menetelmän soveltamisesta tai numeerisista tuloksista anneta esimerkkejä. Schreuder (1971) on todennut, että Näslundin käyttämä hakkuumuuttujan jako harvennusuuttuun ja päätehakkumuuttuun oli tarpeeton, sillä kummassakin hakkuussa oli kysymys puustopääoman määrän säätelystä.

Sittemmin on esitetty myös numeerisia tuloksia jatkuva-aikaisille optimiohjaustehtäville tasaikäisissä metsiköissä (Clark 1976, Cawrse ym. 1984). Metsikköä on tällöin kuvattu vain tilavuuden ja iän avulla, koska tehtävän ratkaisu analyyttisesti on vaikeaa.

Epäjatkuvan ajan tehtäville soveltuva diskreetti maksimiperiaate näyttäisi tarjoavan mahdollisuuden laajempien ongelmien ratkaisuun. Haight ym. (1985a) ovat optimoineet harsintarakenteisen metsikön hakkuita ja Haight (1986) on verrannut tasaikäisen ja harsintarakenteisen metsikön edullisuutta useita kymmeniä tilamuuttujia käsittävällä mallilla.

Epälineaarista ohjelmointia voidaan käyttää samantapaisissa tehtävissä kuin optimiohjausteoriaakin. Niinpä samaa kasvumallia on optimoitu epälinearisella ohjelmoinnilla (Adams ja Ek 1974) ja optimiohjausteoriolla (Raper 1980, Haight ym. 1985a). Epälineaarisen ohjelmoinnin käyttökelpoisuus on kuitenkin ollut vaihteleva. Tehtävää numeerisesti ratkaistaessa on toisinaan jouduttu turvautumaan heuristisiin menetelmiin melko suppeidenkin optimointitehtävien kohdalla (Bullard ym. 1985), kun taas laajahkojakin

ongelmia on ratkaistu (Roise 1986).

Sekametsiköitä koskevia taloudellisia tutkimuksia on tämän kirjoittajan tietoon tullut vähän. Esimerkkejä mäntysekametsiköiden perustamisen kustannuksista Saksassa on julkaissut Liebeneiner (1958). Esitetyistä irrallisista laskelmista ei kuitenkaan saa aineksia puhtaiden ja sekametsien vertailuun. Darrah ja Dodds (1967) havainnoivat erityyppisiä sekametsiköitä Englannissa. Aineisto vaihteli laajasti puulajien ja metsikkörakenteen suhteen eikä yksittäisten metsikkötyyppien kasvusuhteista tai edullisimmista määräsuhteista saatu tuloksia.

Bullard ym. (1985) ovat esittäneet menetelmän kahden puulajin sekametsikön optimaalisen harvennusohjelman etsimiseksi (heuristic random search). Menetelmässä simuloidaan vaihteittain suuri joukko kasvatusvaihtoehtoja siten, että uutta simuloinnin vaihetta aloitettaessa käytetään hyväksi aikaisemmista simuloinneista saatu tieto eri kasvatusohjelmien edullisuuksista. Simulointien antamien nykyarvojen jakaumaa seurataan samalla ja arvioidaan, kuinka kaukana paras löydetty ratkaisu on todellisesta optimisesta.

13. Tutkimusongelma

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on määrittää mänty-rauduskoivusekametsikön optimaalinen hakkuuohjelma. Metsänomistajan taloudellisena tavoitteena pidetään metsikön käsittelyohjelman antaman nykyarvon maksimointia.

Metsikön kasvatusta tarkastellaan tavalliseen tapaan investointina, jossa investointiin sidottu pääoma koostuu uudistamiskustannuksista, markkinakelpoisen puuston arvosta ja metsän kasvuun käytetyn maan arvosta seuraajametsiköiden tuottoarvona. Analyysissä optimoidaan metsikön kiertoajan ohella myös puustopääomaa ja puulajisuhteita kaikilla iänkohdilla. Kasvava puusto joutuu harvennettavaksi, mikäli puuston jokin osa tuottaa enemmän markkinahinnan mukaan realisoituna ja laskentakorkokannalla sijoitettuna kuin kasvamaan jätettynä. Harvennuksen edullisuutta määritettäessä otetaan huomioon harvennuksen vaikutukset sen hetkisiin ja myöhempisiin korjuukustannuksiin

sekä metsikön kehitykseen kiertoajan loppuun saakka.

Tuotot muodostuvat pystymyyntien antamista tuloista. Pääomamarkkinoiden oletetaan olevan täydelliset siten, että rahaa voidaan ottaa ja antaa lainaksi rajattomasti samalla, sekä ajan että määrän suhteen kiinteällä korkokannalla. Korkokanta on reaalin, inflaatiosta vapaa. Puun markkinahinnat ovat kiinteitä ajan ja määrän suhteen sekä tunnettuja. Korjuukustannukset ovat ajan suhteen kiinteitä ja tunnettuja.

Tutkimusongelmaa rajattaessa on keskeinen kysymys, kuinka suuri osa metsänomistajan päätöksentekoon vaikuttavista tekijöistä otetaan huomioon. Jo aluksi rajataan tarkastelu koskemaan vain taloudellisia näkökohtia ja niistäkin vain metsäomaisuuteen liittyviä. Puunkorjuun sisällyttäminen optimointimalliin metsänomistajan tekemänä edellyttää mallin laajentamista metsätalouden ulkopuolelle, sillä metsänomistajan oman työpanoksen ja koneiden käytön arvottaminen vaatii metsänomistajan muun talouden tarkastelua. Tulokset ovat lisäksi tällöin sidottuja kulloiseenkin metsälön kokoon ja rakenteeseen sekä metsänomistajan taloustilanteeseen (ks. esim. Hämäläinen 1973a ja 1973b). Samasta syystä tutkimuksessa tarkastellaan metsikköä metsälökokonaisuudesta erotettuna.

Metsänomistajan oletetaan myyvän puutavaran pystykaupoin ja korjuukustannukset sisällytetään tarkasteluun vain siltä osin, kuin ne heijastuvat pystymyyntien hinnoittelussa. Laskelmissa lähdetään harvennusvaiheeseen kehittyneestä metsiköstä, joten nykymetsikön perustaminen ja taimikonhoito jäävät optimoinnin ulkopuolelle tekijöinä, jotka on määrätty ennalta. Jotta tulevien puusukupolvien vaikutus optimaaliseen kiertoaikaan olisi oikeata suuruusluokkaa, uudistamiskustannukset sisältyvät laskelmiin kiinteänä, metsikön käsittelystä riippumattomana eränä.

Männyn ja rauduskoivun sekametsikön voidaan ajatella edellyttävän intensiivisempää hoitoa kuin puhtaiden männiköiden tai koiviköiden, mikä johtaisi lisäkustannuksiin. Ilmiön tapauskohtaisuuden ja tutkimustulosten puutteen vuoksi tätä tekijää ei otettu huomioon taloudellisessa tarkastelussa. Laskelmien ulkopuolella ovat myös muut kuin edellä mainitut metsänkasvatuksen kustannukset ja verot. Niiden vaikutusta metsikön optimaaliseen puulajisuhteeseen pidettiin vähäisenä.

Tässä julkaisussa tarkastellaan aluksi käytettävää kasvumallia ja esitellään laaditut metsikön tukki- ja hukkapuuosuusyhtälöt. Sen jälkeen kuvaillaan männyn ja rauduskoivun kantohintasuhteen ajallista ja alueellista vaihtelua ja esitetään laskelmissa käytetyt hinnat ja kustannukset sekä optimointimalli. Tuloksia raportoidaan peruslaskelmien lisäksi kantohintasuhdetta ja eräitä muita analyysin oletuksia vaihdellen. Päätulokset koskevat olemassa olevan 40-vuotiaan sekametsikön käsittelyä. Lisäksi tarkastellaan puulajisuhteen valintaa koko kiertoajalle.

Metsäntutkimuslaitoksen sekametsikköprojekti on usean tutkimusosaston ja -suunnan yhteistutkimus, jonka tarkoituksena on selvittää koivusekoituksen merkitystä havupuumetsissä biologiselta, puuntuotannolliselta ja taloudelliselta kannalta. Nyt julkaistava projekti ensimmäinen liiketaloudellinen tutkimus koskettelee männyn ja rauduskoivun sekametsiköitä.

Lausun kiitokseni professori Jouko Hämäläiselle, KTT Pekka Ollonqvistille ja KTM Markku Kuulalle sekä muille työtovereilleni liiketaloudellisen metsäekonomian tutkimussuunnalla arvokkaista huomautuksista ja parannusesityksistä työni kuluessa. Professori Yrjö Vuokila ja MML Yrjö Sevola ovat myös lukeneet käsikirjoituksen ja tehneet hyödyllisiä huomautuksia. MMT Kari Mielikäinen on tukenut työtäni opastamalla kasvumallien soveltamisessa ja antamalla käyttööni tutkimusaineistoaan. Kiitän häntä samoin kuin MMK Risto Ojansuuta myös käsikirjoitusta koskeneista kommentista. Lisäksi kiitän fil. yo. Pekka Ripattia osallistumisesta ohjelmointityöhön sekä professori Pekka Kilkkiä dynaamista ohjelmointia koskeneista keskusteluista.

2. OPTIMOINTIMALLI

21. Metsikön kehitysmalli

Sekametsikön kasvatuksen optimointia varten tarvitaan kyseisten metsiköiden kehitystä kuvaava malli. Lappi-Seppälän (1930) tutkimus koski käsittelemättömiä mäntykoivusekametsiä ja siinä esitettiin tuloksia vain kolmelle kiinteälle puulajisuhteelle. Se ei siten tarjoa riittävää aineistoa talousmetsien käsittelyn optimointiin. Mielikäinen (1980) laati tutkimuksessaan mäntykoivusekametsiköiden tilavuuskasvuyhtälöt talousmetsistä kerätyllä aineistolla. Yhtälöillä voidaan enustaa suhteellista tilavuuskasvua metsikön iän, puuston tilavuuden ja koivuosuuden funktiona. Yhtälöitä voidaan käyttää joustavasti vaihtoehtoisten käsittelyohjelmien muodostamiseen. Tutkimuksen aineisto kattaa 40—80-vuotiaat metsiköt.

Mielikäisen (mt.) kasvumallia sovellettaessa on oletettava, että taimikonhoito ja ensiharvennus on tarvittaessa tehty, ja että metsikön runkoluku on 40 vuoden iällä 700—1500 kpl hehtaarilla. Mäntyjen ja rauduskoivujen keskipituuksien edellytetään lisäksi olevan likimain samat siten, että kumpikaan puulaji ei ole etukasvuinen. Kasvupaikan mäntyjen valtapiitusboniteetti (H_{100}) on noin 28, mikä vastaa rehevähkää tuoreen kankaan kasvupaikkaa. Nämä rajaukset on johdettu kasvumallin pohjana olevasta aineistosta.

Mäntykoivusekametsien kehitystä taimikkovaiheesta nuoreksi harvennusmetsäksi ei ole maassamme varsinaisesti tutkittu. Mielikäinen (mt.) analysoi tutkimuksessaan luontaisesti syntyneiden mäntyjen ja koivujen pituuskehitystä ja totesi varttuneiden mäntyjen olevan keskimäärin 5—6 vuotta vanhempia kuin samanpituisten rauduskoivujen. Harin ym. (1982) simulointien mukaan 6 vuoden ikäero olisi riittävä turvaamaan mäntyjen eloonjäämisen ja 8 vuoden ikäero johtaisi mäntyjen valta-asemaan metsikössä. Simulointien pohjana oleva kasvupaikka, lehtomainen kangas, oli rehevämpi kuin Mielikäisen (mt.) aineiston boniteetti, mikä heikensi männyn kilpailukykyä. Sekametsiköiksi kasvatettavien mäntykoivu-taimikoiden perustaminen ja käsittely on edelleen puutteellisesti tunnettu.

Mielikäisen (mt.) laatima tilavuuskasvukasvuyhtälö mäntyrauduskoivusekametsiköille on seuraava:

$$\ln(P_v) = 7.050 - 0.8732 \ln(T_{1.3}) - 0.4187 \ln(V) - 0.5154 \cdot 10^{-6} B \cdot T_{1.3}^2 - 1.403 \frac{(50 - B)^2}{T_{1.3}^3}$$

jossa

P_v = tulevan 5-vuotiskauden tilavuuskasvu, prosenttia nykytilavuudesta,

$T_{1.3}$ = puuston rinnankorkeusikä, a,

V = puuston tilavuus, m^3/ha ja

B = koivun osuus puuston tilavuudesta, %.

Yhtälön kaksi viimeistä termiä osoittavat koivuosuuden vaikutuksen tilavuuskasvuprosenttiin. Niiden yhteisvaikutus on, että suurin tilavuuskasvu saadaan nuorella iällä hieman alle 50 %:n koivuosuudella ja iän lisääntyessä jatkuvasti alenevalla koivuosuudella (ks. Mielikäinen mt., kuva 20 ja taulukko 9).

Jotta puulajeittaiset tilavuudet kasvujakson lopussa voidaan laskea, on tunnettava kasvun jakaantuminen puulajien kesken. Tätä varten Mielikäinen (mt.) on esittänyt taulukon, josta osuudet saadaan metsikön rinnankorkeusian ja männyn tilavuusosuuden perusteella. Taulukko on myös tämän tutkimuksen liitteenä.

Kasvuyhtälön muoto ja parametrien arvot ovat lähtöaineistosta johtuen sellaiset, että samalla iänkohdalla kasvu on aina sitä suurempaa, mitä suurempi on metsikön puustopääoma. Siten esimerkiksi täysin harventamattoman, runsaspuustoisien metsikön kasvu muodostuu epärealistisen suureksi eikä luonnonpoistumaa esiinny. Tämän vuoksi metsikön kehitysmalliin liitettiin tässä tutkimuksessa osamalli, joka rajoittaa kasvua hyvin suurilla puustopääomilla.

Aluksi kokeiltiin Ilvessalon (1920) luonnonnormaalien metsien tilavuuksia eräänlaisina biologisina maksimipuustoina puulajeittain. Osoittautui kuitenkin, että sekä Mielikäisen (mt.) että Lappi-Seppälän (1930) aineistoissa oli runsaasti metsiköitä, joiden puuston tilavuus oli suurempi kuin luonnonnormaaleissa puhtaissa metsiköissä vastaavilla kasvupaikoilla ja valtapituuden arvoilla.

Tässä tutkimuksessa päädyttiin ratkaisuun, jossa puuston liikiheyden rajoina pidetään Mielikäisen (mt.) tutkimuksen aineiston suurimpia tilavuuksia kullakin iänkohdalla. Kyseiset tilavuudet eivät olleet vielä johtaneet itseharvenemiseen koemetsiköissä. Tilavuusraja ilmaistaan metsikön biologisen iän (T) funktiona seuraavalla yhtälöllä:

$$V_{\max} = 273,42 + 0,9308 T.$$

Tukkipuun määrän selvittämiseksi Mielikäinen (mt.) laati yhtälöt, jotka antavat sekametsikön tukkipuusuudet puulajeittain metsikön iän funktiona. Lähinnä puutavaran hinnoitteluperusteiden vuoksi tämän tutkimuksen kannalta olivat tarkoituksenmukaisempia tukkiosuusyhtälöt, jotka perustuivat puuston keskirungon kokoon. Käyttäen Mielikäisen (mt.) tutkimuksen metsikköaineistoa laadittiin epälineaarilla regressioanalyysillä

maximum likelihood -estimointia käyttäen yhtälöt puulajeittain tukkipuun ja hukkapuun osuuksille metsiköissä. Kuitupuun osuus saatiin edellisten perusteella.

Metsikköaineistosta (215 havaintoa) karstiin harkinnan jälkeen ne metsiköt, joissa jommankumman puulajin tilavuus oli alle 50 m³/ha. Metsikölle määritetyissä tukki- ja kuitupuun määrissä havaittiin tuntuvaa satunnaisvaihtelua silloin, kun puulajin tilavuus oli pieni. Käytetty aineisto oli sama kaikille yhtälöille ja sen kooksi muodostui 133 metsikköä. Rungon keskikoon ohella selittäjänä kokeiltiin myös metsikön ikää, mutta sillä ei ollut riittävää selitysvoimaa, jotta se olisi voitu sisällyttää malleihin.

Tukki- ja hukkapuusuuksien yhtälöille valittiin seuraava muoto, jotta ne voisivat saada arvoja vain nollan ja yhden väliltä:

$$\text{Osuus} = \frac{1}{1 + e^{\left\{ b_0 + b_1 \left(\frac{V_i}{N_i} \right)^{b_2} \right\}}}$$

jossa

V_i = puulajin tilavuus iällä t,
 N_i = puulajin runkoluku iällä t ja
 b_0, b_1, b_2 = yhtälön parametreja.

Mallin perusmuoto on perinteinen logistinen yhtälö. Parametri b_2 lisättiin, jotta malli saisi enemmän joustavuutta. Mallit estimoitiiin suoraan esitetystä muodosta linearisoimatta niitä. Epälineaarista regressioanalyysiä käytettiin sen vuoksi, että em. yhtälömuotoa ei voida saattaa kokonaan lineaariseksi muunnoksilla. Samalla vältettiin linearisointiin liittyvästä logaritmuunnoksesta aiheutuvat ongelmat vakiotermin korjauksen määrittämisessä.

Käytetyn mallin ominaisuus on, että varianssi ei ole homogeeninen selitettävän muuttujan suhteen. Varianssin homogeenoiseksi laskettiin havaintokohtaiset painot (w_i) iteratiivisesti selitettävän muuttujan ennustetun arvon (y_i) perusteella ($w_i = 1/(y_i(1 - y_i))$) (ks. esim. Draper ja Smith 1981, s. 238). Yhtälöiden kertointen ja keskivirheiden estimaattien arvot ilmenevät taulukosta 1. Yhtälöitä vastaavat kuvaajat on esitetty kuvissa 1 ja 2.

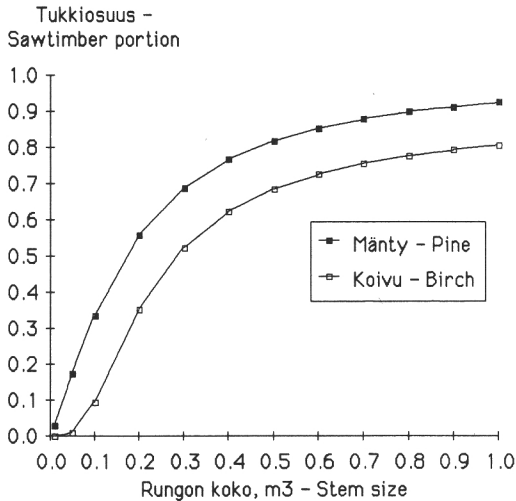
22. Hinta- ja kustannustiedot

Tämän tutkimuksen päätavoitteena on määrittää mänty-rauduskoivusekametsikön optimaalinen puulajisuhde. Tutkimus ei pyri

Taulukko 1. Tukki- ja hukkaosuusyhtälöiden kertoimet (b_i) ja kesquivirheiden (MSE) estimaatit.

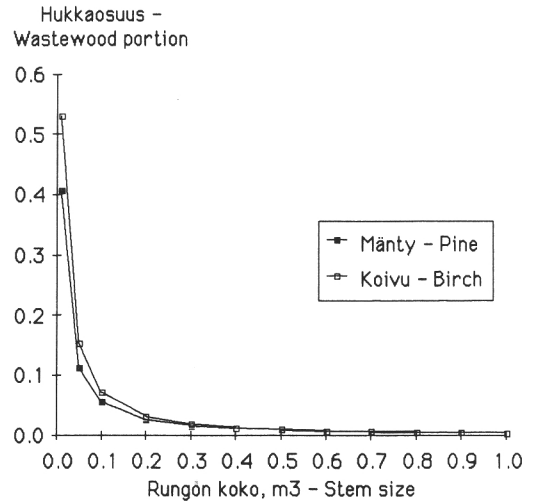
Table 1. Estimates of the coefficients (b_i) and mean squared errors (MSE) for the sawtimber and wastewood equations.

	Puulaji — species	b_0	b_1	b_2	MSE
Tukkiosuus Sawtimber portion	mänty pine	26,5087	-29,0039	0,050616	0,01453
	koivu birch	-2,76338	1,34138	-0,573641	0,06009
Hukkaosuus Wastewood portion	mänty pine	-15,6872	21,3952	0,062216	0,000156
	koivu birch	-17,8019	23,4687	0,061549	0,000304



Kuva 1. Mänty-rauduskoivusekametsikön tukkipuun osuudet puulajeittain puulajin rungon keskikoon funktiona.

Fig. 1. Sawtimber portion as a function of average stem size for mixed pine birch stands, by tree species.



Kuva 2. Mänty-rauduskoivusekametsikön hukkipuun osuudet puulajeittain puulajin rungon keskikoon funktiona.

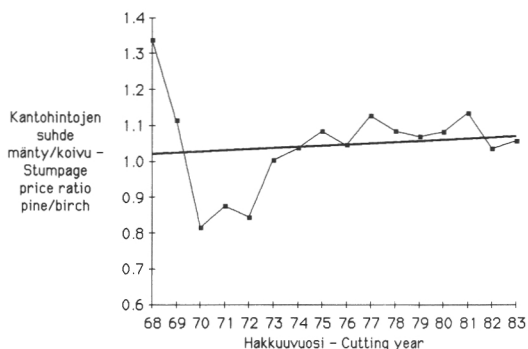
Fig. 2. Wastewood portion as a function of average stem size for mixed pine birch stands, by tree species.

selvittämään ko. metsikön kasvatuksen kannattavuuden tasoa absoluuttisesti. Käytetyt hinta- ja kustannustiedot eivät siten ole kaikki osin riittäviä laajempaa kannattavuustarkastelua ajatellen. Puulajien välinen kantohintojen suhde on keskeisin hintatekijä.

Analyysijä varten laskettiin lineaariset trendiyhtälöt männyn ja koivun kantohintojen suhteelle, tukki- ja kuitupuulle erikseen. Vuotuishavaintoina käytettiin Järvi-Suomen piirimetsälautakuntien alueiden kantohintojen aritmeettisten keskiarvojen suhteita. Järvi-Suomen piirimetsälautakunnilla tarkoitetaan tässä Itä-Hämeen, Etelä-Savon, Etelä-Karjalan, Itä-Savon, Pohjois-Savon ja Pohjois-Karjalan piirimetsälautakuntia. Aineisto

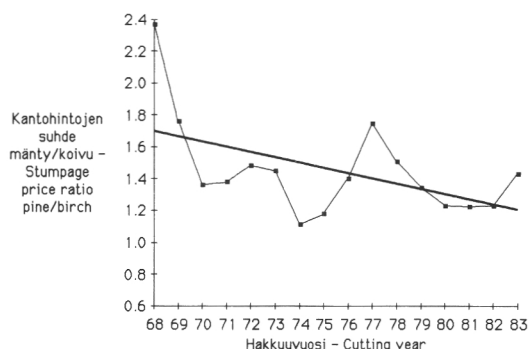
käsitti hakkuuvuosittaiset havainnot vuosilta 1968/69—1983/84 (Uusitalo 1985). Aineiston alkuvuoden myöhäisyys johtui siitä, että koivutukkipuulle ei ollut käytettävissä aiempia havaintoja.

Mäntytukkipuun hinnat tilastoititiin hakkuuvuoteen 1977/78 saakka yhdessä kuusitukkipuun kanssa havutukkipuuna. Mäntytukkipuun ja koivutukkipuun hintasuhteen kehittymistä varten aineiston ensimmäisten 10 hakkuuvuoden kohdalla oli määritettävä mäntytukkipuun kantohinnan suhde havutukkipuun kantohintaan. Tämä suhde oli edellä mainittujen piirimetsälautakuntien alueella keskimäärin 1,1 hakkuuvuosien 1978/79—1983/84 aikana. Tätä keskimää-



Kuva 3. Mäntytukkipuun ja koivutukkipuun kantohintojen suhteen kehitys hakkuuvuosina 1968/69—1983/84 Järvi-Suomen piirimetsälautakuntien alueen keskiarvoina. Lisäksi on esitetty hakkuuvuosittaisista havainnoista laskettu lineaarinen trendiyhtälö.

Fig. 3. The stumpage price ratio between pine and birch sawtimber in cutting years 1968/69—1983/84 in Eastern Finland. A linear trend equation, based on yearly observations, is included.



Kuva 4. Mäntykuitupuun ja koivukuitupuun kantohintojen suhteen kehitys hakkuuvuosina 1968/69—1983/84 Järvi-Suomen piirimetsälautakuntien alueen keskiarvoina. Lisäksi on esitetty hakkuuvuosittaisista havainnoista laskettu lineaarinen trendiyhtälö.

Fig. 4. The stumpage price ratio between pine and birch pulpwood in cutting years 1968/69—1983/84 in Eastern Finland. A linear trend equation, based on yearly observations, is included.

räislukua käytettiin muunnettaessa piirimetsälautakunnittaiset havutukin kantohinnat mäntytukin kantohinnoiksi hakkuuvuosille 1968/69—1977/78. Puulajien kantohintasuhteiden kehitys on esitetty kuvissa 3 ja 4. Lisäksi laskettiin samalle alueelle ja vastaavalle ajanjaksolle mäntytukkipuun ja -kuitupuun lineaariset trendiyhtälöt käyttäen tukkuhintojen kokonaisindeksin avulla reaalisiksi muunnettuja kantohintoja. Trendiyhtälöiden antamista arvoista hakkuuvuodelle 1983/84 laskettiin kantohinnat koivun puutavaralajeille puulajien hintasuhteiden trendiarvoja käyttäen.

Tukkipuun hintasuhte muuttui kuvatun periodin kahtena ensimmäisenä vuotena voimakkaasti koivun eduksi. Kyseisinä vuosina mäntytukkipuunkin reaalihintana nousi mutta koivutukkipuun reaalihinnan nousu oli poikkeuksellisen nopeaa. Hakkuuvuodesta 1970/71 lähtien ajanjakson loppuun asti hintasuhte on muuttunut vähitellen männyn eduksi. Suurin muutos tapahtui hakkuuvuodesta 1972/73 hakkuuvuoteen 1973/74. Tässä korkeasuhdanteessa mäntytukkipuun hinta nousi selvästi voimakkaammin kuin koivutukkipuun hinta.

Suhdannehuipun jälkeen mäntytukkipuun reaalihintana laski puoleen entisestä arvostaan hakkuuvuoteen 1977/78 mennessä. Samana jaksana koivutukkipuun reaalihintana laski suhteellisesti vielä enemmän. Hakkuuvuodesta 1977/78 aina kuvatun jakson loppuun hin-

tasuhte on muuttunut hitaasti edelleen männyn eduksi. Koivukuitupuun hinta nousi kuvatun jakson alusta hakkuuvuoteen 1974/75 asti keskimäärin nopeammin kuin mäntykuitupuun hinta. Koivukuitupuun kysyntä vahvistui selluloosateollisuuden prosessien muuttumisen myötä.

Piirimetsälautakunnittaisten keskihintojen mukaan koivutukkipuun hinta on tarkastellulla alueella ollut korkeampi kuin mäntytukkipuun hinta viimeksi hakkuuvuonna 1976/77, tuolloin Etelä- ja Itä-Savon piirimetsälautakunnissa. Viime vuosien kehityksen mukaan on todennäköistä, että männyn kantohinnat säilyvät koivun kantohintoja korkeampina ainakin lähivuosina.

Puulajien hintasuhteiden (mänty/koivu) trendiarvot hakkuuvuodelle 1983/84 olivat tukkipuulle 1,072 ja kuitupuulle 1,203. Puutavaralajeittaisiksi kantohinnoiksi hakkuuvuodelle 1983/84 saatiin siten seuraavat:

Puutavaralaji	mk/m ³	%
mäntytukkipuu	203,59	100
koivutukkipuu	189,92	93
mäntykuitupuun	91,71	45
koivukuitupuun	76,23	37

Edellä olevia puulajien hintoja ja hintasuhteita nimitetään normaaliarvoiksi ("No"). Tuloksia esitetään myös kahdelle muulle hintasuhteelle, joilla yksikköhinnat ovat seuraavat:

Puutavaralaji	Hintasuhte "Ta"		Hintasuhte "Ma"	
	mk/m ³	%	mk/m ³	%
mäntytukkipuu	196,76	100	215,54	100
koivutukkipuu	196,76	100	179,62	83
mäntykuitupuu	83,97	43	95,74	44
koivukuitupuu	83,97	43	73,65	34

Kantohintasuhteen alueellisissa tarkaste- lussa (kuva 5) käytetään esimerkkinä hak- kuuvuoden 1983/84 tilastoituja arvoja (Uusi- talo 1985). Kyseisenä hakkuuvuotena Keski- ja Itä-Suomessa oli yhtenäinen alue, jossa koivutukkipuun kantohinta oli lähellä män- tytukkipuun kantohintaa (hintasuhte oli 1,06 tai pienempi). Vain maan länsirannikolla ja pohjoisosissa hintasuhte oli suurempi kuin 1,2. Trendiyhtälön antama tukkipuun hinta- suhteen arvo (1,07) hakkuuvuodelle 1983/84 vastaa keskimääräistä tilannetta valtaosassa Etelä- ja Keski-Suomea tuona hakkuuvuote- na. Männyn kannalta edullisempi hintavaih- toehto, "Mä" (hintasuhte 1,2), tarjoaa puo- lestaan esimerkin maan muissa osissa tavalli- sesta tilanteesta.

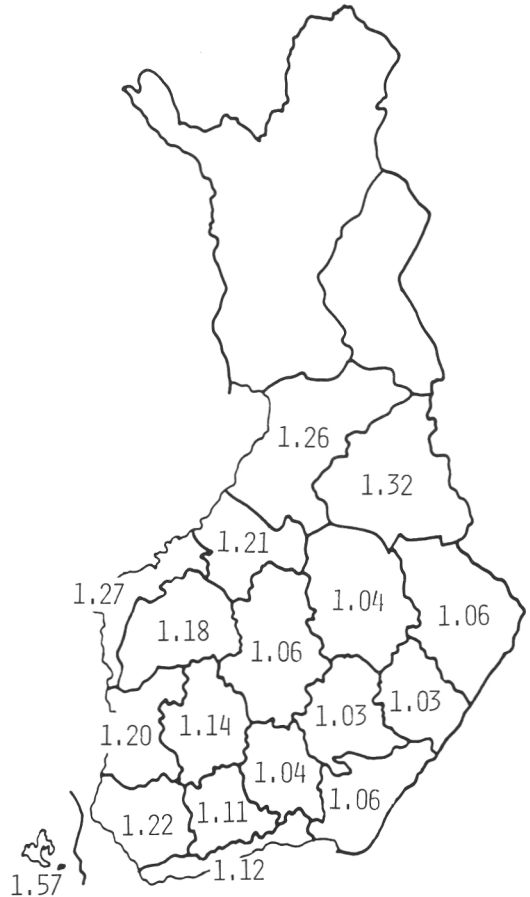
Käytetty hakkuupoistumien hinnoittelu perustuu raakapuun hintasuositussopimuk- seen hakkuuvuodelle 1983/84 (maan etelä- puolisko). Kyseisissä hintasuosituksissa oli runkojen järeyyteen perustuva yksikköhinnan korjaus vain tukkipuulla. Korjaukset olivat samanlaiset männylle ja koivulle ja ne ilme- vävät taulukosta 2.

Hehtaaria kohden poistettava puumäärä vaikuttaa yksikköhintaan kahdella tavalla: leimikon tiheyden ja koon välityksellä. Kos- ka jälkimmäisellä tekijällä on huomattava vaikutus yksikköhintaan, se haluttiin ottaa huomioon, vaikka siitä johtuva korjauksen suuruus ei ole välittömästi johdettavissa heh- taarikohtaisesta poistuman määrästä. Olet- tamalla leimikon kooksi neljä hehtaaria ja yhdistämällä mainitut kaksi tekijää saatiin taulukossa 3 esitetyt, laskelmissa käytetyt leimikon tiheydestä riippuvat yksikköhinnan korjaukset.

Taulukko 2. Järeyyteen perustuva yksikköhinnan kor- jaus.

Table 2. Stumpage price adjustment caused by average stem size.

Runkolajin käyttöosan keskijäreys, m ³ —	<0,3	<0,4	<0,5	<0,6	>0,6
Average stem size					
Korjaus, mk/m ³ —	-6	-3	0	4	8
Adjustment					



Kuva 5. Mäntytukkipuun ja koivutukkipuun kantohin- tojen suhde piirimetsälautakunnittain hakkuuvuonna 1983/84 (Uusitalo 1985).

Fig. 5. The stumpage price ratio between pine and birch sawtimber in cutting year 1983/84 by forestry board districts (Uusitalo 1985).

Taulukko 3. Leimikon tiheyteen perustuva yksikkö- hinnan korjaus.

Table 3. Stumpage price adjustment caused by the volume removed.

Leimikon tiheys, m ³ /ha - Volume removed	Korjaus, mk/m ³ - Adjustment
— 12,5	-24
12,5— 25	-18
25 — 30	-11
30 — 50	-7
50 — 60	-5
60 — 75	-2
75 —100	0
100 —125	+ 2
125 —150	+ 3
150 —175	+ 5
175 —250	+ 6
250 —	+ 8

Kun tulevat puusukupolvet otetaan huomioon, optimaalisen kiertoajan määrittäminen nykyarvomenetelmällä edellyttää, että uudistamisvaiheen kustannukset tunnetaan. Koska ei ollut käytettävissä tietoja uudistamiskustannusten ja syntyvän mänty-rauduskoivusekametsikön puulajisuhteiden välisistä riippuvuuksista, käytettiin samoja uudistamiskustannuksia kaikille puulajisuhteille. Yksikkökustannuksina käytettiin Metsätalouden vuosikirjan (Uusitalo 1985) vuoden 1983 arvoja yksityiset ym. metsänomistajaryhmälle. Kalenterivuoden 1983 arvot muunnettiin hakkuuvuoden 1983/84 arvoiksi käyttäen tukkuhintojen kokonaisindeksin kuuksiarvojen aritmeettista keskiarvoa kalenterivuodelle ja hakkuuvuodelle. Eri työlajien yksikkökustannuksiksi (mk/ha) saatiin seuraavat:

Hakkuualan raivaus	282
Maanmuokkaus	606
Istutus ja taimet	2240
Taimikonhoito	686

Koska analyysi perustui rehevähkön kasvupaikan metsiköihin, taimikonhoito oletettiin jouduttavan suoritamaan kahdesti, 2 ja 5 vuoden kuluttua päätehakuusta. Istutuksen oletettiin tapahtuvan vuoden kuluttua päätehakuusta. Kokonaiskustannukset metsänhoitotöistä olivat siten 4500 mk hehtaaria kohden kiertoajan kuluessa.

23. Optimointimenetelmän valinta

Hann ja Brodie (1980) ovat esittäneet vertailevan katsauksen metsikön ja metsälön päätöksentekongelmista ja niihin soveltuvista optimointimenetelmistä. Katsaus antaa myös läpileikkauksen Pohjois-Amerikassa aiheesta tehdyistä tutkimuksista. Dykstran (1984) oppikirjassa esitellään matemaattisen ohjelmoinnin menetelmiä ja niiden käyttöä luonnonvarojen hoidon suunnittelussa, erityisesti metsätaloudessa.

Eräissä aiemmissa optimointitutkimuksissa on havaittu, että metsiköstä saatavien nettotulojen nykyarvo ei ole kovin herkkä puus-
topääoman tai kiertoajan vaihteluille (Kilkki ja Väisänen 1969, Hann ym. 1983). Toisin sanoen optimit ovat olleet laakeita. Edelliseen perustuen simulointi saattaisi olla käytökelpoinen menetelmä sellaisten käsittelyohjelmien löytämiseen, jotka antavat lähes sa-

man taloudellisen tuloksen kuin optimikäsitely. Epävarmuus optimihakkuuohjelman luonteesta on kuitenkin tavanomaista suurempi käsillä olevassa tutkimustehtävässä, jossa tarkastellaan kahta toisiinsa vaikuttavaa puulajia. Simuloinnilla katettavien vaihtoehtojen joukko on myös monin verroin suurempi kuin yhden puulajin tapauksessa. Simulointia pidettiin näistä syistä riittämättömänä asetetun tehtävän ratkaisuuun.

Optimointimenetelmän valinnassa huomioon otettavia tekijöitä ovat mm.

- ajan ja optimointimallin tilamuuttujien jatkuvuus,
- kasvumallien sekä hinta- ja kustannusriippuvuuksien muoto ja
- tulosten muunnettavuus toimenpideohjeiksi.

Metsä ekosysteeminä muuttuu ja kehittyy jatkuvasti. Taloudellisen toiminnan kannalta on kuitenkin tarkoituksenmukaista pitää metsän kehitystä meidän ilmasto-olosuhteissamme epäjatkuvana puiden kasvun vuotuisen rytmin mukaan. Koska yksittäisten vuosien kasvut vaihtelevat sääeroista johtuen huomattavasti ja lisäksi yhden vuoden kasvun mittaaminen on epätarkkaa, metsikön kehityksen mallit laaditaan yleensä 5 vuoden jaksoille. Nämä mallit ovat siten luonteeltaan epäjatkuvia. Myös kasvatusprosessin ohjaus eli hakkuut tapahtuvat epäjatkuvasti tiettyinä ajankohtina.

Kun käytetään jatkuva-aikaista optimointia, harventaminen määritellään yleensä jatkuvana ajan funktiona. On vaikea soveltaa käytäntöön tuloksia, jotka perustuvat metsikön jatkuvaan harventamiseen. Jatkuvassa ajassa on myös mahdollista tehdä pulssimaisia harvennuksia, jolloin puumäärä vähenee yhtäkkisesti (kalastukseen liittyvistä sovelluksista ks. Clark 1976).

Optimiohjausteoria ja epälineaarinen ohjelmointi edellyttävät, että kohdefunktio ja tilayhtälöt ovat jatkuvasti derivoituvia tilamuuttujien suhteen. Tätä rajoitusta ei ole dynaamisista ohjelmointia käytettäessä, vaan muuttujien väliset riippuvuudet voivat olla esim. taulukkomuodossa. Joissain tapauksissa epäjatkuvuuden ongelma voidaan tosin kiertää approksimoimalla epäjatkuvia riippuvuuksia jatkuvilla funktioilla.

Käytettävänä olevan kasvumallin keskeinen ominaisuus optimointimenetelmän valinnan kannalta on, että puulajien osuudet kasvusta määritetään annetun taulukon perusteella. Kasvumalli ei siten täytä edellä mainittua derivoituvuuden vaatimusta. Käyt-

tökelpoiseksi optimointimenetelmäksi jäi esillä olleiden menetelmien joukosta ainoastaan dynaaminen ohjelmointi (ks. esim. Valsta 1986). Tässä tutkimuksessa kasvumalli voidaan lisäksi määritellä vain muutamien muuttujien avulla ja siten välttää dynaamisessa ohjelmoinnissa toisinaan ongelmana oleva laskentatehtävän kasvu mahdollisuuksien ulkopuolelle.

24. Dynaaminen ohjelmointi

Dykstra (1984) esittää neljä ominaisuutta tehtävälle, joka voidaan ratkaista dynaamisella ohjelmoinnilla:

1. Tehtävä voidaan jakaa vaiheisiin, joista jokaisen kohdalla tehdään valinta vaihtoehtojen välillä.
2. Jokaisessa vaiheessa on joukko vaihtoehtoisia tutkitavan systeemin tiloja.
3. Jokainen valinta kulloisessakin vaiheessa siirtää systeemin uuteen tilaan seuraavassa vaiheessa.
4. Tehtävä noudattaa optimaalisuuden periaatetta.

Käsillä olevassa ongelmassa metsikön kasvatuksen 5-vuotisjaksot muodostavat edellä määritellyt vaiheet ja jokaisessa vaiheessa tehdään hakkuuta koskeva päätös. Hakkuiden poisto- ja koivuprosentit määrittävät vertailtavat vaihtoehdot. Kunkin valinnan jälkeen metsikköä kasvatetaan 5 vuotta, mikä siirtää metsikön uuteen tilaan seuraavassa vaiheessa.

Dynaamisen ohjelmoinnin perustana on optimaalisuuden periaate, jonka on esittänyt Bellman (ks. esim. Bellman ja Dreyfus 1962, s. 15). Sen merkitys on seuraavanlainen: Kun optimaalinen reitti (metsikön kasvatusohjelma) alkutilasta tiettyyn tilaan on määritetty, jäljellä olevan matkan optimaalinen reitti voidaan määrittää erillisenä tehtävänä ja riippumattomana jo kuljetun matkan reitistä. Toisin sanoen optimiratkaisu jäljellä olevalle metsikön käsittelyohjelman osalle on sama, olipa käsillä olevaan metsikön tilaan saavutettu minkä tahansa toimenpideketjun seurauksena. Tarvittavien laskelmien määrä vähenee ratkaisevasti optimaalisuuden periaatteen ansiosta.

Jotta dynaamista ohjelmointia voidaan soveltaa, optimaalisuuden periaatteen tulee päteä tutkittavassa ilmiössä tai sitä kuvaavassa mallissa. Käytettävässä kasvuyhtälössä metsikön kehitys riippuu metsikön iästä, ti-

lavuudesta ja koivuosuudesta. Kasvu riippuu vain näiden muuttujien hetkellisistä arvoista, joiden oletetaan sisältävän myös kaiken tarvittavan informaation metsikön historiasta. Kun nämä muuttujat sisällytetään optimointimalliin, se on optimaalisuuden periaatteen mukainen.

Hakkuupoistumien hinnoittelua varten otettiin metsikön runkoluku neljänneksi muuttujaksi. Jakamalla metsikön kokonaistilavuus runkoluvulla saadaan keskirungon tilavuus, jota käytetään puutavaralajiosuuk-sien laskentaan sekä leimikkokohtaisten hintakorjausten tekoon. On huomattava, että runkolukua pienennetään harvennuksissa samassa suhteessa kuin tilavuus vähenee, toisin sanoen systemaattisen harvennuksen periaatteen mukaan. Metsikköä kuvaavat muuttujat ilmaistaan vektorimuodossa seuraavasti:

$$x_t^T \equiv (V_t, B_t, N_t)$$

jossa

- x_t = metsikön tilavektori hetkellä t ,
- V_t = metsikön runkotilavuus hetkellä t ,
- B_t = koivun osuus edellisestä hetkellä t ja
- N_t = metsikön runkoluku hetkellä t .

Käytettävissä ollut tieto ei antanut mahdollisuutta sisällyttää malliin uudistamistoimenpiteiden vaikutuksia syntyneen metsikön ominaisuuksiin. Analyysi joudutaan siten perustamaan yhteen metsikön alkutilaan, jossa tosin koivun osuuden voidaan antaa vaihdella. Samalla joudutaan olettamaan, että uudistamiskustannus on sama riippumatta tuloksena olleesta koivun osuudesta. Edelliseen perustuen uudistuskustannukset eivät vaikuta eri käsittelyvaihtoehtojen edullisuuksiin yhden kiertoajan tarkastelussa, vaan optimointi voi aluksi perustua pelkästään hakkuutulojen nykyarvoon. Metsikön käsittelyohjelman optimointiin käytetään dynaamisessa ohjelmoinnissa ns. rekursioyhtälöä, jonka avulla karsitaan epäoptimaaliset vaihtoehdot. Koska päätehakuutulot lasketaan samoin perustein kuin harvennustulot, päätehakkuu voidaan ajatella 100 prosentin harvennukseksi. Rekursioyhtälö saa siten seuraavan muodon:

$$R(x_t) = \max_{\substack{\{x_{t-1}\} \\ t = 1, \dots, T}} [H(x_t, x_{t-1}) + R(x_{t-1})]$$

jossa

$R(x_t)$ = tavoitefunktion arvo jakson t alussa metsikölle x_t ,
 $\{x_{t-1}\}$ = niiden metsiköiden joukko jakson $t - 1$ alussa, joista voi kehittyä metsikkö x_t kasvun ja mahdollisen hakkuun seurauksena,
 $H(\cdot)$ = mahdollinen diskontattu hakkuutulo, kun siirrytään metsiköstä x_{t-1} optimaalisesti metsikköön x_t ,
 $R(x_{t-1})$ = tavoitefunktion arvo jakson $t - 1$ alussa metsikölle x_{t-1} ja
 T = optimoinnin viimeinen periodi, suurin mahdollinen kiertoaika.

$$L = \frac{(NA - UK)(1 + i)^u}{(1 + i)^u - 1}$$

Kaikki optimointimallin tilamuuttujat diskreditoitiin analyysiä varten. Muuttujien luokkavälit olivat seuraavat:

Metsikön ikä (aika)	5 vuotta
Puuston tilavuus	10 m ³ /ha
Metsikön runkoluku	75 kpl/ha
Koivun osuus tilavuudesta	10 %

Kun käydään läpi jaksot 1:stä T:hen, tavoitefunktion arvoksi muodostuu diskontattujen hakkuutulojen summa kiertoaajan kuluessa. Rekursioyhtälöstä nähdään, että se on optimaalisuuden periaatteen mukainen. Jakson $t - 1$ käsittely määräytyy riippumatta siitä, miten metsikön tilaan x_{t-1} on tultu.

Optimoinnin kuluessa tallennetaan optimaaliset hakkuuohjelmat kaikille kiertoaikavaihtoehdoille. Kun oletetaan samaa hakkuuohjelmaa noudatettavan perättäisinä kiertoaikoina, ikuisuuteen ulottuvan tulo-menosarjan nykyarvo (L) eri kiertoajoille saadaan yhden kiertoaajan hakkuutulojen nykyarvon (NA) ja uudistuskustannusten (UK) perusteella seuraavalla kaavalla kiertoajalle (u) ja korkoprosentille (i):

Kullakin iänkohdalla metsiköllä oli 7 200 mahdollista tilaa, ts. tilavuuden, runkoluvun ja koivun osuuden yhdistelmää. Muuttujien luokkavälit ilmaisevat myös optimointitarkkuuden. Malli antaa globaalin optimiratkaisun niiden hakkuuohjelmien joukosta, jotka poikkeavat toisistaan vähintään luokkavälin verran.

Tyypillisessä analyysissä tehtiin 350 000 kasvuennustetta ja harvennusta. Mikäli ei olisi käytetty dynaamista ohjelmointia, vaan optimiratkaisu olisi etsitty käymällä systemaattisesti läpi kaikki mahdolliset harvennusvaihtoehdot, olisi simuloinneilla täytynyt kattaa suuruusluokkaa 10¹⁶ kiertoaajan mitaista harvennusohjelmaa.

3. TULOKSET

31. Yleistä

Optimoitaessa metsikön hakkuuohjelmaa on määriteltävä laskennan lähtötilanne, tässä tapauksessa puuston ikä, tilavuus, koivuosuus ja runkoluku. Ennustaessaan kiertoaajan tuotoksia Mielikäinen (1980) lähti liikkeelle rinnankorkeudelta 30-vuotiaista metsiköistä, mikä vastasi mäntyjen 40 vuoden biologista ikää. Verraten myöhäinen lähtötilanne oli seurausta kasvumallin laadinta-aineiston ikäjakaumasta, jossa nuorimmatkin metsiköt olivat rinnankorkeudelta yli 25-vuotiaita. Arvioitaessa koivusekoituksen vaikutusta koko kiertoaajan tuotokseen joudutaan tekemään oletuksia metsiköiden kehitymisestä laskelmien lähtötilanteeseen. Mielikäisen (mt.) laskelmissa oletettiin, että puhdas männikkö ja sekametsikkö olivat kasvaneet kiertoaajan 40 ensimmäisen vuoden kuluessa

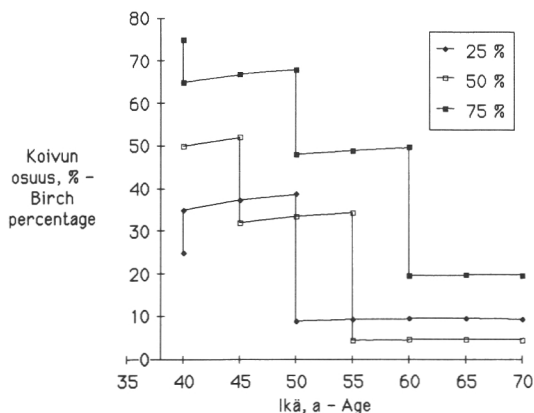
yhtä paljon. Lähtökohta on sekametsiköiden tuotoskyvyn suhteen varovainen, sillä myös mainitussa tutkimuksessa rauduskoivujen todettiin kasvaneen nuorella iällä mäntyjä nopeammin.

Edellä mainitut näkökohdat huomioon ottaen päädyttiin kahteen eri näkökulmaan taloudellisessa tarkastelussa: Ensimmäisessä päätöksenteko koskee 40-vuotiaita metsiköitä (rinnankorkeusiltään 30-vuotiaita). Lähtien eri koivuosuuksista määritettiin kullekin niistä optimaaliset hakkuuohjelmat kiertoaajan loppuosalle. Tarkastelu antaa perusteita olemassa olevien harvennusikäisten sekametsiköiden käsittelylle.

Toiseksi pyrittiin ennustamaan koko kiertoaajan kehitystä ottaen mahdollisuuksien mukaan huomioon myös ennen 40 vuoden ikää syntyneet tuotoserot. Tätä tarkastelua on pidettävä olennaisesti epävarmempana

kuin ensimmäistä ja sen tulokset ovat vain suuntaa antavia. Lähtökohdaksi otettiin 25-vuotias (rinnankorkeusiltään 15-vuotias) metsikkö. Samalla oletettiin, että puulajisuhteiltaan erilaiset metsiköt olivat kehittyneet tähän ikään mennessä samoin. Ennustettava oli 15 vuoden jakso, 40 vuoden ikään asti, joka oli kasvumallin varsinaisen soveltamisalueen ulkopuolella. Käytetylle kasvumallille on ominaista, että nuoren sekametsikön kasvu puhtaaseen männikköön verrattuna on sitä suurempi mitä nuorempi metsikkö on. Varovaisuussyistä rajoitettiin mainittu kasvu alle 40-vuotiailla metsikoilla sille tasolle, jolla se on 40 vuoden iällä.

Eri tarkasteluissa seuraavat peruspiirteet ovat yhteneviä: Metsiköt ovat yksijaksoisia mänty-rauduskoivusekametsiköitä, joissa puulajien keskipituudet ovat suunnilleen samat, joten kumpikaan puulaji ei ole etukasvuinen. Tuloksissa esiintyvä metsikön ikä on uudistamisesta kulunut aika. Vaikka Mielikäisen (1980) tutkimus koskee luonnonmetsiköitä, tässä tutkimuksessa oletetaan, että tasapuustoiset sekametsiköt joudutaan perustamaan osittain viljelemällä ja että kokonaisuudistamiskustannukset vastaavat keskimäärin täyttä metsänviljelyä. Puuston runkoluku 40 vuoden iällä on 1200 kpl/ha. Laskennan taloudelliset parametrit vaihtelevat analyysin mukaan, mutta perusvaihtoehtona on 3 prosentin korkokanta ja hintasuhde "No".



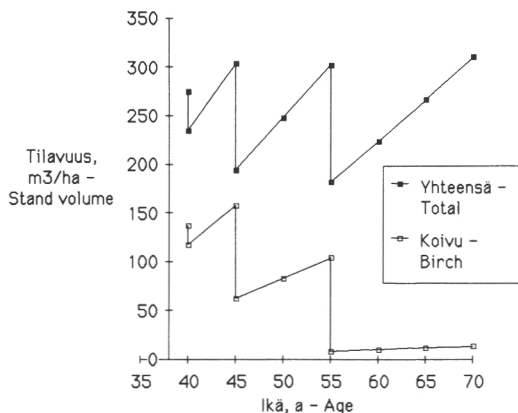
Kuva 6. Optimaalisen koivuosuuden kehitys lähtöarvoista 25, 50 ja 75 %. Hintasuhde "No", korkokanta 3 %.

Fig. 6. Optimal birch percentages, given initial values 25, 50 and 75 %. Price set "No", interest rate 3 %.

32. Optimaaliset hakkuuohjelmat 40-vuotiaalle metsiköille

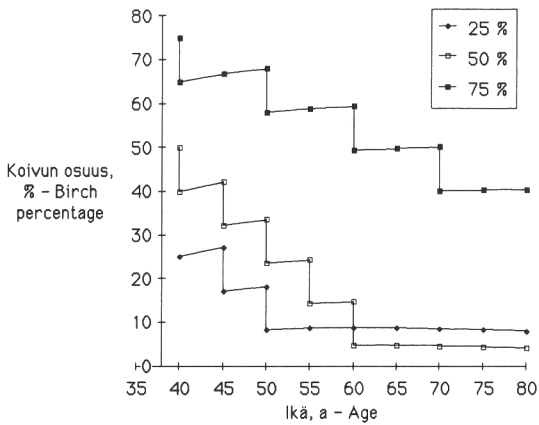
Optimaalisen koivuosuuden kehitys 40 ikävuodesta eteenpäin esimerkkinä oleville kolmelle metsiköille on esitetty kuvassa 6. Alkupuuston koivuosuus on 25, 50 tai 75 prosenttia. Yleispiirre on koivuosuuden pieneneminen kiertoajan loppua kohden. Tarkastelujakson alkuvuosina edullisin koivuosuus on 30—50 %, minkä jälkeen koivut tulee muutoinkin tehtävissä harvennuksissa poistaa. Kun koivua on runsaasti (75 %), sitä kannattaa poistaa vain sen verran kuin puustopääoman säätelyn kannalta on tarpeen. Puuston määrän vähentäminen taloudellisen optimitason alapuolelle ei ole tulosten mukaan perusteltua, vaikka se parantaisikin mäntyjen kasvua.

Harvennusohjelman vaikutus puuston tilavuuteen ilmenee esimerkinomaisesti kuvasta 7, jossa on esitetty kokonaistilavuuden ja koivun tilavuuden kehitys metsikössä, jossa oli 50 % koivua 40 vuoden iällä. Tällöin puuston tilavuus oli 275 m³/ha ja runkoluku 1200 kpl/ha. Kiertoajan kuluessa tehtiin 3 harvennusta, joista ensimmäisen yhteydessä koivun osuutta metsikössä ei vielä vähennetty. Jäljellä olleet koivut poistettiin 55 vuoden iällä kolmannessa harvennuksessa käytännöllisesti katsoen kokonaan. Kiertoajan kokonaiskasvu oli 580 m³/ha (8,3 m³/ha/v), josta koivun osuus oli 39 %.



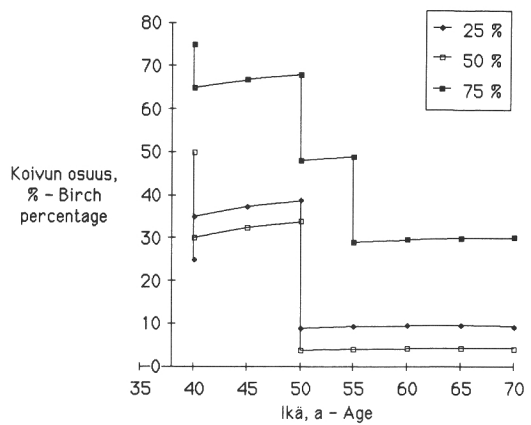
Kuva 7. Optimaalinen harvennusohjelma metsiköille, jossa on 50 %:n koivuosuus 40 vuoden iällä. Kiertoaika 70 vuotta, korkokanta 3 %.

Fig. 7. An optimal thinning schedule for a stand with 50 % birch at age 40. Rotation age 70, interest rate 3 %.



Kuva 8. Optimaaliset koivuosuudet metsänkorkkoa maksimoitaessa, kiertoaika 80 vuotta. Alkuarvot ovat 25, 50 ja 75 % 40 vuoden iällä.

Fig. 8. Birch percentage in optimal forest rent thinning regimes, rotation is 80 years. Initial values are 25, 50 and 75 %, at age 40.



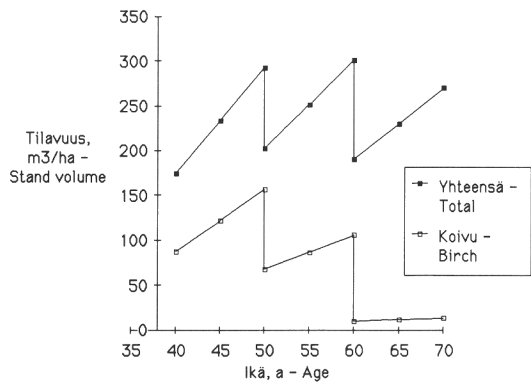
Kuva 9. Optimaalisen koivuosuuden kehitys lähtöarvoista 25, 50 ja 75 %. Hintasuhde "Mä", korkokanta 3 %.

Fig. 9. Optimal birch percentages, given initial values 25, 50 and 75 %. Price set "Mä", interest rate 3 %.

Laskentakorkokokannan alentaminen nolnaan prosenttiin johti kuvassa 8 esitettyyn tilanteeseen. Laskelma vastaa metsänkoron maksimointia, joskin optimaalinen kiertoaika olisi tällöin ollut noin 90 vuotta. Metsikköä harvennettiin 5 vuoden välein, mikä johti koivuosuuksien tasaiseen laskuun iän lisääntyessä. Harvennustuloja laskettaessa kantohintaan vaikutti kerrallaan poistettavan puumäärän suuruus. Vaikka lievät harvennukset johtivat alhaisempaan kantohintaan, niiden avulla oli kuitenkin mahdollista ylläpitää suurempaa kasvua metsikössä, mikä teki ne voimakkaampia harvennuksia edullisemmiksi. Kun kantohinnan riippuvuutta harvennuskertymästä koemielessä vahvistettiin, harvennusten välinen aika piteni ja kertapoistumat suurenivat.

Kun hintasuhdetta muutettiin männyn eduksi, hintasuhteesta "No" hintasuhteeseen "Mä" (kuva 9), koivun määrää vähennettiin 50 prosentin alkupuuston kohdalla hieman aiemmin. Muutoin käsittelyohjelmat säilyivät samanlaisina. Hintasuhteen muutos koivun eduksi siten, että molempien puulajien hinnat tulivat yhteneviksi (hintasuhteesta "No" hintasuhteeseen "Ta"), ei aiheuttanut muutoksia hakkuuohjelmiin.

Kun korkokanta oli 3 %, optimaaliset kiertoajat olivat yhden kiertoajan nykyarvon mukaan noin 90 vuotta. Ottaen huomioon tulevat, samanlaisiksi oletetut puusukupolvet optimaalinen kiertoaika lyheni 65 vuoteen.



Kuva 10. Optimaalinen harvennusohjelma metsikölle, jossa on 50 %:n koivuosuus 40 vuoden iällä. Alkutilavuus 175 m³/ha, kiertoaika 70 vuotta, korkokanta 3 %.

Fig. 10. An optimal thinning schedule for a stand with 50 % birch at age 40. Initial volume 175 m³/ha, rotation age 70, interest rate 3 %.

Kiertoajan keskimääräinen tilavuuskasvu saavutti suurimman arvonsa niinkään 65 vuoden kohdalla. Liitteessä 2 on esitetty yksityiskohtaisemmin eri koivuosuuksien antamia tuloksia 40 vuoden iältä päätehakkukseen.

Kun alkupuuston tilavuutta alennettiin tasolle 175 m³/ha (kuva 10), harvennus 40 vuoden iällä jäi pois. Koivun osuutta vähennettiin tuntuvasti kummankin harvennuksen yhteydessä niin, että päätehakkussa hakattiin puhdas männikkö.

Taulukko 4. Puuston kokonaistilavuuskasvu koivu-
osuuden eri alkuarvoille. Alkutilavuus 25 vuoden
iällä on 69,17 m³/ha.

Table 4. Cumulative growth for various initial birch
percentages. Initial stand volume is 69,17 m³/ha, at
age 25.

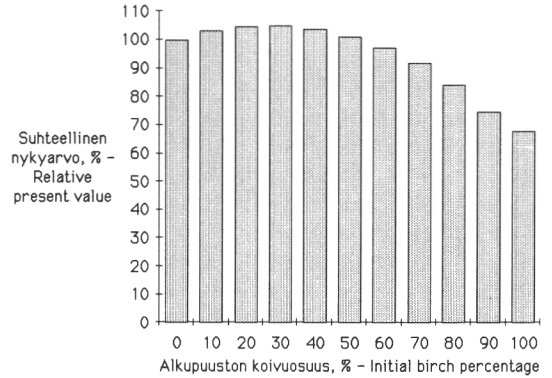
Koivuosuus, % — Birch percentage	Metsikön ikä, a — Stand age		%
	30 Puuston tilavuus m ³ /ha	40 Stand volume m ³ /ha	
0	125	250	100
10	127	260	104
30	130	271	108
50	130	274	110
70	129	266	106
90	125	251	100
100	123	240	96

33. Koko kiertoaikaa koskevat hakkuuohjelmat

Kuten jo edellä korostettiin, koko kierto-
aikaa koskeviin tuloksiin tulee suhtautua va-
rauksella, koska ne perustuvat kasvumallin
käyttöön osittain sen laadinta-aineiston ikä-
alueen ulkopuolella. Lähtien koivuosuuden
eri arvoista 25 vuoden iällä ennustettiin met-
siköiden kehitys kohdassa 31. kuvatuilla pe-
rusteilla. Puuston tilavuudeksi 25 vuoden iäl-
lä valittiin esimerkinomaisesti sellainen arvo,
että puhtaan männikön tilavuus 40 vuoden
iällä tulisi olemaan noin 250 m³/ha. Sopi-
vaksi arvoksi osoittautui 69,17 m³/ha. Puus-
ton kokonaistilavuuskasvut eri koivuosuuk-
silla muodostuivat taulukon 4 mukaisiksi.

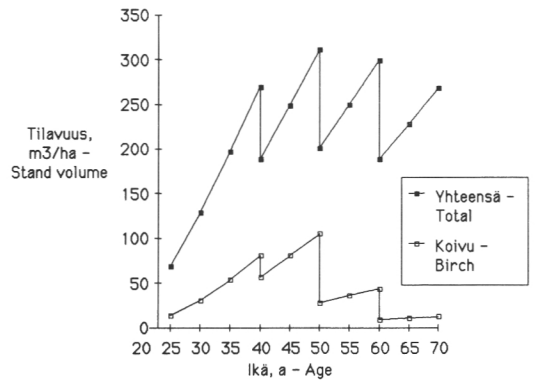
Ensimmäisten 15 vuoden aikana 50 pro-
sentin koivuosuuden metsikkö oli saavutta-
nut 10 prosentin tilavuusedun puhtaaseen
männikköön verrattuna. Esimerkiksi 80 vuo-
den kiertoajalla kokonaiskasvujen ero nyky-
arvoa maksimoivissa harvennusohjelmissa
supistui 8 prosenttiin sekametsikön tilavuus-
kasvun heikennyttyä metsikön ikääntyessä.

Kun kullekin lähtöpuuston koivuosuudelle
(25 vuoden iällä) määritettiin optimaalinen
hakkuuohjelma, saatiin kuvassa 11 esitetyt
tulokset. Suurimpaan nykyarvoon päädyttiin
lähtöpuuston 20—30 prosentin koivuosu-
udella. Paras sekametsikkövaihtoehto johti
puhtaaseen männikköön verrattuna 5 pro-
sentin etuun nykyarvoilla mitaten (kuva 11).
Puhdas koivikko sen sijaan merkitsi vastaa-
vasti 32 prosentin tappiota. Merkillä panta-
vaa on myös, että vielä lähtöpuuston 50 pro-



Kuva 11. Lähtöpuuston koivuosuuden vaikutus opti-
maalisiin nykyarvoihin, korkokanta 3 %.

Fig. 11. The effect of initial birch percentage on optimal
present values, interest rate 3 %.

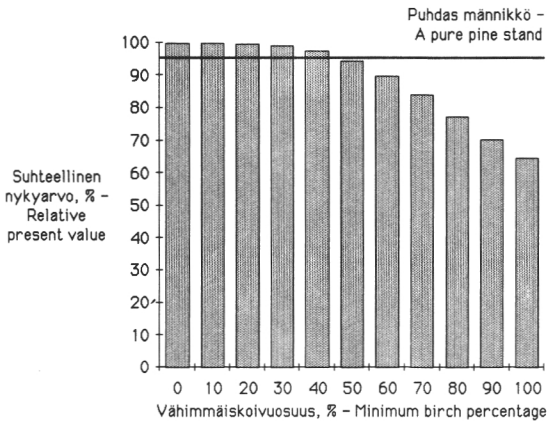


Kuva 12. Optimaalinen hakkuuohjelma 3 prosentin
korkokannalla.

Fig. 12. The optimal harvest schedule for 3 percent
interest rate.

sentin koivuosuudella saatiin nykyarvolla mi-
taten yhtä hyvä tulos kuin puhtaassa männi-
kössä. Tulosten yleispiirre oli, että sekamet-
sikkövaihtoehto oli puhdasta männikköä
edullisempi silloin, kun mäntyjä oli metsikö-
ssä vähintään niin paljon, että harvennusten
avulla päästiin likimain puhtaaseen männi-
köön ennen pätehakkuuikää, ilman että
jouduttiin alentamaan puustopääomaa alle
optimaalisen tason.

Optimaalinen hakkuuohjelma 25 vuoden
iält 70 vuoden kiertoajan loppuun on esitet-
ty kuvassa 12. Kyseessä on myös alkupuus-
ton koivuosuuden suhteen optimaalinen hak-
kuuohjelma. Kiertoajan kuluessa oli opti-
maalista harventaa kolmesti — harvennus-
voimakkuudet olivat 30, 35 ja 37 prosenttia

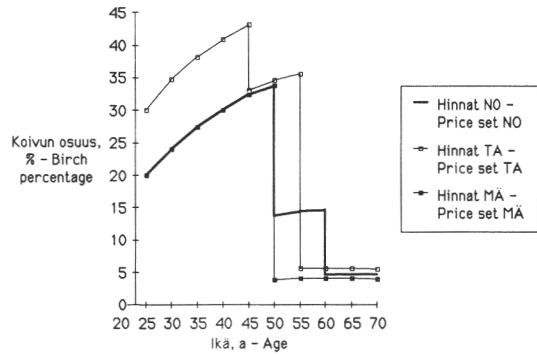


Kuva 13. Optimaaliset nykyarvot koko kiertoaajan vallitseville vähimmäiskoivuusosuuksille tilavuudesta, korkokanta 3 %. Vaakaviiva osoittaa puhtaan männikön antaman nykyarvon.

Fig. 13. Optimal present values for various levels of minimum birch percentage over the rotation, interest rate 3 percent. The horizontal line indicates the present value of a pure pine stand.

tilavuudesta laskettuna. Koivuusuuden annettiin lisääntyä rauduskoivun nopean kasvun myötä alkuarvostaan (20 %) 50 vuoden iälle asti, jolloin osuutta alennettiin 34 prosentista 14 prosenttiin ja 60 vuoden iällä edelleen 15 prosentista 5 prosenttiin. Puuston hehtaarikohtainen runkoluku aleni lähtöpuuston 1200 rungosta päätehakuupuuston 345 runkoon.

Sekametsikön käsittelyä saatettaisiin moninaiskäytöllisistä tai ekologisista syistä rajoittaa siten, että tietty vähimmäisosuus puustosta tulee olla koivua läpi kiertoaajan. Tällaisen rajoituksen vaikutus sekametsikön antamaan nykyarvoon ilmenee kuvasta 13. Rauduskoivun osuutta läpi kiertoaajan voitiin nostaa 30 prosenttiin tappion ylittämättä yh-



Kuva 14. Optimaalinen rauduskoivuusosuus eri hintavaihtoehdoilla, korkokanta 3 %.

Fig. 14. Optimal birch percentages under various stumpage price sets, interest rate 3 %.

tä prosenttia nykyarvosta. Kun koivuusosuus nostettiin puoleen, tappio kasvoi 5,5 prosenttiin. Näissä luvuissa vertailukohtana on parhaan sekametsikön antama nykyarvo. Puhtaaseen männikköön verrattaessa koivuusosuus oli nostettava 50 prosenttiin, ennen kuin menetyksiä alkoi syntyä.

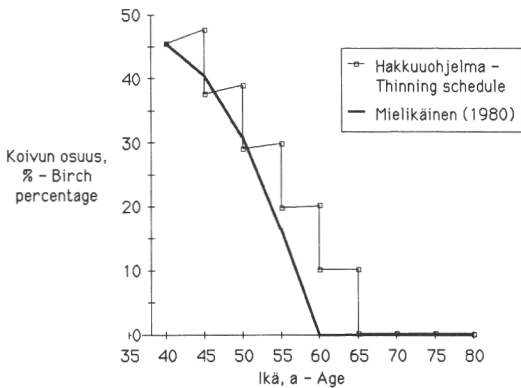
Puulajien kantohintasuhteen vaihtelun vaikutus optimaaliseen koivuusuuteen ilmenee kuvasta 14. Kantohintojen saattaminen puulajeittain samalle tasolle (Hinnat "Ta") nosti odotetusti optimaalista koivuusuutta. Koivut oli kuitenkin edullista poistaa 55 vuoden iällä mäntyjen myöhemmällä iällä voimakkaamman kasvun ja korkeamman tukkipuuprosentin vuoksi.

Kun tukkipuun hintasuhte nostettiin 1,2:een ja kuitupuun hintasuhte 1,3:een (hinnat "Mä"), optimaalinen koivuusosuus säilyi pääosin muuttumattomana perusarvoihin verrattuna. Koivut poistettiin kokonaan 50 vuoden iällä, mutta muuten hakkuuohjelma vastasi hintasuhteella "No" saatua tulosta.

4. TARKASTELU

Saatujen tuloksien tarkastelua vaikeuttaa aiempien vertailukelpoisten tutkimusten vähäisyys. Tarkastelu painottuu sen vuoksi optimointimallin taustatekijöiden muutosten analysointiin. Siten saadaan viitteitä optimiratkaisun herkkyydestä eri lähtökohtaolettamusten muutoksille sekä sovellettavuudesta toisiin olosuhteisiin.

Tässä tutkimuksessa on käytetty Mielikäisen (1980) laatimaa kasvumallia. Tilavuuskasvua maksimoivan kasvatusohjelman koivuusuudet approksimoivat hyvin niitä Mielikäisen (mt.) esittämiä koivuusuuden arvoja, jotka antoivat suurimman tilavuuskasvun kullakin iänkohdalla (kuva 15). Koska koivuusuutta voitiin muuttaa harvennuksissa



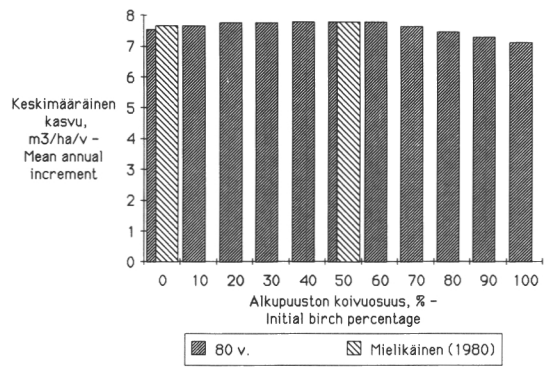
Kuva 15. Suurimman tilavuuskasvun antavat koivuosuudet tilavuuskasvun suhteen optimaalisen hakkuuohjelman ja kasvuyhtälön mukaan.

Fig. 15. The birch percentage yielding maximum volume growth, by the optimal M.A.I. thinning schedule, and based on the growth equation.

vain 10 prosenttiyksikön välein, hakkuuohjelma ei pysty tarkasti seuraamaan suurimman kasvun koivuosuuksia.

Olettaen tilavuuskasvuksi 40 vuoden ikään mennessä $275 \text{ m}^3/\text{ha}$ saatiin kuvassa 16 esitetyt kiertoajan keskimääräisen kasvun arvot eri alkupuuston koivuosuuksille. Vertailuna kuvaan on sijoitettu myös Mielikäisen (1980) esittämät keskikasvun arvot puhtaalle männikölle ja yhdelle sekametsikön kasvatusohjelmalle. Tutkimuksessa saadut keskimääräisen kasvun arvot vastaavat hyvin Mielikäisen (mt.) esittämiä tuloksia. Suurimmat arvot 80 vuoden kiertoajalla ($7,82 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{v}$) saatiin 30—40 prosentin koivuosuudella alkupuustosta. Suotuisin sekametsikkövaihtoehto antoi 3,6 prosenttia suuremman keskimääräisen kasvun kuin puhdas männikkö 40 ja 80 ikävuoden välisenä aikana. Jos vertailun lähtökohdaksi on 25 vuoden ikäinen metsikkö, puhtaan männikön ja sekametsikön välille syntyy suurempi ero pidemmästä kasvujaksosta johtuen. Saatuja kasvuennusteita alle 40-vuotiaille sekametsiköille ei voida kuitenkaan pitää yhtä luotettavina kuin sitä vanhempien metsiköiden kohdalla.

Ruotsalaiset tilavuuskasvua koskeneet tutkimukset tukevat osittain Mielikäisen (1980) saamia tuloksia. Agestamin (1985) esimerkiksiimuloinnissa mänty-koivusekametsikkö antoi 3 prosentin tuotoslisän puhtaaseen männikköön verrattuna 73 vuoden kiertoajalla. Kiertoaika pidennettäessä tuotosetupieni ja kääntyi tuotostappioksi 100 vuoden kiertoaikaan mennessä.



Kuva 16. Kiertoajan keskimääräinen kasvu alkupuuston eri koivuosuuksilla nykyarvon suhteen optimaalisissa hakkuuohjelmissa 80 vuoden kiertoajalla.

Fig. 16. Mean annual increment in relation to initial birch percentage, based on optimal present value thinning schedules with 80 year rotation.

Ekön (1985) mukaan vastaavan sekametsikön kasvu oli tilanteesta riippuen joko pienempi tai suurempi kuin puhtaan männikön kasvu. Tulokset olivat sikäli odottamattomia, että kiertoajan pidentäessä sekametsikön kasvu lisääntyi suhteessa puhtaan männikön kasvuun päinvastoin kuin Mielikäisen (1980) ja Agestamin (1985) tulosten mukaan.

Tukkipuu- ja hukkapuuyhtälöt estimoitii tätä tutkimusta varten Mielikäisen (1980) koala-aineistoon perustuen. Puutavaralajiosuudet oli arvioitu pystyjuusta, mikä oli saattanut johtaa tukkipuun määrän yliarvioihin. Männyn kohdalla oli niukasti havainoja sellaisista metsiköistä, joissa oli pieni rungon keskikoko ja alhainen tukkipuuosuus. Tältä osin yhtälöiden luotettavuus on heikompi. Toisaalta harvennuksia ei juurikaan vielä tehty kyseisillä rungon keskikoon arvoilla. Yhtälöitä ei ole tarkoitettu käytettäväksi puutavaralajirakenteen ennustamiseen yleisesti.

Männyn ja koivun kantohintojen suhde 1,2 (hintasuhte ”Mä”) oli vielä riittävän pieni rauduskoivun sekoituksen säilymisen kannalta. Hakkuuvuoden 1983/84 tilanteessa valtaosassa maan eteläpuoliskoa koivun kantohinta olisi keskimäärin puoltanut rauduskoivusekoitusta. Hintasuhteen ennustaminen kiertoajan mittaiselle ajanjaksolle on luonnollisesti mahdotonta, mutta käytetyillä kantohinnoilla saadut optimaaliset koivuosuudet olivat siksi pieniä, alle 50 prosenttia, että esim. siirtyminen jokseenkin puhtaaseen männikköön olisi mahdollista kesken kiertoai-

kaakin, jos hintasuhteiden muutos sitä edellyttäisi.

Tutkimuksen analyysi perustuu olettamukselle, että metsikköä kuvaavat muuttujat (ikä, tilavuus, koivuosuus ja runkoluku) sisältävät riittävästi informaatiota metsikön hakkuuohjelman optimoimiseksi. Käytettyjen muuttujien joukko on epäilemättä vajavainen. Subjektiiivisesti valittuun koela-aineistoon (Mielikäinen 1980) perustuvaan kasvuyhtälöön on suhtauduttava varauksin optimointimallin osana. Optimointimalli käy läpi monenlaisia hakkuuohjelmia, joista osa saattaa poiketa huomattavasti koemetsiköissä esiintyneestä vaihtelusta. Eri lähtökohta-olettamuksin tehdyt analyysit osoittavat, että koivuosuuden optimiratkaisu on vakaa lukuun ottamatta kantohintasuhteen aiheuttamaa selvää vaikutusta. Tähän perustuen tuloksia voidaan pitää suuntaa antavina myös olosuhteissa, joissa metsikön puustopääoma, harvennusten lukumäärä, kiertoaika, runkoluku, korkokanta tai korjuukustannukset poikkeavat tässä tutkimuksessa käytetyistä arvoista.

Muutettaessa puulajisuhdetta voimakkaasti yhdessä harvennuksessa metsikköön saattaa syntyä aukkoja, mikäli puut sijaitsevat puulajeittain ryhmittäisesti. Esitetyt tulokset

perustuvat olettamukselle, että puulajit ovat sekoittuneet tasaisesti ja että toisen puulajin poisto ei johda aukkoisuuteen. Puulajien ryhmittäisyys voidaan ottaa huomioon optimointimallissa esimerkiksi rajoittamalla puulajisuhteen säätömahdollisuutta harvennuksen yhteydessä. Tällöin puulajisuhte voi muuttua vain vähitellen ja molempia puulajeja voidaan käyttää metsikön tasaisuuden säilyttämiseksi.

Käytetty kasvumalli ja puutavaran hinnat koskevat männyn ja rauduskoivun muodostamaa tasaikäistä metsikköä. Saatuja tuloksia ei voida suoraan soveltaa mänty-hieskoivusekametsiin. Mielikäisen (1980) esittämien tulosten mukaan ainakin kivennäismailla hieskoivun optimaaliset osuudet olisivat huomattavasti pienempiä kuin nyt esitetyt rauduskoivun osuudet.

Dynaamiseen ohjelmointiin perustuva optimointimalli tarjoaa joustavan analyysikehikon. Menetelmän etu on, että mikä tahansa mallin tilamuuttujiin (metsikön ikä, puuston tilavuus, koivuosuus ja runkoluku) perustuva tuotto- tai kustannustekijä voidaan sisällyttää optimointimalliin. Myös kasvumallia koskevat muutokset ja hakkuuohjelmiin mahdollisesti liitettävät rajoitukset voidaan ottaa huomioon.

KIRJALLISUUS — REFERENCES

- Adams, D. M. & Ek, A. R. 1974. Optimizing the management of uneven-aged forest stands. *Can. J. For. Res.* 4: 274—287.
- Agestam, E. 1985. A growth simulator for mixed stands in Sweden and two examples of yield in birch-pine and birch-spruce mixed stands. *Sveriges Lantbruksuniversitet, Inst. Skogsskötsel, Rapport 14*: 235—252.
- Amidon, E. L. & Akin G. S. 1968. Dynamic programming to determine optimum levels of growing stock. *Forest Sci.* 14(3): 287—291.
- Arimizu, T. 1958. Regulation of the cut by dynamic programming. *J. Japanese Operations Res.* 1: 175—182.
- Bellman, R. E. 1954. The theory of dynamic programming. *Bull. Amer. Math. Soc.* 60: 503—516.
- 1957. *Dynamic programming*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey. 340 s.
- & Dreyfus, S. E. 1962. *Applied dynamic programming*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey. 363 s.
- Brodie, J. D., Adams, D. M. & Kao, C. 1978. Analysis of economic impacts on thinning and rotation for Douglas-fir, using dynamic programming. *Forest Sci.* 24(4): 513—522.
- Brodie, J. D. & Haight, R. G. 1985. Optimization of silvicultural investment for several types of stand projection systems. *Can. J. For. Res.* 15: 188—191.
- Brodie, J. D. & Kao, C. 1979. Optimizing thinning in Douglas-fir with three descriptor dynamic programming to account for accelerated diameter growth. *Forest Sci.* 25(4): 665—672.
- Bullard, S. H., Sherali, H. D. & Klemperer, W. D. 1985. Estimating optimal thinning and rotation for mixed-species timber stands using a random search algorithm. *Forest Sci.* 31(2): 303—315.
- Cawse, D. C., Better, D. R. & Kent, B. M. 1984. A variational solution technique for determining optimal thinning and rotational schedules. *Forest Sci.* 30(5): 793—802.
- Chappelle, D. E. & Nelson, T. C. 1964. Estimation of optimal stocking levels and rotation ages of loblolly pine. *Forest Sci.* 10(4): 471—502.
- Clark, C. W. 1976. *Mathematical bioeconomics*. Wiley, New York. 352 s.
- Darrah, G. V. & Dodds, J. W. 1967. Growing broad-leaved trees in mixture with conifers. *Forestry* 1967(2): 220—228.
- Draper, N. R. & Smith, H. 1981. *Applied regression analysis*. 2. painos. Wiley, New York. 709 s.
- Dykstra, D. P. 1984. *Mathematical programming for natural resource management*. McGraw-Hill, New

- York. 318 s.
- Einola, J. 1964. Yksityismetsätaloudelliset vaihtoehdotlaskelmat. Referat: Vergleichende Rentabilitätsberechnungen in Privatforsten. Acta For. Fenn. 77(4): 80 s.
- Ekö, P. M. 1985. En produktionsmodell för skog i Sverige, baserad på bestånd från riksskogstaxeringens provtytor. Summary: A growth simulator for Swedish forests, based on data from the national forest survey. Sveriges Lantbruksuniversitet, Inst. Skogsskötsel. Rapport 16.
- Gregory, G. R. 1972. Forest resource economics. Wiley, New York. 548 s.
- Haight, R. G. 1986. Evaluating the efficiency of even-aged and uneven-aged management: An optimal control model and its application. In press.
- , Brodie, J. D. & Adams, D. M. 1985a. Optimizing the sequence of diameter distributions and selection harvests for uneven-aged stand management. Forest Sci. 31(2): 451—462.
- , Brodie, J. D. & Dahms, W. G. 1985b. A dynamic programming algorithm for optimization of lodgepole pine management. Forest Sci. 31(2): 321—330.
- Hann, D. W. & Brodie, J. D. 1980. Even-aged management: basic managerial questions and available or potential techniques for answering them. U.S.D.A. For. Serv., Gen. Tech. Rep., INT-83. 29 s.
- Hann, D. W., Brodie, J. D. & Riitters, K. H. 1983. Optimum stand prescriptions for ponderosa pine. J. of Forestry 81(9): 595—598.
- Hari, P., Kellomäki, S., Mäkelä, A., Ilonen, P., Kanninen, M., Korpilahti, E. & Nygrén, M. 1982. Metsikön varhaiskehityksen dynamiikka. Summary: Dynamics of early development of tree stand. Acta For. Fenn. 177. 42 s.
- Hool, J. N. 1966. A dynamic programming—Markov chain approach to forest production control. Forest Sci. Monograph 12. 26 s.
- Hämäläinen, J. 1973a. Profitability comparisons in timber growing: underlying models and empirical applications. Commun. Inst. For. Fenn. 77(4). 178 s.
- 1973b. Contribution profit analysis for a fully regulated forest and its empirical application. Seloste: Normaalmetsän katetuottoanalyysi ja sen empiirinen sovellus. Commun. Inst. For. Fenn. 80(1). 47 s.
- Iivessalo, Y. 1920. Kasvu- ja tuottotaulukot Suomen eteläpuoliskon mänty-, kuusi- ja koivumetsille. Referat: Ertragstabellen für die Kiefern-, Fichten- und Birkenbestände in der Südhälfte von Finnland. Acta For. Fenn. 15(4). 94 s.
- Jääskeläinen, V. & Kuusi, K. 1974. Kvantitatiivisen suunnittelun perusteet. Weiling + Göös, Helsinki. 238 s.
- Kao, C. 1979. A study of optimal timing and intensity of silvicultural practices — commercial and pre-commercial thinning, fertilization and regeneration effort. Ph.D. thesis, College of Forestry, Oregon State Univ., Corvallis, Oregon. 219 s.
- Kilkki, P. 1971. Optimization of stand treatment based on the marginal productivity of land and growing stock. Seloste: Maan ja puuston rajatuottavuuksiin perustuva metsikön käsitellyn optimointi. Acta For. Fenn. 122. 7 s.
- 1972. Metsikön hakkuuohjelman optimointi. Julkaisussa: Harvennuspuun korjuu. Harvennuspuun korjuun koneellistamistoimikunta. Helsinki. s. 119—137.
- & Väisänen, U. 1969. Determination of the optimum cutting policy for the forest stand by means of dynamic programming. Seloste: Metsikön optimihakkuuohjelman määrittäminen dynaamisen ohjelmoinnin avulla. Acta For. Fenn. 102. 23 s.
- Lappi-Seppälä, M. 1930. Untersuchungen über die Entwicklung gleichaltriger Mischbestände aus Kiefer und Birke. Seloste: Tutkimuksia tasaikäisen mänty-koivusekametsikön kehityksestä. Metsäntutkimuslait. julk. 15(2). 241 s.
- Lembersky, M. R. & Johnson K. N. 1975. Optimal policies for managed stands: an infinite horizon Markov decision process approach. Forest Sci. 22(2): 109—122.
- Liebeneiner, E. 1958. Wirtschaftliche Begründung von Mischbeständen auf Kiefernkahlschlägen. Allg. Forstzeitschrift 13(8): 87—91.
- Mielikäinen, K. 1980. Mänty-koivusekametsiköiden rakenne ja kehitys. Summary: Structure and development of mixed pine and birch stands. Commun. Inst. For. Fenn. 99(3). 82 s.
- 1985. Koivusekoituksen vaikutus kuusikon rakenteeseen ja kehitykseen. Summary: Effect of an admixture of birch on the structure and development of Norway spruce stands. Commun. Inst. For. Fenn. 133. 79 s.
- Näslund, B. 1969. Optimal rotation and thinning. Forest Sci. 15(4): 446—451.
- Rapera, R. B. 1980. A control theory approach to uneven-aged forest management. Ph.D. thesis, University of Washington, Seattle. 218 s.
- Reich, R. & Dippon, D. R. 1986. Stand optimization under uncertainty. Proceedings from "The 1985 symposium on system analysis in forest resources", 9—11.12.1985, Athens, Georgia, USA.
- Riitters, K., Brodie, J.D. & Hann, D.W. 1982. Dynamic programming for optimization of timber production and grazing in ponderosa pine. Forest Sci. 28(3): 517—526.
- Risvand, J. 1969. Economic analysis of cutting programs applying dynamic programming. Julkaisussa: Svensrud, A. (toim.) Readings in Forest Economics. Universitetsforlaget, Oslo. s. 73—79.
- Roise, J. 1986. Diameter class optimization in even-aged stands. Proceedings from "The 1985 symposium on system analysis in forest resources", 9—11.12.1985, Athens, Georgia, USA.
- Schreuder, G. F. 1971. The simultaneous determination of optimal thinning schedule and rotation for an even-aged forest. Forest Sci. 17(3): 333—339.
- Siitonen, M. 1972. Dynaaminen malli metsikön optimihakkuuohjelman määrittämiseksi. Summary: A dynamic programming model for the determination of the optimal cutting schedule for a forest stand. Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteen laitoksen tiedonantaja 2.
- Uusitalo, M. (toim.) 1985. Metsätalastollinen vuosikirja 1984. Yearbook of forest statistics 1984. Folia For. 620. 232 s.
- Valsta, L. 1986. Optimizing stand management in two-species mixed forest stands. Paper presented in the 18th IUFRO World Congress, September 7—21, 1986, Ljubljana, Yugoslavia.
- & Brodie, J. D. 1986. An economic analysis of hardwood treatment in loblolly pine plantations — a whole rotation dynamic programming approach. Proceedings from "The 1985 symposium on system analysis in forest resources", 9—11.12.1985, Athens, Georgia, USA.

Total of 51 references

SUMMARY

Optimizing thinnings and rotation for mixed even-aged pine-birch stands

Introduction

The optimal species composition of a mixed conifer-hardwood stand is affected by several factors. It is informative to differentiate between the effects generated by the roundwood market and the effects due to nonmarket values. No attempt was made in this study to make the two groups commensurate and the analysis is limited to stumpage values. However, an analysis of the economic returns from various levels of species mixture is believed to be useful for the decision maker.

Regarding the management of mixed stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and silver birch (*Betula pendula* Roth) the prevailing perception has been that pine is more valuable than birch. Hence, a pure pine stand has been preferable to a mixed species stand. For example, in precommercial thinnings the practice has been to favor pine over birch. A recent study by Mielikäinen (1980) suggests that the volume growth of a mixed pine-birch stand is superior to that of a pure pine stand during most of the rotation. The aim of this study is to determine the financially optimal species composition in mixed, even-aged pine-birch stands.

Managing the stand is viewed as an investment, where the capital invested consists of the management costs, the merchantable growing stock, and the value of land occupied. The returns are comprised of stumpage received from pine and birch pulpwood and sawtimber. The soil expectation value of an infinite series of equal rotations is used to compare management alternatives. The analysis is subject to the usual assumptions of deterministic growth models, costs and prices, and a perfect capital market with known and time invariant interest rates.

The growth model for pine-birch stands

This work was preceded by a yield study (Mielikäinen 1980) on the structure and development of even-aged mixed stands of Scots pine and silver birch. The following volume growth model had been estimated:

$$\ln(P_v) = 7.050 - 0.8732 \ln(T_{1,3}) - 0.4187 \ln(V) \\ - 0.5154 \cdot 10^{-6} B \cdot T_{1,3}^2 - 1.403 \frac{(50 - B)^2}{T_{1,3}^3}$$

where

- P_v = volume increment in the next 5-year period, percent of the present volume,
- $T_{1,3}$ = stand age at breast height, a,
- V = stand volume, m³/ha, and
- B = birch percentage of volume.

The allocation of the predicted growth between the two species is obtained from a table, dimensioned by species composition and stand age at breast height (see Appendix 1).

The last two terms in the equation above show the effect of birch percentage on growth. The birch percentage yielding the maximum volume growth is just below 50 percent in a young stand. For older stands the percentage decreases with increasing age.

Due to the form of the growth model and the values of the parameters, volume growth is a strictly increasing function of stand volume. If the stand is left unthinned its volume increases to unrealistic levels. Based on the data set in Mielikäinen (1980) a volume limit was constructed above which growth was terminated. This caused the optimal regimes to avoid too large stand volumes. The volume limit (V_{\max} , m³/ha) was defined as a function of stand age (T):

$$V_{\max} = 273.42 + 0.9308 T.$$

Sawtimber and pulpwood were priced individually and, hence, equations were needed to predict the sawtimber and wastewood percentages of stand volume. Using nonlinear regression, maximum likelihood estimates were computed based on the data in Mielikäinen (1980). The following function form was used:

$$\text{Percentage} = \frac{1}{1 + e^{\left\{ b_0 + b_1 \frac{V_t}{N_t} + b_2 \right\}}}$$

where

- V_t = stand volume at age t ,
- N_t = number of trees at age t and
- b_0, b_1, b_2 = parameters of the equation.

The values of the parameters and the estimated mean squared errors of the equations are given in Table 1. The equations are plotted in Figs. 1 and 2.

Price and cost data

The stumpage price ratio between pine and birch is a preeminent factor of the optimal species mix. Using historical data from central and eastern Finland (Uusitalo 1985) trend equations for the price ratio were derived for sawtimber (Fig. 3) and pulpwood (Fig. 4). In addition to the normal ("No") prices given by the trend equations, two other sets of stumpage prices are used in the analysis. The relative prices and the price of pine sawtimber in each price set are:

	Stumpage price set		
	No	Ta	Mä
Pine sawtimber	100	100	100
Birch sawtimber	93	100	83
Pine pulpwood	45	43	44
Birch pulpwood	37	43	34
Pine sawtimber (FIM/m ³)	203.59	196.76	215.54

Price set "Ta" refers to a circumstance where pine and birch have equal prices. Price set "Mä" implies that pine is 20 % more valuable than birch. The price ratio is shown to have considerable geographical variation (Fig. 5).

The stumpage prices of each removal were adjusted, based on average stem size (Table 2) and volume removed (Table 3). Final harvests had the same adjustments as thinnings. Regeneration costs were assumed fixed and independent of the resulting species composition. The discounted value of the total regeneration costs amounted to 4500, 4300, and 4180 FIM/ha for 0, 3, and 5 percent interest rate, respectively.

The dynamic programming algorithm

Discrete-time, discrete-state dynamic programming was used to derive optimal thinning, rotation, and species composition regimes. The computational method resembles that of Brodie and Kao (1979). The state variables are stand volume (V), birch percentage of volume (B), and number of trees (N). The state vector at time t (x_t) is thus

$$x_t^T \equiv (V_t, B_t, N_t)$$

Because the stumpage value of a final harvest is computed like that of a thinning, the dynamic programming recursion may be formulated as a single equation. In forward recursion the optimal value function $R(x_t)$ for stand x_t at age t with a discounted thinning revenue $H(x_t, x_{t-1})$ at age t is

$$R(x_t) = \max_{\{x_{t-1}\}} [H(x_t, x_{t-1}) + R(x_{t-1})]$$

$t = 1, \dots, T$

The thinning revenue is associated with moving along the optimal path between stand x_{t-1} and stand x_t . The set $\{x_{t-1}\}$ is the set of all possible stands at age $t-1$ from which the stand x_t may be reached by first growing and then possibly thinning at age t . T denotes the last stage of optimization, the maximum rotation length. Once the recursion equation is applied to stages 1 to T the optimal value function equals the sum of discounted thinning revenues. A single rotation optimum solution is thus found for each rotation length. After the discounted regeneration cost is subtracted from the single rotation discounted value, the transformation to soil expectation value is made. Soil expectation value is then used as the final optimality criterion.

The state space was discretized with the intervals $V = 10 \text{ m}^3/\text{ha}$, $B = 10 \%$, and $N = 75 \text{ trees}/\text{ha}$. The time (stage) interval was 5 years. At each stage the

stand had potentially 7200 alternative states. A single typical optimization analysis involved 350 000 thinnings. If simulation had been used instead of dynamic programming about 10^{16} whole rotation simulations would have had to be covered to achieve the same accuracy of analysis.

Results

The first set of results was derived for 40-year-old mixed stands with varying birch percentage. The initial volume was $275 \text{ m}^3/\text{ha}$ and the number of trees 1200 per hectare. The underlying site index was 28 m, a dominant height at stand age 100. Pine and birch were assumed to be equal in height such that neither species was overtopping in the canopy.

The optimal time paths of birch percentage are seen in Fig. 6 for three different initial values (25, 50 and 75 %). At first, the optimal birch percentage is 30 to 50 percent. Later, the birches are removed in thinnings to produce a pure pine stand before the end of the rotation. However, maintaining a productive growing stock level turns out to be more important than achieving a desired species composition. A sample thinning schedule is seen in Fig. 7. More detailed results are presented in Appendix 2.

When the interest rate is lowered to zero percent several light thinnings are applied. The birch percentage is gradually adjusted (Fig. 8). The alternative stumpage price sets cause only minor changes in the optimal thinning schedules (Fig. 6 vs. Fig. 9). The effect of a decrease of the initial volume is seen in Fig. 10.

A second set of analysis is based on 25-year-old stands with varying birch percentage. The growth equation has the property that the effect of birch percentage is increased with decreasing age. Because the youngest stands in the data were more than 35 years old the growth equation would have been used outside the range of the data. For stands less than 40 years old, the influence of birch percentage on growth was restricted not to be larger than it is for 40-year-old stands. The early development of stands, using the modified growth equation, is seen in Table 4.

An optimal harvest schedule was determined for various levels of initial birch percentage. The results imply that 20–30 percent would be the most profitable starting values (Fig. 11). Both a pure pine and a pure birch stand give a lower present value than the optimal mixed stand. It is remarkable that even the 50 percent case results in a present value equal to that of a pure pine stand. A sample harvest schedule is seen in Fig. 12.

The manager might want to impose a lower limit for birch percentage because of scenic or ecological reasons. Compared to the optimal regime, up to 30 percent of volume could be birch without any noticeable loss (Fig. 13). If the comparison is made with a pure pine stand the minimum birch percentage could be raised to 50. The effect of stumpage price ratio on the optimal birch percentage is seen in Fig. 14.

The optimal birch percentage for maximizing volume production (Fig. 15) parallels the results by Mielikäinen (1980). The optimal birch percentage is initially 45, after which it gradually decreases almost to zero by the end of the rotation. Because the interval of birch percentage was 10 percent the exact zero was not reached in the thinning schedule. A comparison of mean annual increment to the results by Mielikäinen (1980) can be seen in Fig. 16.

Conclusions

Using the growth model by Mielikäinen (1980) for mixed even-aged pine-birch stands the optimal species composition, and thinning and rotation schedule was determined. The main result of this study is that a mixed stand of pine and birch is financially superior to a pure pine or birch stand. Volume maximization gave

a similar result. The optimal species composition is dependent on the stumpage price ratio between pine and birch. However, the price variation inside the potential region of mixed stand management (the southern half of the country) is not likely to alter the conclusions. The results were relatively insensitive to changes in other parameters of the analysis.

Liite 1. Männyn osuus metsikön kasvusta (Mielikäinen 1980).
Appendix 1. Pine percentage of volume growth (Mielikäinen 1980).

Männyn osuus tilavuudesta, % — Pine percentage of stand volume	Metsikön ikä, a — Stand age										
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
	Mäntyä kasvusta, % — Pine out of growth										
10	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	9
20	15	15	15	15	15	16	17	17	18	18	18
30	23	23	23	24	25	26	27	27	28	28	28
40	32	32	32	34	35	36	37	38	38	39	39
50	41	41	41	43	45	46	47	48	48	49	50
60	50	50	50	53	55	56	57	58	59	60	61
70	60	60	60	63	65	67	68	69	70	71	72
80	71	71	71	74	76	78	79	81	82	82	83
90	83	83	83	85	87	89	90	92	93	94	95

Liite 2. 40-vuotiaan alkupuuston koivuosuuden vaikutus kiertoajan kokonaisarvoihin nykyarvoa maksimoivien hakkuuohjelmien mukaan.
Appendix 2. The effect of 40-year initial birch percentage on the cumulative values of a rotation, based on thinning schedules that maximize present value.

Kiertoaika 65 v — Rotation 65 yrs

Koivuosuus	Suhteellinen nykyarvo	Kokonaistuotos	Koivua edellisestä		Keskikasvu
Birch	Relative present value	Total production	Birch out of total production		Mean ann. increment
%	%	m ³ /ha	m ³ /ha	%	m ³ /ha/v
0	100	531,59	0,00	0	8,18
10	99,2	535,26	64,06	11,97	8,23
20	98,2	535,28	120,12	22,44	8,24
30	96,9	538,88	165,91	30,79	8,29
40	95,5	538,89	191,09	35,46	8,29
50	93,9	538,95	224,38	41,63	8,29
60	92,0	537,72	277,18	51,55	8,27
70	89,5	535,06	341,33	63,79	8,23
80	86,3	523,27	399,07	76,26	8,05
90	82,4	518,29	474,29	91,51	7,97
100	78,9	504,55	504,55	100	7,76

Kiertoaika 80 v — Rotation 80 yrs

0	100	604,36	0,00	0	7,55
10	99,1	614,04	65,88	10,73	7,68
20	97,9	622,65	122,81	19,72	7,78
30	96,7	623,51	159,05	25,51	7,79
40	95,3	625,22	193,92	31,02	7,82
50	93,7	625,32	227,07	36,31	7,82
60	91,8	623,62	279,87	44,88	7,80
70	89,6	611,62	327,21	53,50	7,65
80	86,3	598,34	391,95	65,51	7,48
90	81,1	561,81	515,09	91,68	7,02
100	78,0	572,23	572,23	100	7,15

METSÄNTUTKIMUSLAITOS

THE FINNISH FOREST RESEARCH INSTITUTE

Tutkimusosastot — *Research Departments*

Maantutkimusosasto
Department of Soil Science

Suontutkimusosasto
Department of Peatland Forestry

Metsänhoidon tutkimusosasto
Department of Silviculture

Metsänjalostuksen tutkimusosasto
Department of Forest Genetics

Metsänsuojelun tutkimusosasto
Department of Forest Protection

Metsäteknologian tutkimusosasto
Department of Forest Technology

Metsänarvioimisen tutkimusosasto
Department of Forest Inventory and Yield

Metsäekonomian tutkimusosasto
Department of Forest Economics

Matemaattinen osasto
Department of Mathematics

Metsäntutkimusasemat — *Research Stations*

Parkanon tutkimusasema
Parkano Research Station
Os. — *Address:* 39700 Parkano, Finland
Puh. — *Phone:* (933) 2912

Muhoksen tutkimusasema
Muhos Research Station
Os. — *Address:* Kirkkosaarentie, 91500 Muhos, Finland
Puh. — *Phone:* (981) 431 404

Suonenjoen tutkimusasema
Suonenjoki Research Station
Os. — *Address:* 77600 Suonenjoki, Finland
Puh. — *Phone:* (979) 11 741

Punkaharjun jalostuskoegasema
Punkaharju Tree Breeding Station
Os. — *Address:* 58450 Punkaharju, Finland
Puh. — *Phone:* (957) 314 241

Ojajoen koeasema
Ojajoki Experimental Station
Os. — *Address:* 12700 Loppi, Finland
Puh. — *Phone:* (914) 40 356

Kolarin tutkimusasema
Kolari Research Station
Os. — *Address:* 95900 Kolari, Finland
Puh. — *Phone:* (9695) 61 401

Rovaniemen tutkimusasema
Rovaniemi Research Station
Os. — *Address:* Eteläranta 55
96300 Rovaniemi, Finland
Puh. — *Phone:* (960) 15 721

Joensuun tutkimusasema
Joensuu Research Station
Os. — *Address:* PL 68
80101 Joensuu, Finland
Puh. — *Phone:* (973) 28 331

Kannuksen tutkimusasema
Kannus Research Station
Os. — *Address:* PL 44
69101 Kannus, Finland
Puh. — *Phone:* (968) 71 161

Ruotsinkylän jalostuskoegasema
Ruotsinkylä Tree Breeding Station
Os. — *Address:* 01590 Maisala, Finland
Puh. — *Phone:* (90) 824 420

- No 644 Saksa, Timo: Männyn taimikoiden kehitys muokatuilla viljelyaloilla Lieksan ja Rautavaaran hoitoalueissa. The development of Scots pine plantations on prepared reforestation areas in northern Karelia in Finland.
- No 645 Sirén, Matti: Puuston vaurioituminen karsimattomien puiden ja puunosien korjuussa. Stand damage in logging of undelimited trees and tree parts.
- No 646 Kaunisto, Seppo & Tukeva, Jorma: Kasvatustiheyden vaikutus männyn istutustaimikoiden kehitykseen turvemilla. Effect of tree spacing on the development of pine plantations on peat.
- No 647 Ikäheimo, Erkki & Norokorpi, Yrjö: Perkauksen vaikutus männyn istutustaimikoiden kehitykseen, laatuun ja tuhoihin Pohjois-Suomessa. The effect of cleaning on the incidence of damage and the development and quality of Scots pine plantations in northern Finland.
- No 648 Kortesharju, Jouko: Hillan sato ja kukinta lannoitus- ja olkikatekokeissa Rovaniemen maalaiskunnassa. The yield and flowering of the cloudberry (*Rubus chamaemorus*) in fertilizer and straw mulch experiments at Rovaniemi, northern Finland.
- No 649 Valtanen, Jukka, Kuusela, Juha, Marjakangas, Arto & Huurinainen, Seppo: Eri ajankohtina istutettujen männyn ja lehtikuusen kennotaimien alkukehitys. Initial development of Scots pine and Siberian larch paperpot seedlings planted at various times.
- No 650 Ovaskainen, Ville: Funktionaalinen tulojako metsäteollisuudessa 1955—1983. Factor shares in the Finnish forest industries, 1955—1983.
- No 651 Teivainen, Terttu, Jukola-Sulonen, Eeva-Liisa & Mäenpää, Elina: Pintakasvillisuuden kemiallisen torjunnan vaikutus peltomyyräpopulaation kehitykseen. The effect of ground-vegetation suppression using herbicide on the field vole, *Microtus agrestis* (L.), population.
- No 652 Varmola, Martti & Vuokila, Erkki: Pienten mäntyjen tilavuusyhälöt ja -taulukot. Tree volume functions and tables for small-sized pines.
- No 653 Hytönen, Jyrki: Fosforilannoitelajin vaikutus vesipajun biomassatuotokseen ja ravinteiden käyttöön turpeenostosta vapautuneella suolla. Effect of some phosphorus fertilizers on the biomass production and nutrient uptake of *Salix 'Aquatica'* in a peat cut-away area.
- No 654 Nieppola, Jari: Cajanderin metsätyyppiteoria. Kirjallisuuteen perustuva tarkastelu. Cajander's theory of forest site types. Literature review.
- No 655 Kuusela, Kullervo, Mattila, Eero & Salminen, Sakari: Metsävarat piirimetsälautakunnittain Pohjois-Suomessa 1982—84. Forest resources in North Finland by Forestry Board Districts, 1982 to 1984.
- No 656 Mäkinen, Pekka: Kokokehon värinä ajettaessa maataloustraktorilla metsässä. Whole-body vibration in farm tractors driven in the forest.
- No 657 Hänninen, Riitta: Suomen sahatavaran vientikysyntä Länsi-Euroopassa vuosina 1962—1983. Demand for Finnish sawnwood exports in western Europe, 1962—1983.
- No 658 Tiihonen, Paavo: Kasvun vaihtelu Suomen pohjoispuoliskossa valtakunnan metsien 7. inventoinnin aineiston perusteella. Growth variation in North Finland according to the 7th National Forest Inventory.
- No 659 Nurmi, Juha: Chunking and chipping with conescrew chipper. Palahakkeen ja hakkeen valmistus kartioruuvihakurilla.
- No 660 Metsätilastollinen vuosikirja 1985. Yearbook of Forest Statistics 1985.
- No 661 Mattila, Eero: Lapin metsävarat osa-alueittain. Valtakunnan metsien 7. inventointi vuosina 1978 ja 1982—84. The forest resources of Finnish Lapland by sub-areas. The 7th National Forest Inventory in 1978 and 1982—84.
- No 662 Juutinen, Paavo & Varama, Martti: Ruskean mäntypistiäisen (*Neodiprion sertifer*) esiintyminen Suomessa vuosina 1966—83. Occurrence of the European pine sawfly (*Neodiprion sertifer*) in Finland during 1966—83.
- No 663 Räisänen, Hannu, Laine, Lalli, Kero, Ilkka & Kaleva, Tapio: Alustavia tutkimustuloksia hyönteis- ja sienituhon pestykarsituissa männiköissä. Preliminary study on insect and fungal damage in pruned Scots pine stands.
- No 664 Laasasenaho, Jouko & Päivinen, Risto: Kuvioittaisen arvioinnin tarkistamisesta. On the checking of inventory by compartments.
- No 665 Metsäntutkimuslaitoksen julkaisut 1985. Abstracts of publications of the Finnish Forest Research Institute, 1985.
- No 666 Valsta, Lauri: Mänty-rauduskoivusekametsikön hakkuuohjelman optimointi. Optimizing thinnings and rotation for mixed even-aged pine-birch stands.
- No 667 Lipas, Erkki: Maan ravinnetila siemenviljelyksillä. Soil fertility levels in Finnish seed orchards.
- No 668 Uusvaara, Olli: Sahanhakkeen painomittaus. Weight scaling of sawmill chips.

Metsäntutkimuslaitoksen julkaisusarjoja, Communicationes Institutii Forestalis Fenniae ja Folia Forestalia, koskevat yksittäiskappaletilaukset ja vaihtotarjoukset osoitetaan laitoksen kirjastolle. Tiedonantomisteita koskevat pyynnöt osoitetaan ao. tutkimusosastolle tai -asemalle.

Subscriptions concerning single copies of the publications, as well as exchange offers, can be addressed to the Library of the Institute.