



■ Timo Pukkala

Timo Pukkala

Puun hinta ja taloudellisesti optimaalinen hakkuun ajankohta

Pukkala, T. 2006. Puun hinta ja taloudellisesti optimaalinen hakkuun ajankohta. Metsätieteen aikakauskirja 1/2006: 33–48.

Silloin kun metsä on omistajalleen sijoituskohde, metsää tulee käsitellä niin, että sijoituksen tuottavuus eli metsän tuottoarvo maksimoituu. Metsän tuottoarvo riippuu mm. puun hinnasta ja laskentakorosta, minkä vuoksi myös ohjeet siitä, kuinka metsää on hoidettava hyvän taloudellisen tuloksen saamiseksi, riippuvat puun hinnasta ja korkokannasta. Tässä tutkimuksessa analysoidaan toisaalta sitä, kuinka hinta, jolla hakkuuseen ryhtyminen on optimaalinen päätös, riippuu metsikkötunnuksista ja korkokannasta, ja toisaalta sitä, kuinka optimaalinen käsittely riippuu puun hinnasta ja korkokannasta. Tulosten mukaan metsikön varttuessa hakkuuseen kannattaa ryhtyä yhä pienemmällä kuitupuun hinnalla. Kun tukin hinta paranee, myös kuidusta on saatava parempi hinta, jotta hakkuun optimaalinen ajankohta ei siirtyisi myöhemmäksi. Suureneva korkokanta pienentää hintaa, jolla hakkuuseen kannattaa ryhtyä. Paraneva tukin hinta pidentää optimaalista kiertoaikaa, mutta paraneva kuidun hinta lyhentää sitä. Puun hinta vaikuttaa vain vähän harvennuksen ajankohtaan ja voimakkuuteen eikä juuri lainkaan harvennustapaan. Korkokanta vaikuttaa voimakkaasti kiertoaikaan, metsikön optimaaliseen kasvatustiheyteen ja harvennustapaan. Suureneva korkokanta lyhentää kiertoaikaa, pienentää puuston optimaalista kasvatustiheyttä ja muuttaa harvennustapaa siten, että metsikön suurimpia puita kannattaa koron suurentuessa poistaa yhä enemmän.

Asiasanat: metsikön tuottoarvo, kiertoaika, harvennusmallit, mänty, kuusi, varaushintafunktio, metsikön käsittelyohjeet

Yhteystiedot: Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta, PL 111, 80101 Joensuu. Sähköposti timo.pukkala@joensuu.fi

Hyväksytty 14.2.2006

I Johdanto

Useimmilla metsänomistajilla puunmyyntitulot ja taloudelliset hyödyt ovat metsänomistuksen päätavoite (esim. Ihalainen 1992). Monelle metsä on sijoitus, jonka toivotaan tuottavan hyvin. Sijoituksen tuottoa on perusteltua arvioida nykyhetkeen diskontattujen nettotulojen summalla, ts. metsän tuottoarvolla. Sijoittajametsänomistajan tulee käsitellä metsäänsä niin, että sen tuottoarvo maksimoi- tuu. Metsän tuottoarvo riippuu mm. puun hinnasta ja laskentakorosta, jona käytetään yleensä vaihto- ehtoisten sijoituskohteiden tuotto prosenttia. Niin- pä myös ohjeet siitä, kuinka metsää on hoidettava hyvän taloudellisen tuloksen saamiseksi, riippuvat puun hinnasta ja korkokannasta.

Tuottoarvon maksimointi johtaa erilaiseen käsittelyyn kuin esim. puuntuotannon maksimointi. Tuotantoon sidotulle pääomalle, ts. puustolle ja maapohjalle, pyritään saamaan hyvä tuotto. Taloudellista tuottavuutta maksimoitaessa metsikön tiheyttä on luontevaa mitata pääoman arvolla ja tuottoa arvokas- vulla. Arvokasvun on oltava riittävän hyvä puuston ja maapohjan arvoon nähden, jotta kasvattaminen olisi kannattavaa. Tuottavuutta voidaan parantaa harventamalla metsää niin, että puuston ja maapohjan vaihtoehtoiskustannus eli pääoman korko pie- nenee enemmän kuin arvokasvu. Tähän päästään esimerkiksi poistamalla metsiköstä arvokkaita puita ja jättämällä jäljelle puustoa, jonka arvo suurentuu lähitulevaisuudessa merkittävästi.

Suureneva korkokanta lyhentää kiertoaikaa ja pie- nentää metsikön optimaalista kasvatustiheyttä. Tä- hän johtopäätökseen on päästy lukuisissa tutkimuk- sessa, joissa parasta metsikön käsittelyä on haettu numeerisen optimoinnin keinoin maksimoimal- la metsikön tuottoarvoa (Valsta 1992a, Salminen 1993, Vettenranta 1996, Hyytiäinen ja Tahvonen 2001, 2002). Useissa tutkimuksissa on mm. havaittu, että varsinkin suuremmilla korkokannoilla metsikön optimaalinen kasvatustiheys pohjapinta-alalla mitat- tuna pienenee ensiharvennuksen jälkeen kiertoajan loppua kohti (esim. Salminen 1993, Vettenranta ja Miina 1999, Hyytiäinen ja Tahvonen 2003). Lähes poikkeuksetta on saatu tulokseksi, että etenkin kier- toajan loppupuolella tulisi käyttää yläharvennuksia (esim. Valsta 1992a, Pukkala ja Miina 1998, Hyy- tiäinen ym. 2005), joilla pääoman kustannusta voi-

daan pienentää voimakkaasti metsikön arvokasvun pienentymättä läheskään yhtä paljon.

Taloudellisessa mielessä yläharvennuksen käyttö on loogista, vaikka se ei alaharvennuksen tavoin vas- taakaan tasaikäisen metsikön luontaista kehitystä, jossa luontainen harveneminen poistaa eniten pie- nimpiä puita. Jos metsikössä on sekä tukki- että kui- turunkoja, poistaisi alaharvennus puita ennen kuin ne ovat tuottaneet ”pääsatoa” eli tukkipuuta, ja jät- täisi kasvamaan puita, jotka ovat jo satonsa tuotta- neet, mikä on mahdollisimman epäviisasta. Ylähar- vennus sitä vastoin poistaa satoa ja jättää kasvamaan puita, joissa pääsato on vielä ”kypsymässä”.

Korkokannan ohella taloudellisesti optimaalinen metsän käsittely riippuu puun hinnasta. Puun hin- nan ja metsikön käsittelyn kiinteä yhteys on otettu selkeimmin huomioon ns. varaushintafunktioissa, jotka kertovat hinnan, jolla metsikkö kannattaa ha- kata. Varaushinta (*reservation price*) on pienin puun hinta, jolla metsikön hakkuu heti on optimaalinen päätös (Brazee ja Mendelsohn 1988). Varaushinta- funktioita on laadittu erityisesti tilanteisiin, joissa puun hinta on stokastinen eli vaihtelee ajallisesti. Näissä tilanteissa varaushintaan perustuvat hakkuu- päätökset parantavat metsätalouden kannattavuutta verrattuna Faustmannin kaavaan ja kiinteisiin hin- toihin perustuviin suosituksiin (Gong ja Yin 2004). Näin ollen varaushintafunktio on metsänomistajan kannalta hyvä tapa ohjeistaa metsän käsittely silloin, kun puun hinnassa on ajallista vaihtelua.

Sekä deterministisillä että stokastisilla puun hin- noilla hintavaatimus pienenee puuston varttuessa varsinkin jos avohakkuu on ainoa hakkuutapa ja puutavaralajeja on vain yksi (esim. Brazee ja Men- delsohn 1988). Tämä tarkoittaa sitä, että metsikkö kannattaa hakata sitä huonommalla hinnalla mitä varttuneempi se on. Yleensä varaushinta on sitä suu- rempi, mitä enemmän puun hinta vaihtelee ajallisesti (Gong ja Löfgren 2005). Tilanne on mutkallisempi, jos metsikössä voidaan tehdä myös harvennuksia ja puutavaralajeja on enemmän kuin yksi (Gong ja Yin 2004). Varsin yleisesti lienee niin, että paraneva kuidun hinta aikaistaa hakkuuta, ts. tekee yhä use- ammasta metsiköstä taloudellisesti hakkuukypsän (Nyyssönen ja Ojansuu 1988). Jos kuitenkin tukki- puun osuus metsikössä on parhaillaan suurentumas- sa voimakkaasti, paraneva tukin hinta voikin lykätä optimaalista hakkuun ajankohtaa. Kun siirtymistä

tukkipuuksi ei enää juuri tapahdu, paraneva tukin hinta luultavasti aikaistaa hakkuuta. Samalla tavoin voidaan päätellä, että jos nuoressa metsikössä kuiturunkojen määrä on nopeasti lisääntymässä, paraneva kuidun hinta voikin myöhäistää optimaalista hakkuun ajankohtaa.

Suomessa on tehty runsaasti laskelmia optimaalisesta metsän käsittelystä eri korkokannoilla ja puutavaralajien hinnoilla (ks. esim. Hyytiäinen 2003). Näiden laskelmien soveltamista käytännön päätöksenteossa hankaloittaa se, että puun hinta voi erota optimointilaskelmissa käytetystä. Lisäksi metsikkö, jonka käsittelystä halutaan päättää, ei useinkaan ole optimaalisen käsittelyn mukaisella kehitysuralla. Tämän vuoksi optimointitutkimukset eivät aina sovellu suoraksi ohjeeksi tietyn metsikön käsittelystä vaikka ne osoittavatkin taloudellisesti optimaalisen käsittelyn pääpiirteet.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on mallittaa puun kantohinnan ja taloudellisesti optimaalisen metsikön käsittelyn välinen riippuvuus eri korkokannoilla. Tutkimuksessa analysoidaan toisaalta sitä, kuinka hinta, jolla hakkuuseen ryhtyminen on optimaalinen päätös, riippuu metsikkötunnuksista ja korkokannasta, ja toisaalta sitä, kuinka optimaalinen käsittely riippuu puun hinnasta ja korkokannasta. Analyysissä oletetaan, että puun hinnassa ei ole ajallista vaihtelua, vaan vaihtelu voi johtua esim. metsikön sijainnista, saavutettavuudesta ja korjuuoloista. Jos hinta muuttuu, muutos on pysyvä. Deterministisyysoletuksen takia hintamalleista käytetään varaushintafunktion sijasta nimitystä myyntihintafunktio.

Tutkimus etenee niin, että erilaisten metsiköiden optimaalinen käsittely eri korkokannoilla ja puutavarain hinnoilla haetaan ensin numeerisen optimoinnin keinoin. Sen jälkeen tutkitaan, kuinka hinta, jolla hakkuuseen on optimaalisissa käsittelyohjelmissa ryhdytty, riippuu metsikön ominaisuuksista ja korkokannasta. Lopuksi analysoidaan optimaalisen hakkuun ajankohdan ja harvennushakkuun toteutustavan riippuvuutta korkokannasta, puun hinnasta ja metsikön ominaisuuksista.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Analyysin vaiheet

Analyysin ensimmäisenä vaiheena optimoitiin 25–100-vuotiaiden VT-männikköjen ja MT-kuusikkojen käsittely eri korkokannoilla ja puutavaralajien hinnoilla. Metsiköt edustivat lämpösumma-alueita 1 100 d.d. Metsiköille poimittiin tuotostaulukoista (Vuokila ja Väliaho 1980) 15 vuoden ikävällein loogisia keskipituuksia ja -läpimittoja. Kullekin iänkohdalle otettiin kolme pohjapinta-alaa. Yhdessä pohjapinta-ala oli harvennusmallien (Hyvän metsänhoidon suositukset 2001) leimausrajalla, toisessa harvennuksen jälkeisen pohjapinta-alan alarajalla ja kolmannessa edellisten puolivälissä. Kullekin metsikölle laskettiin runkoluku, joka oli loogisessa suhteessa keskiläpimittaan ja pohjapinta-alaan. Näin saatiin tuotetuksi eri iänkohdille tiheydeltään erilaisia alkumetsiköitä.

Optimoinnissa kaikki nettotulot diskontattiin nykyhetkeen (ei metsikön perustamishetkeen), ja päätehakkuuvuoden tuloihin lisättiin samalla korkokannalla ja puutavaralajien hinnoilla laskettu paljaan maan tuottoarvon ennuste (Pukkala 2005). Kaikkien metsiköiden käsittely optimoitiin 1, 2, 3 ja 4 %:n korolla ja seuraavilla tukin kantohinnoilla: 1, 11, 21, ..., 101 €/m³. Kullakin tukin hinnalla optimointi toistettiin usealla eri kuidun hinnalla niin, että heikoin hinta oli 1 €/m³, josta sitä parannettiin 10 €/m³ välein, kunnes kuidun hinta oli sama kuin tukin hinta. Jokaisen metsikön käsittely joka korkokannalla ja hintayhdistelmällä optimoitiin siten, että harvennushakkuuta oli 0, 1 tai 2, minkä jälkeen tehtiin avohakkuu. Näistä jatkoanalyysiin otettiin se harvennusten lukumäärä, jonka maksimaalinen tuottoarvo oli suurin. Jokaisesta optimaaliseen käsittelyohjelmaan kuuluneesta hakkuusta kirjattiin puustotunnukset ennen hakkuuta ja sen jälkeen, minkä lisäksi tiedossa olivat optimoinnissa käytetyt tukin ja kuidun kantohinta. Mukaan ei kuitenkaan otettu käsittelyohjelman 1. hakkuuta, jos se oli tehty heti, sillä heti hakkaaminen tarkoittaa useimmiten sitä, että optimaalinen hakkuun ajankohta on jo ohitettu. Aineistoon kertyi tällä tavoin männikössä 1 873 ja kuusikossa 4 213 optimaaliseen käsittelyohjelmaan kuuluvaa hakkuuta.

Laskelmissa käytettiin kantohintoja, koska tavoitteena oli analysoida nimenomaan kantohinnan ja

hakkuun ajankohdan välistä riippuvuutta. Useimmat metsänomistajat myyvät puuta kantohinnoin, ja heidän on helpompi pohtia kantohinnan kuin tienvarsihinnan riittävyttä. Koska käytettiin kantohintoja, ei nettotulon laskennassa otettu huomioon korjuukustannuksia, joiden suuruus korjattua tilavuusyksikköä kohti riippuu mm. hakkuukertymästä. Epärealistisen pienten hakkuukertymien välttämiseksi optimoinnissa käytettiin sakkofunktiota, joka esti alle $30 \text{ m}^3\text{:n/ha}$ hakkuukertymät.

Myyntihintafunktiot laadittiin erikseen harvennushakkuulle ja avohakkuulle. Funktiot kehitettiin ainoastaan kuitupuulle, ja tukin hintaa käytettiin yhtenä selittäjänä. Kun tukkipuun hinta on selittäjänä, voidaan pelkästään kuitupuun myyntihintafunktiolla tutkia sitä, onko puutavaralajien hintayhdistelmä sellainen, että hakkuuseen ryhtyminen olisi taloudellisesti oikea päätös tietyssä metsikössä senhetkiselällä korkokannalla. Kun hintavaatimus pienenee metsikön varttuessa, on optimaalisten käsittelyohjelmien puun hinta myös pienin hinta, jolla hakkuuseen kannattaa ryhtyä, sillä huonommalla hinnalla hakkuuta kannattaisi lykätä ja paremmalla hinnalla aikaistaa. Nuorten metsien iän tai keskiläpimitan ja pienimän kuitupuun myyntihinnan välillä ei kuitenkaan havaittu laskevaa riippuvuutta, mikä vuoksi harvennushakkuun myyntihintafunktion mallitusaineistoon otettiin aineiston perusteellisen tutkimisen jälkeen pelkästään hakkuut, joihin ryhdyttäessä keskiläpimitta oli männikössä vähintään $18-r$ cm ja kuusikossa $24-3r$ cm, missä r on korkoprosentti.

Myyntihintafunktioiden kehittämisen jälkeen analysoitiin avohakkuun ajankohdan riippuvuutta puutavaralajien kantohinnoista, korkokannasta ja metsikön tiheydestä. Analyysin tuloksena saatiin sellaiset kiertoaikaohjeet taloudellisen tuottavuuden maksimoivalle metsänkäsittelylle, jotka ottavat huomioon korkokannan ja puun hinnan. Lisäksi selvitettiin, kuinka metsikön pohjapinta-ala ennen harvennusta ja sen jälkeen riippui valtapituudesta, puun hinnasta ja korkokannasta optimaalisissa käsittelyohjelmista. Tämä analyysi tuotti sellaiset harvennusohteet taloudellista tuottavuutta maksimoivalle metsätaloudelle, jotka ottavat huomioon puun hinnan ja korkokannan.

Kaikkiin yhtälöihin otettiin mukaan pelkästään sellaisia muuttujia ja niiden muunnoksia ja yhdistelmiä, joiden vaikutusta selitettävään muuttujaan

haluttiin analysoida tai joilla oli selkeitä yhdysvaikutuksia selittävien muuttujien kanssa. Kaikkien selittäjien regressiokerrointen oli oltava erittäin merkitseviä ($p < 0,0001$).

2.2 Simulointimalli

Tutkimuksessa käytettiin simulointimallia, joka simuloi tietyn lähtömetsikön käsittelyt ja kehityksen kiertoajan loppuun saakka ja laskee käsittelyohjelman tuottaman nettotulojen nykyarvon. Simulointi perustuu toisaalta alkumetsikköön, toisaalta käsittelyohjelmaan, joka määrittää metsikössä tehtävät käsittelyt nykyhetkestä uudistamishetkeen.

Metsikön kasvua simuloitiin Hynysen ym. (2002) malleilla. Tässä tutkimuksessa käytettiin vain kivennäismaiden malleja. Metsikön kehityksen simuloinnissa Hynysen ym. (2002) malleista tarvittiin boniteettimalleja, valtapituuden kehitysmalleja, läpimitan kasvumalleja, latvusrajamalleja, pituusmalleja ja kuolemismalleja. Syntymismalleja ei tarvittu, koska simulointi alkoi alkumetsiköstä ja päättyi uudistamishakkuuseen.

Alkumetsikkö määriteltiin seuraavien tunnusten avulla: lämpösumma, kasvupaikkatyyppi, puulaji, ikä, pohjapinta-ala, runkoluku, pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta ja ko. läpimittaa vastaava pituus. Muutama kasvun simulointiin vaikuttava tunnus vakioitiin. Esim. järvisyys oli aina 0,2, merisyys 0 ja korkeus merenpinnasta 50 m (ks. Hynysen ym. 2002). Metsikkötietojen perusteella ennustettiin puuston läpimittajakauma täsmälleen samalla tavalla kuin julkaisussa Pukkala ja Miina (2005) on selostettu. Läpimitan vaihteluväli jaettiin kymmeneen yhtä leveään luokkaan ja jokaisen luokan keskikohdalta otettiin yksi puu kuvaamaan luokkaa. Näin saatujen kuvauspuiden frekvenssit kalibroitiin tavoiteohjelmoinnin keinoin niin, että niistä lasketut metsikön pohjapinta, runkoluku ja keskiläpimitta olivat samat, joista kalibroimaton jakauma oli ennustettu (Kangas ja Maltamo 2000, Pukkala ja Miina 2005).

Hakkuissa poistettujen puiden tilavuus laskettiin Laasasenahon (1982) runkokäyräyhtälöillä. Yhtälöistä saatuun tukkitilavuuteen tehtiin tukkivähennys (osa laskennallisesta tukkiosan tilavuudesta muutettiin kuitupuuksi). Tukkivähennykset laskettiin Mehtälön (2002) yhtälöillä.

2.3 Optimointi

Optimoinnin tehtävänä oli löytää hakkuille sellaiset ajankohdat ja voimakkuudet, jotka maksimoivat metsikön tuottoarvon. Ongelman formaalinen muotoilu on esitetty mm. Hyytiäisen (2003) tutkimuksessa. Hakkuiden ajankohta määriteltiin uudistumisesta (1. hakkuu) tai edellisestä hakkuusta (muut hakkuut) kuluneen ajan avulla. Harvennusten voimakkuus määriteltiin kolmen harvennusprosentin avulla, joista ensimmäinen ilmoitti poistettavien puiden osuuden läpimittajakauman alarajalla, toinen keskikohdalla ja kolmas ylärajalla (Valsta 1992a). Muille läpimitoille poisto-osuus saatiin lineaarisella interpoloinnilla. Päätehakkuu simuloitiin aina avohakkuuna, ts. säästö-, siemen-, suojus- tai verhopuita ei jätetty. Metsiköiden käsittely määräytyi siten seuraavien päätösmuuttujien perusteella:

Harvennushakkuu

- Ajankohta (vuosia metsikön perustamisesta tai edellisestä harvennuksesta)
- Harvennusvoimakkuus pienimmälle läpimitalle
- Harvennusvoimakkuus läpimitan vaihteluvälin keskikohdalla
- Harvennusvoimakkuus maksimiläpimitalle

Päätehakkuu

- Ajankohta (vuosia edellisestä hakkuusta tai, ellei harvennuksia ollut, vuosia uudistumisesta)

Jos harvennuksia ei ollut lainkaan, optimoitavia päätösmuuttujia oli ainoastaan yksi (kiertoaika). Yhden harvennuksen käsittelyohjelmissa optimointiin viiden päätösmuuttujan yhdistelmää, kahden harvennuksen ohjelmissa yhdeksän.

Päätösmuuttujien optimiarvot haettiin Hooken ja Jeevesin (1961) epälineaarisen optimoinnin menetelmällä. Jokainen optimointitehtävä ratkaistiin kahdesti ja parempaa ratkaisua käytettiin, jos ratkaisuissa oli eroa. Ensimmäinen optimointi (Hooke & Jeeves -suorahaku) lähti liikkeelle subjektiivisesti valituista päätösmuuttujien arvoista. Toisen suorahaun lähtöpiste oli paras 500 satunnaisratkaisusta. Satunnaisratkaisut tuotettiin generoimalla päätösmuuttujille tasajakautuneita satunnaisarvoja etukäteen määritellyiltä vaihteluväliltä.

Hooke & Jeeves -suorahaku etenee siten, että aluksi muutetaan yhtä päätösmuuttujaa kerrallaan

tietyn askeleen verran, ja kaikki muutokset, jotka parantavat tavoitemuuttujan arvoa, jäävät voimaan (*exploratory search*). Ensin kokeillaan päätösmuuttujan arvon suurentamista, ja ellei se paranna ratkaisua, kokeillaan pienentämistä. Tämän jälkeen edetään *pattern search* -vaiheeseen, jossa muutetaan useampaa päätösmuuttujaa yhtäaikaisesti 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 määrätty lopetuskuiteeri. Tämän tutkimuksen optimoinneissa ensimmäinen askel oli 0,2 kertaa päätösmuuttujan vaihteluvälin pituus. Lopetuskuiteeri taas oli 0,02 kertaa alkuaskel.

3 Tulokset

3.1 Myyntihintafunktiot

Uudistushakkuu

Kuitupuun hinta, jolla metsiköt oli avohakattu taloudellisesti optimaalisissa käsittelyohjelmissa, riippuu puuston järeydestä, tiheydestä, korkokannasta ja tukin hinnasta (taulukko 1). Kummallakin puulajilla hinta, jolla hakkuuseen on ryhdytty, pienenee voimakkaasti puuston järeytyessä (kuva 1A, D), ts. mitä järeämpää puusto on, sitä huonommalla kuidun hinnalla se kannattaa avohakata. Erityisesti männylä myös lisääntyvä puuston tiheys pienentää hintavaatimusta (kuva 1B): jos tukin hinta on nykyisellä tasolla, tiheä ja melko varttunut männikkö kannattaa hakata alle 10 €/m³ kuidun hinnalla, jos korkokanta on vähintään 2 %.

Suureneva korkokanta pienentää odotetusti ja voimakkaasti hintavaatimusta, ts. koron suurentuessa riittää yhä huonompi hinta tekemään metsiköstä taloudellisesti hakkuukypsän (kuva 1). Jos tukkipuun hinta paranee, niin myös kuitupuusta on saatava parempi hinta, jotta metsikkö kannattaa avohakata. Paraneva tukkipuun hinta siis myöhäistää metsikön optimaalista uudistamisajankohtaa.

Taulukko 1. Mallit kuitupuun kantohinnalle, jolla metsikkö kannattaa hakata. Selitettävä muuttuja on kuitupuun kantohinnan ($\text{€}/\text{m}^3$) luonnollinen logaritmi.

	Mänty		Kuusi	
	Avohakkuu	Harvennus	Avohakkuu	Harvennus
Vakio	-18,683	5,165	-13,310	14,043
D	-0,722	-	-0,547	-
$\ln(D)$	12,205	-	8,498	-2,873
$\ln(G)$	-	-	-	-1,708
$\ln(Htu)$	0,766	0,754	1,046	1,708
$\ln(r)$	-	2,533	-	-1,203
$D \times r$	-0,0313	-0,0862	-0,0239	-
$G \times r$	-	-	-0,0625	-
$G \times D$	-0,00490	-0,00718	-	-
n	1373	298	2543	1028
R^2	0,693	0,396	0,560	0,293
s_e	0,827	1,182	0,959	1,285

D = pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta, cm
 G = metsikön pohjapinta-ala, m^2/ha
 Htu = tukkipuun kantohinta, $\text{€}/\text{m}^3$
 r = korkokanta, %
 n = havaintojen lukumäärä
 s_e = jäännöshajonta

Taulukko 3. Mallit harvennusta edeltävälle ja harvennuksen jälkeiselle pohjapinta-alalle taloudellisesti optimaalisessa metsän käsittelyssä. Selitettävä muuttuja on pohjapinta-alan (m^2/ha) luonnollinen logaritmi.

	Mänty		Kuusi	
	Ennen	Jälkeen	Ennen	Jälkeen
Vakio	-7,361	-0,311	1,368	-2,380
Hdom	-0,435	-	-0,0730	-0,0782
$\ln(Hdom)$	6,520	-	1,446	1,376
Hku	-	0,00700	-	0,00205
$\ln(Hku)$	-0,0413	-	-0,0189	-
Htu/Hku	-	0,000952	-	-
Htu \times Hku	-	-0,0000425	-	-
Hdom \times r	-0,00473	-0,00403	-0,00975	-0,00238
Htu \times r	-	-	0,000498	-
$\ln(G)$	-	0,954	-	0,858
n	500	500	1670	1670
R^2	0,665	0,795	0,399	0,790
s_e	0,140	0,118	0,174	0,134

Hdom = metsikön valtapituus, m
 G = metsikön pohjapinta-ala ennen harvennusta, m^2/ha
 Htu = tukkipuun kantohinta, $\text{€}/\text{m}^3$
 Hku = kuitupuun kantohinta, $\text{€}/\text{m}^3$
 r = korkokanta, %
 n = havaintojen lukumäärä
 s_e = jäännöshajonta

Taulukko 2. Mallit metsikön iälle ($\ln(T)$) ja keskiläpimitalle ($\ln(D)$) optimaalisella avohakkuuhetkellä.

	Mänty		Kuusi	
	Ikä	Läpimitta	Ikä	Läpimitta
Vakio	4,099	4,024	5,374	3,634
G	-	-	0,0114	-
$\ln(G)$	-	-0,302	-0,367	-0,106
$\ln(Htu)$	0,192	0,0601	0,0830	0,0791
Hku	-0,0144	-0,0186	-0,0112	-0,0116
$\ln(Hku)$	-0,119	-	-	-
$Hku \times Htu$	0,0000711	0,000109	0,0000601	0,0000692
Htu/Hku	-0,00357	-	-	-
$\ln(r)$	-0,114	-0,179	-0,308	-0,330
$G \times r$	-0,00154	-	-	-
n	1373	1373	2543	2543
R^2	0,758	0,732	0,798	0,634
s_e	0,156	0,132	0,116	0,158

G = metsikön pohjapinta-ala, m^2/ha
 Htu = tukkipuun kantohinta, $\text{€}/\text{m}^3$
 Hku = kuitupuun kantohinta, $\text{€}/\text{m}^3$
 r = korkokanta, %
 n = havaintojen lukumäärä
 s_e = jäännöshajonta

Taulukko 4. Mallit harvennuksen jälkeisen ja sitä edeltävän keskiläpimitan suhteelle taloudellisesti optimaalisessa harvennushakkuussa.

	Mänty	Kuusi
Vakio	1,220	1,248
$\ln(Hdom)$	-0,0872	-0,0917
r	-	-0,00798
$\ln(r)$	-0,0201	-
N	500	1670
R^2	0,270	0,375
s_e	0,030	0,039

Hdom = metsikön valtapituus, m
 r = korkokanta, %
 n = havaintojen lukumäärä
 s_e = jäännöshajonta

Harvennushakkuu

Harvennushakkuuseen ryhtymiseen vaadittava kuitupuun hinta riippuu metsikön tiheydestä, puuston järeydestä, tukkipuun hinnasta ja korkokannasta suunnilleen samalla tavalla kuin avohakkuun hintavaatimus, mutta riippuvuudet ovat paljon heikompiä (taulukko 1, kuva 2). Erona on, että pieni- ja keskikokoisessa puustossa varaushinta on selvästi pienempi kuin avohakkuussa (kuva 2A, D), ts. nuoressa puustossa metsikkö kannattaa harventaa selvästi huonommalla kuidun hinnalla kuin se kannattaa avohakata. Esim. 20 cm:n keskiläpimitala kuitupuun myyntihinta on harvennushakkuussa noin kolmanneksen pienempi kuin avohakkuussa. Suureneva pohjapinta-ala pienentää kuitupuun hintavaatimusta, mikä tarkoittaa sitä, että tiheyden suurentuessa harventaminen on optimaalista yhä huonommalla kuidun hinnalla. Suureneva korkokanta pienentää kuitupuun hintavaatimusta kummallakin puulajilla, mutta koron vaikutus on eri puulajeilla jonkin verran erilainen.

3.2 Avohakkuun ajankohta

Kiertoaika

Kummallakin puulajilla optimaalinen avohakkuun ajankohta riippuu voimakkaasti korkokannasta, tukin hinnasta ja kuidun hinnasta (taulukko 2, kuva 3). Korkokannan suureneminen yhdestä prosentista neljään prosenttiin lyhentää kiertoaikaa männyllä 15–20 ja kuusella 25–30 vuotta. Suureneva pohjapinta-ala aikaistaa jonkin verran optimaalista päätehakkuun ajankohtaa. Tiheähkö metsikkö (pohjapinta-ala 30 m²/ha) kannattaa uudistaa 2–3 vuotta aiemmin kuin harvahko metsikkö (pohjapinta-ala 20 m²/ha).

Keskiläpimitta

Puuston keskiläpimitta avohakkuuhetkellä riippuu metsikön tiheydestä, korkokannasta ja puun hinnasta samalla tavalla kuin puuston ikä uudistamishetkellä (taulukko 2, kuva 4). Erona on, että lisääntyvä metsikön tiheys pienentää voimakkaammin hakkuuseen vaadittavaa keskiläpimittaa kuin kiertoaikaa. Lisään-

tyvä tiheys siis aikaistaa metsikön uudistushakkuuta enemmän, kun puuston varttumista mitataan puun koolla, kuin jos varttumista mitataan iällä. Tulosten mukaan VT-männikön on oltava varsin harva, jotta puusto kannattaa kasvattaa järeäksi.

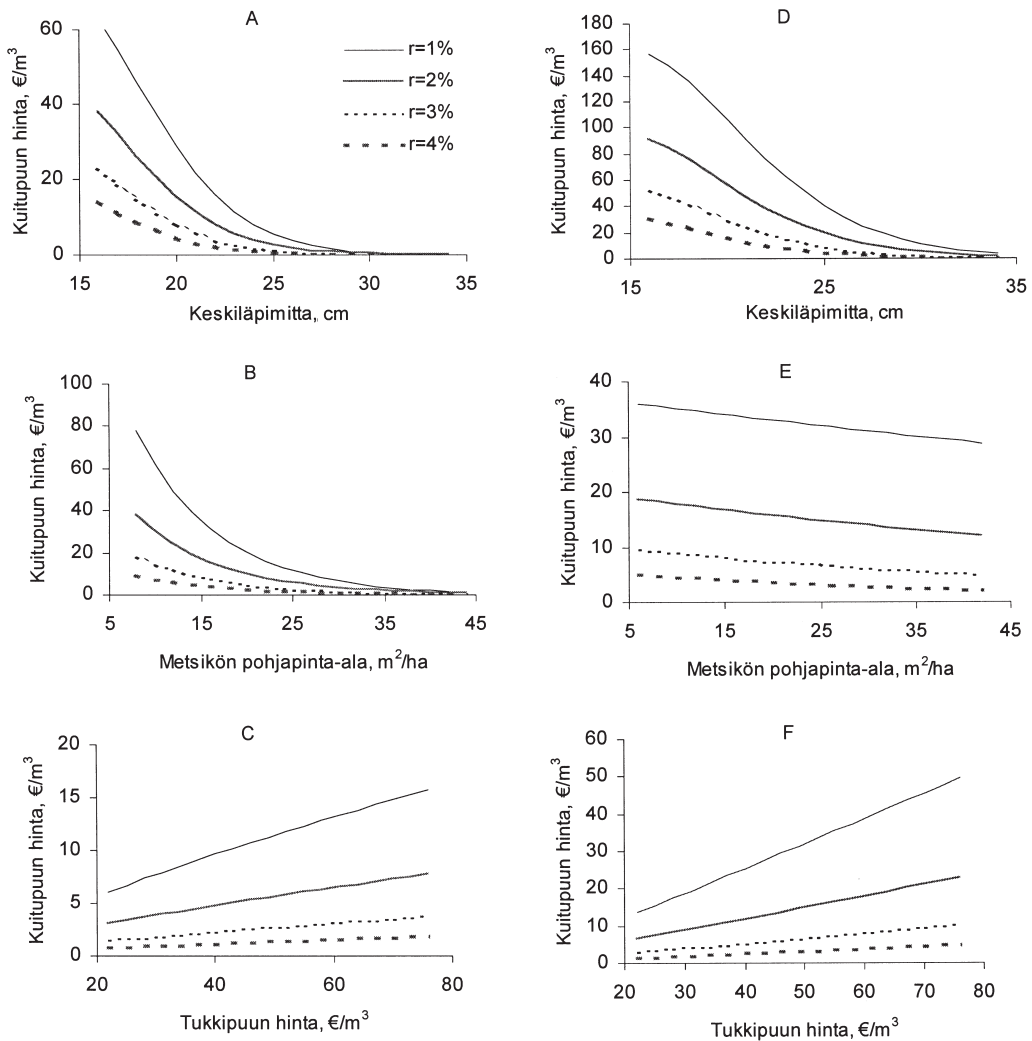
Paraneva tukin hinta suurentaa puuston keskiläpimittaa avohakkuuhetkellä ja paraneva kuidun hinta pienentää sitä (kuva 4 B, C, E, F). Korkokannan suurentuessa yhdestä prosentista neljään prosenttiin kuusikon keskiläpimitta avohakkuuhetkellä pienenee nykyisillä kantohinnoilla ja tavanomaisella puuston tiheydellä peräti 10 cm (n. 30 cm:stä n. 20 cm:iin) ja männikön keskiläpimitta noin 5 cm (n. 22 cm:stä n. 17 cm:iin).

3.3 Harvennuksen ajankohta ja voimakkuus

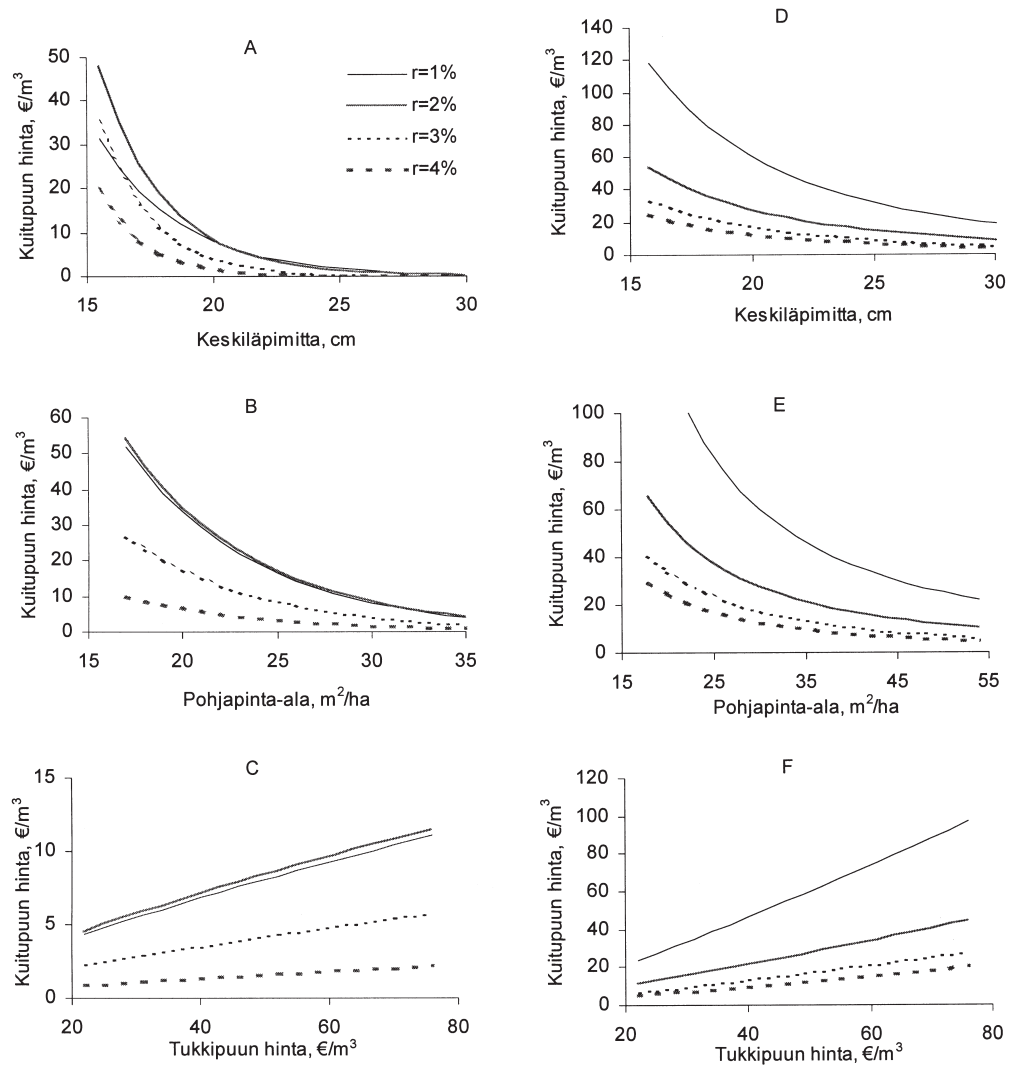
Kummallakin puulajilla pohjapinta-ala, jolla metsikkö kannattaa harventaa, on suurimmillaan tiettyssä valtapituusvaiheessa (13–18 m puulajista ja korkokannasta riippuen), minkä jälkeen metsikkö kannattaa harventaa yhä pienemmällä pohjapinta-alalla (taulukko 3, kuva 5). Erityisesti männikössä metsikön kasvatustiheyttä kannattaa pienentää voimakkaasti, kun puusto varttuu. Kummallakin puulajilla pohjapinta-ala, jossa nuoren metsikön harvennushakkuuseen kannattaa ryhtyä, on alhaisella korkokannalla lähellä metsikön itseharvenemisrajaa (Hynynen ym. 2002).

Männikön harvennuksissa poistetaan n. 40 % puuston pohjapinta-alasta. Kuusikossa taas poistetaan aina 15–20 m²/ha, mikä tarkoittaa sitä, että kuusikon harvennus on suhteellisesti voimakkainta nuorissa ja varttuneissa metsiköissä, jossa harvennukseen kannattaa ryhtyä pienemmällä pohjapinta-alalla.

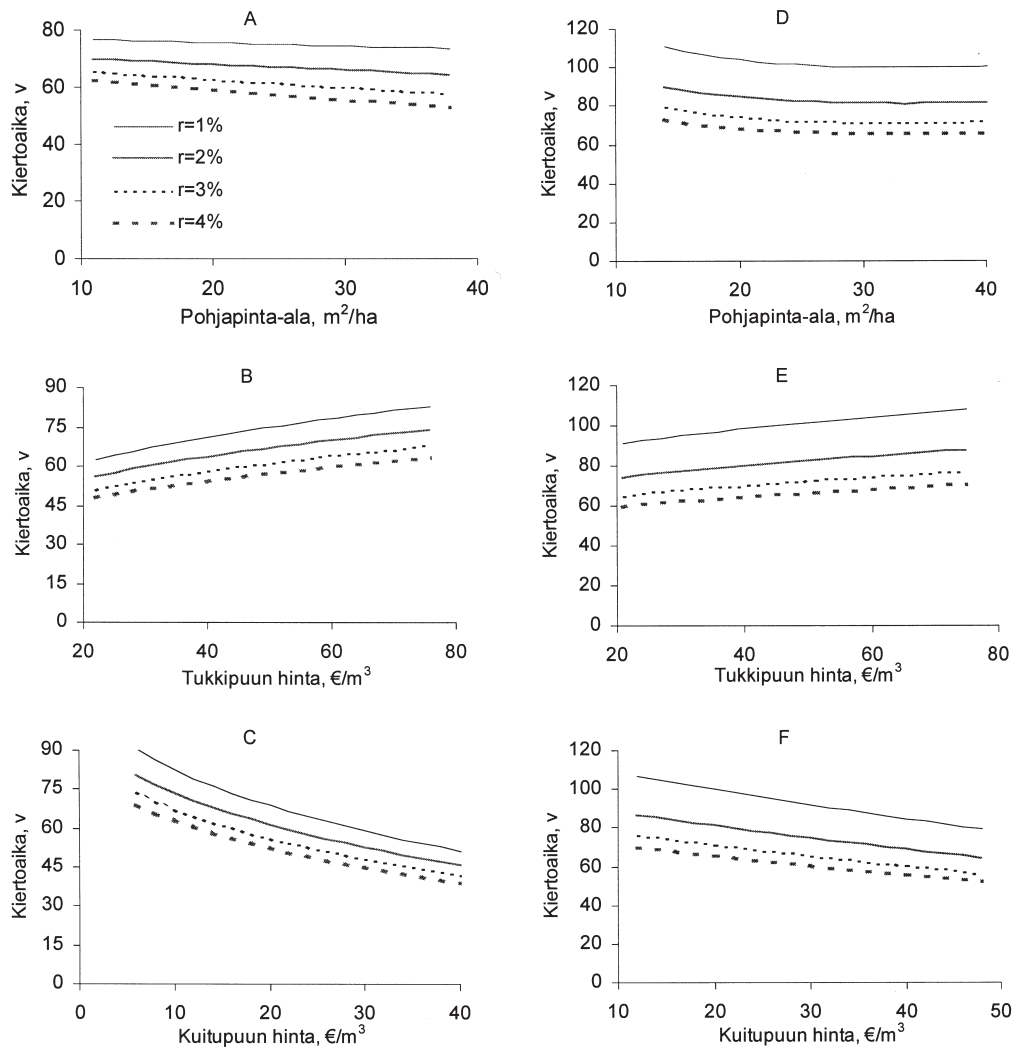
Puun hinta ei vaikuta paljonkaan harvennushakkuun optimaaliseen ajankohtaan ja voimakkuuteen. Paraneva kuidun hinta aikaistaa hakkuuta jonkin verran ja pienentää jäävän puuston pohjapinta-alaa, mutta tukin hinnalla ei ole mitään vaikutusta. Suureneva korkokanta pienentää voimakkaasti sekä harvennusta edeltävää että sen jälkeistä pohjapinta-alaa. Koron suurentuessa metsikön optimaalinen kasvatustiheys pienenee nopeammin kiertoajan loppua kohden. Lisäksi suureneva korkokanta pienentää valtapituuksia, jossa kasvatustiheys on suurimmillaan.



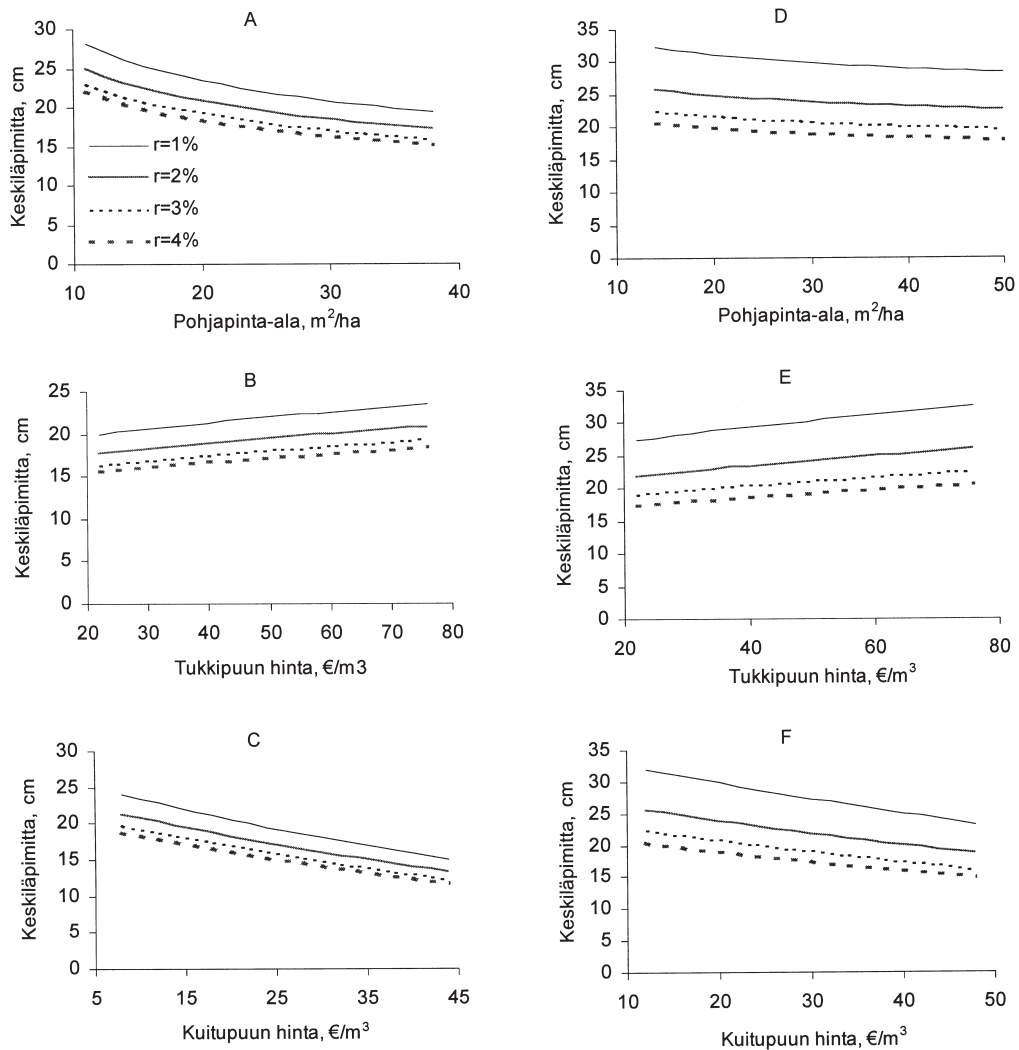
Kuva 1. Kuitupuun hinta, jolla VT-männikkö (A, B, C) tai MT-kuusikko (D, E, F) kannattaa avohakata lämpösukka-alueella 1100 d.d., kun korkokanta (r) on 1, 2, 3 tai 4 %. Osakuissa A ja D pohjapinta-ala on 25 m²/ha ja tukkipuun hinta 50 €/m³. Osakuissa B keskiläpimitta on 23 cm ja tukkipuun hinta 50 €/m³. Osakuissa C keskiläpimitta on 23 cm ja pohjapinta-ala 20 m²/ha. Osakuissa E keskiläpimitta on 26 cm ja tukkipuun hinta 50 €/m³. Osakuissa F keskiläpimitta on 26 cm ja pohjapinta-ala 25 m²/ha.



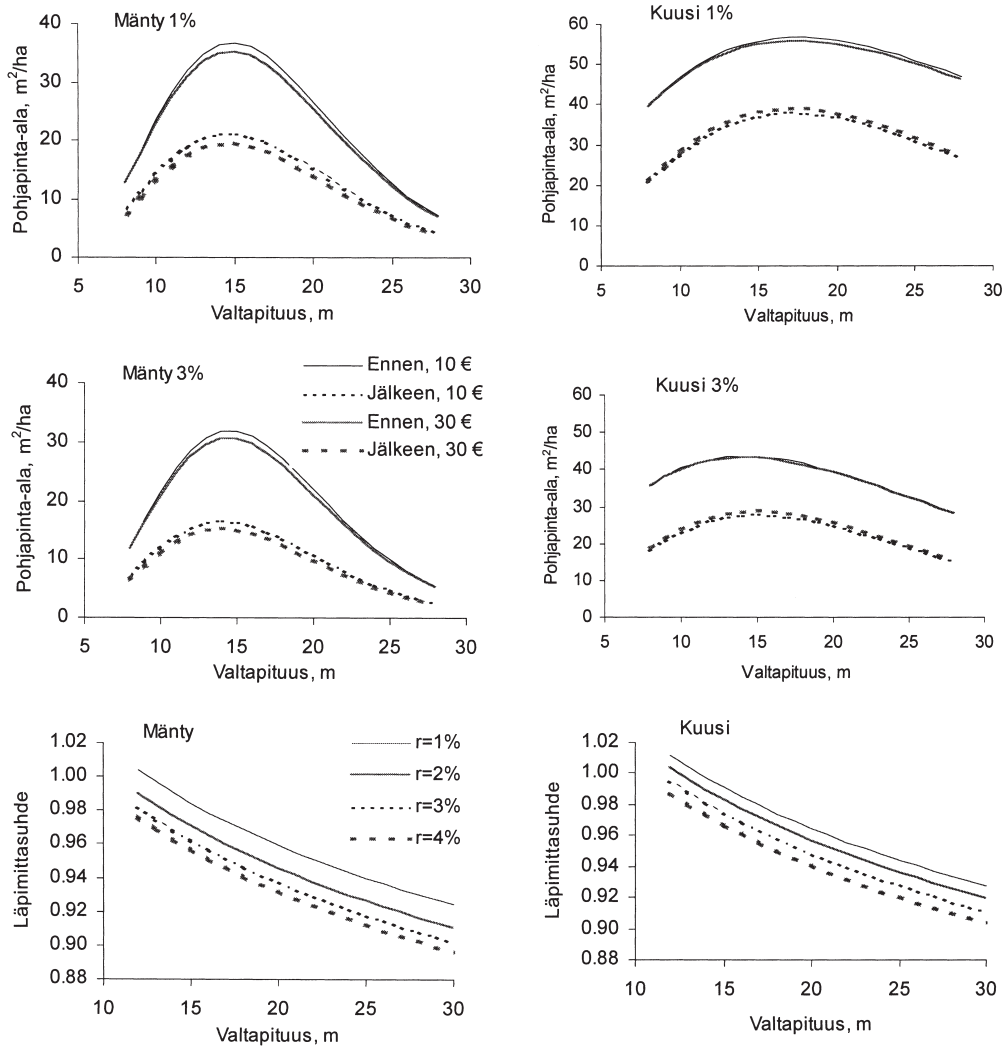
Kuva 2. Kuitupuun hinta, jolla VT-männikkö (A, B, C) tai MT-kuusikko (D, E, F) kannattaa harventaa lämpösukka-alueella I 100 d.d., kun korkokanta (r) on 1, 2, 3 tai 4 %. Osakuissa A ja D pohjapinta-ala on 30 m²/ha ja tukkipuun hinta 50 €/m³. Osakuissa B ja E keskiläpimitta on 20 cm ja tukkipuun hinta 50 €/m³. Osakuissa C ja F keskiläpimitta on 20 cm ja pohjapinta-ala 30 m²/ha.



Kuva 3. Taloudellisesti optimaalisen kiertoaajan riippuvuus korkokannasta (r) ja puun hinnasta VT-männikössä (A, B, C) ja MT-kuusikossa (D, E, F) lämpösukka-alueella I 100 d.d.. Osakuvassa A tukkipuun hinta on 50 €/m³ ja kuitupuun hinta 15 €/m³. Osakuvassa B pohjapinta-ala on 25 m²/ha ja kuitupuun hinta 15 €/m³. Osakuvassa C pohjapinta-ala on 25 m²/ha ja tukkipuun hinta 50 €/m³. Osakuvassa D tukkipuun hinta on 45 €/m³ ja kuitupuun hinta 20 €/m³. Osakuvassa E pohjapinta-ala on 30 m²/ha ja kuitupuun hinta 20 €/m³. Osakuvassa F pohjapinta-ala on 30 m²/ha ja tukkipuun hinta 45 €/m³.



Kuva 4. Metsikön keskiäpimitta avohakkuuhetkellä puuston pohjapinta-alan, korkokannan (r) ja puun hinnan funktiona taloudellisesti optimaalisissa käsittelyohjelmissä VT-männikössä (A, B, C) ja MT-kuusikossa (D, E, F) lämpösukka-alueella I 100 d.d. Osakuvassa A tukkipuun hinta on 50 €/m³ ja kuitupuun hinta 15 €/m³. Osakuvassa B pohjapinta-ala on 25 m²/ha ja kuitupuun hinta 15 €/m³. Osakuvassa C pohjapinta-ala on 25 m²/ha ja tukkipuun hinta 50 €/m³. Osakuvassa D tukkipuun hinta on 45 €/m³ ja kuitupuun hinta 20 €/m³. Osakuvassa E pohjapinta-ala on 30 m²/ha ja kuitupuun hinta 20 €/m³. Osakuvassa F pohjapinta-ala on 30 m²/ha ja tukkipuun hinta 45 €/m³.



Kuva 5. Metsikön pohjapinta-ala ennen (yhtenäinen viiva) ja jälkeen (katkoviiva) harvennishakkuuta taloudellisesti optimaalisissa käsittelyohjelmissä VT-männikössä ja MT-kuusikossa lämpösukka-alueella 1100 d.d., kun kuitupuun hinta on 10 (ohut viiva) tai 30 €/m³ (paksu viiva) sekä hakkuun jälkeisen ja sitä edeltävän keskiläpimitan suhteen riippuvuus valtapituudesta ja korkokannasta.

3.4 Harvennustapa

Jos harvennustapaa kuvataan puuston keskiläpimitan muutoksella (läpimita harvennuksen jälkeen jaettuna harvennusta edeltävällä keskiläpimitalla), optimaaliset harvennukset ovat puuston varttuessa yhä enemmän yläharvennuksia (taulukko 4, kuva 5). Valtapituusvaiheessa 10–15 m keskiläpimita ei paljonkaan muutu, mistä voidaan päätellä, että ensiharvennusemetsikön optimaalinen harvennus ei ole alaharvennus eikä yläharvennus.

Suureneva korkokanta pienentää jäävän puuston keskiläpimitan suhdetta harvennusta edeltävän puuston keskiläpimitaan. Koron suurentuminen merkitsee siis yläharvennuksen lisääntyvää käyttöä. Optimaalinen harvennustapa ei riipu tukin tai kuidun hinnasta. Esim. tukin hinnan paraneminen kuidun hintaan nähden ei siis näyttäisi johtavan siihen, että kertymää olisi optimaalista suunnata enemmän tukkiin voimistamalla hakkuun yläharvennusluonetta.

4 Tarkastelua

Tutkimuksessa mallitettiin metsikön optimaalisen käsittelyn riippuvuutta puutavaran hinnasta, korkokannasta ja metsikön ominaisuuksista. Toisaalta mallitettiin hinnan, jolla hakkuuseen kannattaa ryhtyä, riippuvuutta korosta ja metsikön ominaisuuksista. Kummallakin menetelmällä voidaan ohjeistaa taloudellisesti optimaalinen metsikön käsittely ja sen riippuvuus puun hinnasta.

Mallien kaikki selittäjät olivat erittäin merkitseviä ($p < 0,0001$). Kertoimien t-arvot olivat vähintään 4, useimmiten reippaasti yli 10. Parametristimaatit olivat siis varsin luotettavia.

Puun hinnan vaikutuksesta metsikön käsittelyyn voidaan tehdä muutama selkeä johtopäätös. Paraneva tukin hinta pidentää optimaalista kiertoaikaa, mutta paraneva kuidun hinta lyhentää sitä. Myös Nyssösen ja Ojansuon (1982) tutkimustuloksista voidaan päätellä, että paraneva kuidun hinta pienentää useimpien metsiköiden suhteellista arvokasvua ja näin ollen aikaistaa optimaalista päätehakkuun ajankohtaa. Hinnan vaikutus on varsin voimakas, mikä tarkoittaa sitä, että puun hinnasta riippumat-

tomia kiertoaikaohjeita ei voi antaa, jos hinta ei ole vakio ja tavoitteena on tuottavuuden maksimointi.

Sitä vastoin puun hinta vaikuttaa vain vähän harvennuksen ajankohtaan ja voimakkuuteen eikä juuri lainkaan harvennustapaan. Tästä voidaan päätellä, että harvennusohteet voidaan perustaa korkokantaan ja esim. metsikön valtapiuuteen ja pohjapinta-alaan, ja jättää puun hinta pois vaikuttavien tekijöiden joukosta.

Korkokanta vaikuttaa voimakkaasti kiertoaikaan, metsikön optimaaliseen kasvatustiheyteen ja harvennustapaan. Suureneva korkokanta lyhentää kiertoaikaa, pienentää puuston optimaalista kasvatustiheyttä ja muuttaa harvennustapaa siten, että metsikön suurimpia puita kannattaa koron suurentuessa poistaa yhä enemmän.

Tutkimuksessa kehitetyt käsittelyohjeet ovat hieinan erilaisia kuin mihin Suomessa on totuttu. Sen lisäksi, että nyt kehitetyissä ohjeissa käsittely riippuu korkokannasta ja puun hinnasta, myös ennen kaikkea harvennushakkuun riippuvuus metsikkötunnuksista on erilainen kuin nykyisin sovellettavissa ohjeissa (Hyvän metsänhoidon... 2001). Tulokset ovat kuitenkin ennako-odotuksia vastaavia ja loogisia, ja ne muistuttavat aiemmissa tutkimuksissa havaittuja riippuvuuksia. Esim. se, että metsikön pohjapinta-ala kannattaa ensiharvennusvaiheen jälkeen pienentää kiertoajan loppua kohti, on havaittu monissa tutkimuksissa (esim. Salminen 1993, Pukkala ja Miina 1998, Pukkala ym. 1998, Palahí 2001, Hyytiäinen 2003). Samanlaisiin tuloksiin on Suomessa päädytty useilla erityyppisillä kasvumalleilla (esim. Salminen 1993, Pukkala ja Miina 1977, Pukkala ym. 1998, Hyytiäinen ja Tahvonen 2003, Hyytiäinen ym. 2004). Samoin yläharvennuksen käytön edullisuus varttuneen metsikön harvennuksessa on todettu lähes kaikissa niissä tutkimuksissa, joissa harvennustapaa on optimoitu, vaikka käytyissä kasvumalleissa on ollut suuriakin eroja (esim. Valsta 1992a, Pukkala ja Miina 1997, Pukkala ym. 1998, Hyytiäinen ym. 2005). Jos tämän tutkimuksen optimoinneissa olisi kantohintojen sijasta käytetty tienvarsihintoja ja otettu huomioon korjuukustannukset, olisi optimaalinen metsänkäsittely ollut vielä selvemmin yläharvennusvoittoista.

Harvennustapaa kuvattiin tässä tutkimuksessa harvennuksen jälkeisen ja sitä edeltävän keskiläpimitan suhteella. Tulosten perusteella yläharvennuk-

sia tulisi käyttää sitä enemmän, mitä suurempi on korkokanta ja mitä varttuneempaa puusto. Muissa tutkimuksissa on kuitenkin havaittu, että tilanne ei ole näin yksinkertainen, sillä monesti on optimaalista poistaa metsiköstä sekä pienimpiä että suurimpia puita (esim. Valsta 1992a, Pukkala ja Miina 1997, 1998, Pukkala ym. 1998, Vettenranta ja Miina 1999, Hyytiäinen ym. 2005). Harvennustavan riipuvuus korkokannasta ja metsikön kehitysvaiheesta lieneekin sellainen, että ensiharvennusvaiheessa kannattaa poistaa suunnilleen yhtä paljon isoimpia ja pienimpiä puita, mutta kiertoajan loppua kohti painopiste siirtyy yhä enemmän suurimpiin puihin. Tämä on varsin loogista, kun ottaa huomioon, että kiertoajan loppupuolella metsikön suurimpien puiden arvokasvu on puiden arvoon nähden pientä, ts. parhaan tuottavuuden aika on näillä puilla jo takana päin. Lisäksi metsikön suurimmat puut reagoivat harvennuksiin heikommin kuin hieman pienemmät puut (esim. Pukkala ym. 2002), mutta toisaalta vievät paljon kasvutilaa niiltä puilta, joiden arvo voisi vielä reippaasti suurentua.

Ensiharvennusvaiheen metsiköiden optimaalinen harvennusta edeltävä pohjapinta-ala on varsin korkea, alhaisella korkokannalla käytännössä itseharvenemisrajalla. Tulos ei ole ristiriidassa aiempien tutkimusten kanssa (esim. Salminen 1993, Pukkala ym. 1998). Ryhmittäinen metsikkö kannattaa kuitenkin harventaa alhaisemmalla pohjapinta-alalla kuin tasainen (Pukkala ja Miina 2005), minkä vuoksi useimpien ensiharvennusmetsikköjen optimaalinen harvennuspohjapinta-ala lienee jonkin verran pienempi kuin taulukon 3 mallit ja kuvan 5 käyrät osoittavat. Harvennuksessa tulee yleensä poistaa yli kolmannes puuston pohjapinta-alasta. Koska harvennukset ovat yläharvennusvoittoisia, pienenee runkoluku suhteellisesti vähemmän kuin pohjapinta-ala, eivätkä harvennukset näin ollen näyttäne luonnossa erityisen voimakkailta.

Hyvällä kuidun hinnalla ja huonolla tukin hinnalla männikön optimaalinen kiertoaika on varsin lyhyt ja metsikön keskiläpimitta uudistamishetkellä pieni. Kuvan 3 esimerkeissä MT-kuusikon kiertoajat ovat usein pidempiä kuin VT-männikön kiertoajat, mikä ei ole uusi tulos (Salminen 1993). Kuusikon kiertoajan pituus johtunee osaksi siitä, että kiertoajan kannattava jatkaminen reippain yläharvennuksin onnistuu kuusella pidempään kuin männyllä. Varttuneessa

männikössä yläharvennuksella ei ilmeisesti ole saatu aikaan samanlaista vaikutusta. Asiaan lienee vaikuttanut myös laskelmissa tehty tukkivähennys, joka on hidastanut tukin määrän lisääntymistä männikössä ja sen kautta pienentänyt männikön arvokasvua ja sen suhdetta puuston hakkuuarvoon.

Tutkimuksessa esiteltiin menetelmä, jolla metsikön käsittelyohjeet voi johtaa objektiivisesti ja analyttisesti. Tässä tutkimuksessa tavoiteltiin ohjeita, joita noudattamalla metsänomistaja voi maksimoida metsänsä taloudellisen tuottavuuden. Samaa tekniikkaa voidaan käyttää haettaessa käsittelyohjeita esim. puuntuotannon tai keskimääräisen vuotuisen nettotulon maksimoivalle metsänkäsittelylle, vaikka näitä tavoitteita onkin vaikea järkisyin perustella yksityismetsätaloudessa. Sen sijaan on perusteltua etsiä ohjeita sellaiselle metsätaloudelle, jossa kannattavuuden ohella tavoitellaan esim. maisema- ja luontoarvoja. Näissä tapauksissa tavoitefunktiona voidaan käyttää Faustmannin kaavan sijasta hyötyfunktia (Pukkala ja Miina 1997) tai Hartmannin kaavaa, jossa oletetaan, että myös kasvava puusto – esim. maisema- ja biodiversiteettihyötyjen kautta – vaikuttaa siihen, mikä on kiertoajan kokonaistulos (Viitala 2002).

Jos metsänomistajalla on toivomuksia hakkuutulojen ajallisen jakaantumisen suhteen, yksittäisen metsikön käsittelyä ei voi päättää ottamatta huomioon metsänomistajan muita metsiköitä. Tällöin voidaan menetellä esim. niin, että eri metsiköille tuotetaan useita hyviä mutta hakkuuiden ajankohdan puolesta erilaisia käsittelyohjelmia, joista haetaan paras yhdistelmä kombinatorisen optimoinnin keinoin (esim. Siitonen 1983). Tällöinkin metsikkötason optimointeja ja niistä johdettuja käsittelyohjeita voidaan käyttää apuna, kun etsitään metsiköille hyviä käsittelyvaihtoehtoja. Jos taas metsänomistaja maksimoi esim. pelkästään taloudellista kannattavuutta tai muita hyötyjä, jotka eivät riipu hakkuuiden sijainnista ja hakkuutulojen tasaisuudesta, metsälön optimaalinen käsittely saadaan metsikköoptimien summasta, ja käsittelypäätökset voidaan perustaa metsikkötason laskelmiin ja ohjeisiin.

Tässä tutkimuksessa esitetyt mallit selittävät vain osan optimaalisen kiertoajan, harvennushetken tai hakkuuseen vaadittavan kuitupuun hinnan vaihtelusta. Tämä johtuu osittain siitä, että useampi varsin erilainenkin käsittelyohjelma voi olla tuottoarvoltaan

jotakuinkin yhtä hyvä, ja optimointi hiukankin erilaisilla puun hinnoilla voi päätyä varsin erilaisiin ratkaisuihin. Usean eri ratkaisun tasapäisyys tarkoittaa sitä, että metsikön käsittelyssä on pelivaraa. Esim. varttuneen ja tiheän kuusikon käsittelyn lähes yhtä hyviä vaihtoehtoja voivat olla avohakkaus heti tai voimakas yläharvennus heti ja avohakkaus kymmenen vuoden päästä (mutta ei lepo). Optimointituloksia tarkasteltaessa havaittiin lisäksi mm., että usea eri hintayhdistelmä tuottaa jotakuinkin saman kiertoajan. Kun esim. kuitupuun hintaa ruvetaan tietyllä tukkipuun hinnalla suurentamaan, lyhenee kiertoaika porrasmaisesti siten, että useampi eri kantohinta tuottaa lähes saman kiertoajan. Tämä johtune siitä, että puuston arvokasvu ei ole tasaista, vaan puuston arvossa tapahtuu hyppäyksiä silloin, kun metsikössä tapahtuu voimakasta siirtymistä arvokkaampiin puutavaralajeihin. Jos seuraava siirtymisvaihe on lähellä, sitä kannattaa odottaa suurella puun hinnan vaihteluvälillä. Jos kuitenkin metsikkö on heterogeeninen ja koostuu puun keskikoon ja tiheyden suhteen erilaisista osa-alueista, arvokasvu on metsikkötasolla tasaisempaa ja käsittelyajankohdan riippuvuus puun hinnasta suoraviivaisempaa.

Etenkin harvennushakkuun ajankohdan ja puun hinnan välinen riippuvuus oli varsinkin nuorissa metsiköissä heikko, mistä pääteltiin, että optimaalinen harvennushakkuun ajankohta, voimakkuus ja harvennustapa ovat pitkälti riippumattomia puun hinnasta. Harvennushakkuun myyntihintafunktioiden kehittämistä varten aineisto olisi voitu muodostaa myös etsimällä kullakin korkokannalla ja tukin hinnalla pienin kuidun hinta, jolla metsikkö oli hakattu heti. Tätä kokeiltiin, mutta kuitupuun myyntihinnan riippuvuus metsikön ominaisuuksista, tukin hinnasta ja korkokannasta säilyi heikkona. Riippuvuus oli tällä tavoin muodostetussa aineistossa samanlainen kuin tässä tutkimuksessa esitetyt mallit osoittavat.

Tutkimuksessa oletettiin, että puun hinnassa ei tapahdu ajallisia muutoksia. Jos laskelmat olisi tehty stokastisin puun hinnoin (esim. Brazee ja Mendelsohn 1988, Valsta 1992b, Pukkala ja Miina 1997), tulokset olisivat luultavasti olleet jonkin verran erilaisia (esim. Pukkala ja Miina 1997). Tutkimusten mukaan varaushinta suurenee, kun ajallinen vaihtelu puun hinnassa lisääntyy, vaikka yhtälön perusmuoto säilyykin samana (Gong ja Löfgren 2005). Voidaan

lisäksi päätellä, että jos puun hinta heikkenee lähitulevaisuudessa nykyhinnasta, hakkuuseen kannattaa ryhtyä pienemmällä puun hinnalla kuin tapauksessa, jossa hinta ei pienene (Brazee ja Mendelsohn 1988). Hinnan ollessa paranemassa kannatta lykätä hakkuuta eli suurentaa hintavaatimusta.

Optimaalinen metsikön käsittely riippuu puutavaralajien hintojen ja korkokannan lisäksi kasvupaikasta ja metsänomistajan tavoitteista. Kun otetaan lisäksi huomioon, että monet metsiköt ovat sekametsiköitä ja niissä voi olla useita ikäluokkia, yleisohjeiden antaminen metsikön optimaalisesta käsittelystä on vaikeaa. Vaihtoehto ohjeille on tapauskohtainen optimointi, jossa tarkasteltavana olevan metsikön käsittelytarve johdetaan analyttisesti metsikön senhetkisestä tilasta sekä puutavaran hinnoista ja pääoman tuottovaatimuksesta. Laskentatekniset edellytykset tällaiselle optimoinnille ovat olemassa. Kysymys onkin halusta ruveta soveltamaan näitä tekniikoita. Jos metsänhoidon neuvonnan tavoitteena pidetään hyvien neuvojen antamista, muiden kuin parhaiden tekniikoiden käyttöä on vaikea perustella. Samalla tavoin on vaikea perustella sellaisia neuvoja, joita ei ole johdettu objektiivisin ja analyttisin keinoin tai joiden oikeellisuutta ei voi analyttisin laskelmin todentaa.

Kirjallisuus

- Brazee, R. & Mendelsohn, R. 1988. Timber harvesting with fluctuating prices. *Forest Science* 34(2): 359–372.
- Gong, P. & Yin, R. 2004. Optimal harvest strategy for slash pine plantations: the impact of autocorrelated prices for multiple products. *Forest Science* 50(1): 10–19.
- & Löfgren, K.G. 2005. Market and welfare implications of the reservation price strategy for forest harvest decisions. Department of Economics, University of Umeå, The S-WoPEc Working Paper Collection. 30 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., Salminen, H. & Haapala, P. 2002. Models for predicting

- stand development in MELA system. Finnish Forest Research Institute, Research Papers 835. 116 s.
- Hyvän metsänhoidon suositukset 2001. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisuja 13/2001. 95 s.
- Hyttiäinen, K. 2003. Integrating economics and ecology in stand-level timber production. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 908. 42 s. + liitteet.
- & Tahvonen, O. 2001. The effects of legal limits and recommendations on timber production: the case of Finland. *Forest Science* 47: 443–454.
- & Tahvonen, O. 2002. Economics of forest thinnings and rotation periods for Finnish conifer cultures. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17: 274–288.
- & Tahvonen, O. 2003. Maximum sustained yield, forest rent of Faustmann: does it really matter? *Scandinavian Journal of Forest Research* 18: 457–469.
- , Hari, P., Kokkila, T., Mäkelä, A., Tahvonen, O. & Taipale, J. 2004. Connecting process-based forest growth model to stand-level economic optimization. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 2060–2073.
- , Tahvonen, O. & Valsta, L. 2005. Optimum juvenile density, harvesting and stand structure in even-aged Scots pine stands. *Forest Science* 51: 120–133.
- Ihalainen, R. 1992. Yksityismetsänomistuksen rakenne. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 405. 41 s.
- Kangas, A. & Maltamo, M. 2000. Calibrating predicted diameter distribution with additional information. *Forest Science* 46: 390–396.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume equations for pine spruce and birch. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 108. 74 s.
- Mehtätalo, L. 2002. Valtakunnalliset puukohtaiset tukki-vähennysmallit männylle, kuuselle, koivulle ja haavalle. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2002: 575–591.
- Nyysönen, A. & Ojansuu, R. 1982. Metsikön puutavara-lajirakenteen, arvon ja arvokasvun arviointi. *Acta Forestalia Fennica* 179. 52 s.
- Palahi, M. 2002. Modelling the stand development and optimising the management of even-aged Scots pine forests in northeast Spain. PhD thesis. University of Joensuu. 58 s.
- Pukkala, T. 2005. Metsikön tuottoarvon ennustemallit kiennäismaan männiköille, kuusikoille ja rauduskoivikoille. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2005: 311–322.
- & Miina, J. 1997. A method for stochastic optimization of stand management. *Forest Ecology and Management* 98: 189–203.
- & Miina, J. 1998. Tree-selection algorithms for optimizing thinning using a distance-dependent growth model. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 693–702.
- & 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: 31–42.
- , Miina, J. & Palahi, M. 2002. Thinning response and thinning bias in a young Scots pine stand. *Silva Fennica* 36(4): 827–840.
- Salminen, O. 1993. Dynaamiseen ohjelmointiin perustuva viljelymetsiköiden harvennusten ja kiertoajan optimointi. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 480. 48 s.
- Siitonen, M. 1983. A long term forestry planning system based on data from the Finnish national forest inventory. University of Helsinki, Department of Forest Mensuration and Management, Research Notes 17: 195–207.
- Valsta, L. 1992a. An optimization model for Norway spruce management based on individual-tree growth models. *Acta Forestalia Fennica* 232. 20 s.
- 1992b. A scenario approach to stochastic anticipatory optimization in stand management. *Forest Science* 38: 430–447.
- Vettenranta, J. 1996. Effect of species composition on economic return in a mixed stand of Norway spruce and Scots pine. *Silva Fennica* 30(1): 47–60.
- & Miina, J. 1999. Optimizing thinnings and rotation of Scots pine and Norway spruce mixtures. *Silva Fennica* 33(1): 73–84.
- Viitala, E.-J. 2002. Metsän optimaalinen kiertoaika: lähestymistavat ja niiden talousteoreettinen perusta. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 848. 128 s.
- Vuokila, Y. & Väliäho, H. 1980. Viljeltyjen havumetsiköiden kasvatusmallit. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 99(2). 271 s.

32 viitettä