



Timo Pukkala

Timo Pukkala

Metsikön tuottoarvon ennustemallit kivennäismaan männiköille, kuusikoille ja rauduskoivikoille

Pukkala, T. 2005. Metsikön tuottoarvon ennustemallit kivennäismaan männiköille, kuusikoille ja rauduskoivikoille. Metsätieteen aikakauskirja 3/2005: 311–322.

Yksi tapa kuvata metsikön puuntuotannollista arvoa on ilmoittaa sen maksimoitu tuottoarvo. Näin saatu luku ilmentää metsikön arvoa sijoituskohteena. Tuottoarvon laskeminen tällä tavoin edellyttää metsikön käsittelyn optimointia senhetkistä korkokantaa ja puutavaralajien hintoja käyttäen, mikä on monessa käytännön tilanteessa tarpeettoman hankalaa. Tässä tutkimuksessa esitetään mallit, joilla metsikön maksimaalinen tuottoarvo voidaan ennustaa korkokannan, puutavaralajien hintojen, kasvupaikan ja puuston rakennetta kuvaavien tunnusten avulla. Mallit perustuvat tuhansiin metsikkötason optimointeihin, joissa erilaisten metsiköiden käsittelyä optimoitiin tuottoarvoa maksimoiden käyttäen erilaisia puutavaralajien hintoja ja korkokantoja. Mallit laadittiin erikseen kivennäismaan männiköille (OMT, MT, VT ja CT), kuusikoille (OMT, MT ja VT) ja rauduskoivikoille (OMT ja MT). Ne selittävät n. 95 % metsikkökohtaisten optimointien avulla saatujen tuottoarvojen vaihtelusta.

Asiasanat: metsän arvo, käsittelyohjelman optimointi, Hooke & Jeeves -menetelmä

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

Hyväksytty 12.9.2005

I Johdanto

Perustelluin tapa kuvata metsikön puuntuotannollista arvoa on ilmoittaa sen tuottoarvo. Tuottoarvo tarkoittaa kaikkien tulevien nettotulojen nykyhetken diskontattujen arvojen summaa. Tuottoarvo kertoo metsikön arvon sijoituskohteena, ja sitä on helppo verrata vaihtoehtoisten sijoituskohteiden nykyarvoon. Metsälön tuottoarvo on metsiköiden tuottoarvojen summa.

Metsäsuunnittelussa halutaan usein laatia sellaisia suunnitelmia esim. 10 ja 20 vuodeksi, jotka antavat hyviä tuottoja suunnittelukauden aikana mutta toisaalta mahdollistavat tuottojen jatkumisen suunnittelukauden jälkeenkin. Eksogeenisia puun hintoja käytettäessä tämä voidaan ottaa huomioon esim. niin, että suunnitteluongelmaan lisätään rajoite, joka pitää huolen siitä, että metsän tuottoarvo suunnittelukauden lopussa on vähintään yhtä hyvä kuin suunnittelukauden alussa. Tuottoarvon käyttö tuottojen jatkuvuuden varmistamiseen on perustellumpaa kuin esim. kokonaistilavuuden tai hakkuuarvon käyttö, koska tuottoarvo ottaa huomioon puuston rakenteen. Kaksi tilavuudeltaan tai hakkuuarvoltaan samanlaista metsälöä voi erota paljonkin tulevien tuottojen nykyarvon puolesta, jos esim. metsälöiden ikärakenne on erilainen. Kaksi tuottoarvoltaan samanlaista metsälöä taas eivät eroa tulevien tuottojen nykyarvon puolesta.

Tuottoarvo voidaan laskea monenlaisille metsikön käsittelyohjelmille, esim. suositusten mukaiselle käsittelylle, metsänomistajan tavoitteet maksimoivalle käsittelylle tai tuottoarvon maksimoivalle käsittelylle. Jos se lasketaan suositusten mukaiselle käsittelylle, saadaan lähtökohtaisesti pienempiä arvoja kuin tuottoarvoa maksimoitaessa, sillä suositusten mukainen käsittely ei aina ole taloudellisesti optimaalista (Hyytiäinen ja Tahvonen 2001, 2003). Se, kuinka lähellä suositukset ovat taloudellista optimaalia, riippuu useista tekijöistä, mm. korkokannasta (Hyytiäinen ja Tahvonen 2001). Näin ollen suosituskäsittelylle laskettu tuottoarvo on siinä mielessä epämääräinen käsite, että se kuvaa metsikön kykyä tuottaa taloudellisia hyötyjä joskus melko hyvin, mutta joskus huonosti.

Metsänomistajan tavoitteiden mukaiselle käsittelylle laskettu tuottoarvo on siinä mielessä perusteltu

tunnus, että se kuvaa niitä tuottoja, jotka omistaja on oikeissa realisoida metsästään. Näin lasketun tuottoarvon hankaluutena on tapauskohtaisuus ja laskennan työläys. Omistajakohtainen tuottoarvo voi olla hyödyllinen omistajalle, mutta ei yhtä hyödyllinen esim. metsäkauppojen yhteydessä.

Perustelluin tapa määrittää metsikön tuottoarvo lieneekin laskea se käsittelylle, joka maksimoi tuottoarvon. Tämä edellyttää metsikön käsittelyohjelman optimointia, mikä on yleistä (ks. esim. Valstan (1993) ja Hyytiäisen (2003) laatimat kirjallisuuskatsaukset) mutta tarpeettoman hankalaa monissa käytännön tilanteissa. Periaatteessa maksimaaliset tuottoarvot voitaisiin laskea valmiiksi ja taulukoida erilaisille metsiköille, puutavaran hinnoille ja korkokannoille. Tuottoarvoon vaikuttavia tekijöitä on kuitenkin niin paljon, että taulukoista tulisi erittäin laajoja. Joustavampi tapa olisikin ilmaista tuottoarvon riippuvuus eri tekijöistä yhtälömuotoisina malleina, joiden avulla metsikön tuottoarvo voidaan ennustaa paljon vähemmällä työllä kuin optimoinnin kautta.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tuottaa mallit, joilla voidaan laskea metsikön tuottoarvo korkokannan, puutavaralajien hintojen, kasvupaikan ja puuston rakenteen avulla. Mallit ennustavat metsikön maksimaalisen tuottoarvon, minkä vuoksi aineistona käytettiin erilaisten metsiköiden optimaalisille käsittelyohjelmille laskettuja tuottoarvoja. Mallit laadittiin erikseen männiköille, kuusikoille ja koivikoille.

2 Menetelmät

2.1 Vaiheet

Tutkimuksen ensimmäisenä vaiheena oli laatia malli paljaan maan tuottoarvolle. Tämä tapahtui siten, että metsikön käsittely optimoitiin (ks. luku 2.4) nuorille lähtömetsiköille perustamisvuoteen diskontaten, ottaen huomioon koko kiertoajan tulot ja kustannukset ja käyttäen erilaisia korkokantoja ja puutavaralajien hintoja. Optimointilaskelmien yhteydessä tehdyt simuloinnit antoivat yhden kiertoajan nettotulojen nykyarvon. Kun tämä nykyarvo (*NA*) kerrottiin päättymättömän jaksottaiserän pääomistustekijällä, saatiin

paljaan maan tuottoarvo (TA), joka oli optimoinnin tavoitemuuttuja:

$$TA = \frac{NA}{1 - \frac{1}{(1+i)^T}}$$

missä i on korkosadannes ($0,01 \times$ korkoprosentti) ja T on kiertoaika (v).

Metsikön tuottoarvo laskettiin monelle erilaiselle metsikölle usealla eri korkokannalla ja puutavara-lajien hintayhdistelmällä. Koska tavoitteena oli laskea maksimaalinen tuottoarvo, metsiköiden käsittely optimoitiin jokaisella eri yhdistelmällä. Nyt maksimoitavana oli nykyhetkeen (ei metsikön perustamishetkeen) diskontattujen nettotulojen summa, joka saatiin laskemalla loppukiertoajan nettotulojen nykyarvo siten, että päätehakkuvuoden tuloihin lisättiin paljaan maan ennustettu tuottoarvo, joka kuvaa seuraavien kiertoaikojen päätehakkuvuoteen diskontattujen nettotulojen summaa.

Näin muodostui aineisto, johon sovittiin malli, joka ilmoittaa metsikön tuottoarvon riippuvuuden korkokannasta, puutavara-lajien hinnasta, kasvupai-kasta ja puuston rakenteesta.

2.2 Simulointimalli

Tutkimusta varten kehitettiin simulointimalli, 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. Malleja käytettiin ja kasvua simuloitiin siten kuin julkaisussa Hynysen ym. (2002) on selostettu. Metsikön kehityksen simuloinnissa olennaisimpia malleja olivat boniteettimallit (Hynysen ym. yhtälöt 14, 15, 8), valtapituuden kehitysmallit (6, 8), läpimitan kasvumallit (29, 30, 31), latvusrajamallit (62, 63, 64), pituuskasvumallit (32, 33) ja kuolemismallit (45–51, 53–56). 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 keskikohtalta otettiin yksi puu kuvaamaan luokkaa. Metsikköä siis kuvattiin kymmenen kuvauspuun avulla, joista tiedettiin puulaji, ikä, läpimitta, pituus ja puun edustama runkoluku.

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

Kaikki alkumetsiköt olivat tiheydeltään sellaisia, että voitiin olettaa, että niissä oli uudistamistoimenpiteiden lisäksi tehty taimikon hoito. Näin ollen kaikki jäljellä olevat käsittelyt olivat ainespuuhakkuita. Optimoinnin tehtävänä oli löytää hakkuille sellaiset ajankohdat ja voimakkuudet, jotka maksimoivat metsikön tuottoarvon. Metsikön ensiharvennus määriteltiin harvennusvuoden ja jäävän pohjapinta-alan avulla. Jokaisesta läpimittaluokasta poistettiin yhtä suuri osuus puustoa. Tämän katsottiin olevan perusteltua ensiharvennuksessa, jossa mm. ajourien aukaisun ja huonolaatuisen puuston poistotarpeen vuoksi joudutaan hakkaamaan kaikenkokoisia puita. Alaharvennusta ei simuloitu edes ajourien hakkuun jälkeen, koska se ei etukäteislaskelmien ja aiemman tiedon (esim. Valsta 1992a,b, Pukkala ja Miina 1998, Pukkala ym. 1998, Hyytiäinen ym. 2005, Pukkala ja Miina 2005) perusteella ollut tuottoarvon maksimoinnin kannalta viisasta.

Myöhempien hakkuiden ajankohta määriteltiin edellisestä hakkuusta kuluneen ajan avulla. Harvennusten ajankohdan ja voimakkuuden lisäksi myös

niiden luonne oli optimoinnin määrättävissä. Muiden kuin ensiharvennuksen voimakkuus määriteltiin kolmen harvennusprosentin avulla, joista ensimmäinen ilmoitti poistettavien puiden osuuden läpimittajakauman alarajalla, toinen keskikohdalla ja kolmas ylärajalla. Muille läpimitoille poisto-osuus saatiin lineaarisella interpoloinnilla (ks. Valsta 1992b). Päätehakkuu simuloitiin aina avohakkuuna, ts. säästö-, siemen-, suojus- tai verhopuita ei jätetty.

Tutkimuksessa optimoitiin metsikön käsittelyä korkeintaan kahden harvennushakkuun käsittelyohjelmillä. Useampi harvennus voi joskus parantaa tuottoarvoa, mutta parannukset ovat yleensä pieniä. Nuorten metsiköiden käsittely määräytyi siten seuraavien päätösmuuttujien perusteella:

Ensiharvennus

- Ajankohta (vuosia uudistamisesta)
- Jäävä pohjapinta-ala (m^2/ha)

Toinen harvennus

- Ajankohta (vuosia ensiharvennuksesta)
- Harvennusvoimakkuus pienimmälle läpimitalle
- Harvennusvoimakkuus läpimitan vaihteluvälin keskikohdalla
- Harvennusvoimakkuus maksimiläpimitalle

Päätehakkuu

- Ajankohta (vuosia toisesta harvennuksesta)

Nämä seitsemän muuttujaa määrittivät nuoren metsikön käsittelyn seuraavaan uudistamiseen saakka. Ensiharvennusikä vanhemmissa metsiköissä (yli 45–60 vuotta kasvupaikasta riippuen) kaikki jäljellä olevat harvennukset (enintään 2) määriteltiin kolmen harvennusprosentin avulla, ts. optimoitavia muuttujia oli 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 käyttäjän ilmoittamista päätösmuuttujien arvoista. Toisen suorahaun lähtöpiste oli paras 500 satunnaisratkaisusta. Satunnaisratkaisut tuotettiin generoimalla päätösmuuttujille tasajakautuneita satunnaisarvoja etukäteen määritellyltä 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 määritetty lopetus-kriteeri. Tämän tutkimuksen optimoinneissa ensimmäinen askel oli 0,2 kertaa päätösmuuttujan vaihteluvälin pituus. Lopetus-kriteeri taas oli 0,02 kertaa alkuaskel.

2.4 Paljaan maan tuottoarvo

Paljaan maan tuottoarvo laskettiin erilaisille nuorille lähtömetsiköille korkokannoilla 1, 2, 3 ja 4 % seuraavilla tukin ja kuitupuun hinnoilla (tukki/kuitu, euroa/ m^3) 30/15, 30/25, 40/15, 40/25, 40/35, 50/25 ja 50/35. Kysymyksessä ovat kantohinnat, mikä tarkoittaa sitä, että hakkuun nettotuloja laskettaessa ei tarvinnut ottaa huomioon korjuukustannuksia. Lähtömetsiköt olivat iältään 25–40-vuotiaita ja sellaisia, joissa ei oltu tehty hakkuuta mutta niissä oli tehty taimikonhoito. Metsiköt edustivat kasvupaikkaluokkia lehtomainen ja tuore kangas (mänty, kuusi ja koivu), kuivahko kangas (mänty ja kuusi) ja kuiva kangas (mänty) ja seuraavia lämpösummia: 700, 1000 ja 1300 d.d. Lähtömetsiköitä tuotettaessa käytettiin tukena tuotostaulukoita, millä taattiin se, että metsikötunnusten (kasvupaikkaluokka, puulaji, ikä, keskipituus, keskiläpimitta, runkoluku, pohjapinta-ala) keskinäiset suhteet olivat loogisia.

Metsikön perustamisvuoden uudistamiskustannukseksi oletettiin 850 euroa/ha (raivaus 50 euroa/ha, maanpinnankäsittely 150 euroa/ha ja istutus 650 euroa/ha) kerrottuna kasvupaikasta riippuvalla kertoimella (taulukko 1). Kertoimien mukaan uudistamiseen oletetaan käytettävän karuimmilla kasvupaikoilla vähemmän rahaa kuin viljavilla, mikä tarkoittaa mm. luontaisen uudistamisen lisääntyvää käyttöä

Taulukko 1. Suhteellinen viljely- ja taimikonhoitokustannus eri kasvupaikoilla.

Kasvupaikkatyyppi	Uudistus	Taimikonhoito
Lehto (OMaT ja vastaavat)	1,2	1,2
Lehtomainen (OMT ja vastaavat)	1,1	1,1
Tuore (MT ja vastaavat)	1,1	1,1
Kuivahko (VT ja vastaavat)	0,5	0,9
Kuiva (CT ja vastaavat)	0,2	0,7
Karukko CIT ja vastaavat)	0,1	0,5

karummille kasvupaikoille siirryttäessä. Metsiköissä oletettiin tehdyn taimikonhoito, jonka kustannus oli 250 euroa/ha kerrottuna kasvupaikasta riippuvalla kertoimella (taulukko 1). Taimikonhoitovuodeksi oletettiin 3 vuotta eteenpäin siitä vuodesta, jona taimikon keskipituus saavuttaa 1,3 m. Vuosimäärä, joka kuuluu 1,3 m:n saavuttamiseen laskettiin Hynynen ym. (2002) esittämällä tavalla.

Eri lähtömetsiköiden, korkokantojen ja hintojen yhdistelminä saatiin kaikkiaan 1 672 optimointiongelmaa männiköille, 1 098 ongelmaa kuusikoille ja 832 ongelmaa rauduskoivikoille. Näin syntyneeseen aineistoon sovitettiin seuraava malli:

$$\text{Tuottoarvo} = (TS, \text{Korko}, \text{Tukki}, \text{Kuitu}, \text{Kasvupaikkaluokka})$$

missä *TS* on lämpösusma (d.d.), *Korko* on korkokanta (%), *Tukki* on tukin hinta (euroa/m³) ja *Kuitu* on kuidun hinta (euroa/m³).

Muuttujien yhdysvaikutuksista merkitseviksi osoitautuivat tukin hinnan ja korkokannan sekä kuidun hinnan ja korkokannan tulo. Näin saatiin kuvatuksi riippuvuus, jonka mukaan puutavaralajien hinnan vaikutus tuottoarvoon on sitä pienempi, mitä suurempi on korkokanta (suureneva korkokanta pienentää tuottoarvon vaihteluväliä). Selitettävä muuttuja oli tuottoarvon neliöjuuri, mikä homogenisoi jäännösvarianssia ja linearisoi muuttujien välisiä riippuvuuksia.

2.5 Metsikön tuottoarvo

Metsikön tuottoarvon mallitusta varten muodostettiin aineisto optimoimalla 25–100-vuotiaiden met-

siköiden käsittelyä eri korkokannoilla ja puutavaralajien hinnoilla. Metsiköt edustivat lehtomaisia kankaita, tuoreita kankaita, kuivahkoja kankaita (vain mänty ja kuusi) ja karuja kankaita (vain mänty) sekä lämpösusma-alueita 700, 1 000 ja 1 300 d.d. Tuotostaulukkoja apuna käyttäen kullekin lämpösusma-alueelle, puulajille ja kasvupaikalle poimittiin 15 vuoden ikäväleihin loogisia keskipituuksia ja -lämpimittoja (4–5 iänkohtaa per puulaji, lämpösusma ja kasvupaikka). Kullekin iänkohdalle tuotettiin 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 keskilämpimittaan ja pohjapinta-alaan. Näin saatiin eri kasvupaikoille, puulajeille ja iänkohdille tiheydeltään erilaisia alkumetsiköitä.

Aineistoa täydennettiin 27 taimikolla, jotka edustivat 2 (koivu) – 4 (mänty) kasvupaikkaa per puulaji ja kolmea lämpösusma-aluetta (9 kasvupaikan ja puulajin yhdistelmää × 3 lämpösusmaa = 27). Metsiköiden ikä oli rinnankorkeuden saavuttamiseen kuuluva vuosimäärä (Hynynen ym. 2002) plus kahdeksan vuotta. Taimikoiden pituus saatiin oletamalla vuotuiskasvun 1,3 m:n jälkeen olevan sama kuin ennen 1,3 m:n saavuttamista. Taimikoiden runkoluvuksi otettiin 1 600 runkoa/ha ja keskilämpimittaksi 1,4 kertaa keskipituus. Pohjapinta-ala laskettiin runkoluvun ja keskilämpimittan avulla.

Kaikkien metsiköiden käsittely optimoitiin eri korkokannoilla ja puutavaralajien hinnoilla siten, että kaikki tuotot diskontattiin nykyhetkeen (ei metsikön perustamishetkeen) ja päätehakkuvuoden tuloihin lisättiin samalla korkokannalla ja puutavaralajien hinnoilla laskettu paljaan maan tuottoarvon ennuste. Harvennuksia voitiin tehdä korkeintaan kaksi, joista nuoren metsikön ensimmäinen harvennus, joka voitiin tulkita ensiharvennukseksi, oli tasaharvennus, mutta muut ns. vapaita harvennuksia, joissa optimointitulokset määräsivät, missä suhteissa eri kokoisia puita poistettiin.

Kaikkien metsiköiden käsittely optimoitiin 1, 2, 3 ja 4 %:n korolla ja seuraavilla tukin ja kuidun kantohinnoilla: tukki 30, 40 tai 50 euroa/m³; kuitu 15, 25 tai 35 euroa/m³. Kaikki eri hinta-yhdistelmät optimoitiin joka korkokannalla. Näin saatiin määrite-

tyksi monen erilaisen metsikön tuottoarvo usealla eri korkokannalla ja kantohintayhdistelmällä. Syn-tyneeseen aineistoon lisättiin vielä 972 paljaan maan tuottoarvon mallilla laskettua ennustetta (korkokan-
nat 1, 2, 3 ja 4 %, lämpösummat 700, 1 000 ja 1 300 d.d., tukin hinnat 30, 40 ja 50 euroa/m³, kuidun hin-
nat 15, 25 ja 35 euroa/m³ sekä 2 (koivu), 3 (kuusi)
tai 4 (mänty) kasvupaikkaluokkaa per puulaji).

Näin saatiin kaikkiaan 6 362 tuottoarvoa männi-
köille, 4 652 tuottoarvoa kuusikoille ja 3 122 tuotto-
arvoa rauduskoivikoille. Aineistoon sovitettiin seu-
raava malli

$$\text{Tuottoarvo} = f(\text{TS}, \text{Korko}, \text{Tukki}, \text{Kuitu}, \\ \text{Kasvupaikkaluokka}, G, N, D, T)$$

missä *TS* on lämpösumma (d.d.), *Korko* korkokanta (%), *Tukki* tukin hinta (euroa/m³) ja *Kuitu* kuidun hinta (euroa/m³), *G* metsikön pohjapinta-ala (m²/ha), *N* runkoluku (runkoja/ha), *D* pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta (cm) ja *T* metsikön koko-
naisikä (v). Yhdysvaikutuksista selittäjinä käytettiin nytkin tukin hinnan ja korkokannan sekä kuidun hin-
nan ja korkokannan tuloa. Lisäksi merkitseviä olivat keskiläpimitan ja tukin hinnan sekä keskiläpimitan ja kuidun hinnan tulot. Niiden avulla saatiin mal-
litettua riippuvuus, jonka mukaan tukin hinta vai-
kuttaa tuottoarvoon sitä enemmän, mitä järeämpää puusto on ja kuidun hinta sitä vähemmän, mitä jä-
reämpää puusto on. Lämpösumman ja keskiläpimi-
tan tulo otettiin selittämään oletettua riippuvuutta, jonka mukaan kasvuolojen vaikutus tuottoarvoon pienenee puuston järeytyessä. Tukin hinnan ja läm-
pösumman tulo puolestaan ottaa huomioon sen, et-
tä tukin hinta vaikuttaa tuottoarvoon sitä enemmän, mitä etelämmäksi siirrytään. Selitettävä muuttuja oli nytkin tuottoarvon neliöjuuri.

3 Tulokset

3.1 Paljaan maan tuottoarvo

Paljaan maan tuottoarvo riippuu selittäjistä loogisel-
la tavalla (taulukko 2). Yhtälöt selittävät n. 90 % si-
mulaattorilla lasketun tuottoarvon vaihtelusta. Kaik-
ki selittäjät ovat erittäin merkitseviä ($p < 0,0001$).

Taulukko 2. Ennustemallit paljaan maan tuottoarvolle. Selitettävä muuttuja on tuottoarvon (euroa/ha) neliö-
juuri.

Muuttuja	Mänty	Kuusi	Koivu
Vakio	-6,802	-71,947	-18,881
Lämpösumma (d.d.)	0,043	0,105	0,039
Korkokanta (%)	18,333	29,405	16,681
ln(korkokanta)	-71,989	-97,095	-65,995
Tukin hinta (euroa/m ³)	0,592	1,069	0,547
Kuidun hinta (euroa/m ³)	1,384	1,058	1,738
Tukin hinta × Korkokanta	-0,140	-0,241	-0,129
Kuidun hinta × Korkokanta	-0,143	-0,156	-0,166
MT (tuore kangas) ^{a)}	-10,057	-18,946	-12,06
VT (kuivahko kangas) ^{b)}	-18,036	-32,780	-
CT (kuiva kangas) ^{c)}	-26,655	-	-
Selitysaste (R ² ajd.)	0,907	0,903	0,884
Havaintojen lukumäärä	1672	1098	832
Jäännöshajonta	10,4	14,6	11,1

^{a)} MT=1, jos kasvupaikka on tuore kangas, muutoin MT=0

^{b)} VT=1, jos kasvupaikka on kuivahko kangas, muutoin VT=0

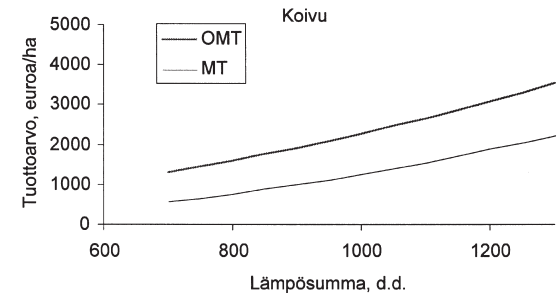
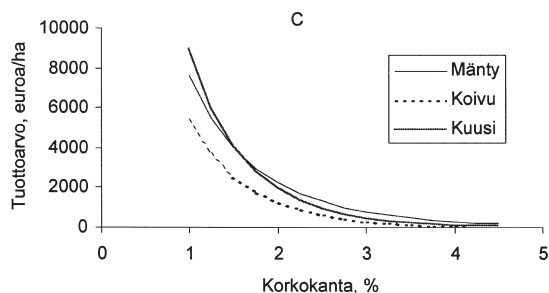
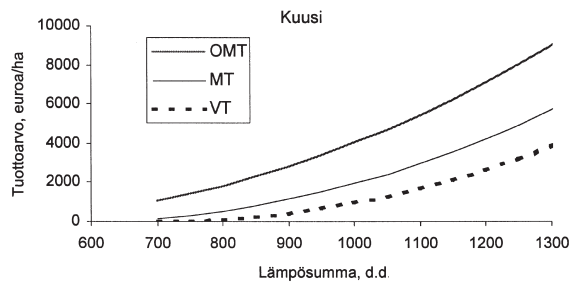
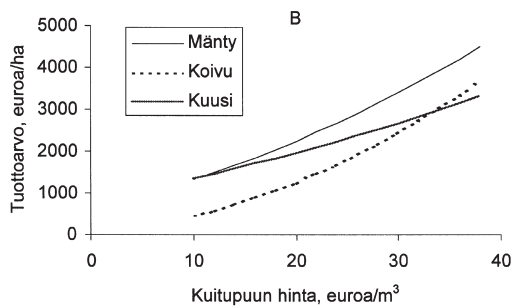
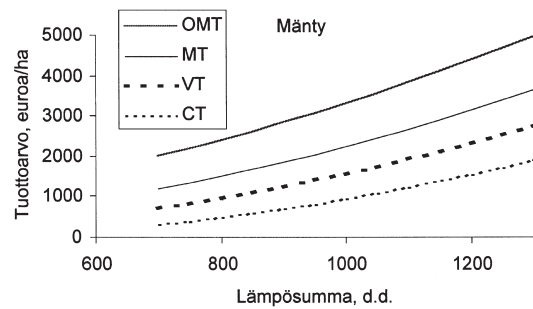
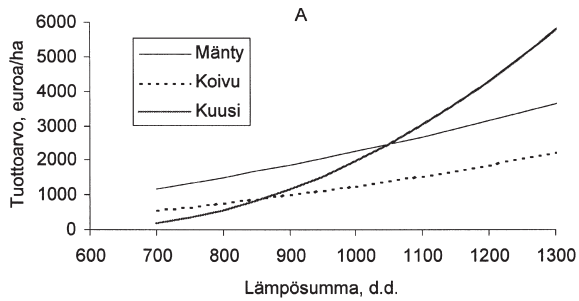
^{c)} CT=1, jos kasvupaikka on kuiva kangas, muutoin VT=0

Lämpösumman vaikutus tuottoarvoon on kuusel-
la paljon voimakkaampi kuin männyllä ja koivul-
la (kuva 1A). Männyllä ja koivulla tuottoarvo riip-
puu voimakkaasti kuidun hinnasta (taulukko 2, ku-
va 1B), ja kuusella suunnilleen yhtä voimakkaas-
ti tukin ja kuidun hinnasta. Korkokannan vaikutus
tuottoarvoon on odotetun voimakas ja muotoinen
(kuva 1C). Puun hinta vaikuttaa tuottoarvoon sitä
vähemmän, mitä suurempi on korkokanta, mikä oli
odotettua (taulukko 2). Kasvupaikkaluokka vaikut-
taa tuottoarvoon eniten kuusella, vähiten männyllä
(taulukko 2, kuva 2).

Kaikilla puulajeilla paljaan maan tuottoarvo me-
nee nolnaan tietyllä lämpösummalla, joka on sitä
suurempi, mitä korkeampi on korkokanta ja mitä
alhaisempi on puun hinta ja huonompi kasvupaikka.
Erityisesti kuusella ”nollaraja” tulee vastaan useas-
ti, eikä malleja pidä käyttää nollarajan ulkopuolella
(pohjoispuolella). Tämän vuoksi kuuselle laadittiin
malli, jolla nollarajan voi ennustaa:

$$TS_{\text{tuottoarvo}=0} = 936 + 118Korko - 44Kuitu \\ + 604MT + 1157VT$$

missä $TS_{\text{tuottoarvo}=0}$ on lämpösumma (d.d.), jonka



Kuva 1. Paljaan maan tuottoarvon riippuvuus lämpösummasta (A), kuitupuun hinnasta (B) ja korkokannasta (C) tuoreella kankaalla. Osakuvassa A korkokanta on 2 %, tukin hinta 40 euroa/m³ ja kuidun hinta 20 euroa/m³. Osakuvassa B: lämpösumma on 1 000 d.d., korkokanta 2 % ja tukin hinta 40 euroa/m³. Osakuvassa C lämpösumma on 1 000 d.d., tukin hinta 40 euroa/m³ ja kuidun hinta 20 euroa/m³.

pohjoispuolella tuottoarvo on nolla, *Korko* on korkokanta (%) ja *Kuitu* on kuidun hinta (euroa/m³). *MT* ja *VT* ovat indikaattorimuuttujia, joista *MT*=1, jos kasvupaikkaluokka on tuore kangas (muutoin *MT*=0) ja *VT*=1, jos kasvupaikkaluokka on kuituvahko kangas (muutoin *VT*=0). Kuusella on syytä ennustaa ensin nollaraja, ja jos alueen lämpösumma

Kuva 2. Paljaan maan tuottoarvon riippuvuus lämpösummasta ja kasvupaikkaluokasta 2 %:n korkokannalla, kun tukin hinta on 40 euroa/m³ ja kuidun hinta 20 euroa/m³.

on nollarajaa suurempi, paljaan maan tuottoarvon voi ennustaa taulukon 2 yhtälöllä. Muussa tapauksessa tuottoarvo on nolla.

3.2 Metsikön tuottoarvo

Metsikön tuottoarvon ennustemalleissa selittäjinä olivat korkokannan, kasvupaikkamuuttujien ja puun hinnan lisäksi metsikön rakennetta kuvaavat muuttajat. Ennustemallit selittivät 93,4–96,4 % simulaat-

Taulukko 3. Ennustemallit metsikön tuottoarvolle. Selitettävä muuttuja on tuottoarvon (euroa/ha) neliöjuuri.

Muuttuja	Mänty	Kuusi	Koivu
Vakio	10,384	-34,371	31,152
Lämpösumma (d.d.)	0,0418	0,0891	0,0482
Lämpösumma × Keskiläpimitta (cm)	-0,000797	-0,00244	-0,000729
Korkokanta (%)	12,611	13,108	14,832
ln(Korkokanta)	-54,066	-57,870	-61,643
ln(Korkokanta) × Keskiläpimitta	0,460	0,643	0,413
Tukin hinta (euroa/m ³) × Lämpösumma	0,000331	0,000662	0,000347
Kuidun hinta (euroa/m ³)	1,524	1,365	1,548
Tukin hinta × ln(Korkokanta)	-0,287	-0,414	-0,328
Kuidun hinta × ln(Korkokanta)	-0,425	-0,441	-0,268
Keskiläpimitta (cm)	0,599	-	1,952
Tukin hinta × Keskiläpimitta	0,0239	0,0205	0,0263
Kuidun hinta × Keskiläpimitta	-0,00961	-0,00565	-0,0169
Pohjapinta-ala (m ² /ha)	1,621	1,377	1,944
ln(Pohjapinta-ala)	-4,751	-	-7,550
Runkoluku (runkoja/ha)	-	-	-0,00753
Ikä (v)	-0,0580	0,577	-0,676
Keskiläpimitta/ikä	-29,786	-21,782	-73,160
MT (tuore kangas) ^{a)}	-5,325	-17,356	-5,534
VT (kuivahko kangas) ^{b)}	-12,152	-29,990	-
CT (kuiva kangas) ^{c)}	-16,186	-	-
Selitysaste (R ² ajd.)	0,959	0,934	0,964
Havaintojen lukumäärä	6362	4652	3122
Jäännöshajonta	7,03	10,97	6,73

^{a)} MT=1, jos kasvupaikka on tuore kangas, muutoin MT=0

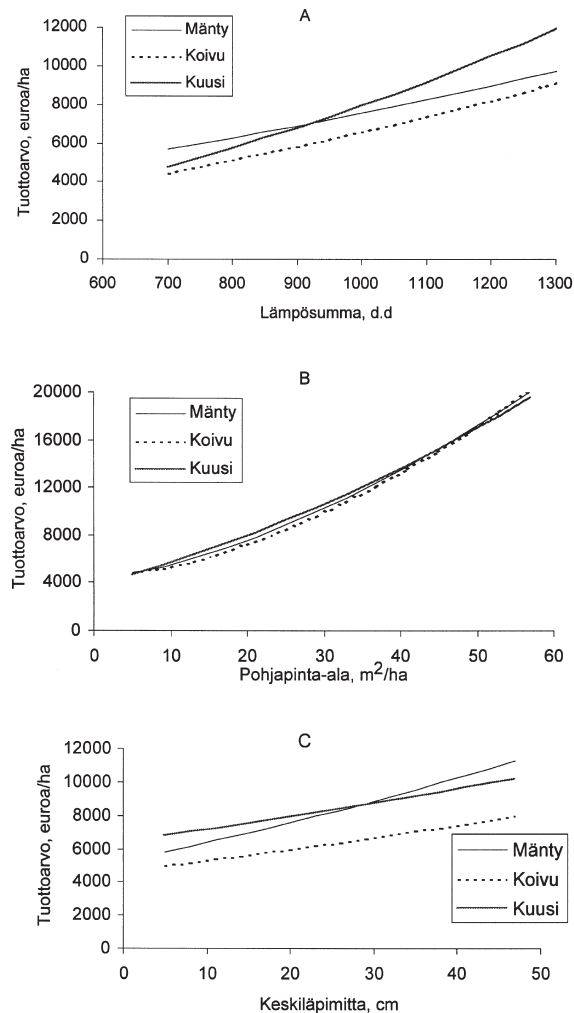
^{b)} VT=1, jos kasvupaikka on kuivahko kangas, muutoin VT=0

^{c)} CT=1, jos kasvupaikka on kuiva kangas, muutoin VT=0

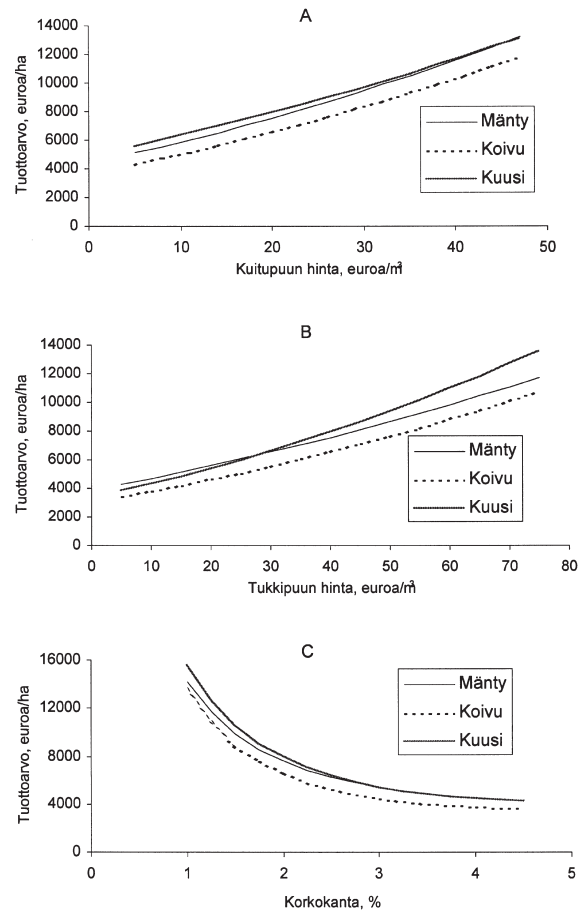
torilla lasketun tuottoarvon vaihtelusta (taulukko 3). Nytkin kaikki selittäjät olivat erittäin merkitseviä ($p < 0,0001$). Myös metsikön tuottoarvoon lämpösumma vaikuttaa enemmän kuusella kuin männylällä tai koivulla (kuva 3A). Lämpösumman vaikutus pienenee keskiläpimitan suurentuessa, erityisesti männyllä ja koivulla, koska puuston järeytyessä tuottoarvo riippuu enemmän hakkuuarvosta ja vähemmän tulevien tuottojen odotusarvosta. Puuston määrä (pohjapinta-ala) ja järeyys (keskiläpimitta) suurentavat tuottoarvoa samantapaisesti kaikilla puulajeilla, tosin keskiläpimitan vaikutus on männyllä voimakkaampi kuin kuusella ja koivulla (kuva 3B,C).

Tukin ja kuidun hinta vaikuttavat metsikön tuottoarvoon suunnilleen yhtä voimakkaasti lämpösumma-alueella 1000 d.d. (kuva 4A,B). Tukin hinnan

vaikutus riippuu lämpösummasta siten, että tukin hinta vaikuttaa sitä enemmän, mitä suurempi on lämpösumma (taulukko 3). Kuidun hinta taas vaikuttaa maan eri osissa samalla tavoin. Kuusikon tuottoarvo riippuu tukin hinnasta voimakkaammin kuin männikön tai koivikon tuottoarvo. Korkokanta vaikuttaa tuottoarvoon voimakkaasti (kuva 4C), mutta koron tuottoarvoa pienentävä vaikutus vähenee puuston järeytyessä, koska korkokannan logaritmin ja keskiläpimitan tulon kerroin on positiivinen (taulukko 3). Puun hinnan vaikutus tuottoarvoon on sitä pienempi, mitä suurempi on korkokanta. Tukin hinnan vaikutus suurenee ja kuidun hinnan vaikutus pienenee puuston järeytyessä (taulukko 3).



Kuva 3. Metsikön tuottoarvon riippuvuus lämpösommasta (A), metsikön pohjapinta-alasta (B) ja keskiläpimitästä (C) tuoreella kankaalla, kun korkokanta on 2 %, tukin hinta 40 euroa/m³ ja kuidun hinta 20 euroa/m³. Osakuvassa A keskiläpimitta on 20 cm, pohjapinta-ala 20 m²/ha, runkoluku 1 000/ha ja metsikön ikä 60 v. Osakuvassa B lämpösomma on 1 000 d.d., keskiläpimitä 20 cm, metsikön ikä 60 v ja runkoluku keskiläpimitä ja pohjapinta-alan funktio. Osakuvassa C lämpösomma on 1 000 d.d., pohjapinta-ala 20 m²/ha, metsikön ikä (v) 3 × keskiläpimitä (cm) ja runkoluku keskiläpimitä ja pohjapinta-alan funktio.



Kuva 4. Metsikön tuottoarvon riippuvuus kuitupuun hinnasta (A), tukkipuun hinnasta (B) ja korkokannasta (C) tuoreella kankaalla lämpösomma-alueella 1 000 d.d., kun metsikön keskiläpimitä on 20 cm, pohjapinta-ala 20 m²/ha, metsikön ikä 60 v ja runkoluku 1 000/ha. Osakuvassa A tukin hinta 40 euroa/m³. Osakuvassa B korkokanta on 2 % ja kuidun hinta 20 euroa/m³. Osakuvassa C tukin hinta on 40 euroa/m³ ja kuidun hinta 20 euroa/m³.

4 Tarkastelua

Tutkimuksessa esitetyt metsikön tuottoarvon ennustemallit selittävät noin 95 % tarkemmin lasketusta, yksityiskohtaiseen simulointiin perustuvan tuottoarvon vaihtelusta. Mallit ottavat huomioon kantohinnan, korkokannan, kasvupaikan ja puuston rakenteen vaikutuksen tuottoarvoon. Ne kattavat tasaikäisten talousmetsien tyypillisen ikä-, tiheys- ja kasvupaik-

Taulukko 4. Paljaan maan tuottoarvo (euroa/ha) Hyytiäisen ja Tahvosen (2003) mukaan sekä tämän tutkimuksen mallien (taulukko 2) mukaan lämpösumma-alueella 1100 d.d. ja seuraavilla puutavaralajien kantohinnoilla (euroa/m³): mäntytukki 50, mäntykuitu 25, kuusitukki 40, kuusikuitu 25.

Tutkimus	Korkokanta			
	1 %	2 %	3 %	4 %
	Mänty, lehtomainen kangas (H100=30 m)			
Tämä tutkimus	12646	4944	2390	1291
Hyytiäinen ja Tahvonen (2003)	18047	5393	1987	657
	Mänty, tuore kangas (H100=27 m)			
Tämä tutkimus	10489	3631	1507	669
Hyytiäinen ja Tahvonen (2003)	12606	3253	894	33
	Mänty, kuivahko kangas (H100=24 m)			
Tämä tutkimus	8915	2733	951	320
Hyytiäinen ja Tahvonen (2003)	8280	1938	410	0
	Mänty, kuiva kangas (H100=21 m)			
Tämä tutkimus	7361	1906	494	86
Hyytiäinen ja Tahvonen (2003)	4813	940	76	0
	Kuusi, lehtomainen kangas (H100=30)			
Tämä tutkimus	16545	5959	2882	1732
Hyytiäinen ja Tahvonen (2003)	13633	4096	1495	463
	Kuusi, tuore kangas (H100=27)			
Tämä tutkimus	12030	3393	1207	514
Hyytiäinen ja Tahvonen (2003)	10145	2700	760	28
	Kuusi, kuivahko kangas (H100=24)			
Tämä tutkimus	9186	1972	437	78
Hyytiäinen ja Tahvonen (2003)	8280	1938	410	0

kavaihtelun. Mallit laadittiin erikseen männiköille, koivikoille ja kuusikoille. Sekametsän tuottoarvon voi malleilla ennustaa niin, että eri puulajien malleilla lasketuista, metsikkötunnusten kokonaismääriin ja eri puu- ja puutavaralajien yksikköhintoihin perustuvista tuottoarvoista lasketaan puulajien pohjapinta-aloilla painotettu keskiarvo. Tämä menettely on yksinkertaistus eikä ota huomioon esim. sitä, että sekametsän puulajikoostumusta voi olla optimaalista muuttaa kiertoajan kuluessa.

Mallit ovat helppo tapa ennustaa tuottoarvo esim. metsäsuunnittelulaskelmien yhteydessä. Niistä voi olla hyötyä myös metsäkauppojen hieronnassa, sillä varsinkin sijoitusmielessä metsää ostava on kiinnostunut siitä, kuinka hyvä sijoitus metsä on vaihtoehtoihin sijoituskohteisiin verrattuna. Tuottoarvoennusteissa on tosin mukana vain puuntuotannollinen arvo, ja sitäkin laskettaessa esim. saavutettavuussei-

kat on jätetty huomiotta. Ne voi sisällyttää arvioihin vaikkapa korjaamalla kantohintoja saavutettavuuden perusteella.

Mallien mukaan metsän arvo pienenee koron suurentuessa, erityisesti nuorissa metsissä. Vaikka tämä saattaaakin tuntua harmilliselta metsän arvoa määrittäessä, on se siinä mielessä loogista, että jos vaihtoehtoisen sijoituksen tuotto on pieni ja raha on halpaa, metsään sijoittaminen on yhä kannattavampaa eli metsän arvon kuuluukin nousta. Jos taas vaihtoehtoiset sijoitukset tuottavat hyvän koron, metsän arvo sijoituskohteena pienenee eikä siitä kannata enää maksaa yhtä paljon.

Tutkimuksessa laaditut paljaan maan tuottoarvot antavat samaa suuruusluokkaa olevia ennusteita kuin muissa tutkimuksissa on saatu (taulukko 4). Eri tutkimusten tuottoarvojen vertailtavuus tosin on monesti vaikeaa, koska esim. kasvupaikan kuvaa-

minen tai nettotulojen laskentatapa eivät aina ole tarkasti rinnastettavissa. Esim. taulukossa 4 olevat Hyytiäisen ja Tahvosen (2003) tulokset on laskettu tienvarsihintojen ja korjuukustannusfunktioiden perusteella ja kasvupaikan tuottavuutta on kuvattu pituusboniteetilla, kun tässä tutkimuksessa käytettiin kantohintoja, ja kasvupaikkaa kuvattiin lämpösumman ja kasvupaikkatyyppin avulla. Taulukon 4 luvut on laskettu samoilla puutavaralajien hintasuhteilla kuin Hyytiäisen ja Tahvosen tutkimuksessa. Tämän tutkimuksen mallien mukaan suureneva korkokanta ja heikkenevä kasvupaikka pienentävät tuottoarvoa hieman hitaammin kuin Hyytiäisen ja Tahvosen tutkimuksessa, jotka perustuvat Vuokilan ja Väliahon (1980) metsikkötason malleihin.

Paljaan maan tuottoarvon vaikutus metsikön tuottoarvon ennusteen luotettavuuteen on varsinkin suurrehkoilla koroilla melko pieni, koska sen avulla kuvattiin ainoastaan nykyistä kiertoaika seuraavien kiertoaikojen nettotulojen nykyarvoa. Nuorten metsiköiden tuottoarvon luotettavuus riippuu paljon optimoinnin ja simuloinnissa käytettyjen mallien luotettavuudesta, mutta metsikön varttuessa malleista johtuva epävarmuus pienenee tuottoarvon riippuessa yhä enemmän metsikön hakkuuarvosta, etenkin suurrehkoilla korkokannoilla. Tällä perusteella metsikön tuottoarvon ennustemallien luotettavuuden voidaan arvioida olevan paras keski-ikäisissä ja varttuneissa metsiköissä.

Tässä tutkimuksessa laadittujen mallien osoittamat tuottoarvon riippuvuudet kasvupaikasta ja puustosta heijastavat simuloinnissa käytettyjen mallien sisältämiä riippuvuuksia. Esim. kuusikon tuottoarvon voimakas riippuvuus lämpösummasta on seurausta siitä, että simuloinnissa käytettyjen mallien (Hynynen ym. 2002) mukaan kuusikon boniteetti ja kasvu pienenevät nopeasti lämpösumman pienentyessä. Kuitupuun hinnan voimakas vaikutus erityisesti paljaan maan ja nuoren metsän tuottoarvoon varsinkin pienen lämpösumman alueilla on osittain seurausta käytetyistä tukkivähennysmalleista (Mehätälö 2002), jotka antavat varsin suuria tukkivähennyksiä näissä tilanteissa. Tukin hinnan vaikutusta nuorissa metsissä pienentää myös diskonttaus, joka pienentää kaukana tulevaisuudessa saatavien tukki-puun myyntitulojen vaikutusta.

Maan tuottoarvon maksimoivissa käsittelyohjelmissä metsiköissä tehtiin usein yläharvennuksia.

Yläharvennuksen runsas käyttö herättää kysymyksen siitä, onko tulos osittain optimointiharhaa, mikä johtuu siitä, että käytetyt kasvumallit, jotka perustuvat etupäässä alaharvennettuihin tutkimusmetsiköihin, yliarvioivat yläharvennetun metsikön kasvua. Yläharvennuksen käytön edullisuus varttuneen metsikön harvennuksessa on kuitenkin todettu lähes kaikissa niissä tutkimuksissa, joissa harvennustapaa on optimoitu, vaikka käytetyissä kasvumalleissa on ollut suuriakin eroja (esim. Valsta 1992b, 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. Yläharvennuksen käyttö kannattavuutta maksimoitaessa on looginen tulos, sillä sen avulla pääoman kustannusta voidaan pienentää voimakkaasti metsikön arvokasvun pienentymättä läheskään yhtä paljon. Voidaan lisäksi olettaa, että vaikka kasvumallit perustuvatkin alaharvennettuihin metsiköihin, aineistossa voi olla runsaastikin puita, joiden ympäristöä on yläharvennettu (esim. sekametsässä). Jos malli on laadittu järkevästi, se saattaa toimia hyvin myös yläharvennetussa metsikössä. Tämän tutkimuksen kannalta olennaista on se, kuinka oikein simulaattori on kyennyt laskemaan optimaalisen käsittelyohjelman tuottoarvon. Pukkalan ja Miinan (2005) samoihin kasvumalleihin perustavassa tutkimuksessa sellaisen optimaalisen käsittelyohjelman, jossa muut kuin ensiharvennukset saivat olla yläharvennuksia (kuten tässä tutkimuksessa), tuottoarvo oli 2–7 % suurempi kuin optimaalisen tasaharvennusohjelman (kaikkia läpimittaluokkia harvennettiin yhtä voimakkaasti). Tästä erosta suurin osa lienee yläharvennuksen paremmuutta, joten mahdollisen yläharvennuksen liittyvän optimointiharhan –jos sitä on lainkaan– voidaan arvioida olevan varsin pieni.

Tuottoarvo maksimoitiin olettaen, että metsikön uudistushakkuu on avohakkuu. Nykyisin hakkuualalle jätetään useasti säästöpuita, mikä pienentää avohakkuun nettotuloa hiukan, elleivät säästöpuut ole taloudellisesti arvottomia. Säästöpuut pienentävät myös seuraavien kiertoaikojen tuottoarvoa (ts. paljaan maan arvoa), koska ne vievät kasvutilaa seuraavan sukupolven puustolta. Tämän vuoksi tuottoarvon ennusteisiin voi olla tarpeen tehdä pieni säästö-

puukorjaus, jos säästöpuita aiotaan jättää. Jos metsikössä on jo säästöpuita, tuottoarvon ennustamisessa käytettävien metsikkötunnusten arvot on laskettava ilman säästöpuita.

Tuottoarvot, joiden perusteella ennustemallit laadittiin, laskettiin metsikkötunnusten yhdistelminä muodostetuille teoreettisille metsiköille. Teoreettisia metsiköitä tuotettiin niin, että ne kattoivat talousmetsien tyypillisen ikä-, tiheys- ja kasvupaikkavaihtelun. Aineistona olisi voitu käyttää myös todellisia metsiköitä. Sillä, ovatko lähtömetsiköt todellisia vai kuviteltuja, ei kuitenkaan ole olennaista vaikutusta tuloksiin, jos kummatkin aineistot edustavat riittävän hyvin yhden puulajin talousmetsissä esiintyvää vaihtelua puiden keskikoossa ja iässä sekä metsikön tiheydessä, sijainnissa ja kasvupaikassa.

Tässä tutkimuksessa tuottoarvot laskettiin ottamatta huomioon veroja ja tukia, koska ne luonteeltaan nopeasti muuttuvina lyhentäisivät mallien käytöikää. Näin ollen myös verojen ja tukien vaikutus täytyy arvioida erikseen.

Tuottoarvomallit laadittiin vain kivennäismaille. Jos kivennäismaan kasvumallien arvioidaan toimivan huonosti samaa kasvupaikkaluokkaa edustavalla turvemaalla, on turvemaalle joko laadittava omat tuottoarvon ennustemallit tai tuottoarvoon on tehtävä turvemaakorjaus. Korjauksen tarve lienee varsin pieni ainakin keski-ikäisissä ja varttuneissa metsiköissä, joissa tuottoarvon määrää melko pitkälle metsikön hakkuuarvo, johon kasvuennusteet eivät vaikuta.

Kirjallisuus

- 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.
- Hyytiäinen, 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. 2003. Maximum sustained yield, forest rent of Faustmann: does it really matter? *Scandinavian Journal of Forest Research* 18: 457–469.
- , Tahvonen, O. & Valsta, L. 2005. Optimum juvenile density, harvesting and stand structure in even-aged Scots pine stands. *Forest Science* 51: 120–133.
- 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.
- Pukkala, T. & 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. *Käsikirjoitus*.
- , 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.
- Valsta, L. 1992a. A scenario approach to stochastic anticipatory optimization in stand management. *Forest Science* 38: 430–447.
- 1992b. An optimization model for Norway spruce management based on individual-tree growth models. *Acta Forestalia Fennica* 232. 20 s.
- 1993. Stand management optimization based on growth simulators. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 453. 51 s. + liitteet.
- Vuokila, Y. & Väliaho, H. 1980. Viljeltyjen havumetsiköiden kasvatusmallit. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 99(2). 271 s.

17 viitettä