

Dynaamiseen ohjelmointiin perustuva
viljelymetsiköiden harvennusten ja
kiertoajan optimointi

*Simultaneous optimization of thinnings and rotation
of cultivated stands using dynamic programming*

Olli Salminen

Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 480
The Finnish Forest Research Institute.
Research papers 480

METSÄNTUTKIMUSLAITOS
Kirjasto

Dynaamiseen ohjelmointiin perustuva viljelymetsiköiden harvennusten ja kiertoajan optimointi

*Simultaneous optimization of thinnings and rotation of
cultivated stands using dynamic programming*

Olli Salminen



Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 480
The Finnish Forest Research Institute.
Research papers 480

Metsien käytön tutkimusosasto
Helsinki 1993

METSÄNTUTKIMUSLAITOS
Kirjasto

Salminen, O. 1993. Dynaamiseen ohjelmointiin perustuva viljelymetsiköiden harvennusten ja kiertoajan optimointi. *Summary*: Simultaneous optimization of thinnings and rotation of cultivated stands using dynamic programming. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 480. The Finnish Forest Research Institute. Research papers 480. 48 s. ISBN 951-40-1334-4, ISSN 0358-4283.

Tutkimuksessa laaditulla dynaamisen ohjelmoinnin mallilla selvitetään taimikkovaiheen ohittaneiden viljelymetsiköiden taloudellisesti edullisimmat kasvatustiheydet ja kiertoajat. Edullisuuskriteerinä käytetään korkeimman maankoron tavoitteen mukaisesti laskettua nettotuottojen nykyarvoa. Tulokset esitetään myös suurimman keskikasvun ja korkeimman metsänkoron tavoitteille. Puuston kehityksen ennustamiseen sovelletaan metsikkötason kasvumalleja. Optimointimallin tilamuuttujina ovat puuston ikä, pohjapinta-ala ja runkoluku. Simuloidut puustot ovat tasaikäisrakenteisia yhden puulajin männiköitä, kuusikoita ja rauduskoivikoita.

Esimerkkilaskelmissa männikön ja kuusikon optimaaliset kasvatustiheydet muodostuivat huomattavasti nykykäytäntöä korkeammiksi ja taloudelliset kiertoajat lyhyemmiksi. Nykyisillä kantohintasuhteilla rauduskoivikkoa kannatti sen sijaan kasvattaa hyvinkin harvana. Esimerkkilaskelmien tulosten perusteella optimointimallin soveltamismahdollisuuksia rajoittaa käytettyjen kasvumallien kyky ennustaa luotettavasti puustojen kehitystä.

A dynamic programming algorithm based on forward recursion and neighborhood storage location method is formulated to optimize cutting regimes for Finnish even-aged Norway spruce, Scots pine and silver birch cultures. A whole-stand diameter-free type of stand development simulator is used. The state descriptors are basal area, the number of trees and age. Soil expectation value, forest rent and mean annual increment are the objectives of maximization. The influences of discount rate, stumpage prices, and growth and mortality models are studied.

The optimal growing densities of spruce and pine stands were found out to be at a much higher level and the optimal financial rotations much shorter than according to the present guidelines. The numerical results indicate that the applicability of the optimization model is restricted due to the capability of used growth models to simulate the stand development. Especially, this concerns thinning response and the growth of stands of large growing stock.

Keywords: dynamic programming, optimization, thinnings, optimal rotation, cultivated stands, *Pinus sylvestris*, *Picea abies*, *Betula verrucosa*

Julkaisija: Metsäntutkimuslaitos; hanke 3002-5.

Hyväksynyt: tutkimusjohtaja Risto Seppälä 17.12.1993

Kirjoittajan yhteystiedot: Metsäntutkimuslaitos, metsien käytön tutkimusosasto,

Author's address: The Finnish Forest Research Institute
Unioninkatu 40 A, FIN-00170 Helsinki, Finland

Myynti: Metsäntutkimuslaitos, metsien käytön tutkimusosasto

Sisällys

1	Johdanto	5
2	Optimointimalli	5
	2.1 Päätöksentekijän tavoitefunktio	5
	2.2 Metsikön kehitysmalli	8
	2.3 Tuottojen ja kustannusten hinnoitteluperusteet	11
	2.4 Optimointimenetelmä	12
3	Tulokset	16
	3.1 Viljelymännikön ja -kuusikon optimikäsittelyohjelmat	16
	3.2 Viljelykoivikon optimikäsittelyohjelmat	20
	3.3 Ad hoc –harvennusreaktiomalli	22
4	Tulosten tarkastelu	26
	Kirjallisuus – References	29
	<i>Summary</i>	33
	Liitteet – Appendices	36
	1. Lähtöpuustojen alkuarvot	36
	2. Puuston kehitys- ja puutavaralajimallit	37
	3. Metsänuudistamisketjut	
	a. Töiden tarve ja ajoittuminen	41
	b. Metsähoitotöiden yksikkökustannukset	42
	4. Hinnat	
	a. Kantohinnat	43
	b. Hankintahinnat	43
	c. Kantohintojen korjaustekijät	44
	d. Korjuukustannukset	45
	5. Dynaamisen ohjelmoinnin algoritmi	46
	6. Tavoitemuuttujien kehitys kiertoajan suhteen	
	a. Mänty	47
	b. Kuusi	48

MMK Hannu Hirvelä, professori Kari Mielikäinen, MMK Mauno Pesonen, MH Markku Siitonen ja MMT Lauri Valsta ovat tutustuneet tutkimuksen käsikirjoitukseen ja tehneet siihen arvokkaita parannusehdotuksia. Heille kaikille haluan esittää parhaimmat kiitokseni.

Joulukuu 1993

Olli Salminen

1 Johdanto

Suomessa keinollisesti uudistetun metsämaan osuus oli vuonna 1990 noin 20 % (4,2 milj. hehtaaria) metsämaan alasta. Valtaosa, noin 80 %, metsänviljelystä on tehty 1960-luvun puolivälin jälkeen. Viljellen perustetun metsämaan osuus kasvaa edelleen, sillä keinollisesti uudistetaan tällä hetkellä noin 70 % vuosittaisesta uudistamisalasta – esimerkiksi vuonna 1990 noin 120 000 hehtaaria (Aarne 1992). Suurimmillaan metsänviljelyn osuus vuosittaisesta uudistamisalasta on ollut 80–85 % vuosina 1975–83. Laatuongelmat, kalleus, asenteiden sekä raakapuun kysynnän muutokset ovat kuitenkin viime vuosina hieman vähentäneet viljelyn, erityisesti männyn istutuksen, suosiota.

Ensimmäiset viljelymetsiköt ovat saavuttaneet taloudellisen hyödyntämisen vaiheen. Taimikkovaiheen ohittaneessa puustossa keskeisimmät päätökset liittyvät kasvatustiheyden ja kiertoajan määrittämiseen. Tämän tutkimuksen tavoitteena on laatia optimointimalli viljelymetsikön harvennusten ja kiertoajan määrittämiseksi. Tutkimus rajataan vain viljelymetsiköihin, koska erilaisten perustamiskustannusten ja mahdollisten tuotoserojen vuoksi metsikön synty tapa voi vaikuttaa parhaan käsittelyohjelman valintaan ja toisaalta viljelymetsiköitä koskevia taloudellisia tutkimuksia ei ole juuri tehty.

Tutkimuksessa sovelletaan Vuokilan & Väliahon (1980) ja Oikarisen (1983) viljelymetsiköiden kasvu- ja kehitysmalleja, jolloin optimointi testaa myös näiden mallien yleistettävyyttä. Tutkittavat puustot ovat tasaikäisiä kangasmaiden yhden puulajin männiköitä, kuusikoita ja rauduskoivikoita.

2 Optimointimalli

2.1 Päätöksentekijän tavoitefunktio

Puuston käsittelyyn vaikuttavat päätöksentekijän tavoitteet, metsikön tila, puunkorjuutekniikka, kantohinnat, metsänhoitotöiden kustannukset ja yhteiskunnan asettamat rajoitukset. Rationaalisesti toimiva metsänomistaja pyrkii maksimoimaan päätöksillään metsästä saatavan hyödyn. Metsänomistajan kokeman hyödyn riippuvuus toiminnan tu-

loksista voidaan esittää hyötyfunktiona, jonka ratkaiseminen matemaattisesti edellyttää kaikkien tavoitteiden, niihin liittyvien preferenssien ja rajoitusten kvantitatiivista määrittelyä (Steuer 1986). Yleistä kaikille päätöksentekijöille yhteistä hyötyfunktiota ei kuitenkaan ole, mutta jos oletetaan hyötyfunktion olevan summautuva, niin tarkasteltavaan toimintoon kohdistuvat yksittäiset tavoitteet on mahdollista erottaa ja muotoilla kunkin tavoitteen toteutumista kuvaavaksi yleistettäväksi osittaishyötyfunktioksi. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan vain puunkasvatukseen kohdistuvia taloudellisia tavoitteita. Vertailun vuoksi tulokset esitetään myös suurimman keskikasvun tavoitteelle.

Metsänkäsittelevä vaihtoehtojen edullisuutta voidaan tutkia joko yhden metsikön tasolla muista metsiköistä ja metsänomistajan kokonaistaloudesta riippumatta tai metsälötasolla, jolloin em. seikat ovat mukana vaihtoehtojen paremmuutta arvioitaessa. Toimenpiteet kohdistuvat molemmilla tapauksissa yksittäiseen metsikköön. Metsälötason tulokset ovat metsälöiden erilaisen rakenteen, metsänomistajien tavoitteiden ja taloudellisen tilanteen eroista johtuen pitkälti tapauskohtaisia. Tässä tutkimuksessa pitäydytään vain metsikkötason laskelmiin. Metsiköittäiset optimit yhdistämällä saadaan metsälötason optimi silloin, kun metsälötasolla ei aseteta rajoituksia esim. hakkuumäärien tai hakkuiden ajoittumisen suhteen eikä toimintojen keskittämisestä, esim. leimikkokeskityksistä, saatavia suuruushyötyjä oteta huomioon.

Taloudellisesti edullisimman metsikön kasvatustiheyden ja kiertoajan määrittämistä voidaan tarkastella investointiongelmana, jossa investointiin sidottu pääoma koostuu uudistamiskustannuksista, markkinakelpoisen puuston arvosta ja metsän kasvuun käytetyn maan arvosta (Samuelson 1976). Puuston tuottoarvo aikahorisontin rajalla on myös otettava huomioon. Tämä arvostusongelma häviää, jos tarkasteluhorisontti ulotetaan äärettömyyteen. Keltikangas (1971) on tosin esittänyt yksittäisen metsänomistajan rationaalisen aikahorisontin olevan pisimmillään noin 30 vuotta, koska aikahorisontin pidentyessä epävarmuus talouden ja kasvun osatekijöistä kasvaa. Käytännössä puunkasvatukseen liittyvien päätösten aikahorisontti lähestyy kuitenkin ääretöntä, sillä esim. uudistamisen yhteydessä tehtävät valinnat vaikuttavat seuraaviin puusukupolviin ja päätöksentekijät pyrkivät myös huolehtimaan omien jälkeläistensä hyvinvoinnista (perinnönjättömotiivi).

Puuston käsittelyvaihtoehtojen seuraukset voivat poiketa sekä ajallisesti että määrällisesti, joten eri ajankohtiin sattuvat tulo- ja menotahtumat on yhteismitallistettava. Taloudellisissa laskelmissa tämä tahtuu laskentakorkoa käyttäen. Laskentakorko määräytyy päätöksen-

tekijän eri ajankohtien tulonkäytön arvostuksen (subjektiivinen aika-preferenssi), päätöksentekijän investoinnille asetettaman tuottovaa-
timuksen sekä vaihtoehtoisista sijoituksista saatavan tuoton perusteella
(Honko 1973). Metsätaloudellisissa edullisuuslaskelmissa on yleensä
käytetty 1–5 prosentin reaalisia laskentakorkokantoja, kun pitkäjänteis-
ten sijoitusten reaalityttö Suomessa on ollut keskimäärin kaksi pro-
senttia (Saario 1991).

Päätöksentekijän tavoitefunktio muotoiltiin korkeimman maankoron
tavoitteen mukaisesti (Faustmann 1849) laskettuna nettotuottojen ny-
kyarvona. Faustmannin maanarvon laskentamallin on osoitettu (esim.
Johansson & Löfgren 1985) käsittelevän puunkasvatuksen investoin-
tiongelmaa teoreettisesti oikein, koska se ottaa huomioon myös puus-
ton ja puunkasvatuksen käytetyn maan arvon. Faustmannin malli läh-
tee paljaan maan metsittämisestä ja sen tavoitteena on löytää metsikön
kiertoaika, jota noudattaen ikuisuuteen asti ulottuvien samanlaisina
toistuvien puusukupolvien nettotuottojen nykyarvo maksimoituu [2.1].

$$\max_{T,m} U_{SEV} = \frac{\sum_{t=0}^T R_t^m (1+i)^{T-t}}{(1+i)^T - 1} \quad [2.1]$$

jossa

U_{SEV} = korkeimman maankoron tavoitteen mukaisesti laskettu
nettotuottojen nykyarvo

t = aika

T = kiertoaika

R_t^m = puunkasvatuksen nettotuotot hetkellä t toimintavaih-
toehdolla m

= $pQ_t^m - C_t^m$, jossa p on kantohinta, Q myyty puu -
määrä ja C puunkasvatuksen kustannukset

i = laskentakorkokanta (% / 100)

2.2 Metsikön kehitysmalli

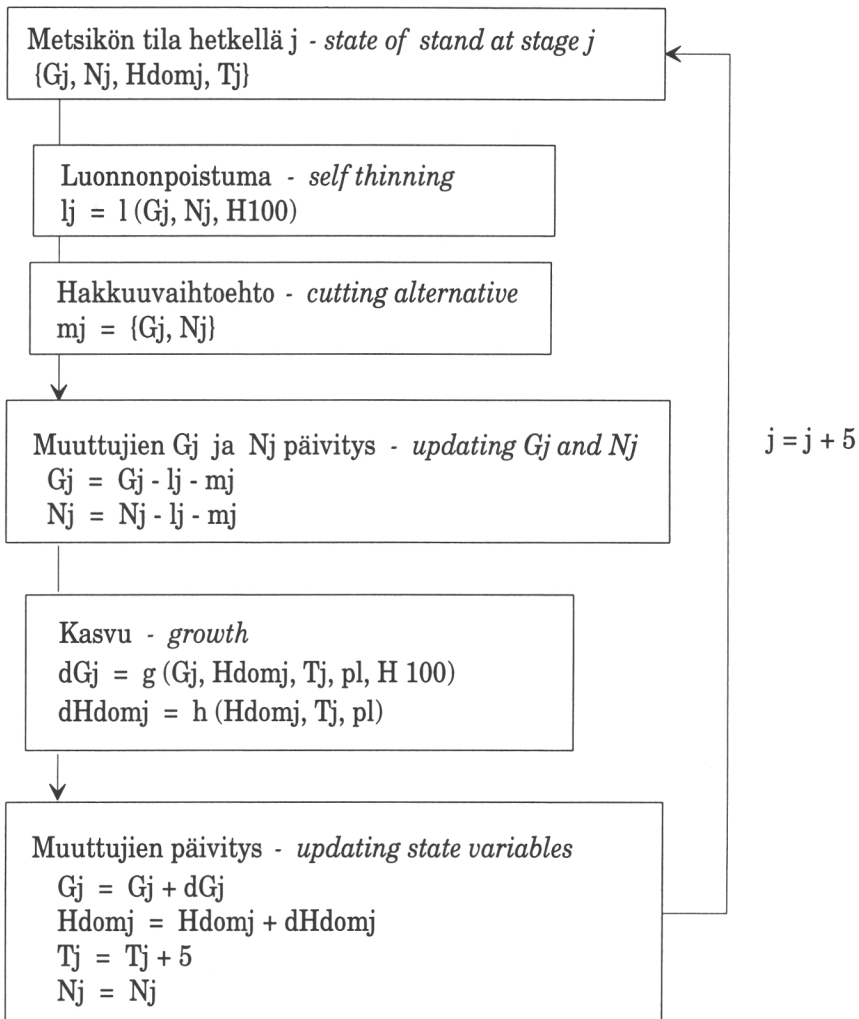
Käsittelyvaihtoehtojen vertailua varten koostettiin olemassa olevien kasvumallien pohjalta puuston kehitystä ennustava malli. Metsikön tila kuvattiin pohjapinta-alan (G), runkoluvun (N), valtapituuden (H_{dom}) ja iän (T) avulla. Muut keskeiset metsikköä kuvaavat muuttujat olivat puulaji (pl) ja kasvupaikka H₁₀₀ tai H₅₀-valtapituusboniteettina. Tila-muuttujien kehitykseen vaikuttivat kasvu (dG, dH_{dom}) ja luonnonpoistuma (I_j) sekä metsikössä tehtävät toimenpiteet (m_j), joita olivat pääte-hakkuu, harvennukset ja lepo (kuva 1). Puuston kehityksen simulointi eteni kasvumallien mukaisesti viiden vuoden jaksoissa.

Päätehakkuu oli aina avohakkuu, joten tutkimuksessa ei puututtu uudistamismenetelmän valinnan ongelmaan, vaan uudistaminen tapahtui aina viljellen. Puusto oli mahdollista uudistaa kunkin jakson alussa maksimikiertoajan ollessa 120 vuotta. Harvennukset tapahtuivat myös jaksojen alusssa. Puuston valtapituus ei muuttunut harvennuksissa. Ensimmäinen harvennus oli mahdollista tehdä runkolukuun perustuen; muut harvennukset tehtiin pohjapinta-alaan perustuen. Harvennuksia vastaavat pohjapinta-alan ja runkoluvun poistoprosentit saatiin männiköille ja kuusikoille Vuokilan & Väliahon (1980) tutkimuksesta. Rauduskoivikon harvennukset olivat mekaanisia, ts. ne kohdistuivat tasaisesti koko puustoon.

Runkolukuun perustuvat harvennusvaihtoehdot muodostuivat 50 puun luokista (50, 100, 150, ..., N_{max}) ja pohjapinta-alaharvennukset 1 m² luokista (1, 2, 3, ..., G_{max}). Minimiharvennus oli siten joko 50 runkoa tai 1 m²/ha, mikäli 20 m³ minipoistumarajoite ylittyi. ”Maksimiharvennus” oli avohakkuu. Erilaisia vaihtoehtoisia kasvatusketjuja muodostui puulajista, kasvupaikasta ja maksimoitavasta tavoitteesta riippuen 150 000–300 000 kappaletta.

Viljelymänniköiden ja -kuusikoiden pohjapinta-alan ja valtapituuden kasvun ennustamiseen käytettiin Vuokilan & Väliahon (1980) malleja (liite 2) ja rauduskoivulle sovellettiin Oikarisen (1983) tilavuuden ja valtapituuden kasvumalleja (liite 2). Männyn ja kuusen pohjapinta-alan kasvumallit perustuvat kuorettomiin arvoihin. Tarvittavat kuorimuunokset tehtiin Vuokilan & Väliahon (1980) kuoriyhtälöillä.

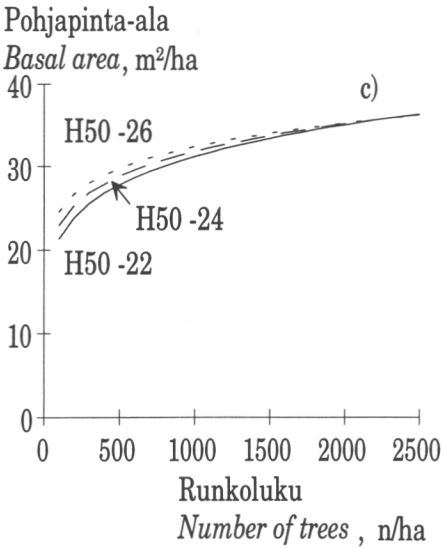
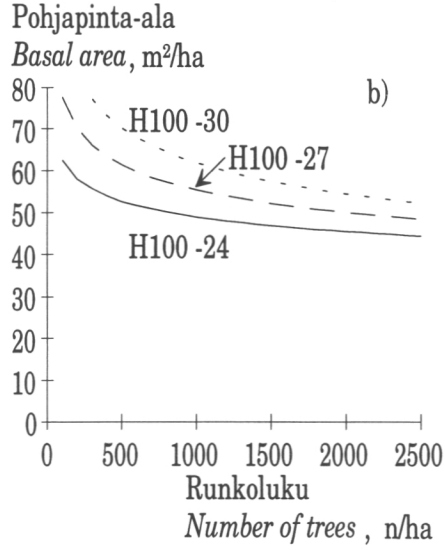
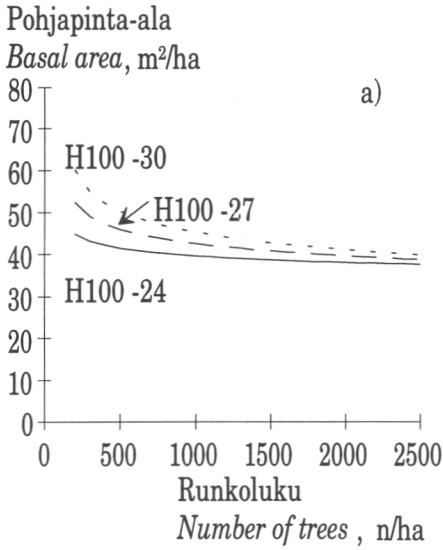
Puuston ylitiheydestä aiheutuvan luonnonpoistuman määrittämiseen sovellettiin Hynysen (1991) laatimia itseharvenemisyhtälöitä (liite 2, kuva 2). Puuston tilajärjestyksestä ja sinä tapahtuvien muutosten vaikutusta latvuksen kuntoon ei voitu ottaa huomioon, kuten ei myöskään satunnaista, luonnonolosuhteiden esim. myrskyn tai lumen aiheuttamaa kuolleisuutta, koska niille ei ollut käytettävissä metsikkötason malleja.



Kuva 1. Metsikön kehityksen simuloinnin periaate
(selitykset ks. teksti 2.2).

Fig. 1. The flow chart of stand simulation
(symbols, see app. 1 and 2).

Uuden puusukupolven perustamiseen ja vakiintumiseen liittyy lukuisia tekijöitä, joiden pitäisi sisältyä puuston kehitystä ennustavaan malliin, koska tutkimus perustuu korkeimman maankoron laskentaan. Taimikkovaiheen kehitystä ja siihen liittyviä toimenpiteitä edellä mainitut kasvumallit eivät kuitenkaan tunne, sillä niiden sovellusalue alkaa vasta puuston valtapituuden ollessa 5–7 metriä ja iän 15–40 vuotta. Kasvumallien alkuarvoihin (liite 1) oletettiin päästävän sovelta-



a) Mänty - Scots pine

b) Kuusi - Norway spruce

c) Rauduskoivu - Silver birch

Kuva 2. Hynysen (1991) mallien mukaan lasketut puuston itseharvenemisrajat pohjapinta-alan ja runkoluvun suhteen.

Fig. 2. The self-thinning curves as a function of basal area and number of trees calculated according to the formulas of Hynynen (1991).

malla Tehdaspuu Oy:n uudistamisala-aineistosta muodostettuja keskimääräisiä metsätyyppittäisiä uudistamisketjuja (liite 3a). Näiden käyttö on perusteltua siksi, että töiden tarve vaihtelee uudistusaloittain samalla metsätyyppillä ja samaa uudistamismenetelmääkin käyttäen varsin

paljon, sillä kasvupaikan luonnonolosuhteet, kuten ilmasto ja maaperä sekä päätöksentekijän aikaisemmat toimet vaikuttavat ratkaisevasti esimerkiksi raivauksen, maanmuokkauksen ja taimikonhoidon tarpeisiin. Tehdaspuu Oy:stä kerätty aineisto (Hämäläinen & Salminen 1984) käsittää vain männyn ja kuusen uudistusalat. Rauduskoivun keinolliseen uudistamiseen liittyvät työt on muodostettu männyn uudistamisketjujen perusteella.

2.3 Tuottojen ja kustannusten hinnoitteluperusteet

Taloudellisen tuloksen laskemiseksi on määriteltävä kunkin käsittelyvaihtoehdon tuotot ja kustannukset. Puukauppatapana tutkimuksessa käytettiin pystykauppaa. Tällöin puunkasvatuksen tuotot muodostuvat vain puun mynnistä saatavista kantorahatuloista ja kustannukset uuden puusukupolven aikaansaamiseen uhratuista panoksista.

Hakkuupoistuman hinnoittamiseksi poistettavan puuston tilavuus laskettiin pohjapinta-alan, valtapituuden ja muotoluvun tulona. Muotolukuyhtälöt saatiin Vuokilan & Väliahon (1980) sekä Oikarisen (1983) tutkimuksista (liite 2). Järeissä kuusikoissa muotoluku muodostui sitä paremmaksi mitä pienempi metsikön runkoluku ja pohjapinta-ala olivat. Kuusen muotolukumalliin jouduttiin asetettamaan rajoitus, koska muuten järeitä kuusikoita kasvatettiin erittäin harvoina kiertoaikaa pitkittäen.

Poistettavan puuston puutavaralajijakaumat laskettiin männylle ja kuuselle Vuokilan & Väliahon (1980) puutavaralajimalleilla ja rauduskoivulle Oikarisen (1983) mallilla (liite 2). Oikarisen mallin mukaan tukkipuun osuus laskee, kun keskirungon koko ylittää $0,6 \text{ m}^3$. Malli perustuu kuitenkin puhtaasti rungon dimensioihin (ks. Oikarinen 1983, s. 10), joten tukkipuuprosentin ei tule pienentyä runkojen järeytyessä. Näin ollen koivun tukkipuuprosentti vakioitiin samaksi kaikille em. keskirungon koon ylittäville koivikoille.

Hakkuupoistumien hinnoittelussa käytettiin hakkuuvuoden 1990/91 hintasuositussopimusten mukaisia yksikköhintoja (liite 4a). Tässä tutkimuksessa ei lähdetty mallittamaan kantohintojen vuosittaista kehitystä, vaikka raakapuumarkkinoille on ominaista suhdannevaihtelusta johtuva voimakas markkinahintojen vaihtelu. Korkeimman maankoron laskentamalli edellyttää ajan suhteen kiinteiden – stationaaristen – hintojen käyttöä ja toisaalta tavoitteena ei ollut puunkasvatuksen kannattavuuden ”todellisen” tason selvittäminen, vaan tutkittavien metsänkäsittelyvaihtoehtojen keskinäisen edullisuusjärjestyksen vertailu. Puun-

kasvatuksen kustannusten oletettiin myös pysyvän samoina koko tutkimuksen aikahorisontin. Tosin metsänuudistamistöiden yksikköhinnoissa ei ole kantohinnoille luonteenomaista suhdannevaihtelua

Hakkuuvuoden 1990/91 kantohinnat olivat varsin lähellä pitkän aikavälin (1949–1989) kantohintatrendien vuodelle 1990 ennustamia suhdannevaihtelusta puhdistettuja arvoja, joten niiden voidaan sanoa edustavan keskisuhdannehintoja. Tukki- ja kuitupuun hintasuhteessa tapahtuvien muutosten vaikutuksia selvitettiin herkkyyksianalyysien, ja esimerkkilaskelmia tehtiin myös kevään 1993 hinnoin.

Hintasuositussopimuksen (1990/91) mukaisesti hakkuupoistumien hinnoittelun yhteydessä ns. perusleimikon kantohintoja korjattiin leimikon järeyden ja tiheyden perusteella (liite 4c). Näin yksikköhinnoissa pyrittiin ottamaan huomioon hakattavan puuston määrän ja sen käyttöarvon vaikutukset puunostajan puustamaksukykyyn. Korjuukustannukset huomioon ottavan hinnoittelun vaikutusta yritettiin selvittää järeys- ja tiheyshinnoittelun vaihteluväliä laajentamalla sekä laskemalla osa tuloksista myös hankintahintoja (liite 4b) ja leimikon keskijäreyteen perustuvia (Harvennushakkuiden ... 1992, s. 44–46) keskimääräisiä korjuukustannuksia käyttäen (liite 4d). Tutkimuksessa tarkasteltiin lisäksi minimipoistumarajoitteen vaikutusta optimihakkuuohjelmaan. Metsäkuljetusmatkaan tai muihin korjuuolosuhteisiin liittyviä tekijöitä ei tutkimuksen yleistettävyyden vuoksi otettu mukaan laskelmiin eikä mäntytukkirunkojen kuivaoksarajaan perustuvaa laatuhinnoittelua ollut mahdollista sisällyttää hinnoitteluun, koska käytetyt puuston kehitysmallit eivät tuottaneet siihen tarvittavaa tietoa.

Metsänuudistamistöiden yksikköhinnat määräytyvät taksataulukoiden ja uudistusaloitusten työvaikeustekijöiden perusteella. Tämän tutkimuksen kannalta käyttökelpoisempia olivat kuitenkin tilastoidut keskimääräiset yksikköhinnat. Tutkimuksessa käytettiin vuoden 1990 rahanarvoon inflatoitua vuoden 1989 Etelä-Suomen toteutuneita nimellishintoja (liite 3b). Uuden puusukupolven aikaansaamiseksi tarvittut kokonaiskustannukset saatiin kertomalla yksikköhinnat liitteen 3a työlajeittaisilla prosenttiluvuilla.

2.4 Optimointimenetelmä

Metsikön käsittelyn optimointiin on käytetty dynaamista ohjelmointia, optimiohjausta, epälineaarista ohjelmointia ja simulointiin perustuvia hakumenetelmiä (ks. Valsta 1993) sekä myös lineaarista ohjelmointia (esim. Pesonen & Hirvelä 1992). Tässä tutkimuksessa sovelletaan dy-

naamista ohjelmointia. Optimiohjaus ja osa epälineaarisen ohjelmoinnin ratkaisualgoritmeista edellyttävät tilamuuttujien suhteen jatkuvia funktioita; tutkimusongelma on kuitenkin metsien kasvun vuotuisesta rytmistä, kasvun vaihtelusta ja hakkuista johtuen luonteeltaan epäjatkuva. Derivaattavapaat epälineaarisen ohjelmoinnin algoritmit eivät takaa globaalia optimia kuten dynaaminen ohjelmointi, ja dynaaminen ohjelmointi on metsikkötasolla selvästi lineaarista ohjelmointia tehokkaampi.

Dynaaminen ohjelmointi perustuu Bellmannin (1957) esittämälle optimaalisuuden periaatteelle¹. Optimaalisuuden periaatteen ansiosta vertailtavien vaihtoehtojen ja siten myös tarvittavien laskelmien määrä supistuu oleellisesti. Dynaamisen ohjelmoinnin käyttöä rajoittaa kuitenkin optimointitehtävän koon kasvu eksponentiaalisesti tilamuuttujien määrän kasvaessa, mikä käytännössä rajaa ratkaistavat ongelmat metsikkötasolle ja metsikkötason kasvumalleihin perustuviksi.

Ensimmäisenä dynaamista ohjelmointia puunkasvatukseen sovelsi tiettävästi Arimizu (1958). Metsikön kehitysmallien suhteen selvästi realistisempia olivat Amidonin & Akinin (1968), Kilkin & Väisänen (1969) ja Risvandin (1969) puuston kasvatusiheyttä ja optimikiertoaikaa käsitelleet tutkimukset. Brodie & Kao (1979) tehostivat perinteistä verkkomalliin perustuvaa dynaamisen ohjelmoinnin ratkaisualgoritmia yhdistämällä tilamuuttujien virittämän kaikkien mahdollisten tilojen verkon yksittäiset pisteet (solmut) suuremmiksi pinnoiksi (neighborhood storage location). Tällöin yksittäisiä solmuja ei ole tarpeen määrittellä etukäteen annettuina diskreetteinä arvoina, mikä nopeuttaa ongelman ratkaisua ja mahdollistaa tilamuuttujien luonnolliset yhdistelmät. Menetelmä on osoittautunut varsin tehokkaaksi ja sitä ovat myöhemmin käyttäneet mm. Riitters ym. (1982), Haight ym. (1986), Valsta (1986), Arthaud & Klemperer (1988), Filius & Dull (1992) ja myös tämä tutkimus perustuu siihen. Dynaamisen ohjelmoinnin metsätaloudellisia sovelluksia ja kehitystyötä ovat yksityiskohdaisemmin käsitelleet mm. Hann & Brodie (1980), Dykstra (1984), Brodie & Haight (1985) sekä Valsta (1993). Suomessa dynaamista ohjelmointia metsikön kasvatuksen optimointiin ovat soveltaneet Kilkki & Väisänen (1969), Kilkki (1972), Siitonen (1972), Valsta (1986,1990), Ringbom (1992) sekä Salminen (1993). Kilkin (1972) ja Siitosen (1972) työt perustuvat samaan malliin.

¹ Kun optimaalinen reitti jostain alkutilasta tiettyyn tilaan tunnetaan, niin jäljellä oleva optimireitti voidaan määrittää erillisenä tehtävänä riippumatta jo kuljetusta reitistä ja jäljellä olevat optimaaliset päätökset sisältävät myös aiemman optimiohjelman (Bellman 1957, s. 83).

Dynaaminen ohjelmointi noudattaa rekursion periaatetta. Rekursio voi olla joko eteenpäin tai taaksepäin askeltava. Edellinen lähtee liikkeelle ensimmäisestä vaiheesta askeltaen viimeiseen; jälkimmäinen taas päinvastoin. Päätösten joukko, jota seuraa tilojen joukko, valitaan siten, että halutun tavoitteen arvo maksimoituu tai minimoituu. Metsikön käsittelyn optimointiin on sovellettu sekä eteenpäin että taaksepäin askeltavaa rekursiota. Tässä tutkimuksessa sovellettiin eteenpäin askeltavaa rekursiota, koska siihen perustuen puuston optimikiertoaika ja sen sisältämä optimikäsitelyohjelma ovat määritettävissä tilamuuttujien muodostaman verkon yhdellä läpikäynnillä ja tilamuuttujien luokittelu "neighborhood storage location" menetelmällä on mahdollista vain eteenpäin askellessa. Puunkasvatuksen logiikka ja kasvumallit perustuvat myös etenevään rekursioon

Harvennusten ja kiertoajan optimointi ratkaistiin samanaikaisesti käyttämällä päätösmuuttujana harvennusvoimakkuutta siten, että päätehakkuu edusti 100 % ja lepo 0 % harvennusta. Muut harvennukset saivat arvoja näiden väliltä (ks. luku 2.2). Mallin tilamuuttujina olivat puuston pohjapinta-ala, runkoluku ja ikä. Myös valtapituus otettiin huomioon metsikön tilan kuvauksessa, mutta sitä ei käytetty tilamuuttujana samassa mielessä kuin pohjapinta-alaa ja runkolukua, koska valtapituuden kehitys ei riippunut puuston harvennuksista.

Tilamuuttujien virittämää käsittelyvaihtoehtojen avaruutta yksinkertaistettiin ryhmittelemällä yksittäiset pohjapinta-alalla ja runkoluvulla kuvatut pisteet suuremmiksi pinnoiksi. Luokkavälinä ryhmittelyssä oli 1 m²/ha ja 20 puuta. Ikä jaksotettiin kulkemaan kasvumallien mukaisesti 5 vuoden aika-askelin. Kunkin luokan sisälle joutuneista todellisista pohjapinta-alan ja runkoluvun yhdistelmistä tavoitefunktion suhteen paras vaihtoehto talletettiin ja tätä käytettiin systeemin uutena tilana ja panoksena seuraavassa vaiheessa.

Eteenpäin askeltavaan rekursioon perustuen optimaalisuuden periaatteen mukaisesti nettotuottojen nykyarvoa maksimoiva funktio on esitettävissä tilamuuttujien suhteen funktionaaliyhtälönä [2.2] (esim. Brodie & Kao 1979, Paredes & Brodie 1987). Käytännössä etenevään rekursioon perustuva dynaamisen ohjelmoinnin numeerinen ratkaisu etenee liitteen 5 mukaisesti.

$$R_j^*(y_j) = \max_{\{m_j\}} \{r_j(x_j, m_j) + R_{j-1}^*(y_{j-1})\}, \quad j = 1, \dots, n \quad [2.2]$$

siten, että

$$0 \leq m_{ij} \leq x_{ij} \quad \forall i$$

$$y_j = x_j - l(x_j) - m_j$$

$$x_{j+1} = y_j + f(y_j)$$

$$R_{j=0}^*(y_{j=0}) = 0$$

jossa

$R_j^*(y_j)$ = nettotuottojen nykyarvon maksimi metsikön tilalle y_j vaiheessa j
 - *maximum net present value for state y_j at stage j*

$r_j(x_j, m_j)$ = nettotuotot vaiheesta j , kun hakkuuvaihtoehto m_j toteutetaan
 metsikön tilalle x_j - *net present value generated at stage j when
 cutting alternative m_j has been carried out for state x_j*

y_j = metsikön tilavektori ($G_j^y, N_j^y, \mathbf{Hdom}_j$), joka muodostuu jakson j
 alussa tilasta x_j hakkuun ja / tai luonnonpoistuman seurauksena
 - *state vector ($G_j^y, N_j^y, \mathbf{Hdom}_j$) at the beginning of stage j
 developed from state x_j after cuttings and/or self thinning*

x_j = metsikön tilavektori ($G_j^x, N_j^x, \mathbf{Hdom}_j$) jakson j alussa, joka
 muodostuu kasvun seurauksena tilasta y_{j-1} - *state vector
 ($G_j^x, N_j^x, \mathbf{Hdom}_j$) at the beginning of stage j grown up from
 state y_{j-1}*

m_j = hakkuuvaihtoehtojen joukko $m_{ij} \in \{G_j^x, N_j^x, \mathbf{Hdom}_j\} \quad \forall i$
 - *set of cutting alternatives*

$f(y_j)$ = puuston kasvumalli - *stand growth*

$l(x_j)$ = luonnonpoistuma - *mortality due to self thinning*

3 Tulokset

3.1 Viljelymännikön ja -kuusikon optimikäsittelyohjelmat

Korkeimman maankoron tavoitteen mukaisesti nettotuottojen nykyarvoa maksimoivat metsikön käsittelyohjelmat laskettiin käyttäen laskentakorkokantana 1 ja 3 %. Tavoitefunktion vaikutusta tutkittiin laske-
malla myös suurimman keskikasvun (MAI) ja korkeimman metsän-
koron (laskentakorko 0 %) mukaiset optimikäsittelyohjelmat.

Männikössä optimaalinen kasvatusihteys lähestyi kaikilla tavoitteilla
itseharvenemisrajaa (kuva 3, vrt. kuva 2) harvennusten tapahtuessa juuri

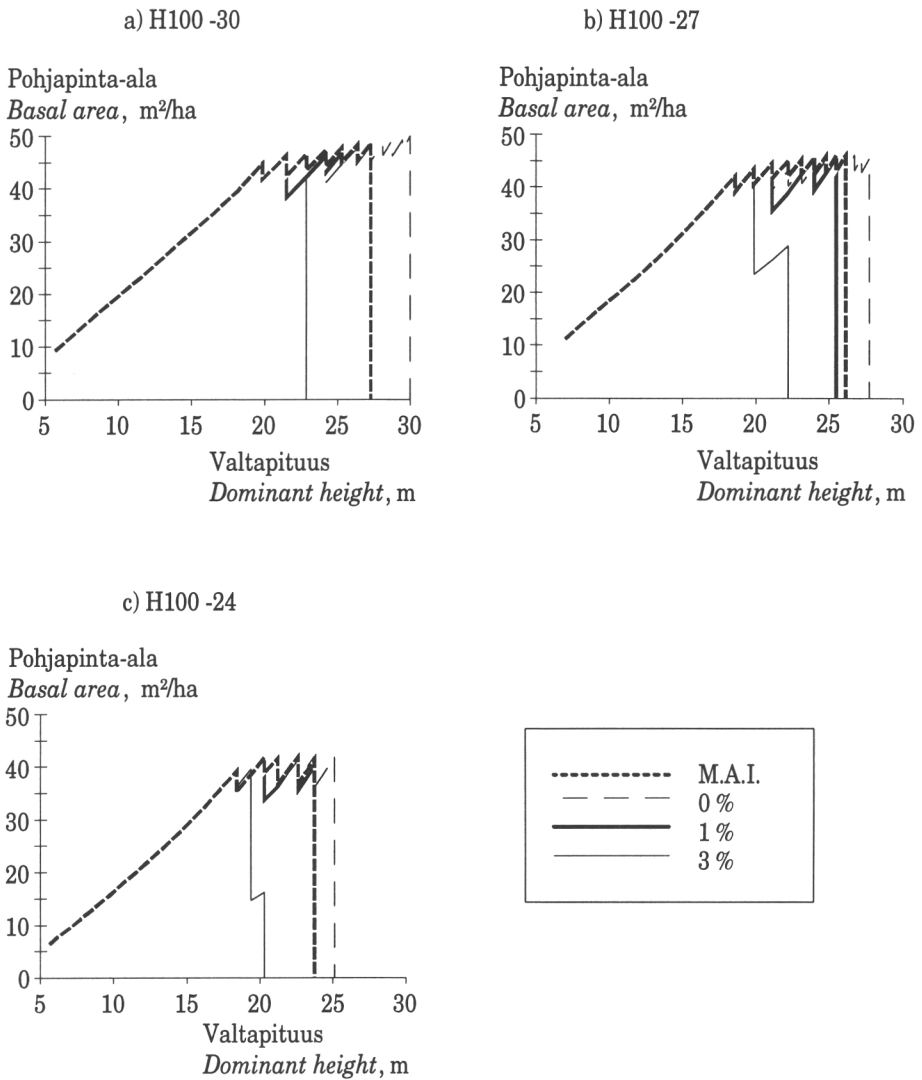
Taulukko 1. Optimikiertoajat.

Table 1. Optimum rotations.

Puulaji <i>Tree species</i>	Kasvupaikka <i>Site type</i>	Kiertoaika <i>Rotation</i> , a			
		MAI	Tavoite 0%	Objective SEV 1%	SEV 3%
Mänty <i>Scots pine</i>	30	75	95	75	55
	27	90	105	85	65
	24	95	110	95	70
Kuusi <i>Norway spruce</i>	30	85	95	75	60
	27	95	105	85	70
	24	110	120	100	80

Merkinnät – Symbols

- MAI – suurimman keskimääräisen tilavuuskasvun tavoite
maximum mean annual increment
- 0 % – korkeimman metsänkoron tavoite
maximum forest rent
- SEV 1% – korkeimman maankoron tavoite - laskentakorko 1 %
maximum soil expectation value (1 % discount rate)
- SEV 3% – korkeimman maankoron tavoite - laskentakorko 3 %
maximum soil expectation value (3 % discount rate)



Kuva 3. Viljelymännikön optimiharvennusohjelmat kasvupaikoille a) H₁₀₀-30, b) H₁₀₀-27 ja c) H₁₀₀-24 (selitykset ks. taulukko 1).
 Figure 3. Optimum thinning schedules for cultivated Scots pine stand on site types a) H₁₀₀-30, b) H₁₀₀-27 and c) H₁₀₀-24 (legend, see footnote in table 1).

ennen tämän rajan ylittymistä. Harvennusten aiheuttama arvokasvutappio oli siten suurempi kuin harvennustulojen sijoittamisesta syntyvä vaihtoehtoinen tuotto. Puuston määrän ylläpitämisellä pyrittiin mahdollisimman monen rungon kasvattamiseen tukkipuiksi.

Ensimmäinen harvennus tehtiin kasvupaikasta riippuen 18–20 metrin valtapituudella. Maksimaalisen keskikasvun ja suurimman metsän-

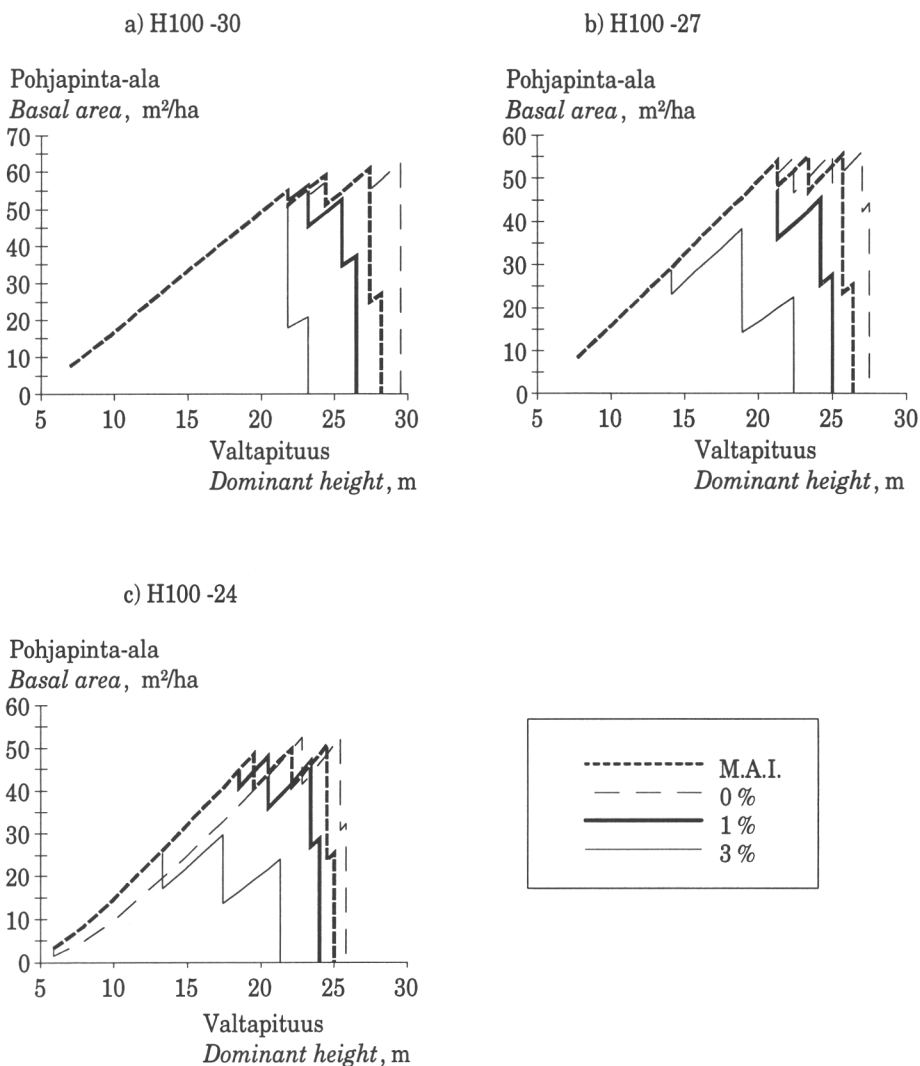
koron laskelmissa harvennusten voimakkuuden ratkaisi lähinnä minimipoistumarajoite (20 m³/ha) harvennusten lukumäärän muodostuessa varsin suureksi (6–8). Maankorkoa maksimoivat tavoitteet, joissa puunkasvatukselle on asetettu nolasta poikkeava taloudellinen tuottovaatimus (korkokanta), lyhensivät kiertoaikoja (taulukko 1) ja johtivat hieman suurempiin ja aikaisempiin harvennuksiin.

Kantohintatason muutos ei vaikuttanut männikön optimikäsittelyohjelmiin, mikäli tukin ja kuidun hintasuhteet eivät samalla muuttuneet kuidun hyväksi. Esimerkiksi vuoden 1993 maaliskuun matalasuhdannehintoja (mäntytukki 180 mk ja mäntykuitu 60 mk/m³) käyttäen vain maankorkoa maksimoivan tavoitteen (SEV 3 %) optimikiertoajat pidentyivät 5 vuodella. Hinnat ovat muuttuneet suhteellisesti tukin hyväksi ja kantohintatason lasku on puolestaan pienentänyt puuston edelleenkasvatuksen vaihtoehtoiskustannusta. Harvennusten voimakkuuteen tai niiden ajoittumiseen ei em. hintojen muutoksilla kuitenkaan ollut vaikutusta. Muuttamalla männyn hintatasoa kuidun hyväksi kiertoajat lyhenivät ja harvennusten taso hieman voimistui, sillä kuitu tuotti omaa taloudellista tulosta eikä vain lisäarvoa tukkipuun kuituosana, ts. aikaisemman hakkuutulon vaihtoehtoiskustannus oli suurempi kuin hakkuissa poistetun puuston arvokasvu.

Harvennusten minimipoistuman nostaminen 20 m³:stä 40 m³:iin hehtaarilla ei vaikuttanut männiköiden optimikasvatusohjelmien yleislinjaan: puuston kasvattamiseen lähelle itseharvenemisrajaa ja korkean puuston määrän ylläpitämiseen. Harvennuspoistumat, etenkin suurinta keskikasvua ja korkeinta metsänkorkoa maksimoitaessa, tosin hieman kasvoivat ja harvennuskertojen määrät vähenivät. Peruslaskelmien mukaiset tulokset eivät muuttuneet ratkaisevasti myöskään käytetäessä hankintahintoja ja metsikön järeyteen perustuvia keskimääräisiä korjuukustannuksia.

Viljelykuusikoiden harvennukset olivat männiköitä voimakkaampia (kuva 4). Tukki- ja kuitupuun pienen hintaeron vuoksi maksimaalisesta tukkipuurunkojen tuottamisesta kannatti luopua ja aikaistaa harvennuksilla puunkasvatuksen tuottoja. Kuusikko harvennettiin kasvupaikasta riippuen ensimmäisen kerran keskimäärin 18–22 metrin valtapituudella. Kolmen prosentin tuottovaatimuksella harvennukset tapahtuivat kuitenkin kasvupaikoilla H₁₀₀₋₂₇ ja H₁₀₀₋₂₄ selvästi aiemmin: 13–14 metrin valtapituudessa.

Kuusikon optimikiertoajat olivat keskimäärin 5–10 vuotta pidemmät kuin saman kasvupaikan männikön (taulukko 1). Vuoden 1993 maaliskuun toteutuneiden hintojen (kuusitukki 150 mk ja kuusikitu 80 mk/m³) mukaiset hintasuhteet ovat muuttuneet tukin hyväksi, minkä



Kuva 4. Viljelykuusikon optimiharvennusohjelmat kasvupaikoille a) H₁₀₀-30, b) H₁₀₀-27 ja c) H₁₀₀-24 (selitykset ks. taulukko 1).

Figure 4. Optimum thinning schedules for cultivated Norway spruce stand on site types a) H₁₀₀-30, b) H₁₀₀-27 and c) H₁₀₀-24 (legend see footnote in table 1).

seurauksena kasvupaikoilla H₁₀₀-30 ja H₁₀₀-27 maankorkoa maksimoivien tavoitteiden mukaiset optimikiertoajat pidentyivät peruslaskelmaan nähden 5 vuodella ja harvennusten hakkuupoistumat hieinan vähenivät.

Kuusikoissa, joissa harvennukset olivat alunperin olleet männiköitä voimakkaampia, minimipoistuman kaksinkertaistaminen 20 m³:stä 40

m³:iin hehtaarilla ei vaikuttanut optimikäsittelyohjelmiin. Hankintahinnat ja leimikon keskijäreyyteen perustuvat keskimääräiset korjuukustannukset siirsivät, kasvupaikkaa H₁₀₀-30 lukuunottamatta, maankoron 3 % tavoitteen mukaisia harvennushakkuita 5 vuodella eteenpäin ja lyhensivät toisaalta kaikkien taloudellisten tavoitteiden kiertoaikoja viidellä vuodella. Puuston kasvatustiheyteen tai harvennushakkuiden voimakkuuteen ei niillä kuitenkaan ollut juuri vaikutusta.

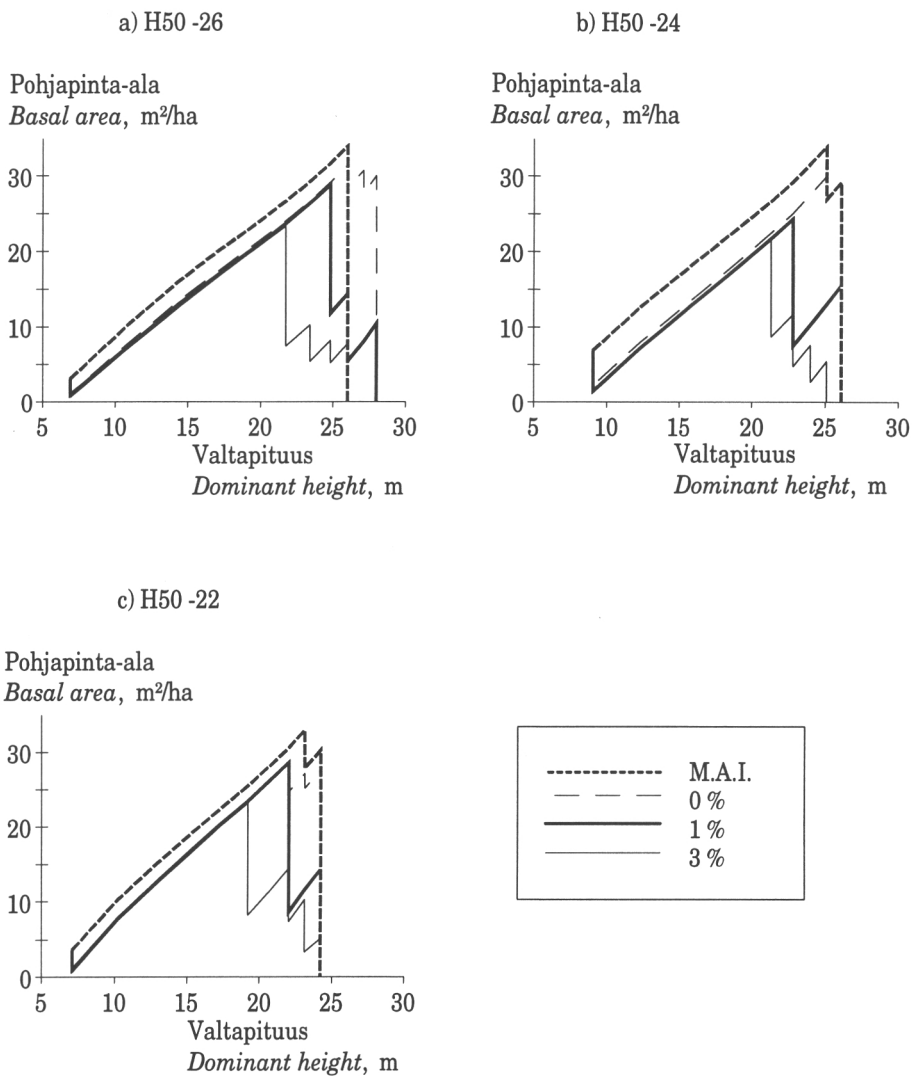
Puuntuotukselliset ja taloudelliset optimit olivat viljelymänniköissä (liite 6a) ja viljelykuusikoissa (liite 6b) kiertoajan suhteen laakeita, mikä mahdollistaa käytännössä vaihtoehtoiset metsien käsittelytavat aiheuttamatta suuria kasvutappioita tai taloudellisia menetyksiä. Taloudellista tulosta maksimoitaessa kannattaa siten esimerkiksi havupuuviljelymetsiköiden päätehakuut ajoittaa hintahuippujen kohdalle, jos se vain metsänomistajan kokonaistalouden ja puuston kunnan kannalta on mahdollista.

3.2 Viljelykoivikon optimikäsittelyohjelmat

Rauduskoivikon taloudellisesti optimaaliset kasvatustiheydet (kuva 5) poikkesivat viljelymänniköiden ja -kuusikoiden peruslaskelmien tuloksesta, sillä rauduskoivikko kannatti jo taimikkovaiheessa väljentää erittäin harvaksi; korkokannasta ja kasvupaikasta riippuen 450–750 runkoon hehtaarilla. Maksimaalisen keskikasvun tavoitteella puustoa sen sijaan kannatti kasvattaa mahdollisimman tiheänä itseharvenemisen rajalle.

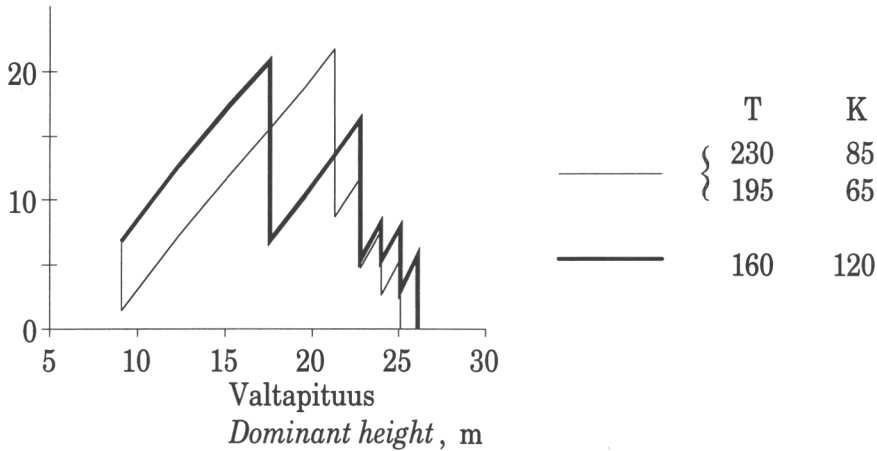
Taloudellisten tavoitteiden kannalta Oikarisen (1983) mallien mukainen rauduskoivikon lähtötiheys (2000 runkoa) oli liian suuri. Tukki- ja kuitupuun kantohinnoissa oli niin iso ero, ettei kuitua kannattanut kasvattaa. Varhaisella harvennuksella saatiin tukkipuun tuotos rauduskoivikossa maksimoitumaan. Koivun puutavaralajimalleissa kuidun osuus jää myös melko pieneksi. Kantohintatason selvä muutos kuidun hyväksi muutti kuitenkin viljelykoivikon taloudellisesti edullisinta käsittelyä (kuva 6).

Käytettyjen rauduskoivikon pituuskasvumallin sovellusalue päättyy 60 vuoden ikään. Pituuskasvumallien ekstrapolointi tuon iän yli ei ollut mielekäästä, koska mallin ennustama pituuskasvu jatkui voimakkaana vielä pitkään ja optimikiertoajat muodostuivat varsin korkeiksi. Optimikiertoajat voitiin määrittää mallin rajojen puitteissa vain maankoron 3 prosentin tavoitteelle, jolloin ne olivat kasvupaikoittain 50 vuotta H₅₀-26, 55 vuotta H₅₀-24 ja 60 vuotta H₅₀-22.



Kuva 5. Viljellyn rauduskoivikon optimiharvennusohjelmat kasvupaikoille a) H₅₀-26, b) H₅₀-24 ja c) H₅₀-22 (lyhennysten selitykset ks. taulukko 1).
Figure 5. Optimum thinning schedules for cultivated silver birch stand on site types a) H₅₀-26, b) H₅₀-24 and c) H₅₀-22 (legend, see footnote in table 1).

Pohjapinta-ala
Basal area, m²/ha



Kuva 6. Kantohintatason vaikutus rauduskoivikon korkeimman maankoron optimikäsitelyohjelmaan 3 % laskentakorolla kasvupaikalla H₅₀-24.

Fig. 6. The effects of stumpage prices on optimum cutting schedule (SEV 3 %) of silver birch on site type H₅₀-24.

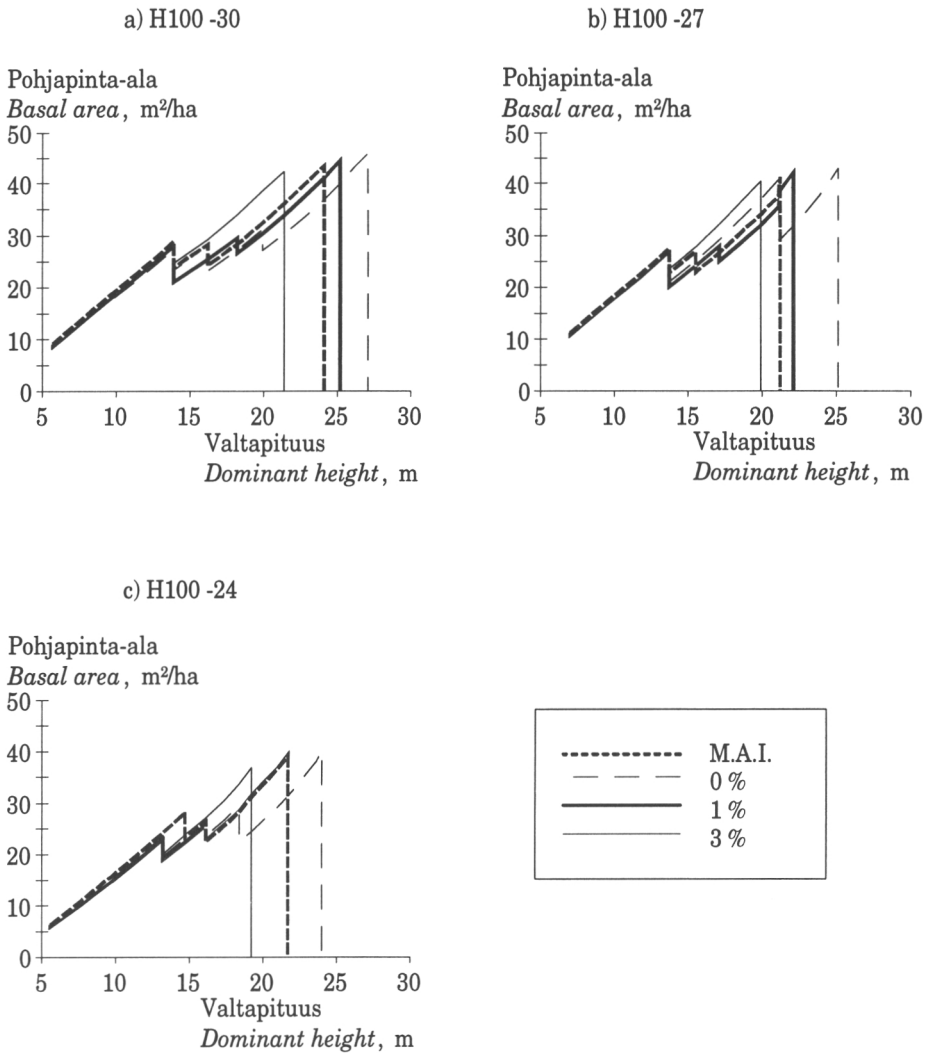
T = tukin kantohinta – stumpage price of veneer log

K = kuidun kantohinta – stumpage price of pulpwood

3.3 Ad hoc -harvennusreaktiomalli

Mallien puutteen vuoksi metsikön kehityssimulaattori ei sisältänyt latvuston kehitysmalleja, niinpä edellä esitetyissä perusajojen tuloksissa oletettiin latvuston kunnan säilyvän ja puuston kasvun elpyvän viipeettä tiheänkin puuston harvennuksesta. Simulaattoriin asetettiin tulosten tarkastelua varten viiden vuoden viive latvuston elpymiselle ja kasvun palautumiselle mallien ennustamalle tasolle, jos harvennuksat tapahtuivat puustossa, jonka pohjapinta-ala oli yli 70 % itseharvenemisrajasta. Kasvun tasoa alennettiin ”ad hoc” -harvennusreaktiomallilla siten, että em. 70 % rajalla kasvu ei vielä vähentynyt, mutta itseharvenemisrajalla tehdyn harvennuksen jälkeen kasvun taso aleni 90 prosentilla. Näiden raja-arvojen välillä kasvun taso aleni lineaarisesti.

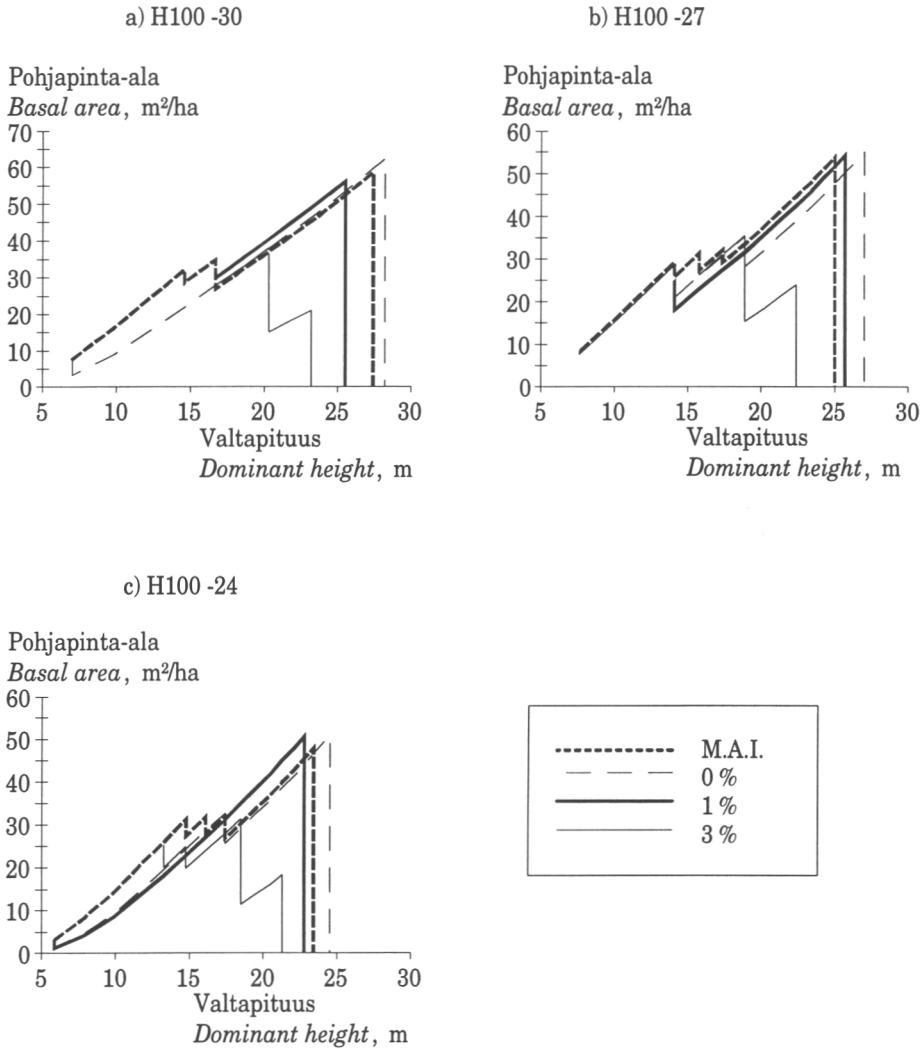
Ad hoc -malli ei vaikuttanut rauduskoivikon perusajojen tuloksiin. Viljelymänniköiden ja -kuusikoiden kiertoajat lyhenivät sen sijaan perusmalliin nähden keskimäärin 5–15 vuodella (taulukko 2), ensiharvennuksat aikaistuivat 13–14 metrin valtapituuteen ja harvennusten määrä



Kuva 7. Viljelymännikön optimiharvennussuhteet kasvupaikoille a) H₁₀₀-30, b) H₁₀₀-27 ja c) H₁₀₀-24, kun metsikön kehityssimulaattoriin on lisätty ad hoc -viivemalli harvennusten jälkeiselle kasvun ja latvuston elpymiselle.

Figure 7. Optimum thinning schedules for cultivated Scots pine stand on site types a) H₁₀₀-30, b) H₁₀₀-27 and c) H₁₀₀-24, when ad hoc growth and crown recovery model due to the thinnings is included in growth simulator.

vähäni (kuvat 7 ja 8). Puustoa kasvatettiin 17–18 metrin valtapiuuden jälkeen harventamatta kiertoajan loppuun, jolloin tiheys läheni jo itseharvenemisrajaa. Metsikön kasvatustiheys muodostui havupuilla tässä tapauksessa selvästi nykyohjeita korkeammaksi vain kiertoajan loppupuolella.



Kuva 8. Viljelykuusikon optimiharvennusohjelmat kasvupaikoille a) H₁₀₀-30, b) H₁₀₀-27 ja c) H₁₀₀-24, kun metsikön kehityssimulaattoriin on lisätty ad hoc -viivemalli harvennusten jälkeiselle kasvun ja latvuston elpymiselle.

Figure 8. Optimum thinning schedules for cultivated Norway spruce stand on site types a) H₁₀₀-30, b) H₁₀₀-27 and c) H₁₀₀-24, when ad hoc growth and crown recovery model due to the thinnings is included in growth simulator.

Alennettaessa vain itseharvennemismallin (Hynynen 1991) tasoa 30 % ensiharvennukset aikaistuivat ad hoc -harvennusreaktiomallin tavoin 13–15 metrin valtapituuteen. Puuston määrä ei kuitenkaan kohonnut kiertoajan loppua kohden, vaan optimaalinen harvennusohjelma muistutti "sahanterää". Puustoa oli siten perusajojen tapaan optimaalista

kasvattaa itseharvenemisrajan tuntumassa. Perusajoihin nähden metsänkoron ja suurimman keskikasvun mukaiset kiertoajat lyhenivät, mutta ad hoc -harvennusreaktiomallin tuloksiin verrattuna kaikkien tavoitteiden kiertoajat pidentyivät.

Taulukko 2. Optimikiertoajat, kun metsikön kehityssimulaattoriin on lisätty ad hoc -viivemalli kasvun ja latvuksen elpymiselle.

Table 2. The optimum rotations, when ad hoc growth and crown recovery model due to the thinnings is included in growth simulator.

Puulaji <i>Tree species</i>	Kasvupaikka <i>Site type</i>	Kiertoaika <i>Rotation</i> , a			
		MAI	Tavoite 0%	<i>Objective</i> SEV 1% SEV 3%	
Mänty <i>Scots pine</i>	30	60	75	65	50
	27	65	90	70	55
	24	80	100	80	65
Kuusi <i>Norway spruce</i>	30	80	85	70	60
	27	85	100	90	70
	24	95	105	90	80

Selitykset ks. taulukko 1 – *Symbols, see table 1*

4 Tulosten tarkastelu

Tutkimuksessa laadittiin Vuokilan & Väliahon (1980) ja Oikarisen (1983) viljelymetsiköiden kasvumalleihin ja dynaamiseen ohjelmointiin perustuva tietokonemalli. Tämän tietokoneohjelman avulla minkä tahansa em. mallien piiriin lukeutuvan viljelymetsikön optimaalinen käsittelyohjelma on laadittavissa. Tutkimuksessa esitetyt metsiköiden käsittelyohjelmat ovat siten vain esimerkitapauksia ja toimivat optimointimallin käyttökelpoisuuden testinä. Puunkasvatus on pitkän ajan tuotannonohjauksista ja tarkasteluhorisontin pidentyessä epävarmuus sekä

talouden että kasvun osatekijöistä kasvaa. Tämä tutkimus perustui täydellisen ennustettavuuden oletukseen, mikä pitää ottaa huomioon tuloksia tarkasteltaessa.

Viljelymänniköiden ja -kuusikoiden sekä taloudellisesti että puuntuotannollisesti edullisimmat kasvatustiheydet muodostuivat tutkimuksen perusajoissa selvästi nykykäytäntöä korkeammiksi. Puustoa kasvatettiin itseharvenemisrajan tuntumassa harvennusten tapahtuessa juuri ennen luonnonpoistuman alkua, joten esimerkiksi ensiharvennukset tehtiin vasta 18–22 metrin valtapituudella. Rauduskoivikon taloudellisesti edullisin käsittelyvaihtoehto oli erittäin voimakas varhainen harvennus. Suurimman keskikasvun tavoitteella rauduskoivikkoa kasvatettiin sen sijaan tiheänä.

Suurimman keskikasvun tavoitteen mukaisia tuloksia voidaan pitää puuntuotosteorian mukaisina: tilavuuden kasvu on sitä suurempaa mitä enemmän puustoa on (Vuokila 1987) ja maksimikasvu saadaan poistamalla metsästä pelkästään ne puut, jotka muutoin kuolisivat. Todellisuudessa täystiheän metsikön harvennuksen jälkeen puusto on altis myrsky- ja lumituhoille. Puita kuolee myös muista satunnaistekijöistä johtuen (Haapala 1983). Tuhoja ei kuitenkaan voitu malleissa ottaa huomioon, kuten ei myöskään kuolemistodennäköisyyden vaihtelua metsikön sisällä puun aseman ja koon perusteella, sillä puuston kehitysmalleista puuttuivat läpimittajakaumat. Puuston kasvatustiheys nousi näin todellisia luonnonolosuhteita korkeammaksi.

Tutkimuksen perusajoissa oletettiin tiheänä kasvatetun puuston elpyvän esimerkiksi viivästetyn harvennuksen jälkeen kasvumallien mukaisesti. Tätä käytettyjen kasvumallien luonteen mukaista oletusta pidettiin käytännössä kuitenkin mahdottomana, joten metsikön kehityssimulaattoriin lisättiin ad hoc pohjalta kasvun elpymismalli, jossa mallien ennustamaa kasvun tasoa alennettiin viiden vuoden ajan. Ad hoc -malliin jouduttiin turvautumaan, koska tiheiden puustojen harvennuksista ei ole vielä riittävästi tutkittua tietoa. Käytettyjen arvojen suuruus ja oikeellisuus ei ole tutkimuksen kannalta oleellista, koska tavoitteena oli kuvata simulaattorista puuttuvaa ilmiötä ja sen vaikutusta puuston käsittelyyn. Harvennusreaktiomalli laski perusajoihin nähden männikön ja kuusikon kasvatustiheyttä kiertoajan alussa. Ensiharvennukset tehtiin sekä viljelymänniköissä että -kuusikoissa 13–14 metrin valtapituudessa. Kiertoajan loppua kohden puuston pohjapinta-ala kuitenkin kasvoi lähestyen perusajojen kasvatustiheyttä etenkin puuston kasvua maksimoitaessa.

Viljelymänniköiden ja -kuusikoiden perusajojen taloudelliset optimiratkaisut merkitsivät ensiharvennusten myöhentämistä ja hakkuiden keskittymistä kiertoajan loppupuoliskolle, jolloin poistettava puusto oli järeämpää ja pienelläkin poistoprosentilla saatiin aikaan riittävä hakkuupoistuma. Puutavaralajien hintasuhteet ovat painottuneet tukin hyväksi, joten taloudelliset optimiratkaisut pyrkivät tukkipuun tuotoksen maksimointiin. Tukkipuun hintasuositussopimusten mukainen hintaporastus johti, etenkin männyllä, mahdollisimman monen pienen tukkirungon tuottamiseen. Harvennushakkuiden aiheuttama arvokasvutappio ylitti siten pääsääntöisesti harvennustulojen sijoittamisesta syntyvän vaihtoehtoisen tuoton. Tätä tuottoa ilmensi kulloinkin käytetty korkokanta. Tuloksissa on kuitenkin muistettava, että metsiköimällemihin perustuvat puutavaralajimallit, joista puuttuu läpimittajakauma, voivat yliarvoida tiheän puuston järeyden kehityksen, kun mallien laadinta-aineiston maksimitiheydet ovat selvästi matalammalla tasolla: aineiston tiheimmät männiköt olivat 33–37 ja tiheimmät kuusikot 45–50 m²/ha.

Rauduskoivikko harvennettiin taloudellista tulosta maksimoitaessa jo taimikkovaiheessa. Puutavaralajien hintasuhteet ovat koivulla mäntyä ja kuusta vielä selkeämmin painottuneet tukin hyväksi ja lisäksi puutavaralajimalleissa koivukuidun osuus jää melko pieneksi. Puutavaralajimallit eivät vielä pysty ottamaan huomioon teknistä laatua, vaan laatu määräytyy vain keskirungon koon perusteella. Tämä yliarvioi tukin osuuden ja sen kehityksen. Voimakkaan harvennuksen on todettu alentaneen nuorissa hieskoivikoissa valtapituuden kasvua (Niemistö 1991). Käytännössä erittäin harvan puuston runkomuodon kehitys voi siten poiketa mallien ennustamasta, ja voimakkaan harvennuksen seurauksena voi todellisuudessa kehittyä omenapuumaisia runkoja. Harvassa koivikossa myös koko puuston tuhoutumisriski esim. hirvivahingon vuoksi on suuri.

Muuttamalla hintasuhteita selvästi kuidun hyväksi taloudelliset optimiratkaisut muuttuivat: männikön ja kuusikon harvennukset voimistuivat ja rauduskoivikkoa kasvatettiin selvästi tiheämpänä. Kantohintoihin perustuva hinnoittelu ei yleensä ota huomioon riittävästi poistumaa ja sen rakennetta. Minimipoistuman nostaminen 20 m³:stä 40 m³:iin, kantohintojen tiheyskorjauksen laajentaminen tai hankintahintojen ja keskijäreyteen perustuvien korjuukustannusten käyttö eivät muuttaneet perusmallin tuloksia sanottavasti. Kasvumallit ja kantohintasuhteet näyttivät siten vaikuttavan optimiratkaisuihin enemmän kuin

korjuukustannukset, tosin todellisten korjuukustannusten vaikutus voi olla kuitenkin edellä esitettyjä vertailuja merkittävämpi.

Männikön ja kuusikon optimaalista kasvatustiheyttä ovat viime vuosina Suomessa tutkineet mm. Pesonen & Hirvelä (1992) ja Valsta (1992). Tutkimukset perustuvat MELA -järjestelmän puutason kasvumalleihin, jotka on laadittu lähinnä luontaisesti syntyneitä puita käsitävästä aineistosta (Ojansuu ym. 1991). Valsta (1992) julkaisi vain kasvupaikan H₁₀₀-29 kuusikon tulokset ja ne ovat osin tämän tutkimuksen tulosten mukaiset. Pesosen & Hirvelän (1992) tulokset, jotka pohjautuvat useiden todellisten metsiköiden (puuston lähtötaso vaihtelee) optimiohjelmien perusteella laadittuihin malleihin, ovat tämän tutkimuksen perusajoihin verrattuna selvästi matalammalla tasolla, etenkin männiköt. Perinteellisin menetelmin viljelymetsiköiden kasvatustiheyttä liiketaloudellisena ongelmana ovat lisäksi selvittäneet mm. Hannelius (1978), Valsta (1982) ja Sumanen (1992). Näiden tutkimusten tulokset eivät kuitenkaan ole vertailukelpoisia tämän tutkimuksen kanssa, koska niissä on arvioitu vain olemassa olevia tuotossarjoja. Sumanen (1992) käytti tosin juuri Vuokilan & Väliahon (1980) ja Oikarisen (1983) tuotossarjoja.

Tämän tutkimuksen tulosten mukaan havuviljelymetsiköiden kasvatustiheyttä voitaisiin nostaa sekä puuntuotannollisessa että taloudellisessa mielessä ja rauduskoivikon perustamistiheyttä laskea. Tulokset poikkeavat kuitenkin selvästi nykyisistä käytännön toimitaohjeista ja osin myös aiemmista tutkimuksista. Käytetyissä ennustemalleissa on keskeisiä puutteita, jotka olisi poistettava optimointimallin luotettavuuden varmistamiseksi. Näitä puutteita ovat mm. läpimittajakaumat, latvuston kehitysmallit ja niihin liittyvät harvennusreaktiomallit sekä puuston järeytymistä ja teknistä laatua ja niiden kehitystä ennustavat mallit sekä tuhomallit.

Kirjallisuus - References

- Aarne, M. (toim.) 1992. Metsätilastollinen vuosikirja 1990–91. Year-book of forest statistics 1990-91. SVT Maa- ja metsätalous 1992:3. Folia Forestalia 790. 281 s. ISBN 951-40-1205-4, ISSN 0015-5543.
- Amidon, E.L. & Akin, G.S. 1968. Dynamic programming to determine optimum levels of growing stock. *Forest Science* 14(3): 287–291. ISSN 0015-749X.
- Arimizu, T. 1958. Regulation of the cut by dynamic programming. *Journal of Operations Research Society of Japan* 1(4): 175–182.
- Arthaud, G.J. & Klemperer, W.D. 1988. Optimizing high and low thinnings in loblolly pine with dynamic programming. *Canadian Journal of Forest Research* 18: 1118–1122. ISSN 0045-5067.
- Bellman, R.E. 1957. *Dynamic programming*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey. 340 s.
- Brodie, J.D. & Haight, R.G. 1985. Optimization of silvicultural investment for several types of stand projection systems. *Canadian Journal of Forest Research* 15: 188–191. ISSN 0045-5067.
- & Kao, C. 1979. Optimizing thinning in Douglas-fir with three descriptor dynamic programming to account for accelerated diameter growth. *Forest Science* 25(4): 665–672. ISSN 0015-749X.
- Dijkstra, D.P. 1984. *Mathematical programming for natural resource management*. McGraw-Hill, New York. 318 s. ISBN 007-0185522.
- Faustmann, M. 1849. Berechnung des Wertes, welchen Waldboden sowie noch nicht haubare Holzbestände für die Waldwirtschaft besitzen. *Allgemeine Forst und Jagd Zeitung* 25: 441–455. ISSN 0002-5852. [Reprinted in English (1968): Calculation of the value which forest land and immature stands possess for forestry. *Julkaisussa: Gane, M. (toim.). Martin Faustmann and evolution of discounted cash flow. Commonwealth Forest Institute Papers* 42. University of Oxford. s. 25–55.]
- Filius, A.M. & Dull, M.T. 1992. Dependence of rotation and thinning regime on economic factors and silvicultural constraints: results of an application of dynamic programming. *Forest Ecology and Management* 48: 345–356. ISSN 0378-1127.
- Haapala, J. 1983. Luonnonpoistuman ennustaminen puun kuolemis-todennäköisyysmallilla. Käsikirjoitus. Metsäntutkimuslaitos, metsän-arvioinnin tutkimusosasto. 33 s.

- Haight, R., Brodie, J.D. & Dahms, W.G. 1986. A dynamic programming algorithm for optimization of lodgepole pine management. *Forest Science* 31(2):312–330. ISSN 0015-749X.
- Hann, D.W. & Brodie, J.D. 1980. Even-aged management: basic managerial questions and available or potential techniques for answering them. USDA Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT-83. 29 s.
- Hannelius, S. 1978. Istutuskuusikon tiheys – tuotoksen ja edullisuuden tarkastelua. Summary: Initial tree spacing in Norway spruce timber growing – an appraisal of yield and profitability. *Folia Forestalia* 359. 51 s. ISBN 951-40-0348-9, ISBN 0015-5543.
- Harvennushakkuiden taloudellinen merkitys ja toteuttamisvaihtoehdot. 1992. Maa- ja metsätalousministeriö. 121 s. Helsinki. ISBN 951-40-1191-0.
- Honko, J. 1973. Investointien suunnittelu ja tarkkailu. 4. painos. WSOY, Porvoo. 263 s. ISBN 951-0-00544-4
- Hynynen, J. 1991. Luonnonpoistuman ennustaminen metsikkötason mallilla. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, metsänarvioimistieteen laitos. 47 s.
- Johansson, P-O. & Löfgren, K-G. 1985. The economics of forestry and natural resources. Blackwell, Oxford. 292 s. ISBN 0-63-114162-6.
- Hämäläinen, J. & Salminen, O. 1984. Eräitä tuloksia Tehdaspuu Oy:n havupuumetsiköiden uudistamisketjuista sekä niiden kustannuksista. Metsäntutkimuslaitos. Konekirjoite. 20 s.
- Keltikangas, M. 1971. Time factor and investment calculations in timber growing: theoretical fundamentals. Tiivistelmä: Aikatekijä ja investointilaskelmat puunkasvatuksessa – teoreettisia perusteita. *Acta Forestalia Fennica* 120. 68 s. ISSN 0001-5636.
- Kilkki, P. 1972. Metsikön hakkuuohjelman optimointi. Julkaisussa: Harvennuspuun korjuu. Harvennuspuun korjuun koneellistamistomikunta. SITRA, 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 Forestalia Fennica* 102. 23 s. ISSN 0001-5636.
- & Siitonen, M. 1975. Metsikön puuston simulointimenetelmä ja simuloituun aineistoon perustuvien puustotunnusmallien laskenta. Summary: Simulation of artificial stands and derivation of growing stock models from this material. *Acta Forestalia Fennica* 145. 33 s. ISBN 951-651-020-5, ISSN 0001-5636.

- Niemistö, P. 1991. Hieskoivikoiden kasvatustiheys ja harvennusmallit Pohjois-Suomen turvemailla. Summary: Growing density and thinning models for *Betula pubescens* stands on peatlands in northern Finland. Folia Forestalia 782. 36 s. ISBN 951-40-1185-6, ISSN 0015-5543.
- Oikarinen, M. 1983. Etelä-Suomen viljeltyjen rauduskoivikoiden kasvatustallit. Summary: Growth and yield models for silver birch (*Betula pendula*) plantations in southern Finland. Communications Instituti Forestalis Fenniae 113. 75 s. ISBN 951-40-0619-4, ISSN 0358-9609.
- Ojansuu, R., Hynynen, J., Koivunen, J. & Luoma, P. 1991. Luonnonprosessit metsälaskelmassa (MELA) – Metsä 2000 -versio. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 385. 59 s. ISBN 951-40-1164-3, ISSN 0358-4283.
- Paredes V., G.L. & Brodie, J.D. 1987. Efficient specification and solution of the even-aged rotation and thinning problem. Forest Science 33(1): 14–29. ISSN 0015-749X.
- Pesonen, M. & Hirvelä, H. 1992. Liiketaloudelliset harvennusmallit Etelä-Suomessa. Summary: Thinning models based on profitability calculations for southern Finland. Folia Forestalia 800. 35 s. ISBN 951-40-1268-2, ISSN 0015-5543.
- Puun hintasuositussopimukset 1.4.1990 - 31.3.1991. Maataloustuottajien Keskusliiton Metsävaltuuskunnan ja Teollisuuden Puuyhdistyksen sopimus.
- Riitters, K., Brodie, J.D. & Hann, D.W. 1982. Dynamic programming for optimization of timber production and grazing in ponderosa pine. Forest Science 28(3):517–525. ISSN 0015-749X.
- Ringbom, S. 1992. The optimal management of even-aged forest stands under risk; an application of stochastic dynamic programming. Licentiatavhandling. Svenska Handelshögskolan, Helsinki. 82 s.
- Risvand, J. 1969. Economic analysis of cutting programs applying dynamic programming. Julkaisussa: Svendsrud, A. (toim.). Readings in forest economics. Universitetsforlaget, Oslo-Bergen-Tromsø. s. 73–79.
- Saario, S. 1991. Trendi: yli 70 kuvaa ja taulukkoa pörssikurssien ja niihin vaikuttavien tekijöiden kehityksestä pitkällä tähtäimellä. Summary: Visual perspectives of financial cycles and trends in Finland. Weilin + Göös, Hämeenlinna. 161 s. ISBN 951-35-5245-4.
- Salminen, O. 1993. Männikön ja kuusikon liiketaloudellinen vajeatuottoisuus. Summary: Profitability of growing understocked Scots pine

- and Norway spruce stands. *Folia Forestalia* 805. 27 p. ISBN 951-501299-2, ISSN 0015-5543.
- Samuelson, P.A. 1976. Economics of forestry in an evolving society. *Economic Inquiry* 14: 466–492. ISSN 0095-2583.
- 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 tiedonantoja 2. ISSN 0355-1164.
- Steuer, R.E. 1986. Multiple criteria optimization: theory, computation, and application. John Wiley & Sons, New York. 546 s. ISBN 0-471-88846-X.
- Sumanen, J. 1992. Harvennusvoimakkuuden vaikutus viljelymetsiköstä saatavaan tuottoon. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, metsätalouden liiketieteen laitos. 70 s.
- Valsta, L. 1982. Istutuskuusikon kasvatustiheyksien liiketaloudellinen vertailu. Summary: Profitability comparison of growing densities in spruce plantations. *Folia Forestalia* 504. 33 s. ISBN 951-40-0556-2, ISSN 0015-5543.
- 1986. Mänty- ja rauduskoivusekametsikön hakkuuohjelman optimointi. Summary: Optimizing thinnings and rotation for mixed, even-aged pine-birch stands. *Folia Forestalia* 666. 23 s. ISBN 951-40-0751-4, ISSN 0015-5543.
 - 1990. A comparison of numerical methods for optimizing even aged stand management. *Canadian Journal of Forestry* 20(7): 961–969. ISSN 0045-5067.
 - 1992. An optimization model for Norway spruce management based on individual-tree growth models. Seloste: Kuusikon käsittelyn optimointi puittaisiin kasvumalleihin perustuen. *Acta Forestalia Fennica* 232. 20 s. ISBN 951-40-1263-1, ISSN 0001-5636.
 - 1993. Stand management optimization based on growth simulators. The Finnish Forest Research Institute. Research papers 453. 51 + 81 s. ISBN 951-40-1279-9, ISSN 0358-4283
- Vuokila, Y. 1987. Metsänkasvatuksen perusteet ja menetelmät. 2. painos. WSOY, Porvoo. 258 s. ISBN 951-0-09916-3.
- & Väliaho, H. 1980. Viljeltyjen havumetsiköiden kasvatusmallit. Summary: Growth and yield models for conifer cultures in Finland. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 99(2): 1–271. ISBN 951-40-0452-3, ISSN 0026-1610.

Total of 45 references

Summary

Simultaneous optimization of thinnings and rotation of cultivated stands using dynamic programming

Artificial regeneration increased in Finland rapidly during the early 1960's. At the end of 1990 the total area regenerated either by planting or by seeding was 20 per cent of the whole forest land, i.e. 4.2 million hectares. The first artificially regenerated stands have reached the phase of harvesting. The future management problems of these stands are: how much timber to cut and when (the problem of optimal growing density over time) and when to regenerate a stand (the optimal rotation problem). Both the problems are the same for naturally regenerated stands, but differences in regeneration costs and in growth and yield may cause divergent optimal solutions. Therefore, this study deals only with artificially regenerated stands.

The aim of this study is to formulate an optimization model for cultivated stands. The study is based on stand level analyses, and the objectives of maximization are soil expectation value, forest rent and mean annual increment. The studied tree species are Scots pine, Norway spruce and silver birch.

A stand simulator for the optimization model was developed using the models of Vuokila & Väliäho (1980) for pine and spruce and the models of Oikarinen (1983) for silver birch. These models have been made especially for cultures. The self-thinning models of Hynynen (1991) were applied to limit the maximum density of stand (figure 2). All the used models are whole-stand diameter-free type and they are presented in Appendix 2. The simulation went on by 5-year time periods and basal area growth and height growth were the driving equations. Thinning, no thinning, and clear cutting were the possible management actions during the simulation (figure 1). The actions occurred in the beginning of each period. Thinnings were made either 1 m² or 50 trees (first thinning) intervals. It was able to derive the optimal thinning regime and rotation simultaneously considering clear cutting as a total thinning. Thinning alternatives were thus 1, 2, 3,..., G_{\max} or 50, 100, 150,..., N_{\max} . However, the minimum thinning removal was 20 m³. The volumes were estimated multiplying basal area by height and form factor.

The study covers the whole rotation, but the applicability of the growth models begins at the age of 10–25 years depending on tree species and site type. It was assumed, that the silvicultural work and the unit prices listed in Appendices 3a–3b led to the growth models.

The study was based on the sales at stumpage (Appendices 4a, 4c) and therefore the logging costs were omitted. However, some calculations were also made using delivery prices (Appendix 4b) and average logging costs (Appendix 4d). The price level was assumed to be constant over time. The change of stumpage prices was studied applying sensitivity analyses. The SEV-calculations were carried out using 1 or 3 per cent interest rate.

Stand level growth models, discrete thinnings, non-differentiable equations with regard state variables and the forms of prices and costs led to the use of discrete-time, discrete-state dynamic programming. The solution procedure was formulated using forward recursion, and the state variables were basal area, number of trees and age (formula 2.2 and Appendix 5). The solution algorithm was made more effective using the neighborhood storage location method: the state space was discretized with intervals $G = 1 \text{ m}^2/\text{ha}$, $N = 20$ trees and time interval was 5 years. The computational method resembles that of presented Brodie & Kao (1979). [There are several studies covering the applications of dynamic programming in forestry, of which the most recent one is Valsta (1993).]

The aim of this study was to formulate an optimization model and the purpose of presented numerical results, is to show the capabilities of the model. The optimal growing densities of Scots pine and Norway spruce stands (Appendix 1) were found out to be very high for all studied objectives (figures 3–6). Coniferous stands were growing near the self-thinning boundary and thinnings happened just before the mortality due to the over density occurred. The first thinnings were postponed to the dominant height of 18–22 meters. The small range of saw timber stumpage prices caused, that it was profitable to grow as many trees as possible at least up to the minimum size of saw timber. Economic returns generated from pulpwood thinnings were thus smaller than the losses of value growth of thinned trees. The expansion of the stumpage price adjustment caused by removed volume (App. 4c), or the use of delivery prices (App. 4b) and the logging costs that were dependent on average stem size (App. 4d) did not affect the results, neither the changes of prices if they happened for the benefit of saw timber. The relative increase of pulpwood prices caused heavier thinnings and shorter rotations.

For all economic objectives the best management alternative of silver birch stand was a very heavy thinning at the seedling stand phase (figure 7). The price gap between veneer log and pulpwood was so huge and the percentage of pulpwood according to the assortment models so small, that it was profitable to grow only veneer logs. However, "growing of pulpwood" became profitable with higher pulpwood and lower veneer log prices (figure 8). Silver birch was also grown near the self-thinning boundary when the objective was to maximize mean annual growth.

There are several shortages, which make the numerical results and thus the applicability of the optimization model questionable. In reality, after thinning of overstocked stand the probability of storm and snow damages will grow, likewise the possibility of total damage increases in sparse birch stand, for example due to the moose eating. These phenomena were missing from the simulator. The simulator did not take into account either the possibility, that the growth does not necessarily follow the models after a thinning of overstocked stand, but it will stagnate due to the poor crown condition. Therefore an ad hoc growth recovery model was installed into the simulator. The ad hoc model activated, if thinning happened above 70 per cent range of self thinning boundary and the growth will stagnate during the next 5-year period. The ad hoc growth recovery model changed the optimal management regimes of conifers very much (figures 8–9, table 2). First thinnings were carried out for example at the dominant height of 13–15 meters. There are also some open questions concerning the used timber assortment models: 1) The models may overestimate in dense stands the stem size development, because they are based solely on the stands, which were growing at a much lower level. 2) The models did not take either into account the quality of stem, because they are based only on the mean size of stems.

The results of this study differ clearly from the earlier knowledge and from the present guidelines of the private forestry administration (Central Forestry Board Tapio). Therefore, the shortages mentioned above have to be studied more thoroughly, before the optimization model has some practical importance.

Lähtöpuustojen alkuarvot
Initial stand characteristics

Puulaji <i>Tree species</i>	Kasvupaikka <i>Site type</i>	Muuttuja <i>Character</i>			
		T	Hdom	G	N
Mänty <i>Scots pine</i>	H100	15	5,7	9,1	2000
		20	7	11,1	2000
		20	5,6	6,3	1800
Kuusi <i>Norway spruce</i>	H100	20	7	7,4	2200
		25	7,7	8,4	2000
		25	5,9	3,1	2000
Rauduskoivu <i>Silver birch</i>	H100	10	6,9	3	2000
		15	9,1	6,8	2000
		15	7,1	3,6	2000

T = Ikä - *Age*
Hdom = Valtapituus - *Dominant height*
G = Pohjapinta-ala - *Basal area*
N = Runkoluku - *Number of trees*
* Kasvupaikka - *Site type* = H50

Puuston kehitys- ja puutavaralajimallit.
The growth and timber assortment models.

a) Pohjapinta-alan kasvumallit - *Basal area growth models*

Mänty - *Scots pine* (Vuokila & Väliaho 1980)

$$P_G = -0,89537 + 0,0019059 \cdot (H_{100})^2 + 730,26 / (H_{dom}^{0,3} \cdot G_u^{0,4} \cdot T^\alpha) + 363780 / (H_{dom}^{0,3} \cdot G_u^{0,4} \cdot T^\alpha)^3$$

$$\alpha = 0,8 + H_{100} / 175$$

Kuusi - *Norway spruce* (Vuokila & Väliaho 1980)

$$P_G = -0,099776 + 3256,7 / (H_{dom}^{0,5} \cdot G_u^{0,6} \cdot T^{0,9}) - 31736 / (H_{dom}^{0,5} \cdot G_u^{0,6} \cdot T^{0,9})^2$$

Rauduskoivu - *Silver birch* (Oikarinen 1983)

$$1) P_V = 14832 / T^{2,2} + 3140,5 / V$$

$$2) G = 2,2958 \cdot V / H_{dom}$$

b) Valtapituuden kasvumallit - *Dominant height increment models*

Mänty - *Scots pine* (Vuokila & Väliaho 1980)

$$P_{H_{dom}} = -0,40006 + 434,52 / (H_{dom}^{0,4} \cdot T^{1,1}) - 124,51 \cdot 1 / (H_{dom}^{0,4} \cdot T^{1,1})^2$$

Kuusi - *Norway spruce* (Vuokila & Väliaho 1980)

$$P_{H_{dom}} = -0,41018 + 616,40 / (H_{dom}^{0,55} \cdot T^{1,05}) - 3592,9 / (H_{dom}^{0,55} \cdot T^{1,05})^2$$

Rauduskoivu - *Silver birch* (Oikarinen 1983)

$$P_{H_{dom5}} = -0,103 + 3177,4 / (T + 4,5)^{1,5} + 802,8 / H_{dom}^{1,8} - 3,99 \cdot [(H_{dom} + 34,7) / T]^{1,2}$$

c) Luonnonpoistumamallit – *Self thinning models*

Mänty – *Scots pine* (Hynynen 1991)

$$\ln D_g = 2,222 + 1,426 \cdot \ln H_{100} - 0,166 \cdot \ln H_{100} \cdot \ln N$$

Kuusi – *Norway spruce* (Hynynen 1991)

$$\ln D_g = 1,552 + 1,726 \cdot \ln H_{100} - 0,174 \cdot \ln H_{100} \cdot \ln N$$

Rauduskoivu – *Silver birch* (Hynynen 1991)

$$\ln D_g = 2,651 + 1,043 \cdot \ln H_{50} - 0,135 \cdot \ln H_{50} \cdot \ln N$$

c) Muotolukumallit – *Form factor models*

Mänty – *Scots pine* (Vuokila & Väliäho 1980)

$$F_{Hdom} = 0,49372 - 0,0016280 \cdot H_{dom} + 4,4746 / (T \cdot G)$$

Kuusi – *Norway spruce* (Vuokila & Väliäho 1980)

$$\ln F_{Hdom} = -0,042807 \cdot \ln G - 0,049259 \cdot \ln N - 0,087706 \cdot \ln H_{100}$$

$$\text{Rajoitus – Constraint: max. } F_{Hdom} = 0,5$$

Rauduskoivu – *Silver birch* (Oikarinen 1983)

$$F_{Hdom} = 0,43433 + 4,8749 / (D_g \cdot H_{dom})$$

d) ”Harvennusmallit” – ”*Thinning models*”

Mänty – *Scots pine* (Vuokila & Väliäho 1980)

$$R_G = 2,1070 - 0,078991 \cdot H + 1,10126 \cdot R_V$$

$$R_N = -0,25627 + 1,1320 \cdot R_V + 0,26511 \cdot N/G - 0,86598 \cdot N/V$$

Kuusi – *Norway spruce* (Vuokila & Väliaho 1980)

$$R_G = 2,3851 \cdot c_1 + 1,4000 \cdot c_2 + 1,0016 \cdot R_V$$

$$R_N = -22,134 \cdot c_1 - 25,383 \cdot c_2 + 1,1842 \cdot R_V + 0,97946 \cdot H \\ + 0,42868 \cdot N/G - 1,1804 \cdot N/V$$

$$c_1 = 1, \text{ ensiharvennus – first thinning, muuten – otherwise} = 0$$

$$c_2 = 0, \text{ ensiharvennus – first thinning, muuten – otherwise} = 1$$

e) Puutavaralajimallit – *Timber assortment models*

Mänty – *Scots pine* (Vuokila & Väliaho 1980)

$$\ln(1 - S \% / 96) = 0,42486 - 5,21294 \cdot v - 0,0037506 \cdot T$$

$$W \% = -0,13864 + 0,31264 / [(1000 \cdot v - 9,82) / 1200]^{0,9}$$

Kuusi – *Norway spruce* (Vuokila & Väliaho 1980)

$$\ln(1 - S \% / 95) = 1,2543 - 4,4921 \cdot v - 0,10810 \cdot H_{\text{dom}} + \\ 0,0027574 \cdot H_{\text{dom}}^2$$

$$W \% = -0,10455 + 306,394 / (1000 \cdot v - 3,76)$$

Rauduskoivu – *Silver birch*

$$S \% = 256,82 \cdot (V / N - 0,11) - 345,19 \cdot (V / N - 0,11)^3$$

$$\text{Rajoitus - Constraint: } V/N > 0,6 \text{ m}^3 \rightarrow V/N = 0,6 \text{ m}^3$$

(Oikarinen 1983)

$$\ln(W \% - 0,15) = -1,199 - 1,275 \cdot \ln v - 0,1522 \cdot 10^{-7} \cdot \\ (0,7526 - \ln v)^{10} - 0,1445 \cdot 10^{-11} \cdot (5,356 + \ln v)^{15}$$

(Kilkki & Siitonen 1975)

Merkinnot – *Symbols*

P_G = tulevan 5-vuotiskauden keskimääräinen vuotuinen pohjapinta-alan kasvuprosentti – *mean annual increment percentage of basal area during the following 5-year period* – %/a

P_V	= tulevan 5-vuotiskauden keskimääräinen vuotuinen tilavuuden kasvuprosentti – <i>mean annual increment percentage of volume during the following 5-year period</i> – %/a
$P_{H_{dom}}$	= tulevan 5-vuotiskauden keskimääräinen vuotuinen valtapituuden kasvuprosentti – <i>mean annual increment percentage of dominant height during the following 5-year period</i> – %/a
$P_{H_{dom}5}$	= tulevan 5-vuotiskauden valtapituuden kasvuprosentti – <i>increment percentage of dominant height during the following 5-year period</i> – %/5a
$F_{H_{dom}}$	= puuston valtapituuteen perustuva muotoluku – <i>form factor determined using dominant height</i>
V	= puuston tilavuus – <i>stand volume</i> – m^3/ha
v	= metsikön puiden keskikoko – <i>mean size of all trees</i> – m^3
H_{dom}	= metsikön valtapituus – <i>dominant height</i> – m
G	= metsikön kuorellinen pohjapinta-ala – <i>stand basal area incl. bark</i> – m^2/ha
G_u	= metsikön kuoreton pohjapinta-ala – <i>stand basal area excl. bark</i> – m^2/ha
T	= metsikön biologinen ikä – <i>biological age of the stand</i> – a
N	= runkoluku, kpl/ha – <i>number of trees per hectare</i>
D_g	= pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta – <i>mean diameter weighted by basal area</i> – cm
H_{50}	= valtapituusboniteetti, puuston valtapituus 50 vuoden iällä – <i>site index, dominant height at the age of 50 years</i>
H_{100}	= valtapituusboniteetti, puuston valtapituus 100 vuoden iällä – <i>site index, dominant height at the age of 100 years</i>
R_V	= tilavuuden poistoprosentti harvennuksessa – <i>per cent of cubic volume removed in thinning</i>
R_G	= pohjapinta-alan poistoprosentti harvennuksessa – <i>per cent of basal area removed in thinning</i>
R_N	= runkoluvun poistoprosentti harvennuksessa – <i>per cent of stems removed in thinning</i>
$S_{\%}$	= tukkipuuprosentti - <i>sawtimber percent</i> – %
$W_{\%}$	= hukkapuuprosentti - <i>wastewood percent</i> – %

a) Metsänuudistamistöiden tarve ja ajoittuminen
 a) Need and timing of silvicultural work due to the regeneration

Työlaji <i>Type of work</i>	Vuosia <i>Years from clear cutting</i>	% uudistusalaista <i>per cent of clear cutting area</i>	
		Mänty ja rauduskoivu* <i>Scots pine and silver birch*</i>	Kuusi <i>Norway spruce</i>
Raivaus <i>Clearing</i>	1	75	60
Maanmuokkaus <i>Scarification</i>	1	75	20 (OMT) 40 (MT)
Istutus <i>Planting</i>	2	100	100
Täydennysviljely <i>Complementary planting</i>	5	25 (MT) 15 (VT)	25
1. Ruohous <i>1st grass weeding</i>	3	45 (MT) 20 (VT)	35
2. Ruohous <i>2nd grass weeding</i>	3	35 (MT) 10 (VT)	20
3. Ruohous <i>3rd grass weeding</i>	4	10 (MT)	15
1. Taimikon perkaus <i>1st clearing of seedling stand</i>	8	80	90
2. Taimikon perkaus <i>2nd clearing of seedling stand</i>	12	70	60
3. Taimikon perkaus <i>3rd clearing of seedling stand</i>	15	10	30

VT = Puolukkatyyppi, *Vaccinium site type*, ~ H₁₀₀₋₂₄, *) H₅₀₋₂₂

MT = Mustikkatyyppi, *Myrtillus site type*, ~ H₁₀₀₋₂₇, *) H₅₀₋₂₄

OMT = Käenkaali–Mustikkatyyppi, *Oxalis–Myrtillus site type*, ~
 H₁₀₀₋₂₄, *) H₅₀₋₂₂

b) Metsänhoitotöiden keskimääräiset yksikkökustannukset.
 b) *The average unit cost per hectare of silvicultural work.*

Työlaji <i>Type of work</i>	mk/ha <i>FIM per hectare</i>
Raivaus <i>Clearing</i>	400
Maanmuokkaus 1 <i>Scarification 1</i>	850
Maanmuokkaus 2 <i>Scarification 2</i>	1050
Männyn istutus/taimi <i>Planting with Scots pine/seedling</i>	1.80
Kuusen istutus/taimi <i>Planting with Norway spruce/seedling</i>	1.95
Koivun istutus/taimi <i>Planting with silver birch/seedling</i>	2.30
Männyn kylvö <i>Seeding with Scots pine</i>	1500
Männyn täydennysistutus <i>Complementary planting with Scots pine</i>	1750
Kuusen täydennysistutus <i>Complementary planting with Norway spruce</i>	2200
Koivun täydennysviljely <i>Complementary planting with Silver birch</i>	2350
Ruohous <i>Grass weeding</i>	500
Taimikon perkaus <i>Cleaning of seedling stand</i>	850

Puutavaralajien yksikköhinnat
Unit prices by timber assortments

a) Kantohinnat
a) Stumpage prices

Puulaji <i>Tree species</i>	Kantohinta, mk/m ³ <i>Stumpage price, FIM/m³</i>	
	Tukki <i>Sawlog</i>	Kuitu <i>Pulpwood</i>
Mänty - <i>Scots pine</i>	225	100
Kuusi - <i>Norway spruce</i>	180	120
Koivu - <i>Silver birch</i>	230	85

b) Hankintahinnat
b) Delivery prices

Puulaji <i>Tree species</i>	Hankintahinta, mk/m ³ <i>Delivery price, FIM/m³</i>	
	Tukki <i>Sawlog</i>	Kuitu <i>Pulpwood</i>
Mänty - <i>Scots pine</i>	275	190
Kuusi - <i>Norway spruce</i>	235	215
Koivu - <i>Silver birch</i>	280	175

c) Kantohintojen korjaustekijät
c) Stumpage price adjustments

Järeyskorjaus

The adjustment caused by the average stem size

Tukkipuu <i>Sawtimber</i>		Korjaus, mk/m ³ <i>Adjustment, FIM/m³</i>	
Käyttöosa <i>The usable part of stem</i> m ³	Mänty ja koivu <i>Pine and birch</i>	Kuusi <i>Spruce</i>	
-0.300	-4	-8	
0.301-0.400	-2	-4	
0.401-0.500	0	0	
0.501-0.600	2	3	
0.601-	4	5	

Kuitu <i>Pulpwood</i>		Korjaus, mk/m ³ <i>Adjustment, FIM/m³</i>	
Keskiläpimitta, d _{1,3} <i>The average dbh</i> cm	Mänty ja koivu <i>Pine and birch</i>	Kuusi <i>Spruce</i>	
7	-25	-30	
9	-15	-20	
4	-5	-10	
13	0	0	
15	5	10	
17	10	20	
19+	15	30	

Tiheyskorjaus

The adjustment caused by the volume removed per hectar

Leimikon tiheys <i>The volume removed</i> m ³ /ha	Korjaus, mk/m ³ <i>Adjustment, FIM/m³</i>
-30	-8
31-60	-3
61-100	0
101-150	3
151-	5

d) Rungon keskikoon vaikutus manuaalisen korjuun kustannuksiin.
Peruskustannus on männyn avohakkuulle 45 mk/m³, muuten 55mk/m³
d) *Effect of average size of stems on manual logging costs. The base cost for clearcutting of pine is 45 FIM/m³, otherwise 55 mk/m³.*

Lähde – *Source*: Harvennushakkuiden ... 1992

Rungon keskikoko <i>The average size of stem</i> m ³	Lisäkustannus mk/m ³ <i>Extra cost, FIM/m³</i>	
	Mänty <i>Pine</i>	Kuusi <i>Spruce</i>
-0.025	-80	-110
0.025-0.050	-50	-70
0.051-0.075	-25	-40
0.075-0.100	-15	-30
0.101-0.150	-12	-20
0.151-0.200	-10	-15
0.201-0.300	-4	-8
0.301-0.400	-2	-4
0.401-0.500	0	0
0.501-0.600	2	3
0.601-	4	5

Eteenpäin askeltava dynaamisen ohjelmoinnin algoritmi
Dynamic programming algorithm based on forward recursion

$$R_0^*(G_0^y, N_0^y \mid Hdom_0) \leftarrow 0$$

$$optval \leftarrow R_0^*(G_0^y, N_0^y \mid Hdom_0)$$

$$M^*((G_0^x, N_0^x \mid Hdom_0), 0) \leftarrow \emptyset$$

while $j = 1, j_{\max}$ *do*

$\forall m_j \in \{G_j^x, N_j^x \mid Hdom_j\}$ *do*

$$R_j((G_j^y, N_j^y \mid Hdom_j), m_j) \leftarrow r_j((G_j^x, N_j^x \mid Hdom_j), m_j) \\ + R_{j-1}^*(G_{j-1}^y, N_{j-1}^y \mid Hdom_{j-1})$$

$$R_j^*(G_j^y, N_j^y \mid Hdom_j) \leftarrow \max_{m_j} R_j((G_j^y, N_j^y \mid Hdom_j), m_j)$$

$$M^*((G_j^x, N_j^x \mid Hdom_j), j) \leftarrow M^*((G_{j-1}^x, N_{j-1}^x \mid Hdom_{j-1}), n-1) \cup m_j^*$$

if

$$\frac{R_j^*(G_j^y = 0, N_j^y = 0 \mid Hdom_j)}{(1+i)^n - 1} > optval$$

then

$$optval \leftarrow \frac{R_j^*(G_j^y = 0, N_j^y = 0 \mid Hdom_j)}{(1+i)^j - 1}$$

$$optchain \leftarrow M^*((G_i^x, N_i^x \mid Hdom_i), i) \quad i = 1, \dots, j$$

$$optrot \leftarrow j$$

endif

$\forall \notin \{G_j^y = 0, N_j^y = 0 \mid Hdom_j\}$

$$G_{j+1}^x \leftarrow G_j^y + g(\cdot)$$

$$N_{j+1}^x \leftarrow N_j^y$$

$$Hdom_{j+1} \leftarrow Hdom_j + h(\cdot)$$

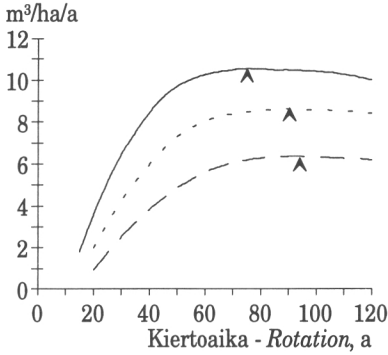
$$j \leftarrow j + 1$$

end

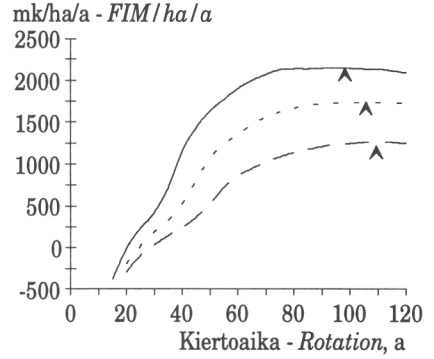
Tavoitemuuttujien kehitys kiertoajan suhteen (perusajo)
The effect of rotation on objectives (base run)

a) Mänty – Scots pine

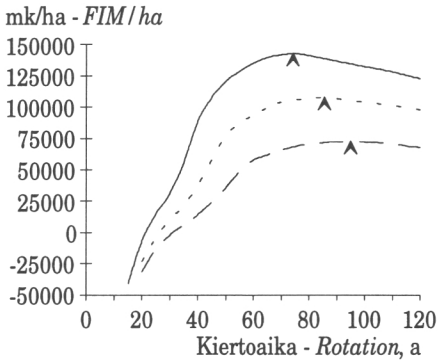
a) Keskimääräinen vuotuinen kasvu
Mean annual increment



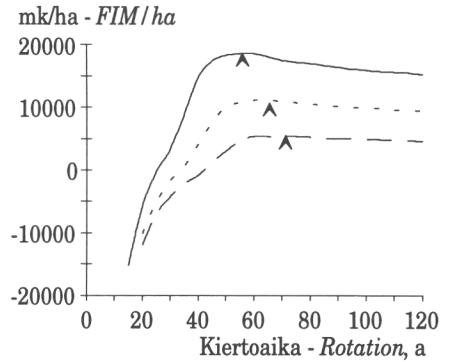
b) Keskim. vuotuinen metsänkorko
Mean annual forest rent, 0 %



c) Maanarvo
Soil expectation value, 1 %

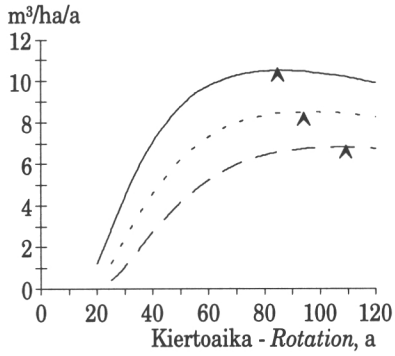


d) Maanarvo
Soil expectation value, 3 %

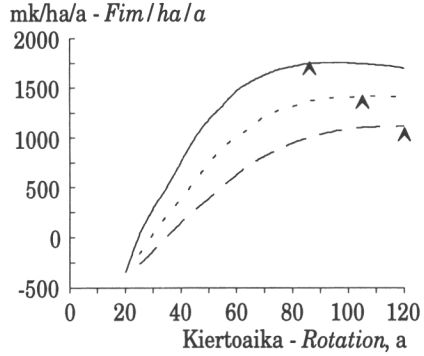


b) Kuusi – Norway spruce

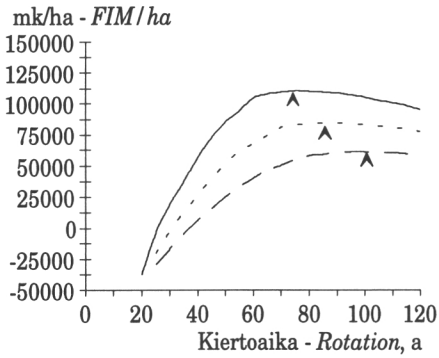
a) Keskimääräinen vuotuinen kasvu
Mean annual increment



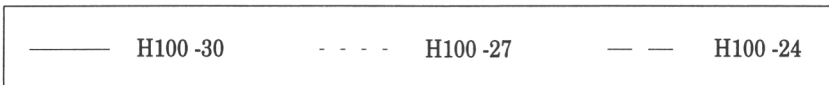
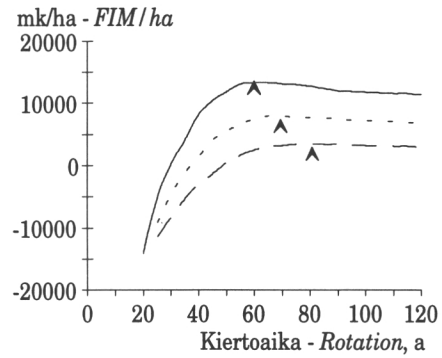
b) Keskim. vuotuinen metsänkorko
Mean annual forest rent, 0 %



c) Maanarvo
Soil expectation value, 1 %



d) Maanarvo
Soil expectation value, 3 %





**Metsien käytön tutkimusosastolla ilmestyneet
Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja –sarjan
viimeisimmät julkaisut:**

- 454 Seppälä, Heikki. 1993. Metsäteollisuus 2010. Arvio Suomen metsäteollisuudesta ja sen puunkäytöstä.
- 455 Elovirta, Pertti. 1993. Metsätyömarkkinoiden rakennemuutos ja metsäalalle rekrytoituminen.
- 456 Antikainen, Minna. 1993. Metsämaiseman suunnittelu Kolin kansallispuistossa.
- 459 Toropainen, Mikko. 1993. Metsäsektorin muutosten työllisyysvaikutukset 1989–1997.
- 465 Sievänen, Tuija. 1993. Kolin kansallispuiston kävijät. Abstract: Visitors in Koli National Park.
- 467 Kangas, Jyrki & Karsikko, Jari. 1993. Metsäkanalintujen elinympäristövaatimukset, metsänhoito ja metsäsuunnittelu.
- 471 Palo, Matti & Hellström, Eeva (toim.). 1993. Metsäpolitiikka valinkauhassa.
- 472 Pesonen, Mauno & Räsänen, Petri. 1993. Metsäverovalinta – strateginen ratkaisu.
- 473 Seppälä, Heikki & Siekkinen, Virpi. 1993. Puun käyttö ja hiilitasapaino. Tutkimus puun käytön vaikutuksesta hiilen kiertokulkuun Suomessa 1990.
- 474 Uotila, Esa, Kakkuri, Eero & Toivanen, Erja. 1993. Hankintahakkuut metsien pinta-alaverotuksessa.
- 475 Metsäsektorin ajankohtaiskatsaus 1993.
- 476 Laitinen, Jarmo. 1993 Metsäalan työttömien yritysajat ja yrittäjäkoulutustarve.



411 011

Kierrätykseen sopiva tuote
Alhaiset päästöt valmistuksessa

Hakapaino Oy, Helsinki 1994

ISBN 951-40-1334-4

ISSN 0358-4283