



■ Mikko Kurttila



■ Timo Pukkala

Mikko Kurttila ja Timo Pukkala

## Tilatason metsäsuunnitelman koostaminen metsikkötason optimoinnilla

**Kurttila, M. & Pukkala, T.** 2009. Tilatason metsäsuunnitelman koostaminen metsikkötason optimoinnilla. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2009: 341–355.

Tutkimuksessa esiteltiin tila- ja metsikkötason tarkastelut yhdistävä suunnittelumenetelmä, jossa metsiköiden käsittelyohjelmien määrittämiseen vaikuttavat paitsi metsikkötason tavoitemuuttujien arvot myös tilatason rajoitteet. Metsikkötason optimointiongelmia tehtiin toisistaan riippuviksi tilatason rajoitteiden varjohintojen avulla. Rajoitteiden avulla voidaan vaikuttaa esimerkiksi hakkuumäärien ajalliseen jakautumiseen. Menetelmän etu on jatkuvien metsikkötason päätösmuuttujien käyttö, jolla tarkoitetaan sitä, että ne voivat saada lähes minkä tahansa arvon niiden vaihteluväliltä. Tämä tuo tehokkuusetuja verrattuna normaaliin tilatason suunnittelumalliin, jossa metsiköille simuloidaan etukäteen rajallinen määrä käsittelyvaihtoehtoja. Menetelmän toimintaa havainnollistettiin kahdelle esimerkkitilalle tehdyillä laskelmilla, joissa esitellyn menetelmän ja tyypillisten käytössä olevien suunnittelumallien eroksi nykyarvolla mitattuna tuli noin 20 %. Tämä ero johtui suurelta osin siitä, että esitellyssä mallissa kunkin metsikön käsittely valitaan periaatteessa kaikkien mahdollisten vaihtoehtojen joukosta, kun taas perinteisissä suunnittelumalleissa valitaan paras muutamasta etukäteen tuotetusta käsittelyvaihtoehdosta. Jatkuvien päätösmuuttujien käyttö tuo lisää joustavuutta ja tarkkuutta käsittelyjen määrittelyyn. Menetelmän suurin ongelma on rajoitemuuttujien suuri herkkyys varjohinnoille joissakin suunnitteluongelmissa, minkä vuoksi menetelmä ei aina päädy käypään ratkaisuun, vaikka sellainen olisi olemassa. Näissä tilanteissa suunnittelijan tulee muuttaa menetelmän parametreja, mikä vaatii ammattitaitoa.

Asiasanat: aligradienntimenetelmä, Hooke-Jeeves-menetelmä, metsälötason optimointi, metsäsuunnittelu, redusoitu kustannus, varjohinta

Yhteystiedot: *Kurttila*, Metsäntutkimuslaitos, Joensuun yksikkö, PL 68, 80101 Joensuu; *Pukkala*, Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta, PL 111, 80101 Joensuu

Sähköposti [mikko.kurttila@metla.fi](mailto:mikko.kurttila@metla.fi)

Hyväksytty 29.6.2009

Saatavissa: <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff09/ff094341.pdf>

## I Johdanto

**Y**ksittäisen metsikön käsittelyä optimoitaessa haetaan optimaalisia arvoja päätösmuuttujille, joita ovat mm. harvennusten ajankohdat, harvennustapa ja -voimakkuus sekä päätehakkuun ajankohta (esim. Valsta 1993). Koska päätösmuuttujat voivat saada lähes minkä tahansa arvon niiden vaihteluväliltä, on kyseessä jatkuvien päätösmuuttujien optimointiongelma. Käytettäessä metsikön käsittelyohjelman määrittelyssä esim. dynaamista ohjelmointia, käytetään kuitenkin diskretoituja päätösmuuttujia (esim. Valsta 1986).

Yksittäisen metsikön käsittelyohjelma optimoidaan usein rajoittamattomasti, jolloin esimerkiksi kiertoaika ja harvennusvoimakkuutta ei rajoiteta etukäteen. Tarvittaessa päätösmuuttujien vaihteluväliä voidaan kyllä rajoittaa joko sakkofunktioita tai ehdottomia rajoitteita käyttäen. Käsittelyohjelmaksi etsitään sellainen päätösmuuttujien arvojen yhdistelmä, joka tuottaa optimoinnissa käytetylle tavoiteyhtälölle suurimman mahdollisen arvon. Tarkasteltavaa aikajännettä ei ole sidottu suunnittelu-kauteen, vaan sen pituus on yleensä nykyhetkestä kunkin metsikön uudistamishetkeen saakka. Jakson pituus siis vaihtelee metsiköittäin.

Tila- tai aluetason metsäsuunnittelussa puolestaan haetaan optimaalista käsittely-yhdistelmää kaikille suunnittelualueen metsiköille. Optimointiongelma on yleensä muotoiltu ja toteutettu kombinoitioingelman, joka yleensä tarkoittaa metsiköille etukäteen simuloidun käsittelyvaihtoehtojen optimaalisen yhdistelmän hakemista asetettujen tila- tai aluetason tavoitteiden suhteen. Metsiköiden käsittelyvaihtoehtoja on tällöin rajallinen määrä ja käsittelyjen ajankohdat samoin kuin metsiköiden käsittelytavat (esim. harvennustapa ja voimakkuus) on määritetty etukäteen. Optimointi voi olla kokonaislukuoptimointia, jossa päätösmuuttujat voivat saada vain arvon 1 tai 0 sen mukaan, valitaanko käsittelyohjelma suunnitellaan vai ei. Jos tehtävä ratkaistaan lineaarisella ohjelmoinnilla eikä päätösmuuttujia määritellä kokonaisluvuiksi, päätösmuuttujat ovat jatkuvia, ja pieni osa metsiköitä tulee yleensä jaetuksi kahteen tai useampaan osaan, joita käsitellään eri tavoin.

Metsäalueen metsiköiden käsittely-yhdistelmää optimoitaessa suunnittelujakson pituus on määritelty etukäteen. Suunnittelujakso on lisäksi jaettu useisiin

suunnittelukausiin. Esimerkiksi yksityismetsien metsäsuunnittelussa suunnittelujakson pituus on yleensä kymmenen vuotta ja se on jaettu kahteen viisivuotiskauteen (lisäksi käytetään aikakäsitettyä kiireellinen, joka tarkoittaa että tietyn metsikön käsittely tulisi toteuttaa ensimmäisen vuoden aikana). Toisaalta suunnittelujakson pituus voi olla myös vaikkapa sata vuotta, joka on jaettu sataan yhden vuoden kauteen. Alueen metsiköille simuloidaan ennen optimointia vaihteleva määrä käsittelyvaihtoehtoja koko suunnittelujaksolle. Metsiköiden käsittelyt simuloidaan yleensä kunkin suunnittelukauden puoliväliin. Käsittelyvaihtoehtojen määrä riippuu suunnittelujakson pituudesta, kausien lukumäärästä, metsikön ominaisuuksista ja simuloinnin ohjausparametreista. Käsittelyvaihtoehtojen simulointia voidaan ohjata mm. siten, että käsittely toteutetaan aikaisintaan silloin, kun sitä voimassa olevissa metsänhoitosuosituksissa suositellaan. Näiden aikaisimpien mahdollisten käsittelyjen lisäksi kuvioille simuloidaan usein viivästettyjä käsittelyjä, joissa harvennus tai uudistamisketju toteutetaan aikaisinta mahdollista toteutuskautta myöhemmillä kausilla. Aluetason suunnittelulaskelmien ongelmana voidaan pitää simuloidun käsittelyvaihtoehtojen pientä määrää sekä niiden mahdollista epäsopevuutta omistajan tavoitteisiin.

Jos metsäsuunnitelma halutaan koostaa metsikkötason optimoinnilla, ongelmaksi muodostuu tilan metsiköiden välisten riippuvuuksien huomioon ottaminen. Jos omistajalla on tavoitteena vaikkapa puuntuotannon maksimointi, voidaan tilan kaikkien metsiköiden käsittely hakea metsikkötason optimoinnilla, sillä metsiköiden välisiä riippuvuuksia ei ole. Käytännössä riippuvuuksia voivat kuitenkin aiheuttaa liian pienet hakkuualat ja -kertymät yhdestä metsiköstä. Tämän seikan huomioiminen edellyttäisi esimerkiksi sitä, että pinta-alaltaan ja kertymältään liian pienet metsiköt yhdistetään leimikoiksi, jotka hakataan yhtä aikaa (esim. Lu ja Eriksson 2000, Pukkala ym. 2009). Usein omistajilla on metsästä saatavan tulovirran tai hakkuukertymän ajoitukseen liittyviä tavoitteita (esim. tulojen tasaisuus), jota ei voida ottaa huomioon yksittäisen metsikön käsittelyohjelmaa määrittäessä. Tämän tyyppiset tavoitteet edellyttävät koko alueen metsiköiden yhtäaikaista tarkastelua.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on esitellä metsikkötason optimointiin perustuva menetelmä aluetason metsäsuunnitelman laadintaa varten. Menetel-

mässä optimoidaan suunnittelualueen metsiköiden käsittelyohjelmat ottaen samalla huomioon päätöksentekijän koko suunnittelualueelle asettamia tavoitteita. Esiteltävästä menetelmästä käytetään tässä artikkelissa nimitystä ”RC-malli” käytetyn optimointimenetelmän perusteella. Menetelmän tuloksia verrataan erilaisten LP-mallien antamiin tuloksiin.

## 2 Aineisto ja menetelmät

### 2.1 RC-malli

RC-mallin metsikkötason optimoinnin tehtävänä oli löytää hakkuille sellaiset ajankohdat ja voimakkuudet, jotka maksimoivat metsikön nykyarvon. Tässä tutkimuksessa nykyarvo ( $NA$ ) laskettiin 3 %:n korkokannalla seuraavalla kaavalla (1):

$$NA = \sum_{y=0}^Y \left( \frac{N_y}{(1+i)^y} \right) + \frac{TA_{\text{paljas}}}{(1+i)^Y} \quad (1)$$

missä  $y$  on vuosi-indeksi (vuosien lukumäärä nykyhetkestä eteenpäin),  $Y$  on vuosien lukumäärä nykyhetkestä avohakkuuseen,  $N_y$  vuonna  $y$  saatavat nettotulot,  $i$  korkokanta (sadannes) ja  $TA_{\text{paljas}}$  on paljaan maan arvo, joka laskettiin Pukkalan (2005) malleilla.

Hakkuiden ajankohtien ja voimakkuuksien määrittämiseksi käytettiin seuraavia päätösmuuttujia:

Harvennus

- Ajankohta (vuosia nykyhetkestä tai edellisestä hakkuusta)
- Kunkin puusto-ositteen (puulajin tai latvuskerroksen) harvennusvoimakkuus (%)

Päätehakkuu

- Ajankohta (vuosia nykyhetkestä tai viimeisestä harvennuksesta)

Harvennuksissa poistettiin saman verran puita tietyn puusto-ositteen kaikista läpimittaluokista (tasaharvennus). Koska puusto-ositteet voivat olla rakenteeltaan erilaisia, voidaan erirakenteisissa metsiköissä käytännössä kuitenkin tehdä myös ylä- tai alaharvennus, mikäli se on optimaalista. Päätehakkuu simuloitiin aina avohakkuuna, ts. säästö-

siemen-, suojus- tai verhopuita ei jätetty. Jäljellä olevien harvennusten lukumäärä laskettiin malleilla. Mallin aineistona käytettiin yhteensä 643:n ominaisuusiltaan erilaisen metsikön tunnuksia, joista 244 oli männikköjä, 166 kuusikkoja ja 233 koivikkoja. Kunkin metsikön käsittelyohjelma optimoitiin maksimoiden nykyarvoa korkokannoilla 1 ja 3 % vaihdellen harvennuskertojen määrää (0, 1, 2 ja 3 harvennusta). Näistä tuloksista valittiin korkeimman nykyarvon tuottava harvennuskertojen määrä mallin selitettäväksi muuttujaksi. Mahdollisina selittäjinä käytettiin erilaisia metsikkötunnuksia, niiden muunnoksia ja korkokantaa. Tulokseksi saatiin eri puulajeille seuraavat harvennuskertojen mallit (korkokanta ei ollut merkitsevä selittäjä):

Mänty:

$$NH = 3.629 - 0.091D + 0.574\ln(G) - 0.495\ln(T) \quad (2)$$

$(R^2=0,611 \text{ } s_e=0,702)$

Kuusi:

$$NH = 3.011 - 0.839\ln(D) + 0.684\ln(G) - 0.017T \quad (3)$$

$(R^2=0,308 \text{ } s_e=0,907)$

Koivu:

$$NH = 1.629 - 0.078D + 0.363\ln(G) \quad (4)$$

$(R^2=0,245 \text{ } s_e=0,977)$

missä  $NH$  on jäljellä olevien harvennusten lukumäärä,  $D$  on pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimittana (cm),  $G$  pohjapinta-ala ( $\text{m}^2/\text{ha}$ ) ja  $T$  pohjapinta-alalla painotettu keski-ikä. Mallin ennuste pyöristettiin lähimpään kokonaislukuun ja loogisuustarkastuksilla huolehdittiin siitä, ettei malli anna epärealistisia arvoja ( $<0$  ja  $>3$ ). Jos metsikön pisin puusto-osite oli yli kaksi kertaa pidempi kuin lyhin osite, mallin antamaan harvennuskertojen määrään lisättiin yksi harvennus. Mikäli metsikössä oli useampia puulajeja, harvennuskerrat määritettiin sen puulajin mallilla, jonka osuus pohjapinta-alasta oli suurin. Metsikkötason optimoinnissa voidaan päätyä ratkaisuun, jossa kaksi tai useampia hakkuuta toteutetaan yhtä aikaa (esim. samanaikaisesti harvennus ja päätehakkuu, jos se on tavoitemuuttujan arvon perusteella kannattavampaa kuin kiertoajan jatkaminen), joten käytännössä yo. mallit määrittävät harvennuskertojen maksimimäärän metsikkötunnusten perusteella.

Metsikkötason päätösmuuttujien optimiarvot haettiin Hooken ja Jeevesin (1961) epälineaarisen optimoinnin menetelmällä. Optimoinnissa lähdettiin liikkeelle ohjelman generoimasta alkuratkaisusta, jossa kiertoaika oli 100 vuotta, harvennukset olivat tasaisin välein, ja kaikkien puusto-ositteiden harvennusvoimakkuus oli 30 %. Hooke-Jeeves-suorahaku etenee siten, että aluksi muutetaan yhtä päätösmuuttujaa kerrallaan tietyin askeleiden verran, ja kaikki muutokset, jotka parantavat tavoitemuuttujan arvoa, jäävät voimaan (exploratory search). Ensimmäisillä kokeillaan päätösmuuttujan arvon suurentamista ja ellei se paranna ratkaisua, kokeillaan pienentämistä. Tämän jälkeen edetään pattern search -vaiheeseen, jossa muutetaan useampaa päätösmuuttujaa yhtäaikaaisesti suunnassa, joka määräytyy sen mukaan, kuinka päätösmuuttujia muutettiin exploratory search -vaiheessa. Seuraavaksi askel, jolla päätösmuuttujia muutetaan, puolitetaan, minkä jälkeen alkaa uusi exploratory search ja sitä seuraava pattern search. Näin jatketaan siihen saakka, kunnes kaikkien päätösmuuttujien muutosaskel on pienempi kuin ennalta määritetty lopetuskriteeri. Tämän tutkimuksen optimoinneissa ensimmäinen askel oli 10 % harvennusvoimakkuuksille (0,1 kertaa muuttujan vaihteluväli, joka oli 100 %) ja 0,1 kertaa  $2 \times (100 - T) / (NH + 1)$  vuotta hakkuiden välisille ajoille (kuitenkin vähintään 0,1 kertaa 5 vuotta). Lopetuskriteeri oli 0,01 kertaa alkuaskel.

Tässä tutkimuksessa metsikkötason optimointiin yhdistettiin metsälötason tavoitteita. Menetelmä on Hogansonin ja Rosen (1984) esittelemä redusoitujen kustannusten (RC) menetelmä, jossa jokaisen kuvion  $j$  kohdalla maksimoidaan seuraavaa yhtälöä:

$$RC_j = NA_j - \sum_{k=1}^K v_k A_k \quad (5)$$

missä  $NA_j$  on kuviolle  $j$  yhtälöllä 1 laskettu nykyarvo,  $v_k$  ovat käytettyjen aluetason rajoitteiden varjohinnat ja  $A_k$  ovat rajoitemuuttujien arvot (ks. tarkemmin redusoitujen kustannusten johtaminen esim. Pukkala ym. 2009). Varjohinnat olivat aluksi nollia. Tässä tutkimuksessa käytettiin koko aluetta koskevia kolmen kymmenvuotiskauden kokonaishakuukertymärajoitteita. Rajoitteita oli kaikkiaan kuusi kappaletta, sillä kullekin 10-vuotiskaudelle tarvittiin sekä vähintään- että enintään-rajoite:

$$RC_j = NA_j - v_1 H_1 - v_2 H_2 - v_3 H_3 - v_4 H_1 - v_5 H_2 - v_6 H_3$$

missä  $H_i$  on kauden  $i$  hakkuumäärä. Ensimmäiset kolme varjohintaa ovat vähintään-rajoitteille ( $H_i \geq$  minimihakkuumäärä) ja loput kolme enintään-rajoitteille ( $H_i \leq$  maksimihakkuumäärä).

Ensimmäisen metsiköittäisen optimoinnin jälkeen laskettiin rajoitemuuttujien arvot koko alueelle. Niiden perusteella varjohinnoille laskettiin uudet arvot ( $v_{k,t+1}$ ) aligradienttimenelmässä (engl. sub-gradient method) käytetyllä tekniikalla (Beasley 1993):

$$v_{k,t+1} = v_{k,t} + 0.01 \times \sum_{j=1}^N RC_j \times \sum_{k=1}^K (B_k - A_{k,t})^2 \times \text{Askel}_k \times \text{Kerroin}_{k,t} \quad (6)$$

missä

$$\text{Kerroin}_{k,t} = \begin{cases} 0 & \text{jos } A_{k,t} = B_k \\ (A_{k,t} - B_k) / |A_{k,t} - B_k| & \text{jos } A_{k,t} \neq B_k \end{cases} \quad (7)$$

Päivitetyn varjohinnan oli oltava vähintään nolla ”pienempi tai yhtäsuuri” -tyypin rajoitteille ja enintään nolla ”suurempi tai yhtäsuuri” -tyypin rajoitteille. Symboli  $A_{k,t}$  tarkoittaa kuvioille optimoitujen käsittelyohjelmien tuottamaa rajoitemuuttujan  $k$  arvoa (tässä tutkimuksessa kausittaiset hakkuumäärät) optimointikierroksen  $t$  jälkeen ja symboli  $B_k$  rajoitemuuttujan  $k$  tavoitearvoa. Parametri  $\text{Askel}_k$  ilmoittaa varjohinnan  $k$  muutosnopeuden.  $N$  on metsiköiden ja  $K$  rajoitteiden lukumäärä.

Muutosaskeleen (Askel) alkuarvo oli kaikille rajoitteille 1. Askelpituudet puolitettiin, jos aluetason tavoitefunktio (yhtälö 8) ei parantunut 6 kierrokseen. Kierros eli iteraatio tarkoittaa sitä, että jokaiselle metsikölle haetaan kerran paras käsittelyvaihtoehto Hooke-Jeeves-menetelmällä. Aluetason tavoitefunktio, jota minimoidaan, on seuraava:

$$\text{OF}_{\text{alue}} = \sum_{j=1}^N RC_j + \sum_{k=1}^K v_k B_k \quad (8)$$

missä  $RC_j$  on metsikön  $j$  redusoitu kustannus,  $N$  metsiköiden lukumäärä,  $K$  rajoitteiden lukumäärä,  $v_k$  rajoitteen  $k$  varjohinta ja  $B_k$  rajoitteen  $k$  tavoitetaso.

Varjohintojen päivytyksen jälkeen metsiköille valittiin uudelleen paras käsittelyohjelma maksi-

moimalla redusoitujen kustannusten kaavaa (5). Näin jatkettiin, kunnes kaikki rajoitteet täyttyivät. Tuloksena oli sellainen käsittelyjen yhdistelmä, joka toisaalta maksimoi metsikkötason tavoiteyhtälöä mutta toisaalta täytti aluetason rajoitteet.

Metsiköiden kasvua simuloitiin Hynysen ym. (2002) malleilla. Metsikköä edustamaan generoitiin jokaista puusto-ositetta kohti 5 kuvauspuuta, joiden runkoluvut laskettiin samalla tavalla kuin Pukkalan ja Miinan (2005) tutkimuksessa on selostettu.

## 2.2 LP-mallit

LP-mallien mukaiset metsälötason laskelmat toteutettiin Monsu-metsäsuunnitteluohjelmistolla (Pukkala 2008). Ohjelman hinta- ja kustannusparametrien arvot määritettiin samoiksi kuin metsikkötason optimoinnissa. Myös simuloinnissa käytetyt luonnonprosesseja kuvaavat mallit olivat samat (Hynysen ym. 2002) ja kuvauspuut muodostettiin täsmälleen samalla tavalla kuin metsikkötason optimoinnissa. Männyn luontaisen uudistamisen vaihtoehdot säilytettiin karuimmilla (VT ja sitä karumpi) kasvupaikoilla, sillä niiden ero viljelyn antamaan nykyarvoon oli pieni.

LP-mallien tilataason suunnitelmat muodostettiin lineaarisella optimoinnilla. Suunnitelmien laatimisenä käytetty LP-malli voidaan esittää seuraavasti:

$$\max z = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} NA_{ij} x_{ij} \quad (9)$$

siten että

$$\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} a_{ijk} x_{ij} \geq l \leq B_k \quad k = 1, \dots, K \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{n_j} x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, N \quad (11)$$

$$x_{ij} \geq (0,1) \quad \forall ij \quad (12)$$

missä  $N$ =kuvioiden lukumäärä;  $n_j$ =kuviolle  $j$  simuloitujen käsittelyvaihtoehtojen määrä;  $x_{ij}$ =kuvion  $j$  osuus, joka käsitellään vaihtoehdon  $i$  mukaan;  $NA_{ij}$ =nykyarvo, jonka käsittelyvaihtoehto  $i$  tuottaa kuviolla  $j$ ;  $a_{ijk}$ =rajoitemuuttujan  $k$  (hakkuukertymä

kausien 1, 2 tai 3 aikana) määrä, jonka käsittelyvaihtoehto  $i$  tuottaa kuviolla  $j$ ;  $B_k$ =vähintään/enintään/tarkalleen vaadittu määrä tuotetta  $k$ ; sekä  $K$ =muiden kuin kuvioiden pinta-ala osuuksia kuvaavien rajoitteiden lukumäärä.

Kaikissa LP-malleissa suunnittelujakson pituus oli 30 vuotta. Niissä käytettiin kahta erilaista tavoiteyhtälöä. Metsäsuunnitelmassa 1 tavoitteena oli nykyarvon maksimointi 3 %:n korkokannalla ilman rajoitteita. Metsäsuunnitelmassa 2 pyrittiin nykyarvon maksimoimisen lisäksi suhteellisen tasaisiin hakkuukertymiin 10-vuotiskausilla lisäämällä tavoiteyhtälöön kolmea kautta koskevat hakkuumäärärajoitteet. Kaiken kaikkiaan erilaisia LP-malleja laadittiin viisi kappaletta. Niiden kuvaukset ovat seuraavat:

*LP 1:* Suunnittelukausi jakaantui kolmeen 10-vuotiskauteen. Tavoitteena oli nykyarvon maksimointi 3 %:n korkokannalla. Metsiköille simuloitiin normaaleja Tapion metsänhoitosuosituksia (Hyvän metsänhoidon suositukset 2006) mukaillen käsittelyvaihtoehtoja ja näistä viivästettyjä käsittelyjä. *LP 2:* Ensimmäisen suunnittelujakson pituutta lyhennettiin ja vastaavasti viimeistä jaksoa pidentettiin. Jaksojen pituudet olivat 3, 9 ja 18 vuotta. Metsiköille simuloitiin käsittelyvaihtoehdot Tapion metsänhoitosuosituksia (Hyvän metsänhoidon suositukset 2006) mukaillen ja näistä viivästettyjä käsittelyjä. Tavoitteena oli nykyarvon maksimointi 3 %:n korkokannalla. *LP 3:* Suunnittelujaksojen pituudet olivat 3, 9 ja 18 vuotta. Metsiköille simuloitiin käsittelyvaihtoehdot mukaillen Pukkalan (2006) tuloksia. Metsänhoitosuositusten (Hyvän metsänhoidon suositukset 2006) mukaiset uudistushakkuiden raja-arvot (läpimitta ja ikä) kerrottiin luvulla 0,9. Lisäksi harvennussalleja muokattiin siten, että 10 metrin valtapituudessa metsänhoitosuositusten mukainen harvennusta edeltävä pohjapinta-ala ("leimausraja") kerrottiin luvulla 1,2 ja harvennuksen jälkeinen pohjapinta-ala luvulla 1,1. Vastaavat kertoimet 24 metrin valtapituudessa olivat 0,8 ja 0,9. Väliarvot saatiin interpoloimalla. Lisäksi harvennukset tehtiin yläharvennuksina. Tavoitteena oli nykyarvon maksimointi 3 %:n korkokannalla. *LP 4:* Suunnittelukausi jaettiin kolmeen 10-vuotiskauteen. Metsiköille simuloitiin käsittelyvaihtoehdot Tapion metsänhoitosuosituksia (Hyvän metsänhoidon suositukset 2006) mukaillen ja näistä viivästettyjä käsittelyjä. Tavoitteena oli nykyarvon maksimointi siten, että

hakkuukertymät 10-vuotiskausilla olisivat suhteellisen tasaiset. *LP 5*: Suunnittelukausi jaettiin kolmeen 10-vuotiskauteen. Käsittelyvaihtoehdot simuloitiin samalla tavalla kuin *LP*-mallissa 3. Tavoitteena oli nykyarvon maksimointi siten, että hakkuukertymät 10-vuotiskausilla olisivat suhteellisen tasaiset.

Nykyarvo 3 %:n korkokannalla laskettiin *LP*-malleissa seuraavasti:

$$NA = \sum_{y=1}^{30} \left( \frac{N_y}{(1+i)^y} \right) + \frac{NA_{\text{Loppu}}}{(1+i)^{30}} \quad (13)$$

Koska käsittelyjä simuloitiin vain suunnittelujaksojen puoliväliin, mahdollisia  $y$ :n arvoja olivat 5, 15 ja 25 (*LP*-mallit 1, 4 ja 5) tai 1,5, 6 ja 15 (*LP*-mallit 2 ja 3).

Loppupuuston nykyarvon ( $NA_{\text{Loppu}}$ ) laskentaa varten tehtiin pelkästään tätä tutkimusta palveleva alueellisesti tarkennettu malli, koska se toimi nuorissa metsiköissä paremmin kuin Pukkalan (2005) yleinen malli. Mallin aineistona käytettiin yhteensä 1917 ominaisuuksiltaan erilaisen metsikön tunnuksia, jotka on mitattu kuvioittaisella arvioinnilla ja joita on käytetty useissa aiemmissä tutkimuksissa (mm. Pukkala ym. 1998, Kurttila ja Pukkala 2003, Pukkala 2005). Osa näistä metsiköistä oli puhtaita kuusikoita, koivikoita tai männiköitä (harvennusten lukumäärän mallituksessa käytetty aineisto), ja osa oli metsiköitä, joissa oli useampia puolajaja tai puusto-ositteita. Mahdollisina selittäjinä kokeiltiin erilaisia kuviotunnuksia sekä niistä johdettuja muunnoksia. Laadinta-aineiston metsiköiden lämpösumma oli vakio (1 100) ja hintoina käytettiin samoja 10 vuoden reaalihintojen keskiarvoa, joita käytettiin kaikissa muissakin tämän tutkimuksen laskelmissa. Metsiköiden käsittely optimointiin Hooken ja Jeevesin menetelmällä käyttäen tavoitemuuttujana 3 %:n korkokannalla laskettua nykyarvoa. Optimoinnin tuloksena saatiin kunkin metsikön nykyarvo. Näin saatua aineistoon sovitettiin seuraavanlainen metsikön loppupuuston nykyarvoa kuvaava malli:

$$\begin{aligned} \ln(NA) = & 6.110 + 0.0961H + 0.000412G \times D \\ & + 0.430MäOs + 0.491KuOs + 0.201OMT \\ & - 0.251VT - 0.928CT \quad (14) \\ R^2 = & 0,715, s_e = 0,400 \end{aligned}$$

missä  $H$  on pohjapinta-alalla painotettu keskipituus (m),  $G$  pohjapinta-ala ( $m^2/ha$ ),  $D$  pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta,  $MäOs$  männyn osuus pohjapinta-alasta ja  $KuOs$  kuusen osuus pohjapinta-alasta.  $OMT$ ,  $VT$  ja  $CT$  ovat indikaattorimuuttujia, jotka osoittavat, onko metsikön kasvupaikkaluokka lehtomainen kangas tai sitä viljavampi, kuivahko kangas, tai kuiva kangas tai sitä heikompi.

*LP*-mallien 4 ja 5 10-vuotiskausien hakkuumäärärajoitteiden ("yhtä suuri kuin"-rajoite) arvot saatiin summaamalla *RC*-mallin hakkuukertymät kultakin kymmenvuotiskaudelta seuraavasti. Ensiksi *RC*-mallilla haettiin ratkaisu, jonka hakkuukertymät toteuttivat tehtävänannossa määritetyt rajoitteet. Tilalla 1 kausittaisten hakkuukertymien tuli olla vähintään  $7000 m^3$  ja enintään  $10000 m^3$  kaikilla kolmella kaudella. Tilalla 2 hakkuukertymien tuli olla yli  $4300$  ja alle  $4800 m^3$  kaikkien kolmen kauden aikana. *RC*-mallin ratkaisusta saaduista metsiköiden käsittelyohjelmista laskettiin kolmen kymmenvuotiskauden hakkuumäärät, jotka otettiin *LP*-mallien rajoitteiksi ("yhtä suuri kuin"-rajoite). Näin saatiin ratkaisut *LP*-malleihin 4 ja 5.

Näiden laskelmien lisäksi kummallekin tilalle muodostettiin *LP*-mallien 1, 2 ja 3 mukaisilla suunnittelujaksoilla ja käsittelyvaihtoehtojen simulointiperiaatteilla tuotantomahdollisuuksien rajat nykyarvon (3 %) ja 30 vuoden kokonaishakkuumäärän suhteen. Tuotantomahdollisuuksien rajan erilainen sijainti kuvaa menetelmien tehokkuuseroa ko. tilalla. *LP*-malleissa tuotantomahdollisuuksien rajan pisteet tuotettiin antamalla 30-vuoden kokonaishakkuumäärärajoitteelle eri arvoja, minkä jälkeen lineaarisella ohjelmoinnilla nykyarvoa maksimoiden tuotettiin ratkaisu, joka toteutti ko. rajoitteen. *RC*-mallissa tehtävä ratkaistiin muutamalla eri hakkuumäärärajoitteella. Kunkin optimoinnin iteraatioiden joukosta otettiin muutama ratkaisu. Näin saatujen pisteiden perusteella hahmotettiin tehokkaan pinnan sijainti.

### 2.3 Esimerkkitalat

Menetelmän toimintaa selvitettiin kahdella esimerkkitalalla (taulukko 1). Tila 1 on noin kaksi kertaa suurempi kuin Tila 2, mutta kuvioiden ja *LP*-malliin simuloitujen vaihtoehtojen lukumäärä oli lähes sama kummallakin tilalla. Tilalla 1 viljavan kasvupaikan

**Taulukko 1.** Esimerkkitulojen ominaisuudet.

	Tila 1	Tila 2
Pinta-ala (ha)	141,3	67,5
Kuvioiden lukumäärä	68	60
Viljavan kasvupaikan (MT & OMT) osuus (%)	53	29
Keskitytilavuus (m <sup>3</sup> )	150,4	154,8
Kuusen osuus tilavuudesta (%)	32	10
Ikäluokkajakauma (%)		
– alle 20 vuotta	0	28
– 20–60 vuotta	61	44
– 60–80 vuotta	23	11
– yli 80 vuotta	15	17

osuus pinta-alasta ja kuusen osuus puuston tilavuudesta ovat suurempia kuin Tilalla 2. Tilalla 2 on selkeästi enemmän nuoria metsiköitä, itse asiassa Tilalla 1 ei ole lainkaan alle 20-vuotiaita metsiköitä.

## 3 Tulokset

### 3.1 RC-mallin mukaisen suunnittelu- menetelmän toiminta

RC-menetelmän toimintaa havainnollistavat rajoittemuuttujien varjohintojen (kuvat 1a ja 2a) sekä rajoitteiden arvojen (kuvat 1b ja 2b) kehittyminen optimointi-iteraatioiden aikana esimerkkituloilla. Tilalla 1 optimoinnin edetessä 1. kauden ”pienempi-kuin” tyyppistä rajoitetta lukuun ottamatta kaikkien muiden rajoitteiden varjohinnaksi tulee lopulta 0. Muiden rajoittemuuttujien vaihteluvälit olivat siis tässä tapauksessa niin väljät (7000–10000 m<sup>3</sup>), että ne eivät rajoittaneet metsiköiden nykyarvon maksimointia sen jälkeen, kun ensimmäisen kauden hakkuu oli pakotettu vaihteluväliin 7000–10000 m<sup>3</sup>. Rajoittamattomassa tilanteessa Tilalla 1 hakattaisiin ensimmäisellä kaudella 12648 m<sup>3</sup>, toisella kaudella 5117 m<sup>3</sup> ja kolmannella kaudella 7262 m<sup>3</sup> (taulukko 2). Tilalla 2 sekä 1. että 2. kauden rajoitteiden ”≤4800 m<sup>3</sup>” varjohinnat saivat positiivisen arvon, jotka vakiintuivat noin 60 iteraatiokierroksen kohdalla. Varjohintojen tasaantumisen huolimatta mikään iteraation 60 jälkeinen ratkaisu ei ollut aivan

käypä, sillä toisen kauden hakkuumäärärajoite ylittyy hieman (viimeisessä iteraatiossa hakkuukertymä toisella kaudella oli 4831 m<sup>3</sup>). Paras käypä ratkaisu löytyi iteraatiolla 24 (kuva 2a,b). Kummallakin tilalla varjohintojen muutosaskeleet näkyvät sahakuvion omaisena kuviona, joka tasaantuu iteraatiokierrosten edetessä. Varjohintojen tasaantuminen ei siten tässä tapauksessa taannut käyvän ratkaisun löytymistä.

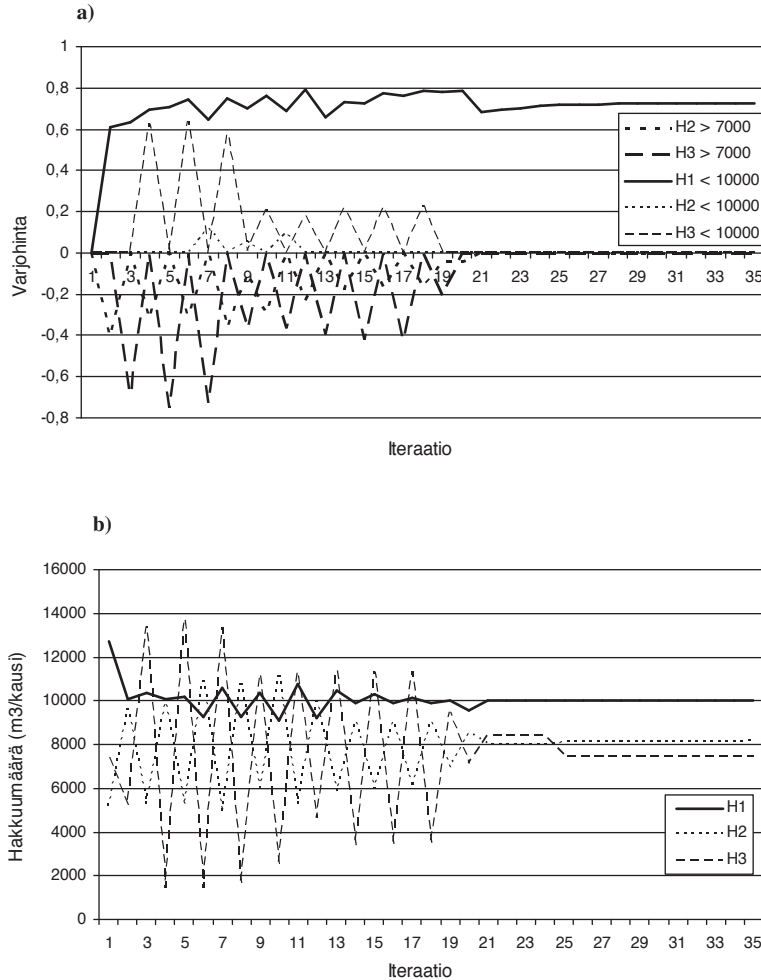
### 3.2 RC- ja LP-mallien vertailu

Metsäsuunnitelmassa 1 ero nykyarvossa oli tilalla 1 RC-mallin hyväksi 140000–150000 € ja tilalla 2 noin 100000 € (taulukko 2). RC-malli antoi kummallakin tilalla noin 20 % korkeamman nykyarvon kuin LP-mallit. Kummallakin tilalla kokonaiskertymä ja tukkikertymä olivat RC-mallissa suurempia kuin LP-malleissa. RC-mallissa myös koivukertymä on LP-malleihin verrattuna kummallakin tilalla selvästi suurempi, erityisesti ensimmäisellä kaudella.

Tilalla 1 RC-mallin hakkuukertymä on ensimmäisellä kaudella noin 1500 m<sup>3</sup> suurempi kuin LP-mallissa 1, kun taas tilalla 2 RC-mallissa hakataan ensimmäisellä kaudella hieman vähemmän kuin LP-mallissa 1. Toisella kaudella RC-mallissa hakataan kuitenkin selkeästi enemmän kuin LP-mallissa 1.

LP-mallien väliset keskinäiset erot olivat loogisia, mutta varsin pieniä. Ensimmäisen mahdollisen hakkuujankohdan aikaistaminen LP-malleissa 2 ja 3 sekä harvennusohejien muuttaminen optimaalisemmaksi (yläharvennus, nuoren metsän leimausrajan nosto, varttuneen metsän leimausrajan lasku) paransi nykyarvoa jonkin verran. Selitys LP-mallien pieniin keskinäisiin eroihin lienee se, että nykyiset kiertoaikaohjeet sallivat pätehakkuun varsin nuorella iällä, ja harvennustavan vaikutus nykyarvoon on melko vähäinen. Tuloksista huomataan, että nykyarvon kasvattaminen hakkuuta aikaistamalla johtaa kokonaishakkuumäärien pienenemiseen.

Metsäsuunnitelmassa 2 käytettiin tilatason rajoitteita, joilla pyrittiin saavuttamaan toivotunlainen hakkuukertymien ajallinen jakauma kymmenvuotiskausittain. Rajoitteet eivät kuitenkaan osoittautuneet tilalla 1 erityisen rajoittaviksi, sillä RC-mallin optimoinnissa asetetut rajoitteet toteutettava ratkaisu löydettiin siirtämällä vajaa 3000 m<sup>3</sup> hakkuuta ensimmäiseltä kaudelta toiselle kaudelle.



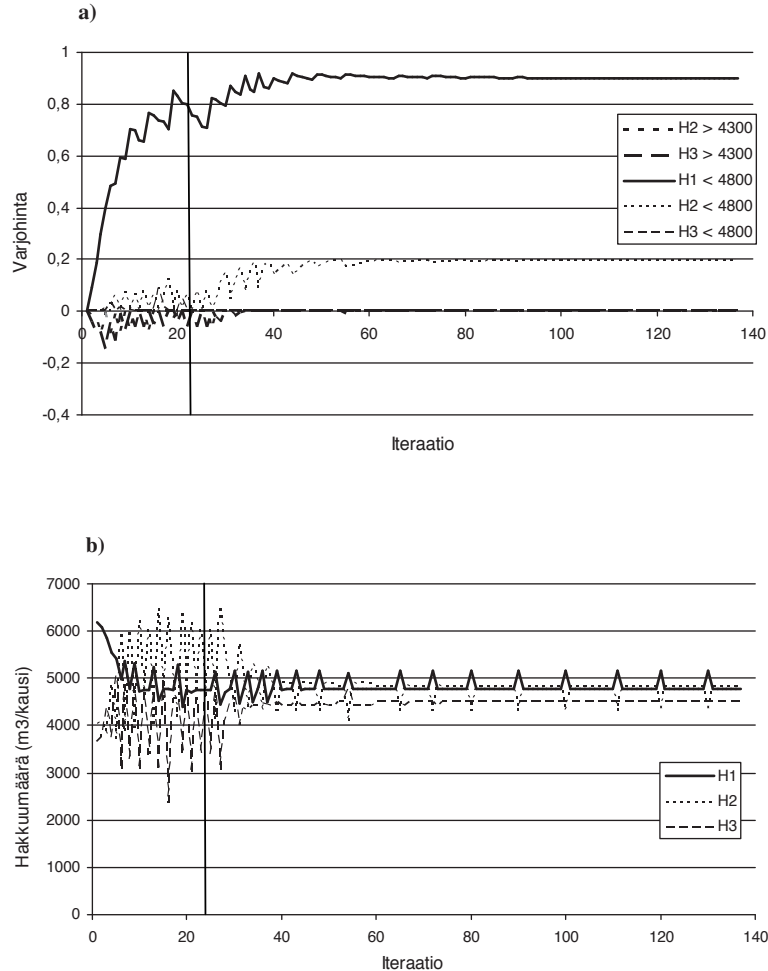
**Kuva 1.** RC-mallin varjohintojen (kuva 1a) sekä rajoitteiden arvojen kehittyminen (kuva 1b) tilalla 1 iteraatioiden (x-akseli) kuluessa. 1. kauden hakkukertymärajoitteen ( $H1 > 7000$ ) varjohinta oli koko ajan nolla, joten sitä ei esitetä kuvassa 2a.

Myös metsäsuunnitelman 2 RC-mallin ratkaisussa huomattava määrä metsiköitä hakattiin heti kummallakin tilalla.

Tilalla 2 käytetyt rajoitteet olivat tiukempia, sillä asetettujen rajoitteiden toteutuminen edellytti RC-mallissa ensimmäisen kauden hakkuiden lykkäämistä kolmannelle kaudelle. Tämä aiheutti kokonaishakkuumäärän lievän kasvun suunnitelmaan 1 verrattuna, mikä johtunee hakattavien metsiköiden kasvusta tänä aikana. Hakkuiden siirtäminen näkyi kuvasta 3 erityisesti vuoden 10 kohdalla olevasta

piikistä. Vuoden 20 kohdalla piikki ei ole yhtä selvä, sillä siirretyt hakkuut jakautuivat useammalle vuodelle. Erot nykyarvoissa suunnitelman 1 ja 2 välillä olivat pieniä kummallakin tilalla, kuitenkin siten, että rajoitteet pienensivät nykyarvoa hieman enemmän LP-mallissa. Hakkuiden viivästyttäminen ei näillä tiloilla vaikuttanut paljonkaan nykyarvoon. LP-malleissa 10-vuotiskausien hakkuumäärien tasaaminen lisäsi nettotuloja kymmenisen prosenttia kummallakin tilalla.





**Kuva 2.** RC-mallin varjohintojen (kuva 2a) sekä rajoitteiden arvojen kehittyminen (kuva 2b) tilalla 2 iteraatioiden (x-akseli) aikana. Ratkaisuna käytetään iteraation 24 tulosta, joka on osoitettu kuvissa pystyviivalla. 1. kauden hakkuukertymärajoitteen ( $H1 > 4300$ ) varjohinta oli koko ajan nolla, joten sitä ei esitetä kuvassa 2a.

### 3.3 Tuotantomahdollisuuksien rajat

Kummallekin tilalle tuotettiin RC-mallilla ja LP-malleilla 1, 2 ja 3 tuotantomahdollisuuksien rajat, jotka kuvaavat nykyarvon ja 30-vuotiskauden kokonaishakkuumäärän välistä transformaatio-suhdetta (kuva 4 a,b). Rajat olivat kummallakin tilalla kuperia, mikä tarkoittaa, että rajan ääripäässä pieni muutos esimerkiksi hakkuumäärässä aiheuttaa suhteellisen suuren pienennyksen nykyarvossa.

Kummallakin tilalla LP-mallien mukaiset tuotanto-

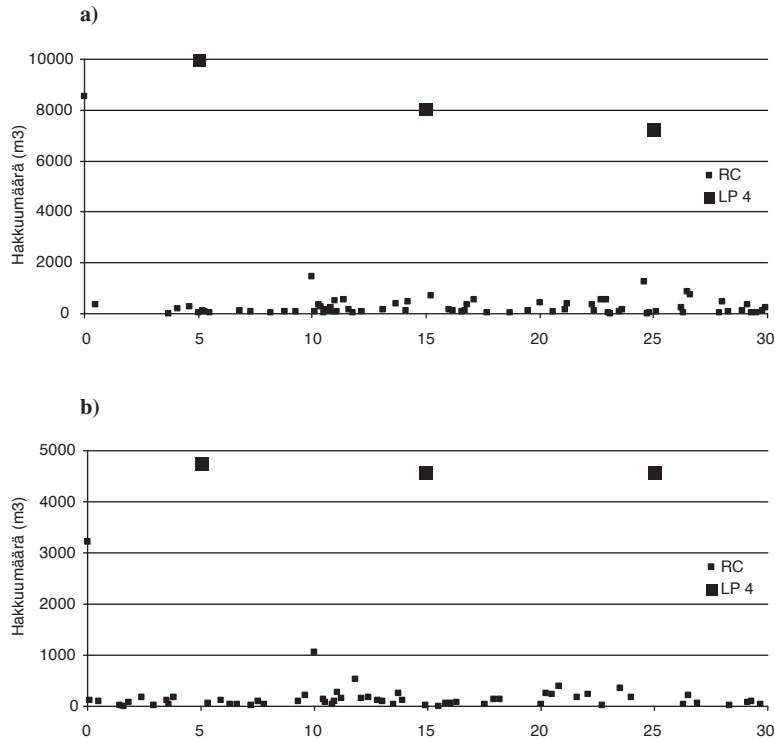
mahdollisuuksien rajat olivat selvästi alemmalla tasolla kuin RC-mallilla tuotettu raja. RC-mallin mukainen metsien käsittely on siis selvästi tehokkaampaa kuin LP-mallin, ts. RC-mallilla tuotettu suunnitelma on parempi. LP-mallilla 2 laadittu tuotantomahdollisuuksien raja havainnollistaa hakuiden aikaistamisen vaikutusta: tuloksen mukaan tuotantomahdollisuuksien raja leikkaa LP-mallin 1 rajan. Toisaalta hakkuuohjeiden muutoksen vaikutus LP-mallissa 3 näkyy myös selvänä, sillä tuotantomahdollisuuksien raja on siirtynyt kummallakin tilalla oikealle.

**Taulukko 2.** Tilojen 1 ja 2 tulokset metsäsuunnitelmassa 1, jossa maksimoitiin nykyarvoa ilman rajoitteita.

	Tila 1				Tila 2			
	LP 1	LP 2	LP 3	RC	LP 1	LP 2	LP 3	RC
Nykyarvo (3 %), €	653 581	660 931	663 333	805 224	322 553	325 075	330 547	416 851
Nettotulo, €								
1. kausi	344 199	302 814	307 753	417 575	168 639	121 812	150 000	166 730
2. kausi	51 420	33 270	36 932	133 382	41 045	49 006	31 945	97 056
3. kausi	207 126	193 285	221 010	196 326	96 698	112 377	117 371	111 418
Yhteensä	602 745	529 369	565 695	747 283	306 382	283 195	299 316	375 207
Hakkuukertymä, m <sup>3</sup>								
1. kausi	11 113	9 832	9 987	12 648	6 401	4 361	5 410	6 024
2. kausi	2 911	1 985	1 804	5 117	1 728	2 315	1 468	4 029
3. kausi	8 784	8 399	9 381	7 262	4 176	4 703	4 910	3 614
Yhteensä	22 808	20 216	21 172	25 027	12 305	11 379	11 788	13 667
Tukkikertymä, m <sup>3</sup>								
1. kausi	7 200	6 315	6 472	7 627	2 968	2 325	2 802	2 783
2. kausi	712	454	595	1 986	658	663	425	1 394
3. kausi	3 571	3 158	3 811	2 989	1 383	1 687	1 763	1 913
Yhteensä	11 483	9 928	10 878	12 602	5 009	4 675	4 990	6 090
Koivun kertymä, m <sup>3</sup>								
1. kausi	582	391	391	1058	772	587	655	1606
2. kausi	132	191	208	484	121	188	224	614
3. kausi	823	651	779	166	628	706	628	0
Yhteensä	1 537	1 233	1 378	1 708	1 521	1 481	1 507	2 220

**Taulukko 3.** Tilojen 1 ja 2 tulokset metsäsuunnitelmassa 2, jossa nykyarvon maksimoinnin lisäksi pyrittiin tasaisiin hakkuisiin kolmella 10-vuotiskaudella.

	Tila 1			Tila 2		
	LP 4	LP 5	RC	LP 4	LP 5	RC
Nykyarvo (3 %), €	642 276	653 483	800 479	318 514	322 978	415 701
Nettotulo, €						
1. kausi	309 637	314 315	338 561	128 179	138 080	137 734
2. kausi	189 742	196 853	223 230	113 738	116 221	111 153
3. kausi	158 596	163 701	197 633	103 815	101 773	130 753
Yhteensä	657 975	674 869	759 424	345 732	356 074	379 640
Hakkuukertymä, m <sup>3</sup>						
1. kausi	9 971	9 971	9 971	4 749	4 749	4 749
2. kausi	8 027	8 027	8 027	4 563	4 563	4 563
3. kausi	7 246	7 246	7 246	4 561	4 561	4 561
Yhteensä	25 244	25 244	25 244	13 873	13 873	13 873
Tukkikertymä, m <sup>3</sup>						
1. kausi	6 537	6 606	6 299	2 299	2 632	2 393
2. kausi	3 263	3 646	3 250	1 893	1 981	1 600
3. kausi	2 752	2 950	3 020	1 583	1 439	2 166
Yhteensä	12 552	13 202	12 569	5 778	6 052	6 159
Koivun kertymä, m <sup>3</sup>						
1. kausi	458	469	721	557	571	1 067
2. kausi	524	543	721	515	525	1 128
3. kausi	600	656	186	702	681	277
Yhteensä	1 582	1 668	1 628	1 774	1 777	2 472



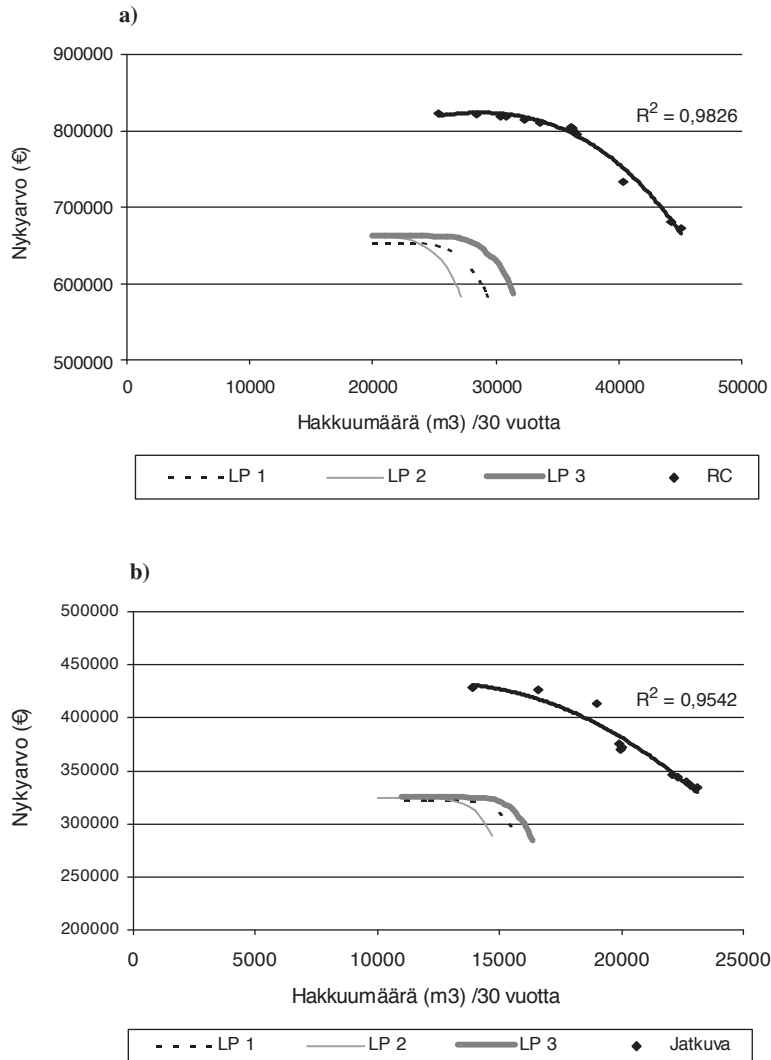
**Kuva 3.** Metsäsuunnitelman 2 mukaisten hakkuukertymien jakautuminen 30 vuoden suunnittelujaksolle (x-akselilla) Tilalla 1 (kuva 2a) sekä Tilalla 2 (kuva 2b).

## 4 Tarkastelu ja johtopäätökset

Tutkimuksessa esiteltiin metsikkötason optimointiin perustuva suunnittelumalli tilatazon metsäsuunnitteluun ja sen toimintaa havainnollistettiin ja verrattiin nykyisiin käytössä oleviin malleihin kahdella tilalla. Metsäsuunnitelma 2 laadittiin tässä tutkimuksessa esitetyllä menetelmällä, mutta suunnitelma 1 perustui pelkästään metsikkötason optimointien yhdistelmään. Menetelmä perustuu Hogansonin ja Rosen (1984) esittämään malliin, joka on jo sisällytetty ainakin yhteen metsäsuunnitteluohjelmistoon (Hoganson ja Rose 1989). Viime aikoina Hogansonin ja Rosen (1984) esittämää menetelmää on sovellettu myös laskennallisesti vaativiin spatiaalisiin suunnitteluongelmiin (Wei ja Hoganson 2005, 2006, Pukkala ym. 2009).

Sekä metsikköoptimointiin (RC-malli) että lineaariseen ohjelmointiin (LP-mallit) perustuvassa menetelmässä metsikön kehitystä simuloitiin täsmälleen samalla tavalla. Metsiköiden lähtötiedot olivat samat, kuvauspuut generoitiin samalla tavalla ja niitä oli yhtä monta, ja puuston kehitystä simuloitiin samoilla malleilla. Puutavaralajien yksikköhinnat ja toimenpiteiden kustannukset olivat samat ja eri puutavaralajien tilavuudet laskettiin samalla tavalla. Näin ollen suunnittelumallien väliset erot nykyarvoissa eivät johdu simuloinnin tai mallien eroista.

Esimerkkituloilla toteutetut laskelmat osoittivat, että vaikka esitelty menetelmä tuottaa ratkaisuja, joissa metsän hyödyntäminen on tehokkaampaa, se kuitenkin tarvitsee vielä jatkokehitystä. Tilatazon rajoitteiden toteuttamiseksi menetelmä pyrkii löytämään itseisarvoltaan mahdollisimman pienet varjohinnat, jotka toteuttavat rajoitteet. Menetelmän kehittämistarve liittyy kuvissa 1 ja 2 näkyvään rajoit-



**Kuva 4.** Tilan 1 (Kuva a) ja 2 (Kuva b) tuotantomahdollisuuksien rajat RC-mallilla ja erilaisilla LP-malleilla tuotettuna. RC-mallin tuotantomahdollisuuksien raja on trendiviiva, joka on Tilalla 1 muodostettu 15 ja Tilalla 2 12 pisteen perusteella.

teiden arvojen oskillointiin. Kun lähestytään oikeita varjohintoja, niihin tehdyt muutokset aiheuttavat suuria muutoksia rajoitemuuttujien arvoissa. Tämän aiheuttaa se, että joissakin metsiköissä useampi kuin yksi käsittelyvaihtoehto on käytännössä lähes yhtä hyvä. Joissakin tapauksissa optimaalinen hakkuuvuosi saattaa olla kahden 10-vuotiskauden taitteessa, jolloin pienikin varjohinnan muutos vaihtaa hakkuun

10-vuotiskautta. Oskillointi ilmenee hakkuiden siirtymisenä kaudelta toisella (yleensä kahden kauden välillä). Ongelma voidaan ratkaista esimerkiksi siten, että ratkaisuna käytetään sellaisen iteraation tulosta, jossa varjohinnat eivät ole saavuttaneet vielä aivan minimitasoa. Tämän seurauksena kuitenkin menetetään hieman nykyarvossa. Toinen ratkaisu on tuottaa rajoitteet täyttävä suunnitelma kahdes-

ta peräkkäisestä ratkaisusta, ts. metsikköoptimeita poimitaan kahdesta peräkkäisestä iteraatiosta siten, että aluetason rajoitteet toteutuvat. On huomattava, että useimpien metsiköiden käsittelyohjelmat ovat kahdessa peräkkäisessä iteraatiossa samat, ja eroa on ainoastaan niiden kuvioiden kohdalla, joissa hyvin pieni varjohinnan muutos aiheuttaa hakkuun siirtymisen toiselle kaudelle.

Menetelmä on vielä käytännön kannalta vaikea. Optimointi vie runsaasti aikaa, esimerkkituloilla useita tunteja. Menetelmä edellyttää käyttäjältä varjohintojen alkuarvojen, varjohinnan muutosaskeleen alkuarvon ja iteraatioiden lukumäärän määrittelyä. Varjohintojen alkuarvoina voidaan tosin käyttää myös systemaattisesti arvoa 0 optimoinnin juurikaan hidastumatta. Myös alkuaskel voidaan vakioida ilman että optimointitulos heikkenee (kunhan alkuaskel ei ole liian pieni). Iteraatioiden lukumäärä voidaan myös vakioida. Suurin vaikeus aiheutuukin siitä, että rajoitteiden arvot saattavat ruveta oskilloimaan, jolloin viimeinen ratkaisu ei välttämättä ole käypä. Tällöin tarvitaan tapauskohtaista koko optimointiprosessin tarkastelua ja jonkin aiemman iteroinnin valintaa optimiratkaisuksi. Aligradienimenetelmältä puuttuu myös muunlainen selkeä lopetuskriteeri kuin iteraatioiden maksimimäärän saavuttaminen.

Menetelmän etuja ovat mm. käytettyjen hintojen, korkokannan sekä tavoite- ja rajoitemuuttujien mukaan tuotetut optimaaliset metsiköiden käsittelyohjelmat ja tämän seurauksena myös se, ettei sen käyttö edellytä metsänhoitosuosituksen tai simuloinnin ohjaustiedostojen olemassaoloa. Menetelmän antamien tulosten käytännön toteutettavuuden lisääminen voi edellyttää joidenkin sääntöjen sisällyttämistä simulointiin ja optimointiin, mikä ei ole vaikeaa. Näitä voivat olla esimerkiksi hakkuukertymän minimitaso, joka voidaan myös toteuttaa sisällyttämällä nettotulojen laskentaan korjuukustannus, joka riippuu hakkuukertymästä. Myös aikaisinta luvallista päätehakkuun ajankohtaa voi olla syytä rajoittaa.

RC-mallia voidaan käyttää myös monitavoiteisissa tilanteissa, jolloin tässä tutkimuksessa käytetty nykyarvon kaava korvataan esimerkiksi Hartmannin kaavalla tai hyötymallilla (Hartman 1976, Pukkala ja Miina 1997, Pukkala ym. 2009). Menetelmää voidaan jossain määrin soveltaa myös spatiaalisen optimoinnin ongelmiin (esim. Wei ja Hoganson 2005, 2006, Pukkala ym. 2009).

Erilaisten LP-mallien ja RC-mallin tulosten välillä oli selkeä ero. Ensimmäisen suunnittelujakson lyhentäminen (ensimmäisen mahdollisen hakkuuajan kohdan aikaistaminen) ja harvennusohjeiden muutos optimaalisempaan suuntaan pienensivät hieman RC-mallin ja LP-mallien välisiä eroja. Mitä lyhyempiin suunnittelujaksoihin kausi jaetaan ja mitä enemmän kuvoille simuloidaan vaihtoehtoja, sitä lähempänä LP- ja RC-malli ovat toisiaan. Mikäli laskennassa käytetyillä tiloilla olisi ollut runsaammin hakkuukypsiä metsiä, ero olisi pienentynyt vielä selvemmin pelkästään ensimmäistä jaksoa lyhentämällä.

Osa suunnittelumallien välisistä eroista kuvaa nykyisten metsänhoitosuosituksen ja metsälain mukaisten käsittelyjen (LP-mallit 1, 2 ja 4) aiheuttamaa kustannusta metsien optimaalisen käsittelyyn verrattuna, ja osa eroista johtuu hakkuun ajoituksen ja harvennusvoimakkuuden ajoitusvaihtoehtojen vähäisyydestä LP-malleissa. Tämän tutkimuksen esimerkkimetsälöissä yksi merkittävä eron syy näyttäisi olleen se, että LP-mallien käsittelyvaihtoehtoisissa hakattiin aivan liian vähän koivua kahdella ensimmäisellä 10-vuotiskaudella. Nykyarvon maksimointi olisi edellyttänyt ensimmäisten hakuiden kohdistamista nimenomaan koivuun monissa metsiköissä. RC-malleissa kertymästä oli hieman suurempi osa tukkia kuin useimmissa LP-malleissa, mikä viittaa yläharvennuksen runsaampaan käyttöön RC-malleissa.

Taulukossa 4 on arvioitu niitä syitä, jotka vaikuttavat menetelmän välisten erojen syntymiseen. Osa näistä syistä voidaan poistaa tai niiden vaikutusta voidaan vähentää LP-mallin paremman muotoilun avulla. LP-malleissa toimenpiteiden ajoittamismahdollisuuksia voidaan lisätä kasvattamalla suunnittelukausien lukumäärää ja lyhentämällä niitä. Tässä tutkimuksessa käytettyjen kausien sijasta suunnittelujakso olisi voitu jakaa vaikkapa kolmeenkymmeneen yhden vuoden kauteen, mikä olisi lisännyt huomattavasti simuloitujen käsittelyvaihtoehtojen määrää.

Kuten tuloksista huomattiin, myös simuloinnin ohjaaminen vaikuttaa tuloksiin (LP-mallit 3 ja 5). LP-malliin on mahdollista simuloida lukuisia erilaisia harvennuksia, joissa esimerkiksi niiden toteuttamisajankohtaa aikaistetaan suosituksiin verrattuna, harvennustapaa varioidaan tai harvennuksissa poistettavien puulajien osuuksia varioidaan. Menetelmän

**Taulukko 4. Menetelmien toimintaperiaatteiden vertailua.**

Ominaisuus	RC-malli	LP-malli
Toimenpiteiden toteuttamisajankohta	Mikä tahansa ajanhetki suunnittelukauden aikana	Vähän ajoittamismahdollisuuksia, aina suunnittelujakson keski-kohdassa
Toimenpiteiden ajoituksen rajoitteet	Tavoitefunktion määrittämä optimaalinen ajanhetki, ei rajoitteita	Aikaisintaan simulointiohjeen mukaisena ajanhetkenä sekä sitä myöhemmillä kausilla
Harvennusten voimakkuus	Tavoitefunktion määrittämä taso, ei rajoitteita	Simulointiohjeen mukainen
Uudistaminen	Oletuksena viljely uudistamishakkuun jälkeen	Luontainen uudistaminen VT:n ja sitä karumpien kasvupaikkojen männiköissä, muualla avohakkuu ja viljely
Harvennushakkuutapa	Optimaalinen yhdistelmä tasa-harvennuksia eri puusto-ositteista (mikä metsikkötasolla voi tarkoittaa yläharvennusta, alaharvennusta tai jotain muuta), puulajeja harvennetaan eri voimakkuuksilla	Aina ala- ja tasaharvennuksen yhdistelmä, joka ei huomioi kuvion puulajikoostumusta, puulajeja harvennetaan yhtä voimakkaasti
Harvennusten lukumäärä	Harvennuskertojen malli (ks. luku 2.4)	Aina kun valtapituudesta riippuva PPA (harvennusraja) ylittyy ennen uudistuskypsytyden saavuttamista
Vaihtoehtojen lukumäärä	Ääretön määrä vaihtoehtoja, joiden hyvyyttä testataan optimoinnissa	Melko pieni määrä vaihtoehtoja

perusominaisuus, eli tarve simuloida vaihtoehdot etukäteen, ei kuitenkaan katoa. Tämän vuoksi toisiinsa kytkettyjen metsikkötason optimointitehtävien ratkaisu pysyy aina parempana menetelmänä, joskin menetelmien ero kaventuu etukäteen simuloitujen vaihtoehtojen lukumäärän kasvaessa.

## Kirjallisuus

- Beasley, J.E. 1993. Lagrangian relaxation. Julkaisussa: Reeves, C.R. (toim.). *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*. John Wiley & Sons, Inc., New York. s. 243–303.
- Hartman, R. 1976. The harvesting decision when a standing forest has value. *Economic Inquiry* 14: 52–58.
- Hoganson, H.M. & Rose, D.W. 1984. A simulation approach for optimal timber management scheduling. *Forest Science* 30(1): 220–238.
- & Rose, D.W. 1989. DUALPLAN version 1.0. Users manual. Staff Pap. Ser. Rep. 73. St. Paul, MN: College of Natural Resources and Agricultural Experiment Station, Department of Forest Resources. 48 s.
- Hooke, R. & Jeeves, T.A. 1961. “Direct search” solution of numerical and statistical problems. *Journal of the Association for Computing Machinery* 8: 212–229.
- Hynynen, J., Ojansuu, R., Hökkä, H., Siipilehto, J., Salmi, H. & Haapala, P. 2002. Models for predicting stand development in MELA system. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 835. 116 s.
- Hyvän metsänhoidon suositukset. 2006. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. 100 s.
- Hyttiäinen, K. & Tahvonen, O. 2001. The effects of legal limits and recommendations on timber production: the case of Finland. *Forest Science* 47: 443–454.
- & Tahvonen, O. 2003. Maximum sustained yield, forest rent of Faustmann: does it really matter? *Scandi-*

- navian Journal of Forest Research 18: 457–469.
- Kurttila, M. & Pukkala, T. 2003. Combining holding-level economic goals with spatial landscape-level goals in the planning of multiple ownership forestry. *Landscape Ecology* 18(5): 529–541.
- Lu, F., & Eriksson, L.O. 2000. Formation of harvest units with genetic algorithms. *Forest Ecology and Management* 130(1): 57–67.
- Pukkala, T. 2005. Metsikön tuottoarvon ennustemallit kiivennäismaan männiköille, kuusikoille ja rauduskoivikoille *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2005: 311–322.
- 2006. Puun hinta ja taloudellisesti optimaalinen hakkuun ajankohta. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2006: 33–48.
- 2008. Monsu-metsäsuunnitteluohjelma. Versio 5. Ohjelmiston toiminta ja käyttö. Moniste. 69 s.
- & Miina, J. 1997. A method for stochastic optimization of stand management. *Forest Ecology and Management* 98: 189–203.
- & Miina, J. 2005. Optimising the management of a heterogeneous stand. *Silva Fennica* 39(4): 525–538.
- , Miina, J., Kurttila, M. & Kolström, T. 1998. A spatial yield model for optimizing the thinning regime of mixed stands of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 13(1): 31–42.
- , Heinonen, T. & Kurttila, M. 2009. An application of the reduced cost approach to spatial forest planning. *Forest Science* 55(1): 13–22.
- Valsta, L. 1986. Mänty-rauduskoivusekametsikön hakkuuohjelman optimointi. *Folia Forestalia* 666. 23 s.
- 1993. Stand management optimization based on growth simulators. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 453. 51 s. + liitteet.
- Wei, Y. & Hoganson, H.M. 2005. Landscape impacts from valuing core area in national forest planning. *Forest Ecology and Management* 218(2005): 89–106.
- & Hoganson, H.M. 2006. Spatial information for scheduling core area production in forest planning. *Canadian Journal of Forest Research* 36(1): 23–33.

## 22 viitettä