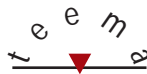


Veli-Pekka Kivinen ja Jori Uusitalo

# Sumea logiikka ja sen soveltaminen hakkuukoneen apterauksen ohjauksessa



## Maailma on sumea

**V**anhan tarinan mukaan eräässä syrjäisessä kylässä oli vain yksi parturi, joka yhtenä päivänä ripusti liikkeensä ikkunaan kyltin, jossa luki: ”Ajan kaikkien ja vain niiden kyläläisten parran, jotka eivät itse aja partaansa.” Kuka siis ajoi parturin parran? Jos hän ajoi sen itse, hänen kylttinsä sanoi, ettei hän ajanut sitä. Jos hän taas ei ajanut omaa partaansa, liikkeen mainoskyltti kuitenkin väitti, että hän ajoi sen. Parturimme näytti samanaikaisesti sekä ajavan että ei-ajavan partansa (Kosko 1993).

Tämä loogikko Bertrand Russellin parturiesimerkki kuvaa osuvasti sitä ristiriitaa, johon usein törmätään päättelyn perustuessa puhtaaseen klassiseen logiikkaan. Klassinen logiikka, jota myös Aristoteleen logiikaksi kutsutaan ja johon länsimainen ajattelu keskeisesti nojaa, on kaksiarvoista logiikkaa: väite voi olla vain ja ainoastaan joko täysin tosi tai täysin epätosi, mitään kolmatta vaihtoehtoa ei ole olemassa (Kosko 1993, Niemi 1996). Tämän ns. kolmannen poissuljetun lain periaatteen mukaisesti esimerkiksi taivas on joko sininen tai ei-sininen, työntekijä joko tyytyväinen tai ei-tyytyväinen työhönsä, juomaa sisältävä lasi joko täysi tai tyhjä ja henkilö joko nuori tai ei-nuori.

Kokemuksemme todellisuudesta eivät kuitenkaan läheskään aina tue kaksiarvologiikan mustavalkoista käsitystä maailmasta. Asiat eivät useinkaan ole vain joko täysin tosia tai täysin epätosia, vaan jotakin siltä väliltä. Esimerkiksi taivas voi olla sekä sini-

nen että ei-sininen, työntekijä enemmän tai vähemmän tyytyväinen työhönsä, puolillaan juomaa oleva lasi sekä tyhjä että täysi ja henkilö osittain sekä nuori että ei-nuori. Monia todellisuuden ilmiöitä, kuten ruoan makua, hajuveden tuoksua, seoksen rakeisuutta tai ihmisten asenteita, ei voida tyydyttävästi edes kuvata täsmällisillä, numeerisilla arvoilla (Isomursu ym. 1993). Toisaalta epätäsmällisyys ja epämääräisyys ovat olennainen elementti myös ihmisen ajattelussa ja kommunikoinnissa, sillä ihmisen käyttämä luonnollinen kieli tulvii epätäsmällisiä ilmaisuja, kuten ”melko suuri”, ”noin 2” ja ”liikimain samanlainen”. Metsänomistaja voi esimerkiksi päätellä myyvänsä puuta, jos hinta on korkea. Tällöin myyjällä ei välttämättä ole mielessä täsmällistä raja-arvoa korkealle hinnalle, vaan hinnan noustessa se on yhä suuremmassa määrin korkea.

## Sumea logiikka on päättelyä sumeilla joukoilla

Sumea logiikka on tapa analysoida moniarvoista, harmaata maailmaa. Sumea logiikka voidaan sumean teorian perustajan Lofti Zadehin mukaan periaatteessa määrittellä kahdella erilaisella tavalla (Fuzzy logic...1998).

Ahtaasti tulkittuna sumea logiikka on moniarvologiikan laajennus (Fuzzy logic...1998). Toisin kuin klassinen kaksiarvologiikka moniarvologiikka sallii kaikki totuuden asteet aina täysin epätodesta (0) täy-

sin toteen (1). Moniarvoisen logiikan mukaan tosiasioita koskevat väitteet voivat olla siis täysin totia tai täysin epätosia, mutta ne voivat saada myös totuusarvon, joka asettuu 0-prosenttisesti toden ja 100-prosenttisesti toden väliin. Vaikka sumea logiikka nojautuuakin moniarvologiikan ajattelutapaan, sumea logiikka poikkeaa tutkimuskohteeltaan ja metodeiltaan monessa suhteessa muista logiikoista. Yksi keskeisimmistä eroista on se, että sumeassa logiikassa on luovuttu pyrkimyksestä täsmällistä epätasällisistä ilmaisut ja on siten selvästi hyväksytty epätasällisyyden läsnäolo (Isomursu ym. 1993).

Laajemmassa merkityksessä sumea logiikka on vallitsevan tulkinnan mukaan lähes tulkoon synonyymi sumeiden joukkojen teorialle (Fuzzy logic... 1998). Kun perinteisessä binaariseen logiikkaan perustuvassa joukko-opissa alkio joko kuuluu täydellisesti tai ei kuulu lainkaan annettuun joukkoon, niin sumeassa joukko-opissa alkio voi kuulua joukkoon myös vain osittain (Kosko 1993, Isomursu ym. 1993). Sumeassa joukko-opissa objektin kuulumista ja/tai kuulumattomuutta joukkoon kuvataan tavallisesti jäsenyysfunktiolla, jonka arvojoukko on laajennettu suljetuksi väliksi  $[0,1]$ . Jos alkio kuuluu kokonaan joukkoon, alkiolla on täysi jäsenyysaste kyseisessä joukossa eli jäsenyysfunktio saa arvokseen tasan yksi. Jos taas alkio ei kuulu lainkaan joukkoon, alkion jäsenyysaste joukossa on tasan nolla. Mikäli alkio kuuluu joukkoon vain osittain, jäsenyysaste on nollan ja ykkösen välissä. Koska konventionaalisessa joukko-opissa alkion jäsenyysaste on joko nolla tai yksi, voidaan konventionaalisia joukkoja pitää sumeiden osajoukkojen erikoistapauksina. Tämä merkitsee sitä, että periaatteessa mikä tahansa järjestelmä voidaan sumeuttaa.

Sumean joukko-opin lisäksi sumean logiikan toinen keskeinen peruskäsite on lingvistinen eli sanallinen muuttuja. Lingvistinen muuttuja on sanan mukaisesti muuttuja, jonka arvojoukko esitetään sanallisesti ja jonka tulkinnassa käytetään kokonaisia sumeita joukkoja (Isomursu ym. 1993, Puolakka 1997). Esimerkiksi puun pituus on sanallinen muuttuja, jonka arvojoukko intuitioon perustuvan syntaktisen säännön mukaan voisi olla vaikkapa seuraavanlainen: {hyvin lyhyt, lyhyt, melko lyhyt, melko pitkä, pitkä, hyvin pitkä}. Kukin näistä sanallisista arvoista tulkitaan semanttisilla säännöillä, jotka liittävät jokaiseen arvoon yhden sumean

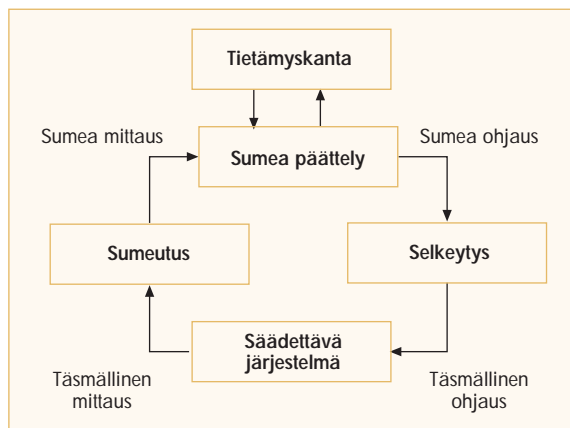
joukon. Itse asiassa sumea logiikka voidaan pitkälti nähdä metodina tehdä laskutoimituksia numeroiden sijasta sanoilla (Fuzzy logic... 1998).

Sumea logiikka juontaa juurensa 1920- ja 1930-luvuille, jolloin loogikot puolalaisen Jan Lukasiewiczin johdolla loivat moniarvologiikan (Kosko 1993, Niemi 1996). Käsite ”sumea” iskostui kieleen vasta runsaat kolmekymmentä vuotta myöhemmin, kun iranilaissyntyinen Berkleyn yliopiston professori Lofti Zadeh julkaisi sumeita joukkoja ja sumeaa logiikkaa käsittelevät tutkimuksensa. Siihen saakka sumeaa logiikkaa kutsuttiin yleisesti epätasälliseksi logiikaksi. Sumea teoria herätti alusta alkaen kiinnostusta, joka on jatkunut aina näihin päiviin asti. Sumeuden on epäilty olevan mm. naamioitunutta todennäköisyyttä ja tieteen ”kokaiinia”, joka entistään vähentää loogista ajattelua (Kosko 1993). Sittemmin sumea logiikka on kuitenkin herättänyt kasvavaa mielenkiintoa ja arvostusta ennen kaikkea siksi, että markkinoille on tullut suuri määrä sumeaa logiikkaan pohjautuvia älykkäitä sovelluksia.

Tunnetuimpia ja kaupallisesti menestyneimpiä sumeita tuotteita ovat olleet kamerat, videokamerat, kopiokoneet, pesukoneet, pölynimurit ja vastaavat kulutuselektronikan tuotteet, mutta sumeaa logiikka on hyödynnetty menestyksellisesti myös teollisuuden monimutkaisissa säätöjärjestelmissä, kuten sellutehtaan soodakattilan ohjauksessa, voimalaitosten päästöjen vähentämisessä ja tehtaan kokoonpanolinjan tehtävien ajoituksessa (Kosko 1993, Puolakka 1997). Alueellisesti tarkasteltuna kiinnostus sumeisiin järjestelmiin on ollut voimakkainta Kauko-idässä, erityisesti Japanissa, mutta myös Suomessa alan tutkimus on ollut verraten vilkasta (Isomursu ym. 1993).

## Sumea säätö

Monimutkaisen, epälineaarisen tai esimerkiksi aikariippuvan prosessin matemaattinen mallintaminen on usein hankalaa. Kuitenkin tällaisesta prosessista, kuten jonkin toimilaitteen ohjauksesta, voi olla olemassa heuristista tietämystä, jonka järjestelmän operaattori tai muu asiantuntija osaa ilmaista sanallisesti esimerkiksi ns. peukalosääntöjen muodossa. Etenkin tällaisissa perinteisin säätömenetelmin vaikeasti hallittavissa ongelmissa sumeaa logiikkaan



Kuva 1. Sumean säätimen perusrakenne.

perustuva säätö on osoittautunut käyttökelpoiseksi. On arvioitu, että jopa 90 % kaikista sumean logiikan sovelluksista liittyy tavalla tai toisella sumeaan säätöön (Isomursu ym. 1993).

Sumea säätöjärjestelmä on Puolakan (1997) mukaan eräänlainen asiantuntijajärjestelmä, joka sisältää tietämystä ohjattavasta kohteesta ja joka tämän tiedon sekä kohteesta tehtävien mittausten perusteella päättää tarvittavan ohjauksen (kuva 1). Tietämys kohdejärjestelmästä ja sen käyttäytymisestä on tavallisesti tallennettu tietämys- tai sääntökanaksi kutsutuksi kokonaisuudeksi, joka koostuu jossin-tyyppisistä implikaatioista. Esimerkiksi huoneen lämpötilaa säätelevän, sumeaan logiikkaan perustuvan laitteen toimintasäännöt voisivat olla seuraavanlaisia:

Sääntö 1: jos huone on kylmä, niin kytke lämmitys täydelle teholle.

Sääntö 2: jos huone on viileä, niin kytke lämmitys melkein täydelle teholle.

Sääntö 3: jos lämpötila on sopiva, niin kytke lämmitys keskisuurelle teholle.

Sääntö 4: jos huone on lämmin, kytke lämmitys pienelle teholle.

Sääntö 5: jos huone on kuuma, niin kytke lämmitys pois.

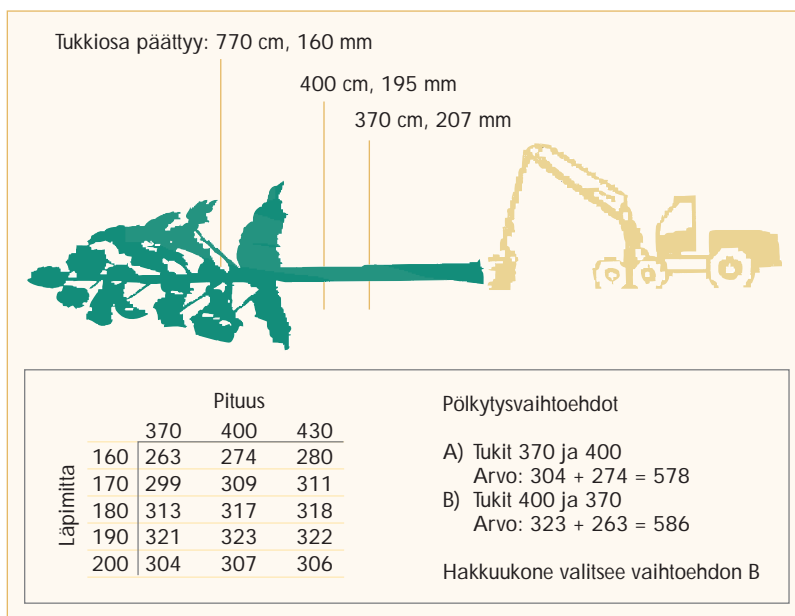
Sumeassa säädössä järjestelmän tilaa kuvaavien muuttujien (tulosuureiden) täsmälliset mittausravot ensin sumeutetaan, minkä jälkeen suoritetaan sumea

päätely ja edelleen lähtösuureen sumean arvon täsmällistäminen yksikäsitteiseksi numeeriseksi ohjausarvoksi. Sumeuttamisessa lasketaan kunkin tulosuureen mittausravon jäsenyysasteet kaikissa kyseiselle muuttujalle määritellyissä sumeissa joukoissa. Sumeassa päätelyssä sitten päätellään sumeuttujen mittausten perusteella, missä määrin kukin sääntö tulee vaikuttamaan lopulliseen säätöarvoon: mitä enemmän syöte muistuttaa säännön etuosaa, sitä suurempi on kyseisen säännön takaosan sisältämän säätötoimenpiteen laukaisuvoimakkuus. Lopullinen selkeytetty vastearvo voi olla esimerkiksi laukaisuvoimakkuuksilla painotettu sääntöjen takaosien keskiarvo.

### Sumea säätö ohjaamaan hakkuukoneen apterausta

Hakkuukoneissa runkojen katkontaa kohti tuotantolaitoksen asettamaa tavoitetta ohjataan yleisimmin niin kutsuttujen arvo- ja jakaumamatriisien avulla. Arvomatriisi eli hintalista on kaksiulotteinen taulukko, jossa on määritelty kunkin tietynpituisen ja -läpimittaisen pölkyn arvo suhteessa muihin kyseisen puutavaralajin pölkkyjen pituus-läpimitta -yhdistelmiin. Jakaumamatriisi on puolestaan tarvejakaumataulukko, joka kertoo pölkkyjen tavoiteosuuden kullekin pituuden ja läpimitan yhdistelmälle. Arvoapteerauksessa hakkuukone valitsee pölkkytysohjeen, joka maksimoi arvomatriisien ja rungon geometrian perusteella laskettavan rungon arvon (kuva 2). Jakauma-apteerauksessa lähtökohtana on jakaumamatriisi, jonka mukaista pölkkyjakaumaa hakkuukone pyrkii valmistamaan mahdollisimman täydellisesti. Tällöin hakkuukone vertaa jatkuvasti toteutunutta jakaumaa tavoitejakaumaan ja joko säätää arvomatriisia tavoitejakaumaa paremmin toteuttavaan suuntaan tai valitsee pölkkytysohjeen, joka toteuttaa jakaumatavoitetta parhaiten mutta jonka arvo samalla eroaa korkeintaan sallitun maksimimäärän arvoapteerauksen optimipölkkytyksen mukaisesta rungon arvosta.

Vaikka hakkuukonevalmistajat ovat tuoneet markkinoille apterausmatriisien laadintaa ja hallintaa helpottavia ohjelmistoja, varsinaiset analyttiset menetelmät arvo- ja jakaumamatriisien muodostamiseen ja säätämiseen ovat puuttuneet jokseenkin



Kuva 2. Arvoopterauksen periaate hakkuukoneessa.

kokonaan. Parametrien säätö onkin toistaiseksi perustunut pitkälti toimihenkilöiden ja hakkuukoneenkuljettajien ammattitaidon, oma-aloitteellisuuden ja pitkäaikaisen kokemuksen varaan. Tästä syystä katkonnan ohjauksessa on esiintynyt suuria alueittaisia ja konekohtaisia eroja. Kuitenkin oikein säädetyillä hakkuukoneen apterausparametreilla on entistä suurempi merkitys niin puunhankinnan kuin koko metsästä asiakkaalle ulottuvan tuotantoketjun onnistumisessa, sillä nykyisin jo valtaosa, lähes 90 %, markkinoille tulevasta puutavarasta hakataan koneellisesti.

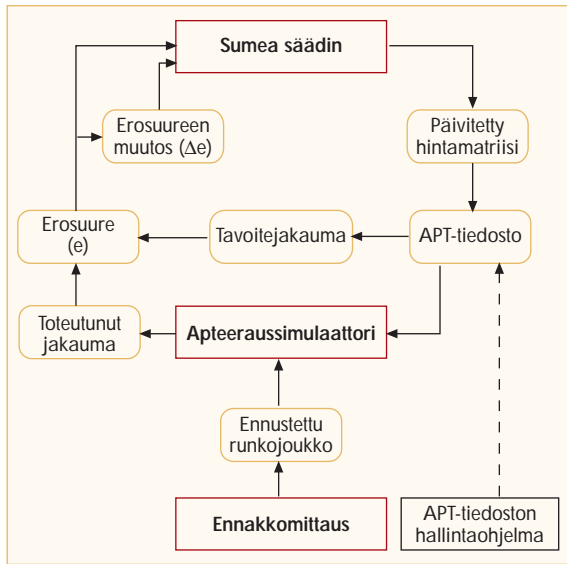
Metsäalan tutkimusohjelmaan kuuluvassa Helsingin ja Joensuun yliopistojen yhteistyöhankkeessa pyritään kehittämään laskennalliseen älykkyyteen (soft computing) perustuvia menetelmiä arvo- ja jakaumamatriisien laadintaan ja säätämiseen. Hankkeen ensimmäisessä vaiheessa on testattu sumean logiikan soveltuvuutta apterauksen ohjaukseen.

Arvomatriisin sumea säätöjärjestelmä perustaa toimintansa tuotantolaitoksen asettamaan tavoitejakaumaan ja leimikosta mitattuun ennakkotietoon. Säätöjärjestelmä koostuu varsinaisesta sumeasta säätimestä, apteraussimulaattorista, ennakkomitaussovelluksen generoimasta runkojoukosta sekä

säädettävästä apterauksen ohjaustiedostosta (kuva 3). Säädin on toteutettu MatLab-ympäristössä hakkuun simuloinnin perustuessa Ponssen OptiSimu-ohjelmistoon. Ennakkotieto leimikoiden puustosta on kerätty Uusitalon (1997) esittämällä subjektiiviseen koelavalintaan ja kiinteään koepuumäärään (n lähintä puuta) perustuvalla menetelmällä, ja runkojoukot on estimoitu tämän tiedon pohjalta Helsingin yliopistossa kehitetyllä EMO-ohjelmistolla (Uusitalo ja Kivinen 1997).

Sumea säädin vastaanottaa tietoa tavoitejakauman ja apteraussimulaattorin ennustaman toteutuneen tukkijakauman välisestä erosta ja tämän eron muutosnopeudesta, suorittaa sumean päättelyn tarvittavista korjauksista ja palauttaa lopuksi ohjaussuurena päivitetyn arvomatriisin apteraussimulaattorille. Säätimestä on viritetty erilaisia versioita muuttamalla säätimen sisäänmenosuureiden (erosuuren muutos) ja ulostulosuureen (arvomatriisin muutos) sumeiden joukkojen jäsenyysfunktioiden muotoa ja sijaintia.

Iteroinnit apteraussimulaattorin ja sumean säätimen muodostamalla säätösilmukalla osoittavat, että sumea säätö toimii arvomatriisin kalibroinnissa. Esimerkiksi kuusitukin jakauma-aste (tavoiteja-



**Kuva 3.** Hakkuukoneen apteerausta ohjaavan arvomatriisin sumea säätöjärjestelmä.

kauman toteutumisaste) parani neljässä kuusitukki-leimikossa 20 säätökierroksella keskimäärin noin kolmanneksen (absoluuttisesti keskimäärin 16 %) sekä ennakkomittauksesta generoidun että hakkuukoneen keräämän todellisen runkojoukon hakkuun simuloinnissa (kuva 4).

Sitä vastoin ennakkomittausotoksen perusteella sumealla säädöllä kalibroitu arvomatriisi paransi vain vähän tai ei lainkaan leimikon todellisen runkojoukon apteeraustulosta niin arvo- kuin jakauma-apterauksessa, kun vertailukohtana käytettiin käytännön toiminnassa hankitun pitkäaikaisen kokemuksen perusteella hiottua arvomatriisia. Tulos ei johdu niinkään sumeasta säätimestä kuin runkojoukon estimointivirheestä, sillä simuloitaessa leimikon hakkuuta todellisella runkoaineistolla säädetyllä arvomatriisilla jakauma-aste jo puhtaassa arvo-apterauksessa ylitti perusmatriisilla jakauma-apterauksessa saavutetun tason.

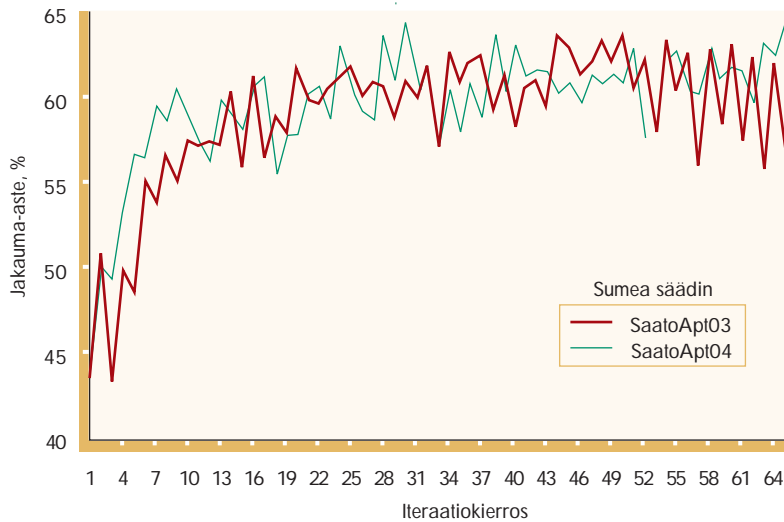
### Säätömenetelmän soveltamismahdollisuudet

Mihin kehitettyä sumean säädön metodiikkaa voi-

daan sitten soveltaa? Kuten aiemmin on jo todettu, hakkuukoneen katkonnan ohjauksessa esiintyy käytännön puunhankinnassa suuria alueittaisia ja konekohtaisia eroja. Joissakin hankintatiimeissä arvotaulukoita on säädetty jo pitkään yrityksen ja erehdyksen viitoittamaa tietä. Käytännön kokemuksen kautta on saatu jonkinasteinen ”tuntuma” siitä, millainen vaikutus läpimitta/pituus-soluarvojen muuttaman arvoyksikön muutoksella on toteutuneeseen jakaumaan. Varmasti kokeneet ammattilaiset pystyvät parantamaan omalla ”näppituntuma-säädöllä” hakkuukoneen katkonnan ohjausta verrattuna tilanteeseen, jossa matriisien toimivuuteen ei kiinnitetä mitään huomiota, mutta kovin analyttinen kyseinen lähestymistapa ei ole.

Kehitetty säätömekanismi tarjoaa mielekkään työkalun kalibroida hakkuukoneen arvomatriisit sellaisissa tilanteissa, joissa ei ole käytettävissä tilanteeseen sopivaa, hyvän lopputuloksen tuottavaa arvomatriisia. Näin esimerkiksi käyttäjät, joilla ei ole pitkäaikaista kokemusta matriisien säätämisestä, voivat hyvin vaivattomasti ja nopeasti säätää koneille puutavaralajikohtaiset perusmatriisit. Samoin sahan antaman tavoitteen muuttuessa voidaan nopeasti reagoida uuteen kysyntätilanteeseen. Tänä päivänä hakkuukoneissa on useimmiten käytössä ainoastaan tietty perusmatriisi, jota käytetään ympäri vuoden. Kun sahaus on koko ajan muuttumassa entistä asiakaslähtoisemmäksi, vaaditaan myös puunhankinnalta sopeutumista. Vuositasolla samanlaisena pysyviä apteerausmatriiseja ei voida tässä suhteessa pitää kovinkaan asiakaslähtöisenä toimintana. Kehitetty säätömekanismi antaa myös hyvät valmiudet analysoida, miten matriisit pitäisi perusmuodossaan säätää, kun samalla puulajilla on useita toimituskohteita (esim. hiomotukki, vaneritukki, sahatukki). Edelleen säätömekanismi mahdollistaa nk. tyyppileimikoiden määrittelyn. Tyyppileimikolla tarkoitetaan sitä, että leimikot jaotellaan tiettyjen keskimääräisten tunnusten perusteella tiettyihin luokkiin, joille kullekin laaditaan annettuun tavoitteeseen nähden optimaaliset arvo- ja jakaumamatriisit.

Kaiken säätämisen perustana on oletus, että runkojoukko, jota hakkuun simuloinnissa käytetään, vastaa ominaisuuksiltaan sitä todellista runkojoukkoa, jossa korjuu suoritetaan. Runkojoukon muodostamiseen on olemassa periaatteessa kaksi eri vaihtoehtoa. Leimikossa voidaan ensinnäkin suorit-



**Kuva 4.** Kuusitukin tavoitejakauman toteutumisasteen kehittyminen arvomatriisin säätökierrosten funktiona kahdella erilaisella sumealla säätimellä eräässä kuusileimikossa. Leimikon runkojoukko estimoitu ennakkomittauksen perusteella ja hakattu arvoapteerauksella. Arvomatriisin arvojen maksimimuutos säädössä  $\pm 20\%$ .

taa ennen korjuuta ennakkomittaus esim. Uusitalon (1997) ehdottamalla tavalla ja luoda ennakkomittauksen perusteella kuvaus runkojoukosta (nk. stm-tiedosto). Toisena vaihtoehtona on pyrkiä löytämään aikaisemmin hakatuista leimikoista nk. vastinleimikoita, jotka ominaisuuksiltaan vastaavat korjattavaa kohdetta. Analyttisiä menetelmiä ollaan tähänkin parhaillaan kehittelemässä (Tommola ym. 1999).

## Kirjallisuutta

- Fuzzy logic toolbox user's guide. 1998. 3. painos. The MathWorks Inc., USA.
- Isomursu, P., Niskanen, V.A., Carlsson, C. & Eklund, P. 1993. Sumean logiikan mahdollisuudet. Tekes, Helsinki. 100 s.
- Kosko, B. 1993. Sumea logiikka. Art House, Helsinki. 363 s.
- Niemi, A. 1996. Johdatus sumeisiin joukkoihin ja sumeaan logiikkaan. Opetushallitus, Helsinki. 202 s.
- Puolakka, H. 1997. Sumea logiikka käytännön sovelluksissa. Opetushallitus, Helsinki. 285 s.
- Tommola, M., Tynkkynen, M., Lemmetty, J., Harstela, P. & Sikanen, L. 1999. Estimating the characteristics of a marked stand using k-nearest-neighbour regression. *Journal of Forest Engineering* 10(2): 75–81.
- Uusitalo, J., 1997. Pre-harvest measurement of pine stands for sawing production planning. *Acta Forestalia Fennica* 259. 56 s.
- & Kivinen, V-P. 1997. EMO: A tool for predicting forest composition based on an efficient forest sampling method. In Proc. 1997 ACSM/ASPRS/RT Annual Convention, Seattle, April 7–10, 1997. s. 216–223.

■ MMM Veli-Pekka Kivinen (veli.kivinen@helsinki.fi) toimii tutkijana Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksella ja MMT Jori Uusitalo (jori.uusitalo@joensuu.fi) yliassistenttina Joensuun yliopiston metsätieteellisessä tiedekunnassa.