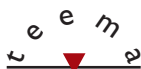


Timo Pukkala

Muut kuin puuaineiset tuotteet metsäsuunnittelussa



Johdanto

Yksityismetsänomistajien arvoja ja tavoitteita käsittelevien tutkimusten mukaan kolmannes metsänomistajista on monitavoitteisia (Karppinen 1988). He haluavat metsältään taloudellisia hyötyjä, työmahdollisuuksia ja muita palveluja. Yhtä runsaslukuiselle ryhmälle puunmyyntitulot ja metsän tarjoamat työmahdollisuudet ovat keskeisimmät tavoitteet. Muita metsänomistajaryhmiä ovat virkistyskäyttäjät ja investoijat.

Yksityismetsänomistajien tavoitteet muuttuvat yhteiskunnan kehityksen mukana. Niiden metsänomistajien osuus, joille oman metsän tarjoamat työtilaisuudet ovat tärkeä tavoite, on luultavasti pienentynyt. Investoijat sitä vastoin ovat saattaneet lisääntyä, sillä metsäpalstoja ostetaan halukkaasti nimenomaan sijoituskohteiksi. Myös monitavoitteisia omistajia lienee enemmän kuin ennen, ja monimuotoisuus ja ympäristöseikat ovat luultavasti lisänneet painoarvoaan.

Myös yhteiskunnalla on metsien käsittelyyn liittyviä tavoitteita. Yhteiskunnalle on tärkeää puuhuollon turvaaminen, monimuotoisuuden ylläpito ja enenevässä määrin myös muut ympäristöseikat kuin monimuotoisuus (esim. hiilen sidonta).

Metsäsuunnittelujärjestelmän pitäisi pystyä tarjoamaan käyttökelpoisia laskelmia kaikille niille metsänomistajaryhmille, joiden edustajia metsänomistajien joukossa on runsaasti. Runsaalukuisia ryhmiä ovat ainakin metsässään työtä tekevät, investoijat,

monikäyttömistajat ja virkistäytyjät. Luonto- ja ympäristöarvoja korostavat ovat luultavasti myös merkittävä ryhmä. Järjestelmän on tuotettava tietoa myös niistä seikoista, joiden merkitys on yhteiskunnalle suuri ja joiden määrän yhteiskunta haluaa tarkistaa.

Suunnittelujärjestelmien kehittäjien on mietittävä lähinnä sitä, mikä on tärkeää ja tarpeellista lähitulevaisuudessa eikä niinkään sitä, millainen järjestelmä vastaa tämänhetkisen tai taakse jääneen metsätalouden tarpeita. Tutkijan on oltava kehittäjäkin enemmän tulevaisuuteen suuntautunut.

Investoijametsänomistajalle suunnittelun ja suunnittelujärjestelmän tulee osoittaa se metsän käsittely, joka maksimoi sijoituksen kannattavuuden. Metsää tulee käsitellä niin, että maan tuottoarvo eli nykyhetken diskontattujen nettotulojen summa maksimoituu. Hakkuiden ajallisella jakaantumisella ei yleensä ole suurta merkitystä. Työtilaisuuksia haluavan suunnitelmassa olennaista on hakkuiden ja tulojen tasaisuus. Tutkimusten mukaan käsittelysuositusten (Hyvän metsänhoidon suositukset 2001) noudattaminen ei maksimoi taloudellista kannattavuutta (Hyytiäinen ja Tahvonen 2001, 2003) eikä se yksinään myöskään takaa työtilaisuuksien ajallista tasaisuutta.

Virkistyskäyttäjän metsäsuunnittelussa kiinnitetään huomiota maisema-arvoihin, marja- ja sienisatoihin sekä riistan viihtymiseen, luontoihmisen suunnittelussa taas esim. monimuotoisuuteen ja hiilen sidontaan. Virkistysarvojen tuottaminen edel-

lyttää erilaista metsänhoitoa kuin kannattavuuden tai puuntuotannon maksimointi. Monimuotoisuus taas edellyttää, että metsässä on riittävästi esim. suurikokoisia lahopuita, taloudellisesti vähäarvoisia lehtipuita ja erilaisia elinympäristöjä. Hiiltä voidaan sitoa suurentamalla biomassaa. Koska näin ei voi määrättömästi tehdä, voidaan samalla pyrkiä tuottamaan puutavaralajeja, joista valmistettujen tuotteiden elinikä on pitkä.

Edellisen perusteella on selvää, että samanlainen metsän käsittely ei sovi kaikille metsänomistajille. Hyvän metsänhoidon ohjeiden suoraviivainen noudattaminen ei itse asiassa saata olla monenkaan metsänomistajan kannalta optimaalinen menettelytapa. Jotkin tavoitteet, esimerkiksi lajistollisen monimuotoisuuden lisääminen, edellyttävät jo yksinään metsänhoidon erilaistamista, joko metsälön sisällä tai metsälöiden muodostamassa kokonaisuudessa. Tavoitteiden tapauskohtaisuuden ja suuren vaihtelun vuoksi suunnittelujärjestelmä onkin nähtävä välineeksi, jolla metsänomistajakohtaiset käsittelysuositukset johdetaan omistajan tavoitteista ja metsän tuotantomahdollisuuksista. Suunnittelujärjestelmä ei saa olla väline, jonka avulla metsänomistaja manipuloidaan käsittelemään metsäänsä yleisten käsittelysuositusten mukaisesti.

Muiden kuin puuaineisten tavoitteiden olemassaolon vuoksi suunnittelujärjestelmiin tarvitaan välineitä näiden mittaukseen. Mittauksessa on luontevaa erottaa metsikkö- ja aluetaso. Yleensä metsikkö on ensimmäinen taso, jolla muiden tuotteiden ja palveluiden määrää on järkevää mitata. Metsikkötason tunnuksista voidaan johtaa monenlaisia aluetason (maisematason) tunnuslukuja. Aluetunnukset ovat yksinkertaisimmillaan metsikkötunnusten summia (esim. hiilen sidonta) tai keskiarvoja. Joskus tarvitaan mittareita, joiden arvo riippuu maiseman koostumuksesta. Monimuotoisuus esimerkiksi ei maksimoidu maksimoimalla metsiköille laskettujen monimuotoisuusindeksien summaa, koska lajin elinvoiman ylläpito edellyttää monenlaisten ympäristöjen luomista. Jos on eduksi, että tietyn lajin elinympäristöt eivät pirstoudu, maisematason mittarin on otettava huomioon elinympäristölaikkujen koko ja sijoittuminen toisiinsa nähden. Jos tällaista, metsiköiden sijainnista riippuvaa mittaria käytetään optimointilaskelmien tavoite- tai rajoitemuuttujana, suunnitteluongelma on ratkaistava spatiaalisen opti-

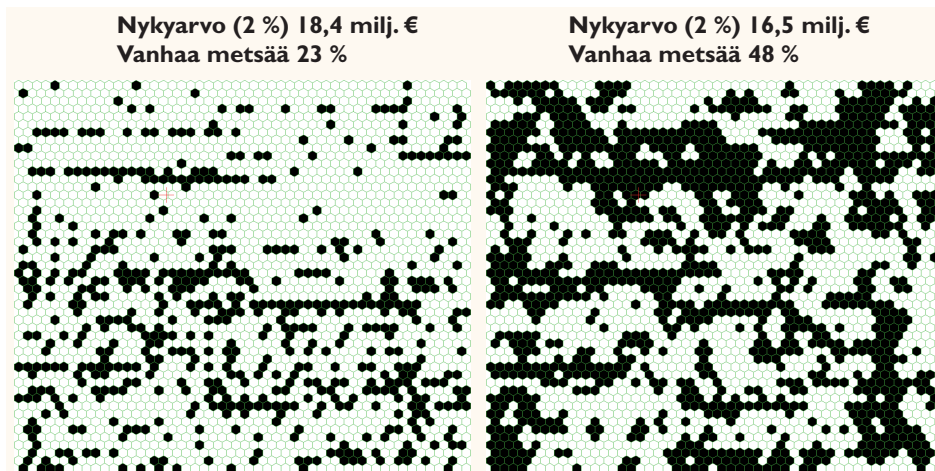
moinin keinoin. Spatiaalista optimointia saatetaan tarvita myös tuhoriskien minimoimiseksi tai määrätujen saamiseksi leimikkokeskityksiä muodostamalla.

Tässä artikkelissa tarkastellaan keinoja, joita Suomessa on kehitetty muiden kuin puuaineisten tuotteiden ja metsän piirteiden sisällyttämiseksi metsäsuunnittelun analyttisiin laskelmiin. Tarkempaan pohdintaan otetaan monimuotoisuus ja hiilen sidonta. Koska metsän spatiaalinen rakenne on monen muun kuin puuaineisen tunnuksen kannalta olennainen asia, artikkelissa tarkastellaan myös sitä, kuinka maiseman rakenne voidaan ottaa huomioon suunnittelulaskelmissa. Kaikki tässä artikkelissa käsiteltävät tunnuksot ja menetelmät sisältyvät Monsu-suunnittelujärjestelmän uusimpaan versioon (Pukkala 2006). Esimerkkilaskelmissa käytetään kuvitteellista metsälöä, joka muodostuu 2500 yhden hehtaarin laajuudesta kuusikulmion muotoisesta metsikkökuvioista. Metsiköiden kasvupaikka- ja puustotiedot ovat todellisten pohjoiskarjalaisten metsikkökuvioiden tietoja.

Ekologinen suunnittelu ja monimuotoisuus

Nykyisessä metsäsuunnittelussa monimuotoisuus otetaan huomioon lähinnä niin, että ns. avainbiotoopeja ja alueella harvinaisia elinympäristöjä käsitellään varovasti tai ei lainkaan. Suunnitelmassa esitetyt toimenpiteet monimuotoisuuden suojeluksi eivät perustu systemaattiseen analyysiin vaihtoehtojen hyvydestä. Rutiinis suunnittelussa ei myöskään juuri kiinnitetä huomiota siihen, kuinka suunnitelmien toteutus vaikuttaa pitkällä aikavälillä metsämaiseman rakenteeseen ja koostumukseen.

Monsu-ohjelmistossa ekologisen suunnittelun yleisperiaate on se, että metsiköiden eri käsittelyvaihtoehdoille lasketaan simulointivaiheessa indeksejä, joista valtaosa on lajikohtaisia elinympäristöindeksejä ja loput yleisindeksejä (esim. vanhuus, diversiteetti). Indeksejä laskettaessa voidaan ottaa huomioon ajallinen jatkuvuus, jolloin indeksiarvo paranee, jos se on ollut hyvä myös edellisenä laskenta-ajankohtana. Optimointivaiheessa, kun vaihtoehtoisia suunnitelmia vertaillaan, kuviotason indekseistä lasketaan tilanteeseen sopivia maisematunnuksia, joita voidaan käyttää optimoinnin tavoite-



Kuva 1. Vanhan metsän (tummennetut alueet) jakaantuminen 2500 ha:n metsälössä 60 vuoden kuluttua, kun maksimoidaan nykyarvoa (vasemmalla) tai kun nykyarvon maksimoinnin lisäksi pyritään luomaan vanhan metsän keskityksiä (oikealla).

tai rajoitemuuttujina (Pukkala 2004). Esimerkkejä maisematunnuksista ovat elinympäristön tai ydinalueen pinta-ala, elinympäristöindeksin keskiarvo, indeksin spatiaalinen autokorrelaatio sekä sellaisen kuvionrajan osuus, joka yhdistää kahta elinympäristöksi luettavaa metsikkökuviota. Metsikkökohtaisia indeksejä on tällä hetkellä noin 40 kpl ja maisematunnuksia 15 kpl, joiden yhdistelmänä saadaan 600 erilaista ekologista tunnusta laskenta-ajankohtaa kohti.

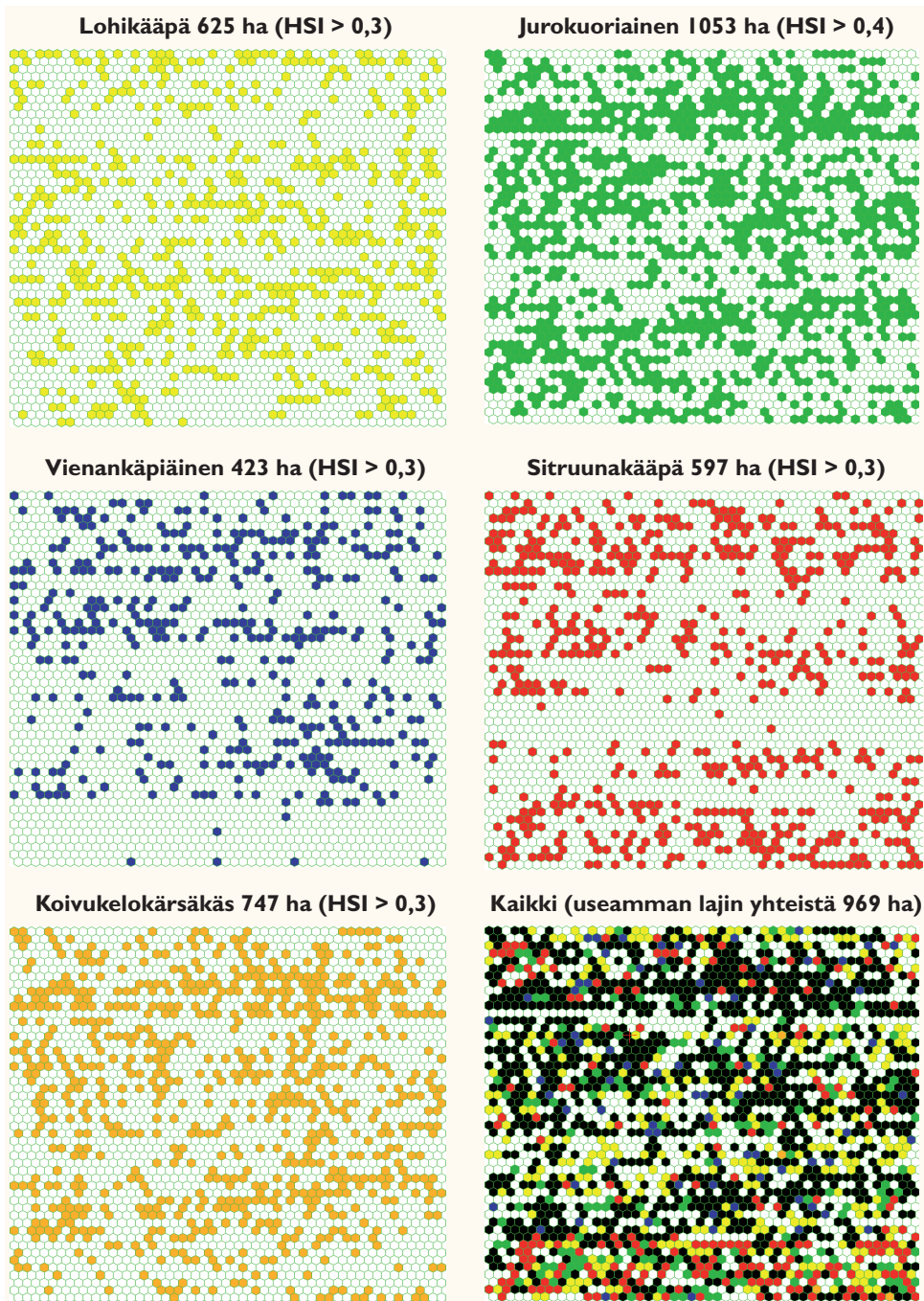
Kuvassa 1 on esimerkki vanhuusindeksin käytöstä. Käsittelyvaihtoehtoja simuloitaessa kuvioille on laskettu vanhuusindeksi, joka riippuu metsikön iästä, puulajikoostumuksesta ja puuston tilavuudesta. Vanhuusindeksi saa arvon 0,5 esim. silloin, kun metsikön ikä on sama kuin kiertoaikasuositus ja puuston tilavuus on vähintään 200 m³/ha. Vanhoiksi on luettu metsät, joissa indeksiarvo ylittää 0,5.

Kun maksimoidaan nykyarvoa (maan tuottoarvoa) 2%:n korkokannalla, mutta jokaisena 20-vuotiskautena hakataan kuitenkin vähintään 150 000 m³, tuottoarvo on 18,4 milj. €, ja vanhaa metsää on 60 vuoden päästä 23 % pinta-alasta (kuva 1). Kun optimointiongelmaan lisätään toiseksi yhtä tärkeäksi tavoitteeksi vanhan metsän pinta-alan lisääminen ja kolmanneksi vanhan metsän keskittäminen, saadaan vanhan metsän osuudeksi 48 %, ja vanhat metsät ovat ryhmittyneet laajoiksi kokonaisuuksiksi. Tä-

män suunnitelman nykyarvo on 16,5 milj. €, ts. 10 % pienempi kuin suunnitelmassa, jossa vanha metsä ei ollut tavoite. Tavoitepainotuksia muuttamalla voidaan kokeilemalla löytää sellainen yhdistelmä taloudellista kannattavuutta ja vanhaa metsää, joka tyydyttää parhaiten päätöksentekijää.

Vanhan metsän keskitykset ovat hyväksi monelle lajille. Ne eivät kuitenkaan takaa yksittäisten uhanalaisten lajien säilymistä alueella. Tähän tarvitaan laji- tai lajiryhmäkohtaista tarkastelua. Seuraavassa esimerkissä (kuva 2) tavoitteeksi on otettu se, että 2500 ha:n esimerkkimetsälössä viiden merkittäväksi arvioidun lajin elinympäristöjä on 60-vuotisen suunnittelukauden lopussa kutakin vähintään 500 ha, mutta mielellään enemmänkin. Elinympäristöksi on luettu metsiköt, joissa lajin habitaatti-indeksi (HSI) ylittää ennalta määrätyn minimiarvon. Kuvasta 2 nähdään, että vienankäpiäisen kohdalla tavoitteeseen ei ole päästy, mutta muiden lajien minimiala on ylittynyt. Jurokuoriaisen elinympäristöjä on eniten, ja ne ovat suureksi osaksi samoja metsiköitä kuin koivukelokärsäkkään ja vienankäpiäisen elinympäristöt. Lohikäävän ja sitruunakäävän elinympäristöt taas sijaitsevat eri paikoissa, minkä vuoksi optimoinnin tuloksena on syntynyt erilaisista elinympäristölaikuista koostuva maisemamosaiikki.

Edellisen kaltaisen suunnitteluongelman ratkaisu ei edellytä spatiaalista optimointia, minkä vuoksi se



Kuva 2. Lohikäävän, jurokuoriaisen, vienankäpiäisen, sitruunakäävän ja koivukelokärsäkkään habitaatit 60 vuoden päästä, kun tavoitteena on tilanne, jossa kunkin lajin habitaattia on vähintään 20% pinta-alasta. Oikealla alhaalla olevassa kartassa ne metsiköt, jotka ovat useamman kuin yhden lajin habitaatteja, on osoitettu mustalla värillä.

olisi voitu ratkaista myös lineaarisen ohjelmoinnin keinoin, mikä on käytettävissä lähes kaikissa suunnittelujärjestelmissä. Suunnitteluteknisesti ei ole ongelma, jos lajeja on viiden sijasta 50 tai 5000. Erilaisten elinympäristöjen säilyttämisestä huolehtiminen suunnitteluongelmia ratkaistaessa on siis teknisesti helppoa sen jälkeen, kun on olemassa tieto siitä, minkä lajien elinympäristöksi tietty metsikkö sopii.

Monien uhanalaisten lajien viihtyminen riippuu lahoppuun määrästä. Laji saattaa käyttää vain tiettyä puulajia, kokoluokkaa ja lahoastetta olevaa puuta. Minimitekijänä on usein järeä runkomaapuu. Habitaatti-indeksien laskemiseksi tarvitaankin lahoppuun syntymisen ja lahoamisen simulointia elävän puuston kehityksen simuloinnin ohella. Lisäksi on oltava tietoa siitä, kuinka paljon ja minkälaista lahoppuuta metsikössä on suunnittelukauden alussa. Monsujärjestelmässä alkulahoppu saadaan joko inventointitietona tai – ellei lahoppuuta ole inventoitu – sen määrä ja jakaantuminen erilaisiin ositteisiin voidaan ennustaa.

Hiilitase

Kioton ilmastonmuutospöytäkirja tuli voimaan 2005 (Kioton ilmastonmuutospöytäkirja 2006). Pöytäkirja merkitsee sitä, että hiilen päästöistä ja sidonnasta voidaan käydä kauppaa. Yhden päästöyksikön (hiilidioksidiekvivalenttitonnin) hinta on tällä hetkellä n. 25 €. Pöytäkirjan mukaan Suomen tulee laskea päästönsä vuoden 1990 tasolle. Suomen tulee selvittää kasvihuonekaasupäästönsä ja nielujen aikaansaamat poistumat. Pakollisesti laskettaviin hiilen nieluihin ja lähteisiin kuuluvat mm. metsitys ja metsänhävitys. Valinnaisia keinoja päästötaseen säätämisessä ovat mm. metsänhoito ja kasvillisuuden palauttaminen.

Periaatteessa on siis mahdollista, että hiilen sitominen metsään voi lähitulevaisuudessa toimia tulonlähteenä tai että metsästä vapautuvan hiilen vastineeksi on ostettava päästöoikeuksia. Kioton ilmastopimuksen ja ympäristön muutoksesta käydyn keskustelun vuoksi metsien hiilitase kiinnostaa yhä enemmän poliittisia päätöksentekijöitä, ympäristöjärjestöjä ja yksittäisiä ihmisiä. Suunnittelujärjestelmien kehittäjien tuleekin valmistautua siihen, että järjestelmä tuottaa tietoa suunnitelman

toteutuksen vaikutuksesta hiilipäästöihin.

Metsätalouden hiilitase voidaan laskea esim. seuraavasta kaavasta (Diaz-Balteiro ja Romero 2003):

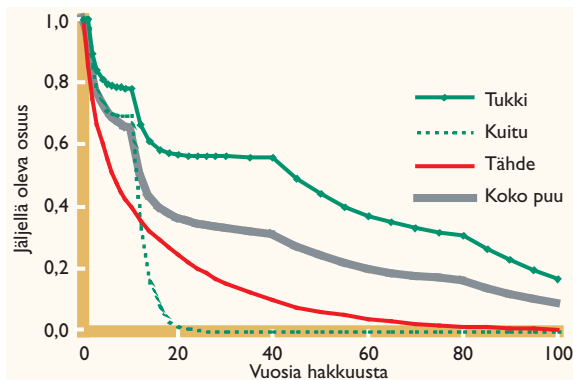
$$C_t = a(B_t - B_{t-1} + H_t) - P_t$$

missä C_t on jakson $t-1 \dots t$ hiilitase, a on hiilen osuus biomassasta, B on biomassa, H_t on elävästä puustosta poistunut biomassa kaudella $t-1 \dots t$ ja P_t on kuolleen biomassan hajoamisessa vapautunut hiili kaudella $t-1 \dots t$. Kuollut biomassa voidaan jakaa kuolleisiin puihin, metsään jäävään hakkuutähteeseen ja hakkuukertymään. Jos oletetaan, että pintakasvillisuuden määrässä ja maassa olevassa muussa orgaanisessa aineessa kuin puiden juurissa ei tapahdu suuria ajallisia muutoksia, hiilitase voidaan laskea puiden biomassasta sekä kuolleen ja hakkuussa poistetun puuston hajoamisesta.

Puuston biomassan laskemiseksi on käytettävissä malleja, ja myös biomassan hajoamisesta metsässä on tietoa. On myös olemassa laskelmia puista valmistettujen tuotteiden käyttöästä ja käytön jälkeisestä hajoamisnopeudesta. Näin ollen metsätalouden hiilitaseen laskennan edellytykset ovat olemassa, vaikkakin monissa parametreissa on vielä tarkentamisen varaa.

Monsu-ohjelmassa kuvauspuille lasketaan rungon massan lisäksi oksien, neulasten ja juurten massa käyttäen Marklundin (1988) yhtälöitä. Kuolleiden puiden massaositteiden hajoamista simuloidaan, ja kuivamassan pienenemisen perusteella lasketaan hajoamisessa vapautuva hiili. Hakatut puut jaetaan tukki-, kuitu-, ja energiapuuhun sekä metsätähteeseen. Metsätähteestä on erikseen tiedossa oksien (johon myös latvahukkapuu luetaan), juurten ja neulasten massa (kuva 3). Tukkipuu jaetaan tuotteiden käyttöön ja hajoamisnopeuden perusteella neljään, kuitupuuhun kahteen ja energiapuuhun yhteen ositteeseen. Kun tiedetään kunkin ositteen osuus ja hajoamisnopeus, voidaan hiilen vapautumista hakkuutähteistä ja tuotteista simuloida (kuva 3).

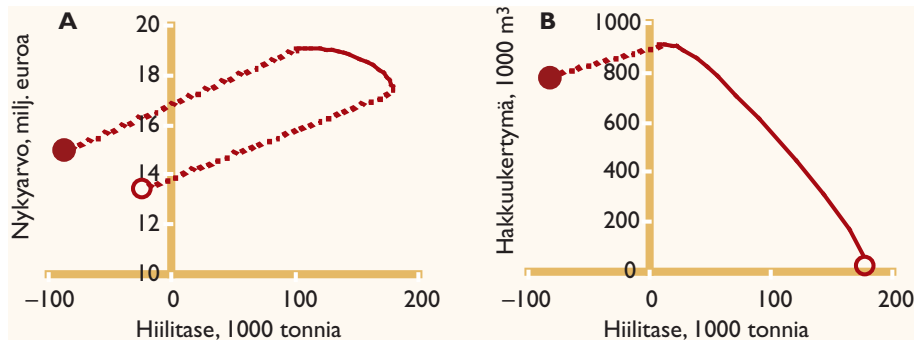
Metsässä on inventointihetkellä ja suunnittelukauden alussa hajoavaa biomassaa, jonka määrä ei ole käytettävissä mittaustietona. Jos lahoppu inventoidaan, saadaan yleensä tietoa vain kuolleen runkopuun määrästä. Metsässä on kuitenkin muunkinlaista kuollutta puuainesta, ennen kaikkea hakattujen ja kuolleiden puiden kantoja ja juuria.



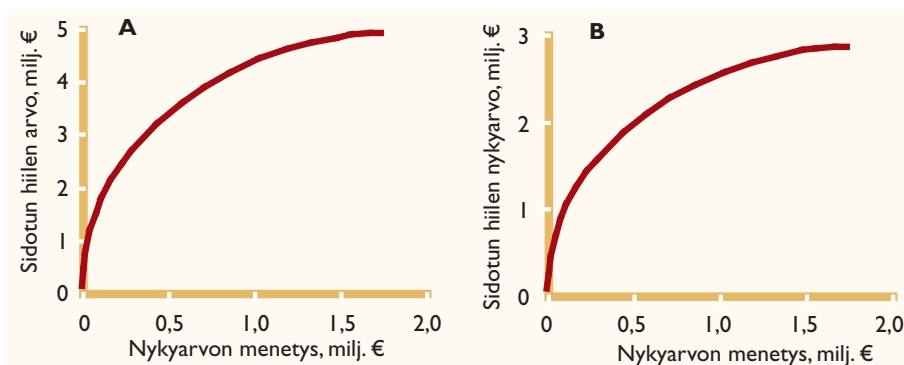
Kuva 3. Hakatun kuusen hajoaminen Monsu-ohjelmiston metsikkösimulaattorissa (kuvasta puuttuu energiaranka). Tukkipuu jaetaan neljään ja kuitupuuta kahteen ositteeseen tuotteiden käyttöä perusteella.

Jos tätä puuainesta ei oteta huomioon, saadaan vapautuvan hiilen määrästä etenkin simulointijakson alussa aliarvio ja hiilitaseesta yliarvio. Tämän vuoksi suunnittelujärjestelmässä on oltava väline, jolla voidaan ennustaa metsässä oleva alkulahopuu ja sen jakaantuminen eri ositteisiin.

Sen jälkeen, kun hiilisimulaattori on sisällytetty suunnittelujärjestelmän metsikkösimulaattoriin, järjestelmällä voidaan analysoida esim. hakkuiden vaikutusta hiilitaseeseen tai hiilen sidonnan lisäämisen vaikutusta metsätalouden kannattavuuteen (kuva 4). Kuvan 4 laskelmassa, joka koskee 2500 ha:n esimerkkimetsälöä ja 60 vuoden aikajännettä, hiilitasetta maksimoivan käsittelyohjelman nykyarvo on 2 %:n korolla 17,3 milj. €, mikä on 1,7 milj. € pienempi kuin tuottoarvon maksimoivassa käsittely-



Kuva 4. Hiilitaseen ja nettotulojen nykyarvon (A) sekä hiilitaseen ja hakkuukertymän (B) välinen tuotantomahdollisuuksien raja 2500 hehtaarin metsälössä 60 vuoden suunnitteluperiodin aikana (paksu yhtenäinen viiva). Suljettu pallo osoittaa ratkaisun, joka minimoi hiilitaseen ja avoin pallo ratkaisun, joka minimoi nykyarvon (A) tai hakkuukertymän (B).



Kuva 5. Nykyarvon menetyksen ja pidätetyn hiilen arvon (A) tai nykyarvon (B) välinen riippuvuus 2500 ha:n metsälössä. Siirtyminen origosta x-akselin suunnassa oikealle vastaa siirtymistä kuvan 4A tuotantomahdollisuuksien rajalla vasemmalta oikealle.

ohjelmassa (19 milj. €). Maksimaalisen hiilen sidonnan hinta on siis nykyarvolla mitattuna 1,7 milj. €. Hiiltä saadaan tällä sijoituksella sidotuksi 80 000 tonnia (200 000 tn CO₂), minkä arvo päästökaupassa on suuruusluokkaa 5 milj. € (kuva 5A). Jos kaikki nämä rahat saisi heti suunnittelukauden alussa, metsänhoidossa kannattaisi ilman muuta erikoistua hiilen sidontaan. Hiilen sidontaan erikoistuminen kannattaisi myös siinä tapauksessa, että hiilensidontapalkkio saadaan tasaisesti suunnitelmakauden aikana (kuva 5B). Jos puuntuotannon nykyarvosta tingittäisiin 1 milj. € hiilensidonnan hyväksi, sijoitus saataisiin takaisin kaksinkertaisena. Tämä merkitsisi hakkuiden vähentämistä kolmanneksella.

Esimerkkimetsälössä maksimaalinen hiilen sidonta saavutetaan minimihakkuilla, ts. kasvattamalla biomassaa (kuva 4). Tilanne saattaisi olla toinen, jos käytettäisiin yläharvennuksia. Tukkeihin keskittyvässä yläharvennuksessa hiiltä voidaan sitoa paremmin pitkäikäisiin tuotteisiin kuin alaharvennuksessa, ja samalla luoda tilaa biomassan kasvulle. Maksimaaliset hakkuut eivät alaharvennusemetsätaloudessakaan kuitenkaan minimoi hiilitasetta, vaan johtavat hivenen positiiviseen taseeseen (9000 tonnia), joka on 90 000 tonnia enemmän kuin hiilitaseen minimoivassa hakkuuohjelmassa. Pidemmällä aikavälillä biomassan kasvattaminen ei enää olisi riittävä keino, koska yhä useampi metsikkö saavuttaisi itseharvenemisrajan, jossa metsikön hiilitase on nolla. Positiivisen taseen aikaa voidaan jatkaa hakkaamalla metsästä tukkipuita, ja valmistamalla tukeista pitkäikäisiä tuotteita. Koska kuitenkin myös tuotteiden hiilitase saavuttaa lopulta tasapainon (vanhoista tuotteista vapautuvan hiilen määrä on lopulta sama kuin uusiin tuotteisiin sitoutuva hiili), metsätalouden hiilitase ei voi olla loputtomasti positiivinen.

Spatiaalinen optimointi

Ekologiset, monikäyttöiset ja taloudelliset tavoitteet saattavat edellyttää metsämaiseman spatiaalisen rakenteen huomioonottamista. Monsu-ohjelmassa on kymmenkunta spatiaalista maisematunnusta, jotka voidaan laskea periaatteessa mille hyvänsä metsikkötunnukselle. Joidenkin maisematunnusten laskenta edellyttää metsikköindeksin raja-arvoa, joka jakaa

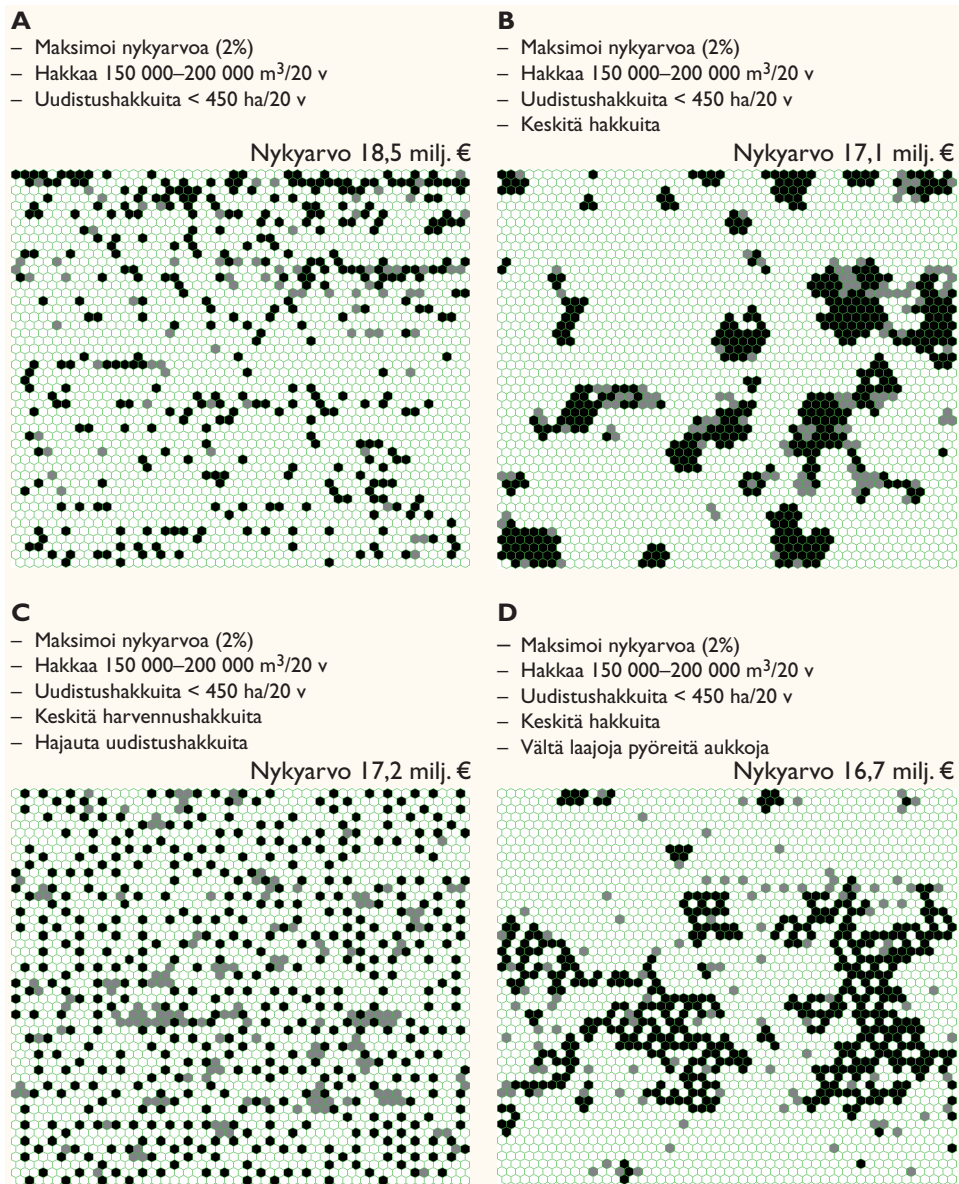
metsiköt hyviin ja huonoihin, sopiviin ja sopimattomiin tai käsiteltyihin ja käsittelemättömiin. Kaikki Monsussa olevat spatiaaliset tunnuksot lasketaan samanlaisesta spatiaalisesta tiedosta, nimittäin naapurikuvioita yhdistävien kuvionrajojen pituudesta. Spatiaaliseen optimointiin tarvitaan luettelo kaikista naapureina olevista kuviopareista ja kunkin parin yhteisen kuvionrajan pituus. Tämä tieto tuotetaan etukäteen, mikä vuoksi optimoinnin kuluissa ei tarvitse tehdä kyselyjä paikkatietojärjestelmille tai karttaohjelmille.

Tiettyä piirrettä tai käsittelyä voidaan pyrkiä keskittämään maksimoimalla sellaisen kuvionrajan osuutta, joka yhdistää kahta ko. piirteen suhteen samanlaista kuviota. Keskittymiseen päästään myös minimoimalla piirteen muutosta kuvionrajalla. Vaihtumisen minimointi tuottaa pehmeän maiseman, kun taas eron maksimointi tuottaa mahdollisimman pirstoutuneen rakenteen. Pehmeään maisemaan päästään myös spatiaalista autokorrelaatiota maksimoimalla, ja pirstoutuneeseen maisemaan autokorrelaatiota minimoimalla.

Monsun spatiaalisessa optimoinnissa käytetään heuristisia hakumenetelmiä. Monsussa ovat käytävissä Hero (Pukkala ja Kangas 1993), satunnaisuus (engl. direct ascent; Reeves 1993a), simuloitu mellotus (simulated annealing; Dowland 1993), tabuhaku (tabu search; Glover ja Laguna 1993), geneettinen algoritmi (genetic algorithm; Reeves 1993b), kynnyksarvomenetelmä (threshold accepting; Bettinger ym. 2002), vedenpaisumusmenetelmä (great deluge; Bettinger ym. 2002) sekä muutama edellisten yhdistelmä. Kehitteillä on myös soluauto-maattiajatteluun perustuvia uusia menetelmiä, jotka ovat spatiaalisissa ongelmissa usein kertaluokkaa nopeampia kuin em. perusheuristiikat.

Spatiaalinen optimointi kuvioiden keskinäisestä sijainnista riippuvia maisematunnuksia minimoimalla tai maksimoimalla on tehokas tapa vaikuttaa maiseman rakenteeseen ja koostumukseen (kuva 6). Samanaikaisesti on mahdollista pyrkiä keskittämään montaa erilaista metsän piirrettä tai resurssia, ja pyrkiä tekemään maisemasta pehmeä esim. puuston iän ja tilavuuden suhteen mutta rikkonainen jonkin muun piirteen suhteen.

Kun tämän artikkelin esimerkkimetsälössä maksimoidaan tuottoarvoa 2 %:n korkokannalla sillä rajoituksella, että kunakin 20-vuotiskautena haka-



Kuva 6. Esimerkkejä spatiaalisen optimoinnin käytöstä hakkuiden sijoittelussa 2500 ha:n metsälössä. Mustat alueet ovat uudistushakkuita ja harmaat kasvatushakkuita. Kartat osoittavat hakkuiden sijoittumisen kolmantena 20-vuotiskautena.

taan 150 000–200 000 m³, mutta uudistushakkuita on korkeintaan 450 ha/20 v, hakkuit sijoittuvat melko hajanaisesti (kuva 6A). Jos hakkuita pyritään keskittämään voimakkaasti, esim. pirstoutumisen vähentämiseksi tai korjuusäästöjen saamiseksi, kantohinnoin (ts. ilman leimikkokeskityksistä aiheutuvaa säästöä)

laskettu nykyarvo pienenee 7,6 % (kuva 6B). Kuvassa 6C on pyritty keskittämään kasvatushakkuita ja hajauttamaan uudistushakkuita, kuvassa 6D taas muodostamaan uudistushakkuujuotteja esim. reunametsän siemennyksen maksimoimiseksi tai liiallisen aukeuden tunnun välttämiseksi.

Monikäyttö ja riskit

Artikkelin esimerkit osoittavat, että tekniset edellytykset monipuoliseen ja tilanteen mukaan joustavaan numeeriseen analyysiin metsäsuunnittelun yhteydessä ovat olemassa. Niistä tavoiteryhmistä, joista ei esitetty esimerkkejä, monikäyttöarvot voidaan ottaa huomioon samalla tavalla kuin ekologiset seikat: metsiköille lasketaan monikäyttöä kuvaavia indeksejä, joista voidaan muodostaa spatiaalisia ja ei-spatiaalisia maisematason tunnuksia. Monsu laskee metsiköille mm. seuraavat monikäyttöön liittyvät tunnuksat: sopivuus puolukan ja mustikan keruuseen, sopivuus ulkoiluun ja maisemallinen kauneus. Riistan viihtyminen metsässä voidaan ottaa huomioon samoilla tekniikoilla, joilla analysoidaan uhanalaisten lajien viihtymistä.

Maiseman rakenteen tarkastelu suunnittelulaskelmien yhteydessä on usein mielekästä vasta huomattavasti laajempien alueiden puitteissa kuin mitä yksityismetsälöt ovat. Suunnittelualueen pienuus ei kuitenkaan oikeuta unohtamaan monimuotoisuuden suojelua. Elinympäristöjä on pyrittävä luomaan, säilyttämään ja keskittämään myös yksityismetsien suunnittelussa tai ainakin suunnittelujärjestelmillä olisi kyettävä analysoimaan, kuinka hyvää suunniteltu yksityismetsätalous on monimuotoisuuden suojelun kannalta. Tekniset edellytykset tähänkin ovat olemassa (Kurttila ja Pukkala 2003). Maisemataso suunnittelu edellyttää sitä, että tietyn alueen yksityismetsälöiden suunnitelmat laaditaan yhtäaikaaisesti, jolloin maisematasolla pyritään ekologisesti hyvään maiseman rakenteeseen samalla, kun huolehditaan metsälökohtaisten tavoitteiden toteutumisesta. Optimaalisessa suunnitelmassa monimuotoisuuden suojelu kohdistuu eniten niihin metsälöihin, joissa omistajan tavoitteet ja metsän tuotantoresurssit ovat vähiten ristiriidassa monimuotoisuuden suojelun kanssa.

Erilaiset tuhoriskit voidaan myös sisällyttää analyysiin samalla periaatteella kuin ekologiset ja monikäyttölliset seikat. Stokastisen simuloinnin ja Monte Carlo -tekniikan käytön sijaista tuhon todennäköisyyttä ja määrää kuvaavien mallien ennusteet voidaan ajatella indekseiksi, joita minimoidaan sellaisenaan tai metsikköindekseistä lasketaan mutkikkaampia tavoite- tai rajoitemuuttujia. Metsiköille voidaan laskea esim. kriittinen tuulenoisuus, jossa

reunametsän puita alkaa merkittävästi kaatua, jos metsikkö rajoittuu hakkuuaukkoon. Optimoinnissa voidaan minimoida sellaisten reunametsiköiden määrää, joissa kriittinen tuulenoisuus on pieni. Käytännössä yhtä hyvään tulokseen päästään, kun minimoidaan sellaisen kuvionrajan pituutta, jossa hakkuuaukko rajoittuu solakoita puita kasvavaan varttuneeseen havumetsikköön.

Kehittämistarpeita

Vaikka menetelmällisiä edellytyksiä onkin jo monien lähtöön, tulee sekä menetelmiä että niiden käyttöön liittyviä malleja ja parametreja kehittää edelleen. Ekologisessa suunnittelussa ja hiilitaseen laskennassa avainasemassa ovat biomassamallit, kuolemismallit ja hajoamismallit. Yhtä tärkeää on tieto lajien elinympäristövaatimuksista. Muuhun kuin puun tuotantoon tähtäävä metsätalous edellyttää ainakin osassa metsää ja metsälöitä olennaisesti nykyisestä poikkeavaa metsätaloutta, eikä ole varmaa, että nykyiset kasvu-, syntymis- ja kuolemismallit toimivat luotettavasti rakenteeltaan ja käsittelyltään uudenaikaisissa metsiköissä. Yläharvennukset esimerkiksi saattavat parantaa taloudellista kannattavuutta ja lisätä hiilen sidontaa, minkä vuoksi niiden käyttöä saattaa olla syytä lisätä osassa metsiköitä. Eri-ikäismetsiä sekä lepikoita, koivikoita ja haavikoita tarvitaan elinympäristöiksi sekä joskus myös maisema- ja tunnesyistä. Säästöpuut ovat jo yleistynyt keino saada aikaan ajallista jatkuvuutta ja suurikokoisia lahopuita.

Vaikka säästöpuut ovatkin jo nykykäytäntöä, niiden vaikutusta metsikön kehitykseen ei ole kunnolla mallinnettu. Eri-ikäismetsien, lepikoiden ja haavikkojen kehitystään ei tunneta hyvin. Koska useimmat muut kuin puuaineiset tunnuksat ovat kytköksissä puustoon, on puuston dynamiikan entistä perusteellisempi tutkiminen mitä tärkein tutkimusaihe myös monikäytön, monimuotoisuuden ja metsätalouden ympäristövaikutusten analysoinnin kannalta.

Vaikka metsän monikäyttöön, lajien elinympäristövaatimuksiin ja ympäristöseikkoihin liittyvä tutkimus onkin Suomessa ollut vähäisempää kuin puun kasvuun liittyvä tutkimus, muiden kuin puuaineisten metsän hyötyjen ennustaminen ei silti

välttämättä ole olennaisesti epäluotettavampaa kuin puuntuotannon ja taloudellisten hyötyjen ennustaminen. Metsikön kehityksen ennustaminen on senkin varsin epävarmaa, varsinkin jos ennustettavaan käsittelyohjelmaan sisältyy metsikön luontainen uudistaminen. Kaukana tulevaisuudessa saatavien tulojen ennustaminen on vieläkin epävarmempaa. Toisaalta monen uhanalaisen lajin habitaattivaatimukset tiedetään melko hyvin, samoin esim. se, millaisen metsän enemmistö suomalaisista kokee kauniiksi tai hyväksi ulkoiluympäristöksi. Ennustamisen epävarmuus ei siten ole riittävä syy sille, että metsän muut tuotteet ja palvelut jätetään pois suunnittelulaskelmista.

Analyttisen ja numeerisen suunnittelun vaihtoehto on ns. asiantuntijasuunnittelu, jota suomalainen metsäsuunnittelu on pitkälti ollut monikäytön, ekologian ja ympäristövaikutusten osalta. Monitavoitteinen asiantuntijasuunnittelu on kuitenkin kallista, jos se tehdään huolellisesti, sillä suunnitteluun tarvitaan monen alan asiantuntijoita. Suunnittelijan tai asiantuntijan subjektiivisen esityksen tueksi ei useinkaan ole esittäjä laskelmia, jolloin on pelkästään uskon varassa, että esitys on oikeasti hyvä. Numeerisessa suunnittelussa tuotetaan vaihtoehtoja ja niitä analysoidaan systemaattisesti tavoitteena löytää kokonaisuuden kannalta paras ratkaisu. Monitavoitteiset metsäsuunnittelutilanteet ovat niin monimutkaisia, että numeerisesti saatujen ratkaisuehdotusten käyttö asiantuntijasuunnittelun tukena kannattaa varmasti. Sitä, että numeerinen suunnittelu korvaisi kokonaan subjektiivisen harkinnan, eivät metsäsuunnittelun tutkijat ole missään vaiheessa ehdottaneet.

Viitteet

- Bettinger, P., Graetz, D., Boston, K., Sessions, J. & Chung, W. 2002. Eight heuristic planning techniques applied to three increasingly difficult wildlife planning problems. *Silva Fennica* 36(2): 561–584.
- Diaz-Balteiro, L. & Romero, C. 2003. Forest management optimisation models when carbon capture is considered. *Forest Ecology and Management* 174: 447–457.
- Dowsland, K.A. 1993. Simulated annealing. Teoksessa: Reeves, C.R. (toim.). *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*. Blackwell Scientific Publications. s. 20–69.

- Glover, F. & Laguna, M. 1993. Tabu search. Teoksessa: Reeves, C.R. (toim.). *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*. Blackwell Scientific Publications. s. 70–150.
- Hyvän metsänhoidon suositukset. 2001. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisuja 13/2001. 96 s.
- Hyytiäinen, 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? *Scandinavian Journal of Forest Research* 18: 457–469.
- Karppinen, H. 1998. Values and objectives of non-industrial private forest owners in Finland. *Silva Fennica* 32(1): 43–59.
- Kioston ilmastonmuutospöytäkirja. 2006. Valtion ympäristöhallinnon verkkosivut (www.ymparisto.fi). (viitattu 8.2.2006).
- Kurttila, M. & Pukkala, T. 2003. Composing holding-level economic goals with spatial landscape-level goals in the planning of multiple ownership forestry. *Landscape Ecology* 18: 529–541.
- Marklund L.G. 1988. Biomassfunktioner för tall, gran och björk i Sverige. Biomass functions for pine, spruce and birch in Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Survey, Umeå. Report 45. ISSN 0348-0496. ISBN 91-576-3524-2. 73 s.
- Pukkala, T. 2004. Dealing with ecological objectives in the Monsu planning system. *Silva Lusitana, Special issue* (2004): 1–15.
- 2006. Monsu-metsäsuunnitteluohjelmisto. Versio 5. Ohjelmiston toiminta ja käyttö. Joensuun yliopisto. 53 s.
- & Kangas, J. 1993. A heuristic optimization method for forest planning and decision making. *Scandinavian Journal of Forest Research* 8: 560–570.
- Reeves, C.R. (toim.) 1993a. *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*. Blackwell Scientific Publications. 320 s.
- 1993b. Genetic algorithms. Teoksessa: Reeves, C.R. (toim.). *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*. Blackwell Scientific Publications. s. 151–196.

16 viitettä

- Timo Pukkala, Joensuun yliopisto, PL 111, 80101 Joensuu; s-posti timo.pukkala@joensuu.fi