

Puuston kehityksen ennustaminen – MELA ja vaihtoehtoja

Tutkimusseminaari Vantaalla 1996

Jari Hynynen ja Risto Ojansuu (toim.)



Puuston kehityksen ennustaminen – MELA ja vaihtoehtoja

Tutkimusseminaari Vantaalla 1996

Jari Hynynen ja Risto Ojansuu (toim.)

Hynynen, Jari & Ojansuu, Risto (toim.) 1996. Puuston kehityksen ennustaminen – MELA ja vaihtoehtoja. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 612. 116 s. ISBN 951-40-1530-4. ISSN 0358-4283.

Avainsanat: kasvumallit, kasvupaikka, metsikön kehitysdynamiikka, optimointi, simulointi.

Kirjoittajien yhteystiedot:

Jari Hynynen, Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus, PL 18, 01301 Vantaa. Email: jari.hynynen@metla.fi.

Hannu Hökkä, Metsäntutkimuslaitos, Rovaniemen tutkimusasema, PL 16, 96301 Rovaniemi. Email: hannu.hokka@metla.fi.

Tapio Linkosalo, Metsäntutkimuslaitos, Helsingin tutkimuskeskus, Unioninkatu 40A, 00170 Helsinki. Email: tapio.linkosalo@metla.fi.

Risto Ojansuu, Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus, PL 18, 01301 Vantaa. Email: risto.ojansuu@metla.fi.

Jari Perttunen, Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus, PL 18, 01301 Vantaa. Email: jari.perttunen@metla.fi.

Risto Sievänen, Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus, PL 18, 01301 Vantaa. Email: risto.sievanen@metla.fi.

Jouni Siipilehto, Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus, PL 18, 01301 Vantaa. Email: jouni.siipilehto@metla.fi.

Markku Siitonen, Metsäntutkimuslaitos, Helsingin tutkimuskeskus, Unioninkatu 40A, 00170 Helsinki. Email: markku.siitonen@metla.fi.

Lauri Valsta, Metsäntutkimuslaitos, Helsingin tutkimuskeskus, Unioninkatu 40A, 00170 Helsinki. Email: lauri.valsta@metla.fi.

Tilaukset: Metsäntutkimuslaitos, Unioninkatu 40A, 00170 Helsinki, puh. (90) 857 051, fax (90) 8570 5717.

Hinta: 100,-



411 011

Kierrätykseen sopiva tuote
Alhaiset päästöt valmistuksessa

Hakapaino Oy, Helsinki 1996

Kannen kuva: Jouni Siipilehto
Taitto: Marja-Liisa Herno

Alkusanat

Puiden ja metsiköiden luotettavat kehitysennusteet ovat olennainen osa suuralueiden hakkuulaskelmia. Laskelmien yleistäminen koskemaan alueen kaikkia metsiä edellyttää, että kasvupaikkaa sekä puiden syntymää, kasvua ja kuolemaa kuvaavat mallit ovat keskenään yhteensopivia. Mallien on myös katettava kasvuolosuhteiltaan ja käsittelyhistorialtaan toisistaan huomattavasti poikkeavien metsiköiden koko kirjo.

Hakkuulaskelmiin sopeutettu metsätalouden operatiivinen suunnittelu tapahtuu metsikkökuvion tasolla. Lukuisten metsänhoidon vaihtoehtojen puuntuotannollisten ja taloudellisten vaikutusten vertailu kaipaa tuekseen helppokäyttöistä ohjelmistoa, jolla laskettavien tulosten on oltava huomattavasti yksityiskohtaisempia ja pienpiirteisempiä kuin alueellisissa hakkuulaskelmissa.

Yksittäisen puun kasvu ja arkkitehtoninen rakenne riippuu puun yleisten kasvuedellytysten lisäksi puu asemasta metsikössä. Puun eri komponenttien kehityksen tarkka ennustaminen on erityisen tärkeää, mikäli arvio lähivuosikymmeninä tapahtuvasta nopeasta ympäristömuutoksesta osoittautuu paikkansapitäväksi. Vaikka yksityiskohtaiset mallit eivät vaatimansa tietokonekapasiteettinsa vuoksi vielä sovellu käytännön hakkuulaskelmiin, tarvitaan niistä saatavaa tietoa pyrittäessä kehittämään biologisesti entistä perustellumpia kasvumalleja myös käytäntöön.

Tässä seminaarijulkaisussa esitetään alueellisiin hakkuulaskelmiin käytettävän MELA-ohjelmiston uusi mallisukupolvi, päätöksentekijän työkaluna käytettävä metsikkösimulaattori SMA sekä puun rakenteen yksityiskohtaiseen kuvaamiseen käytettävä LIGNUM.

Vantaalla 18.10.1996

Kari Mielikäinen

Sisällys

Alkusanat.....	3
<i>Markku Siitonen:</i>	
MELA ja metsien kehityksen ennustaminen	7
<i>Jari Hynynen:</i>	
Puuston kehityksen ennustaminen MELA-järjestelmässä.....	21
<i>Risto Ojansuu:</i>	
Kangasmaiden kasvupaikan kuvaus MELA-järjestelmässä...	39
<i>Hannu Hökkä:</i>	
Suometsien uudet kasvu- ja pituusmallit MELA-järjestelmässä	57
<i>Jari Hynynen ja Jouni Siipilehto:</i>	
MELA-mallit kasvatusmetsien dynamiikan kuvaajana.....	69
<i>Lauri Valsta ja Tapio Linkosalo:</i>	
Stand Management Assistant (SMA): Työväline metsikön käsittelyohjeiden määrittämiseen.....	85
<i>Risto Sievänen ja Jari Perttunen:</i>	
Lignum	107

Markku Siitonen

MELA ja metsien kehityksen ennustaminen

Johdanto

MELA kehitettiin 1970- ja 1980-luvuilla tutkijoiden työkaluksi suuralueiden ja koko maan pitkän ajan hakkuumahdollisuuksien arviointiin valtakunnan metsien inventoinnin aineistojen perusteella. Kokemuksia MELAn tuotantokäytöstä on 1980-luvun alkupuolelta lähtien. Pelkkä hakkuusuunnitteen laskenta on laajentunut vähitellen metsien käyttömahdollisuuksien ja metsätalouden analysoinniksi. 1990-luvulla MELAa on täydennetty myös asiakas tuotteeksi, ja MELAa käytetään nyt useissa metsätalouden organisaatioissa Suomessa sekä alue- että metsikkötason laskelmiin. MELA-tulokset vaikuttavat osaltaan moniin metsätaloudessa ja metsäsektorilla tehtäviin päätöksiin.

Parin viime vuoden aikana MELAn kehittäjät ovat järjestäytyneet Metsäntutkimuslaitoksessa MELA-ryhmäksi, jonka toimintaa uudistetaan paraikaa kehityspainotteisesta asiakassuuntautuneeksi. Metsäntutkimuslaitos on sitoutunut MELAn ylläpitoon ja julkistaa MELAn asiakasversiot ja tukipalvelut lähiaikoina. MELA-ryhmä puolestaan pyrkii kiinteään vuorovaikutukseen ja yhteistoimintaan sellaisten tutkijoiden kanssa, jotka tuottavat suunnittelutehtävissä tarvittavaa ja MELA-järjestelmää täydentävää tietoutta. Metsien kehityksen mallittajilla on keskeinen asema MELA-ryhmän yhteistyökumppanina.

Millaisia haasteita MELAn muuttuminen tutkijakäytöstä käyttäjien työkaluksi ja laaja käyttöönotto metsätaloudessa merkitsee metsien kehityksen mallitukseksi? Mitä MELAn käyttäjät tarvitsevat ja odottavat?

Mikä MELA on?

Metsätalouden suunnittelu

Taloudenharjoittajan keskeisimpiä ongelmia on selvittää, millaiset tavoitteet taloudelle voidaan asettaa, millä keinoilla valitut tavoitteet toteutuvat ja mitä erilaisista toimintastrategioista seuraa. Metsätaloudessa päätetään esimerkiksi hakkuusuunnitteesta ja metsien käsittelystä, kuten hakkuiden ja muiden toimenpiteiden määrästä, sijoittelusta ja ajoituksesta. Metsätalouden päätöksissä joudutaan ottamaan huomioon lähiajan MELAn ja mallien roolit ja tarpeet sekä samalla varautumaan tuleviin tarpeisiin, koska metsän kiertoaika on puuta tuottaessa vuosisadan luokkaa ja joidenkin muiden metsän tuotteiden osalta jopa monin verroin pitempi.

Suunnittelu tarkoittaa tulevien tuotanto-, toiminta- ja päätösmahdollisuuksien sekä niihin vaikuttavien tekijöiden ja vuorovaikutusten analysointia päätöksenteon tueksi. Suunnittelutehtäviä metsätaloudessa ovat mm. metsien käyttömahdollisuuksien selvittäminen, tuotanto-ohjelmien laadinta, toimenpiteiden kannattavuuden arviointi ja ristiriitaisten tavoitteiden yhteensovittaminen. Puuntuotannon rinnalla korostetaan nykyisin metsätaloudessa mm. ekologista, taloudellista ja sosiaalista kestävyyttä.

MELA

MELA on metsätalouden pitkän ajan suunnittelujärjestelmä, metsälaskelma, jossa tarkastellaan yhtaikaisesti metsävaroja, metsien hoitoa, metsätaloustuotantoa laajassa merkityksessä, taloutta ja metsätalouden tavoitteita sekä niiden riippuvuutta metsien kehityksestä ja siihen vaikuttavista tekijöistä laskelmakauden aikana. Metsiköiden käsittelyn optimoinnin ja metsäalueen tuotannon suunnittelun muodostama monitasoinen ja -tavoitteinen optimointitehtävä muotoillaan ja ratkaistaan erikseen jokaisessa päätöstilanteessa. Laskelmilla ja niistä muodostettavilla analyyseilla haetaan vastauksia sellaisiin kysymyksiin kuin millaista tuotantoa metsistä voidaan tavoitella, kuinka

metsiä tulisi hoitaa metsätaloudelle asetettavien tavoitteiden saavuttamiseksi, mitä ehdotetusta metsien käsittelystä ennakoidaan seuraavan tai miten metsien käyttöön kohdistuvat tavoitteet sovitetaan yhteen tehokkaalla tavalla.

MELA on itse asiassa metsiä, metsätaloutta ja niitä koskevan päätöksenteon perusteita kuvaava malli, joka kattaa nykyisellään tietokokonaisuuden yksin puin kuvaamista metsiköistä koko metsätalouksikköä koskeviin päätöksiin. Metsätalouksikkö voi olla esimerkiksi yksittäinen metsikkö, metsälö tai suuren alueen metsät. Se voi koostua useista osa-alueista ja huomioon otettavia ehtoja voidaan asettaa monilla eri tasoilla.

MELAssa ratkaistava perustehtävä on hakea taloudenharjoittajan tavoitteet toteuttava tuotanto-ohjelma metsätalouksikolle ja tuotanto-ohjelman toteuttava käsittely metsiköille. Menetelmä on yksinkertainen: selvitetään mahdolliset vaihtoehdot ja valitaan niistä kokonaisuuden kannalta paras. Metsiköiden käsittely-kehitysvaihtoehdot tuotetaan numeerisella simuloinnilla, jossa jäljitellään yksityiskohtaisesti monimutkaisiakin ja toisinaan epäjatkuvia metsän kehityksen ilmiöitä. Linearisella ohjelmoinnilla haetaan simuloituista vaihtoehdoista aluekohtaiset ja ositteitettävät tavoitteet tehokkaasti toteuttava yhdistelmä eli em. metsäalueen tuotanto-ohjelma ja metsiköiden käsittely. Valintaperusteet kuvataan optimointitehtävässä, jonka käyttäjä muotoilee simuloituista käsittely-kehitysvaihtoehdoista laskettujen päätösmuuttujien avulla.

MELAssa sovellettava menetelmä perustuu mm. olettamuksiin, että metsiköiden – ja metsiköiden yhdistelmänä metsävarojen – kehitystä voidaan ennakoida ja että rajallinen määrä metsiköiden käsittely-kehitysvaihtoehtoja kuvaa metsien tuotantomahdollisuuksia riittävän luotettavasti tarkasteltavan päätöksen suhteen.

Käsittely-kehitysvaihtoehtojen tuottamiseen tarvitaan metsävaratiedot ja mm. metsien kehitystä, metsien hoitoa ja käsittelyä, metsätaloustuotantoa ja tuotannon taloutta kuvaavia malleja. Tiedoissa ja malleissa on aina yksinkertaisuuksia ja virheitä. Metsien pitkän kiertoajan takia olettamukset tulevista tarpeista ja mahdollisuuksista ovat epävarmoja. Ammattitaitoinen mallien käyttäjä kykenee arvioimaan MELAn soveltuvuutta tarkasteltavan ongelman

ratkaisuun, tuntee käytössä olevat mallit ja niiden käytöstä aiheutuvat virheet, osaa suunnitella ongelman ratkaisemisen edellyttämät analyysit ja optimointitehtävät, hallitsee epävarmuudet sekä osaa tulkita laskettuja tuloksia. Käytettävissä olevat tiedot ja mallit sekä käyttäjän taidot ratkaisevat, kuinka päteviä tuloksia laskelmista saadaan ja kuinka käyttökelpoinen työkalu MELA käyttäjilleen lopulta on. – Toki etukäteen suunniteltujen optimointitehtävien kaavamaisesta ajamisesta on jo tullut sellainen jokamiehen oikeus, jollaiseksi hakkuusuunnitteen laskennan odotettiin 1970-luvulla MELAn ansiosta kehittyvän.

Metsän kuvaus

Metsätalouslyksikkö kuvataan MELAssa laskentayksikköinä, jotka ovat metsiköitä tai nykytilaltaan ja tulevalta kehitykseltään homogeenisia metsikköryhmiä. Laskentayksiköt koostuvat kukin yhdestä tai useammasta koealasta. Koealat kuvaavat laskentayksikön sisäisen kasvupaikan ja puuston vaihtelun. Koealan tunnuksia ovat mm. sijainti-, omistaja-, kasvupaikka-, puusto- ja tehtyjen toimenpiteiden tiedot. Koealalla voi olla useita, yksi tai ei yhtään kuvauspuuta. Kuvauspuiden tunnuksia ovat mm. puun edustama runkoluku, puulaji, ikä, läpimitta ja pituus. Näistä simuloitavista tunnuksista johdetaan staattisilla malleilla runkotilavuus ja puutavaralajit ja edelleen yksikköhintojen avulla rungon arvo. Koealojen puustotiedot lasketaan kuvauspuiden summa- ja keskitunnuksina, joista edelleen koostetaan tiedot koko laskentayksikölle

Laskelmien aineistona voivat olla metsikön kaikki puut ja koealat tai, kuten tavallista, tietojenkäsittelykapasiteettiin sopeutettu otos koealoja ja puita.

Metsien kehityksen simulointi

Metsän kehityksen simulointi koostuu tiloista ja tapahtumista tilojen välillä. Tapahtumat ovat koealoihin ja puihin kohdistuvia luonnonprosesseja ja toimenpiteitä. Luonnonprosesseista on mukana simulaattorin nykyversiossa uusien puiden syntyminen, puiden kasvu ja luonnonpoistuma.

Toimenpiteitä ovat erilaiset hakkuut, metsänviljely, taimikonhoito, puiden karsinta, maanpinnan käsittely, ojitus, lannoitus ja maankäyttöpäätökset. Toimenpiteistä päätetään laskentayksiköittäin, mutta ne, samoin kuin luonnonprosessit, simuloidaan koaloittain. Luonnonprosesseista ja toimenpiteistä on kustakin omat mallinsa, kuten esimerkiksi puiden kuorettoman pohjapinta-alan ja pituuden kasvua sekä uusien puiden syntymistä ennustavat ja hakkuista sekä poistettavien puiden valintaa kuvaavat mallit.

Simuloinnin tuloksena syntyy kullekin laskentayksikölle yksi tai useampia vaihtoehtoisia käsittely-kehityssarjoja. Vaihtoehtoja syntyy aina, kun useat tapahtumat ovat mahdollisia samassa tilassa. Käsittely-kehitysvaihtoehdoista lasketaan koalojen ja laskentayksikön tilaa ja kehitystä kuvaavia summa- ja keskitunnuksia ohjaamaan simulointia sekä tulostettavaksi myöhempää käyttöä varten. Tuotantohjelman valintaa ja raportointia varten laskettavia päätös-
muuttujia ovat mm. puuston määrä, kasvu, poistuma ja hakkuukertymä puulajeittain ja puutavaralajeittain, puuston arvo, toimenpiteiden pinta-alat, tulot, kustannukset, nettotulot, metsän tuottoarvo ja lukuisien ositteiden pinta-alat.

MELAn ja mallien roolit

MELAn päätehtävä on tuottaa suunnittelutuloksia, kuten esimerkiksi hakkuumahdollisuusarvioita ja toimenpide-ehdotuksia. Yksittäistä hakkuulaskelmaa monipuolisemmat analyysit auttavat ymmärtämään päätösmahdollisuuksia, päätösten seurauksia ja tarkasteltavaan päätökseen vaikuttavia tekijöitä. Toisinaan ratkaisun ympäristön tai päätökseen vaikuttavien tekijöiden keskinäisten riippuvuuksien kartoittaminen saattaa olla jopa yhden hakkuusuunnitelun esittämistä tärkeämpää.

MELA on tietojärjestelmäkehikko, johon kootaan metsätaloudellisiin päätöksiin vaikuttavia tietoja ja tietoutta yhteensopivassa ja tietokoneella käsiteltävässä muodossa suunnittelutehtävissä hyödynnettäväksi. MELAan sisältyvät tutkimustulokset vaikuttavat osaltaan laskelmatuloksiin ja

välittyvät siten suoraan päätöksenteon tueksi MELAn käyttäjille käytännön metsätaloudessa.

Olemassa olevaan tietojärjestelmään voidaan lisätä usein suhteellisen vaivattomasti uusia ominaisuuksia, kuten uusia menetelmiä ja metsän kehitystä kuvaavia malleja sitä mukaa kuin tutkimus niitä tuottaa. Tietojärjestelmässä ja malleissa havaittavat puutteet puolestaan suuntaavat uutta tutkimusta.

Metsätalouden ja metsätalousyksikön tarkastelu kokonaisuutena havainnollistaa tunnettuja riippuvuussuhteita ja avaa uusia näkökulmia. Esimerkiksi metsiköiden käsittelykehitysvaihtoehdot sellaisenaan osoittavat hoidettujen metsien ehdollisesti avoimen tulevaisuuden seurauksineen. Metsäaluekohtaiset optimit eivät useinkaan ole niin huippukkaita kuin useampia vaihtoehtoja tarkastelematta saatetaan kuvitella. Tällaisissa tilanteissa on toimenpiteiden valinnassa ja ajoituksessa pelivaraa ilman suuria menetyksiä – toisaalta eräät mallien virheet saattavat johtaa samanlaisiin päätelmiin. Jos voi hiukankin tinkiä suurimman millä tahansa keinoin saavutettavissa olevan tuotannon tavoittelusta, metsänhoitoa ja toimenpiteiden valintaa voidaan analysoida taloudellisina kysymyksinä – eli optimoida maksimoinnin asemasta. Vaihtoehtoihin perustuva optimointi puolestaan mahdollistaa metsätaloudelle asetettujen ristiriitaistenkin tavoitteiden yhtaikaisen huomioon ottamisen ja tehokkaiden ratkaisujen hakemisen.

Tulevaisuutta koskevilla laskelmilla on kuitenkin rajansa, parhaimmillaankin ne ovat vain ehdollisia ennusteita. Tietojen virheet, tulevaisuuden epävarmuudet ja myöhemmän kehityksen ehdollisuus aikaisemman suhteen kyseenalaistavat varmojen päätelmien tekemisen metsien pitkän ajan tuotanto- ja käyttömahdollisuuksista – ja ne samalla haastavat selvittämään ja konkretisoimaan kestävyiden käsitettä.

Vaikka metsävarojen kehitystä ja tulevia käyttötarpeita ei voitaisikaan täsmällisesti ennustaa, metsävarojen kasvun ja poistuman seurantaan sekä tutkimuksen avulla ennakoi tuun metsien kehitykseen perustuva suunnittelu voi tuottaa perusteet käyttää metsävaroja varautuen tulevaisuuden muuttuviin ja epävarmoihin olosuhteisiin. Tällöin metsätalouden kestävyys tulkittaisiin tuotannon ja toi-

meentulon jatkuvuudesta huolehtimiseksi mahdollisen rajoissa.

Metsien käyttömahdollisuuksien arviot, niistä johdetut metsien käyttöpäätökset ja edelleen metsätalouden kestävyuden toteutuminen riippuvat metsävaratietojen luotettavuuden lisäksi siitä, kuinka pätevästi metsien tuleva kehitys osataan ennakoida. Tähän ennakointiin käytetään MELAssa metsien kehitystä kuvaavia malleja. Mallittajien haasteena on kyetä löytämään ja kuvaamaan metsien tulevan kehityksen lainalaisuudet menneisyyden puutteellisten tietojen perusteella. Mallitustutkimuksen kehitys määrää osaltaan MELAn sovellettavuuden rajat tulevaisuudessa.

Mallituksen ja kasvututkimuksen haasteita

Mallien laadinta ja ylläpito

Metsän kehitystä kuvaavien mallien laadinta on mallitustutkimuksen tärkein tehtävä mallien käyttäjien kannalta. Metsien kehitystä koskevan tietouden ylläpidon tulisi olla vastaavalla tavalla jatkuvaa toimintaa kuin metsävaratietojen ylläpito on valtakunnan metsien inventoinnissa.

MELAn kehityksen alkuvaiheissa 1970-luvulla metsä kuvattiin summatunnuksin ja metsiköiden kehityksen ennustamiseen käytettiin metsikkötason kasvumalleja. Metsikkömallien yksinkertaisuus osoittautui kuitenkin näennäiseksi niiden keskimääräisyyden aiheuttaman "tunnottomuuden" takia, kun kokonaistilavuuden lisäksi alettiin tarkastella metsien rakenteen kehitystä, puuston sekä hakkuukertymän arvoa ja käsittelyn yksityiskohtien vaikutuksia puustoon. Näin MELAssa päädyttiin kuvaamaan puuston kehitys yksittäisten puiden ja niiden kehitystä kuvaavien mallien avulla. Risto Ojansuun pioneerityönä 1980-luvun alkupuolella tekemiä malleja on alettu korvata Jari Hynysen ryhmän laatimilla uusilla malleilla, joiden odotetaan olevan käytössä vuoden 1997 alkupuolella. Myös uudet mallit ovat puutasolla.

MELAssa ei ole mukana kaikkia käyttäjien suunnittelutehtäviinsä tarvitsemia yksityiskohtia, ja joidenkin käytössä olevien mallien tulokset eivät ole riittävän luotettavia. Vaikka suuralueiden strategisissa laskelmissa eräitä puutteita saatetaan sietää, kuviotasolla pienetkin tietojen epätasällisyydet ovat kiusallisia – käyttäjät kiinnittävät huomionsa lähes poikkeuksetta näihin ”mustiin lampaisiin”.

Runkopuun kasvua ja uuden puuston syntymistä kuvaavien mallien valmistuttua vuorossa on luonnonpoistumaa kuvaavien mallien uudistaminen ja yksityiskohtaistaminen. Luonnonpoistuma vaikuttaa sekä käyttöpuusaantoon että lahoppuun muodostumiseen. Toivomuslistalta löytyvät myös uusien metsien käsittelytapojen seuraukset, puuston teknisen laadun kehitys, puutavaralajien yksityiskohtaisempi kuvaus, erilaisten tuhojen esiintyminen, kuolleiden puuston lahoaminen, metsään sitoutuneen hiilen määrä ja ilmakehän ennakoitujen muutosten vaikutukset.

Olemassaolon lisäksi vaatimuksia MELAssa käytettäville malleille ovat soveltuvuus käsittely-kehitysvaihtoehtojen simulointiin pitkälle ajalle, pitkän ajan kehityksen loogisuus, tulosten harhattomuus, laskelmissa esiintyvän vaihtelualan kattaminen (esimerkiksi puulajit, ilmiöt, sijainti, aika, käsittelyt) ja malliperheen sisäinen yhteensopivuus. Useissa sovelluksissa tarvitaan vuotuisia simulointiaskelia. Laskennan nopeutta arvostetaan tietokoneiden nopeutumisesta huolimatta.

Kasvun vaihtelu

MELAssa tavoitellaan strategisiin laskelmiin kasvuenustetta, joka vastaisi puiden kasvun vuotuisen vaihtelun keskimääräistä tasoa viimeisten vuosikymmenien aikana (kasvun taso). Tämä taso haetaan ja säädetään kasvumalleihin valtakunnan metsien inventoinnin aineiston, kasvunarvion, kasvunarvion edustaman ajankohdan ja kasvunarviota vastaavien kasvuindeksien avulla. – Metsävaratietojen ajantasaistuksessa tulisi puolestaan voida käyttää todellisen vuotuisen kasvun tason arvioita.

Metsävarojen kehityksen tilastointia ja puutaselaskelmia varten olisi hyvä saada metsien kasvun vuotuiset kasvun-

arviot ja puiden kasvun vuotuista vaihtelua osoittavat kasvuindeksit puulajeittain ja alueittain. Tähän asti vuotuisten kasvunarvioiden laadintaa on kuitenkin pidetty liian kalliina niillä saavutettavaan hyötyyn nähden, mutta julkista kiinnostusta metsien vuotuisiin kasvutuloksiin tämä ei ole vähentänyt.

Metsien kasvututkimuksen tavoitteena tulisi olla kasvun vaihtelun kuvailun lisäksi myös vaihtelun syiden selvittäminen ja edelleen poikkeamien havaitseminen luontaisesta vaihtelusta. Puiden kasvunvaihtelun tunteminen vähintään vuosisadan tai parin ajalta selvittäisi, millaisessa vaihtelun vaiheessa mitatusta aineistosta nyt käytettävissä olevat kasvumallit ja niihin perustuvat kasvuennusteet ovat peräisin. Vieläkin pitemmät, jopa tuhansien vuosien indeksisarjat puolestaan auttaisivat suhteuttamaan nyt havaittavan vaihtelun pitkän ajan kehitykseen. Kenties pitkiä aikasarjoja voitaisiin käyttää myös em. luontaisen kasvunvaihtelun ja ihmisen mahdollisesti aiheuttamien muutosten erottelemiseen. – Metsätalouden suunnittelutulosten kannalta puiden kasvun pitkän ajan vaihtelun tunteminen ei ole pelkästään teoreettinen kysymys.

Metsien vuotuisen kasvun vaihtelusta päätelmiä tehtäessä on syytä muistaa, että Suomessa metsistä ei hakata puiden kuluneen vuoden kasvua, vaan karkeasti ottaen vuotuisen kasvun suuruusluokkaa oleva määrä noin vuosisadan kuluessa kasvanutta puuta. Metsien puuvaranto on reservi, jonka ansiosta puunkäytön sopeuttamiseen on runsaasti aikaa, mikäli puiden keskimääräisessä kasvussa havaitaan käänne tai hakkuumahdollisuusarvioiden perusteena käytetyt kasvunarviot osoittautuvat muulla tavoin virheellisiksi. – Metsiemme nykyinen puuvaranto vastaa määrältään kolmen vuosikymmenen hakkuita viimeaikaisilla hakkuumäärillä mitaten ja esimerkiksi valtakunnan metsien 7. ja 8. inventoinnin välillä puuvaranto lisääntyi hakkuista huolimatta yli 200 miljoonaa kuutiometriä.

Kasvumallien sovitus laskelma-aineistoon

Kasvumallien taso on säädettävä MELAA käytettäessä myös aineistokohtaisesti, koska esimerkiksi kasvupaikkojen luokittelu laskelma-aineistossa voi poiketa systemaatt-

tisesti mallien laadinta- tai kalibrointiaineistossa noudatetusta. Tästä syystä suunnittelulaskelmissa sovellettava kasvun taso on luonteeltaan käyttäjän päättämä laskenta-parametri. Päätöksen tukena käytetään luonnollisesti kaikkia saatavissa olevia tietoja, mutta säätö jää harkinnanvaraiseksi varsinkin aineistoissa, joihin ei liity kasvun ja sen vaihtelun mittauksia.

Myös valtakunnan metsien inventoinnin aineistoihin perustuvat suunnittelulaskelmat tulisi tehdä vasta koko maan aineistojen valmistuttua, jos kasvumallien aineistokohtainen säätötarve halutaan laskelmia varten selvittää.

Mallien virheet

Mallien ja koko suunnittelulaskelmien virheisiin on Suomessa kiinnitetty tähän mennessä suhteellisen vähän huomiota. Malli on todellisuuden yksinkertaistus, jossa aina keskimääräistetään todellista vaihtelua – ja siinä saatetaan myös vääristellä todellisuutta. Tulevaisuutta koskevat päätelmät perustuvat lisäksi menneisyyden havaintoihin.

Virheitä on tai saattaa olla laskelma-aineiston lisäksi mallitusaineistossa, mallien laadinnassa, mallien soveltamisessa jne. Virheillä voi olla arvaamattomia yhteisvaikutuksia monivaiheisissa laskelmissa. Esimerkiksi eräät metsän kehityksen simuloinnin virheet näyttävät kasautuvan optimoinnissa.

Mallien ja niiden käytön virhelähteet ovat oma tutkimusaiheensa, johon soisi löytyvän vakavaa harrastusta, kun malleja nyt otetaan käyttöön laajassa mitassa metsätaloudessa. Yksittäisten mallien virheiden selvittämisen tavoitteena on virheiden huomioon ottaminen joko suoraan laskelmissa tai epävarmuutena tulosten tulkinnassa. Tähänastisesta välinpitämättömyydestä huolimatta mallien virheiden ja suunnittelutulosten oikeellisuuden selvittämisen tulisi kuulua rutiininomaisesti mallitus- ja laskelmahankkeisiin.

Metsien mallituksen kehittäminen ja kansainvälistäminen

MELAssa käytettävät metsän kehitystä kuvaavat mallit on totuttu laatimaan kotimaisista aineistoista ajoittain toistettuna kertatyönä. Tällaisia malleja ei ole ajateltu käytettäväksi Suomen ulkopuolella. MELAn soveltamisessa muualla on nyt mahdollisuutena joko käyttää Suomen oloihin tarkoitettuja malleja tai laatia kokonaan uudet paikalliset mallit. Molempiin menettelyihin liittyy ongelmia.

Nyt haluaisin herättää kysymyksen, olisiko mahdollista laatia puuston kehityksen tunnettujen lainalaisuuksien perusteella parametrein erilaisiin olosuhteisiin säädettävät "yleiset" puiden kasvumallit. Parametrit selvitettäisiin tai arvioitaisiin käytettävissä olevien paikallisten tietojen perusteella. Tällaisia malleja tarvittaisiin, jos MELAa ja sen käsittely-kehitysvaihtoehtojen simulointia haluttaisiin soveltaa esimerkiksi strategiaan suunnittelulaskelmiin eurooppalaisissa laskelmissa.

Mallituksen kansainvälistyminen saattaisi houkutella ottamaan mallien lähtökohdaksi eri puolajien vaihtelualueet maittaisten mallien asemasta ja metsien käsittelyhistorian erot. Tuloksena saataisiin laajemmalla vaihtelualueella toimivia malleja ja aikanaan yhteensopivampia tietoja metsien käyttö- ja kehittymismahdollisuuksista eri maissa. Käytännöllisenä näkökohtana voisi mainita kansainvälisen rahoitus-kehityskierteen tavoittamisen kotimaisen työn tueksi – hyvälle työlle löytyy rahoitusta ja kehitystä tapahtuu siellä, missä on vaativia tavoitteita ja rahoitus kunnossa.

Päätelmät

Metsänsä tuntevat asiakkaat ja heidän omaa toimeentuloaan koskevat päätöksensä ovat metsätalouden ja metsän kehityksen mallittajien siunaus ja samalla kertaa kirous. Mallien käyttäjille on arvoa vain päätöksenteon hetkellä käyttökelpoisessa muodossa saatavalla luotettavalla tiedolla.

Käytännön päätöksenteon tueksi kelpaavien mallien ja koko maan ja koko metsätaloustuotannon kattavan malli-

perheen laadinta ja ylläpito on kovaa työtä, jossa kaikki eivät pääse loistamaan jatkuvasti suurenmoisilla keksinöillä. Metsien kehityksen mallitukseen ei kuitenkaan ole edellytyksiä kellään muulla kuin tutkimusyhteisöllä. Käyttäjien tarpeita palvelevan tietouden – metsien kehitystä kuvaavan malliperheen – ylläpito ansaitsee merkityksensä mukaisen huomion ja arvon tutkijoiden työohjelmissa ja arvostuksissa samoin kuin mallien käyttäjien tuen. Luotettavat tiedot ovat sekä metsien käytön suunnittelun, kestävän metsätalouden harjoittamisen että koko tutkimusyhteisön olemassaolon ehto.

Risto Ojansuu evästi vuoden 1991 mallitusseminaariin lähtijöitä näin: "Innostus syntyy kannustavasta, seuraamaan pakottavasta esimerkistä ja tuottavuus yhteisen tavoitteensa sisäistäneessä ryhmässä." Toivon, että metsän kehityksen mallittajat saavat kasvaa innostuneeksi, tuotteliaaksi ja ammattitaitoiseksi katraaksi – ja mallittajien liittosuhde MELA-ryhmän kanssa tuottaa myös vastedes merkittäviä uusia malleja asiakkaittemme ja koko metsätalouden hyödyksi.

Kirjallisuus

- Hynynen, J. 1995. Modelling tree growth for managed stands. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 576. ISBN 951-40-1480-4.
- Ojansuu, R., Hynynen, J., Koivunen, J. & Luoma, P. 1991. Luonnonprosessit metsälaskelmassa (MELA) – Metsä 2000-versio. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 385:1–59. ISBN 951-40-1268-2, ISSN 0015-5543.
- Siitonen, M. 1993. Experiences in the use of forest management planning models. *Silva Fennica* 27(2):167–178. ISSN 0037-5330.
- 1994a. Some large-scale applications of the Finnish MELA System. Julkaisussa: Sessions, J. & Brodie, J.D. (eds.) *Proceedings of the 1994 Symposium on Systems Analysis in Forest Resources, Management Systems for a Global Economy with Global Resource Concerns*, Asilomar Conference Center, Pacific Grove, California, U.S.A., September 6–9. s. 327–342.
- 1994b. The MELA System as a forestry modeling framework. *Lesnictvi-Forestry* 41(4): 173–178. ISSN 0024-1105.
- & Nuutinen, T. 1996a. Timber Production Analyses in Finland and the MELA System. Julkaisussa: Päivinen, R., Roihuvuo, L. & Siitonen, M. (eds). *Large-scale Forest Scenario Models:*

Experiences and Requirements. EFI Proceedings 5. ISBN 952-9844-13-1.

— Hirvelä, H., Härkönen, K., Jämsä, J., Kilpeläinen, H., Salminen, O. & Teuri, M. 1996b. MELA handbook 1996 edition. Metsäntutkimuslaitos. Käsikirjoitus.

Tomppo, E. & Henttonen, H. 1996. Suomen metsävarat 1984–1994 ja niiden muutokset vuodesta 1951 lähtien. Metsätilastotiedote 354. Metsäntutkimuslaitos. 17 s.

Yhteensä 8 viitettä.

Jari Hynynen

Puuston kehityksen ennustaminen MELA- järjestelmässä

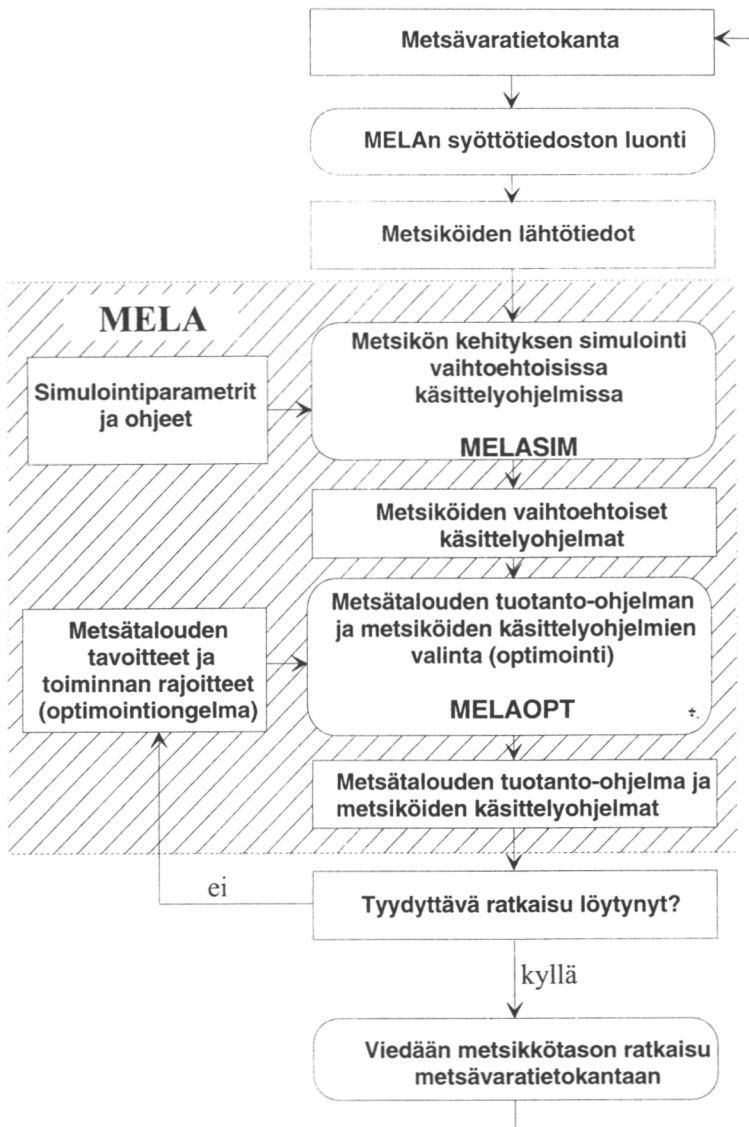
Johdanto

MELA-järjestelmä on Metsäntutkimuslaitoksessa kehitetty metsätaloutta kuvaava ja metsätalouden suunnittelutehtäviä ratkaiseva ohjelmisto, jonka avulla pyritään kokoamaan kaikki metsätalouden suunnittelun päätöksentekoon vaikuttavat tekijät koko metsätaloutta kuvaavaksi tietojärjestelmäksi (Siitonen 1994). MELA-järjestelmä kehitettiin alunperin suuralueen metsätalouden pitkän ajan suunnittelujärjestelmäksi. Suomen metsien käyttömahdollisuuksien selvittäminen on edelleenkin MELA-järjestelmän kehittämisen ja soveltamisen keskeisimpiä kohteita (Metsä 2000...1985, Siitonen 1990). MELA-järjestelmä on todettu kuitenkin käyttökelpoiseksi myös metsätalouden strategiseen ja operatiiviseen suunnitteluun yrityksissä ja metsälötasolla, minkä lisäksi MELA-järjestelmää on sovellettu myös tutkimuksessa ja opetuksessa (Siitonen 1994).

MELA-järjestelmä jakautuu kolmeen toiminnalliseen osaan 1) metsävaratietojen käsittely simulointia varten, 2) metsän tulevien käsittely- ja kehitysvaihtoehtojen tuottaminen (simulointi) yksittäisen puun kasvumalleihin perustuvalla metsikkösimulaattorilla ja 3) tuotanto-ohjelman valinta JLP optimointiohjelmistolla (Lappi 1992), jonka avulla voidaan ratkaista monipuolisia ja laajoja optimointitehtäviä (kuva 1).

MELA-järjestelmässä metsä kuvataan laskentayksikkönä, joka tulkitaan käsittelykuvioksi. Sovellustilanteesta riippuen laskentayksikkö voi koostua useasta koelasta tai yhdestä metsikkökuvioista. Metsätalouden suunnittelutehtävien ratkaisussa sovelletaan tavoitelähtöistä tarkasteluta-

pa. Metsävaratietojen ja metsissä tehtäviä toimenpiteitä koskevien tietojen lisäksi järjestelmän lähtötiedoiksi annetaan metsätaloudelle asetettavat tavoitteet sekä toiminnan rajoitteet. Metsätaloustuotanto-ohjelman ja metsiköiden käsittelyohjelmien valitsemiseksi MELA-järjestel-



Kuva 1. Kaavio MELA-järjestelmän käytöstä metsätalouden tuotanto-ohjelman ja metsiköiden käsittelyohjelmien valinnassa (Siitonen ym. 1996).

mässä simuloidaan jokaiselle metsikölle (laskentayksikölle) useita toteutettavissa olevia käsittelyvaihtoehtoja. Näistä vaihtoehdoista valitaan lineaarisella optimoinnilla samanlaisesti sekä koko metsätalouden tuotanto-ohjelma että yksittäisten metsiköiden käsittely- ja kasvatusohjelmat, jotka perustuvat päätöksentekijän tavoitteisiin (Siitonen 1994).

Vuonna 1996–1997 Metsäntutkimuslaitoksessa tehdään uusi koko maan kattava metsien käyttömahdollisuuksien selvitys. MELA-järjestelmää varten on kuluvan vuoden aikana laadittu uudet luonnonprosesseja kuvaavat mallit. Tässä raportissa kuvataan MELA-järjestelmän luonnonprosessien simuloinnin pääperiaatteet sekä esitellään MELA-järjestelmän uusitut puuston kehitystä kuvaavat mallit.

MELA-järjestelmän kasvumallien kriteerit

Kasvumalleille asetettavat vaatimukset vaihtelevat mallien sovellustilanteen mukaan. Käytännön metsäsuunnittelun piirissä kasvumalleja sovelletaan mm. 1) metsävaratietojen päivityksessä, 2) metsänhoidollisten käsittelyiden vaikutusten arvioinnissa, 3) metsätalouden suunnittelussa ja 4) puunkorjuun suunnittelussa (Burkhart 1993). MELA-järjestelmää sovelletaan metsätalouden suunnittelussa eri päätöksentekotasolla etsittäessä vastauksia erilaisiin suunnitteluongelmiin. MELA-järjestelmän laaja sovellusalue, joka kattaa lähes kaikki edellä luetellut sovelluskohteet, on pyritty ottamaan huomioon laadittaessa uusia puuston kehityksen ennustemalleja.

Metsätalouden suunnittelussa käytettävien kasvumallien tulisi kyetä antamaan mahdollisimman harhaton ennuste suunnittelun kohteena olevan alueen metsävarojen kehityksestä. Tuon tavoitteen toteuttamiseksi mallien laadinnassa on käytettävä mahdollisimman edustavia empiirisiä mittausaineistoja. Valtakunnan metsien inventointiaineistoon sisältyy luotettavin saatavilla olevan informaatio maamme metsävaroista. VMI-aineistoa käytetäänkin MELA-järjestelmässä sekä mallien laadinta-aineistona että metsävarojen

kehityssuunnitelmien lähtötietona. MELA-järjestelmän mallit on rakennettu yhteensopiviksi VMI:ssa kerätyn informaation kanssa. Malleissa puuston kehitystä selitetään sellaisten tunnusten avulla, joita metsistä kerätään inventointien yhteydessä. Kasvumallien laadinnan kannalta se merkitsee pitäytymistä suhteellisen yksinkertaisiin mallirakenteisiin ja pieneen valikoimaan selittäviä tunnuksia.

Metsätalouden suunnittelun ja metsäpolitiikan päätöksenteon tueksi tarvitaan pitkän ajan ennusteita metsävarojen kehityksestä. Pitkän aikavälin simuloinneissa käytettävien kasvumallien tulee olla rakenteeltaan hyvin suunniteltuja, jotta niiden toiminta olisi loogista kaikissa tilanteissa, myös silloin kun niitä sovelletaan olosuhteissa, joita mallien laadinta-aineistoissa ei esiinny. Mallien sisältämien muuttujien välisten riippuvuussuhteiden kuvauksen tulee perustua biologiseen ja ekologiseen tietämykseen.

Erilaisten metsänkäsittelyvaihtoehtojen vertailu on keskeinen osa metsätalouden suunnittelua. Kasvumallien tulee kyetä ennustamaan luotettavasti erilaisten metsänkäsittelytapojen vaikutukset puuston kehitykseen. Esimerkkinä voidaan tarkastella erilaisten harvennusohjelmien; harvennusten voimakkuuden ja niiden ajoittumisen vaikutusta metsän kasvuun.

Mallien laadinta-aineistot

MELA-järjestelmän kasvumallien laadinnassa on aina pyritty käyttämään laajoja empiirisiä mittausaineistoja, joiden on katsottu muodostavan edustavimman saatavilla olevan otoksen metsistämme. Ensimmäiset MELA-järjestelmän kasvu- ja tuotomallit perustuivat pääosin valtakunnan metsien 7. inventoinnin puustokoeala-aineistoon (Ojansuu ym. 1991).

Myös uudet kasvumallit perustuvat laajaan ja edustavaan aineistoon. Kivennäismaiden kasvumallien laadinta-aineistoina on käytetty VMI6:n ja VMI7:n koealaverkostoon sidottuja toistuvasti mitattuja metsikkökoealoja, ns. INKA- ja TINKA-koealasarjoja (Vuokila 1986, Gustavsen

ym. 1988). INKA-koealat on perustettu kasvatusvaiheen talousmetsiin ja ne on tähän mennessä mitattu kolme kertaa viiden vuoden välein. TINKA-kokeet on perustettu puolestaan havupuuvaltaisiin taimikoihin, joista on tällä hetkellä käytettävissä mittaustiedot kahdelta peräkkäiseltä mittauskerralta. Koivun kasvumallien laadinta-aineistoina on lisäaineistona käytetty Metsäntutkimuslaitoksen keräämää mittaustietoa viljelykoivikoista ja toistuvasti mitatuilta metsikkökokeilta. Turvemaiden kasvumallit perustuvat valtakunnan metsien 8. inventoinnin yhteydessä perustetuilta pysyviltä koealoilta kerättyyn mittaustietoon ja toistuvasti mitatuilta ns. SINKA-kasvukoealoilta kerättyyn aineistoon. Yhteensä kasvumallien laadinta-aineistot käsittävät n. 3 000 koealaa, joilta on mitattu n. 80 000 puuta (taulukko 1).

Edustavien empiiristen aineistojen lisäksi kasvumallien rakenteen suunnittelussa ja laadinnassa on käytetty hyväksi tuloksia useista aikaisemmista kasvututkimuksista, joiden yhteydessä laaditut kasvumallit kuvaavat erilaisten metsänhoidollisten käsittelyiden, kuten harvennuksen ja lannoituksen vaikutusta puuston kehitykseen (Kukkola ja Saramäki 1983, Hynynen 1995a ja 1995b). Niiden tutkimusaineistot ovat peräisin toistuvasti mitatuilta kestokokeilta.

Taulukko 1. Havaintojen lukumäärät kasvumallien laadinta-aineistoissa.

Malli	Havaintojen lukumäärä					
	Kivennäismaat			Turvemaat		
	Mänty	Kuusi	Koivu	Mänty	Kuusi	Koivu
Valtapituuden kehitys	3 913	3 610	716			
Läpimitan kasvu	22 887	8 286	9 539	20 644	5 645	16 593
Pituuskasvu	23 679	9 324	5 780	3 450	769	2 133
Latvussuhde	33 453	10 913	7 966			

Luonnonprosessien simulointi MELA-järjestelmässä

Simuloinnin kulku

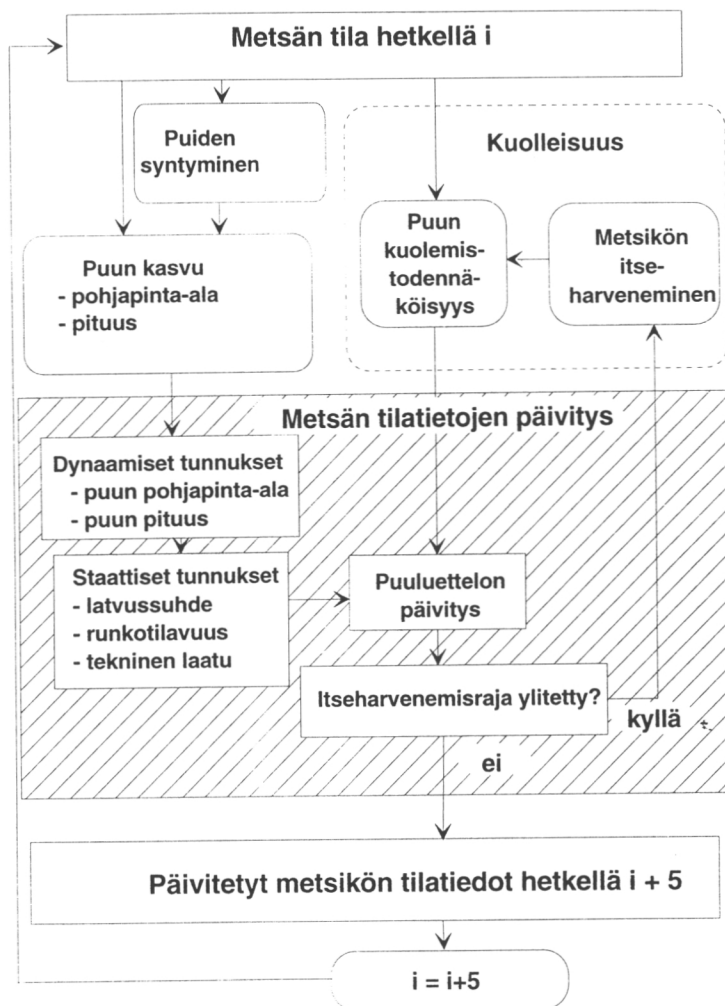
MELA-järjestelmässä metsikön (laskentayksikön) puusto kuvataan ns. kuvauspuiden avulla, joiden kehitystä ohjelmassa simuloidaan. Kuvauspuut poimitaan simuloitavan metsikön runkolukusarjasta niin että kukin kuvauspuu edustaa tiettyä osaa metsikön koko puustosta. Se ilmaistaan kuvauspuun edustamana hehtaarikohtaisena runkolukuna. Simuloinnin aika-askel on viisi vuotta, ts. metsikön tilaa kuvaavat tiedot päivitetään pääsääntöisesti viiden vuoden välein.

Puuston kasvunopeus ja metsikön kehitysdynamiikka määräytyy paljolti kasvupaikan ominaisuuksien perusteella. Ennen kasvun simuloinnin aloittamista lasketaan kasvupaikkaa kuvaavien mittaustietojen perusteella ennuste metsikön kasvupaikan pituusboniteetille, jota käytetään kasvu- ja kuolemismalleissa kasvupaikan puuntuotoskykyä kuvaavana tunnuksena (Ojansuu, tässä julkaisussa).

Metsikön kehitysdynamiikkaa kuvataan yksittäisten puiden syntymistä, kasvua ja kuolemista ennustavilla malleilla (kuva 2). Kasvun- ja kuolemissen ennustemallit on laadittu puulajeittain erikseen kivennäismaille ja turvemaille. Koska erilaisten metsänkäsittelyvaihtoehtojen kasvuvaikutusten tarkastelu on oleellinen osa MELA:n käyttöä, kasvumalleilla voidaan ennustaa harvennuksen ja lannoituksen vaikutusta puuston kehitykseen.

Puiden ja metsikön tilan muutosta ennustavien dynaamisten kasvumallien lisäksi simuloinnissa tarvitaan joukko erilaisia puun ja metsikön tilaa kuvaavia staattisia malleja, joita käytetään päivitettäessä puiden tilatietoja simuloinnin aikana. Tällaisia malleja ovat puiden tilavuus- ja kuorimallit sekä puiden teknistä laatua kuvaavat mallit. Puiden runko-tilavuus lasketaan Laasasenahon (1982) tilavuusyhtälöillä. MELA-järjestelmän kasvumallien uusimisen yhteydessä staattisten mallien joukkoon lisättiin puiden latvussuhteen ennustemallit. Kuvauspuiden tilatietojen päivytyksen jälkeen metsikkötason tunnuksat, kuten puuston pohjapinta-

ala ja kokonaistilavuus lasketaan jokaisen simulointi-
 askeleen vaihtuessa kuvauspuiden tunnuksia summaamalla.



Kuva 2. Kaaviokuva luonnonprosessien simuloinnista MELA-järjestelmässä.

Puiden syntyminen ja varhaiskehitys

Puiden kehitys 1,3 metrin pituuteen saakka ennustetaan varhaiskehitystä kuvaavien mallien avulla. Tulevan viisivuotiskauden aikana 1,3 metrin pituuden saavuttavan puuston runkoluku ja kokorakenne ennustetaan taulukkomal-

leilla, jotka perustuvat valtakunnan metsien 7:ssä inventoinnissa kerättyihin tietoihin. Syntymismalleilla ennustetaan luontaisten taimien syntyminen koko metsikön kehityksen aikana. Luontaisesti syntyvien taimien lukumäärä riippuu metsikön puuston määrästä ja iästä, maanpinnan käsittelystä ja metsikön maantieteellisestä sijainnista. Taimien pituuskasvu kuvataan mallilla, joka ennustaa rinnan korkeuden saavuttamiseen kuluvan ajan. Se ennustetaan kasvupaikkatyypin, lämpösumman, uudistusmenetelmän ja puuston tiheyden avulla (Ojansuu ym. 1991).

Läpimitan kasvu

Puun läpimitan kasvunennusteet lasketaan mallilla, joka ennustaa puun poikkileikkauspinta-alan kasvun tulevan viiden vuoden aikana. Puun läpimitan kasvuun vaikuttavat tekijät voidaan jakaa neljään ryhmään: kasvupaikka, puun koko, puiden välinen kilpailu ja metsikön kehitysvaihe. Kasvupaikkaa kuvaavista tunnuksista keskeisin on metsikön pituusboniteetti, joka kuvaa kasvupaikan puuntuotoskykyä ilmaistuna valtapuuston pituuskasvun nopeudella. Kasvupaikan vaikutus puun läpimitan kasvuun ei kuitenkaan välttämättä ole sama kuin puun pituuskasvuun. Sen vuoksi puun pohjapinta-alan kasvumallissa kasvupaikkaa kuvaavat lisäksi kasvupaikkatyyppi ja alueelliset muuttujat, kuten lämpösumma.

Puun kasvun määrä riippuu viime kädessä puun yhteyttävän biomassan määrästä ja sen yhteyttämistehokkuudesta. Koska biomassan määrää on käytännössä vaikea mitata, sitä kuvataan puun koolla ja puun latvuksen koolla. Pohjapinta-alan kasvumallissa puun koko kuvataan puun läpimitalla ja puun latvuksen koko latvussuhteella. Latvussuhteella tarkoitetaan puun elävän latvuksen suhteellista osuutta puun pituudesta. Latvussuhteen mukaan ottaminen kasvua selittäväksi muuttujaksi onkin yksi merkittävimmistä uusista piirteistä puun pohjapinta-alan kasvumallissa verrattuna aikaisempiin MELA:n kasvumalleihin. Puiden latvusten on todettu reagoivan voimakkaasti puuston tiheyteen ja tehtyihin harvennuksiin (Hynynen 1995a, Hynynen

ja Saramäki 1995). Kun latvussuhde on mukana kasvun selittäjänä, voidaan myös harvennusvaikutuksen olettaa kuvautuvan sitä kautta puun kasvunopeuteen.

Puiden välinen kilpailu on puun kasvunopeuteen keskeisesti vaikuttava tekijä. Kasvumalleissa kilpailun astetta metsikössä kuvataan tavallisesti jollakin puuston tiheyttä kuvaavalla tunnuksella (esim. puuston pohjapinta-ala tai puiden runkoluku). Uusien MELA-mallien laadinnan yhteydessä kehitettiin puuston tiheysindeksi kuvaamaan metsikön tiheyttä. Se ilmaisee metsikön suhteellisen tiheyden verrattuna vastaavassa kehitysvaiheessa olevaan täystiheään metsikköön. Vertailutasona käytettävän täystiheään metsikön tiheys lasketaan Hynysen (1993) metsikkötason itseharvennemismallin avulla. Uuden tiheyttä kuvaavan tunnuksen kehittämisen tavoitteena oli saada käyttöön sellainen puiden välisen kilpailun astetta kuvaava tunnus joka olisi mahdollisimman riippumaton puuston kehitysvaiheesta tai kasvupaikasta. Tiheysindeksi lasketaan puulajeittain, minkä ansiosta metsikön puulajikoostumus (ns. sekametsävaikutus) tulee otetuksi huomioon puun kasvunesteessa. Yksittäiseen puuhun kohdistuvan kilpailun määrään vaikuttaa metsikön tiheyden lisäksi myös puun asema suhteessa kilpaileviin puihin. Kasvumallissa puun asemaa metsikössä kuvataan muuttujalla, joka ilmaisee kyseistä puuta suurempien puiden suhteellisen tiheysindeksin.

Metsikön kehitysvaihe on mallissa kuvattu valtapituuden avulla, koska puun kasvu noudattaa verrattain säännöllistä iänmukaista kehitysrytmiä.

Metsikön harvennus pienentää puuston tiheyttä, minkä seurauksena puiden välinen kilpailu vähenee. Puun kasvu-tilan suurentuessa sen latvuksen supistuminen hidastuu tuntuvasti. Puun pohjapinta-alan kasvumallissa molemmat em. tekijät heijastuvat kasvuun puiden välistä kilpailua ja puun latvussuhdetta kuvaavien muuttujien kautta. Aikaisemmissa kasvututkimuksissa on kuitenkin todettu, että em. tekijöiden muutos ei kuitenkaan yksin riitä selittämään puiden kasvun nopeutumista välittömästi harvennusta seuraavina vuosina (Hynynen 1995b). Sen vuoksi kasvumalliin on lisätty harvennuksen ajankohtaa kuvaavat luokamuuttujat, jotka muuttavat kasvun tasoa harvennusta seuraavan kymmenen vuoden aikana.

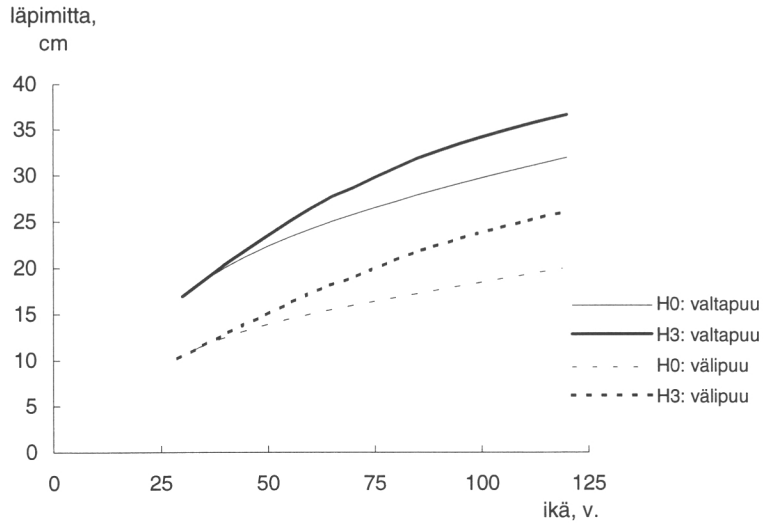
Mallin laadinnassa oletettiin kasvutekijöiden vaikuttavan tulomuotoisesti puun kasvuun. Malli on linearisoitu logaritmuunnoksen avulla. Vaikka kaikkien puulajien malleissa perusrakenne onkin sama, mallien lopullinen yksityiskohtainen rakenne, kuten malleissa esiintyvien muuttujien matemaattiset muunnokset, vaihtelevat puulajeittain. Seuraavassa on esitetty esimerkkinä männylle estimoidun mallin rakenne:

$$\begin{aligned}
 \ln(\hat{ig}) = & -a_0 + a_1 \ln(d) - a_2 d^2 + a_3 (d + 0,1)^{-1} + a_4 \ln(cr) \\
 & - a_5 RDF_L - a_6 \ln(RDF_{mänty} + 1) \\
 & - a_7 \ln(RDF_{kuusi} + 1) - a_8 \ln(RDF_{lehtip.} + 1) \\
 & + a_9 H_{dom}^{-1} - a_{10} H_{dom}^{-2} \\
 & + a_{11} \ln(SI) + a_{12} DDY + a_{13} MT - a_{14} CT \\
 & + a_{15} TH_5 + a_{16} TH_{10}
 \end{aligned} \tag{1}$$

jossa

- \hat{ig} = puun pohjapinta-alan kasvun ennuste, cm^2
- d = puun läpimitta, cm
- cr = puun latvussuhde
- RDF_L = kyseistä puuta isompien puiden tiheysindeksi
- $RDF_{mänty}$ = mäntyjen tiheysindeksi
- RDF_{kuusi} = kuusten tiheysindeksi
- $RDF_{lehtip.}$ = lehtipuiden tiheysindeksi
- H_{dom} = valtapituus, m
- SI = pituusboniteetti
- DDY = lämpösumma
- MT = kasvupaikkaa kuvaava luokkamuuttuja;
1, kun kasvupaikka on MT tai parempi
- CT = kasvupaikkaa kuvaava luokkamuuttuja;
1, kun kasvupaikka on CT tai huonompi
- TH_5 = harvennusta kuvaava luokkamuuttuja;
1, jos harvennuksesta kulunut aika alle 5 v
- TH_{10} = harvennusta kuvaava luokkamuuttuja;
1, jos harvennuksesta kulunut aika 5–10 v

Kuvassa 3 on havainnollistettu mallilla laskettuja puiden läpimitan kasvuennusteita. Niistä ilmenee puun suhteellisen koon vaikutus ja harvennusten aikaansaama muutos yksittäisen puun läpimitan kasvussa.



Kuva 3. Kahden erikokoisen puun (valtapuu ja välipuu) läpimitan ennustettu kehitys harventamattomassa (H0) ja kolme kertaa harvennetussa (H3) VT-männikössä.

Turvemaiden kasvumalleissa kasvutekijät ovat pääosin samat kuin kivennäismaillakin. Käytettävissä olleen mallitusaineiston vuoksi latvussuhde ei ole turvemaiden kasvumallien selittävänä muuttujana. Turvemaille kasvuun vaikuttavana erityispiirteenä on ojituksesta kulunut aika, joka on malleissa mukana yhtenä kasvun selittäjänä (Hökkä, tässä julkaisussa).

Puun pituuskasvu

Valtapuiden pituuskehitysmallilla on keskeinen osa puuston pituuskehityksen ennustamisessa. Kaikkien metsiköiden pituuskasvuennusteet on sidottu valtapituuden kasvunopeuteen. Puun pituuskasvumallin mukaan yksittäisen puun kasvunopeus suhteessa valtapituuden kasvuun määräytyy puun suhteellisen koon mukaan. Puun aseman vaikutuksen voimakkuus pituuskasvuun riippuu metsikön kehitysvaiheesta. Seuraavassa esimerkkinä männylle sovitettu puun pituuskasvun ennustemalli:

$$\hat{h}_s = IH_{dom} \cdot \left(\frac{h}{H_{dom}} \right) \left(-a_0 - a_1 \ln(cr) + IH_{dom} a_2 - a_3 \left(\frac{h}{H_{dom}} \right) \right), \quad (2)$$

jossa

\hat{ih}_5 = puun pituuskasvun ennuste, m

IH_{dom} = metsikön valtapituuden kasvu, m

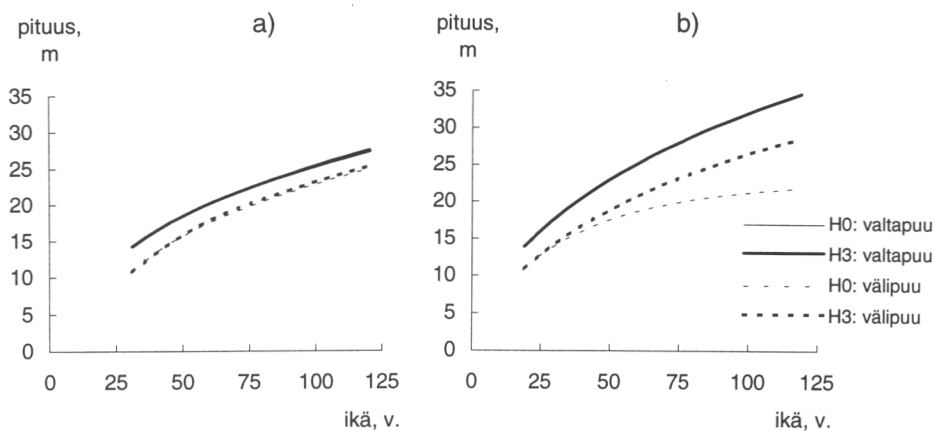
H_{dom} = metsikön valtapituus, m

h = puun pituus, m

cr = puun latvussuhde

Mallissa (2) puun suhteellista kokoa kuvataan puun pituuden ja metsikön valtapituuden välisellä suhteella. Mallin mukaan puun pituuden ollessa yhtä suuri kuin metsikön valtapituus, puun pituuskasvuennuste on yhtä suuri kuin valtapituuden kasvuennuste, joka mallin sovellustilanteessa lasketaan valtapituuden kasvumalleilla (Ojansuu, tässä julkaisussa). Puun aseman vaikutus kasvuun riippuu valtapituuden kasvunopeudesta. Erikokoisten puiden pituuskasvut poikkeavat toisistaan eniten metsiköissä, joissa valtapituuden kasvu on nopeaa. Koska valtapituuden kasvunopeus on suurimmillaan nuorissa metsiköissä, niin niissä myös puiden pituuksien eriytyminen on nopeinta. Pienimmillään erikokoisten puiden pituuskasvujen erot ovat hidaskasvuissa, harvoissa metsissä.

Vaikka mallin perusrakenne on kaikilla puulajeilla sama, niin puulajeittaiset erot metsikön kehitysdynamiikassa ilmenevät eri puulajien pituuskasvuennusteissa (kuva 4).



Kuva 4. Kahden erikokoisen puun (valtapuu ja välipuu) ennustettu pituuden kehitys harventamattomassa (H0) ja harvennetussa (H3) VT-männikössä (a) ja MT-kuusikossa (b).

Männyllä ja koivulla eri kokoisten puiden pituuksien eriytyminen on keskimäärin pienempää verrattuna varjostusta paremmin sietävään kuuseen.

Turvemailla puuston pituuskehitys ennustetaan staattisten pituusmallien avulla (Hökkä, tässä julkaisussa).

Puun latvussuhde

Puun latvussuhde on yksi keskeisimmistä puun kasvua selittävästä tunnuksista. Sen vuoksi latvussuhteen kehityksen ennustaminen on tärkeä osa simulointia siinä kuin puun läpimitan ja pituuskehityksen ennustaminenkin. Lisäksi latvussuhdemallia tarvitaan ennustamaan latvussuhdetta silloin kun MELAa sovelletaan mittausaineistoihin, joissa puiden latvuksien pituuksia ei ole mitattu.

Latvussuhde ennustetaan staattisella mallilla, joka antaa ennusteen puun latvussuhteelle, kun tunnetaan puun pituus, läpimitta, sekä metsikön valtapituus ja puuston tiheys ja kasvupaikan lämpösumma. Seuraavassa on esitetty esimerkiksi männyn latvussuhteen ennustemalli:

$$\hat{c}r = 1 - \exp\left[-a_1 \ln(H_{dom})^{-a_2} d^{a_3} \ln(h)^{-a_4} DDY^{a_5} e^{-a_6 RDF}\right], \quad (3)$$

jossa

$\hat{c}r$ = puun latvussuhteen ennuste

H_{dom} = metsikön valtapituus, m

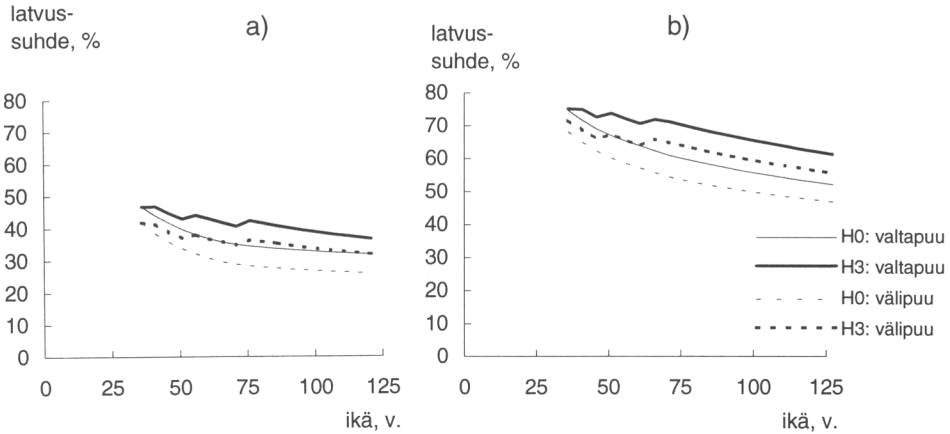
d = puun läpimitta, cm

h = puun pituus, m

DDY = lämpösumma

RDF = metsikön tiheysindeksi

Puun normaaliin iänmukaiseen kehitykseen kuuluu latvussuhteen vähittäinen pieneneminen puun vanhetessa. Metsikön tiheydellä ja puun suhteellisella koolla on kuitenkin myös huomattava vaikutus latvussuhteeseen. Mitä enemmän puulla on kasvutilaa ja mitä parempi sen kilpailu-asema on suhteessa metsikön muihin puihin, sitä suurempi on sen latvussuhde. Puulajien väliset huomattavat erot latvussuhteen suuruudessa ilmenevät selkeästi vertailtaessa mallien antamia latvussuhde-ennusteita eri puulajeille (kuva 5).



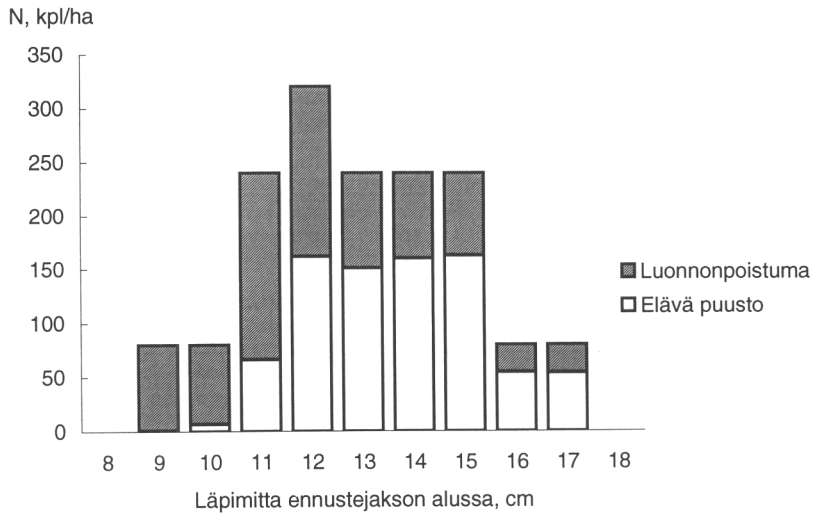
Kuva 5. Kahden erikokoisen puun (valtapuu ja välipuu) ennustettu latvussuhteen kehitys harventamattomassa (H0) ja harvennetussa (H3) VT-männikössä (a) ja MT-kuusikossa (b).

Harvennuksen yhteydessä kasvatettavien puiden kasvutilaa laajennetaan, minkä seurauksena puun alimpien oksien kuoleminen voi väliaikaisesti pysähtyä kokonaan, tai ainakin se hidastuu tuntuvasti, minkä seurauksena puun latvusten supistuminen hidastuu.

Luonnonpoistuma

Luonnonpoistuma lasketaan MELAssa puutason mallilla, joka ennustaa puun kuolemistodennäköisyyden tulevan viiden vuoden kasvujakson aikana. Puun kuolemistodennäköisyys riippuu ratkaisevasti metsikön tiheydestä, ja puun kilpailuasemasta, ts. sen koosta suhteessa metsikön muihin puihin. Kuten tunnettua luonnonpoistumana kuolevista puista valtaosa kuuluu metsikön pienimpiin, kilpailussa tappiolla jääneisiin puihin (kuva 6).

Simuloinnissa mallia sovelletaan siten, että kuvauspuun edustamaa hehtaariohtaista runkolukua pienennetään ennustetun kuolemistodennäköisyyden verran. Tähänastisten kokemusten perusteella on havaittu, että puutason kuolemissmallit eivät välttämättä ota riittävästi huomioon puuston tiheyden vaikutusta puun kuolemistodennäköisyyteen, minkä seurauksena puuston tiheys saattaa kasvaa epärealistisen suureksi harventamattomina kasvatettavissa metsissä. Sen vuoksi puutason mallin lisäksi luonnonpoistuman määrää



Kuva 6. Luonnonpoistumana kuolleen puuston ennustettu osuus läpimittaluokittain harventamattomassa VT-männikössä 90 v:n ennustejakson aikana (30–120 v).

kontrolloidaan metsikkötason itseharvenemisrajan ennustemallilla (Hynynen 1993). Sitä sovelletaan simuloinnissa kuvassa 2 esitetyllä tavalla.

Päätelmät

MELA-järjestelmän luonnonprosessien simulointimallien uusimisella haluttiin parantaa järjestelmän toimivuutta eräillä sen keskeisillä sovellusalueilla. Uusien kasvumallien ennusteet ovat entistä luotettavammalla pohjalla etenkin ojitetuilla turvemailla ja kivennäismaiden koivikoissa, joissa mallien laadinta-aineistot ovat huomattavasti kattavampia verrattuna aikaisempien mallien aineistoihin. Mallien rakenne pyrittiin laatimaan pitkän aikavälin simulointiin soveltuvaksi. Valitun rakenteen avulla taataan realistiset ennusteet myös sellaisissa ääriolosuhteissa, joita laadinta-aineistossa ei esiinny.

Metsien käsittelyssä on tapahtunut viime vuosina ja oletettavasti tapahtuu myös lähitulevaisuudessa muutoksia, joiden vaikutuksista metsävarojen kehitykseen ei vielä ole

selkeää käsitystä. Muun muassa metsien ensiharvennukset ovat viivästyneet harvennuksen taloudellisen kannattavuuden heikentyessä. Mittavien harvennusrästien vaikutuksista metsien kehitykseen ei toistaiseksi ole voitu esittää tutkimukseen perustuvia arvioita. Tämän kaltaisiin metsänhoito- ja käsittelymenetelmien aiheuttamien vaikutusten arviointiin MELA-järjestelmä soveltuu entistä paremmin uusien kasvumallien käyttöönoton myötä.

Nyt esiteltujen uusien mallien valmistumisesta huolimatta MELAn mallivalikoimaa tullaan lähivuosina edelleen kehittämään ja laajentamaan. Kun tässä vaiheessa on keskitytty lähinnä kasvun ja kuoleamisen ennustemallien uusimiseen, lähiajan tärkeimpänä tavoitteena on uudistaa metsikön varhaiskehitystä ennustavat mallit. Myös puiden teknistä laatua kuvaavien mallien laadinnassa riittää vielä työtä lähivuosiksi. Erilaisten metsätuhojen ennustemallit puuttuvat vielä MELA-järjestelmästä toistaiseksi. Ensimmäisenä työvaiheena tällä alueella ollaan aloittamassa mallintamistyötä Etelä-Suomen kuusikoissa esiintyvän maannousemasienen leviämisen ja sen aiheuttamien tuhojen ennustamiseksi.

Kirjallisuus

- Burkhart, H. E. 1993. Tree and stand models in forest inventory. Julkaisussa: Nyssönen, A., Poso, S. & Rautala, J. (toim). Proceedings of Ilvessalo Symposium on national forest inventories (IUFRO S4.02), Finland, 17–21 Aug. 1992. Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja 444:164–170.
- Gustavsen, H. G., Roiko-Jokela, P. & Varmola, M. 1988. Kivennäismaiden talousmetsien pysyvät (INKA ja TINKA) kokeet. Suunnitelmat, mittausmenetelmät ja aineistojen rakenteet. Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja 292. 212 s.
- Hynynen, J. 1993. Self-thinning models for even-aged stands of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula*. Scandinavian Journal of Forest Research 8:326–336.
- 1995a. Predicting tree crown ratio for unthinned and thinned Scots pine stands. Canadian Journal of Forest Research 25:57–62.
- 1995b. Predicting the growth response to thinning for Scots pine stands using individual-tree growth models. Silva Fennica 29(3):225–246.

- & Saramäki, J. 1995. Ensiharvennuksen viivästymisen ja harvennusvoimakkuuden vaikutus nuoren männikön kehitykseen. *Folia Forestalia – Metsätieteen aikakauskirja* 1995(2):99–113.
- Kukkola, M. & Saramäki, J. 1983. Growth response in repeatedly fertilized pine and spruce stands on mineral soils. *Seloste: Toistuvalla lannoituksella saatava kasvunlisäys kivennäismaiden männiköissä ja kuusikoissa. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 114. 55 s.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. *Seloste: Männyn, kuusen ja koivun runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöt. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 108:1–74.
- Lappi, J. 1992. JLP: A linear programming package for management planning. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 414. 134 s.
- Metsä 2000. *Metsien hoidon ja käsittelyn työryhmän raportti*. 1985. *Talousseuvosto*. 113 + 81 s.
- Ojansuu, R., Hynynen, J., Koivunen, J., & Luoma, P. 1991. Luonnonprosessit metsälaskelmassa (MELA) – Metsä 2000-versio. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja*. 385. 59 s.
- Siitonen, M. 1990. Suomen metsävarat 1990 ja metsien kehitysmahdollisuudet 1990–2030. *Selvitys Metsä 2000-ohjelman tarkistustoimikunnalle. Metsäntutkimuslaitos. Moniste*. 56 s.
- 1994. MELA vuonna 2000. MELA-järjestelmän kehittämisen perusteita ja tavoitteita. *Julkaisussa: Niemeläinen, P., Kangas, J. & Päivinen, R. (toim.). Integroidun metsäsuunnittelun menetelmiä ja välineitä. Joensuun yliopisto. Metsätieteellinen tiedekunta. Tiedonantoja* 16:7–102.
- , Härkönen, K., Hirvelä, H., Jämsä, J., Salminen, O. & Teuri, M. 1995. MELA handbook 1996 edition. *Metsäntutkimuslaitos. Käsikirjoitus*.
- Vuokila, Y. 1986. Puuntuotoksen tutkimussuunnan kestokokeiden periaatteita ja suunnitelmia. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 239. 229 s.

Yhteensä 15 viitettä.

Risto Ojansuu

Kangasmaiden kasvu- paikan kuvaus MELA- järjestelmässä

Johdanto

Suomessa metsätalouden kasvupaikkojen kuvaus perustuu pääosin metsä- ja suotyyppeihin. Kangasmailla metsätyyppiä tarkennetaan tarvittaessa puuntuotoskykyä alentavien lisämääreiden avulla, joita ovat esim. kivisyys, soistuneisuus ja kunttaisuus. Metsätyyppissä katsotaan kuvastuvan suurilmaston ja maaperän vaikutus kasvillisuuteen. Suurilmaston vaikutus kuvataan kasvillisuusvyöhykkeiden avulla ja maaperän vaikutus kasvillisuusvyöhykkeen sisällä metsätyyppin avulla. Kasvillisuusvyöhykkeet ovat maantieteellisesti laajoja ja alueen sisällä tietyn metsätyyppin kasvun tason alueellinen vaihtelu on suuri (Mikola 1963). Myöskin rajatulla maantieteellisellä alueella tietyn metsätyyppin puuntuotoskyky vaihtelee ja vierekkäisten metsätyyppien tuotoskyvyn vaihtelualueet menevät suurelta osin päällekkäin (Lahti 1995).

MELAn vanhoissa kasvumalleissa käytetään metsätyyppien avulla muodostettuja kasvupaikkatyyppijä (lehto, lehtomainen kangas, tuore kangas, kuivahko kangas, kuiva kangas ja karukkokangas) (Lehto 1969) ilmaisemaan maaperän vaikutusta kasvuun. Alueellisia muuttujia (esim. koordinaatit, lämpösumma) käytetään kuvaamaan suurilmaston vaikutusta (Ojansuu ym. 1991).

Maailmalla tärkein kasvupaikan tuotoskykyä kuvaava muuttuja on pituusboniteetti. Se on valtapuuston havaitun pituuskehityksen avulla ennustettu valtapituus tietyllä indeksijäljellä. Pituusboniteetti kuvaa hyvin olemassa olevan puusukupolven kasvupotentiaalia. Se ei kuitenkaan käytä hyväksi kasvupaikkamuuttujien antamaa informaatiota,

vaan tulos on ainoastaan ikä- ja valtapituushavainnon funktio. Siksi sitä voidaan suoraan soveltaa vain tasaikäisiin, alaharvennettuihin ja häiriöttömästi kehittyneisiin metsiin, joita on arviolta noin 1/3 metsäpinta-alasta. Metsätyypin ja pituusboniteetin tarkempi analyysi tämän kirjoituksen lähestymistavan kannalta on esitetty artikkelissa: *Kasvupaikan kuvaus metsän kehitystä ennustettaessa* (Ojansuu 1996).

Vanhoissa MELA-malleissa (Ojansuu ym. 1991) puiden pituuden ja läpimitan kasvut ennustetaan suoraan kasvupaikkamuuttujien funktiona. MELAn uusien läpimitan ja pituuden kasvumallien tärkein kasvupaikan kuvausmuuttuja on pituusboniteetti. Valtapuiden pituuskehitys ja sen avulla ennustettu pituusboniteetti saadaan kasvupaikkamuuttujien funktiona. Jos metsikkö on pituusbonitointiin kelvallinen, voidaan pituuskehityksen ja pituusboniteetin ennusteita tarkentaa mittaamalla metsikön ikä ja valtapuiden pituuksia. Pituusboniteetti saadaan aina kaikille tärkeimmille puulajeillemme (mänty, kuusi, rauduskoivu ja hieskoivu). Kangasmaiden kasvupaikkamuuttujat ovat uudessa MELA-järjestelmässä pääosin samat kuin vanhassa.

Aineisto ja kasvupaikkamuuttujat

Mallien pääasiallisena laadinta-aineistona on käytetty pysyvistä koealoista koostuvaa INKA-koealasarjaa (Gustavsen ym. 1988). Se on alaotos niistä metsiköistä, joilla sijaittivat valtakunnan metsien kuudennen ja seitsemännen inventoinnin koealat. Jokaiseen otosmetsikköön perustettiin kolme pysyvää koealaa. Otos on rajattu puulajeittain tärkeimmille kasvupaikoille: mänty kaikille kasvupaikoille lehtomaiselta kankaalta kuivalle kankaalle ja kuusi sekä koivu lehtomaiselle ja tuoreelle kankaalle. Otosmetsiköiden tuli lisäksi olla yksijaksoisia, kasvatuskelpoisia, terveitä ja kuuluu johonkin seuraavista kehitysluokista: varttunut taimikko, nuori kasvatusmetsä tai varttunut kasvatusmetsä. Koealat on mitattu pääosin kolme kertaa viiden vuoden välein. Kuusen aineistoa täydennettiin taimikoihin sijoitetuilla TINKA-koealoilla. Koivun mallien laadinta-aineistona on käytetty Metsäntutkimuslaitoksen keräämää mittausaineistoa

Taulukko 1. Mallien laadinta-aineiston havaintomäärät puulajeittain.

Puulaji	Metsiköitä (koivulla koealoja)	Puita	Mittauksia yhteensä
Mänty	493	1758	3913
Kuusi	520	1601	3610
Koivu	67	321	716

Taulukko 2. Metsätyytit kasvillisuusvyöhykkeittäin ja kasvupaikkatyypeittäin (Lehto 1969).

Kasvupaikkatyyppi	Kasvillisuusvyöhyke			
	Etelä-Suomi	Pohjanmaa ja Kainuu	Perä-Pohjola	Metsä-Lappi
Kuiva kangas	CT	ECT	MCCIt	UVET
Kuivahko kangas	VT	EVT	EMT	UEMT
Tuore kangas	MT	VMT	HMT	LMT
Lehtomainen kangas	OMT	GOMT	GMT	
Lehto	OMaT	GOMaT	GDT	

viljelykoivikoista ja toistuvasti mitatuilta metsikkökokeilta (taulukko 1).

Kasvupaikan kuvaus perustuu metsätyyppijärjestelmän mukaiseen kasvupaikkatyyppien luokitteluun (taulukko 2). Kasvupaikkatyyppin tarkenteina käytetään kivisyyttä, soistuneisuutta ja kunttaisuutta. Tarkenteella ilmaistaan kasvupaikan tuotoskyvyn alentuneen siten, että kasvupaikka kuuluu tuotoskyvyltään tiettyä kasvupaikkatyyppiä vastaavaa veroluokkaa alempaan luokkaan. Kasvupaikan ilmasto-oloja kuvataan lämpösummalla. Lämpösumma ennustettiin aineiston koealoille säähavaintoasemien kuukausikeskiarvojen avulla jakson 1951–1980 keskiarvona (Ojansuu ja Henttonen 1983). Lämpösumman ennuste ottaa huomioon kohteen korkeuden merenpinnasta, meren läheisyyden (merisyysindeksi) ja järvien määrän lähiympäristössä (järvisyysindeksi). Korkeutta sekä merisyys- ja järvisyysindeksejä käytetään myös itsenäisinä alueellisina kasvupaikkamuuttujina. Indeksit kuvaavat meren tai järvien peittävyttä 20 km:n säteellä kohteen ympäristössä siten, että lähellä kohdetta sijaitseva vesialue saa suuremman painon kuin kaukana sijaitseva (Ojansuu ja Henttonen 1983). Merisyys- ja järvisyysindeksit voidaan laskea samalla ohjelmistolla kuin lämpösumma.

Pituuskehitysmallin periaate

Valtapituus määritellään yleensä hehtaarin sadan paksuimman puun keskipituutena. Pienellä koealalla sattuma vaikuttaa valtapituuteen voimakkaasti. Esim. aarin koealalla valtapuustoon kuuluu keskimäärin yksi puu. MELAn kasvumallien tärkeä lähtöpuuston kuvaus perustuu VMI:n relaskoopikoealoihin. Nuoressa metsässä sijaitsevan relaskoopikoealan koko voi jäädä alle yhden aarin, jolloin valtapituuden määrittäminen edelleen vaikeutuu. Jotta pienien koealojen aiheuttama satunnaisuus valtapuuston ominaisuuksissa saataisiin pienemmäksi, määriteltiin valtapuusto entistä suuremmaksi puujoukoksi. MELAn uudessa kasvupaikkakuvauksessa valtapuita ovat kaikki puut, joiden läpimitta on vähintään pohjapinta-alalla painotetun läpimitan suuruinen. Valtapituus on valtapuiden pituuksien keskiarvo. Näin määritelty valtapuiden joukko on suurempi kuin perinteinen valtapuiden joukko ja sisältää enemmän metsikön sisäistä puiden koon vaihtelua kuin hehtaarin sadan paksuimman puun joukko.

Mallissa pituuskehitys kuvataan rinnankorkeusiän funktiona. Rinnankorkeuden alapuolella pituuskehitykseen vaikuttavat suuresti uudistusmenetelmä ja taimikon alkuhoito. Lisäksi metsikön alkukehitykseen vaikuttaa moni vaikeasti ennustettava tekijä. Esimerkiksi kuusen jurominen aiheuttaa suurta vaihtelua kuusikoiden pituuden alkukehitykseen. Rinnankorkeusikä on siten kokonaisikä vakaampi metsikön kehityksen selittäjä. Rinnankorkeusikä on myös yleisemmin mitattu tunnus kuin kokonaisikä. Kokonaisikä laskeaan useimmiten mitatun rinnankorkeusiän ja ikälisäyksen avulla. Varttuneissa metsissä ikälisäys saadaan yleensä mallilla (ikälisäystaulukko) ja sisältää siten ainakin satunnaista ja mahdollisesti systemaattista virhettä.

Pituuskehityksen malli muodostuu kiinteästä ja satunnaisesta osasta. Kiinteä osa ilmaisee valtapuiden keskimääräisen pituuskehityksen kasvupaikkamuuttujien funktiona. Satunnaisen osan avulla malli voidaan kalibroida tiettyyn metsikköön puustomittausten avulla (Lappi ja Bailey 1988). Malli on laadittu logaritmisessa skaalassa ja sen perusrakenne on:

$$\ln(h_{ik} - 1,3) = A_{ik} + B * T_k^C + V_k + e_{ik}, \quad (1)$$

missä

h_{ik} = puun i pituus metsikössä k

T_k = metsikön k valtapuiden rinnankorkeuden keski-ikä

A_{ik} = pituuskehityksen kiinteä tasoparametri

B, C = pituuskehityksen kiinteitä muotoparametrejä

V_k = metsikön k satunnaisvaikutus

e_{ik} = puun i satunnaisvaikutus metsikössä k.

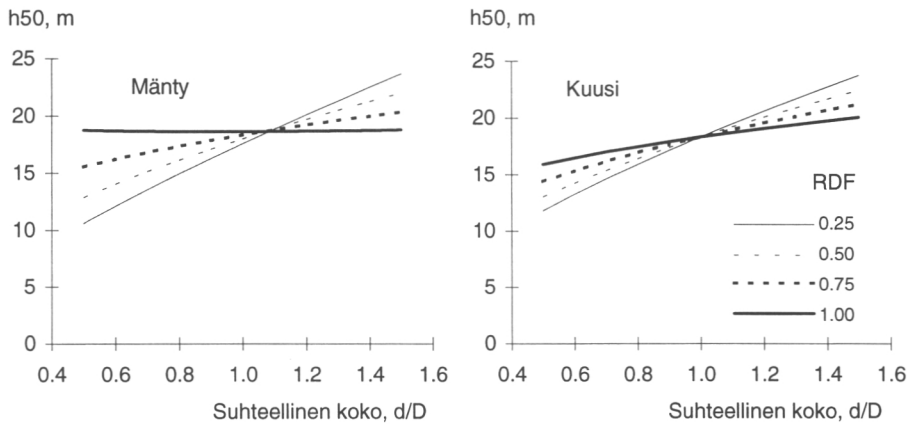
Tasoparametri A on funktio, jonka arvon määräävät metsikön k kasvupaikkamuuttujat, metsikön k tiheys, puun i asema metsikössä k ja metsikön k perustamistapa:

$$A_{ik} = f(\text{kasvupaikkatyyppi}_k, \text{kivisyys}_k, \text{soistuneisuus}_k, \text{kunntaisuus}_k, \text{lämpösumma}_k, \text{korkeus}_k, \text{merisyys}_k, \text{järvisyys}_k, \text{metsikön tiheys}_k, \text{puun suhteellinen koko}_{ik}, \text{perustamistapa}_k). \quad (2)$$

Mallin muotoa säätelevät parametrit B ja C ovat puulajeittain vakioita. Metsikön satunnaisvaikutus V_k ilmaisee, kuinka paljon metsikön k todellinen valtapituus iällä T_k eroaa mallin kiinteällä osalla ennustetusta. Puun satunnaisvaikutus e_{ik} ilmaisee, kuinka paljon yksittäinen puu i poikkeaa metsikön k keskimääräisestä pituuskehityksestä. Malli on yleinen lineaarinen malli ja parametrien arvot estimoitii puulajeittain iteratiivisella yleistetyllä pienimmän neliösumman menetelmällä (Prosser ym. 1991). Mallin estimoidut parametrit muodostuvat funktion A parametreistä ja vakioparametristä B sekä satunnaisvaikutusten V_k ja e_{ik} variansseista. Parametri C valittiin puulajeittain kokeilemalla.

Kun mallilla ennustetaan valtapituutta kasvupaikkatekijöiden funktiona, on ennuste sitä luotettavampi mitä lähempänä mallin laadinta-aineiston ikäpainopistettä ollaan. Tarkennettaessa valtapituuden ennustetta ikä- ja pituusmittauksilla, on tarkentuminen sitä suurempi mitä lähempänä mitattu ikä on indeksi-ikää. Pituusboniteetin indeksi-ikä käytetään uudessa MELA-mallissa rinnankorkeusikä 50 v.

Metsikön tiheys ja puun suhteellinen koko vaikuttavat yhdessä yksittäisten valtapuiden kehitykseen (kuva 1).



Kuva 1. Valtapuun pituus männikössä ja kuusikossa 50 vuoden rinnankorkeusiällä (h_{50}) metsikön tiheyden (RDF) ja puun suhteellisen koon (d/D) funktiona. Kasvupaikkatyyppi on tuore kangas ja lämpösomma on 1200 d.d.

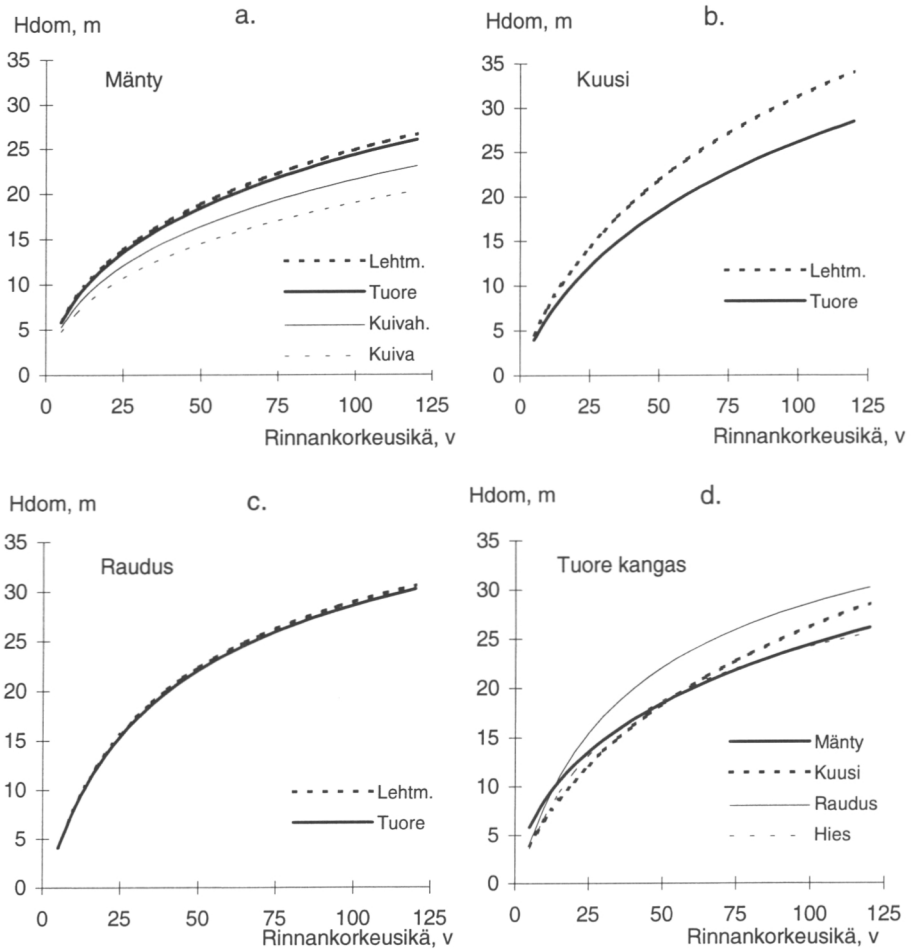
Metsikön tiheys kuvataan kohdemetsikön ja samassa kehitysvaiheessa itseharvenemisrajalla olevan metsikön tiheyden suhteena. Suhteellinen koko on valtapuiden keskiläpimitan ja kohdepuun läpimitan suhde. Tiheyden lisääntyessä valtapuiden läpimitan mukaiset pituuserot pienenevät. Erittäin selvä tämä yhdysvaikutus on männyllä, sillä itseharvenemisrajalla olevassa männikössä kaiken kokoiset valtapuut ovat yhtä pitkiä, mutta harvassa männikössä puun pituus kasvaa selvästi läpimitan kasvaessa. Molemmilla koivulajeilla ilmiö esiintyy suhteellisen voimakkaana ja kuusella heikompana. Männyn ja kuusen välisen eron syy on männyn suurempi valontarve, joka johtaa vallitsevan puuston tasaiseen pituuskehitykseen.

Valtapituuskehitys kasvupaikka- muuttujien funktiona

Metsikön pituusboniteettia ennustettaessa pyritään kuvaamaan ainoastaan kasvupaikan vaikutus pituuskehitykseen. Siksi pituusboniteettia ennustettaessa metsikön tiheys (0,75) ja puun suhteellinen koko (1,0) vakioidaan. Metsikön suhteellinen tiheys 0,75 vastaa hyvinhoidetun hyvä-

puustoisien metsikön tiheyttä ja suhteellinen koko 1,0 vastaa valtapuiden keskiläpimittaa edustavaa puuta.

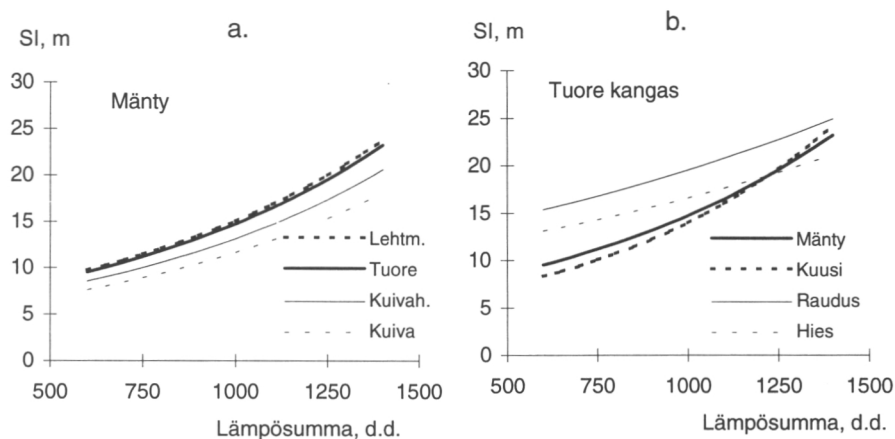
Tietyllä maantieteellisellä alueella yksittäisen puulajin (kuva 2 a–c) valtapituuden iänmukainen kehitys on varsin samanmuotoinen eri metsätyypeillä. Lehtomaisen kankaan ja tuoreen kankaan välinen ero on männyllä ja koivulla pieni. Männyn ja kuusen kehitysrytmit ovat hyvin samankaltaiset (kuva 2 d). Esim. Etelä-Suomen tuoreilla kankailla männyn alkukehitys on vain hieman nopeampaa kuin



Kuva 2. Metsikön valtapituuden (H_{dom}) kehitys metsikön rinnankorkeusikä funktiona. Männyn (a), kuusen (b) ja rauduskoivun (c) kehitys eri metsätyypeillä ja eri puulajien pituuskehitykset tuoreella kankaalla (d). Lämpösumma on 1200 d.d., korkeus merenpinnasta on 100 m, merisyys- ja järvisyys indeksit ovat 0 %.

kuusen, mutta varttuneissa metsissä taas kuusen kehitys on nopeampaa. Molempien koivulajien alkukehitys on suhteellisesti nopeampaa kuin havupuiden.

Lämpösumma on mallissa voimakkaimmin pituusboniteettiin vaikuttava alueellinen kasvupaikkamuuttuja (kuva 3). Molemmilla havupuulajeilla sen vaikutus on varsin samanlainen, mutta lehtipuilla lämpösumman vaikutus on pienempi. Kunttaisuus aiheuttaa kaikilla puulajeilla suurimman pituuskasvun tason pienenemisen (taulukko 3). Myös



Kuva 3. Männyn rinnankorkeusikään perustuva pituusboniteetti (SI) eri kasvupaikkatyypeillä ja eri puulajien pituusboniteetit tuoreella kankaalla lämpösumman funktiona. Korkeus merenpinnasta on 100 m, merisyys- ja järvisyysindeksit ovat 0 %.

Taulukko 3. Eräiden kasvupaikkamuuttujien ja viljelyn prosentuaalinen vaikutus pituusboniteettiin 50 vuoden rinnankorkeusiällä. Lämpösumma on 1200 d.d., korkeus merenpinnasta on 100 m, merisyys- ja järvisyysindeksit ovat 0 % ja kasvupaikkatyyppi on tuore kangas. Suluissa MELA-malliin sisältyvä arvio ositteesta, josta ei ollut havaintoja.

	Mänty	Kuusi	Raudus	Hies
Kivisyys	-5,7	-3,9	0	0
Soistuneisuus	-2,9	-7,9	(-16,1)	+19,1
Kunttaisuus	-17,0	-14,0	-33,8	-33,4
Korkeus, 100 m	+7,8	0	0	0
Merisyys, 10 %	-3,9	-7,0	0	0
Järvisyys, 10 %	+2,0	+0,8	-0,5	-0,5
Viljely	0	0	+35,9	+35,5

kivisyyden ja soistuneisuuden pituuskasvua heikentävä vaikutus on havupuilla merkittävä. Samoin meren läheisyys pienentää havupuiden pituuskasvua. Järvisyydellä on mallissa männyn pituuskasvua hieman lisäävä vaikutus. Koivikoissa metsikön perustamistapa vaikuttaa pituuskehityksen ennusteeseen huomattavasti.

Seuraavassa tarkastellaan metsätyypin ja pituusboniteetin vastaavuutta ja verrataan uuden MELA-mallin pituusboniteettiennusteita eräisiin aikaisempiin tutkimuksiin. Vuokila ja Väliaho (1980) esittivät viljeltyjen havupuunmetsiköiden pituusboniteettimallit perustuen talousmetsistä poimittuun näytteeseen. Rinnastus metsätyyppeihin tehtiin vertaamalla tutkimuksen valtapituuskehitystä siihenastisiin kotimaisiin kasvu- ja tuotossarjoihin. Gustavsen (1980) esitti luontaisesti syntyneiden talousmetsien pituusboniteettimallit männylle ja kuuselle. Aineistona oli otos valtakunnan metsien kolmannen inventoinnin koealoista täydennettynä parhaimpien metsätyyppien männiköillä INKA-aineistosta ja näytteeseen perustuvasta Vuokilan (1965) männikköaineistosta. Gustavsenin (1980) esittämä pituusboniteetin ja metsätyypin vastaavuus perustuu mallien laadinta-aineistoon. Lisäksi valtapituuden iänmukaista kehitystä tarkastellaan Koiviston (1959) kokoamissa kasvu- ja tuotostaulukoissa esitettyjen luonnonnormaalien ja toistuvasti harvennettujen metsien kehityssarjojen avulla. Molemmat perustuvat näytteeseen.

Vertailua vaikeuttaa erilainen valtapituuden määritelmä kuin vertailututkimuksissa ja se, että MELAn valtapituusmallissa käytetään rinnankorkeuskäikää kokonaisuuden asemasta. MELA-mallin valtapituus on aina hieman pienempi kuin perinteinen sataan hehtaarin paksuimpaan puuhun perustuva valtapituus. Ero perinteisen valtapituuden ja tässä käytetyn valtapituuden välillä on keskimäärin alle 5 %. Vertailussa on käytetty rinnankorkeuden indeksi-ikäenä 50 vuotta, johon muiden tutkimusten tulokset on muunnettu. Muunnokseen tarvittavana ikälisäyksenä käytettiin suoraan Vuokilan ja Väliahon (1980) ja Gustavsenin (1980) julkaisuissa esitettyjä valtapituusboniteetin mukaisia arvoja. Koiviston (1959) kokoamissa kasvu- ja tuotostaulukoissa ikälisäys saatiin graafisella tasoituksella olettamalla, että taulukossa esitetty valtapituuden kehitys kulkee kokonais-

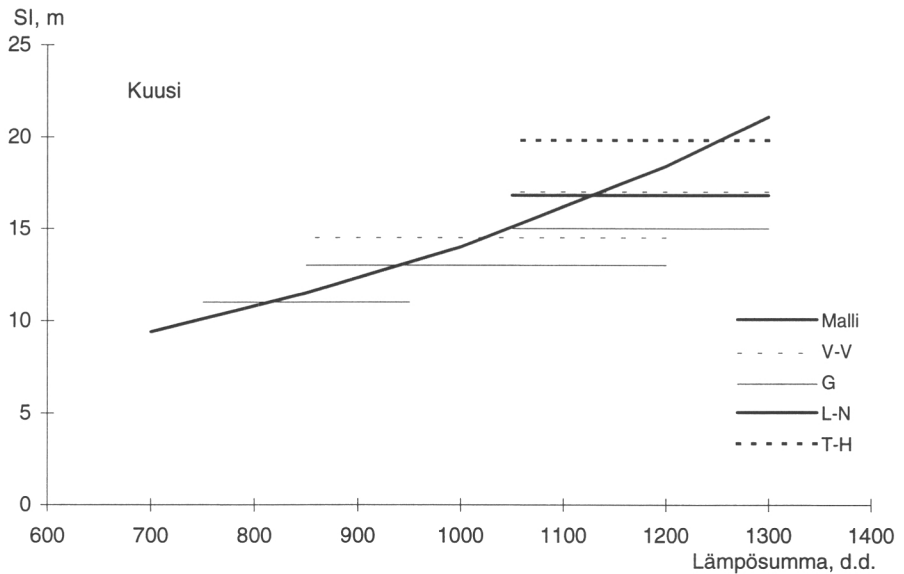
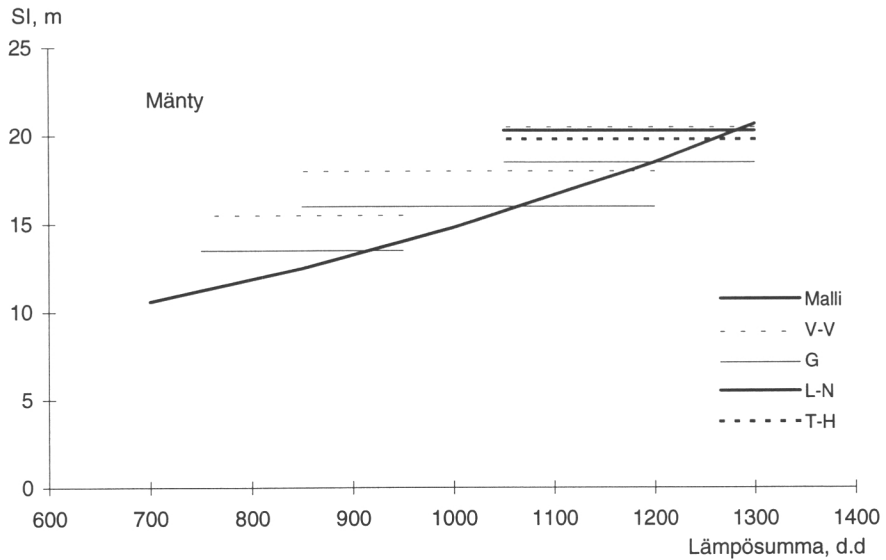
iän ja valtapituuden määräämässä koordinaatistossa origon kautta.

Pituusboniteetti vaihtelee huomattavasti kunkin kasvillisuusalueen sisällä lämpösumman funktiona (kuva 4). Tuoreella kankaalla männiköissä Gustavsenin (1980) esittämät talousmetsien pituusboniteetit sijoittuvat MELA-mallilla ennustetun pituusboniteetin lämpösumman mukaiselle vaihtelualueelle. Vuokilan ja Väliahon (1980) esittämät kasvupaikkatyyppien vastinboniteetit tuoreen kankaan männiköille ovat hieman korkeampia. Kasvu- ja tuotto- taulukoiden pituusboniteetit ovat samalla tasolla kuin Vuokilan ja Väliaho (1980) esittämät. Tuoreen kankaan kuusikoissa kaikkien vertailussa mukana olevien tutkimusten pituusboniteetit ovat MELA-mallilla ennustetun pituusboniteetin lämpösumman mukaisella vaihtelualueella. Tuoreella kankaalla MELA-mallin pituusboniteettiennuste männylle on koko tarkastelualueella suhteellisesti alempana verrattuna muihin tutkimuksiin kuin vastaava ennuste kuuselle. Poikkeuksen tekee Etelä-Suomen kasvillisuusalue.

MELA-mallilla ennustetun männikön pituusboniteetin ero tuoreen ja kuivahkon kankaan välillä (2,1 m) on suunnilleen sama tai hieman pienempi kuin vertailututkimuksissa (2,2–3,0 m) (taulukko 4). Samoin lehtomaisen kankaan ja tuoreen kankaan männiköiden MELA-mallilla ennustettujen pituusboniteettien ero (0,4 m) on samaa suuruusluokkaa luonnonnormaalien metsien kehityssarjoissa (0,5 m). Sen sijaan Vuokilan ja Väliahon (1980) sekä Gustavsenin (1980) mukaan näiden kasvupaikkatyyppien pituusboniteettiero on huomattavasti suurempi (2,5 ja 5,0 m). MELA-mallin pituusboniteettiennusteen ero on kuivahkon ja kuivan kankaan välillä (1,9 m) selvästi pienempi kuin vertailututkimuksissa (5,3–2,5).

MELA-malleilla männylle ja kuuselle ennustettujen pituusboniteettien välinen ero tuoreella kankaalla on lähes olematon (0,2 m). Toistuvasti harvennettujen metsien tuotossarjoissa (Koivisto 1959) ei myöskään ole eroa männyn ja kuusen välillä. Sen sijaan muissa vertailututkimuksissa ero on 3,5 m männyn hyväksi.

Lehtomaisella kankaalla MELA-mallin ennusteet luontaisesti syntyneille hies- ja rauduskoivuille ovat saman tasoisia luonnonnormaalien ja toistuvasti harvennettujen



Kuva 4. Männiköiden ja kuusikoiden rinnankorkeusikään perustuva pituusboniteetti (SI) tuoreella kankaalla eri tutkimusten mukaan lämpösunnan funktiona. Vertailututkimusten pituusboniteetit on esitetty kasvillisuusvyöhykkeen pituisina janoina lämpösunnan suhteen (Etelä-Suomi, Pohjois-Pohjanmaa ja Perä-Pohjola). L-N on luonnonnormaalien täystiheyden kehityssarja (Koivisto 1959), T-H on toistuvasti harvennettujen kehityssarja (Koivisto 1959), G on Gustavsenin (1980) luontaisesti syntyneiden talousmetsien pituusboniteetti ja V-V on Vuokilan ja Väliahon (1980) viljelymetsien pituusboniteetti. Korkeus merenpinnasta on 100 m, merisyys- ja järvisyysindeksit ovat 0 %.

metsien tuotossarjojen kanssa (Koivisto 1959). Lehtomaisen ja tuoreen kankaan välinen ero on MELA-mallin mukaan pieni (0,3 m), kun se luonnonnormaalien metsien tuotossarjojen mukaan on huomattava (3,7 m).

Taulukko 4. Rinnankorkeusikään perustuva pituusboniteetti eri tutkimusten perusteella puulajeittain ja kasvupaikkatyypeittäin. Lämpösumma on 1200 d.d., korkeus merenpinnasta on 100 m, merisyys- ja järvisyyssindeksit ovat 0 %. L-N on luonnonnormaalien täystiheiden kehityssarja (Koivisto 1959), T-H on toistuvasti harvennettujen kehityssarja (Koivisto 1959), G on Gustavsenin (1980) luontaisesti syntyneiden talousmetsien pituusboniteetti ja V-V on Vuokilan ja Väliahon (1980) viljelymetsien pituusboniteetti. Suluissa MELA-malliin sisältyvät arviot sellaisista ositteista, joista ei ollut havaintoja.

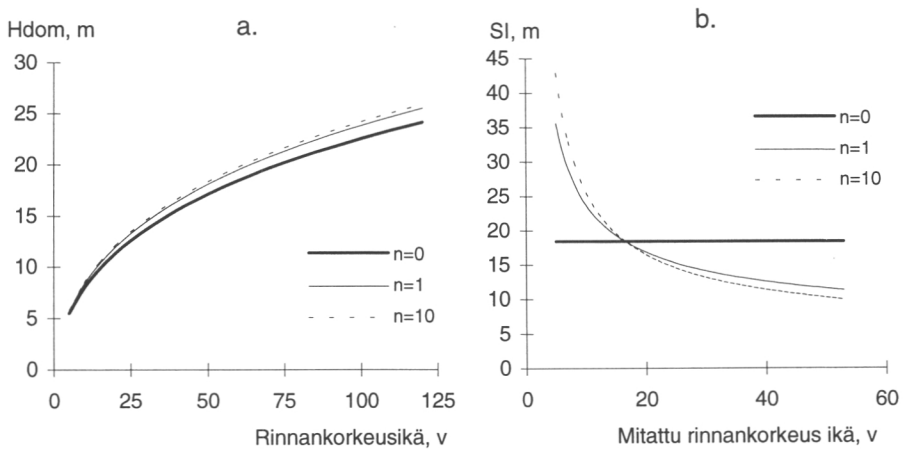
Kasvupaikka- tyyppi	MELA	L-N	T-H	G	V-V	MELA	L-N	T-H
	Mänty					Raudus		
Lehtomainen	18,9	20,8		23,5	23,0	22,4	22,0	22,7
Tuore	18,5	20,3	19,8	18,5	20,5	22,1	18,3	
Kuivahko	16,4	17,6	17,6	16,0	17,5	(17,5)		
Kuiva	14,5	13,6	12,3	13,5	13,0	(13,9)		
	Kuusi					Hies		
Lehtomainen	21,8	19,5	22,0	17,0	20,0	18,9		18,5
Tuore	18,3	16,8	19,8	15,0	17,0	18,7		
Kuivahko	(15,2)			12,5	15,0	(14,8)		
Kuiva	(11,6)					(11,8)		

Pituusboniteetin tarkennus pituus- ja ikämittauksin

Perinteisellä menetelmällä määritetty pituusboniteetti on yleensä luotettavampi kuin pelkkiin kasvupaikkamuuttujiin perustuva pituusboniteetti (Tamminen 1994). Perinteinen pituusbonitointi ei kuitenkaan ota huomioon valtapituuden ja iän määrittämiseen sisältyvää otantavirhettä. MELAn uusi valtapituusboniteetin määrittäminen tarkentaa kasvupaikkamuuttujien avulla tehtyä valtapituuden ennustetta puiden pituus- ja ikämittausten avulla. Mitä useampi pituusmittaus metsiköstä tehdään sitä luotettavampaa puustotieto on ja sitä enemmän kasvupaikkamuuttujien avulla

ennustettua pituuskehitystä korjataan kohti mittaustulosten keskiarvoa (kuva 5). Jo yksi ikä- ja pituushavainto korjaa mallin ennustetta huomattavasti ja lisähavainnot enää vähän.

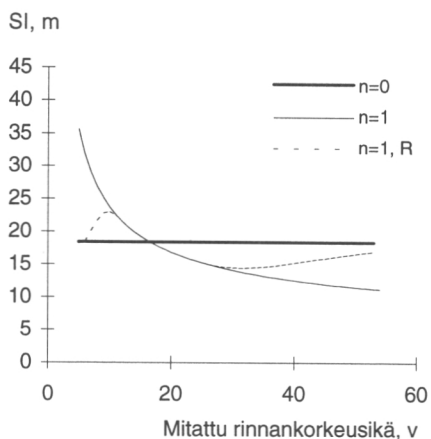
MELA-malli ei ota huomioon mahdollista mittausvirhettä metsikön iässä ja puiden pituuksissa. Kalibrointiin käytetään yksittäisten puiden pituuksia, mutta rinnankorkeusikänsä metsikön ikää. Jos metsikön ikä perustuu vain yhteen ikäkairaukseen, siihen sisältyy satunnaisvirhettä, jonka suuruutta ei tiedetä. Mitä enemmän ikämittauksia tehdään sitä pienemmäksi iän satunnaisvirhe jää. Metsikön rinnankorkeusiän suhteellisen luotettava määrittäminen on onnistuneen kalibroinnin edellytys, koska virhe iässä vaikuttaa voimakkaasti kalibroitukorjauksen suuruuteen. Kuitenkin käytännön metsän inventointiaineistoissa metsikön rinnankorkeusiän määrittäminen voi sisältää suurenkin virheen. Mittausvirheiden aiheuttamaa pituuskehityksen tarkennuksen yliarvion riskiä pienennetään tarkennuskorjauksen



Kuva 5. Ikä- ja pituusmittausten kalibroitivaikutus, kun on mitattu yksi tai kymmenen koepuuta. Puulaji on mänty, lämpösusuma on 1200 d.d., korkeus merenpinnasta on 100 m, merisyys- ja järvisyyksindeksit ovat 0 % ja kasvupaikkatyyppi on tuore kangas. Kasvupaikkamuuttujien avulla ennustettu 10 m:n pituus saavutetaan 15,5 vuoden rinnankorkeusiällä. Kuvassa a. on metsikön pituuskehitys (H_{dom}) kasvupaikkamuuttujien funktiona ja kalibroitu pituuskehitys, kun koepuiden pituus on 10 m 10 vuoden rinnankorkeusiällä. Kuvassa b. on rinnankorkeusikänsä perustuva pituusboniteetti (SI), kun koepuita ei ole mitattu tai kun koepuiden pituus on 10 m ja mitattu rinnankorkeusikä vaihtelee välillä 5–50 vuotta.

itseisarvolle asetetun maksimin avulla. Mikäli ikä- ja pituusmittaukset edellyttävät maksimia suurempaa korjausta, mittaustiedoissa oletetaan olevan virhettä ja korjausta ei tehdä täysimääräisenä. Jos ikä- ja pituusmittausten kautta kulkevan pituuskehityskäyrän ja kasvupaikkamuuttujille ennustetun käyrän ero on hyvin suuri, kasvupaikkamuuttujiin perustuvaa ennustetta ei korjata lainkaan kohti mitausten keskiarvoa (kuva 6).

Kun pituusboniteetti ennustetaan pelkkien kasvupaikkamuuttujien avulla, saadaan mallilla valtapituuden iänmukainen kehitys ja pituusboniteetti suoraan neljälle tärkeimmälle puulajille. Tarkennuksessa käytetään kuitenkin vain pääpuulajin ikä- ja pituushavaintoja. Valtapuiden pituuskehitys ennustetaan muille puulajeille olettaen, että suhteellinen tarkennuskorjaus on niillä yhtä suuri kuin pääpuulajilla. Kalibroitaessa pituuskehityksen ennustetta ikä- ja pituusmittausten avulla luetaan sekametsissäkin metsikön valtapuihin puulajista riippumatta kaikki pohjapinta-alalla painotettua keskiläpimittaa suuremmat puut. Puun suhteellisen koon laskentaan tarvittava keskiläpimitta on kaikkien näiden puiden keskiläpimitta.



Kuva 6. Kalibrointikorjauksen rajoittamisen vaikutus pituusboniteetin ennusteeseen, kun yksi koepuu on mitattu. R tarkoittaa rajoitettua kalibrointia.

Tarkastelu

MELAn uusi pituusboniteettiin perustuva kasvupaikan kuvausjärjestelmä on kaksitasoinen hierarkkinen järjestelmä. 1) Kun puustoa ei ole, tai siitä ei ole käytettävissä pituus- ja ikämittauksia, malli ennustaa valtapuuston rinnankorkeus- iän mukaisen valtapituuden kehityksen ja pituusboniteetin kasvupaikkamuuttujien funktiona. 2) Pituusbonitointiin kelloisessa metsikössä ennustetta voidaan tarkentaa mittaamalla valtapuiden pituuksia ja metsikön ikä.

Mallilla saadaan pituusennuste aina kaikille tärkeimmille puulajeille. Puulajeittaiset ennusteet eivät kuitenkaan ole tarkkaan ottaen vertailukelpoisia, koska mallissa selittävänä muuttujana olevan metsätyypin määrittäminen ei ole täysin puulajista riippumaton (Ojansuu 1996). Myöskään käytetyt kasvupaikkatyyppien tarkenteet eivät ole täysin riippumattomia puustosta.

Pituusboniteetin ja metsätyypin vastaavuutta koskevat eri tutkimusten tulokset poikkeavat melkoisesti toisistaan. Olennainen ero vanhojen rinnastusten ja uuden pituuskehitysmallin avulla tehdyn rinnastuksen välillä on alueellisen vaihtelun erilainen kuvaaminen. MELAn uudessa pituuskehitysmallissa kasvillisuusalueen sisäistä alueellista vaihtelua on selitetty alueellisilla muuttujilla; lämpösummalla, merisyydellä, järvisyydellä ja korkeudella meren pinnasta. Sen sijaan aikaisemmat metsätyypin ja pituusboniteetin rinnastukset perustuvat tietyn kasvillisuusalueen levinneisyysalueelle sattuneiden koealojen keskiarvoon, lukuunottamatta vasta ilmestynyttä tutkimusta Pohjanmaan rannikon ja sisämaan puuntuotoskyvyn vaihtelusta (Karlsson 1996).

Männyn kasvupaikkojen viljavuusvaihtelu on suurempi kuin kuusen kattaen monissa tapauksissa kasvupaikat lehtomaisesta kankaasta kuiviin kankaisiin. MELAn pituuskehitysmallin mukaan eri tyyppiryhmien välinen vaihtelu on männyllä suppeampi kuin vertailututkimuksissa. Erityisesti lehtomaisen kankaan ja kuivan kankaan pituusboniteetit ovat lähempänä keskiviljavien maiden pituusboniteetteja kuin aikaisemmissa tutkimuksissa. Syy voi olla joko MELA-mallin tai vertailututkimusten aineistoissa tai

molemmissa. MELAn pituuskehitysmallin laadinta-aineisto voi olla supistunut kasvupaikkatyypijakauman suhteen, että aineisto edustaa lehtomaisen kankaan huonointa laitaa ja kuivan kankaan parasta laitaa. Toisaalta aikaisempien tutkimusten aineistojen alueellinen jakauma voi olla harhainen siten, että niissä karut kankaat sijaitsevat ilmastoalueen epäedullisimmissa osissa. MELAn pituuskehitysmallissa aineiston alueellisen epäedustavuuden vaikutus on eliminoitu selittävien alueellisten muuttujien avulla.

Aikaisempia tutkimuksia pienempi ero tuoreen kankaan männikön ja kuusikon pituusboniteetin välillä selittyy suurelta osin niiden erilaisella alkukehityksellä ennen rinnankorkeutta.

Lämpösumma vaikuttaa mallin antamaan ennusteeseen voimakkaasti. Mallin laadinta-aineistossa lämpösumma on ennustettu kullekin koealalle jakson 1951–1980 keskiarvona. Lisäksi siihen sisältyy ennustevirhettä, joka voi olla systemaattista ja satunnaista. Jotta lämpösumman avulla kuvattu alueellinen vaihtelu kuvautuisi ennusteissa oikein, tulee pituuskehitysmallia sovellettaessa käyttää samalla perusteella ennustettuja lämpösummia kuin laadinta-aineistossa. Sama koskee merisyys- ja järvisyysindeksejä.

Kalibroitaessa pituuskehitysmallia puustomittausten avulla, on metsikön rinnankorkeusiän oikea määrittäminen ensiarvoisen tärkeää. Kalibroitimenetelmä olettaa metsikön rinnankorkeusiän ja puiden pituudet oikein mitatuiksi. Mikäli niihin sisältyy mittausrvirhettä, kalibrointi tapahtuu liian voimakkaana. Mallissa on ainoastaan oletettu, että hyvin paljon kasvupaikkamuutujien avulla ennustetusta pituuskehityksestä poikkeavat mittaushavainnot ovat todennäköisesti virheellisiä ja niiden kalibrointivaikutusta on rajoitettu.

Vaikka erilaiset kasvupaikkatekijöiden kombinaatiot johtavat samaan pituusboniteettiin, niillä voi olla erilainen vaikutus puun läpimitan kasvuun. Tämä ilmenee esim. ruotsalaisissa bonitointimalleissa, joissa tuotos tietyllä pituusboniteetilla on maantieteellisen sijainnin ja kosteusolojen funktio (Hägglund ja Lundmark 1981), ja läpimitan kasvumalleissa, joissa pituusboniteetin antamaa kasvupaikan kuvausta on täydennetty topografiaa, kosteusoloja ja

maantieteellistä sijaintia kuvaavilla muuttujilla (Söderberg 1986, Persson 1992). Koska erilaiset kasvupaikkatekijöiden yhdistelmät vaikuttavat eri tavoin läpimitan ja pituuden kasvuun, on MELAn uusissa läpimitan kasvumalleissa pituusboniteettia täydentämässä muita kasvupaikkamuuttujia. Pituusboniteetin käyttö kasvupaikan kuvauksen päämuuttujana on kuitenkin perusteltua, koska sen avulla läpimitan ja pituuskasvun ennusteiden keskinäinen yhteensopivuus on helpommin toteutettavissa kuin käyttämällä kasvupaikkamuuttujia suoraan eri mallien selittäjinä.

Valtapituuden kehitysmalli perustuu nykyisessä muodossaan pääosin INKA-aineistoon. Se kalibroidaan valtakunnan metsien inventoinnin pysyvien koalojen avulla ennen kytkemistä osaksi MELAa. Samalla edustavuus puulajien harvinaisemmilla kasvupaikoilla saadaan paremmaksi. Vuonna 1997 aloitetaan Metlassa uusi hanke moniulotteisen kasvupaikkakuvauksen perusteiden selvittämiseksi. Siinä pyritään usean kasvupaikkamuuttujan avulla kuvaamaan kasvupaikka metsätalouden tarpeisiin. Osana aloitettavaa tutkimusta kehitetään tässä esitettyä pituusboniteetin ennustusjärjestelmää. Tavoitteena on lisätä järjestelmän hierarkisuutta siten, että perustaso perustuu puustosta riippumattomiin kasvupaikkamuuttujiin, kuten maaperään, topografiaan ja ilmastoon. Puustoriippumatonta ennustetta voidaan tarkentaa kasvillisuusmuuttujilla (esim. metsätyyppi) ja edelleen tässä esitetyllä tavalla puustomittauksien avulla. Samalla tutkitaan mahdollisuutta käyttää paikkatietoja perustason mallin selittäjinä.

Kirjallisuus

- Gustavsen, H.G. 1980. Talousmetsien kasvupaikkaluokittelu valtapituuden avulla. *Folia Forestalia* 454. 31 s.
- , Roiko-Jokela, P. & Varmola, M. 1988. Kivennäismaiden talousmetsien pysyvät (INKA ja TINKA) kokeet. Suunnitelma, mittausmenetelmät ja aineistojen rakenteet. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 292. 212 s.
- Hägglund, B. & Lundmark, J-E. 1981. Boniteringen. Diagram och tabeller. *Skogsstyrelsen*. 70 s.
- Karlsson, K. 1996 Kasvupaikkojen puuntuotoskyvyn ja puuston kasvun alueellinen vaihtelu Pohjanmaan rannikolta sisämaahan. *Folia Forestalia* 1996(2):113–132.

- Koivisto, P. 1959. Kasvu- ja tuottotaulukoita. Summary: Growth and yield tables. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 51(8). 49 s.
- Lahti, T. 1995. Understorey vegetation as an indicator of forest site potential in southern Finland. *Acta Forestalia Fennica* 246. 68 s.
- Lappi, J. & Bailey, R.C. 1988. A height prediction model with random stand and tree parameters; An alternative to traditional site index methods. *Forest Science* 34(4):907–927.
- Lehto, J. 1969. Käytännön metsätyypit. 2. painos. Kirjayhtymä, Helsinki. 98 s.
- Mikola, P. 1963. Ajatuksia metsätyypeistä ja niiden nimistöstä. *Metsätaloudellinen Aikakauslehti* 4. 7 s.
- Ojansuu, R. 1996. Kasvupaikan kuvaus metsän kehitystä ennustettaessa. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 589:120–129.
- & Henttonen, H. 1983. Kuukauden keskilämpötilan, lämpösunnan ja sademäärän paikallisten arvojen johtaminen ilmatieteen laitoksen mittautustiedoista. *Silva Fennica* 17(2):143–160.
- Hynynen, J., Koivunen, J. & Luoma, P. 1991. Luonnonprosessit metsälaskelmassa (MELA) – Metsä 2000-versio. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 385. 59 s.
- Persson, O.A. 1992. En productionsmodell för tallskog i Sverige. Summary: A growth simulator for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences, department of forest yield research. Report 31. 206 s.
- Prosser, B., Rasbash, J. & Goldstein, H. 1991. ML3, Software for three-level analysis. Institute of Education, University of London. 142 s.
- Söderberg, U. 1986. Functioner för skogliga productionsprognoser. Summary: Functions for forecasting of timber yields. Swedish University of Agricultural Sciences, section of forest mensuration and management. Report 14. 251 s.
- Tamminen, P. 1994. Pituusboniteetin ennustaminen kasvupaikan ominaisuuksien avulla Etelä-Suomen kangasmetsissä. *Folia Forestalia* 819. 26 s.
- Vuokila, Y. 1965. Functions for variable density yield tables for pine based on temporary sample plots. Seloste: Tilapäiskoealoihin perustuvat yhtälöt männyn kasvu- ja tuotostaulukoita varten. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 60(4). 86 s.
- & Väliäho, H. 1980. Viljeltyjen havumetsiköiden kasvatusmallit. Summary: Growth and yield models for conifer cultures in Finland. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 99(2). 271 s.

Yhteensä 18 viitettä.

Hannu Hökkä

Suometsien uudet kasvu- ja pituusmallit MELA-järjestelmässä

Taustaa

Erillisten kasvumallien laatimista ojitetuille turvemaille voidaan perustella sillä, että ojitusalueiden ja kivennäismaiden metsät poikkeavat toisistaan oleellisesti rakenteensa ja metsikkökehityksensä puolesta, ja että ojitusalueiden osuus metsämaan alasta, puuston määrästä ja kasvusta on merkittävä, 20–25 % (Paavilainen ja Tiuhonen 1988). Tehdäessä simulointeja metsävarojen pitkän ajan kehityksestä ojitusalueiden metsien ennusteiden on oltava luotettavuudeltaan samaa tasoa kuin kivennäismaidenkin. Ruotsissa, missä ojitusalueiden pinta-ala on 1,4 milj. ha (Hånell 1990), on ollut jo pitkään käytössä ojitusalueiden metsien kasvumallit (Hägglund 1981, Hånell 1988).

Ojitetuilla soilla lähtöpuuston erikokois rakenne poikkeaa kivennäismaiden keskimääräisestä ja rakenteen muutos ojituksesta kuluneen ajan lisääntyessä on huomattava (Hökkä ja Laine 1988). Ojituksella saadaan aikaan kasvun tason muutos, joka vaihtelee ojituksesta kuluneen ajan mukaan (Seppälä 1969). Myös myöhemmillä kuivatusilanteen muutoksilla on selkeä vaikutus kasvuun. Nämä ovat keskeisiä ojitusalueiden kehitykseen liittyviä ilmiöitä. Niitä kuvaavat muuttajat on oltava tavalla tai toisella kasvumalleissa mukana ja niiden vaikutus on pystyttävä malleilla ennustamaan, jotta voidaan odottaa kehitysennusteiden olevan luotettavia. Lisäksi ojitusalueiden kasvupaikkaluokittelu poikkeaa kivennäismailla käytettävästä.

Vanhassa MELA-versiossa suopuiden pohjapinta-alan kasvumallien laadinta-aineistona käytettiin laajaa ojitusalueinventointiaineistoa (Keltikangas ym. 1986). Mallien rakenne

on sama kuin kivennäismaiden kasvumalleissa, mutta malleissa on mukana parametreja, jotka ovat spesifejä ojitusalueille (Ojansuu ym. 1991). Näillä on pyritty ottamaan huomioon kasvupaikkaeroja ja ojituksenjälkeistä kasvupaikkojen puuntuotoskyvyn muutosta. Pituuskasvun ennustamiseen on käytetty samaa mallia kuin kivennäismailla, mutta kasvun tasoa on korjattu kuivatusasteluokittain.

Lähtökohta uusien mallien laatimiselle oli ojitusalueilta kerätty edustava aineisto. Rajoitteina olivat mallien MELA-yhteensopivuus sekä se informaatio, mitä inventoinneissa oli kerätty. Näissä puitteissa voitiin laatia puulajeittaiset mallit jokaisen parametrin ja muuttujan osalta mahdollisimman hyvin. Samalla pyrittiin kuitenkin siihen, että mallit olisivat rakenteeltaan pitkälle yhdenmukaisia vastaavien uusien kivennäismaiden kasvumallien kanssa.

Kasvupaikan kuvaus perustuu pintakasvillisuuden pohjalta tehtyyn ravinteisuusluokitteluun ja pääryhmäjakoon. Kasvupaikkaluokkia yhdisteltiin puulajeittain vähälukuisemmaksi määräksi yhtenäisiä tuotosluokkia. Puuston kehitys kuvataan puulajeittain laadituilla puun pohjapinta-alan kasvumalleilla ja staattisilla pituusmalleilla. Kasvumalleilla ennustetaan puiden kasvu viiden vuoden simulointijaksolla ja pituusmalleilla ennustetaan puiden pituudet simulointiaskeleen lopussa.

Aineistot

Etelä-Suomesta ja Oulun läänistä oli käytettävissä ojitusalueilla sijaitsevien VMI8:n pysyvien koealojen aineisto. Neljän pohjoisimman metsälautakunnan alueelta voitiin käyttää turvemaiden pysyvien kasvukoealojen (SINKA) aineistoa (Penttilä ja Honkanen 1986, Mielikäinen ja Gustavsen 1993). Aineisto painottui Oulun läänin alueelle ja Keski-Pohjanmaalle, missä myös ojitusalueiden pinta-alaosuus on suurin. Kaikkiaan aineistossa oli 20 644 mäntyä, 16 593 hieskoivua ja 5 645 kuusta. Pituusmalleissa käytettiin vain koepuuaineistoa, joten puumäärät olivat paljon vähäisempiä (3 450 mäntyä, 2 133 koivua ja 769 kuusta). Aineistot koostuivat pääasiassa pienikokoisista

puista, koska valtaosa ojitusalueista oli 1980-luvun puoli-välissä n. 20–25 vuotta vanhoja. Puiden epätasaisesta kokojakaumasta aiheutui ongelmia mallien laadintavaiheessa, koska suurimpien puiden kasvu jouduttiin kuvaamaan vähäisten havaintojen pohjalta.

Kasvupaikkojen tuotosluokittelu

Kasvupaikat luokiteltiin maastossa Huikarin (1952, 1974) järjestelmän ravinteisuusluokkiin sekä tehtiin pääryhmäjako korpiin ja rämeisiin. Ojitetut metsittyneet nevat on VMI:ssä luettu etupäässä rämeiksi. Ravinteisuusluokkia oli rämeillä 6 ja korvissa 4. Kukin puulaji saattoi siis esiintyä korvella tai rämeellä, mänty kaikissa em. ravinteisuusluokissa, koivu ja kuusi luokissa 1–4. Nämä alkuperäiset luokat ryhmiteltiin kunkin puulajin kasvumallissa uudelleen tavoitteena päästä pienempään määrään luokkia. Malleja laadittaessa ne alkuperäiset luokat, joiden välillä ei ollut eroja kasvun tasossa tai kasvun ja läpimitan välisen riippuvuuden kulmakertoimessa, yhdistettiin (Hökkä ym. 1996). Yhdistämisessä käytettiin tukena aikaisempia selvityksiä ojitettujen soiden luokittelusta ja suokasvupaikkojen tuotoseroista (Laine 1989).

Tällä periaatteella männylle saatiin neljä, koivulle viisi ja kuuselle kolme eri tuotosluokkaa (taulukko 1). Männyllä oman luokkansa muodostivat kaikki korpikasvupaikat, jotka ovat alunperin enimmäkseen metsäisiä ja muodostavat suhteellisen yhtenäisen minerotrofisten soiden ryhmän. Toisen tuotosluokan muodostivat viljavimmat rämeet (letto- ja ruohorämeet). Kolmas luokka muodostui suursara- ja piensaratason rämeistä. Tätä karummat rämeet muodostivat viimeisen ryhmän. Männyllä lisäksi lisämääretunnus, joka kuvasi rahkamättäisyyden tai rimpisyyden esiintymistä, pienensi kasvua merkitsevästi.

Koivun mallissa korvet jakaantuivat kahteen tuotosluokkaan; lehto- ja ruohotason korpiin, sekä mustikka- ja puolukkatason korpiin. Rämeillä erottuivat omiksi luokikseen letto- ja ruohorämeet, suursaratason rämeet sekä heikoimpana tuotosluokkana piensaratason rämeet.

Taulukko 1. Puulajeittaiset tuotosluokat.

Puulaji	Tuotosluokka	Luokan sisältämät suotyypit
Mänty	1	Korvet
	2	Letto- ja ruohorämeet
	3	Suursara- ja piensaratason rämeet
	4	Isovarpurämeet ja karummat
Hieskoivu	1	Lehto-, letto- ja ruohokorvet
	2	Mustikkakorvet ja karummat
	3	Letto- ja ruohorämeet
	4	Suursararämeet
	5	Piensararämeet
Kuusi	1	Letto-, lehto- ja ruohotason korvet ja rämeet
	2	Mustikka- ja suursaratason korvet ja rämeet
	3	Puolukka- ja piensaratason korvet ja rämeet

Kuusella pääryhmäjaolla korpiin ja rämeisiin ei ollut merkitystä. Luokittelu tapahtuikin yhdistämällä molempien pääryhmien ravinteisuustasoluokkia. Parhaan tuotosluokan muodostivat lehto/lettotason sekä ruohoisen tason suot. Toiseen luokkaan kuuluivat mustikkaisen ja suursaraisen tason suot ja kolmanteen puolukkaisen ja piensaraisen tason suot.

Määriteltyjä luokkia voitaneen verrata Laineen (1989) esittämään ehdotukseen ojitettujen soiden luokitteluksi, vaikka sitä ei olekaan tehty puulajeittain. Tässä tutkimuksessa kuvatuista tuotosluokista männyn luokka 2 ja koivun luokka 3 ovat melko lailla yhdenmukaisia niihin sisältyvien alkuperäisten suotyyppien puolesta Laineen (1989) määrittelemän mustikkaturvekangas II:n kanssa. Samalla tavalla männyn luokka 3 ja koivun luokka 4 vastaavat puolukkaturvekangas II:ta. Valtaosa luokkiin sisällytetyistä suotyypeistä on sekatyypin soita letto-, ruoho- ja suursaratasoilta. Niiden puuntuotoskyky suhteessa tuotokseen ojittamattomana on suuri. Männyn heikoin kasvupaikka sisältää Laineen varputurvekankaan ja jäkäläturvekankaan. Laine on sijoittanut alkuperäiset korpityypit kolmeen turvekan-gastyyppiin ravinteisuuden mukaan, mikä on samantapainen jako kuin kuusen kasvumallissa tehty tuotosluokitus.

Metsikön pitkän ajanjakson keskimääräistä lämpösummaa käytettiin kuvaamaan keskimääräisiä kasvuoloja (Ojansuu ja Henttonen 1983). Lämpösumman lisäksi mallilla laskettiin metsiköiden järvisyys- ja merisyysindeksit.

Kasvumallit

Kasvumalleilla ennustetaan yksittäisen puun tulevan viiden vuoden jakson pohjapinta-alan kasvu. Puun kasvun oletettiin määräytyvän elävän biomassan määrän ja laadun sekä ulkoisten kasvutekijöiden, kuten kilpailun, maantieteellisen aseman ja kasvupaikan ominaisuuksien mukaan (ks. Jonsson 1969). Näiden tekijöiden kuvaamiseen olivat käytettävissä maastossa mitatut sekä mittauksista johdetut puu-, metsikkö- ja kasvupaikkatunnukset. Koska puun kasvuun turvemaiillakin vaikuttavat etupäässä samat kasvutekijät kuin kivennäismailla, olivat muuttujat paljolti samoja ja mallit siinä mielessä samanlaisia kuin kivennäismaiden kasvumallit. Edellisten lisäksi turvemaiilla käytettiin omia kasvupaikaluokkia sekä kasvupaikan vesitaloutta kuvaavia muuttujia. Malleissa käytetyt selittävät muuttujat on esitetty taulukossa 2 (Hökkä ym. 1996).

Puutasolla kasvua selitettiin ensisijaisesti puun läpimitalla, joka kuvasi puun tilaa jakson alussa. Metsikkötason kilpailun voimakkuutta kuvattiin männyllä metsikön pohjapinta-alalla ja kuusella pohjapinta-alamediaanipuun läpimitalla. Näiden tunnusten arvojen lisääntyminen pienensi yksittäisen puun kasvua. Koivulla ei löytynyt metsikkötason kilpailutunnusta, joka olisi merkitsevästi vaikuttanut kasvuun, luultavasti siksi, ettei aineistossa ollut runsaspuustoisia koivikoita. Kuusen pohjapinta-alaosuuden lisääntyminen metsikössä lisäsi kuusen kasvua. Koivulla sekä kuusen että koivun osuuden lisääntyminen lisäsivät kasvua. Kaikilla puulajeilla edellisellä 5-vuotisjaksolla tehty harvennus (luokkamuuttujalla kuvattuna) lisäsi yksittäisen puun kasvua.

Puiden välistä kilpailua kuvattiin puittain lasketulla kohdepuuta suurempien puiden yhteenlasketulla pohjapinta-alalla. Yläpuolisen pohjapinta-alan kasvaessa yksittäisen puun kasvu pieneni epälineaarisesti. Kasvun väheneminen oli sitä voimakkaampaa, mitä suuremmaksi yläpuolinen pohjapinta-ala kasvoi. Tämä johtuu metsiköiden erikokoisrakenteesta, jolloin kilpailu alkaa vaikuttaa selvemmin vasta kun ojitusalueille tyypillinen aukkoisuus on metsiköiden tihentyessä hävinnyt.

Taulukko 2. Kasvumalleissa käytetyt selittävät muuttujat. Kaikkien mallien vastemuuttuja oli puun viiden vuoden pohjapinta-alan kasvun logaritmi.

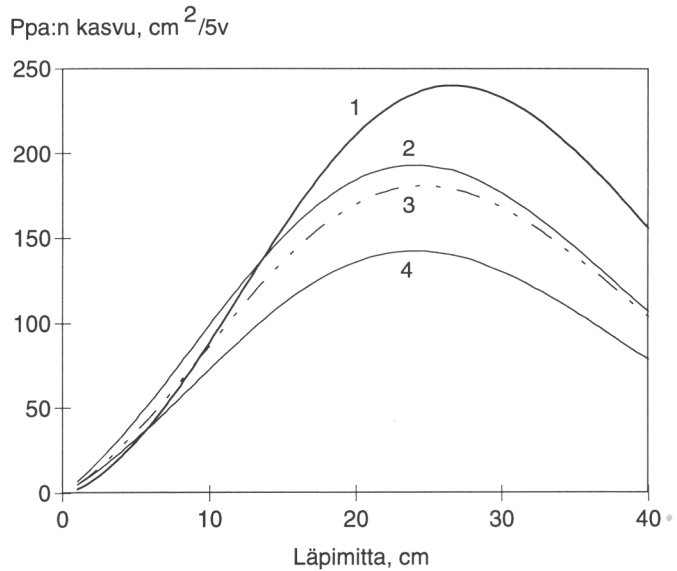
Muuttuja	Mänty	Hieskoivu	Kuusi
<i>Puun tila</i>			
$\ln(d_{13})$	x	x	
$\sqrt{d_{13}}$			x
$(d_{13})^2$	x	x	x
<i>Kilpailu</i>			
$\ln(\text{metsikön ppa})$	x		
D_{gM}			x
harvennus	x	x	x
koivu-%		x	
kuusi-%		x	x
yläpuolinen. ppa	x	x	x
$(\text{yläpuolinen. ppa})^2$	x	x	
<i>Kasvupaikka</i>			
lämpösumma		x	
$\sqrt{\text{lsumma} * \sqrt{d_{13}}}$	x		x
meri-indeksi		x	
tuotosluokat	x	x	x
ojitus 0–5 v	x	x	x
ojitus 11–25 v	x	x	
kunnostustarve	x	x	x
rahka/rimpi	x		

D_{gM} = pohjapinta-alalla painotettu keskilämpimitta.

Yläpuolinen ppa = Kohdepuuta suurempien puiden pohjapinta-ala

Lämpimitan vaikutus kasvuun vaihteli lämpösumman funktiona männyllä ja kuusella. Lämpösummalla oli lineaarinen vaikutus koivun kasvuun mutta vaikutus oli heikompi kuin havupuilla. Tämä johtunee havu- ja lehtipuiden välisistä fysiologisista eroista. Koivulla meren läheisyys (alle 20 km rannikosta, Ojansuu ja Henttonen (1983)) lisäsi kasvua.

Ojitusalueiden kasvumalleissa tarvittiin muuttujia, joilla voitiin kuvata kasvun tason vaihtelua kasvupaikan kuivatustilanteen mukaan. Maastossa kuivatustilanteen arvioimiseen oli käytetty luokkamuuttujia, jotka ilmaisivat lähi-aikoina tehdyn kunnostusojituksen tai sitten tämänhetkisen kunnostustarpeen. Maastossa arvioitu kunnostusojitustarve kuvattiin malleissa luokkamuuttujilla. Kasvu oli kaikilla puulajeilla selvästi alhaisempi, jos metsikössä oli arvioitu olevan ojituksen kunnostustarvetta.



Kuva 1. Esimerkki puun läpimitan ja kasvun riippuvuudesta männyn mallin eri tuotosluokissa 1–4 (ks. taulukko 1).

Ojituksen jälkeinen kasvun ajallinen tasovaihtelu voitiin ottaa malleihin ainoastaan luokkamuuttujan avulla, koska osassa aineistoa ojituksesta kulunutta aikaa ei oltu määritetty tarkasti. Ensimmäisen 5-vuotiskauden aikana kasvu oli alhaisin kaikilla puulajeilla. Männyllä ja koivulla kasvun huippu oli ajanjaksolla 11–25 vuotta ojituksesta, kun taas luokkien 6–10 vuotta ojituksesta ja yli 25 vuotta ojituksesta kasvu oli samaa tasoa. Kuusen kasvussa ei ollut merkittäviä tasoeroja ensimmäisen 5-vuotiskauden jälkeen. Mainitun luokkajaon käyttäminen latistaa kasvureaktion huippua, koska aikaisempien tutkimusten mukaan kasvun ojituksen jälkeinen maksimi sijoittuu luokkaan 10–15 vuotta ojituksesta, jonka jälkeen seuraa kasvun taantuma (Seppälä 1969, Miina 1994). Tässä aineistossa kyseistä 5-vuotiskokonaiskasvun ennuste jaksolle 11–25 vuotta ojituksesta on kuitenkin harhaton.

Heikuraisen ja Kuuselan (1964) sekä Seppälän (1969) mukaan ojitusreaktion voimakkuus (= nopeus ja kasvun maksimi) vaihtelevat puulajin, puun koon, kasvupaikan ja alueen maantieteellisen sijainnin mukaan. Kaikkien näiden yhdysvaikutusten mukaanotto ei ollut käytännössä järke-

vää, koska mallien kompleksisuus olisi nopeasti kasvanut. Lisäksi ajallisten yhdysvaikutusten merkityksen määrääminen inventointiaineistoista on epävarmaa mm. siitä syystä, että eri aikoina ojitusten kohteena olleiden soiden laatu on jonkin verran vaihdellut ja myös ojitusmenetelmät ovat muuttuneet. Edelleen aineiston jakauma useiden muuttujien suhteen oli hyvin epätasainen. Tässä työssä pyrittiin suhteellisen yksinkertaisiin rakenteisiin, joiden oletettiin tuottavan stabiileja malleja.

Kuvassa 1 on esimerkinomaisesti kuvattu puun kasvun ja läpimitan välinen riippuvuus männyn mallin eri tuotosluokissa kun kilpailu ei rajoita puun kasvua.

Pituusmallit

Ojitusalueiden metsät ovat erikokoisrakenteisia ja metsikön sisällä puiden pituusvaihtelu on suurempi kuin kivennäismaiden metsiköissä keskimäärin. Ryhmittäisen tilajakau- man vuoksi pienimmät puut eivät häviä puiden välisessä kilpailussa, vaan ne säilyvät aukkopaikoissa pitkään. Niin- pä puun pituuden ja läpimitan välinen riippuvuus voi myös vaihdella enemmän kuin tasakokoisemmissa kivennäis- maiden metsissä. Edelleen puuston rakenteen muutos oji- tuksen jälkeen on suurempi kuin kivennäismaiden metsien metsikkösuksessiossa. Tämä selittyy eri kokoisten puiden erilaisella ojitusreaktiolla (Seppälä 1969).

Pituusmalleissa puun pituuden oletettiin riippuvan läpi- mitasta seuraavan yhtälön mukaan:

$$\ln(H-1.3) = a - bd^c \quad (1)$$

missä

H = on puun pituus

d = läpimitta

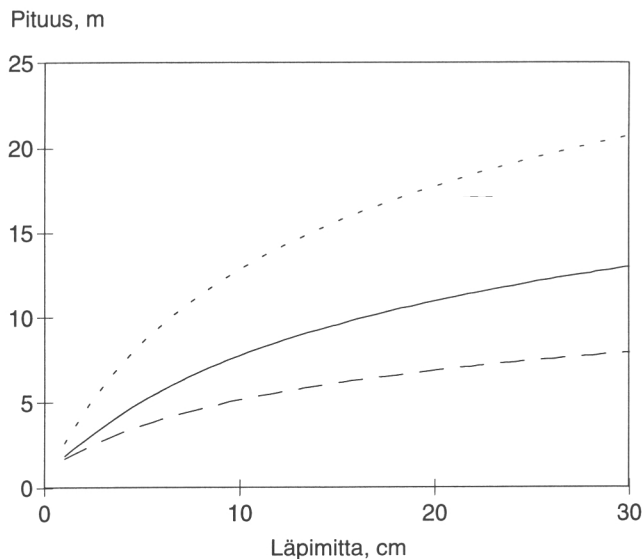
a, b, c = parametreja.

Parametrit a ja b, eli pituuskäyrän taso ja kulmakerroin kuvattiin metsikkö- ja puustotunnusten funktiona (Hökkä 1996). Yhtälö on eksponenttia c lukuunottamatta lineaari- nen. Eksponentin arvo määritettiin puulajeittain kokeile- malla. Sopivimmaksi c:n arvoiksi osoittautuivat männylle

−0,4, kuuselle −0,3 ja koivulle −0,7. Parametrien arvot olivat suhteellisen alhaisia, mikä selittynee suurella metsikön sisäisellä pituuden vaihteluvälillä.

Pituuskäyrän tasoa (a-parametri) selittivät kaikilla puulajeilla pohjapinta-alamediaanipuun läpimitta, metsikön pohjapinta-ala ja pohjoiskoordinaatti, koivulla lisäksi korkeus merenpinnasta ja luokkamuuttuja, joka ilmaisi edellisen 5-vuotiskauden aikana tehdyn harvennuksen. Samoin männyllä pituuskäyrän taso oli korkeampi harvennetuissa metsiköissä mutta myös keskiravinteisilla kasvupaikoilla.

Pohjoiskoordinaatti ja korkeus merenpinnasta vaikuttivat käyrään siten, että pituuskäyrä muuttui latteammaksi pohjoiseen päin. Harvennus nosti pituuskäyrän tasoa, koska lyhimpien puiden poistuminen harvennuksessa on todennäköisintä. Karuimmilla kasvupaikoilla ja toisaalta letoilla männyt eivät ole niin solakoita kuin on ruoho-, suursara- tai piensaratason soilla. Keskimäärin puiden pituus kasvoi, kun puuston keskimääräinen koko kasvoi tai puuston kokonaismäärä lisääntyi.



Kuva 2. Esimerkki malleilla lasketuista pituuskäyristä männiköissä, joissa puuston keskiläpimitta on 5 cm ja pohjapinta-ala on 5 m² (katkoviiva), ja vastaavasti 12 cm ja 11 m² (yhtenäinen viiva) sekä 25 cm ja 25 m² (pisteviiva). Arvot 12 cm ja 11 m² vastaavat laadinta-aineiston keskiarvoja.

Kulmakertoimen (b-parametri) vaihtelua selittivät pohjapinta-alamediaanipuun läpimitta ja metsikön pohjapinta-ala. Toisin sanoen, pituuskäyrän muoto vaihteli metsikön kehitysvaiheen mukaan siten, että saman läpimittainen puu sai eri pituuden metsiköissä, joissa oli erilainen pohjapinta-ala tai keskiläpimitta. Latteimmat pituuskäyrät olivat vasta-ohjitetuissa vähäpuustoisissa metsiköissä, missä pituus vaihteli vain vähän läpimitan kasvaessa (kuva 2). Pituuskäyrän tason ollessa alhainen myös kulmakerroin oli pieni kaikilla puulajeilla. Tämä riippuvuus oli heikointa kuusella.

Näiden mallien ominaisuutena on, että käyrän taso ja muoto muuttuvat metsikön ominaisuuksien mukaan. Pitkän aikavälin ennusteissa mallit ovat joustavia ja pystyvät sopeutumaan ojitusalueilla eteen tuleviin tilanteisiin, joissa metsikön rakenne voi muuttua suhteellisen paljon.

Kehittämistarpeita

Malleilla voidaan simuloida ojitusalueiden metsien kehitystä käyttäen muuttujia, jotka ovat turvemaiden kasvun ennustamisessa tärkeitä. Kasvumalleissa on kuitenkin osia, joihin on tässä vaiheessa esitetty vain alustava ratkaisu, ja joiden kuvaamista on tarkennettava. Tällaisia ovat metsänhoitotoimien vaikutuksen ennustaminen, eli kunnostus-ohituksen ja harvennusreaktion (Hynynen 1995) mallitus. Nykyisissä malleissa on vain luokkamuuttajat, joilla kasvun tasoa korjataan. Mallitustyötä ei helpota se, että käytännössä toimenpiteet tehdään yleensä samanaikaisesti, jolloin erillisiä vaikutuksia on hankala selvittää. Sekä kunnostus-ohituksen että harvennuksen kasvureaktion kuvaaminen edellyttää vielä aineiston kartuttamista.

Mallistusaineiston suurten puiden ja erityisesti puustoisten järeiden metsiköiden määrä oli niin vähäinen, että puustoisten metsien kasvun ennusteet ovat jonkin verran epävarmoja. Tästä syystä malleja on tarpeen päivittää sitä mukaa kun metsiköt kehittyvät ja kertyy lisää aineistoa.

Kun malleja käytetään simulaattorin osana, on tarpeen soveltaa itseharvennemismalleja, jotta puuston määrä pysyisi järkevissä rajoissa. Turvemaille ei ole olemassa itsehar-

venemismalleja, joten on käytettävä kivennäismaiden malleja (Hynynen 1993). Erillisten itseharvenemismallien laadinta myös turvemaille voi olla perusteltua tulevaisuudessa, koska kasvua rajoittavat siellä osin toiset tekijät kuin kivennäismailla.

Kirjallisuus

- Heikurainen, L. & Kuusela, K. 1964. Revival of the tree growth after drainage and its dependence on tree size and age. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 55(8). 15 s.
- Huikari, O. 1952. Suotyypin määrittäminen maa- ja metsätaloudellista käyttöarvoa silmälläpitäen. *Silva Fennica* 75. 22 s.
- 1974. Site quality estimation on forest land. In: Proc. International Symposium on Forest Drainage, 2nd–6th September 1974. Jyväskylä–Oulu, Finland. s. 15–24.
- Hynynen, J. 1993. Self-thinning models for even-aged Stands of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 8:326–336.
- 1995. Predicting the growth response to thinning for Scots pine stands using individual-tree growth models. *Silva Fennica* 29(3):225–246.
- Hänell, B. 1988. Postdrainage productivity of peatlands in Sweden. *Canadian Journal of Forest Research* 18:1443–1456.
- 1990. Present situation and future possibilities of peatland forestry in Sweden. Julkaisussa: Hänell, B. (toim.). Biomass production and element fluxes in forested peatland ecosystems Swedish University of Agricultural Sciences, department of forest site research, Umeå. s. 45–48.
- Hägglund, B. 1981. Forecasting growth and yield in established forests. An outline and analysis of the outcome of a subprogram within the HUGIN project. Swedish University of Agricultural Sciences, department of forest survey. Report 31. 145 s.
- Hökkä, H. 1996. Height-diameter curves for trees growing drained peatlands. *Forest Ecology and Management* (painossa).
- & Laine, J. 1988. Suopuustojen rakenteen kehitys ojituksen jälkeen. *Silva Fennica* 22(1):45–65.
- , Alenius, V. & Penttilä, T. 1996. Individual-tree basal area growth models for Scots pine, Norway spruce and pubescent birch on drained peatlands (käsikirjoitus).
- Jonsson, B. 1969. Studier över den av väderleken orsakade variationen i årsringsbredderna hos tall och gran i Sverige. Summary: Studies of variations in the widths of annual rings in Scots pine and Norway spruce due to weather conditions in

- Sweden. Royal College of Forestry, department of forest yield research, Stockholm. Res. note 16. 297 s.
- Keltikangas, M., Laine, J., Puttonen, P. & Seppälä, K. 1986. Vuosina 1930–1978 ojitetut suot: ojitusalueiden inventoinnin tuloksia. *Acta Forestalia Fennica* 193. 94 s.
- Laine, J. 1989. Metsäojitettujen soiden luokittelu. *Suo* 40(1):37–51.
- Mielikäinen, K. & Gustavsen, H.G. 1993. The empirical basis for tree and stand modelling in Finland. Julkaisussa: Nyysönen, A., Poso, S. & Rautala, J. (toim.). Proceedings of Ilvessalo Symposium on National Forest Inventories, Finland 17–21, Aug. 1992. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 444:179–184.
- Miina, J. 1994. A spatial growth model for Scots pine on drained peatland. *Silva Fennica* 28(1):15–27.
- Ojansuu, R. & Henttonen, H. 1983. Kuukauden keskilämpötilan, lämpösumman ja sademäärän paikallisten arvojen johtaminen Ilmatieteen laitoksen mittautiedoista. *Silva Fennica* 17(2): 143–160.
- Ojansuu, R., Hynynen, J., Koivunen, J. & Luoma, P. 1991. Luonnonprosessit metsälaskelmassa (MELA) – Metsä 2000-versio. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 385. 59 s.
- Paavilainen, E. & Tiihonen, P. 1988. Suomen suometsät vuosina 1951–1984. *Folia Forestalia* 714. 29 s.
- Penttilä, T. & Honkanen, M. 1986. Suometsien pysyvien kasvukoalojen maastotyöohjeet. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 226. 98 s.
- Seppälä, K. 1969. Kuusen ja männyn kasvun kehitys ojitetuilla turvemaidella. *Acta Forestalia Fennica* 93. 88 s.

Yhteensä 21 viitettä.

Jari Hynynen ja Jouni Siipilehto

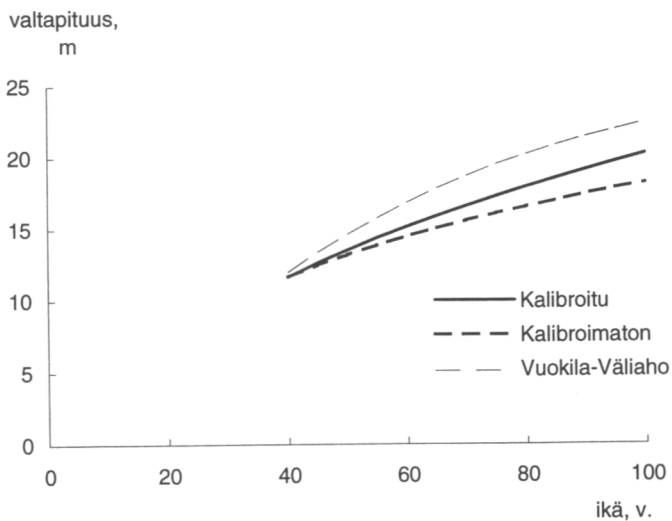
MELA-mallit kasvatusmetsien dynamiikan kuvaajana

Johdanto

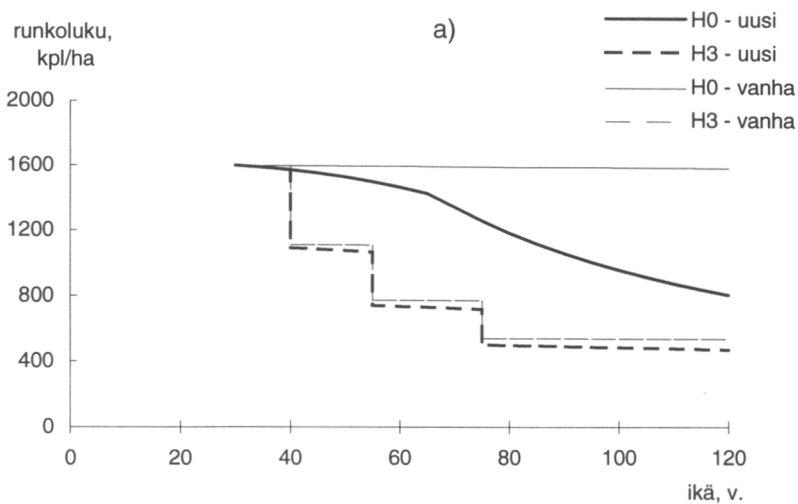
Mallien laadinnan tavoitteena oli kehittää MELAn kasvusimulaattorin ominaisuuksia etenkin metsikön sisäisen kehitysdynamiikan kuvaamisessa. Tässä raportissa havainnollistetaan uusilla malleilla simuloituja metsikön kehityssennusteita esimerkkisimulointien avulla, sekä vertaillaan ennusteita muutamiin yleisesti käytettyihin aikaisemmin julkaistuihin kasvu- ja tuotomalleihin ja vanhoilla MELAn kasvumalleilla laskettuihin ennusteisiin. Tarkastelussa rajoitetaan esittelemään kivennäismaiden kasvatusvaiheen metsiköiden kehitys-dynamiikkaa pääpainon ollessa kasvatusiheyden ja harvennusten tai harventamattomuuden vaikutuksessa.

Simulointimallien keskeisimmät muutokset

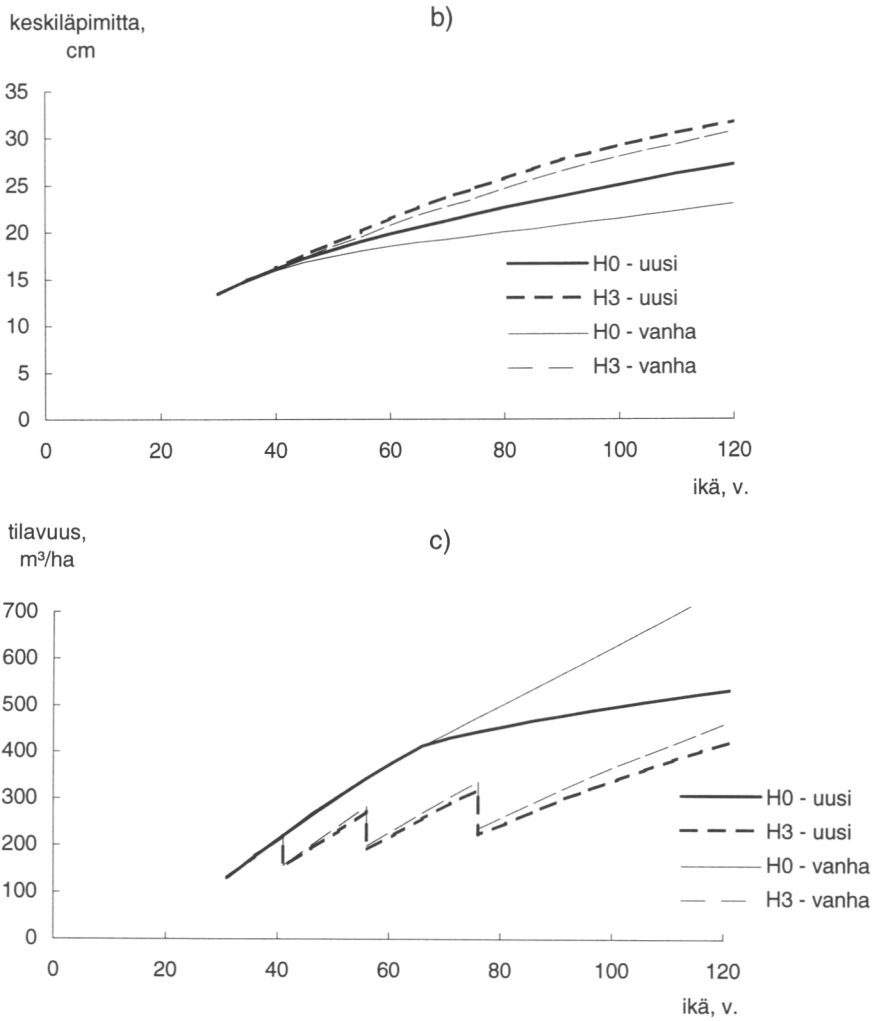
Kasvupaikka vaikuttaa keskeisesti puuston kasvuun ja metsikön kehitysdynamiikkaan. Tärkein kasvupaikkaa kuvaava tunnus uusissa kasvu- ja kuolemismalleissa on puuston pituusboniteetti, joka ennustetaan uudella menetelmällä (Ojansuu, tässä julkaisussa). Sitä on täydennetty puun pohjapinta-alan kasvumallissa kasvupaikkatyyppiä kuvaavalla luokkamuuttujalla ja lämpösummalla. Puun pituuden kasvuennuste on sidottu valtapituuden kasvunopeuteen.



Kuva 1. Puuston valtapituuden kehitysennusteet Kainuussa kasvavassa runsaspuustoisessa, EMT:n kylvömannikössä. Ennusteet on laskettu pysyvien kasvupaikkatekijöiden avulla (kalibroimaton), tarkennettuna puustomittauksilla (kalibroitu) (Ojansuu, tässä julkaisussa), sekä ennustettuna Vuokilan ja Väliahon (1980) valtapituuden kehitysmalleilla.



Kuva 2 jatkuu...



Kuva 2. Puuston runkoluvun (a), keskiläpimitan (b) ja tilavuuden (c) kehitys harventamattomassa (H0) ja toistuvasti harvennetussa (H3) metsikössä MELA-järjestelmän vanhoilla (vanha) ja uusilla (uusi) simulointimalleilla ennustettuna.

Uuden menetelmän mukaan metsikön valtapuiden pituuskehitys ja pituusboniteetti voidaan ennustaa joko pelkästään kasvupaikkamuuttujien avulla tai tarkennettuna metsästä mitattuilla puuston ikä- ja pituushavainnoilla. Puustomittausten avulla tarkennettu pituusboniteetin ennuste saattaa tapauskohtaisesti poiketa merkittävästi ennusteesta, joka perustuu vain kasvupaikkatunnuksiin (kuva 1). Metsikkökohtaisen kalibroituavuuden ansiosta ennustettu kasvun taso

vaihtelee metsiköiden välillä enemmän kuin MELAn vanhoissa kasvumalleissa, joissa kasvun tasoa ei ole kalibroitu.

Toinen keskeinen muutos aiempiin malleihin verrattuna liittyy luonnonpoistuman ennustamiseen. Nykyisessä MELAn kasvusimulaattorissa luonnonpoistumana kuolevien puiden ennuste lasketaan yksittäisen puun kuolemistodennäköisyyttä ennustavalla mallilla, joka on laadittu VMI-aineiston perusteella. Mallilla saadaan jokseenkin realistinen ennuste luonnonpoistumalle toistuvasti harvennetuissa talousmetsissä. Sen sijaan harventamattomana kasvatettavien tiheiden metsien kehitysenusteissa luonnonpoistuman määrä aliarvioituu.

Uudessa simulointijärjestelmässä on otettu käyttöön uusi puun kuolemistodennäköisyyden ennustemalli. Mallin laadinnassa käytettiin kestokoeaineistoa, johon sisältyneiden metsiköiden tiheysvaihtelu oli suurempaa kuin talousmetsissä keskimäärin. Uuden mallin myötä puun kuolemistodennäköisyyden ennuste on aikaisempaa realistisempi tiheissä metsissä.

Luonnonpoistuman määrää kontrolloidaan puutason mallin lisäksi metsikkötason itseharvenemismallin avulla. Sen vaikutus luonnonpoistuman ennusteeseen on merkittävä etenkin simuloitaessa tiheinä kasvavien, harventamattomien metsien kehitystä (kuva 2). Uusien kuolemissmallien myötä puuston tiheys ja puuston rakenne säilyvät entistä realistisemmalla tasolla käsittelemättömien metsien kehitystä ennustettaessa ja MELA-järjestelmän sovellettaavuus tällaisiin simulointeihin parantuu oleellisesti.

Puuston kehityksen simulointiesimerkkejä

Männikkö

Esimerkkimetsiköksi männikön kehityksen simulointia varten valittiin Etelä-Suomessa kasvava ensiharvennusvaiheessa oleva, kylvämällä perustettu VT-männikkö (taulukko 1). Puuston kehitystä simuloitiin sekä harventamattomana että kolmen harvennuksen kasvatusohjelmaa noudattaen. Simuloidut harvennukset olivat alaharvennuksia,

Taulukko 1. Simulointiesimerkeissä käytettyjen metsiköiden puustotietoja ennustejakson alussa.

	Metsä- tyyppi	Ikä v	N kpl/ha	G m ² /ha	V m ³ /ha	H _{dom} m	D _g cm	Cr _g %	SI m
<i>Männikkö</i>									
Esimerkkimetsikkö	VT	31	1600	21,2	130,0	12,8	13,4	55	24,2 ¹⁾
Vuokila-Väliaho (1980)	(MT)	30	2000	22,3	124,7	11,6			27,0
Vuokila-Väliaho (1980)	(VT)	30	1800	15,6	73,6	9,7			24,0
<i>Kuusikko</i>									
Esimerkkimetsikkö	MT	32	1800	24,9	153,4	13,5	14,1	75	33,7 ¹⁾
Vuokila-Väliaho (1980)	(OMT)	30	2200	24,2	132,4	12,3			30,0
<i>Rauduskoivikko</i>									
Esimerkkimetsikkö	MT	22	1120	12,2	75,7	15,1	12,6	67	24,8 ¹⁾
Oikarinen (1983)	(MT)	20	2000	12,8	69,0	12,4	9,7		24,02 ²⁾
<i>Kuusi-koivu-sekametsikkö</i>									
Esimerkkimetsikkö	OMT	29	2580	31,9	211,5	16,0	15,0	64	33,1 ³⁾
Mielikäinen (1985)	OMT	30	2500			11,8	13,0		30,0 ⁴⁾

Selitykset: N = runkoluku; G = pohjapinta-ala; V = tilavuus; H_{dom} = valtapituus;
D_g = pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta;
Cr_g = pohjapinta-alalla painotettu latvussuhteen keskiarvo;
SI = puuston pituusboniteetti (männyllä ja kuusella H₁₀₀, koivulla H₅₀).

¹⁾ Ojansuun (tässä julkaisussa) mallilla laskettu.

²⁾ Oikarisen (1983) mallilla laskettu rauduskoivun pituusboniteetti.

³⁾ Ojansuun (tässä julkaisussa) mallilla laskettu kuusen pituusboniteetti.

⁴⁾ Vuokilan ja Väliahon (1980) mallilla laskettu kuusen pituusboniteetti.

Taulukko 2. Uusilla MELAn kasvumalleilla ja Vuokilan ja Väliahon (1980) malleilla ennustetut puustotunnukset VT-männikössä 90 v:n kiertojan lopussa sekä tietoja kiertojan tuotoksesta.

	H _{dom} m	V _{p.h.} m ³ /ha	V _{harv.} m ³ /ha	V _{l.p.} m ³ /ha	V _{tot.} m ³ /ha	N kpl/ha	G m ² /ha	D _g cm	Cr _g %
MELA- ei harv.	23,0	480	-	146	626	1063	45,2	23,8	31
MELA- 3 harv.	23,0	300	244	18	562	493	28,5	27,7	39
Vuokila-Väliaho ¹⁾	23,0	261	189		450	384	24,7		
Vuokila-Väliaho ²⁾	25,9	383	238		621	428	32,6		

Selitykset: H_{dom} = valtapituus; V_{p.h.} = päätehakkupuuston tilavuus;
V_{harv.} = harvennuspoistuman tilavuus; V_{l.p.} = luonnonpoistuman tilavuus;
V_{tot.} = kiertojan kokonaistuotos; N = runkoluku; G = pohjapinta-ala;
D_g = pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta;
Cr_g = pohjapinta-alalla painotettu latvussuhteen keskiarvo.

¹⁾ H₁₀₀ = 24 m

²⁾ H₁₀₀ = 27 m

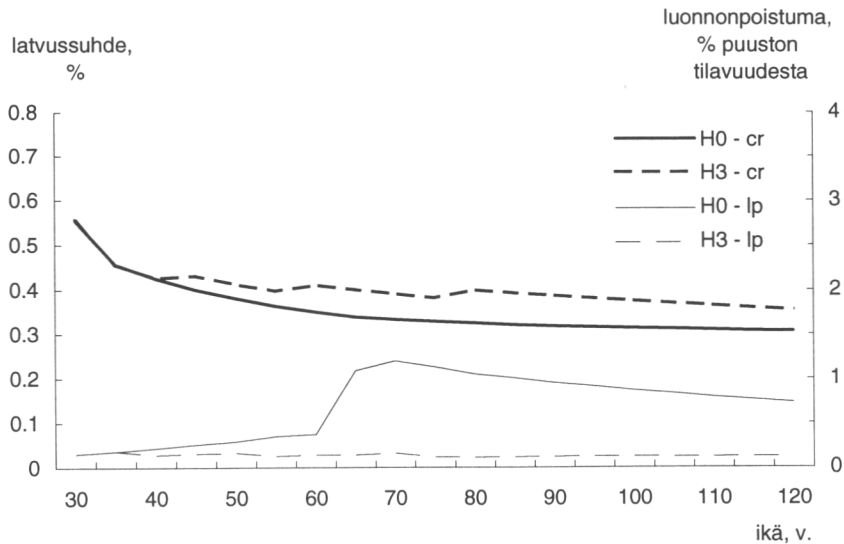
joissa kussakin poistettiin 30 % puuston tilavuudesta.

Kun puuston kehitystä simuloitiin ilman harvennuksia, kokonaistuotos 90 v:n kiertojan loppuun mennessä oli 626 m³/ha. Kiertojan lopussa elossa olevan puuston tilavuus oli 480 m³/ha (taulukko 2). Harvennetussa metsikössä saavu-

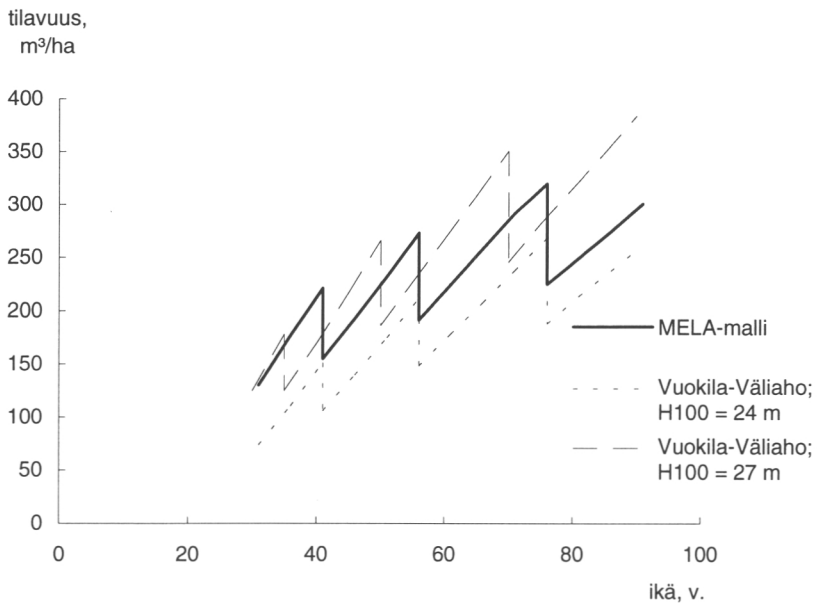
tettiin 562 m³/ha kokonaistuotos, josta 244 m³/ha poistettiin harvennuksissa pätehakkuupuuston tilavuuden ollessa 300 m³/ha.

Harventamattomana kasvatettavassa metsikössä ennustettu luonnonpoistuman määrä alkoi lisääntyä n. 60 v:n iällä. Tuolloin puiden latvukset olivat supistuneet keskimäärin 35 %:iin puun pituudesta (kuva 3). Metsikön ollessa 90 vuotiasta latvussuhde oli supistunut keskimäärin 31 %:iin. Se vaihteli puun koon mukaan 25 %:n ja 35 %:n välillä. Harvennetussa metsikössä luonnonpoistuma pysytteli alhaisena koko kiertoajan. Puiden latvusten ennustettu supistumisvauhti oli selvästi hitaampaa kuin harventamattomassa metsikössä. Harvennusten seurauksena puiden alimpien elävien oksien kuoleminen hidastui tuntuvasti ja latvusten supistuminen pysähtyi.

Harvennetun metsikön simulointituloksia vertailtiin Vuokilan ja Väliahon (1980) julkaisemiin tuotostaulukoihin. Vertailtaviksi otettiin heidän julkaisustaan sekä 24:n että 27 metrin pituusboniteeteilla kasvaneiden viljelymänniköiden tuotossarjat, joissa 90 v:n kuluessa männikkö harvennettiin kolme kertaa 30 %:n harvennusvoimakkuudella.



Kuva 3. Ennustettu keskimääräinen latvussuhteen kehitys (cr) ja vuotuisena luonnonpoistumana kuolleen puuston osuus tilavuudesta (lp) harventamattomassa (H0) ja harvennetussa (H3) esimerkki-männikössä.



Kuva 4. Puuston simuloitu tilavuuskehitys esimerkkimännikössä, sekä Vuokilan ja Väliahon (1980) tuotossarjojen mukainen kehitys kolme kertaa harvennetuissa 24 m:n ja 27 m:n pituusboniteetin männiköissä.

Simuloidun esimerkkimännikön alkutila oli valtapituuskehityksen osalta lähellä Vuokilan ja Väliahon 24 m:n pituusboniteetin männikköä (VT), mutta puuston määrän osalta vertailukelpoisempi 27 m:n pituusboniteetin männikköön (MT). Simulointivertailu osoitti esimerkkimetsikön puustotilavuuden kehityksen lähestyvän kiertoajan loppua kohti Vuokilan ja Väliahon 24 m:n pituusboniteetin männikölle esittämiä tuotossarjoja (taulukko 2, kuva 4).

Kuusikko

Kuusikon kehityksen simulointiin esimerkkimetsiköksi valittiin istutettu Etelä-Suomessa kasvava, ensiharvennusvaiheessa oleva MT-kuusikko (taulukko 1). Kiertoajan loppuun ulottuvan ennustejakson aikana puusto harvennettiin kolme kertaa ennen 90 v:n iässä tehtävää päätehakkua. Jokaisessa harvennuksessa poistettiin alaharvennusperiaatteella 30 % puuston tilavuudesta.

Taulukko 3. Uusilla MELAn kasvumalleilla ja Vuokilan ja Väliahon (1980) malleilla ennustetut puustotunnukset MT-kuusikossa 90 v:n kiertoajan lopussa sekä tietoja kiertoajan tuotoksesta. Symbolien selitykset esitetty taulukossa 2.

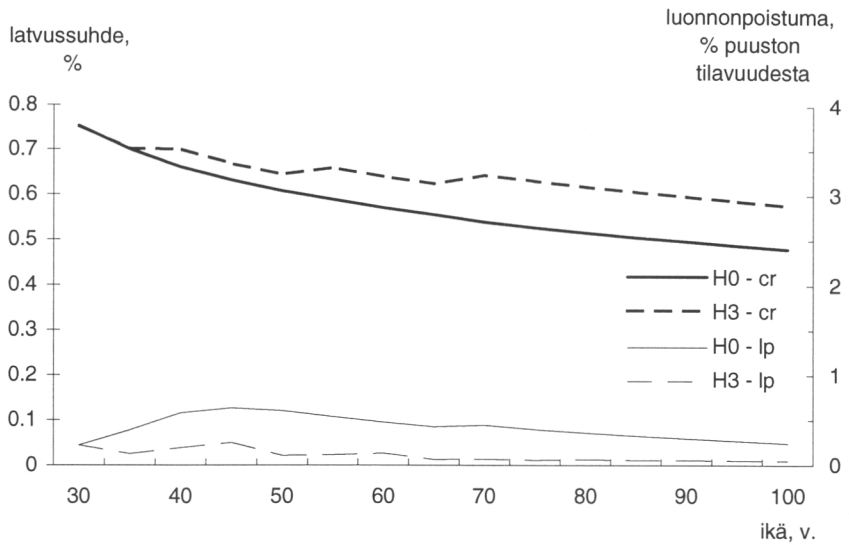
	H_{dom}	$V_{\text{p.h.}}$	$V_{\text{harv.}}$	$V_{\text{l.p.}}$	$V_{\text{tot.}}$	N	G	D_g	Cr_g
	m	m^3/ha	m^3/ha	m^3/ha	m^3/ha	kpl/ha	m^2/ha	cm	%
MELA- ei harv.	31,8	886	-	136	1022	1091	58,5	26,9	50
MELA- 3 harv.	31,8	493	287	19	799	517	33,8	29,9	60
Vuokila-Väliaho	28,9	507	286		793	436	37,3		

Harventamattomana kasvatetun kuusikon kokonaistuotoksen ennuste 90 v:n kiertoajalla oli $1022 \text{ m}^3/\text{ha}$, josta kiertoajan lopussa elossa olevan puuston tilavuus oli $886 \text{ m}^3/\text{ha}$. Kolme kertaa harvennetussa metsikössä kokonaistuotoksen ennuste oli $799 \text{ m}^3/\text{ha}$ ja päätehakkuupuuston tilavuus $493 \text{ m}^3/\text{ha}$ (taulukko 3).

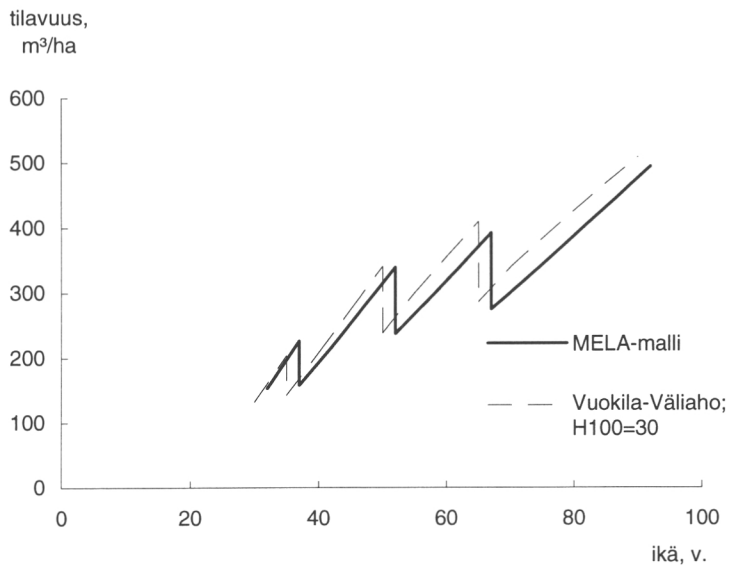
Harventamattomassa kuusikossa luonnonpoistuman osuus alkoi lisääntyä 40–50 v:n iällä puuston valtapituuden ollessa tuolloin 19–20 m (kuva 5). Varjostusta sietävässä kuusikossa metsikön ylitiheydestä aiheutuva pienimpien puiden kuoleminen ei kuitenkaan ollut yhtä voimakasta kuin männikössä ja koivikossa. Puiden keskimääräiset latvussuhteet pienenivät simulointijakson aikana 75:stä 50 %:iin. Harvennusten vaikutus näkyi selkeästi sekä vähäisenä luonnonpoistumana että hitaampana latvusten supistumisena verrattuna harventamattomana kasvavaan metsikköön.

Harvennetun esimerkkikuusikon kehitystä verrattiin Vuokilan ja Väliahon tuotossarjaan, joka oli laadittu 30 m:n pituusboniteetin (OMT) kuusikolle sovellettaessa kolmen harvennuksen kasvatusohjelmaa 30 %:n harvennusvoimakkuudella ja 90 v:n kiertoajalla.

Esimerkkimetsikön kalibroitu pituusboniteetti Ojansuun mallilla laskettuna oli 33,7 m, kun sen pituusboniteetti Vuokilan ja Väliahon mallilla laskettuna oli 30,3 m. Valtapituuden kehitysennusteiden eroista huolimatta harvennetun esimerkkikuusikon tilavuuden kehitysennusteet olivat melko samankaltaisia kuin Vuokilan ja Väliahon (1980) tuotostaulukoissa (kuva 6).



Kuva 5. Ennustettu keskimääräinen latvussuhteen kehitys (cr) ja vuotuisena luonnonpoistumana kuolleen puuston osuus tilavuudesta (lp) harventamattomassa (H0) ja harvennetussa (H3) esimerkki-kuusikossa.



Kuva 6. Puuston simuloitu tilavuuskehitys esimerkki-kuusikossa, sekä Vuokilan ja Väliahon (1980) tuotossarjojen mukainen kehitys kolme kertaa harvennetussa 30 m:n pituusboniteetin kuusikossa.

Koivikko

Esimerkkimetsiköksi valittiin istutettu eteläsuomalainen MT-rauduskoivikko (taulukko 1). Metsikkö oli simulointijakson alussa ensiharvennusvaiheessa. Metsikön kehitystä simuloitiin sekä harventamattomana että kahden harvennuksen kasvatusohjelman mukaisesti. Harvennusohjelmaksi valittiin Oikarisen (1983) esittämä rauduskoivikon harvennusohjelma 24 m:n pituusboniteetin koivikolle (MT). Metsikkö harvennettiin 25:n ja 45 v:n ikäisenä harvennusvoimakkuuden ollessa 30 % puuston tilavuudesta. Esimerkissä sovellettiin 60 v:n kiertoaikaa.

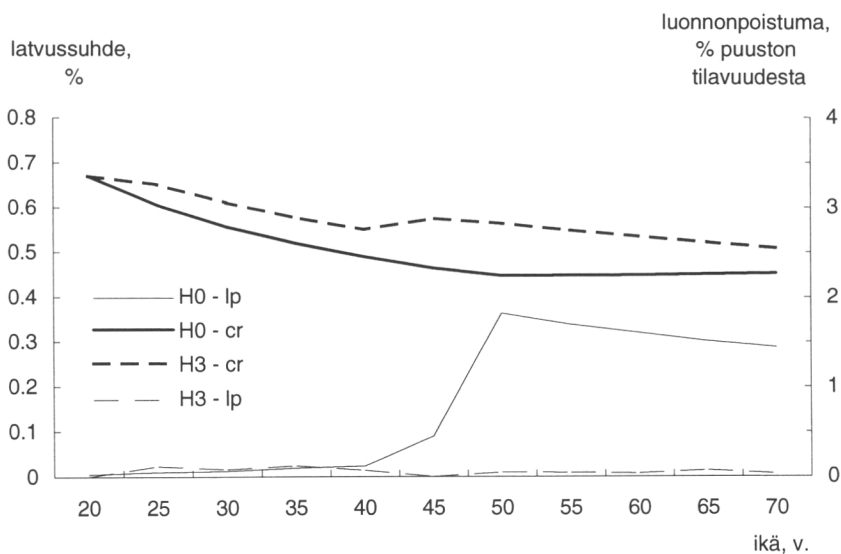
Harvennetun rauduskoivikon kokonaistuotos 60 v:n kiertoaikana oli 353 m³/ha, joka on 80 m³/ha pienempi kuin harventamattomana kasvatettavan koivikon kokonaistuotoksen ennuste (taulukko 4).

Harventamattomassa koivikossa puuston kuoleminen nopeutui 40 v:n iällä, jolloin puuston runkoluku oli 1 090 kpl/ha ja valtapituus 22 m (kuva 7). Keskimääräinen latvussuhde oli laskenut tässä vaiheessa 49 %:iin. Päätehakkuvaiheeseen tultaessa latvukset olivat supistuneet keskimäärin 45 %:iin puun pituudesta. Pienimmillä puilla latvussuhde oli 38 % ja valtapuilla 53 %. Harvennetussa metsikössä latvussuhde säilyi kiertoaajan loppuun saakka koivun kasvun kannalta kriittisenä pidetyn 50 %:n yläpuolella. Päätehakkupuustolla latvussuhde oli keskimäärin 54 % vaihdellen puun koon mukaisesti 42 %:n ja 56 %:n välillä.

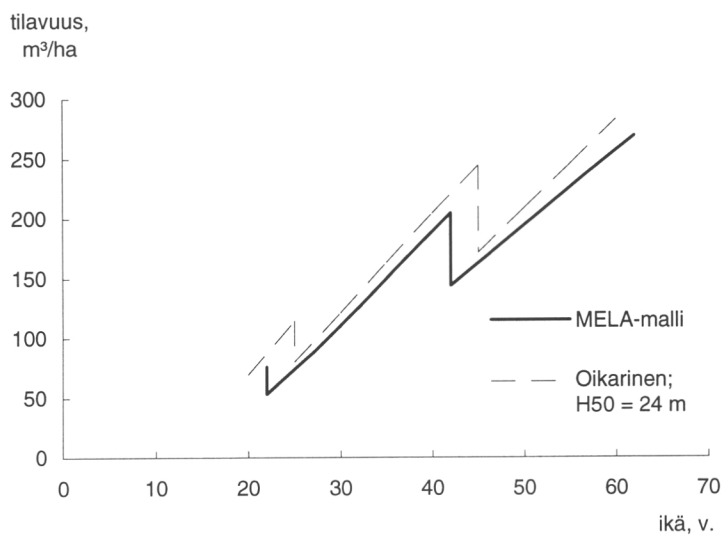
Esimerkkimetsikön kehitystä verrattiin Oikarisen (1983) tuotostaulukossa esitettyyn koivikon kehityssarjaan vastaavalla harvennusohjelmalla ja pituusboniteetilla $H_{50} = 24$ (kuva 8). Uusilla koivun kasvumalleilla metsikön kehitys oli esimerkkimetsikössä hieman hitaampaa kuin Oikarisen (1983) tuotostaulukoissa esittämä koivikon kehitys.

Taulukko 4. Uusilla MELAn kasvumalleilla ja Oikarisen (1983) malleilla ennustetut puustotunnukset MT-koivikossa 60 v:n kiertoaajan lopussa sekä tietoja kiertoaajan tuotoksesta. Symbolien selitykset esitetty taulukossa 2.

	H_{dom} m	$V_{p.h.}$ m ³ /ha	$V_{harv.}$ m ³ /ha	$V_{l.p.}$ m ³ /ha	$V_{tot.}$ m ³ /ha	N kpl/ha	G m ² /ha	D_g cm	Cr_g %
MELA- ei harv.	26,0	363	-	70	433	862	30,8	22,3	45
MELA- 3 harv.	25,9	268	84	1	353	518	23,4	25,0	53
Oikarinen	26,1	282	107		389	536	24,8	25,1	



Kuva 7. Ennustettu keskimääräinen latvussuhteen kehitys (cr) ja vuotuisena luonnonpoistumana kuolleiden puuston osuus tilavuudesta (lp) harventamattomassa (H0) ja harvennetussa (H3) esimerkkikoivikossa.



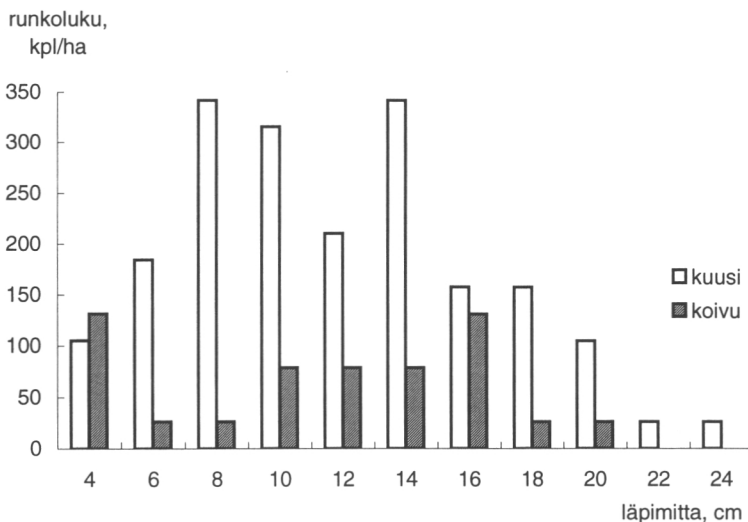
Kuva 8. Istutetun MT-rauduskoivikon tilavuuden kehitys simuloituna uusilla MELA-malleilla ja Oikarisen (1983) malleilla.

Harvennetussa koivikossa tilavuuskehityksen ero taulukon (Oikarinen 1983) mukaiseen kehitykseen selittynee esimerkkimetsikön pienemmästä puustopääoman tasosta. Puustopääoman vaikutus rauduskoivikon tuotokseen on voimakas. Esimerkiksi Niemistön (1995) mukaan istutettu rauduskoivikko tuotti 20 v:n ikään mennessä 2 500 kpl/ha istutustiheydellä 36 % enemmän kuin 1 600 kpl/ha alku-
tiheydellä.

Sekametsät

Sekametsän kehityksen havainnollistamiseksi tarkasteltiin esimerkkinä Etelä-Suomessa kasvavaa OMT:n kuusi-koi-
vusekametsikköä (taulukko 1). Metsikön ikä simulointi-
jakson alussa oli 29 vuotta ja pohjapinta-ala 21,8 m²/ha. Puuston pohjapinta-alasta kuusen osuus oli 77 %, rauduskoivun osuus 14 % ja hieskoivun osuus 9 % (kuva 9).

Puuston kehitystä simuloitiin kahden eri käsittelyvaihtoehdon mukaisesti. Simuloinnissa käytettiin 80 v:n kiertoaikaa. Ensimmäisessä kasvatusvaihtoehdossa puustoa kasvatettiin sekametsikkönä säilyttäen lähtöpuuston puulaji-



Kuva 9. Esimerkkimetsikön puulajeittainen läpimittajakauma simuloinnin alussa.

suhteet ennallaan koko kiertoajan. Toisessa käsittelyvaihtoehdossa metsiköstä poistettiin kaikki koivut ensiharvennuksen yhteydessä ja puustoa kasvatettiin kiertoajan loppuun puhtaana kuusikkona. Puustoa harvennettiin seuraavassa asetelmassa esitetyn kasvatusohjelman mukaisesti:

Harvennuksset	Kuusi-koivusekametskkö		Puhdas kuusikko	
	Metsikön ikä, v	Harvennusvoimakkuus, % tilavuudesta	Metsikön ikä, v.	Harvennusvoimakkuus, % tilavuudesta
I	30	30	30	23
II	40	25	45	30
III	50	25	60	30
IV	65	25		
Päätihakkuu	80		80	

Sekametsän kasvatusohjelmaksi valittiin Mielikäisen (1985) tutkimuksessa esitetty ohjelma. Puhdasta kuusikkoa kasvatettiin koivujen poistamisen jälkeen Vuokilan ja Väliahon (1980) 30 m:n pituusboniteetin kuusikolle esittämää kasvatusohjelmaa noudattaen.

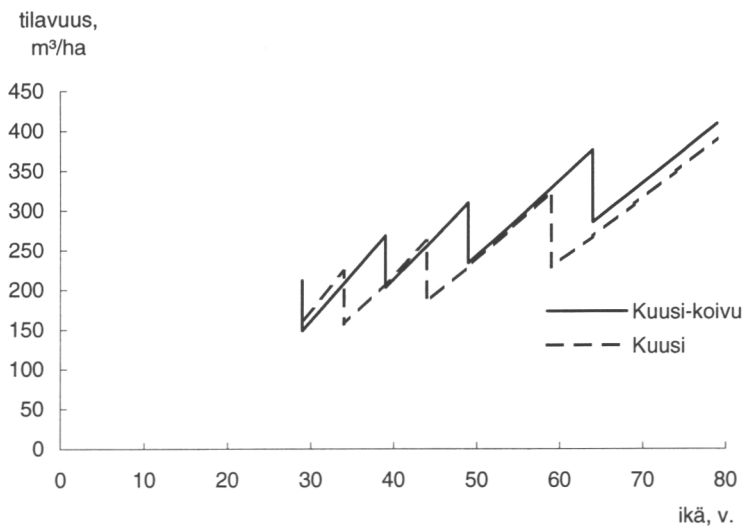
Puuston tilavuuden kehityserot vertailtavien kasvatusohjelmien välillä olivat melko pienet (kuva 10). Kiertoajan kokonaistuotos oli sekametsänä kasvatettuna 710 m³/ha, kun se puhtaana kuusikkona kasvatettaessa oli 647 m³/ha (taulukko 5). Sekametsän kokonaistuotos esimerkkisimuloinnissa oli siten 10 % suurempi verrattuna puhtaan kuusikon tuotokseen.

Simuloituja tuotoksia vertailtiin Mielikäisen (1985) tutkimustuloksiin OMT:n kuusi-koivusekametsiköstä, jossa lähtöpuuston pohjapinta-alasta kuusen osuus oli 75 % ja rauduskoivun 25 %, ja jossa puuston kasvatusohjelma oli

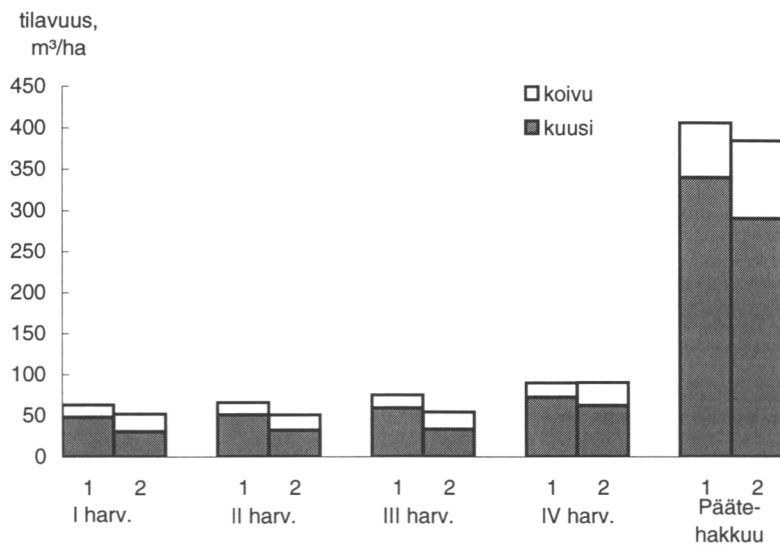
Taulukko 5. Uusilla MELAn kasvumalleilla ja Mielikäisen (1985) malleilla ennustetut puustotunnukset OMT:n kuusi-koivusekametsikössä 80 v:n kiertoajan lopussa sekä tietoja kiertoajan tuotoksesta. Symbolien selitykset esitetty taulukossa 2.

	H _{dom} m	V _{p.h.} m ³ /ha	V _{harv.} m ³ /ha	V _{l.p.} m ³ /ha	V _{tot.} m ³ /ha	N kpl/ha	G m ² /ha	D _g cm	Cr _g %
Kuusi-koivu	28,3 ¹⁾	407	293	10	710	490	32,2	31,1	60
Kuusi	30,1	389	242	16	647	473	31,0	31,1	65
Mielikäinen	26,7 ¹⁾	386	248		634	453		30,9	

¹⁾ Kuusen valtapituus



Kuva 10. Istutetun kuusi-koivu -sekametsikön (OMT) ennustettu tilavuuden kehitys kasvatettaessa metsikköä sekametsänä tai puhtaana kuusikkona.



Kuva 11. Kuusi-koivusekametsän harvennuksissa ja pääte-hakkuussa poistetun puuston tilavuudet puulajeittain MELA-malleilla ennustettuna (1) ja vastaavat tilavuudet Mielikäisen (1985) mukaan (2).

samanlainen. Mielikäisen tutkimuksessa OMT kuusi-koivu-sekametsikön kokonaistuotos oli 634 m³/ha, joka on 76 m³ vähemmän kuin esimerkksimuloinnin kokonaistuotos. Yhtenä syynä eroon on metsiköiden väliset kasvupaikkaerot. Tämän tutkimuksen pituusboniteetti oli hieman parempi kuin Mielikäisen tutkimuksen metsikössä. Toinen ero metsiköiden välillä on koivun osuudessa. Mielikäisen simuloimassa metsikössä lähtötilanteessa koivun osuus puuston pohjapinta-alasta oli 33,1 %, kun se tässä tutkimuksessa oli 23 %. Koivun suhteelliset osuudet säilyivät lähes muuttumattomina molemmissa metsikkösimuloinneissa (kuva 11).

Päätelmät

MELA-järjestelmän uusia kasvumalleja metsikön kehitysdynamiikan kuvaajana tarkasteltiin esimerkkimetsiköille tehtyjen simulointien avulla. Esimerkkimetsiköiksi valittiin runsaspuustoisia ja tasaikäisiä metsiä, koska niissä puiden välisen kilpailun vaikutus metsikön kehitykseen korostuu ja ne soveltuvat siten hyvin metsikön kehitysdynamiikan havainnollistamiseen. Esimerkkimetsiköt eivät lähtöpuuston rakenteensa puolesta vastaa normaaleja keskivertometsiä. Niiden kasvuennusteet ovatkin tasoltaan korkeampia kuin samoilla malleilla lasketut kasvuennusteet olisivat normaaleille talousmetsille.

Uusilla malleilla lasketut puuston kehitysennusteet ovat saman suuntaisia aikaisempien kasvu- ja tuotostutkimuksissa esitettyjen tulosten kanssa. Arvioitaessa tehtyjä tuotosvertailuja on syytä kuitenkin huomata, että vertailuna esitettyjen tuotostaulukoiden kehityssarjat ovat suuren aineiston keskiarvoja, jotka voivat poiketa huomattavastikin yksittäisten metsiköiden kehitysennusteista, jollaisina esimerkkimetsiköistä laskettuja simulointituloksia voidaan pitää. Tuotosvertailujen pohjalta ei sen vuoksi tule tehdä pitkälle meneviä päätelmiä.

Harventamattomana kasvatettujen esimerkkimetsiköiden simulointituloksia ei tässä yhteydessä vertailtu vanhempiin luonnontilaisten metsiköiden kehityssarjoihin (Ilvessalo 1920, Koivisto 1959). Nykyiset viljelymetsiköt eroavat puuston määrän ja rakenteen osalta niin suuresti vanhojen

tuotostutkimusten luontaisesti syntyneistä metsiköistä, etteivät niiden tuotokset ole vertailukelpoisia.

Kirjallisuus

- Ilvessalo, Y. 1920. Kasvu- ja tuottotaulut Suomen eteläpuoliskon mänty-, kuusi- ja koivumetsille. Acta Forestalia Fennica 15(4) 94 s.
- Koivisto, P. 1959. Kasvu- ja tuottotaulukoita. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 51(8). 49 s.
- Mielikäinen, K. 1985. Koivusekoituksen vaikutus kuusikon rakenteeseen ja kehitykseen. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 133. 79 s.
- Niemistö, P. 1995. Influence of initial spacing and row-to-row distance on the growth and yield of silver birch (*Betula pendula*). Scandinavian Journal of Forest Research 10:245–255.
- Oikarinen, M. 1983. Etelä-Suomen viljeltyjen rauduskoivikoiden kasvatusmallit. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 113. 75 s.
- Vuokila, Y. & Väliaho, H. 1980. Viljeltyjen havumetsiköiden kasvatusmallit. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 99(2). 271 s.

Yhteensä 6 viitettä.

Lauri Valsta ja Tapio Linkosalo

Stand Management Assistant (SMA): Työväline metsikön käsittelyohjeiden määrittämiseen

Johdanto

Metsikön käsittelyohjeiden laadinnassa voidaan hyödyntää numeerisia malleja puuston kehityksestä. Nämä mallit voidaan yhdistää optimointialgoritmeihin, jolloin voidaan ottaa huomioon samanaikaisesti eri toimenpiteet ja niiden pitkän ajan vaikutukset metsikköön. Koko metsälön näkökulma päätöksentekoon jää metsikkökohtaisen tarkastelun ulkopuolelle. Metsikkökohtainen analyysi voi kuitenkin olla huomattavasti yksityiskohtaisempi suhteessa eri toimenpiteiden kustannuksiin ja tuottoihin sekä optimaaliseen toteutustapaan. Tällaiseen vertailuun metsälötarkastelu on yleensä liian suurpiirteinen ja tapauskohtainen.

Stand Management Assistant (SMA) on ohjelmisto, jolla voidaan analysoida metsikön käsittelyvaihtoehtoja. Ohjelmisto perustuu deterministiseen tai stokastiseen optimointiin ja sillä voidaan määrittää optimaalisia käsittelyohjelmia erilaisten oletusten vallitessa sekä tarkastella graafisesti optimointituloksia ja niiden herkkyyttä eri tekijöiden muutoksille (vastepinta-analyysi). Ohjelmisto on nyky muodossaan käytettävissä unix-työasemilla ja se on asennettu Metsäntutkimuslaitoksen työasemaverkkoon, joka on yhdistetty internet-verkkoon (Sun SPARCstation ja DEC Alpha -työasemat).

SMA-ohjelmiston analyysimahdollisuudet ovat sidoksissa käytettyyn metsikön kehitysmalliin. SMA on liitetty tähän mennessä kolmeen simulaattoriin: kahden mallisukupolven MELA-simulaattoreihin (Ojansuu et al. 1991 sekä

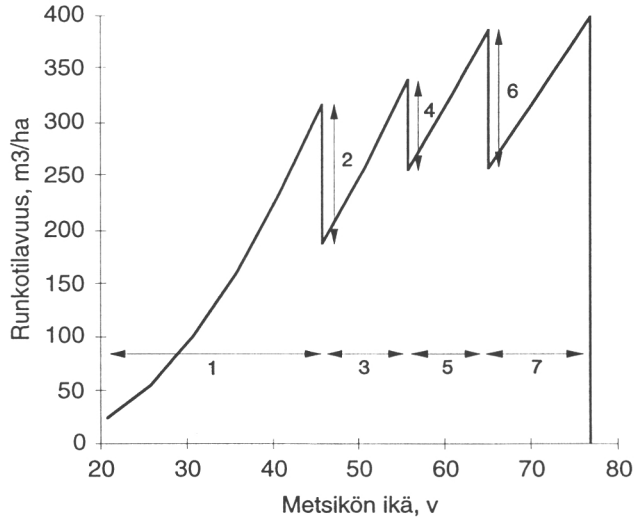
Hynynen ja Ojansuu tässä julkaisussa) puhtaille männiköille ja kuusikoille sekä SIMA-simulaattoriin (Kellomäki et al. 1992) neljän puulajin sekametsille. SMA:lla voidaan määrittää optimaaliset arvot useille toimenpiteille kiertoajan kuluessa: perustamistiheys, harvennusten ajoitus, voimakkuus ja tapa sekä päätehakkuun ajankohta. Maksimoitava tavoitemuuttuja voi olla nettonykyarvo eri korkokannoilla tai puuntuotos. Stokastisessa analyysissä tavoitteeseen voidaan lisäksi liittää riskin karttaminen. Optimointimallin rakenne sallii minkä tahansa simulaattorissa laskettavan muuttujan ottamisen tavoitteeksi. Käytetty optimointimenetelmä on kuvattu aiemmissa julkaisuissa (Valsta 1992a ja b, 1993).

Metsikön käsittelyohjeiden tarkoitus on toimia keskimääräisinä suosituksina, jotka ohjaavat toimenpiteitä asetettujen tavoitteiden mukaisiksi. Tapauskohtaiset tekijät voivat aiheuttaa poikkeamia käsittelyohjeista. Käsittelyohjeiden tueksi tarvitaan tietoa siitä, mitä vaikutuksia on poikkeamalla ohjeista suuntaan tai toiseen. Vastepinta-analyysia voidaan käyttää tämän tiedon tuottamiseen.

Käsittelyohjeiden tulee perustua helposti mitattaviin metsikkötietoihin. Käytössä ovat olleet esim. metsätyyppi, pääpuulaji sekä puuston pohjapinta-ala, valtapituus, keskiläpimitta ja ikä. Ohjeen tulee määrittää, milloin toimenpide tehdään ja miten (esim. intensiteetti, kohdistuminen puustosisiteisiin). Ajoitus voi perustua puuston ikään tai kehitysvaiheeseen, kuten valtapituuteen tai pohjapinta-alaan. Koska SMA perustuu puittaisiin kasvumalleihin, mitkä tahansa metsikkötunnukset voidaan valita toimenpiteiden ajoituksen ja toteuttamistavan määrittelyyn. Toimenpiteen ajoitukseen on käytössä MELA-simulaattorin kanssa ikä ja SIMA-simulaattorin kanssa pohjapinta-ala. Jälkimmäinen johtuu siitä, että puuston kehitys on stokastinen SIMA-simulaattorissa ja pohjapinta-ala soveltuu tällöin ikää paremmin toimenpiteen toteuttamistarpeen määrittämiseen.

Käsittelyohjelman määrittely

Käsittelyohjelmassa määritetään toimenpiteiden ajoitus ja toteutustapa. Toteutustapa voi sisältää toimenpiteen intensiteetin (esim. harvennusprosentti, perustamistiheys) ja muun



Kuva 1. Hakkuuohjelman muuttujat (7 kpl): hakkuiden ajoitus ja voimakkuudet.

määrittelyyn (esim. harvennustapa). Optimointia ja simulointia varten käsittelyohjelma saatetaan numeeriseen muotoon joukoksi muuttujien arvoja.

Kuvassa 1 on esitetty kolmen harvennuksen käsittelyohjelman määrittämiseen käytetyt muuttujat. Ne ilmaisevat hakkuiden väliset ajat sekä harvennusvoimakkuuden prosentteina. Kyseisessä esimerkissä harvennusprosentti on vakio puiden eri läpimittaluokissa ja näin ollen käytetään vain yhtä muuttujaa harvennusta kohden. Ottamalla lisää muuttujia harvennusten määrittelyyn, voidaan harvennustapa määritellä tarkemmin – ääritapauksena jokaisella läpimittaluokalla on oma harvennusprosentti.

Puustotiedot

SMA-ohjelmiston tarvitsemat puustotiedot riippuvat käytetystä metsikön kehitysmallista. MELA-mallin yhteydessä tarvitaan metsikön yleistietoja sekä puu- tai läpimittaluokakohtaiset tiedot. Metsikön yleistietoja ovat mm. kasvupaikan sijainti, maatyyppe ja ravinteisuus sekä metsikön

syntyta, ikä, pääpuulaji jne. Puittaiset tai läpimittaluokitaiset tiedot käsittävät puulajin, iän, läpimitan, pituuden, latvussuhteen ja puun tai läpimittaluokan edustaman runkoluvun. SIMA-versiossa tarvitaan suuri joukko kasvupaikkaa ja ennustettua ilmastoa koskevia parametreja, joiden asettamisessa voi olla tarpeen käyttää ko. mallin laatijoiden asiantuntemusta.

Esimerkkitutkimuksia

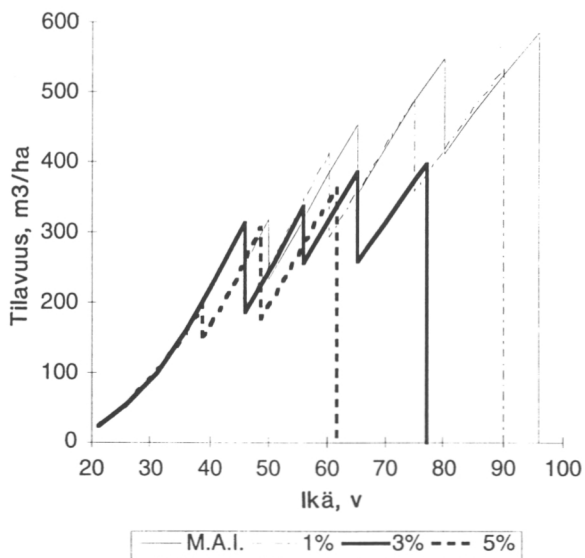
SMA-ohjelmistoa on käytetty kahden eri tyyppisen metsikön kehitysmallin yhteydessä: Kellomäen ym. (1992) SIMA-simulaattori, Ojansuun ym. (1991) sekä Hynysen ja Ojansuun (tässä julkaisussa) MELA-simulaattori. Koska nämä mallit käyttävät erilaisia lähtötietoja, käyttöliittymää muokattiin hieman molempien mallien tarpeisiin.

MELA-versio

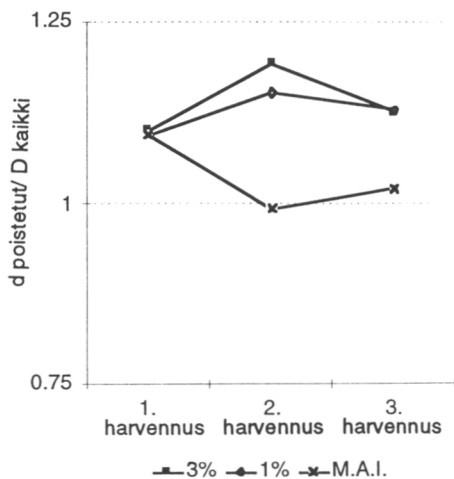
MELA-version tavoitteena on metsänkäsitteilyn vaihtoehtojen taloudellinen vertailu ja optimaalisen toimenpideohjelman analysointi. Metsikön kehitys perustuu tilastollisesti estimoituihin puittaisiin kasvu- ja kuolemismalleihin. Sekä determinististä että stokastista optimointia voidaan käyttää optimaalisen kiertoajan, harvennusten lukumäärän, ajoituksen, voimakkuuden ja tavan sekä perustamistiheyden määrittämiseen. Kyseisiä analyysejä on tehty puhtaille kuusikoille (Valsta 1992a) ja männikoille (Haapanen 1996).

Ohjelmistolla voidaan tutkia esim. optimiharvennusohjelman riippuvuutta harvennusten lukumäärästä tai korkokannasta. Kuvassa 2 on esitetty OMT-kuusikon optimihakkuuohjelmat korkokannoille 1, 3 ja 5 % sekä kiertoajan keskituotoksen maksimoinnille (M.A.I.) (Valsta 1992a).

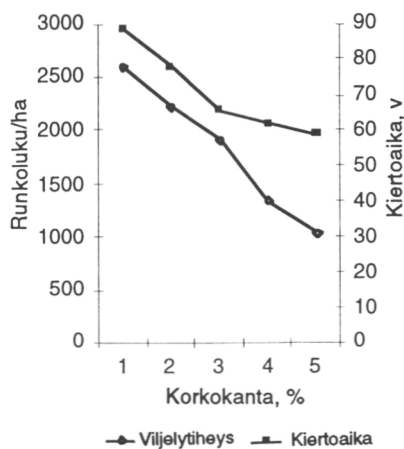
Harvennusten ajoituksen lisäksi mm. harvennustapaa voidaan optimoida harvennuksittain. Kuvassa 3 on SMA:lla määritetty optimaalinen harvennustapa (ylä/alaharvennus) kuusikossa läpimittasuhteen avulla ilmaistuna. Suhde on poistettujen puiden keskiläpimitan suhde keskiläpimittaan ennen harvennusta kuusikossa (Valsta 1992a).



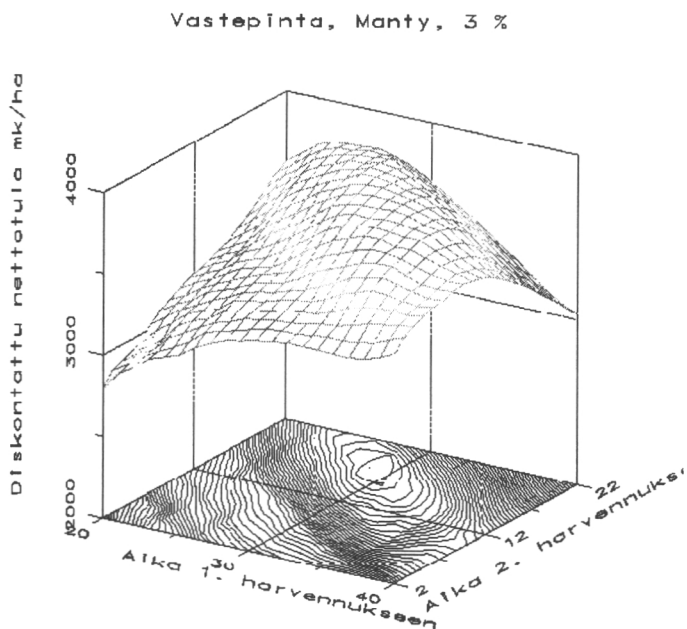
Kuva 2. SMA:lla määritetyt optimiharvennusohjelmat kuusikolle eri tavoitteilla: kiertoajan keskikasvu (M.A.I.), maan arvo korkokannoilla 1,3 ja 5 %.



Kuva 3. Harvennuksen läpimittasuhte (harvennustapa) optimiharvennusohjelmissä kuusikossa (Valsta 1992a).



Kuva 4. Optimaalinen perustamistiheys ja kiertoaika korkokannan funktiona kuusikossa (Valsta 1992a).



Kuva 5. SMA:lla generoitu vastepinta kahden harvennusuuttujan suhteen.

Puunkasvatuksen tavoitteen vaikutusta havainnollistetaan kuvassa 4, jota varten on optimoitu samanaikaisesti metsikön hakkuuohjelmaa ja perustamistiheyttä kuusikossa (Valsta 1992a). Kuvassa on nähtävissä sekä kiertoajan että perustamistiheyden voimakas riippuvuus korkokannasta.

Eri toimenpiteiden merkitystä asetetun tavoitteen kannalta voidaan havainnollistaa vastepinta-analyysillä. Kuvassa 5 on esitetty männikön ensimmäisen ja toisen harvennuksen vaikutusta nettotulojen nykyarvoon. Molempien muuttujien optimiarvot riippuvat toisistaan, kuten myös muista käsittelyohjelman muuttujista, joiden arvot on pidetty kiinteinä kuvan hilapisteitä laskettaessa.

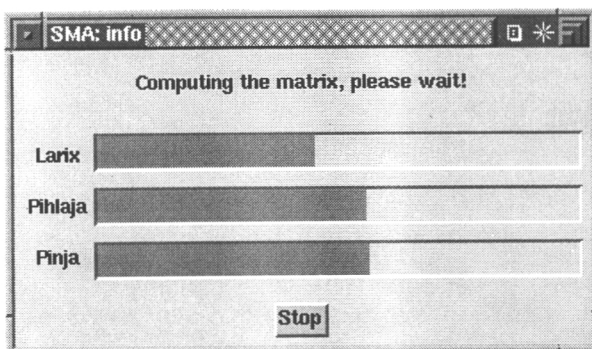
SIMA-versio

SIMA-versio kehitettiin ilmastonmuutoksen ja metsänkäsitelyn vaihtoehtojen tutkimista varten. SIMA-simulaattorissa puiden ja pintakasvillisuuden kehitys riippuu lämpötila- ja valo-olosuhteista sekä ravinteiden ja veden saatavuudesta.

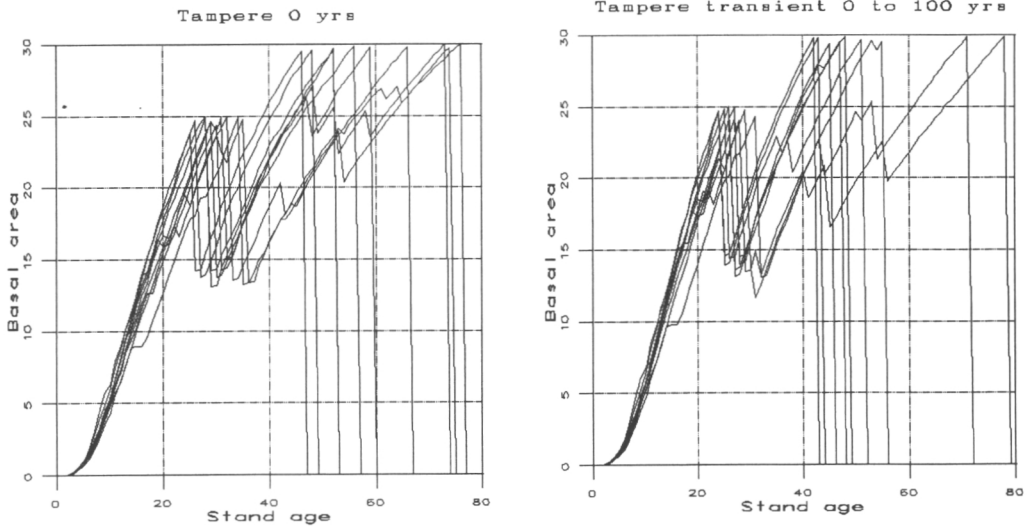
Simulaattori on luonteeltaan stokastinen. Koska ko. mallin käyttö edellyttää raskasta laskentaa, kolmiulotteisten kuvien hilapisteiden tuottamisessa voidaan käyttää rinnakkaislaskentaa muutamalle työasemalle hajautettuna. Kuvassa 6 nähdään ikkuna, joka ilmaisee dynaamisesti laskennan etenemisen valituilla kolmella työasemalla.

Esimerkkitarkasteluna esitetään ilmastonmuutoksen vaikutus puuston kehitysnopeuteen Tampereen seudun nykyilmaston ja malleilla ennustetun 100 vuoden kuluttua vallitsevan ilmaston tilanteessa (Kettunen et al. 1987). Mukaan on otettu 10 ilmastoskenaariota sekä nykyilmastolle että ns. transientille ilmastolle, jolle määriteltiin 0-hetken ilmasto, ilmasto 100 vuoden kuluttua ja lineaarinen muutos niiden välille. Puuston kehitys vaihteli kuukausittaisten säätekijöiden ja muiden SIMA-simulaattorissa olevien stokastisten ilmiöiden mukaan niin, että eri tapauksissa puuston pohjapinta-alan kehitys on nopeudeltaan huomattavasti vaihtelevaa (kuva 7). Muuttuvassa ilmastossa päätehakkuun ehdoksi asetettu 30 m²/ha pohjapinta-ala saavutetaan keskimäärin aikaisemmin kuin nykyilmaston mukaan, mutta vaihtelu on edelleen runsasta.

Ilmastonmuutostutkimuksen yksi keskeinen kysymys on mahdollinen ilmastollisen vaihtelun lisääntyminen. Kuvassa 8 on esitetty SIMA-simulaattorin optimiratkaisut transienteissa simuloinneissa, joissa nykyilmastosta on siirrytty 100 vuoden aikana uuteen ennustettuun ilmastoon siten että keskilämpötilojen ja sademäärien muuttuessa lineaarisesti niiden hajonnat ovat myös muuttuneet kolmeen



Kuva 6. Laskennan etenemistä eri työasemilla kuvaava ikkuna.

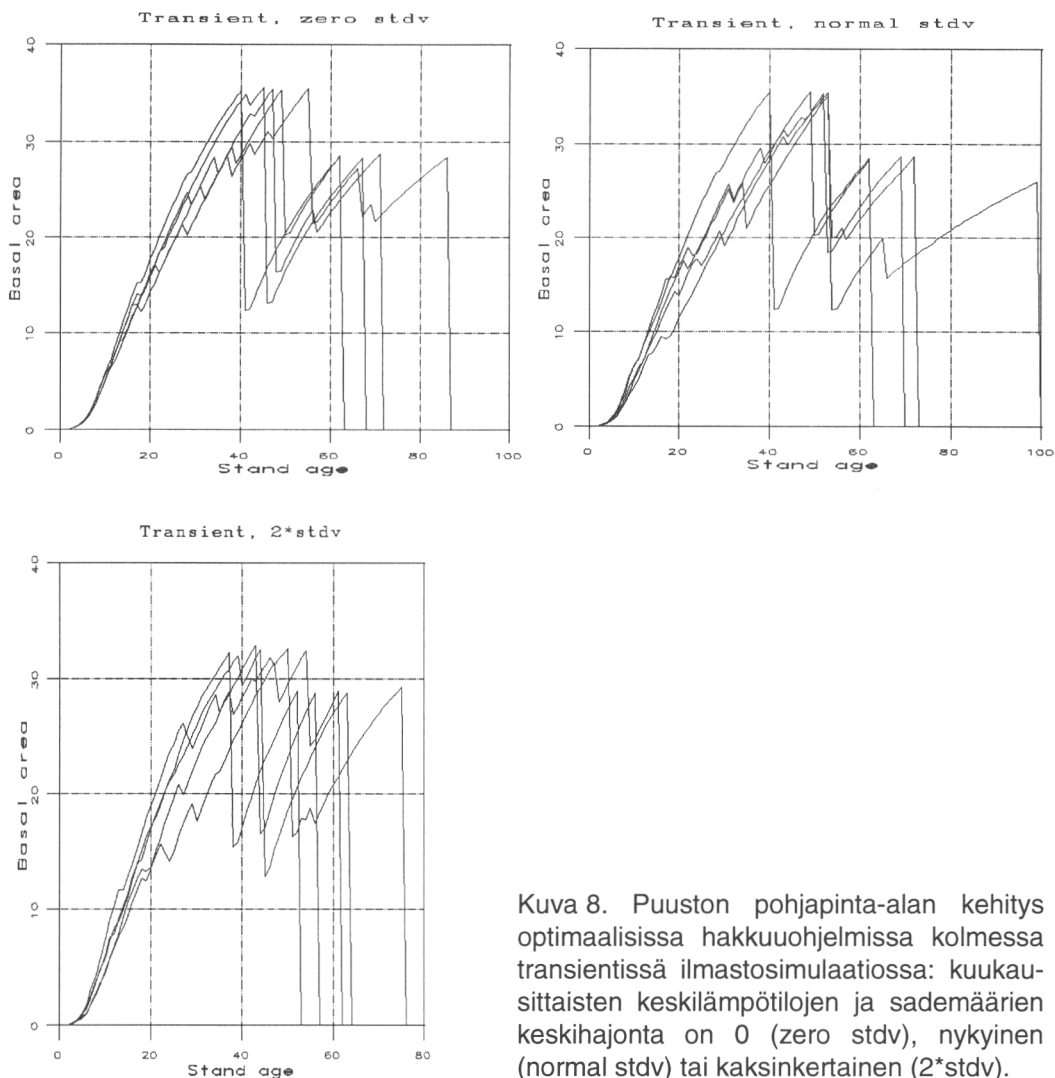


Kuva 7. Puuston pohjapinta-alan kehitys 10:ssä tapauksessa Tampereen nykyilmastossa ja ennustetussa ilmastossa 100 vuoden muutoksen mukaan.

lopputilanteeseen: hajonta on nolla, nykyinen tai kaksinkertainen. Hajonnan pieneminen ei vaikuttanut hakkuisiin tai eri puulajien istutusmääriin. Puuston kehitys yksittäisissä skenaarioissa vaihtelee (kuva 8), mutta keskiarvoina eroja ei juuri ollut. Diskontattujen (3 %) nettotulojen arvoissa oli eroa vain noin kaksi prosenttia. Optimaaliset puulajisuhteet istutusvaiheessa on esitetty taulukossa 1. Ilmastollisen vaihtelun kaksinkertaistaminen ($2 \cdot \text{stdv}$ kuvassa 8) johti hieman alempiin puustopääomiin ja lyhyempään kiertoaikaan. Optimaalinen puulajikoostumus (taulukko 1) muuttui rauduskoivun eduksi niin, että mäntyvaltaisuuden sijaan metsikkö, jossa oli yhtä paljon mäntyä ja rauduskoivua, oli edullisin. Ilmastollisen vaihtelun kaksinkertaistuminen kasvatti nykyarvoa noin kuudella prosentilla.

Taulukko 1. Optimaaliset istutusmäärät eri ilmastoskenaarioille. Keskihajonnat ovat kuukausittaisten lämpötilojen ja sademäärien arvoja ja suhteessa nykyilmastoon.

Keskihajonta	Mänty	Kuusi	Rauduskoivu	Hieskoivu
0	1400	200	500	50
nykyinen	1370	170	650	20
$2 \cdot \text{nykyinen}$	980	70	970	30

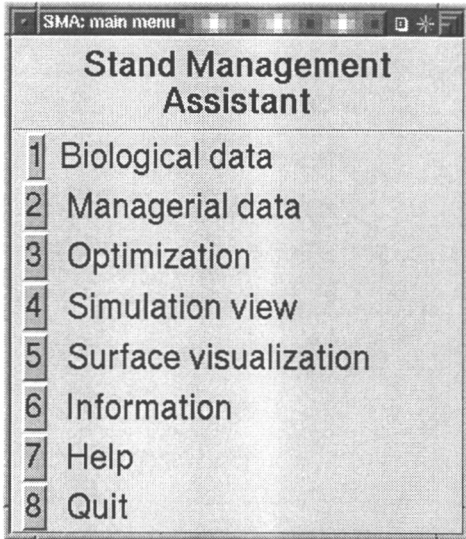


Kuva 8. Puuston pohjapinta-alan kehitys optimaalisissa hakkuuohjelmissa kolmessa transientissä ilmastosimulaatiossa: kuukausittaisien keskilämpötilojen ja sademäärien keskihajonta on 0 (zero stdv), nykyinen (normal stdv) tai kaksinkertainen ($2 \cdot \text{stdv}$).

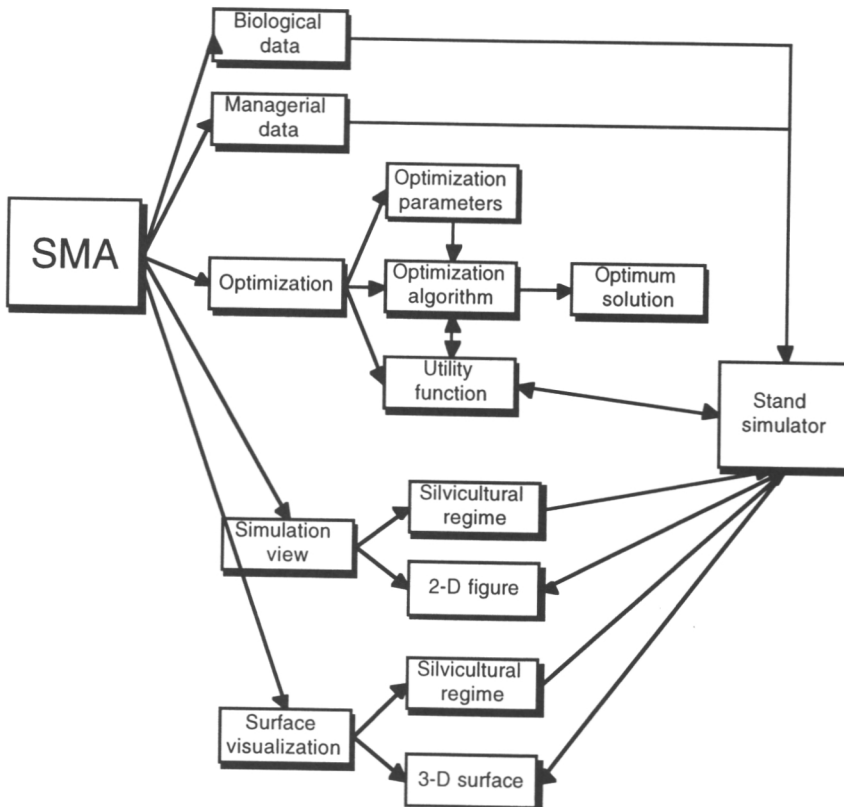
Ohjelmiston rakenne ja käyttö

Pääosat

Ohjelmiston kolme päätoimintoa ovat simulointi, optimointi ja visualisointi. Hiiriohjattu käyttöliittymä on jaettu kahdeksaan pääosaan (kuva 9). Numeroitujen nappien painaminen tuo esiin kunkin toiminnon pääikkunan. Lisäikkunoita käytetään monissa toiminnoissa tehtävien



Kuva 9. SMA-ohjelmiston perusrakenne.



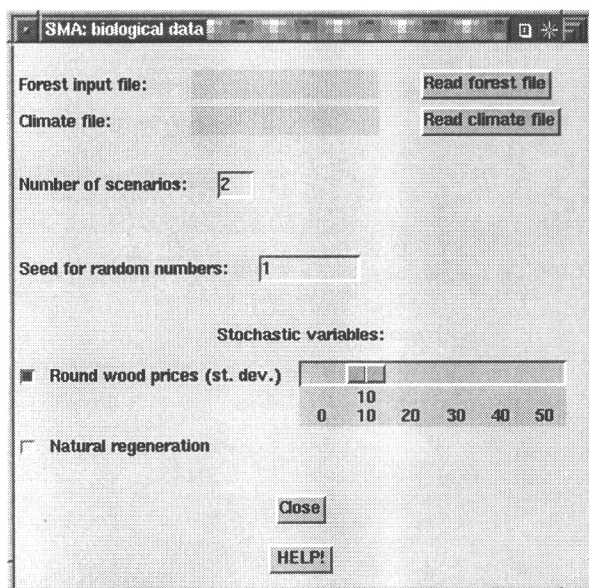
Kuva 10. Ohjelmiston pääosien suhteet.

tarkentamiseen. Käyttöliittymässä on pyritty yksinkertaiseen ja joustavaan rakenteeseen. Valikkopohjaisuuden sijaan käyttöliittymä koostuu ikkunoista, jolloin enemmän informaatiota on samanaikaisesti nähtävillä. Käyttäjän perustoiminnot ovat tekstin ja numeroiden kirjoittaminen kentiin, painikkeiden valitseminen ja numeroarvojen säätäminen liukukanojen avulla.

Ohjelmiston osien suhteet on esitetty kuvassa 10. *Information-* ja *Help-*osia ei ole otettu mukaan.

Biological data

Biological Data -ikkunassa annetaan metsikkösimulaattorin syöttötiedostot ja stokastisuuteen liittyvät parametrit. Stokastisessa optimoinnissa käytetään skenaarioita, jotka sisältävät kaikki satunnaismuuttujat. Näin ollen kantohintoihin liittyvä hajontaparametri annetaan tässä ikkunassa. Kuvassa 11 esitetty ikkuna on tehty Kellomäen et al. (1991) simulaattoria varten. MELA-simulaattorin yhteydessä *Biological Data* -ikkuna ei ole käytössä.



Kuva 11. Ikkuna biologisille lähtötiedoille.

Managerial Data

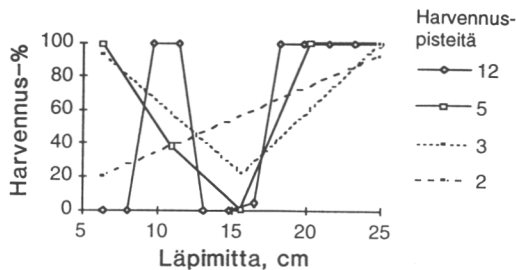
Tässä osassa annetaan taloudellisia ja toimenpiteitä koskevia tietoja (kuva 12). Laskennassa käytettävät työasemat ilmoitetaan myös tässä (SIMA-versio).

Thinning definition

Optimointi vaatii, että mahdollisten harvennusten lukumäärä ja harvennustapaa kuvaavien parametrien (harvennuspisteet) lukumäärä valitaan. Jokainen harvennusten lukumäärä muodostaa erilaisen optimointitehtävän, jossa on oma määränsä muuttujia. Sopivia harvennusten lukumääriä ovat yleensä 1–3. Jos valittua pienempi harvennusten lukumäärä antaa suuremman tavoitefunktion arvon, harvennusprosentit voivat mennä nolleen epäedullisissa harvennuksissa.

Thinning definition		Round wood prices:	
Thinnings	1	species	
described by	2 point(s).	sawtimber	pulpwood
Pine	Yes	210	130
Spruce	Yes	190	150
Silverbirch	Yes	220	120
Whitebirch	Yes	150	120
		Bare land value	4000
		Interest rate	3 %

Kuva 12. Toimenpiteiden ja ekonomisten parametrien valinta.



Kuva 13. Optimaaliset harvennusprosentit läpimitan suhteen tehtäville, joissa on harvennuspisteiden eri lukumäärät (Valsta 1992a).

Harvennuspisteillä (thinning points) voidaan säädellä harvennustapaa (ylä/alaharvennus). Läpimittaluokittainen harvennusprosentti määräytyy paloittain lineaarisen funktion avulla. Funktion joustavuus riippuu parametrien (harvennuspisteiden) lukumäärästä (kuva 13). Optimoinnin kannalta sopivia lukumääriä ovat 1–5.

Yksi harvennuspiste johtaa samaan harvennusprosenttiin kaikissa läpimittaluokissa. Kuvassa 13 on esitetty optimiratkaisut samalle harvennukselle eri harvennuspisteiden lukumäärillä. Met-sikössä on 12 läpimittaluokkaa, joille 12 pisteen malli antaa tarkan optimiratkaisun – muut mallit approksimoivat tarkkaa ratkaisua.

Planting density

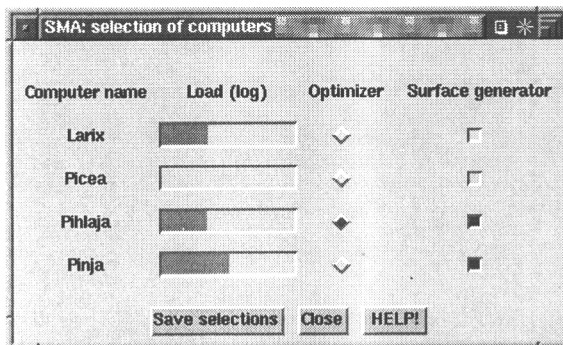
SIMA-simulaattoriin perustuvaan versioon on otettu neljä puulajia. Istutustiheyden optimointi voidaan valita halutuille puulajeille. Istutustaimet lisätään luonnontaimiin (jos on aktivoitu luontainen uudistaminen) tai alkupuustoon (annettu kohdassa 2.2).

Specify computers (SIMA-versio)

Painike tuottaa ikkunan laskennassa käytettävien työasemien valitsemiseksi (kuva 14). Optimoinnissa voidaan käyttää vain yhtä työasemaa, mutta vastepinnan laskenta voidaan jakaa yhdestä neljään työasemalle. Ikkuna näyttää valinnan pohjaksi arvion kunkin työaseman viimeaikaisesta kuormituksesta (logaritmisella asteikolla). Painikkeet [*Optimizer*] ja [*Surface generator*] toimivat eri lailla: edellisen vaihtoehdot ovat toisensa poissulkevia kun taas jälkimmäisistä useampi voi olla samanaikaisesti aktivoituna.

Round wood prices

Puutavaran hinnat on määritelty tienvarsihintoina, mk/m^3 . Hakkuutuloja laskettaessa tienvarsihinnoista vähennetään korjuukustannukset, jotka perustuvat puuston keskijäreYTEEN ja hehtaarikohtaiseen poistumaan.



Kuva 14. Ikkuna tietokoneiden valintaa varten.

Optimization Data

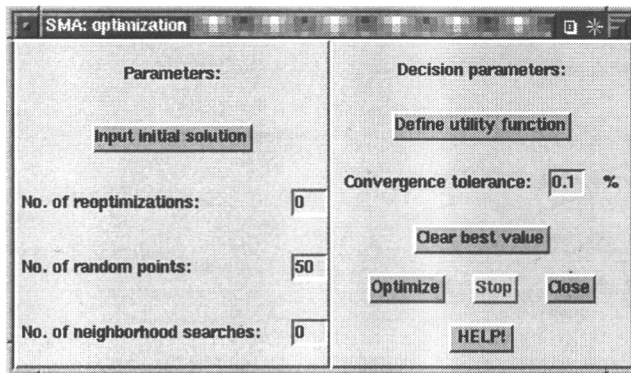
Tässä osassa määritellään optimoinnin parametrit, alkuratkaisu ja ohjataan optimointia (kuva 15). Optimointialgoritmi perustuu Hooken ja Jeevesin (1961) suorahakumenetelmään Osyczkan (1984) muuntamana. Algoritmi luokitellaan derivaattavapaisiin, rajoittamattoman epälineaarisen ohjelmoinnin algoritmeihin (Bazaraa ja Shetty 1979, Neittaanmäki ym. 1988). Se soveltuu käytettäväksi puittaisten kasvumallien kanssa, jotka muodostavat optimointitehtävän, jonka tila- tai ohjausmuuttujille on vaikeaa tai mahdotonta määrittää osittaisderivaattoja tehokkaampien optimointialgoritmien tarpeisiin.

Input initial solution

Optimointi lähtee liikkeelle alkuratkaisusta, jota voidaan antaa painikkeella [*Input initial solution*]. Tällöin saadaan kuvan 16 mukainen ikkuna, jossa on aluksi oletusarvot tai edellisen optimointierroksen ratkaisu. Ikkunassa voidaan määrittellä koko kiertoajan toimenpiteet. Samaa määrittelyä käytetään optimoinnin ja visualisoinnin pohjana. Ikkunan rakenne (painikkeiden ja liukukanojen lukumäärät) riippuu harvennusten ja harvennuspisteiden lukumäärästä.

Number of reoptimizations

Optimointitehtävän ei-konveksisuudesta johtuen optimiratkaisuksi tulee helposti ratkaisu, joka on vain paikallinen maksimi. Jotta todellinen globaali maksimi löytyisi suuremmalla todennäköisyydellä, optimointi kannattaa toistaa muutaman kerran (satunnaisesti generoiduista alkupisteistä lähtien).



Kuva 15. Ikkuna optimoinnin lähtötiedoille.

Kuva 16. Optimoinnin alkuratkaisun tai visualisoinnin peruspisteen määrittäminen.

Number of random points

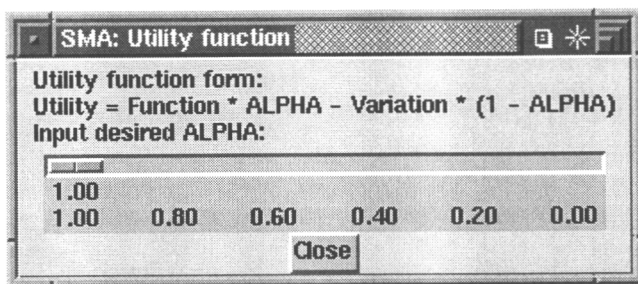
Satunnaispisteiden lukumäärää käytetään kahdessa optimoinnin vaiheessa: optimoinnin uusintojen alkuratkaisun etsinnässä ja löydetyn, paikallisen optimin lähiympäristön tutkimisessa (ns. neighborhood search, ks. seuraava kappale).

Number of neighborhood searches

"Neighborhood" -haku tehdään löydetyn optimiratkaisun ympäristössä, jotta mahdollisuus ennenaikaiseen haun lopettamiseen pienenee. Ko. haku kohdistuu Hooken ja Jeevesin algoritmin antaman optimiratkaisun ympäristöön alueella, joka on 1/10 muuttujien käyvästä vaihtelualueesta.

Define utility function (SIMA-versio)

Stokastisessa optimoinnissa voidaan määrittää hyötyfunktio (kuva 17), jossa riskin karttaminen on mukana. Hyödyn perusmitta on tavoitefunktion odotusarvo. Jos päätöksentekijä karttaa riskiä ja haluaa ottaa huomioon tavoitefunktion arvon vaihtelun, tämä määrittely mahdollistaa sen.



Kuva 17. Riskin karttamisen määrittely hyötyfunktioon.

Malli käyttää yhtä parametria, ALPHA, riskin karttamisen asteen säätelyyn. Kun ALPHA = 1, odotusarvolle annetaan täysi paino hyödyn määrittelyssä ja päätöksentekijä on riskin suhteen neutraali. Pienemmät ALPHAn arvot merkitsevät, että tavoitefunktion odotusarvo saa vähäisemmän merkityksen ja tavoitefunktion hajonta suuremman painon. Kun ALPHA = 0, päätöksentekijä pyrkii mahdollisimman pieneen tavoitefunktion vaihteluun tavoitefunktion arvosta välittämättä ja osoittaa äärimmäistä riskin karttamista.

Convergence tolerance

Optimoinnin päättymiskriteeri annetaan konvergointitoleranssilla. Jos optimoitavien muuttujien muutokset Hooken ja Jeevesin algoritmin iteraatioiden välillä ovat pienemmät kuin toleranssi, algoritmi pysähtyy ja tulostaa parhaan ratkaisun siihen mennessä. Toleranssi on suhteutettu muuttujien käypiin vaihteluväleihin.

Clear best value

Tämä painike nolaa parhaan ratkaisun (tavoitefunktion arvon) ohjelman käynnistyksen jälkeen.

Optimize

Tämä painike käynnistää optimoinnin, jonka aikana dynaaminen ikkuna (SIMA-versiossa) näyttää kunkinhetkisen ratkaisun, sitä vastaavan tavoitefunktion arvon ja parhaan siihenastisen arvon. Riippuen simulaattorista ja stokastisen optimoinnin skenaarioiden lukumäärästä funktioevaluointeja saadaan noin 0.2–50 sekuntia kohden. Kokonaiset optimointiajot voivat kestää joistakin sekunneista mutamiin tunteihin. Kun optimointi päättyy, uusi ikkuna näyttää optimiratkaisun.

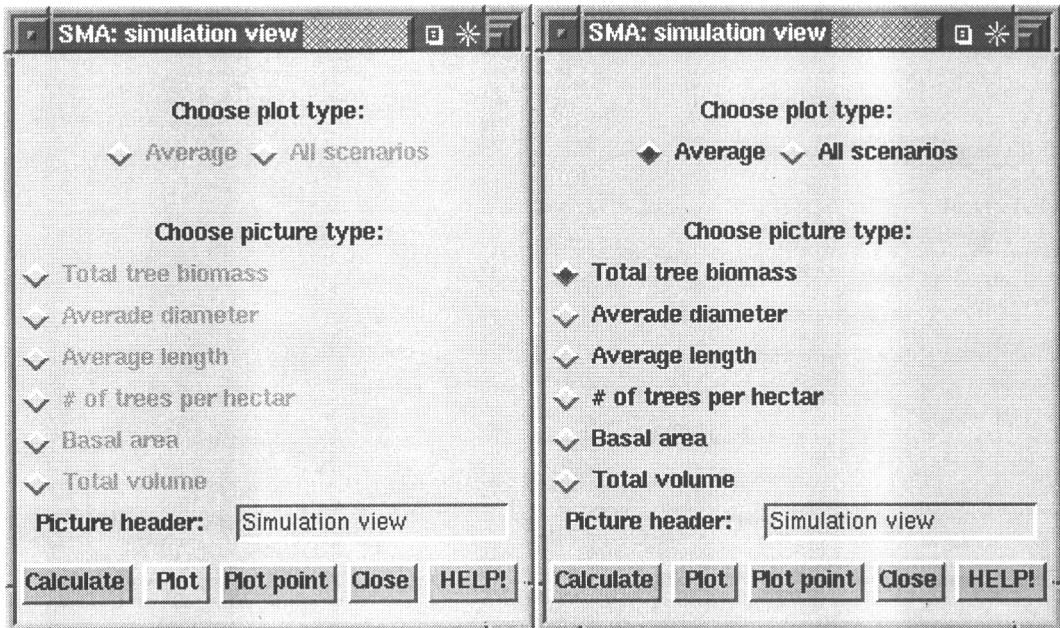
Simulation View

Tämä osa tuottaa kuvaajia valittujen metsikkötunnusten kehityksestä kiertoajan kuluessa. Yksityiskohtainen tekstitulostus tallentuu tiedostoon, josta sitä voidaan jälkikäteen tarkastella.

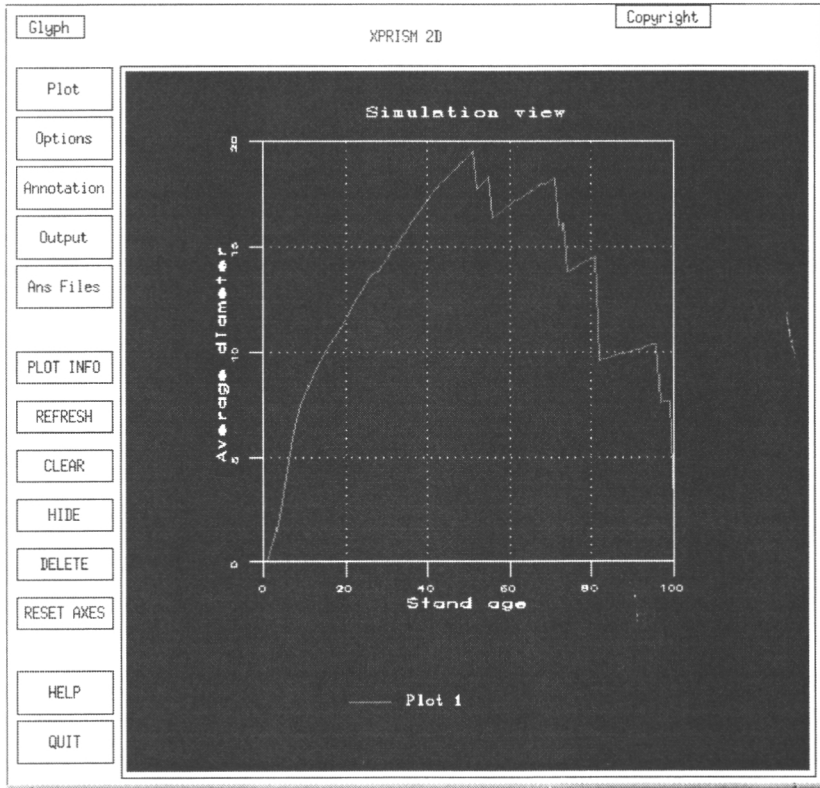
Ellei muuta määritellä, simuloitava toimenpideohjelma on viimeisen optimoinnin lopputulos. Voidaan myös simuloida käyttäjän valitsemia toimenpideohjelmaa, jotka määrittellään *point input* -ikkunassa (kuva 16).

Kuvassa 18 nähdään kaksi esimerkkiä *Simulation view* -ikkunasta. Vasemmanpuolimmaisessa ikkunassa useimmat toiminnot on estetty (himmennetty teksti). Ne tulevat mahdollisiksi kun simulointi on tehty painamalla *Calculate*-painiketta. Sitä ennen toimenpideohjelmaa voidaan muuttaa valitsemalla *Plot point*.

Käytettävissä on kaksi kuvatyyppiä: *Average* tarkoittaa tulosta, joka saadaan laskemalla muuttujista keskiarvot eri skenaarioiden suhteen. *All scenarios* muodostaa kuvaajan jokaista skenaariota kohden (tai enintään 20 ensimmäiselle



Kuva 18. *Simulation view* -toiminnon pääkkuna kahdessa tapauksessa: ennenkuin toimenpideohjelma on simuloitu (vasemmalla) ja sen jälkeen (oikealla).



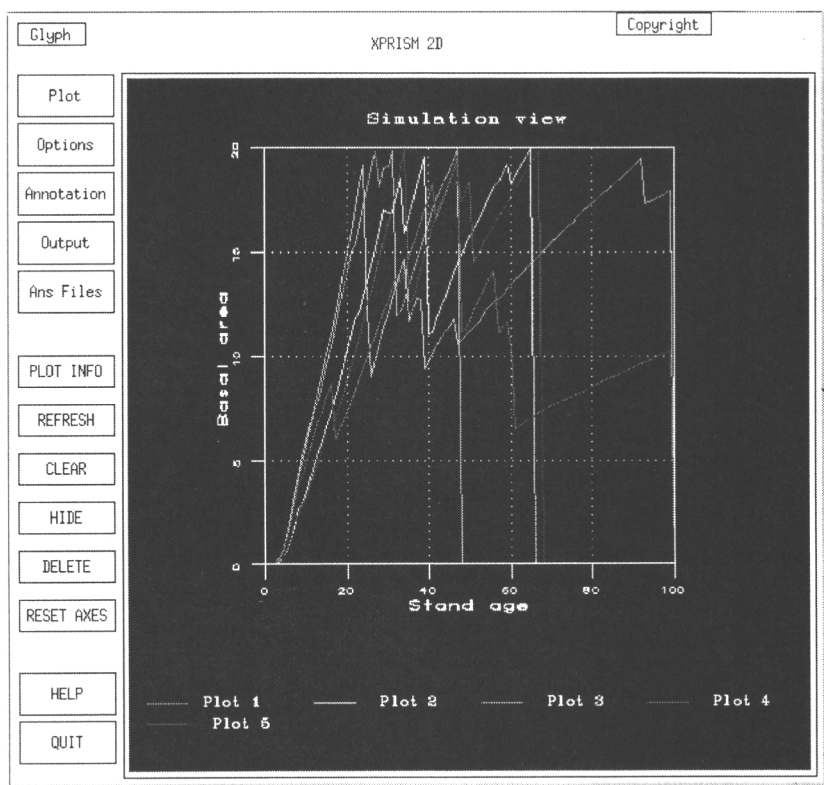
Kuva 19. Puuston keskiläpimitan kehitys viiden skenaarion keskiarvona.

skenaariolle, jos niitä on enemmän). Kuvatyyppien lista vastaa metsikkösimulaattorista saatavia muuttujia. Kuvalle voidaan antaa otsikko mukana olevaan tekstikenttään kirjoittamalla.

Plot-painike käynnistää Khoros-visualisointijärjestelmän ohjelman xprism2, jolle metsikkösimulaattori on tuottanut tarvittavat tiedot. Kaksi esimerkkikuvaa näyttävät keskiarvokehityksen (kuva 19) ja skenaarioittaisen kehityksen (kuva 20).

Surface Visualization

Vastepintaa voidaan katsella kolmiulotteisena kuvana optimiratkaisun tai käyttäjän määrittelemän käsittelyohjelman ympäristössä. Käyttäjä valitsee kaksi muuttujaa, yhden x- ja



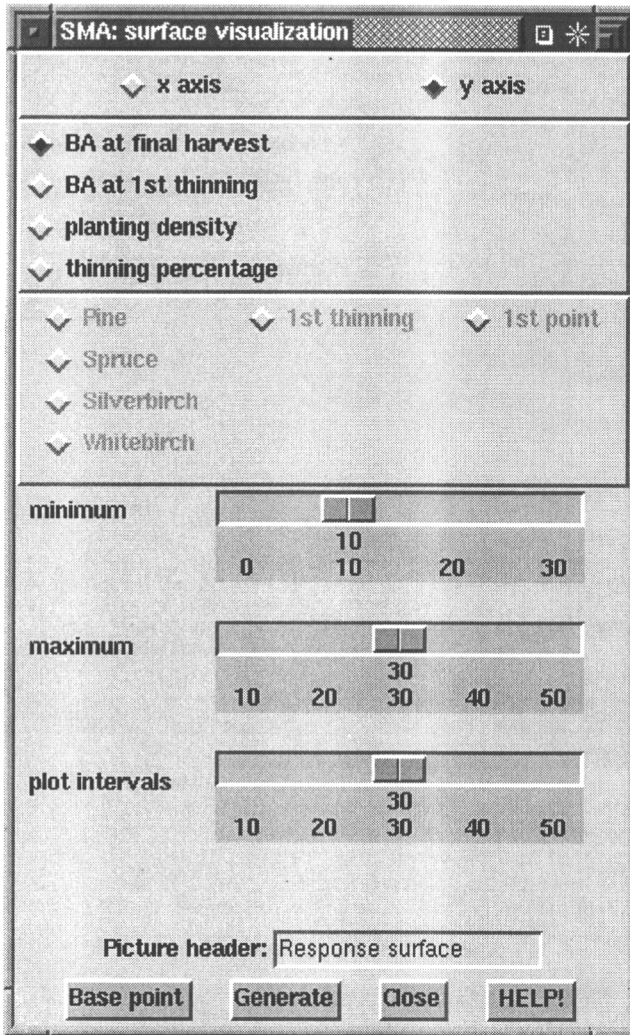
Kuva 20. Puuston pohjapinta-alan kehitys viidessä skenaariossa.

toisen y-akselia varten (kuva 21). Näille muuttujille annetaan minimi- ja maksimi-arvot ja kuvapisteen generoituvat niiden välille. Muut muuttujat pidetään peruspisteen (optimiratkaisu tai käyttäjän valitsema) mukaisina. *Plot intervals* -liukujana säätelee kuvan hilapisteiden lukumäärää.

Himmennetyt painikkeet tulevat aktiiveiksi kun istutus-tiheys tai harvennusprosentti valitaan x- tai y-muuttujaksi. Painike *Base point* tuottaa ikkunan, jossa peruspisteen kaikkien muuttujien arvot (käsittelyohjelma) voidaan valita.

Generate- painike käynnistää xprism3-ohjelman joka on osa Khoros-visualisointijärjestelmää. Xprism3 saa tiedot metsikkösimulaattorilta. Esimerkki tulostuksesta on kuvassa 5.

Vastepintakuvan ominaisuuksia voidaan säätää monipuolisesti Khoroksen säätimillä, mm. kuvan katselukulmaa voidaan muuttaa. Kuvat voidaan tallettaa tai tulostaa Post-Script-muodossa mustavalkoisille tai värikirjoittimille. Khoroksessa on myös laaja help-toiminto.



Kuva 21. Ikkuna vastepintakuvien määrittelyä varten.

Information

Tämä painike tuottaa teksti-ikkunan, jossa on tietoa SMA:n versiosta ja käytöstä. Tieto haetaan tekstitiedostosta.

Help

Tämä painike tuottaa ohjetietoja kustakin ohjelman modulist.

Ohjelmointityökalut

SMA-ohjelmisto koostuu kolmentyyppisistä osista:

- Käyttöliittymä, joka on ohjelmoitu Tcl/Tk -välineillä
- Simulointi- ja optimointiosat, jotka on ohjelmoitu FORTRANilla
- Visualisointi, joka käyttää Khoros-järjestelmää.

Tcl (Tool command language) ja Tk (a Toolkit for X Window System) muodostavat kehitysympäristön graafisten käyttöliittymien ohjelmointiin. Ne on kehittänyt Ousterhout (1994) (University of California, Berkeley, USA) ja ne ovat tulleet suosituiksi sekä yliopisto- ja tutkimusympäristössä että liikemaailmassa. Käyttäjien lukumääräksi on arvioitu kymmeniä tuhansia (Strand 1994). Tcl on kieli, jolla voidaan ohjata ja laajentaa sovelluksia. Tcl-kieltä tulkitaan ohjelman suorituksen aikana. Tcl-rakenteen avulla voidaan tehdä dynaamisia sovelluksia, jotka muuttavat ulkoasuaan käyttäjän toimintojen seurauksena ajon aikana. Näin ollen ei olla sidottuja etukäteen käännettyihin binääritiedostoihin. SMA-ohjelmiston ikkunat mukautuvat ajon aikana esim. käyttäjän antamien harvennusten ja harvennuspisteiden lukumäärien mukaan.

Tcl-kieli on saatavissa useimpiin tietokoneympäristöihin kuten unix, VAX/VMS, DOS, MS-Windows, OS/2, Macintosh, AmigaDOS ja NeXT.

Käyttöliittymä kutsuu FORTRAN-kielisiä ohjelmia optimointia ja metsikön kehityksen simulointia varten. C-kielisiä ohjelmia voitaisiin käyttää yhtä hyvin. Optimointiohjelma on muokattu Osyczkan (1984) esittämästä ja se on kuvattu aiemmissa julkaisuissa (Valsta 1992a & 1992b). Optimointimenetelmä on muunnos Hooken ja Jeevesin (1961) suorahakualgoritmista.

Metsikkösimulaattori riippuu ohjelmiston käyttötarkoituksesta. Simulaattorin tarvitsemat parametrit lähetetään ohjelmakutsun argumenttilistana simulaattorille. Simulaattorin tulee tuottaa yhden kiertoajan simulointi yhdellä ohjelmakutsulla.

Käyttöliittymä kutsuu myös visualisointiohjelmia – kaksi- ja kolmiulotteisia kuvia, jotka tehdään Khoros-järjes-

telmällä (University of New Mexico, USA; Rasure & Williams 1991). Khoros-järjestelmä on saatavissa useisiin suur- ja mikrotietokoneympäristöihin.

Kirjallisuus

- Bazaraa, M. S. & Shetty, C. M. 1979. Nonlinear programming. John Wiley & Sons, New York. 560 s.
- Haapanen, R. 1996. Männikön optimaaliset hakkuut. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, metsävarojen käytön laitos. 59 s.
- Hooke, R. & Jeeves, T.A. 1961. "Direct search" solution of numerical and statistical problems. J. Assoc. Comput. Mach. 8:212–229.
- Kellomäki, S., Väisänen, H., Hänninen, H., Kolström, T., Lauhanen, R., Mattila, U. & Pajari, B. 1992. A simulation model for the succession of the boreal forest ecosystem. *Silva Fennica* 26:1–18.
- Kettunen, L., Mukula, J., Pohjonen, V., Rantanen, O. & Varjo, U. 1987. The effect of climatic variations on agriculture in Finland. Julkaisussa: Perry, M. L., Carter, T. R. & Konijn, N. T. (toim.) The effect of climatic variations on agriculture. International Institute for Applied Systems Analysis. No 1. 90 s.
- Neittaanmäki, P., Mäkelä, M. & Parviainen, S. 1988. Epälineaarinen optimointi. Jyväskylän yliopisto, matematiikan laitos. Luentomoniste 11. 130 s.
- Ojansuu, R., Hynynen, J., Koivunen, J. & Luoma, P. 1991. Luonnonprosessit metsälaskelmassa (MELA) – METSÄ 2000 -versio. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 385. 59 s.
- Osyczka, A. 1984. Multicriterion optimization in engineering with FORTRAN programs. Ellis Horwood, Chichester.
- Ousterhout, J.K. 1994. Tcl and the Tk Toolkit. Addison-Wesley.
- Rasure, J. & Williams. 1991. An integrated visual language and software development environment. *Journal of Visual Languages and Computing* 2: 217–246.
- Strand, E. J. 1994. A shell for X Windows? *GIS World*, March 1994:24, 26.
- Valsta, L. T. 1992a. An optimization model for Norway Spruce management based on individual tree growth models. Tiivistelmä: Kuusikon käsittelyn optimointi puittaisiin kasvumalleihin pohjautuen. *Acta Forestalia Fennica* 232. 20 s.
- 1992b. A scenario approach to stochastic anticipatory optimization in stand management. *Forest Science* 38(2):430–447.
- 1993. Stand management optimization based on growth simulators. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 453. 51+81 s.

Yhteensä 14 viitettä.

Risto Sievänen
Jari Perttunen

Lignum

Taustaa

Tietokoneita on käytetty suomalaisessa metsäntutkimuksessa siitä lähtien kun se on ollut mahdollista. Eräs ensimmäisistä sovellutuksista oli Kuuselan ja Kilkin (1963) analyysi metsikkötekijöiden vaikutuksesta puiden kasvuun. Ensimmäisissä sovellutuksissa tietokonetta käytettiin nopeuttamaan aikaavieviä, aiemmin laskukoneilla tehtyjä laskuja. Ajan mukana tästä lähtökohdasta on päädytty metsäntutkimuksen aloihin, jotka eivät olisi mahdollisia ilman tietokoneita. Esimerkki tällaisesta sovelluksesta on MELA-järjestelmä, jota ei voitaisi toteuttaa käsin tehtävillä laskutoimituksilla.

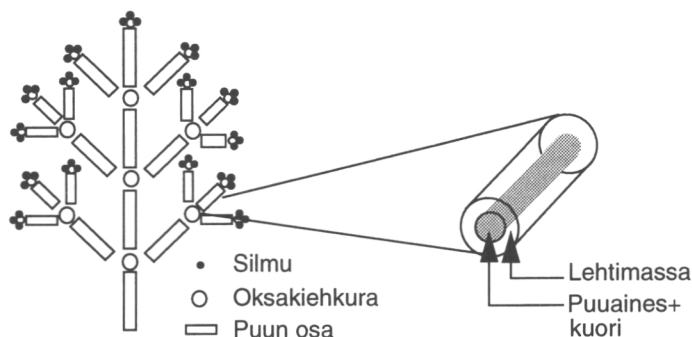
Kehityksen kuluessa tavat, joilla asioita voi esittää tietokoneissa ovat kehittyneet ja tulleet monipuolisimmiksi. Nykyään voidaan tietoa tallentaa monimutkaisiin tietorakenteisiin ja operoida symboliarvoja omaavilla muutujilla. Tietokoneiden ja tietojenkäsittelymenetelmien kehityksen myötä yhä uudenlaisten asioiden tutkiminen on tullut mahdolliseksi. Esimerkkinä uusimmista aluevaltauksista on keinoelämän tutkimus, jossa tietotekniikan avulla luodaan elämää jäljitteleviä järjestelmiä. Keinoelämän tutkimuksen eräs motto on, että elämän ongelma ratkeaa vain luomalla sitä, ei tarkkailemalla ja analysoimalla. Keinoelämän tutkimuksessa on esimerkiksi rakennettu vaihtoehtoisia tapoja yksikertaisten organismien liikkeille ja tutkittu sitten erilaisilla liikkumistavoilla varustettujen organismien selviytymistä ja lisääntymismenestystä erilaisissa ympäristöissä.

Eräs tapa käyttää tietokoneiden nykätehoja hyväksi puiden tutkimisessa on tehdä malli, jossa puu koostuu lukuisista alkeisosista ja kehittyy niiden välisten vuoro-

vaikutusten seurauksena. Puun perimmäinen biologinen alkeisosia lienee solu. Mitkään nykyiset tietokoneet eivät pysty käsittelemään soluista koostuvaa puuta. LIGNUM-malli on tulos pyrkimyksestä mallintaa puu mahdollisimman realististen (todellisuuden kanssa yhdenmukaisten) alkeisosien avulla kuitenkin ottaen huomioon laskennalliset ja mallinnustekniset rajoitukset, ja tehdä tämä työ äärellisessä ajassa. Malli on tehty yhteistyössä Metsäntutkimuslaitoksen ja Helsingin yliopiston Metsäekologian laitoksen tutkijoiden kesken.

Mikä LIGNUM on?

LIGNUM-mallissa puuta tarkastellaan alkeisosista koostuvana kokonaisuutena (kuva 1). Alkeisosien avulla voidaan hallita sekä puun rakenne että elintoiminnot. Rakenne kuvataan rungon/oksan osien, oksakiehkuroiden ja silmujen avulla. Rungon/oksan osa koostuu mantopuusta, sydänpuusta, kuoresta ja yhteyttävästä lehtimassasta. Oksakiehkura on rungon/oksan osien haaroittumiskohta. Silmut tuottavat uusia vuosikasvaimia, oksakiehkuroita ja silmuja. Juuristo on mukana yhdellä tunnuksella kuvattuna. Elintoiminnot ovat tässä yhteydessä kasvun materiaalin eli yhteystuotteiden kerääntyminen, jakautuminen ja poistuminen. Kerääntymistä säätelevät yhteyttäminen ja elävän solukon tarpeisiin kuuluva hengitys. Yhteystuotteiden



Kuva 1. Puu kuvattuna LIGNUMin rakenneosilla.

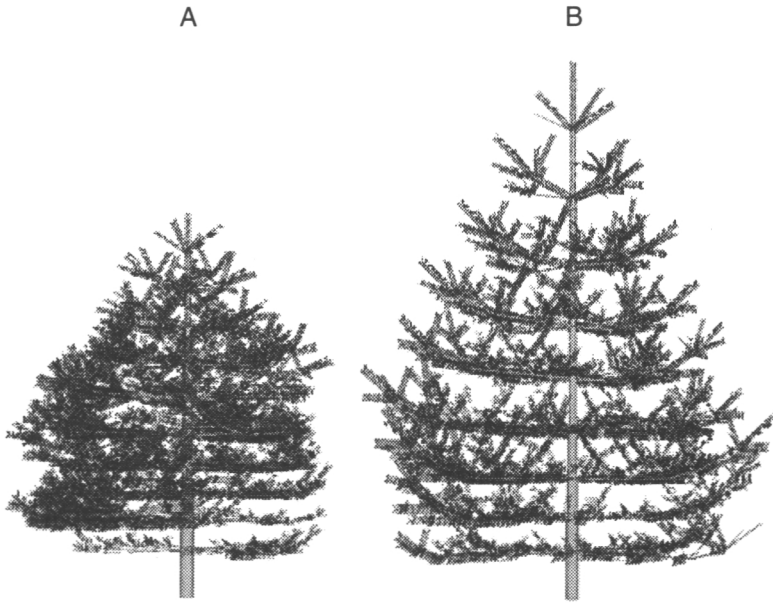
jakautuminen näkyy olemassa olevien osien kasvuna ja kuolleiden osien (neulaset ja oksat) kariseminen näkyy poistumisena. Aika-askel mallissa on yksi vuosi. LIGNUM on tällä hetkellä parametrisoitu vain männylle. Se soveltuu periaatteessa kaikille kotimaisille puulajeille. Tällöin tarvitaan vain uudet parametriarvot ja joidenkin alkeisosien uudelleen määrittely.

Erikoista aikaisempiin malleihin verrattuna LIGNUMissa on sekä rakenteen että elintoimintojen kuvaaminen yksityiskohtaisella tasolla samanaikaisesti. Aiemmin näitä kahta asiaa on tutkittu pitkälti erikseen. On olemassa jompaan kumpaan puoleen keskittyneitä yksityiskohtaisia malleja. Ns. prosessipohjaiset mallit keskittyvät elintoimintojen kuvaamiseen. Erilaisilla metemaattisilla konstruktiolla (esim. Fraktaalit ja Lindenmayer-systeemit) on pystytty jäljittelemään puiden arkkitehtonista rakennetta hämmästyttävän tarkasti. Silloin, kun rakenteen ja toiminnan kuvaukset voidaan yhdistää yhteen malliin, päästään entistä syvemmälle kasvun ilmiöiden tutkimisessa.

LIGNUM-malli on toteutettu Unix työasemassa Window System/Motif ikkunointiympäristössä C++ -kielellä. Käyttöliittymä on graafinen, ja mahdollistaa parametriarvojen interaktiivisen muuttelun ja tulosten (puun) tarkastelun kolmiulotteisena. Puun visualisoinnissa (kuvat 2 ja 4) on käytetty OpenGL graafista kirjastoa.

Miksi LIGNUM?

Eräs syy mallin laatimiseen on ollut halu tehdä sellaista, mikä aiemmin ei ollut mahdollista: synteesi aiemmin erillisinä tarkastelluista asioista, ja halu pystyä ymmärtämään uusia puun kasvun ilmiöitä. LIGNUMin tyypillisellä mallilla on mahdollista tehdä "mitä-jos" -kysymyksiä kasvun ja rakenteen muodostumisen mekanismeista ja näin hylätä tai vahvistaa ennakkokäsityksiä sekä keksiä uusia kysymyksen asetteluja. Esimerkkinä tällaisista kysymyksistä on haarautumisen vaikutus puun kasvuun. Kuvassa 2 on kaksi LIGNUMin simuloimaa puuta, joiden parametriarvot



Kuva 2. Vähän (A) ja paljon haarautuva (B) mänty LIGNUMin simuloimana. Simulointiaika on 10 v. Suuremman puun pituus on 3,7 m. Parametriarvot vastasivat hyvin rehevää kasvupaikkaa.

eroavat toisistaan siten, että pienempi haaroittuu runsaammin kuin suurempi. Kaikki muut parametriarvot ovat samat. Tällaista tulosta voidaan arvella puiden rakenteen mittaus-ten perusteella, mutta LIGNUMin kaltaisen mallin avulla asia voidaan todentaa (tai kumota) sekä visuaalisesti sekä kvantitatiivisesti. Huomionarvoista kuvan 2 tuloksissa on myös, että puiden yhteytysnopeudet neulasyksikköä kohden ovat samat. Tämä huomio tuo valaistusta kokeelliseen tulokseen, jonka mukaan saman kasvilajin sisällä yhteytystehokkuus ja nopeakasvuisuus eivät välttämättä korreloi voimakkaasti: kuvan 2 simulointi osoittaa, että voimakas haaroittuminen voi estää korkeamman yhteytystehon kasvua lisäävän vaikutuksen.

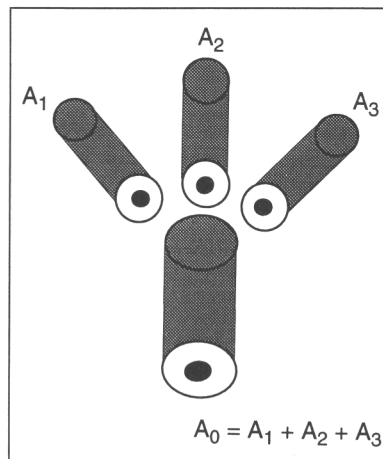
Toinen lähtökohta LIGNUMin kehittämisessä on ollut saada aikaan työkalu, jolla voidaan koota yhteen erillisiä puita koskevia tutkimustuloksia ja tutkia yksittäisten teki-jöiden vaikutusta kokonaisuuteen. Mahdollisia LIGNUMin käyttöalueita voivat olla mm. seuraavat (tutkimus)ongelmat:

- Tuholaiten vaikutus puun kasvuun, ulkonäköön ja lisääntymiseen ja puiden torjuntastrategiat tuohyön-teisiä vastaan.
- Ravinteiden kierto ja jakautuminen puun sisällä.
- Puun hydraulisen arkkitehtuurin ja lehvästön toiminnan välillä olevan yhteyden selvitys.
- Puun latvuksen arkkitehtuurin ja tuotoksen välinen yhteys.
- Metsätuhojen syy–seuraussuhteiden päättely.
- Puita koskevien mittaustietojen havainnollistaminen käyttäen hyväksi graafisen käyttöliittymän visualisointi-mahdollisuuksia.
- Puiden välinen kilpailu metsikön sulkeutumisvaiheessa.

LIGNUMin toimintaperiaatteet

Mallinnuksen kannalta LIGNUM on ollut haasteellinen, koska siinä siirryttiin kokonaisia puita koskevista yhtälöistä yksittäisiä puun osia koskeviin tarkasteluihin. Puun osia voi olla tuhansia; oli vaikea saada kaikki osat toimimaan yhdessä niin, että malli antaa tulokseksi suunnilleen puun näköisen rakenteen.

Toiminnallisesti LIGNUMin kaikkein tärkein yksikkö on kahden haarautumiskohdan välinen puun osa (kuva 3).



Kuva 3. Kahden haarautumiskohdan välisten puun osien liittyminen toisiinsa oksakiehkurassa. Sydänpuu on merkitty tummalla värillä, vaalea osa poikkileikkauksipinnassa on mantopuuta. Rakenneosissa voi olla päällä neulasia, joita tähän kuvaan ei ole merkitty. Kuvassa oleva yhtälö koskee mantopuun poikkileikkauksen pinta-aloja.

Puun kasvu on seurausta yhteyttämisessä syntyneiden yhdisteiden muuttumisesta rakenteelliseksi solukoksi. Tämä tapahtuma on kuvattu siten, että vuodessa kertyneet yhteytystuotteet käytetään ensiksi olemassa olevien puun solukoiden ylläpitoon ja yli jäävä osuus uusien osien kasvattamiseen ja vanhojen osien paksuuskasvuun. Juuret kasvavat suhteessa lehvästön kasvuun.

Koko puusta yhteensä kertyneet yhteytystuotteet saadaan summaamalla jokaisen (lehtimassallisen) osan yhteytys. Osan yhteytysnopeus riippuu sen valaistusolosuhteista ja lehtimassasta. Valaistusolosuhteet lasketaan yksityiskohtaisen mallin avulla, jossa otetaan huomioon taivaankannen eri osista tuleva säteily ja sen varjostuminen latvustossa. Puun solukoiden hengityksestä aiheutuva kulutus summaataan osittain yhteen.

Kasvupisteisiin tulevien uusien osien määrä riippuu mallissa kasvupistettä kannattavan puun osan olosuhteista (valossa vai varjossa) ja kasvumateriaalin yleisestä saataavuudesta. Olemassa olevien osien kasvu tapahtuu siten, että jokaisessa oksakiehkurassa tulevien ja lähtevien puun osien paksuudet säilyvät tietyissä suhteissa. Nämä suhteet määräytyvät ns. puun putkimalliteoriasta. Sen mukaan puu voidaan nähdä koostuvan ohuista putkista, jotka kytkevät (tai ovat aiemmin kytkeneet) yhteen lehden ja juuren kärjen. Tästä voidaan johtaa LIGNUMiin periaate, että kaikissa liitoskohdissa ylä- ja alapuolisten osien vettä kuljettamaan pystyvän puuaineen (mantopuu) poikkileikkauspinta-alojen on oltava samat (kuva 3). Sydänpuun muodostuminen vähentää mantopuun pinta-alaa, ja vähentynyt mantopuu on tarvittaessa kompensoitava uudella sädekasvulla.

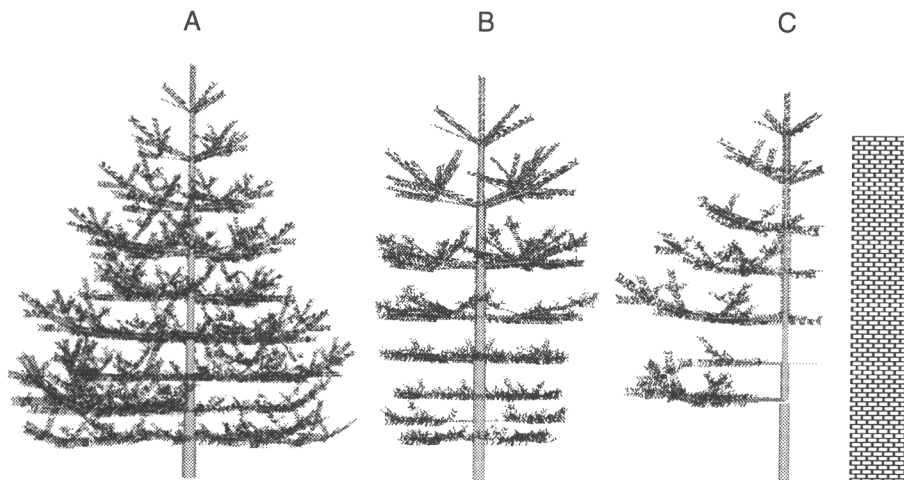
Haarautuminen, joka määrää pitkälle puun arkkitehtonisen rakenteen, on tällä hetkellä toteutettu melko yksinkertaisesti. Sivuhaarat lähtevät päärangasta tietyssä kulmassa. Mikäli uusi sivuhaara osoittaa alaspäin, sitä käännetään oksan ympäri kunnes sen suunta on ylöspäin. Näin malli ei tuota alaspäin kasvavia oksia, joita ei juuri tavata myöskään luonnossa nuorissa puissa.

Oksan kärkiverso on aina samassa kulmassa pystysuoraan nähden (vrt. kuvat 2 ja 4). Edellinen osa on kääntynyt hieman kärkiverson suunnasta kohti horisonttia.

Tämä toistuu takaperin aina runkoon saakka. Oksan osan kiertyminen lakkaa, kun osa on vaakasuorassa. Oksien taipuminen on saatu aikaan siten, että kiertokulma on pienempi oksan kärjessä kuin tyvellä. Tällä menettelyllä jäljitellään puissa taphtuvaa oksien taipumista (kuvat 2 ja 4). Lujusopillisia tai säteilyolosuhteisiin perustuvia mekanismeja ei ole yritetty mallintaa.

LIGNUMin nykytila

Mallin ensimmäinen versio on parametrisoitu männylle, jonka kasvun se pystyy kuvaamaan aina noin 15 vuoden ikään asti. LIGNUMissa ei ole vielä toteutettu haarautumisen kuvausta, joka kattaisi männyn koko eliniän. Malli tuottaa nuoren männyn kasvun peruspiirteet parametriarvoilla, jotka vastaavat Etelä-Suomen olosuhteita. Simuloinnein on tutkittu mm. sydänpuun muodostusnopeuden vaikutusta männyn määrälliseen kasvuun ja latvuston arkkitehtuuriin.



Kuva 4. Mänty, joka kasvaa avoimella paikalla (A), taimikossa muiden samankokoisten joukossa (B) ja seinän vieressä (C). Taimikosta oletettiin, että sen lehtialaindeksi kasvaa kymmenessä vuodessa arvosta 0 arvoon 3. Seinä toteutettiin niin, että säteilyä tuli vain toiselta taivaankannen puoliskolta. Puut eivät ole samassa skaalassa.

Auringon säteily on kasvun ajava voima LIGNUMissa. Mallissa lasketaan puun osan saama säteily siten, että tulevan säteilyn suuntajakauma ja varjostavat tekijät (etupäässä muut puun osat) otetaan huomioon. Sen vuoksi LIGNUMilla voidaan simuloida erilaisia latvukseen/latvuksessa kolmiulotteisesti vakuttavia tekijöitä. Esimerkkeinä mallin toiminnasta ovat simuloinnit erilaisissa olosuhteissa kasvaneista männyistä: avoimella paikalla, taimikossa samankokoisten puiden joukossa ja korkean seinän vieressä (kuva 4). Seinä on toteutettu siten, että auringon säteilyä tulee vain toiselta taivaan puoliskolta. Näillä tulevan säteilyn suuntajakauman vaihteluilla on selvä vaikutus simuloituun puuhun. Vastaavasti voidaan tutkia esimerkiksi oksien karsimisen tai tuhohyönteisen syömisen vaikutuksia puun tulevaan kehitykseen.

Tulevaisuuden näkymiä

Tällä hetkellä LIGNUMissa on otettu huomioon männyn perustavaa laatua olevat vuotuisen kasvuun vaikuttavat prosessit. Tekijät ovat tietoisia, että malli ei suinkaan ole täydellinen, vaan sitä voitaisiin täydentää monin osamallein tai sen tämänhetkisiä komponentteja voitaisiin parantaa. Tätä työtä tullaan epäilemättä tekemään tutkimusryhmän voimin. Tulevaan kehitykseen vaikuttaa paljon myös se millaisiin ongelmiin mallia tullaan soveltamaan. Työn alla olevia tai työlistalle tulevia lisäyksiä/parannuksia ovat mm.:

- Haarautumisen ja oksien taipumisen mekanistinen toteutus siten, että sillä voidaan kattaa koko puun elinikä.
- Veden ja ravinteiden kulku puussa.
- LIGNUMin rinnakkaislaskentaversio toteuttaminen. Mallin ajaminen vaatii paljon laskentatehoa ja käytössä olevien työasemien kapasiteetti alkaa käydä pieneksi. Rinnakkaislaskenta tarjoaa mahdollisuuden nopeuttaa laskentaa ja simuloida useita vuorovaikutuksessa olevia puita.
- Puun visualisoinnin parantaminen.
- Mittaustulosten visualisointi LIGNUMin avulla. Kehitteillä on ohjelma, jonka avulla (yksittäisiä) puita kos-

kevat mittaustiedot voidaan muuttaa mallin ymmärtämään muotoon, jolloin mitattu puu voidaan näyttää tietokoneen kuvaruudulla. Tämä helpottaa mittausvirheiden jäljittämistä ja tulosten visuaalista analyysiä.

- Sovitus ja parametrisointi koivulle ja kuuselle.

Puiden toiminnallis-rakenteellisten mallien tutkimus on yleisen kiinnostuksen kohteena ja nopeasti edistynyt tutkimuksen ala. LIGNUM on yksi ensimmäisiä julkaistuja malleja ja siksi se on herättänyt kiinnostusta kansainvälisestikin. Tällä hetkellä yhteistyötä toiminnallis-rakenteellisten mallien suhteen on useiden tutkimusryhmien kanssa:

1. CIRAD tutkimuslaitoksessa Montpellierissä Ranskassa toimiva AMAP ryhmä on tuottanut jo pitkän aikaa realistisia puiden ja kasvien visualisointeja. Vireillä on tutkijanvaihto ja työskentely kasvien kuvauksen mahdollistavan kielen kehittelyn parissa.
2. Göttingenin Yliopistossa työskentelevän tohtori Winfried Kurthin ryhmässä kehitetään formaaleja matemaattisia välineitä puiden rakenteen ja kasvun kuvaukseen. Heidän kanssaan on vireillä Kurthin kehittämien mallien soveltaminen LIGNUMin yhteydessä.
3. McGill -yliopistossa Kanadassa prof. Christian Messierin johtamassa ryhmässä tutkitaan taimien selviytymistä sekametsien aukoissa. Tässä tutkimuksessa on tarkoitus käyttää LIGNUMia hyväksi.

Kirjallisuus

- Kuusela, K. & Kilkki, P. 1963. Multiple regression of increment percentage on other characteristics in Scots pine stands. *Seuloste: Kasvuprosentin ja muiden metsikkötunnusten välinen yhteiskorrelaatio männiköissä. Acta Forestalia Fennica 75(4).* 40 s.
- Perttunen, J., Saarenmaa, H., Sievänen, R., Salminen, H., Pouttu, A. & Väkevä, J. 1994. Propagating the effects of herbivore attack in an object-oriented model of a tree. Julkaisussa: Mattson, W.J. (toim.) *Proceedings of the IUFRO Symposium "Mechanisms of Plant resistance against Herbivores"*, Maui, Hawaii, February 2–6, 1994. 9 s.
- , Sievänen, R., Nikinmaa, E., Salminen, H., Saarenmaa, H. & Väkevä, J. 1995. LIGNUM: Oliopohjainen puun kasvumalli.

- Julkaisussa: Hyvönen, E. & Seppänen, J (toim.). Keinoelämä – Artificial Life. Tekniikkaa, luonnontiedettä, filosofiaa ja taidetta. Symposio 12.5.1995, Säätytalo, Helsinki. Publications of the Finnish Artificial Intelligence Society – FAIS. s. 151–160. ISBN-951-22-2607-3.
- , Sievänen, R., Nikinmaa, R., Salminen, H., Saarenmaa, H. & Väkevä, J. 1996. LIGNUM: a tree model based on simple structural units. *Annals of Botany* 77: 87–98.
- Salminen, H., Saarenmaa, H., Perttunen, J., Sievänen, R., Nikinmaa, E. & Väkevä, J. 1994. Modelling trees with an object-oriented scheme. *Mathematical and Computer Modelling* 20(8): 49–64.
- Sievänen, R., Nikinmaa, E., Hakula, H., Perttunen, J., Salminen, H., Saarenmaa H. & Väkevä, J. 1995. Lignum – modelling trees with simple structural units. *CSC NEWS* 7(2): 20–24.

Yhteensä 6 viitettä.

ISBN 951-40-1530-4
ISSN 0358-4283