

Metsänarvioimisen tutkimusosasto

Taksaattoriklubi, toim. Simo Hannelius

**ELEKTRONIIKKA METSÄNARVIOINNISSA
METSÄN KASVU JA SEN MALLITTAMINEN**

Taksaattoriklubin järjestämien seminaaritulaisuuksien, 19.12.1989 ja 14.2.1990
esitelmät

Helsinki 1991

05.02.92

METSÄNTUTKIMUSLAITOKSEN TIEDONANTOJA 384

Metsänarvioimisen tutkimusosasto

Taksaattoriklubi, toim. Simo Hannelius

**ELEKTRONIIKKA METSÄNARVIOINNISSA
METSÄN KASVU JA SEN MALLITTAMINEN**

Taksaattoriklubin järjestämien seminaaritulaisuuksien, 19.12.1989 ja 14.2.1990
esitelmät

Helsinki 1991

Alkusanat:

Taksaattoriklubi on metsänarvioimistieteen tutkijoiden ja käytännön ammatti-ihmisten yhteisö. Klubi pyrkii saattamaan tutkijat ja käytännön edustajat hedelmälliseen vuorovaikutukseen edustamallaan alalla. Keskeisiä toimintamuotoja ovat olleet seminaarit ja retkeilyt. Klubi toimii Suomen Metsätieteellisen Seuran alajärjestönä. Jäseniä klubissa oli vuoden 1990 keväällä 150.

Käsillä olevaan julkaisuun on koottu kahdessa seminaarissa pidetyt esitelmät. Aikaisempi tilaisuus pidettiin 18.-19. 12. 1989 aiheesta elektroniikka metsätaloudessa ja myöhempi 12. 2. 1990 aiheesta metsän kasvu ja mallittaminen.

Taksaattoriklubin puheenjohtajana kummassakin seminaarissa toimi professori Pekka Kilkki. Edellisessä seminaarissa klubi luovutti puheenjohtajalleen hopeisen ansiomerkinsä tunnustuksena ja kiitoksena suurenmoisesta klubin päämäärien hyväksi tehdystä työstä. Emme silloin osanneet arvata, että toivotellessamme menestyksekkään työn jatkuvan vireänä, Pekan toiminta tuli katkeamaan kohtalokkaaseen sairauteen vajaan vuoden kuluessa. Pekka Kilkki kuoli syyskuun 8:na 1990.

Klubin hallitus toivoo, että tämä seminaariesitelmät käsittävä julkaisu palvelee portaana taksaattoritieteiden edistämisen polulla. Edesmenneen puheenjohtajamme muistoa kunnioitamme asettamalla alallemme korkeat tavoitteet ja työskentelemällä yhteistoimin tehokkaasti niiden saavuttamiseksi.

Simo Poso

Taksaattoriklubin
puheenjohtaja

SISÄLLYS

Alkusanat

Risto Kuittinen: Tulevaisuuden satelliitit.....	4
Pekka Tätilä: Satelliittipaikannus.....	14
Timo Pekkonen: Digitaalisesta kuvasta metsätaloukartaaksi.....	16
Simo Poso: Taksattorin näkökulma elektroniikkaan perustuvan uuden tekniikan hyväksikäyttöön.....	20
Arto Ahola: Kenttäkokemuksia tiedonkeruulaitteista VMI:ssä.....	24
Risto Suvanto & Pasi Kiema: Yksittäisen puun numeerinen ilmakuvatulkintamenetelmä.....	27
Varpu Kähkönen: Metsien monikäytön suunnittelu kuntatasolla satelliittikuvia hyödyntäen. Esimerkkinä Sipoo.....	32
Mark-Leo Waite: Koealat metsätalouden suunnittelussa.....	44

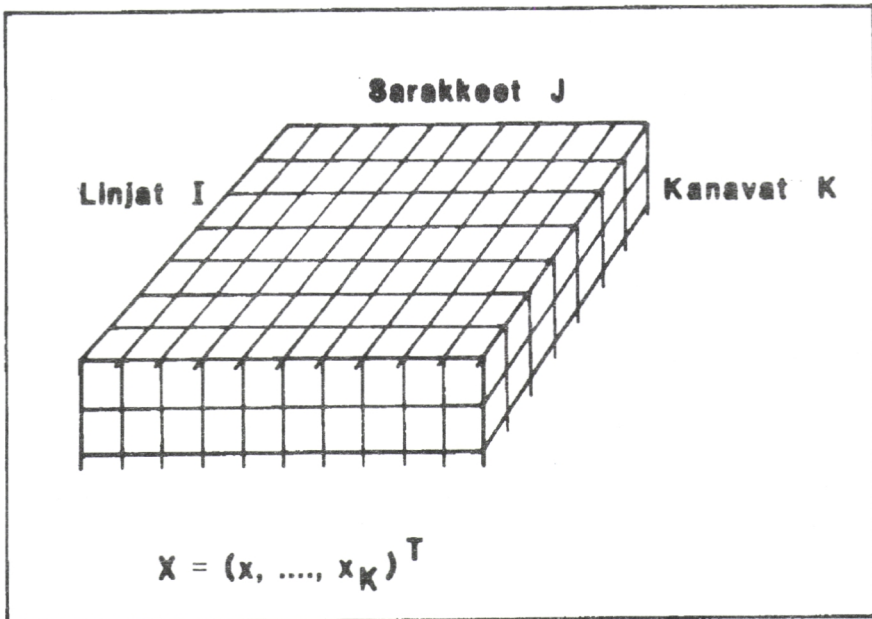
Juhani Pyykkönen: Kasvun mallittamisen tarve.....	49
Kari Mielikäinen: Kasvumallien perusteet.....	50
Risto Sievänen: Prosessimallien soveltaminen metsätalouden tarkoituksiin.....	55
Juha Lappi: Puun pituuskasvu ja boniteetti.....	66
Risto Ojansuu: Männyn runkomuodon muutos.....	70
Jarmo Leskinen: Kasvumallien kalibrointi käytäntöä varten.....	82
Jari Miina: Kuivatuksen vaikutus suomännikön kasvuun.....	88

TULEVAISUUDEN SATELLIITTIT

Risto Kuittinen

Johdanto

Nykyaikainen satelliittikuva on digitaalinen kuva, joka muodostuu kuvanelementeistä. Näillä jokaisella on numeerisesti ilmaistuja arvoja, jotka korreloivat kohteesta tulleeseen säteilyyn. Kun kyseessä on monikanavainen kuva, kuvanelementti sisältää useita eri arvoja, jotka voidaan esittää hahmovektorina. Alkioina ovat tällöin eri kanavilla mitatut kohteen säteilyarvot. Kuva 1 esittää nykyaikaisen satelliittikuvan rakenteen. Rakenne on samanlainen myös tulevaisuuden satelliittikuvissa.



Kuva 1. Digitaalisen satelliittikuvan rakenne.

Kuvanelementtiä vastaavan alueen suuruus maastossa riippuu ilmaisimen rakenteesta. Kaikki ilmaisimet mittaavat maaston lähettämän tai heijastaman säteilyn tietyssä avauskulmassa ja voidaan saada aikaan kunnollisen kuvan, on tähän avaruuskulmaan tulevan säteilyn oltava niin voimakas, että ilmaisin voi erottaa sen kohinasta. Ilmaisimen ominaisuuksia kuvataan seuraavilla käsitteillä:

- Alueellinen erotuskyky, joka tarkoittaa sitä, kuinka pieniä kohteen yksityiskohtia ilmaisoin voi erottaa. Yleensä tällä tarkoitetaan kuvanelementtiä vastaavaa aluetta maastossa, mutta on muistettava, että kohteen kontrasti vaikuttaa oleellisesti kovalta erotettavan pienimmän kohteen suuruuteen.
- Spektrinen erotuskyky, joka tarkoittaa sitä, kuinka pieniä säteilyn aallonpituuseroja eri kohteista mitatuista säteilyistä voidaan erottaa. Ilmaisimilla tämä erotuskyky liittyy käytettävien kanavien lukumäärään ja spektrikaistan leveyteen.
- Radiometrinen erotuskyky, joka ilmoittaa ilmaisimen herkkyyden. Radiometristä erotuskykyä voidaan lisätä erilaisia vahvistuksia käyttäen. Mittaustulosten esitystapa, kuinka monella bitillä tulokset esitetään, vaikuttaa myös kuvan käyttökelpoisuuteen.

Nykyaikaiset satelliittikuvat välitetään radioteitse maahan, jolloin tiedonvälityskyky tulee erääksi keskeiseksi kaukokartoitusjärjestelmän ominaisuudeksi. Suuren tiedonsiirtokyvyn, yli 100 Mb/s, omaavat järjestelmät ovat kalliita ja harvoilla mailla on taloudellisia mahdollisuuksia tällaisten järjestelmien hankkimiseen. Näitä järjestelmiä edellyttävät kuitenkin uusimmat tutka- ja spektroradiometrilaitteet.

Satelliittikuvien muokkaaminen ja tulkinta tehdään osittain tietokoneita käyttäen, jolloin koneiden laskentakapasiteetti on keskeinen resurssi kuvia käytettäessä. Mikrotietokoneiden lisääntyvä laskentateho tuo jatkuvasti uusia mahdollisuuksia myös pienikäyttäjille, kunhan keskitetysti hoidetaan suurta laskentatehoa vaativat tehtävät.

Kaukokartoitussatelliitteja on sekä geostationaarisilla että polaariradoilla. Suomen osalta polaarirataiset satelliitit ovat tärkeitä, koska geostationaaristen satelliittien ottamat kuvat ovat pohjoisilla leveysasteilla huonolaatuisia. Tämä johtuu pääasiassa huonosta alueellisesta erotuskyvystä, mikä puolestaan johtuu viistosta kuvaussuunnasta.

Kaukokartoituksessa satelliittien käyttö on lisääntynyt jatkuvasti. Nähdäkseni tähän on seuraavia syitä:

- Satelliittien avulla saadaan kuvatuksi laajat alueet nopeasti.
- Toistuvat kuvaukset, esimerkiksi kerran päivässä, ovat mahdollisia.
- Satelliiteista otettujen kuvien laatu on verrattain hyvä.
- Kuvien hinta käyttäjille alittaa huomattavasti ilmakuvauksen kustannukset, kun lasketaan hinta kuvattua maaston neliökilometriä kohti.
- Kuvista saadaan tietoa, joita lentokonekuvauksin on mahdotonta saada.

Satelliittikuvien laatuun ja käytettävyyteen vaikuttavat tekijät

Arvioitaessa uusien satelliitti-ilmaisimien käyttökelpoisuutta, on huomio kiinnitettävä moneen seikkaan. Nämä eivät ole pelkästään ilmaisimien ominaisuuksia, vaan tärkeitä ovat myös satelliitin rata sekä aineiston saatavuuteen liittyvät kysymykset. Esitän lyhyen yhteenvedon näistä tekijöistä.

Kuvan informaation sisältö

Yksinkertaisin ja monasti objektiivisin tapa ilmoittaa kuvan tietosisältö on kuvan bittimäärän esittäminen, vaikka tämä ei likimainkaan kaikissa tapauksissa kerro koko totuutta kuvan käyttökelpoisuudesta. Digitaalisen satelliittikuvan bittimäärä voidaan ilmaista lausekkeella:

$$I = N*M*K*B,$$

jossa $N*M$ on kuvanelementtien lukumäärä
 K on kanavien lukumäärä
 B on bittien lukumäärä yhdellä kanavalla.

Lausekkeen suureiden arvot vaihtelevat eri kuvilla suuresti, koska kuvien pinta-alat vaihtelevat paljon. Voidaan myös ilmoittaa tietomäärä neliökilometriä kohti, jolloin

$$I = (1/n)*K*B,$$

jossa n on yhden kuvanelementin ala neliökilometreinä.

Kolmas tapa laskea kuvan tietomäärä on ilmoittaa vain tietomäärä kuvanelementtiä kohti. Tällöin saa hyvän käsityksen aineiston monipuolisuudesta ja lauseke on yksinkertaisesti

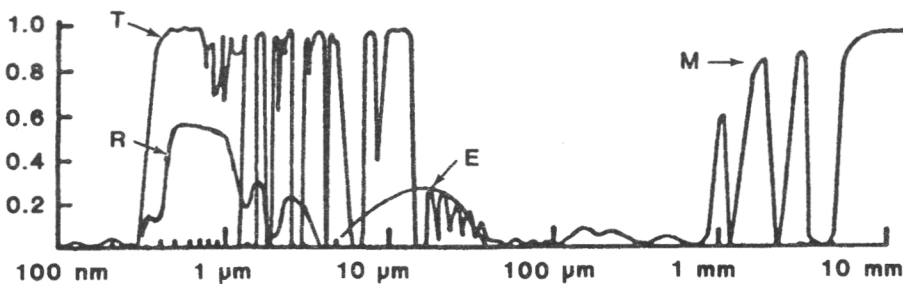
$$I = K*B.$$

On luonnollista, että eri tarkoituksiin kuvia käytettäessä korostuvat kuvien eri ominaisuudet. Kuvan alueellinen erotuskyky eli $n:n$ suuruus katsotaan usein merkittävimmäksi. Kuitenkin spektrinen erotuskyky eli $K:n$ suuruus on monasti tärkeämpi.

Ilmaisimia suunniteltaessa tehdään yleensä kompromissi spektrisen ja alueellisen erotuskyvyn välillä. Jos käytetään hyvää spektristä erotuskykyä, vähennetään kuvan kokoa tai suurennetaan maastoelementin eli $n:n$ arvoa. Näin käsiteltävä tietomäärä pysyy tiedonsiirto- ja laskentakapasiteettia ajatellen käyttökelpoisena.

Informaatiovälillä ja tutkittava ilmiö

Vaikka kuvalla olisikin suuri informaation määrä, saattaa kuva olla kuitenkin huono jonkin tutkittavan ilmiön osalta, ellei tietoa ole tallennettu ilmiön kannalta oikealla sähkömagneettisen spektrin alueella. Mikäli halutaan mahdollisimman käyttökelpoisia tietoja, olisi laitteen mittauskapasiteetti keskitettävä kohteen ominaisuuksien ja mittausmahdollisuuksien kannalta tärkeimmille alueille, kuva 2.



T = ilmakehän läpäisevyys (0 - 1)

R = heijastussuhde (0 - 1)

M = mikroaaltoalue

E = emissio ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$)

Kuva 2. Esimerkki kasvillisuuden heijastus- ja sirontaominaisuuksista sekä ilmakehän läpäisevyydestä.

Lehtivihreää sisältäviä kohteita mitattaessa on päähuomio kiinnitettävä vihreän valon ja lähi-infrapunasäteilyn alueille, kun taas mikroaaltosäteilylle on valittava alueet esimerkiksi kohteen tilavuussirontaan vaikuttavien tekijöitten perusteella. Yleisimmin käytetyissä luonnonvarasatelliiteissa kanavat on valittu siten, että keskimäärin saadaan käyttökelpoista tietoa. Tapauksissa, joissa ilmaisimet on voitu suunnitella jotakin yksittäistä tarkoitusta varten, informaation keruu on keskitetty tärkeimmälle spektrin osa-alueelle.

Kuvien saatavuus

Satelliittikaukokartoituksella pyritään tehostamaan tiedon keruuta viimekädessä käytännön tehtävien helpottamiseksi. Nämä tehtävät edellyttävät jatkuvaa tiedon saantia myös satelliittikuvien osalta silloin, kun niitä käytetään tiedonharkinnan osana. Kuluneiden kahden vuosikymmenen aikana ovat monet sähkömagneettisen spektrin alueet vakiintuneet käyttöön ja niitä on monissa satelliittilmaisimissa. Näin eri satelliittien ottamat kuvat voivat korvata toisiaan eikä välttämättä olla sidoksissa tietyn satelliittisarjan tuottamiin kuviin.

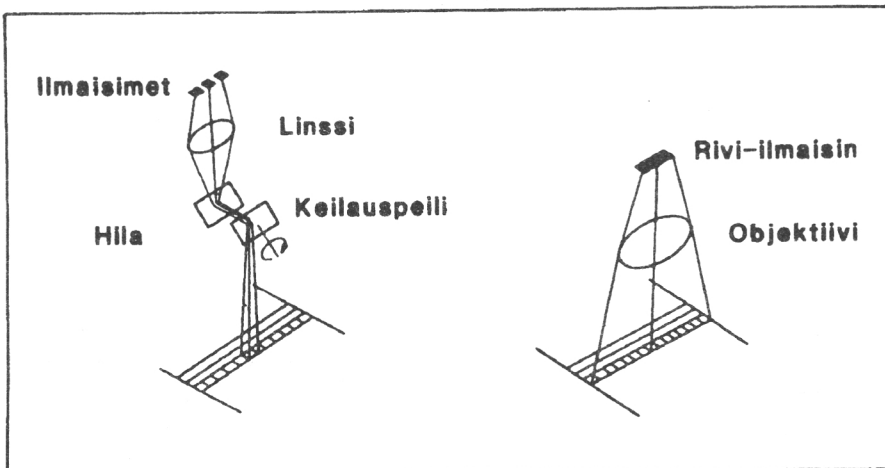
Yhtä tärkeää kuin jatkuvuus on monasti kuvan välityksen nopeus käyttäjille. Eri sovellutusalueilla tarve vaihtelee paljon, riippuen luonnollisesti tutkittavan ilmiön muutosnopeudesta. Satelliittien osalta kuvien saannin nopeuden määräävät kolme seikkaa: radat, kuvien leveys ja kuvien välitys satelliittimaa-asemalta käyttäjälle. Käytännössä saantiin vaikuttaa vielä pilvisyys edellä mainittujen teknisten seikkojen lisäksi.

Tulevien satelliittien ilmaisimien ominaisuuksia

Ilmaisimista

Tulevaisuuden satelliiteissa on viittä eri perustyyppiä olevia ilmaisimia, joiden keskeiset ominaisuudet esitellään seuraavassa.

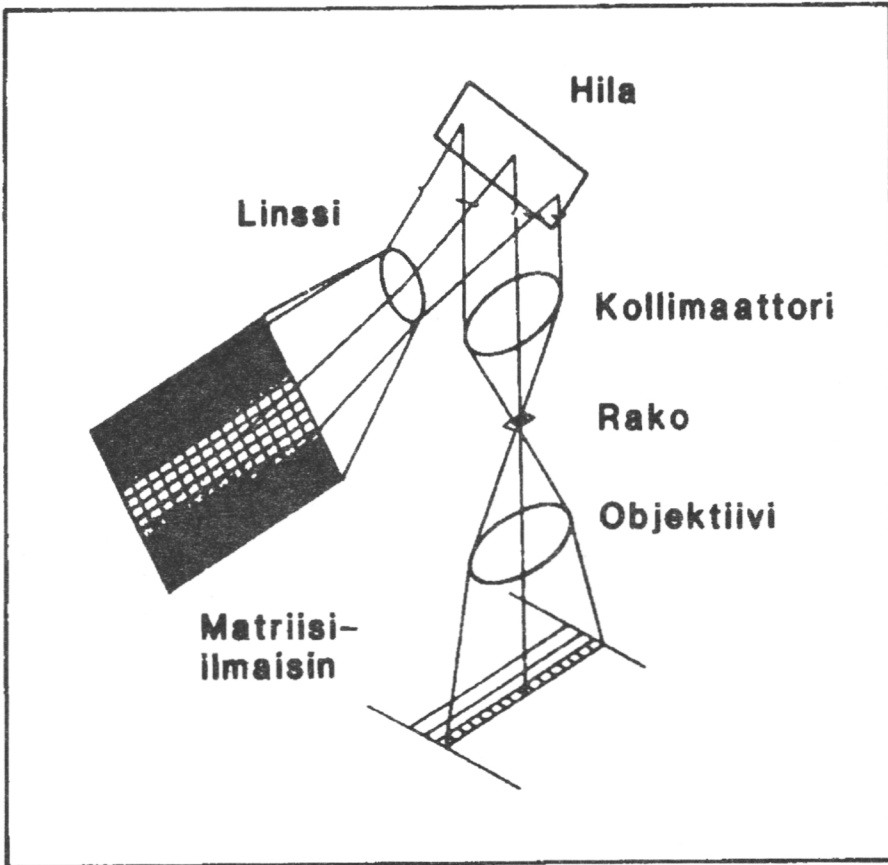
Monikanavakeilain tallentaa kohteesta heijastuneen auringonsäteilyn tai kohteen emittoiman lämpösäteilyn keskimäärin viidellä eri kanavalla. Yhden kanavan leveys on keskimäärin 80 nm. Ilmaisimena on joko rivi- tai matriisimuotoinen CCD-ilmaisim. Laitteen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Keilaimen toimintaperiaate

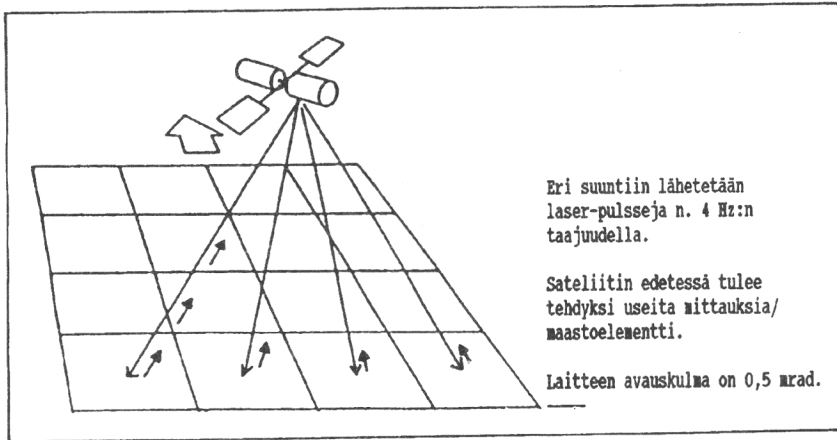
Kuvan ottava spektrometri on oikeastaan hyvin monipuolinen keilain, sillä myös tämä ilmaisin tallentaa säteilyn CCD-ilmaisimia käyttäen. Erona kuitenkin on se, että kanavien lukumäärä on suuri 100 - 200 kpl ja niiden leveys 8 - 10 nm. Mitattaessa voidaan valita haluttu määrä kanavista käyttöön. Tämä riippuu lähinnä kuvattavasta kohteesta. Spektrometri kuvaa kohteen, joten jokaiselle kuvan- elementille on tallennettu eri kanavilla saadut mittaustulokset.

Spektrometrin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 4.



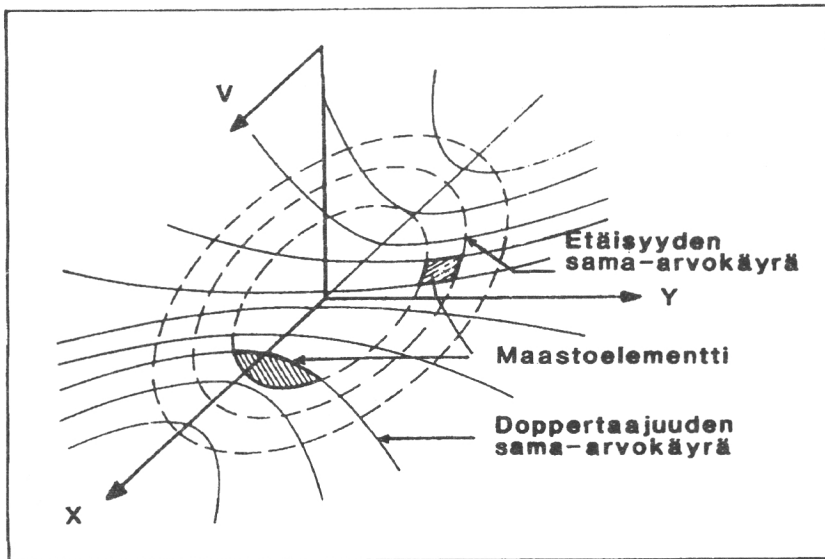
Kuva 4. Kuvan ottavan spektrometrin toimintaperiaate

Laserlaitteet tulevat satelliitteihin noin viidentoista vuoden kuluessa. Laitteen nimilyhenne on Lidar ja niitä käytetään aluksi lähinnä ilmakehän tutkimukseen. Myöhemmin näillä lienee käyttöä myös maa- ja vesialueiden kaukokartoituksessa. Laserin hyvä puoli on se, että sillä saadaan kohde valaistuksi halutulla valolla, joten kohteen heijastusominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä (eri aineita, vesipitoisuutta jne.) voidaan tarkastella auringon säteilyn muutosten kovin paljoa haittaamatta. Lidarin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 5.



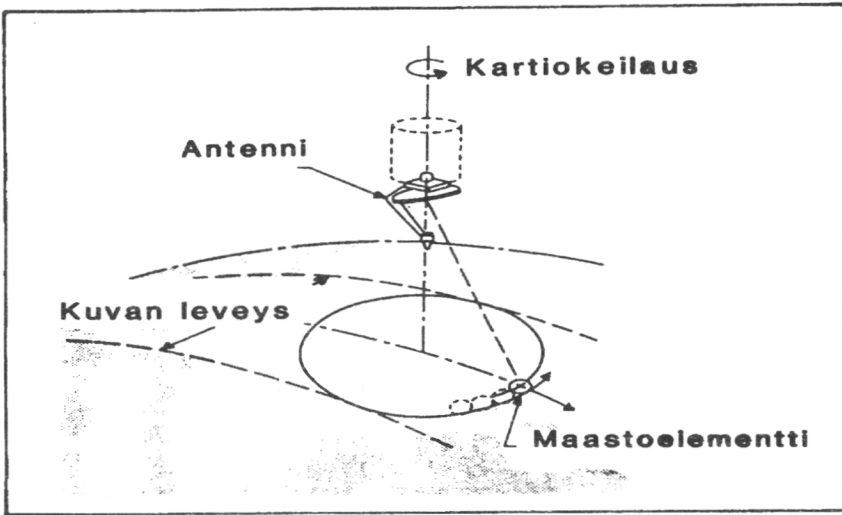
Kuva 5. Erään LIDAR: in toimintaperiaate (NASA).

Synteettisen apertuurin tutkalla (SAR) saavutetaan kuvausetäisyydestä riippumatta sama alueellinen erotuskyky. Näin satelliiteista saadaan otetuksi kuvia, joiden kuvanelementtiä vastaa maastossa sivultaan jopa 8 - 30 m suuruiset neliöt. Mittaus perustuu tutkan kykyyn mitata etäisyyttä sekä tutkan ja kohteen keskinäiseen liikkeeseen perustuvaan säteilyn taajuuden Doppler-siirtymään. SAR-kuvan laskeminen vaatii suurta laskentakapasiteettia. Kuvassa 6 on esitetty SAR-tutkan toimintaperiaate.



Kuva 6. SAR-tutkan toimintaperiaate

Mikroaaltoradiometrit mittaavat kohteen emittoimaa mikroaaltosäteilyä. Mittaus tapahtuu yleensä kartiokeilausta käyttäen noin 3-5 eri taajuus/aallonpituusalueella. Näillä laitteilla on huono alueellinen erotuskyky, koska antennin suuruus ja mitattavan säteilyn aallonpituus määrittävät erotuskyvyn, eikä sitä voida laskennallisesti parantaa kuten SAR-tutkalla. Laitteen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Mikroaaltoradiometrin toimintaperiaate.

Tulevien satelliitti-ilmaisimien ominaisuuksia on kootusti esitetty taulukossa 1. Koska satelliiteissa on useita eri käyttötarkoitukseen valmistettuja ilmaisimia, on tiedot ryhmitelty ilmaisintyypeittäin eikä satelliiteittain. Satelliiteja koskevat tiedot on ilmoitettu taulukossa 2.

Taulukko 1. Tulevaisuuden satelliittikuvien keskimääräisiä ominaisuuksia

Kuvan leveys (km)	Alueellinen erotuskyky (km ²)	Kuvan tietosisältö				
		K	B	bittiä km ²	bittiä elementti	laite
100	0,0004-0,001	5	8	30*10 ³	32	keilain
2500	1,0-7,0	5	10	35	45	keilain
30	0,001	190/64	12	7,7*10 ³	768	spektrometri
1500	0,25-1,0	80/40	12	700	300	spektrometri
100	0,0005	1	6	60*10 ³	6	SAR-tutka
1500	16 - 10000	6	8	0,5	50	mikroaaltoradiometri

Huom! SAR-tutkan keräämä tietomäärä kuvanelementtiä kohti on huomattavasti suurempi kuin lopullisen kuvan sisältämä tietomäärä.

Huom! Spektrometrien toiminta perustuu siihen, että valitaan kohteesta riippuen noin 50 kanavaa kaikista mahdollisista, joilla voi mitata. Esitetyt luvut tarkoittavat osalla kanavista tehtyä mittausta. Kuvien radiometrinen erotuskyky tullaan optisten ilmaisimien osalta parantamaan mahdollistaen erilaisten vastefunktioiden käyttöä. Kohteesta ja vuodenaikasta riippuvalla valinnalla saadaan toden-

näköisesti kuvien radiometrista laatua parannetuksi ja näin tulkintakelpoisuutta lisätyksi. Paraniminen ei kuitenkaan välttämättä vähennä kuvien radiometrisia virheitä, mitkä johtuvat yksittäisten ilmaisimien vioista.

Taulukko 2. Polaarirataiset satelliitit.

Satelliitti	Toiminta	Maa-asema	Ilmaimet	Tyyppi
Ranska: SPOT	—>1999	Kiiruna	KE	LVT
USA: Landsat NOAA EOS	—>1995 jatkuva 1998 —>>	Kiiruna Helsinki ?	KE KE KE,SM,MR	LVT ST LVT&ST
Kanada:Radarsat	1994 —>>	Tromssa	TU	LVT
Japani: MOS JERS ADEOS JPOS	—>1995 1993 —>> 1995 —>> 1998 —>>	Kiiruna ? ? ?	KE TU KE,SM,TU ?	LVT LVT LVT LVT&ST
ESA: ERS-1 ja -2 PPF	1990 —>> 1998 —>>	Kiiruna Kiiruna	TU KE,TU SM,MR	LVT LVT&ST
Neuvostoliitto : Meteor KOSMOS	jatkuva jatkuva	Moskova Moskova		ST LVT&ST

LVT=luonnonvaratekokuu,

PPF=Polar Platform

EOS=Earth Observing System

MOS=Marine Observation Satellite

ERS=European Remote Sensing Satellite

JERS=Japan Earth Resources Satellite

JPOS=Japan Polar Orbiting Satellite

ADEOS=Advanced Earth Observation Satellite

ST=säätetekokuu

KE= keilain

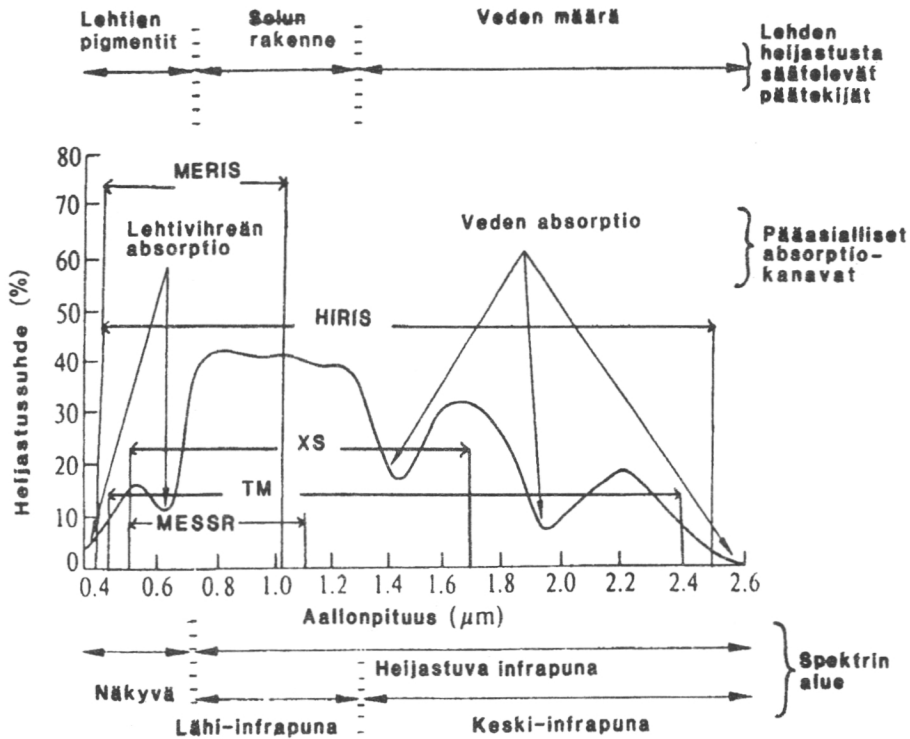
TU= tutka

SM= spektrometri

MR= mikroaaltoradiometri

Neuvostoliiton satelliiteista on saatavissa vähän tietoja, eikä niiden kuvia välitetä maahamme säännöllisesti. Luonnonvaratekokuiden kuvat toimittaa maanmittaushallitus ja säätetekokuiden ottamat kuvat tulevat pääosin Ilmatieteen laitoksen kautta. Tutkakuvien nopeata välitystä maahamme selvitetään ja on todennäköistä, että toimiva järjestelmä on olemassa 1990-luvun alkupuolella.

Kuvassa 8 on esitetty tärkeimpien lehtivihreän kuvaamiseen soveltuvien ilmaisimien toiminta-alueet. Selitteessä on mainittu missä satelliitissa ilmaisimien on ja mikä on sen alueellinen erotuskyky maastoelementin sivunpituutena ilmaistuna.



TM = Thematic Mapper/Landsat/30 m (maastoalem. sivunpituus)
 XS = Kolmikanavakuva/SPOT/20 m
 MERIS = Medium Resolution Imaging Spectrometer/Polar Platform/500 m
 HIRIS = High Resolution Imaging Spectrometer/EOS/30 m
 MESSR = Multispectral Electronic Scanning Radiometer/MOS/ 50 m

Kuva 8. Ilmaisimien toiminta-alueita.

Yhteenvetona taulukkojen 1 ja 2 tiedoista voidaan todeta, että tulevaisuudessa korostuu oikean tiedon käyttö kuhunkin tarkoitukseen, koska valinnan mahdollisuus kasvaa. Tämä on syytä tiedostaa myös kustannustekijänä (aineisto, tiedonkäsittely), jotta päästäisiin tarkoituksenmukaisimpaan tulokseen.

SAR-kuvien osalta on huomattava, että nykynäkymillä satelliittien energia riittää vain noin 10 min kuvauksiin ratakerroksella. Tämän vuoksi ei saada käyttöön riittävästi tutkakuvia lähitulevaisuudessa.

Muutamien satelliittien ilmaisimet mahdollistavat kohteen stereoskooppisen mittaamisen (esim. SPOT, Radarsat). Korkeuden mittauksen tarkkuus on noin 10 m, joten Suomen oloissa tällä menetelmällä ei ole kovin suuria käyttömahdollisuuksia.

Spektrometrien tehokkaaksi käyttämiseksi tarvitaan perustietoja eri ilmiöiden kuvautumisesta, koska kaikilla mahdollisilla kanavilla ei mittausta yhdellä lennolla voida tehdä. On osattava valita kulloinkin kyseeseen tulevat 20-40 parasta kanavaa.

Yhteenveto

Ensi vuosikymmenen lopun kaukokartoitussatelliitit muodostavat järjestelmän, jossa on useita erilaisia ilmaisimia siten, että niiden mittaukset täydentävät toisiaan. Samalla ilmaisimien toiminta tulee nykyistä enemmän ohjelmoiduksi (kanavien valinta, stereokuvaus, kuvauksen suuntaaminen), joten käyttäjälle asetetaan nykyistä paljon enemmän vaatimuksia. Hänen tulee tietää mitä tilata ja miksi. Tämä puolestaan edellyttää tiedon tason kohottamista maassamme seuraavan kymmenen vuoden kuluessa. Merkittävä osa ilmaisimista valmistetaan elinympäristömme muutosten seurantaan varten. Jotta näitä tietoja kyettäisiin tehokkaasti käyttämään, on aineiston jakelu ja arkistointi järjestettävä kattamaan kaikki satelliittikuvat maassamme.

Lähivuosina ei ole odotettavissa suuria muutoksia saatavilla olevan aineiston määrässä ja ominaisuuksissa. Landsat, SPOT ja NOAA-satelliitit tulevat olemaan tärkeimmät satelliitit 1990-luvun puoliväliin saakka. Nyt kehitettäville menetelmille riittää samankaltaista satelliittiaineistoa vielä kymmenen - viidentoista vuoden kuluttua, sillä nykyisentyypiset ilmaisimet säilyvät, vaikka uusia tulee käyttöön. On kuitenkin varauduttava siihen, että kymmenen vuoden kuluttua käytettävissä on nykyistä monipuolisempi satelliittikuva-aineisto. Tämä edellyttää tutkimuspanosta erityisesti siksi, että on nähtävissä erilaisen kuva-aineiston yhteiskäyttö parhaimman mahdollisen tulkintatuloksen saavuttamiseksi.

Tulevaisuudessa keskeistä on myös kyky käyttää eri satelliittien ottamia kuvia korvaamaan toisiaan operatiivisissa tehtävissä. Näin saavutetaan parannusta kehitettyjen menetelmien käyttövarmuuteen.

SATELLIITTIPAIKANNUS

Pekka Töttilä

Satelliitteihin perustuvia navigointijärjestelmiä on sovellettu geodeettiseen paikantamiseen runsaan 10 vuoden ajan. USA:ssa kehitettiin 60-luvulla navigointiin TRANSIT-satelliittijärjestelmä, jonka geodeettisissa sovellutuksissa päästään Doppler-menetelmällä muutamien desimetrien tarkkuuteen. Vuodesta 1973 lähtien on USA:ssa ollut kehitteillä NAVSTAR satelliittijärjestelmä. Tämä ns. GPS-järjestelmä (Global Positioning System) on alkuaan suunniteltu sotilaalliseen navigointiin, mutta sitä on menestyksellä sovellettu myös geodeettiseen paikanmääritykseen. Järjestelmän ensimmäiset kokeilut suoritettiin Suomessa 1983 ja vuodesta 1986 alkaen maanmittaushallitus on käyttänyt GPS-laitteistoa uusien kolmiopisteiden määritykseen ,

GPS-paikanmääritys

GPS- järjestelmä koostuu avaruuslohkosta, valvontalohkosta ja käyttäjälohkosta. Avaruuslohko tulee lopullisessa muodossaan käsittämään 24 satelliittia. Tällä hetkellä käytössä on 6 testivaiheen satelliittia ja kolme varsinaisen tuotantovaiheen, block II satelliittia. Satelliitit kiertävät ympyrärataa noin 20200 km korkeudessa 12 tunnin kiertoaajalla. Kun kaikki suunnitellut tuotantovaiheen satelliitit ovat käytössä, voidaan mm. geodeettisia paikanmäärityksiä tehdä joka hetki missä tahansa maapallolla, Nyt testi vaiheessa havaintoaikaa on 6 tuntia päivässä. Satelliitit lähettävät navigointisignaalia kahdella taajuudella 1575,42 MHz (L1) ja 1227.60 MHz (L2). Aaltoon on moduloitu mittauskoodit P ja C/A sekä satelliitin ratatiedot sisältävä osa. Signaalin kulku aika satelliitista vastaanottimeen mitataan vertaamalla satelliitin koodin vaihetta vastaanottimessa generoituu samanlaiseen koodiin. Satelliitin etäisyys saadaan kertomalla kulku aika valonnopeudella. Mittaamalla samanaikaisesti neljää satelliittia saadaan vastaanottimen kolme koordinaattia ja kellojen välinen aikaero.

Valvontalohko tarkkailee ja seuraa satelliitteja sekä päivittää niihin muun muassa ratatiedot. Valvonta-asemia tulee valmiissa systeemissä olemaan 5 sijoitettuna eri puolille maailmaa.

Käyttäjälohko käsittää satelliittisignaalien vastaanottimet sekä havaintoaineiston käsittelyyn tarvittavan mikrotietokoneen ja laskentaohjelmiston. Markkinoilla on useita geodeettiseen paikanmääritykseen soveltuvia laitteistoja. Absoluuttiseen paikannukseen tarkoitettuja laitteistoja on kehitetty useita eri malleja. Niitä on tähän mennessä käytetty lähinnä navigoinnissa.

GPS-paikanmääritys

GPS-paikanmääritystä on ensimmäiseksi sovellettu geodesiassa kolmiomittauksiin. Mittausmenetelmä on suhteellinen eli samanaikaisesti on suoritettava havainnot vähintään kahdella pisteellä. Näissä sovellutuksissa tarvittavan tarkkuuden saavuttaminen edellyttää satelliittisignaalin kanto-

aallon vaiheen mittaamista P tai C/A koodin vaiheen havaitsemisen sijasta, koska kantoaallon L1 jaksonpituus on 19 cm, kun taas P ja C/A koodien jaksonpituudet ovat 30 ja 300 m.

Satelliittihavaintojen laskennassa kahden tai useamman vastaanottimen vaihehavaintoja käsitellään erilaisilla vaihe-ero-ohjelmilla (single-, double- ja triple-difference). Näiden tuloksena saadaan pisteiden väliset avaruusvektorit GPS-järjestelmän käyttämässä WGS-koordinaatistossa, Tämän jälkeen vektorit voidaan muuntaa paikalliseen koordinaatistoon tasoitusta varten. Lopullinen tasoitus käyttäjän koordinaatistossa suoritetaan havaintopisteiden joukossa olevien koordinaateilla tunnettujen pisteiden suhteen.

Maanmittaushallituksen GPS-mittaukset

Maanmittaushallitus on käyttänyt satelliittipaikantimia tuotantoon vuodesta 1986 lähtien. Kalustoon kuuluu vastaanottimien lisäksi mikrotietokone ja satelliittihavaintojen laskentaohjelmisto. Neljänä maastokautena on määritetty yhteensä noin 2400 uutta GPS - kolmiopistettä. Kokemukset ovat olleet hyviä ja tulokset tarkkuudeltaan usein parempia kuin perinteisin menetelmin. Tarkkuuden lisäksi GPS:llä on muita etuja vanhoihin menetelmiin verrattuna. Kolmiomittaustornien rakentaminen on voitu lopettaa kokonaan, koska määritettävien pisteiden välillä ei tarvitse olla näköyhteyttä; kustannusten säästymisen lisäksi myös työturvallisuus paranee. Pisteiden käytettävyys paranee ja suunnittelu helpottuu, koska pisteet voidaan sijoittaa teiden varsille ja paikkoihin, joista liitosmittaukset on helppo tehdä. Edelleen mittaus on säästä ja vuodenaajasta riippumaton.

Kehitysnäkymiä

Maailmalla on vireillä useitakin hankkeita luoda paikallisia satelliitteihin perustuvia paikannusjärjestelmiä. Tällä hetkellä ei lähinnä järjestelmien kalleudesta johtuen monikaan niistä ole edistynyt kovin pitkälle. GPS - satelliittienkin paikannuskäyttö on pääosin ollut suhteellista paikanmäärittystä. Niitä on käytetty myös navigointiin ja muuhun absoluuttiseen paikannukseen, mutta johtuen satelliittien vähydestä, käyttöaika vuorokaudessa on ollut rajoitettu ja se on ollut lähinnä vara- tai lisäjärjestelmänä. Laitekehityksessä voidaan odottaa suurta edistystä siihenmennessä kun järjestelmä on täydellinen joskus 90-luvun puoliväliin tultaessa. Varsinkin juuri paikannuksessa ja navigoinnissa suuret käyttäjämäärät tulevat takaamaan laitteiden halpenemisen ja monikäyttöisyyden. Eipä liene väärässä sekään ennustus, että vuonna 200? voi katsoa "rannepaikantimesta" mitä koordinaatit ovat.

DIGITAALISESTA KUVASTA METSÄTALOUSKARTAKSI

Timo Pekkonen

Jokaisella taksattorilla on selkeä kuva metsätalouskartasta. Useimmilla se lienee perua metsätalouden suunnittelun kurssilta, jonka harjoitustyönä tehtiin tilakohtainen suunnitelma karttoineen, kaksi väritettyä karttaa hakkuiden ja metsänhoitotoimenpiteiden suunnitteluun sekä yksi värittämätön kartta yleiseen käyttöön. Näillä kartoilla tuli pärjätä yli seuraavan kymmenvuotisen suunnittelukauden.

Metsätalouskartta on operationaalinen. Se on suunnittelun apuväline. Kuten suunnittelun kursseilla esitettiin, suunnittelu on reitin valintaa tavoitteen saavuttamiseksi. Metsätalouskartan kartanselityskirjoineen tulisi siis toimia suunnittelijan oppaana eteen tulevissa tien risteyksissä. Esimerkiksi vuotuisen hakkuusuunnitelman teko on kuin pasianssia. Kuviot, joille on ehdotettu hakkuita, on asetettava järjestykseen. On arvioitava eri vaihtoehtoja ja niiden seurannaisvaikutuksia. Suunnittelija mielessään simuloi metsälön kehitystä eri vaihtoehtojen mukaisesti. Pelkkä metsätalouskartta ja kuviotiedot olisivat koko alkeellisia apuvälineitä tässä työssä mikäli, suunnittelijalla ei olisi ammattitaidon ja kokemuksen mukanaan tuomia sisäisiä visioita metsiköiden kehittymisestä sekä tutkimuksen tuottamia kasvu- ja tuotostaulukoita.

60-luku toi metsätalouden suunnitteluunkin uudet virtaukset. Elektroniikan kehitys toi valtavan laskentakapasiteetin. Aloitettiin erityisten suunnitteluohjelmien kehittäminen. Suunnittelija saattoi laittaa tietokoneen selaamaan kasvu- ja tuotostauluja ja laskemaan eri vaihtoehtojen seuraukset vaikkapa kiertoajan päähän. Optimointimenetelmillä voitiin laskea hakkuusuunnitteet automaattisesti, kunhan vain isäntä oli pukeut toiveensa matemaattisen tavoitefunktion muotoon ja antanut mahdolliset toimenpiderajoitukset niin ikään matemaattisina yhtälöinä.

Nyt 80-luvulla elektroniikka on taas tehnyt hyppäyksen uudelle portaalle. Mikrotietokoneet ovat tuoneet laskentakapasiteetin ilmastoiduista tietokonehalleista kentälle suunnittelijan salkkuun tai jopa povitaskuun. Mitkä mahdollisuudet tämä avaa uudelle vuosikymmenelle? Pysin hahmottamaan näkymiä tietokonemiehen, tilastotieteilijän ja taksattorin silmin.

Ennen metsätalouskartta laadittiin käsin paperille. Nyt, kun useat yritykset ja organisaatiot valmistavat karttansa digitoimalla ja digitointia opetetaan niin metsätieteellisissä tiedekunnissa kuin metsä- ja puutalousoppilaitoksissakin, tilanne on muuttumassa. Kartat valmistetaan paljolti tietokoneella. Kuviotiedot ovat niin ikään rekistereissä ja ne voidaan liittää karttoihin. Voidaan värittää erilaisia teemoja esimerkiksi hoitotoimenpiteitä vaativista kohteista. Kartat piirretään kuitenkin vielä entiseen malliin papereille, joiden ääressä suunnittelija kartanselityskirjaa selailen puntaroi vaihtoehtoja. Tietokoneen hyväksikäyttö on ikäänkuin puolitieissä.

Paperitulosteissa häviää tietokoneen laskentakapasiteetti sekä tietojen nopea selailu- ja yhdistelymahdollisuus. Paperille piirrettynä kartta ikäänkuin seisahtuu ja menettää elinvoimansa. Siitä tulee seinäkoriste. Se on mitä on, eikä muuksi muutu kuin raaputtamalla ja päälle piirtämällä. Samoin käy kartanselityskirjan.

Tietokoneella kartta- ja kuviotiedot säilyttävät elävyytensä. Tietoja voidaan muokata, niitä voidaan käyttää erilaisissa laskelmissa ja ne voidaan visualisoida tarkoituksenmukaisella tavalla. Metsätaloustietokartta tulisi mielestäni entistä selkeämmin numeerisessa muodossa olevien tietojen, niin kartta- ja kuviotietojen, kuin myös muiden aluetta kuvaavien tietojen kokonaisuutena. Numeerista karttaa tarkastellaan työasemalla, mikrotietokoneella tai päätteellä. Kun tällainen metsätaloustietokartta yhdistetään suunnitteluohjelmistoon se aivan toisella tavalla kuin paperikartta toteuttaa alkuperäisen tehtävänsä eli toimii suunnittelijan apuvälineenä.

Yritän antaa kuvan siitä miltä numeerisessa muodossa oleva metsätaloustietokartta näyttää. Toisin sanoen miten sen tietoja voidaan visualisoida. Tänä päivänä käytössä on tarkat satelliittikuvat. Nämä voidaan piirtää kartan taustalle. Sen lisäksi, että satelliittikuvat väriyksellään elävöittävät karttaa, ne myös kuvaavat puustoa, kasvupaikkaa sekä, mikä tärkeää, metsikkökuvioiden sisäistä tasaisuutta. Satelliittikuvasta paljastuvat myös kuvioinnin mahdolliset virheellisydet sekä toimenpiteiden aiheuttamat muutokset kuvioinnissa.

Numeerinen metsätaloustietokartta sisältää luonnollisesti kuviotiedot, joita voidaan kysellä osoittamalla metsikköä työaseman kuvaruudulla. Järjestelmä opettaa tehokkaasti suunnittelijaa tulkitsemaan satelliittikuvaa. Kuviotietojen perusteella voidaan kartta teemoittaa halutulla tavalla. Teemakarttojenkin taustalla voi olla satelliittikuva.

Satelliittikuva on rasterimuotoinen. Sen jokaisessa alkiossa, pikselissä on eri aallonpituuskaistoilta mitatut säteilyarvot. Satelliittikuva on paikkaan sidottua tietoa. Jokainen pikseli kuvaa vastaavaa maastoaluetta. Ajatellaanpa toisin päin. Meillä on olemassa maastokoealat ja niiden mittaukset. Nämä voidaan sopivalla tavoin interpoloida tai tasoittaa halutun kokoisiin ruutuihin. Ruuduista voidaan rakentaa keinotekoinen satelliittikuva eli digitaalikuva. Myös tällaisia kuvia voidaan esittää karttojen taustalla.

Esimerkiksi voidaan laatia rasterimuodossa oleva korkeusmalli. Maanmittaushallitukselta tilatuista korkeuskäyristä voidaan interpoloida korkeudet jokaista rasterin ruutua varten. Valitsemalla eri korkeudet vastaamaan eri värejä voidaan maaston korkeussuhteet visualisoida. Tällaisesta rasterimuodossa olevasta korkeusmallista on helppo laskea maaston kaltevuus vierekkäisten pikselien korkeuden avulla. Kaltevuuksia voidaan käyttää esimerkiksi korjuun suunnittelussa. Kaltevuuskuva voidaan kombinoida satelliittikuvan kanssa ottamalla se vastaamaan yhtä satelliittikuvan kanavaa. Piirtämällä kartta kuvan päälle voidaan korjuuta haittaavat alueet paikallistaa tarkasti.

Korjuun suunnittelussa otetaan huomioon myös metsäautotieverkko. Verkon riittävyttä voidaan visualisoida muodostamalla rasterikuva teitä ympäröivistä korjuuvyöhykkeistä. Kuva muodostetaan yksinkertaisesti laskemalla rasterin ruutujen etäisyydet lähimmästä metsäautotiestä. Etäisyyksiä vastaavat värit valitaan sopivasti käytetyn vyöhykkeen leveyden mukaisesti. Kuva voidaan yhdistää satelliittikuvan ja kartan kanssa, jolloin paljastuvat mahdolliset katvealueet. Vastaavalla tavalla tarkastellaan mahdollisia suojavyöhykkeitä suojeltavien kohteiden, esimerkiksi järvien ympärillä.

Erilaiset vyöhykkeet ym. olisi tietysti helppo hahmotella kynällä kartalle tai leimikkosuunnitelman luonnokseen. Näinhän se nykyisin käy. On kuitenkin huomattava, että esitetyissä visualisoinneissa kuvat ovat numeerisessa muodossa. Jokaista värisävyä vastaa oma lukuarvonsa esimerkiksi kaltevuuskulma tai etäisyys tiestä. Näitä tietoja käytetään yhtäläillä hyväksi suunnitteluohjelmistossa kuin muitakin metsikkötietoja.

Esitelmän otsakkeen, "digitaalikuva metsätaloustietokartaksi" näkemys metsätaloustietokartasta on edellä esitettyä rajoittuneempi. Se sisältää tavanomaisen ajatuksen metsätaloustietokartasta lähinnä metsikkö-

kuviointina. Metsätaloustietokartan valmistaminen digitaalikuvaan tarkoittaa lähinnä metsikkökuvioiden rajojen määrittämistä digitaalisesta kuvasta. Tietenkin digitaalisessa ilma- tai satelliittikuvassa on tietoa myös kuvioiden metsikkötunnuksista. En kuitenkaan puutu tähän puoleen.

Koko kuviointia kohtaan on esitetty kritiikkiä. Sitä on syytetty subjektiivisuudesta ja siitä, että se ei ota huomioon metsikön sisäistä vaihtelua. Jälkimmäinen kysymys ratkennee satelliittikuvien hyödyntämisen myötä. Metsikön sisälle jäävien pikselien vaihtelun avulla saadaan mitta metsikön tasaisuudelle. Vaikka kuviointia kritikoitaankin, niin siitä ei päästä mihinkään, että toimenpiteet metsikössä kohdistuvat yleensä tarkoin rajattuun alueeseen ja jättävät merkinsä siihen. Talousmetissä on tänä päivänä selviä kuvionrajoja, jotka tosin aikaa myöten saattavat hämärtyä.

Miten kuvionrajat voidaan määrittää satelliittikuvilta tai digitaalisilta ilmakuvilta. Koska kuvat ovat numeerisia, voidaan rajat määrittää automaattisesti. VTT: llä on kehitetty ns. segmentointialgoritmeja, jotka etsivät kuvalta säteilyarvojen mukaisesti homogeenisia alueita ja raajaavat ne omiksi alueikseen. Näiden menetelmien sopivuutta testataan myös käytännön metsätaloustietokarttoissa.

Toinen tapa määrittää kuvion rajat digitaaliselta kuvalta, on tarkastella kuvaa monitorilla ja manuaalisesti rajata kuviot visuaalisten havaintojen perusteella. Myös tällaisesta kuvioinnista digitaalisilta kuvilta on suhteellisen vähän kokemuksia. Yleinen käsitys lienee, että nykyisiltä satelliittikuvilta voidaan paikallistaa ja rajata havaitut kuvioinnin muutokset, mutta kuvioinnin tekeminen riittävällä tarkkuudella tuskin on mahdollista. Vaikka tämä näkemys olisikin oikea, niin digitaalikuvioiden merkitys joka tapauksessa kasvaa sitä mukaa, kun metsikkökartat saadaan digitoitua ja työ alkaa painottua karttojen päivitykseen.

Kuvioinnin määrittäminen digitaalikuvilta tarjoaisi erään vaihtoehdon nykyiselle kartan valmistukselle. Nykyisinhän suunnittelija ensin tekee ennakkokuvioinnin ilmakuvalla ja tarkistaa kuvionrajat kentällä. Tämän jälkeen hän piirtää työkartan kelmulle, joka sitten digitoidaan tietokoneelle. Jos ennakkokuviointi voitaisiin määrittää esimerkiksi kuvaruudulla, niin se jäisi automaattisesti talteen. Kentätarkistusta varten suunnittelija voisi tulostaa sopivat kartat sopivassa mittakaavassa. Toimistolle palattuaan hän voisi päivittää mahdolliset korjaukset ennakkokuviointiin. Työkartan piirtäminen ja sen digitointi jäisivät pois.

Kun tarkastelee satelliittikuvaa on siitä helppo nähdä homogeenisia alueita, jotka voitaisiin rajoittaa metsiköiksi. Satelliittikuvaa voidaan myös vapaasti suurentaa aina tarpeen mukaan. Lisäksi kuvan värejä voidaan säätää siten, että metsikkökuvioit parhaiten erottuisivat toisistaan. Yksiä säätöjä voidaan käyttää esimerkiksi puulajien erottamiseksi ja toisia säätöjä kasvupaikan esille saamiseksi. Lisäksi monitorille voidaan tulostaa peruskarttatietoja esimerkiksi korkeussuhteista, ojista tai muusta vastaavasta, josta voisi olla apua kuvioinnissa. Tällaiset digitaalikuvioiden käsittelymahdollisuudet saattavat kompensoida menetettyä kuvan tarkkuutta ja stereovaikutelmaa.

Eräs keskeinen kysymys digitaalikuvioiden tarkastellessa on niiden geometrinen erotuskyky. Huono erotuskyky heikentää kuvioinnin tarkkuutta ja hyvä erottelukyky taas lisää kuvan vaatimaa tallennustilaa. Numeeristen satelliittikuvien erotuskyky on tällä hetkellä parhaimmillaan 10 x 10 maastometriä. Metsikkökuvioiden rajoja ajatellen tarkkuus lienee riittävä. Silmällä voitaneen rajan kulku hahmottaa ehkä vieläkin tarkemmin. Satelliittikuvien koko ei nykyisillä mikrotietokoneilla enää aiheuta ongelmia.

Ilmakuvien saattamisesta digitaaliseen muotoon ja digitoidun kuvan hyödyntämisestä metsätaloustietokartan laatimisessa lienee vieläkin vähemmän kokemuksia kuin satelliittikuvien käytöstä. Ilmakuvien geometrinen erotuskyky on aivan toista luokkaa kuin satelliittikuvien ja värien erotuskykykin on hyvä. Ongelma on geometrisen erotuskyvyn hyödyntäminen. Jos kuva digitoidaan esimerkiksi

1.5 maastometrin tarkkuudella, joka ei edes vielä ole kuvan ääri rajoilla, vaatii 5 x 5 kilometrin alueen esittäminen kolmivärisenä 33 megatavua. Tällaisen tietomäärän käsittely nykyisillä työasemilla on vielä jonkin verran raskasta. Ehkäpä ilmakuvien hyödyntämiseksi voidaan käyttää työasemaan kytkettäviä digitaalisia kameroita, joiden avulla ilmakuvaa voitaisiin tarkastella työaseman monitorilta. Ilmakuvan valtava tietomäärä säilytettäisiin diapositiivilla analogisessa muodossa, mutta kuvaa voitaisiin tarkastella digitaalisena. Tällöin digitaalisen kuvankäsittelyn menetelmät olisivat käytettävissä.

Teknisenä ongelmana digitaalisen kuvan käyttö metsätaloustietokuvioinnin määrittämiseen alkaa olla käytännössä mahdollista. Tietokoneet ja ohjelmistot ovat kehittyneet niin, että suhteellisen halvoin laitteilla voidaan digitaalisia kuvia tarkastella. Menetelmällisesti kuvien hyödyntäminen on kuitenkin vielä alkuvaiheessaan. Kuvatulkinnassa on kehitetty menetelmiä, joilla esimerkiksi puulajit tai kasvupaikat saadaan erilleen kuvalta. Näitä voitaisiin käyttää apuna kuvioinnissa. Segmentointialgoritmit toimivat satelliittikuvilla, mutta miten niitä voitaisiin kehittää ottamaan huomioon ilmakuvien tarkka geometrinen erotuskyky? Maanpinnan muoto, mikrotopografia, vaikuttaa ravinteiden kulkuun maassa ja sitä kautta puuston kasvuun. Olisiko mahdollista korkeusmallien avulla laatia ennakkokuviointia kasvupaikkaluokitukseksi?

Jos tähän kysymykseen saadaan vastaus, niin voidaan kehittää suunnittelijan avuksi ohjelmisto, joka automaattisesti tekisi ehdotuksen ennakkokuvioinniksi joko satelliittikuvilta tai digitaaliselta ilmakuvilta. Suunnittelija voisi tarkistaa kuvioinnin ensin ehkä visuaalisesti ja sitten maastossa ja tehdä tarpeelliset muutokset.

Tarkastellaan vielä metsätaloustietokoneella olevana kartta- ja kuvio- ja muiden alueellisten tietojen kokonaisuutena. Rasterikuvien esittäminen karttojen taustalla on vaikuttava tapa visualisoida alueellisia muuttujia. Muuttujien esittäminen rasterimuodossa on edullista muutoinkin kuin vain visuaaliselta kannalta. Ajatellaan esimerkiksi, että meillä olisi puuston keskiläpimitta rasterissa eli keskiläpimitta olisi tiedossa jokaisesta rasterin ruudusta. Samoin saattaisi olla talletettuna puuston keskipituus rasterimuodossa. Näistä kahdesta rasterista voitaisiin tilavuusmallien avulla muodostaa puuston tilavuusrasteri laskemalla mallin mukaiset tilavuudet pikseleittäin. Tilavuusrasterista edelleen olisi helppo integroida mielivaltaisesti rajatun alueen puuston kokonaistilavuus summamalla alueen sisälle jäävien pikselien puuston tilavuudet. Rasteri voisi olla eräs tapa tallettaa puuvaratiedot, tiheä rasteri pienalueilla ja harvempi rasteri suuralueilla.

Rasterimuotoisten muuttujien välisille riippuvuuksille voitaisiin kehittää oman tyyppisiä malleja. Niissä muuttujia selitettäisiin pikseleittäin. Tavanomaisten selittävien muuttujien lisäksi malleissa voitaisiin käyttää selittävinä myös naapuripikselien arvoja. Jos selittävinä muuttujana olisi maaston korkeusrasteri, niin naapuripikselien korkeuksien käyttäminen mallissa merkitsisi kaltevuuden huomioonottamista. Tämän tyyppisten rasterimallien kehittäminen olisi analoginen puukohtaisten kasvumallien kehittämiseksi. Puukohtaisissa malleissa puustotunnukset integroidaan yli runkolukusarjan. Rasterimalleissa metsikkötunnukset integroitaisiin yli alueellisen jakauman.

Rasterimuuttujien käyttöön liittyy tilastomatemaattisia ongelmia. Miten muuttujan havainnoista päästään rasteriin. Ei voida ajatella, että kenttämittaukset tehtäisiin jokaisesta rasterin ruudusta, vaan ne tehdään käytännössä harvempina verkkona, joko säännöllisenä tai epäsäännöllisenä. Mittaustulokset on yleistettävä rasterin ruuduille. Tämä voidaan tehdä joko interpoloimalla tai tasoittamalla. Koska havaintoihin liittyy yleensä satunnaisvirhettä on tasoitus interpolointia soveliaampi yleistysmenetelmä. Kaksiulotteiset tasoitusmenetelmät kuuluvat ns. spatiaaliseen tilastotieteeseen, jota on alettu tutkia voimakkaammin vasta tällä vuosikymmenellä. Tästä syystä käytännön tasoitusmenetelmät vaativat vielä kehittämistä.

TAKSAATTORIN NÄKÖKULMA ELEKTRONIikkaan PERUSTUVAN UUDEN TEKNIIKAN HYVÄKSIKÄYTTÖÖN

Simo Poso

Tietojenkäsittelyyn soveltuviin laitteiden ja ohjelmistojen yleistymisen on asettanut lähes kaikki tietojen keräämisen ja analysoinnin kanssa tekemisissä olevat ja erityisesti taksaattorit uuteen tilanteeseen. Uusi tekniikka vaikuttaa kahdella tavalla: Aikaisemmin manuaalisesti hoidettu tiedon keruu, tallennus ja käsittely voidaan automatisoida ja toisaalta aikaisemmin tavanomaisen tiedon lisäksi voidaan kerätä ja analysoida muutakin tietoa.

Tietojen keruussa ja analysoinnissa ajan ja paikan määreet saavat yhä enemmän painoa. Yleiseksi suositukseksi pitäisikin esittää, että kaikki tieto tallennetaan ajan ja paikan mukaisessa koordinaatistossa riippumatta siitä, onko tieto maastossa mitattua vai muuta, apumuuttujaluontoista tietoa kuten ilmakehän-, satelliittikuva- tai radarkuvatietoa. Yleisen maantieteellisen koordinaatiston käyttö pituus- ja leveysasteineen on suositeltavaa. Suomessa voidaan soveltaa yhtenäiskoordinaatistoa, jossa keskimeridiaani on 27 astetta itäistä pituutta (kulkee Kotkan läheltä halki Suomen) ja leveyspiiriin nolla-arvoviiva kulkee pitkin päiväntasaajaa. Aika taas mitataan nykyisen gregoriaanisen ajanlaskun mukaisesti Greenwichin aikana tai sen johdannaisena.

Periaatteessa kaikki paikannettavissa ja ajannettavissa oleva tieto, joka on korrelaatiossa kiinnostuksen lopullisena kohteena olevan asian kanssa, voidaan käyttää hyväksi. Tämä voi tapahtua mm. seuraavasti. Määritetään tutkittavalle alueelle sopivaksi katsottava määrä otosyksiköitä. Ositetaan otosyksiköt pienin yksikkökustannuksin hankittavalla apumuuttujatiedolla ositteisiin. Tätä otannan ensimmäistä vaihetta voidaan verrata menetelmään, jossa puista mitataan ensimmäisessä vaiheessa läpimitat. Sen jälkeen läpimittaluokittain mitataan joitakin koepuita, joista päästään läpimittaluokittaisiin "tarkkoihin" tuloksiin. Kaukokuviin perustuvalla apumuuttujatiedolla pyritään samaan, mahdollisimman homogeenisiin ositteisiin, "läpimittaluokkiin". Jokaisesta ositteesta valitaan sitten sopivaksi katsottava määrä koelohjoja, "koepuita", maastossa mitattaviksi.

Taksaattorin tehtäviin kuuluu olla kiinnostunut ei vain yhdestä metsätunnuksesta, esimerkiksi tilavuudesta, vaan kaikista tunnuksista, jotka ovat tärkeitä suunnittelun tai tehtävän kannalta. Tehtävien moninaisuus johtaa myös optimaalisten menetelmäratkaisujen moninaisuuteen. Yleensä monitavoitteisissa tilanteissa monien apumuuttujatietolähteiden, esimerkiksi tavanomaisten satelliittikuvien, radarkuvien, ilmakehän- ja karttojen yhteiskäyttö johtaa parempiin tuloksiin kuin mikään tietolähde erikseen ainakin, jos tietolähteiden käytöstä aiheutuvia kustannuslisäyksiä ei oteta huomioon.

Kun erilaisten apumuuttujatietolähteiden soveltamiskelpoisuutta metsätunnusten arviointiin selvitetään, on kysymyksessä ensisijaisesti sen tutkiminen, millaisiin korrelaatioihin eli riippuvuussuhteisiin päästään apumuuttujatiedon ja maastossa mitattavan, kiinnostuksen kohteena olevan "tarkan" tiedon

välillä ja kuinka suureksi muodostuu apumuuttujatiedon hankinnan kustannus. Korrelaatiot täytyy tutkia mm. seuraavien tekijöiden suhteen:

- tietolähteen laatu (satelliitti-, ilmakehu-, kartta-, ym.)
- metsätunnus (kasvupaikan laatu, puuston tilavuus, ym.)
- tarkastelu- tai otosyksikön laatu (ympyräkoeala, relaskoopikoeala, ym.)

Tarkka maastomittaus on yleensä mahdollista vain suhteellisen pienillä otosyksiköillä. Tällöin otosyksikkö kuvaa epätäydellisesti sitä metsikköaluetta, jolle metsikkötunnus rakentuu. Esimerkiksi relaskoopilla tehtyjen pohjapinta-alahavaintojen hajonnaksi Nyysönen (1954) on todennut 16 %. Tämä näkökohta johtaa kahteen päätelmään:

- Täydellistä vastaavuutta apumuuttuja- ja maastototuuden välillä ei ole helppo saavuttaa edes teoriassa. Suhteellisen pientä yksikköä kuvaavaan maastotietoon sisältyy häiritsevää satunnaisvaihtelua
- Tiedon paikantamisen tarkkuudelle pitää asettaa korkeat tavoitteet

Tavoitteiden tarkka tiedostaminen on tavallisesti tehtävien hyvän hoidon edellytys. Taksattorin työtehtävien tavoitteet ovat moninaiset, liittyen esimerkiksi laaja-alaisten metsien inventointeihin ja metsien käytön suunnittelutehtäviin eri tasoilla. Taksattorin tehtävä voi olla esimerkiksi **tietovirtojen luominen ja tiedon analysointi** siten, että hän pystyy esittämään hyviä ratkaisuja aina kun niitä tarvitaan.

Kaukokuvatekniikka ja kehittynyt elektroniikka saavat merkitystä vasta, kun ne palvelevat taksattorin tavoitteita. On inhimillistä, että uusiin tekniikoihin ihastutaan mieltimättä tarkasti mitä hyötyä niistä on tavoitteiden saavuttamisessa. Kun ilmakehut ja varsinkin kun väri-infrakuvat tulivat, kuviteltiin, että maastossa ei enää tarvitse käydäkään kuin vähäisessä määrin. Maastotyö ajateltiin voitavan korvata ilmakehien stereoskooppisella tarkastelulla. Mainonnan ammattilaiset osasivat käyttää hyväkseen kuvien tarjoamaa illuusiota: tästähän näkee kaiken. Tai myöhemmin satelliittikuvakaudelta muistanemme tapauksen, jossa television uutisten ja Suomen Luonto- lehden voimalla todistettiin satelliittikuvaa näyttären, että Suomessa on metsiä vähemmän kuin koskaan, vaikka valtakunnan metsien inventoinnit tiesivät kertoa aivan päinvastaista.

Taksattorin vaatima tieto on pääosin numeerista. Kuvien värit ja sävyt joudutaan muuttamaan kohteita kuvaaviksi, analyysiin soveltuviksi koodeiksi ja numeroarvoiksi. Ilmakehuvan valjastaminen tyydyttämään taksattorin tavoitteet vaatii laajahkojen systeemien kehittämisen. Kuvioittainen arvionti on laajin ilmakehuvia hyödyntävä systeemi, jossa kuvien hyödyntämistä on kuitenkin vaatimaton. Siinä ilmakehuvia käytetään lähinnä vain kuviorajojen metsäkartoituksen ja maasto-orientoinnin apuvälineenä. Pohjois-Suomen valtakunnallisissa inventoinneissa vuodesta 1970 lähtien ilmakehujen käyttö systeeminä on viety pisimmälle. Jos menetelmä ei sisällä tarkasti mitatun maastotiedon yhdistämistä kuvatulunkintaan, ilmakehusta silmävaraisesti ilman mittauslaitteita tulkitu tieto, esimerkiksi kuvioittainen tieto, ei yleensä täytä tarkkuusvaatimuksia.

Siispä ilmakehujen käyttö on suhteellisen vaatimatonta. Kuvia käytetään ennakkokuviointiin ja maastossa tapahtuvan kävelyn ja silmävaraisen arvioinnin tehostamiseen.

Entä miten käy satelliittikuvien kuten Landsat, SPOT ja tulevien radarkuvien metsätaloudellisen käytön? Voiko taksattori hyödyntää niitä? Seuraavassa muutamia näkökohtia kysymyksen tarkastelua varten:

- Nykyisten satelliittikuvien erotuskyky on heikko ilmakehään verrattuna.
- Radiometrinen erotuskyky voi olla suhteellisen hyvä, esimerkiksi Landsat TM:ssä on 7 aallonpituuskanavaa, joista yksi on lämpöalueella.
- Tähänastisten selvitysten mukaan satelliittikuvien kuviokohtainen tulointatulos on eräiden satelliittikuvista parhaiten estimoitavien tunnussten, esimerkiksi tilavuuden osalta parhaimmillaan samaa luokkaa kuin ilmakehätulkinnassa, mutta suurella osalla paljon heikompi, kuten esimerkiksi puulajisuhteiden arvioinnissa.
- Radarkuvista ei ole vielä riittävästi kokemuksia. On mahdollista, että niistä voidaan estimoida jotakin, esimerkiksi maaperää ja puulajia, mitä muilla menetelmillä on vaikea tai mahdoton arvioida.

Edellisestä luettelosta voitaisiin ehkä päätellä yksioikoisesti, että satelliittikuvista ja radarkuvista tuskin on taksattorille todellista hyötyä alueellisessa inventoinnissa ja suunnittelussa. Tällainen päätelmä olisi kuitenkin hätiköity ja todennäköisesti virheellinen.

Kaukokuvien käyttömahdollisuudet alueellisen suunnittelun tavoitteiden kannalta

Taksattorilla työn tavoite yleisesti on tiedon keruu ja käsittely inventointeja ja metsätalouden suunnittelua varten. Tavoitteisiin voidaan päästä käyttäen useita teitä. Perinteinen kuvioittainen arviointi on eräs, uuden tekniikan ympäristössä todennäköisesti huonokuntoinen ja hidas tie.

Kuvioittainen arviointi on sekä kuviorajojen piirtämisen että kuvioittaisten arviointien osalta subjektiivista. Tuloksen laatu riippuu voimakkaasti tekijänsä ammattitaidosta. Esimerkiksi jos tietylle annetulle alueelle usea ammattimies laatii samoissa olosuhteissa kuvioittaista karttaa, eroavat kuvioinnit usein niin paljon, että kartoituksia on vaikea mieltää samoja alueita koskeviksi. Kuvioittainen arviointi on perinteisesti ollut kertasuoritusta, joka pyritään toistamaan esimerkiksi kerran 10 vuodessa. Tietojen pito ajantasalla on vaikeaa.

Perinteisen kuvioittaisen arvioinnin sijasta voidaan soveltaa koeala-arviointia, jossa mielivaltaiset kuviot voivat olla tulostusyksiköitä. Menetelmä sisältää seuraavat osat:

1. Koealaston määrittäminen halutun tiheäksi karttakoordinaatiston avulla. Tulokseksi saadaan ensimmäisen vaiheen otosyksiköiden joukko.
2. Apumuuttujatiedon keruu ensimmäisen vaiheen koealoille.
3. Ensimmäisen vaiheen koealojen ositus mahdollisimman homogeenisiin osajoukkoihin apumuuttujatiedon suhteen. Tulokseksi saadaan ositteita.
4. Maastokoealojen poiminta. Jokaisen ositteen ensimmäisen vaiheen koealoista poimitaan osa toisen vaiheen otosyksiköiksi, joilta mitataan tiedot riittävällä luotettavuudella ("ground truth" -tiedot).
5. Maastossa mitattujen metsätietojen siirto ositteittain ensimmäisen vaiheen kaikille koealoille. Esimerkiksi ositteesta 15 mitattujen maastokoealojen tiedot siirretään ositteen 15 ensimmäisen vaiheen koealoille.
6. Tulosten laskenta mielivaltaisille osajoukoille ja osa-alueille, esimerkiksi kuvioille.
7. Ensimmäisen vaiheen koealoille saatujen metsätietojen ja muiden tietojen ajantasallapito.

Luonnollisin tapa saada työvaihe 2:n edellyttämää apumuuttujatietoa on käyttää hyväksi kartta- ja kaukokuvatietoa. Tiedon käyttökelpoisuutta arvioidessa on kiinnitettävä huomiota seuraaviin näkökohtiin:

- a) Apumuuttujatiedon, kaukokuvia käytettäessä säteilyarvojen, korrelaatio tutkittavien tunnusten kanssa on hyvä.
- b) Apumuuttujatiedon hankinnan yksikkökustannukset ovat alhaisia.
- c) Apumuuttujatiedon käsittely on helppoa, esimerkiksi kuvat ovat laajoja alueita kattavia ja digitaalisessa muodossa.
- d) Kartta voi sisältää tietoa, joka täyttää maastotiedon luotettavuusvaatimukset, esimerkiksi hallinnolliset rajat, maankäyttöä ja maapohjaa koskevia tietoja, topografista tietoa.
- e) Tietyissä tapauksissa riittävän luotettavaksi katsottavaa metsällistä ”maastotietoa” voidaan saada esimerkiksi suurikaavaisista ilmakuvista.

Siirtyminen perinteisestä kuvioittaisesta arvioinnista koealaperusteiseen tiedon keruuseen, ajantasallapitoon ja suunnitteluun antaa seuraavia etuja.

- Koealatietojen mittaus maastossa on objektiivista.
- Apumuuttujatietojen mittaus on suurelta osalta objektiivista.
- Kuviorajojen muuttuminen ei aiheuta merkittäviä ongelmia tietojen ajantasallapidossa.
- Menetelmä voi hyödyntää joustavasti olemassa olevia maastossa mitattuja koealoja, esimerkiksi valtakunnan metsien inventointikoealoja.
- Menetelmä voi hyödyntää joustavasti kaikkea apumuuttujatietoa, mikäli tiedon siirto atk:ssa käsiteltävään muotoon on helppoa ja mikäli tieto pystyy vähentämään apumuuttujatiedolla saatavien ositteiden sisäistä vaihtelua eli selittämätöntä varianssia voidaan pienentää. Täten menetelmä soveltuu mm. radarkuvien hyödyntämiseen.

Kun edellä kuvatussa systeemissä otosyksiköt ovat suhteellisen pieniä, tulee tärkeäksi, että ne voidaan paikantaa riittävällä tarkkuudella. Tähän toivotaan apua GPS-paikannussysteemistä.

Edellä hahmoteltu systeemi soveltuneee monen tason inventointiin ja suunnitteluun. Se johtaa helposti laajahkojen atk- ja sen oheislaitteiden hankintaan, jotta mm. maastotieto-, mallitieto- ja karttatietokantoja voidaan pitää ajantasalla ja niiden käyttö on joustavaa. Menetelmien kehittämisessä, laitteistojen käytössä ja kuvamateriaalien hankinnassa yhteistyö ja koordinointi olisi tarpeellista. Tässä riittää tehtäviä myös Taksattoriklubille.

KENTTÄKOKEMUKSIA TIEDONKERUULAITTEISTA VMI : SSÄ

Arto Ahola

Valtakunnan metsien inventoinnin maastotyöt suoritettiin vuonna 1989 käyttäen Rautaruukki Oy:n valmistamaa tiedonkeruulaitetta KTP-900. Tavoitteena oli kerätä kaikki kertainventoinnissa mitattavat tiedot keruulaitteelle ja lähettää ne puhelimen ja modeemin avulla suoraan VAXille Helsinkiin.

Lähtökohdat

Tilanne viime talvena projektia käynnistettäessä oli se, että valittu laite oli juuri kokemassa eräänlaista muodonmuutosta osittain Metlan sovelluskohtaisten toivomusten ja osittain valmistajan jo pidemmän aikaa suunnittelemien parannusten vuoksi. Laitteen näyttöä suurennettiin yli kaksinkertaiseksi ja sen rakennetta muutettiin entisestä LED-näytöstä LCD-näytöksi poistaen näin aiemmin esiintyneet virrankulutus- ja näkyvyysongelmat, laitteen muistikapasiteettia kasvatettiin lähinnä ohjelmamuistin osalta, laitteen painoa ja kokoa pienennettiin, laitteen operaattorikantaa ja tiedon-siirtoprotokollaa parannettiin osittain Metlankin toivomusten mukaan jne. Kaiken kaikkiaan laitteen voidaan sanoa uudistuneen lähes täysin.

Tällainen totaalinen muutos vaati luonnollisesti melkoisen räätälöinnin myös laitteen käyttöjärjestelmän kehittäessä Rautaruukki Oy:ssä. Kun laitteen fyysisten osasten, mm. näytön ja ulkokuoren toimitukset alihankkijoilta vielä viivästyivät sovitusta ajasta muutamalla viikolla, laitteen ohjelmointiin, ohjelmien testaukseen ja käyttökoulutukseen käytettävissä ollut aika jäi varsin vähäiseksi. Suoraan sanoen laitteet jouduttiin ottamaan käyttöön lähes kylmiltään ja ohjelmiin jäi merkittäviäkin virheitä, jotka tulivat esiin vasta maastotöiden edetessä.

Käytön opettelu

Ennalta jo sinänsä hankalaksi arveltua laitteen käytön opettelua haittasi siis lisäksi aikapula sekä ohjelmavirheet. Alkuun laitteen käytössä esiintyneet ongelmat johtuivat usein juuri ohjelmavirheistä, vaikkakin syy keruun katkeamisesta meni usein käyttäjän taitamattomuuden tai laitteen toimimattomuuden tiliin.

Ohjelmavirheiden lisäksi havaittiin myös laitteen käyttöjärjestelmään jääneitä virheitä tai vajavaisuuksia, ei kuitenkaan niin vakavia, että tiedonkeruu olisi tästä syystä totaalisesti keskeytynyt.

Näistä lähtökohdista lähtien laitteen peruskäyttö opittiin kuitenkin kaiken kaikkiaan hyvin. Ongelmia käytön opettelussa ja oikeastaan koko kesän ajan tuotti lisäksi eri ryhmien väliset erot työtavoissa koealoilla ja koealojen väliset erot, jotka vaikeuttivat välillä merkittävästikin sujuvaa tietojen tallennusta keruulaitteelle.

Parin viikon käyttökokemuksista saadun palautteen perusteella suoritettiin keruuhjelmien korjaus ja päivitys laitteisiin. Tämän jälkeen ohjelmat sinänsä eivät tuottaneet enää suurempia ongelmia.

Maastokelpoisuus

Laitteen maastokelpoisuudesta saatiin vaihtelevia kokemuksia. Kosteuden suhteen tilannetta auttoi vähäsateinen kesä, todellisia sadepäiviähän ei kuluneena kesänä ollut kuin muutama. Silti koko projektin ainoat kadotetut tiedot johtuivat kosteuden pääsystä laitteeseen; yksi ryhmä joutui mittaamaan kahden työpäivän verran koealoja uudelleen, kun yhden sadepäivän työskentelyn jälkeen laite jumiutui, eikä tietoja saatu ulos edes myöhemmin laitevalmistajan toimesta.

Toinen yhtä vakava laiterikko aiheutui laitteen kolahtamisesta puun kylkeen ojan yli hypättäessä. Onneksi tässä tapauksessa laitteen tiedot oli juuri edellisenä iltana purettu, näin tietoja ei sattumalta menetetty yhtään.

Kaiken kaikkiaan menetettyjen ja kerättyjen tietojen suhde oli varsin hyvä, vain n. 0.4 % mitatuista tiedoista jouduttiin mittaamaan uudelleen..

Laitteen suoraan toimivuuteen vaikuttamattomia käytöstä aiheutuvia kulumishaittojakin esiintyi. Eniten haittaa oli näppäimistön suojakalvon murtumisesta useimmin käytettyjen näppäinten kohdalla. Syyksi kalvon murtumiseen arveltiin vahvojen hyttysmyrkköjen aiheuttamaa mahdollista haurastuttavaa vaikutusta. Muutamaaan laitteeseen jouduttiin koko kalvo vaihtamaan ja lisäksi useassa laitteessa oli kesän jäljeltä teippiä käytetty paikkaamaan murtunut kohta. Paikkaukset laitteisiin oli pakko tehdä kosteuden pääsyn estämiseksi.

Toinen heikosti käyttöä kestävä kohta laitteessa oli näyttö, jota peitti muovinen "lasi". Tämä muovi naarmuuntui käytössä aika helposti tehden näytön joissakin laitteissa jo melko epäselväksi. Yleisesti laitteen maastokelpoisuuteen voidaan kuitenkin olla hyvinkin tyytyväisiä, kun otetaan huomioon kokeilun laajuus suhteessa esiintyneisiin ongelmiin.

Tiedonsiirto

Kerättyjen tietojen siirto laitteelta VAXille suoritettiin puhelinta ja modeemia käyttäen. Siirrossa keruulaite kytkettiin modeemiin ja otettiin yhteys Helsinkiin VAXin modeeminumeroon ja laitetta päätteenä käyttäen käynnistettiin siirto-ohjelma VAXilla, nimettiin lähetettävä tiedosto ja annettiin siirtokäske laitteen muistin tyhjentämiseksi.

Ainoaksi, mutta joillakin ryhmillä huomattavaksikin ongelmaksi tiedonsiirrossa osoittautui puhelinlinjojen paikoittainen heikkous, mikä aiheutti tiedonsiirron katkeamista kesken lähetyksen. Tämä aiheutti paitsi epävarmuutta tietojen siirtymisestä, myös suoranaisia ongelmia siirrossa, tiedostojen nimeämisessä ja varsinkin niiden jatkokäsittelyssä.

Tietojen jatkokäsittely

Metlan Muhoksen tutkimusasemalla vuonna 1987 tehtyä KTP-datan siirto- ja jatkokäsittelyohjelmaa käytettiin myös tässä sovelluksessa. Tiedonsiirron lisäksi ohjelma on tarkoitettu siirrossa syntyneiden jonomuotoisten datatiedostojen selväkielisiksi muokkaamiseen.

Ohjelman käyttäminen oli periaatteessa melko yksinkertaista. Ongelmia alkoi kuitenkin esiintyä sitä enemmän, mitä syvemmin asiaan perehdyttiin. Havaittiin, että ohjelmiston kapasiteetti oli aivan

liian pieni tähän sovellukseen. Ohjelma oli tehty vain yhtä ja lähinnä melko yksinkertaista lomaketta ajatellen. VMI-sovelluksessa käytettiin 5-8 eri lomaketta, joista mm. kuvio- ja koepuulomake olivat suuria ja verraten mutkikkaita.

Ongelmien poistamiseksi jouduttiin tekemään ohjelmia, jotka muunsivat käsiteltävät tiedostot varsinaisen käsittelyohjelman hyväksymään muotoon. Lisäksi hankaluutta aiheutti se, että syöttödata jouduttiin pilkkomaan pieniin osiin, kun kerralla voitiin ajaa vain hyvin rajoitettu datamäärä.

YKSITTÄISEN PUUN NUMEERINEN ILMAKUVATULKINTAMENETELMÄ

Risto Suvanto

Pasi Kiema

Johdanto

Numeerinen tulkinta satelliittikuvilta on tullut entistä yleisemmäksi nopean teknisen kehityksen ja alentuneiden tietojenkäsittelylaitteiden hintojen myötä. Numeerinen tulkinta ilmakuvilta on myös saanut lisääntyntä huomiota. Numeerisella tulkinnalla on nimittäin muutamia merkittäviä etuja verrattuna visuaaliseen tulkintaan :

- numeerinen tulkinta on paljon objektiivisempi ja nopeampi
- tilastolliset analyysit ovat helpompia
- erilaisten materiaalien käyttö ja vertailu on suhteellisen helppoa.

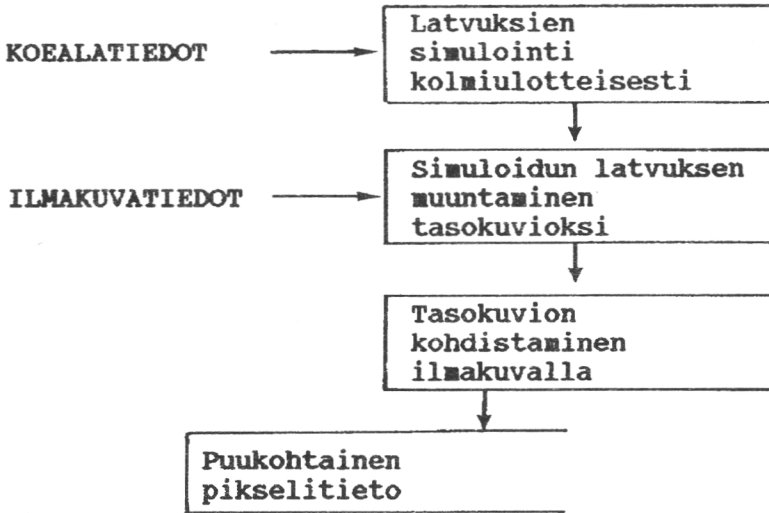
Valitettavasti ilmakuvien numeerisen tulkinnan käyttöönotossa on muutamia ongelmia:

- ilmakuvien digitoinnissa geometrinen erotuskyky huononee
- ohjelmistoista tapaa tulla monimutkaisia ja visuaalista tulkintaa saatetaan tarvita pahojen virheiden estämiseksi.

Ilmakuvien etu verrattuna satelliittikuviin on se, että erotuskyky riittää yksittäisen puun havaitsemiseen ja yksilöimiseen. Ilmakuvan mittakaava on riittävän suuri yksittäisen puun mittaamisen. Erittäin käytännöllinen tähän tarkoitukseen on väri-infrakuva, erityisesti puuston terveydentilan ja vahinkojen tutkimisessa.

Tässä esityksessä kuvaillaan Helsingin Yliopiston Metsänarvioimistieteen laitoksen ja Tampereen Teknillisen Korkeakoulun Geodesian ja fotogrammetrian laitoksen yhteistyössä kehittämän yksittäisen puun numeerisen ilmakuvatulkinnan menetelmän pääpiirteet. Menetelmän tärkeimmät välineet ovat mikrotietokone hiirellä, kuvamuistikortilla ja värimonitorilla varustettuna.

Järjestelmässä projisoidaan maastossa mitattujen puiden latvuksia digitoidun ilmakuvan koordinaatistoon. Menetelmä jakautuu tarvittavan tietoaaineiston keruuseen sekä tietosysteemiin eli ohjelmistoon. Tietoaaineisto koostuu ilmakehän- ja maastotiedosta. Tietosysteemiä apuna käyttäen saadaan tuloksena yhdistetty tieto siitä, millaiset digitoidun ilmakuvan sävyarvot vastaavat maastossa mitatun puun latvusta.



Kuva 1. Järjestelmän pääperiaatteet

Tiedonkeruu

Menetelmässä tarvittavat maastotiedot saadaan sellaisista koealoista, joista on maastossa mitattu vähintään puiden sijainti, pituus ja puulaji. Koealan simuloinnin onnistumisen kannalta on sijaintitietojen tarkkuudessa oleellista puiden keskinäisten sijaintien tarkkuus mukaanlukien maaston kaltevuudesta ja epätasaisuudesta johtuvat korkeuserot. Merkityksellistä simuloinnin onnistumiselle on myös se, että koealasta on mitattu kaikki valtapuut, eli ne puut, jotka oletettavasti selvimmin erottuvat ilmakuvalla.

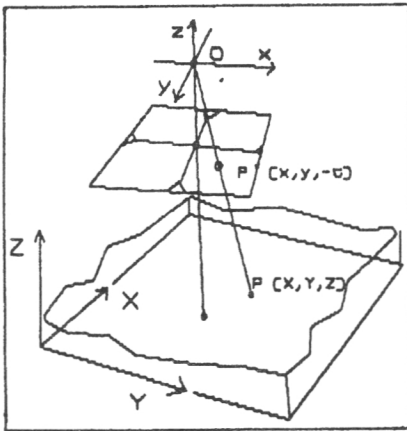
Menetelmän kehittämisen tässä vaiheessa koealatiedot syötetään tietosysteemiin omalla ohjelmalla, mutta jatkossa on syytä pyrkiä hyödyntämään olemassaolevia pysyvien koealojen tiedot sisältäviä tietokantoja.

N. 1:5000 mittakaavainen väri-infrakuva on digitoitu kameraskanneria apuna käyttäen. Digitoidun kuvan maaston erotuskyky on noin 50 senttimetriä. Eri värit, sininen, vihreä ja punainen, on digitoinnissa eroteltu suotimia käyttäen. Menetelmän kehittämissä vaiheissa on käytetty suuruusluokaltaan yhden Mb kokoisia kuvatiedostoja, jotka peittävät noin neljännesneliökilometrin maastoa.

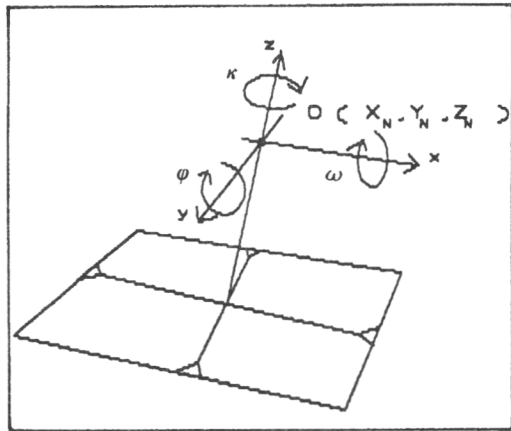
Orientointi

Orientoinnilla tarkoitetaan maastokoordinaatiston ja kuvakoordinaatiston välisen muunnosfunktion selvittämistä. Tämä on toteutettu olettamalla maastopisteen kuvautuvan ilmakuvalla

yksinkertaistetun mallin mukaan. (kuva 2). Jotta koordinaattimuunnos maaston ja kuvan välille voidaan laskea, täytyy määrittää projektiokeskuksen ja kuvatason asema maastokoordinaatistoon nähden. Tämä ilmoitetaan projektiokeskuksen maastokoordinaattien ja kuvatason kallistusten avulla (ks. kuva 3). Koska muunnosfunktiot eivät ole lineaarisia, ei niille löydy suoria ratkaisuja, vaan on käytettävä iteratiivista menetelmää, jossa orientointia parannetaan asteittain. Tätä varten on kuvan alueelta löydettävä maastokoordinaateiltaan tunnettuja maastopisteitä. Muunnosfunktioiden ratkaisu tehdään näiden maastokoordinaattien ja kuvalta mitattavien kuvakoordinaattien avulla.



Kuva 2. Maastopisteiden kuvautuminen ilmakuvalle

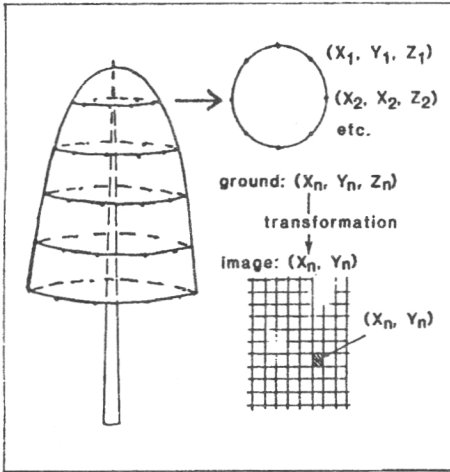


Kuva 3. Orientointiparametrit

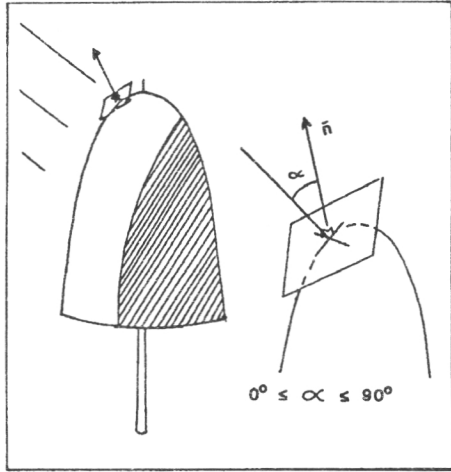
Simulointi

Simuloinnilla tarkoitetaan ilmakuvalla näkyvän latvuspinnan muodon ja ominaisuuksien jäljittelyä maastossa mitatun tiedon perusteella. Simulointi tukeutuu teoreettiseen malliin, joka olettaa latvuksen muodon puulajin ja puun piteuden funktioksi. Puun latvuspinnasta otetaan riittävän suuri joukko pisteitä. Kukin piste projisoidaan ilmakuvalle orientoinnista saadun muunnosfunktion avulla (kuva 4). Pisteeseen liitetään tieto valaistusolosuhteista (kuva 5). Latvuksen pinnasta otettu piste voi olla latvuksen varjo-osassa tai auringon puolella. Valon puolella olevaan pisteeseen liitetään tieto pisteeseen piirretyn tangenttitasen normaalin ja auringon säteiden välisestä kulmasta.

Jatkossa on syytä tutkia, onko sävyarvojen ja valaistusolosuhteiden välillä riippuvuutta ja jos on, niin kuinka voimakasta. Tällä hetkellä puutteena on latvuksen simulointi ainoastaan kahden muuttujan perusteella. Latvusmuodon simulointiin tämä riittää, tarkkuutta voitaneen saada parannettua lisäämällä rinnankorkeusläpimitta yhdeksi muuttujaksi. Mutta latvuksen ilmakuvalla näkyvien ominaisuuksien l. sävyarvojen simulointiin tämä on ehdottomasti liian vähän. Esimerkiksi ikä ja kasvupaikka vaikuttanee sävyarvoihin ja tietenkin puun kunto, jonka tutkimista varten menetelmää kehitetään.



Kuva 4. Latvuspisteen projisointi ilmakuvalle



Kuva 5. Valaistusolosuhteet pisteessä.

Simuloinnin kohdistus ilmakuvalle.

Simuloinnin kohdistuksessa simuloinnissa syntynyt vektorikartta latvusrajoista ja latvuksessa olevista valaistuksen rajoista tulostetaan ilmakuvan päällä. Sen jälkeen vektorikartta siirretään oikeaan kohtaan. Kohdistuksen oikeellisuus perustuu käyttäjän kykyyn nähdä oikea latvuskuvio ilmakuvalla. Oikean paikan löytäminen perustuu siis täysin visuaaliseen tulkintaan. Joidenkin koealojen sijaintia saattaa olla täysin mahdotonta varmuudella osoittaa.

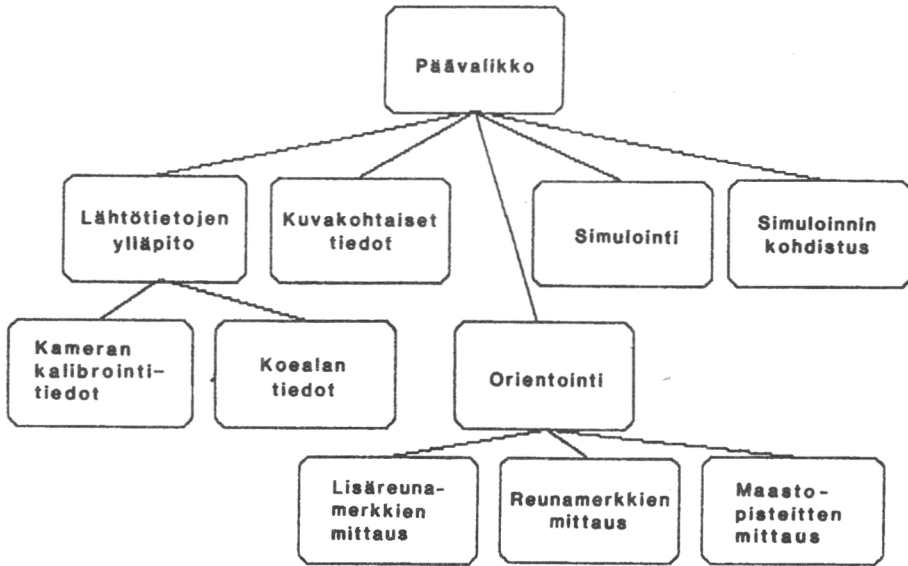
Puukohtainen pikselitieto

Lopullinen tulostiedosto on puukohtainen pikselitieto. Kun simuloitu koeala on kohdistettu käyttäjän mielestä oikeaan kohtaan ilmakuvaa, voidaan muodostaa puukohtainen pikselitiedosto. Kustakin puusta muodostuu tiedostoon lista, jossa on lueteltu kaikkien puun latvuksen alueelle l. vektorikartassa latvusrajan sisään osuneiden pikseleiden sävyarvot kanavittain. Myös teoreettisen mallin mukaisista valaistusolosuhteista talletetaan tieto pikseleittäin.

Tietosysteemin toteutus

Laitteisto koostuu mikrotietokoneesta 80286 prosessorilla ja mieluummin matematiikkaprosessorilla, SPAM-kuvamuistikortilla (512 x 512 pikseliä), värimonitorilla, hiirellä sekä vähintään 20 Mb kovalevyllä varustettuna.

Ohjelmat on käännetty MS-DOS -käyttöjärjestelmän alaisuudessa toimivalla Microsoftin C 5.1 kääntäjällä. Ohjelmisto on rakennettu modulaarisesti siten, että loogisesti yhteenkuuluvat funktiot on koottu samaan ohjelmätiedostoon. Tietosysteemiin kuuluvien ohjelmien käyttöliittymäksi on laadittu hiiriohjattu valikkorakenne, josta käyttäjä valitsee tehtävät toiminnot.



Kuva 6. Valikkorakenne

Tiivistelmä

Laitteistot ja ohjelmistot satelliittikuvien numeeriseen tulkintaan ovat yleistyneet. Satelliittikuvien erotuskyky ei kuitenkaan riitä yksittäisten puiden tunnistamiseen ja analysointiin. Tarvitaan tarkempaa resoluutiota metsiköiden puulajisuhteiden ja terveydentilan tutkimiseen (Poso 1987). Tässä artikkelissa esitellään mikrotietokoneympäristöön ja digitoituun väri-infrakuvaan perustuva ilmakuvatulkintamenetelmä.

Lähdeluettelo

Poso, S. 1985. Numerical interpretation of trees on color-infrared aerial photographs. Proceedings Symposium IUFRO S 6. 05. Kyoto.

METSIEN MONIKÄYTÖN SUUNNITTELU KUNTATASOLLA SATEL- LIITTIKUVIA HYÖDYNTÄEN

Varpu Kähkönen

Johdanto

Metsiemme merkitys muun kuin perinteisen puuntuotannon kannalta on viime aikoina selvästi korostunut. Yleinen vaurastuminen ja ihmisten vapaa-ajan kasvu ovat lisänneet paineita metsien monikäyttöä kohtaan. Muuttunut tilanne tulee ottaa huomioon myös metsien käytön suunnittelussa. Periaatteessa metsätalouden suunnittelulle pitäisi antaa kaikki metsänkäyttömuodot sisältävä merkitys. Normaaleissa talousmetsissäkin tulisi puhua metsien rinnakkais- ja päällekkäiskäytöstä, jossa päätöksentekijän metsänkäyttöön liittyvien toiveiden ja odotusten perusteella erilaiset tavoitteet saavat painoarvonsa.

Toisaalta puhuttaessa metsien monikäytöstä ja monikäytön suunnittelusta ei ongelmien tarkastelu puuntuotannon näkökulmasta ole mielestäni vailla perusteita. Puuntuotanto on nykyisin ja varmasti tulevaisuudessakin metsien tärkein käyttömuoto - ainakin meillä Suomessa. Puuntuotannolla on tutkimusten mukaan myös eniten vaikutusta muihin käyttömuotoihin ja niiden toteuttamisen edellytyksiin, samalla myös eniten mahdollisia ristiriitatilanteita.

Tavoitteiden yksityiskohtainen ja selkeä muotoilu on kaikessa suunnittelussa tärkeätä. Suunnittelun tehtävä on esittää toimintaohjelma näiden ennalta harkittujen tavoitteiden toteuttamiseksi. Suunnittelutilanteen lähtökohdat voivat olosuhteiden mukana suuresti vaihdella. Siksi ei voitaneakaan laatia yleispätevää suunnittelukehikkoa. Esimerkiksi suunnittelualan laajuus, käytettävissä olevat resurssit ja erityisesti suunnitelmalle asetetut tavoitteet antavat käytännön menetelmälle omat rajoitteensa.

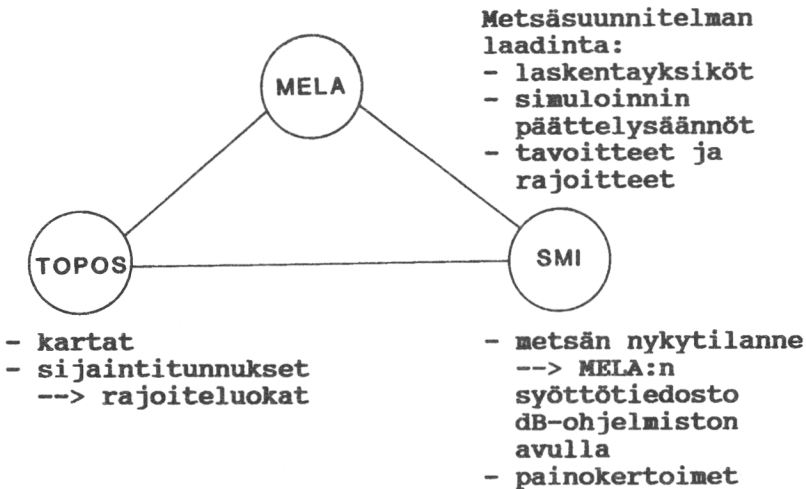
Suunnittelun metsätieto on pääasiassa kuvio- tai koalapohjaista. Kaukokuvia käytettäessä ensimmäisen vaiheen otosyksiköt (koealat) voivat olla hyvinkin tiheässä. Tämä ja se näkökohta, että koealat ovat tarkasti paikannettavissa, tekee koalapohjaisen inventoinnin ja suunnittelun erityisen kiinnostavaksi varsinkin suuralueitten (esim. kunnat) suunnittelussa, jossa pienpiirteiseen kuviokohtaiseen tarkasteluun ei voida mennä jo taloudellisistakaan syistä. Tarkasti paikallistettaviin koealoihin on helpompaa liittää sellaista sijainti- ja etäisyystietoa, jolla on merkitystä metsien monikäytön kannalta.

Tässä esiteltävä tutkimus on osa Sipoon kunnalle laadittavasta metsäselvityksestä (ks. Kähkönen & Härmä 1989). Työ liittyy Sipoon kunnan kaavoitustoimistossa tehtävän yleiskaavan perusselvityksiin. Tarkoituksena oli laatia kunnalle pitkän aikavälin metsäsuunnitelma, jossa pyritään painottamaan monikäyttökysymyksiä ja edelleen selvittää monikäyttönäkökohtien yleistä vaikutusta puuntuotantoon ja saatuihin tuloihin.

Sipoon kunnan maapinta-ala on n. 36200 hehtaaria, joista inventoinnin piiriin kuuluvan metsän peitossa on n. 55 % eli 19600 hehtaaria. Koska inventoitava alue oli näin laaja, ei yksityiskohtainen kuviotason inventointi ollut mahdollista. Toisaalta suunnitelman tavoitteenakin oli luoda perusta metsien käytölle keskipitkällä ja pitkällä aikavälillä. Operatiivisella tasolla toimittaessa on kunkin kohteen käsittelyohjelma suunniteltava yksityiskohtaisesti ja kohteen erityispiirteet tarkoin huomioiden.

Tutkimusongelman ratkaisemiseksi oli luotava menetelmä, jossa metsävarojen käytön suunnittelu perustuu satelliittikuva- ja karttainformaation hyödyntämiseen. Tavoitteena oli eri informaatiolähteitä ja ohjelmistoja hyödyntämällä saada aikaan Sipoon metsille monikäyttökysymykset huomioonottava metsäsuunnitelma. Menettelyn avulla pyrittiin ikään kuin rakentamaan polku kartta- ja satelliittikuvaohjelmistoista metsätalouden ja monikäytön suunnitteluun.

Tutkimuksen viitekehys voidaan kuvata seuraavan kaavion avulla. Siitä ilmenevät tutkimuksen "työvälineiden" kytkeä toisiinsa sekä eri vaiheissa selvitettävät tehtävät ja tutkimusongelmat:



Karttojen valmistaminen TOPOS-ohjelmiston avulla

Sipoon metsäalueet digitoitiin TOPOS-karttajärjestelmän (kts. Pekkonen 1989) avulla keskimäärin 10-50 ha:n (vaihteluväli 5-200 ha) kuvioihin mittakaavassa 1: 10000 olevia väri- infrakuvia ja peruskarttamateriaalia apuna käyttäen. Pienpiirteisyyttä pyrittiin tietoisesti välttämään eikä kuviointia voida sellaisenaan rinnastaa normaaliin metsikkökuviointiin. Kuvioiden muodostamisessa olivat tärkeimpinä kriteereinä satelliittikuvatulkinnan ja laskentatyön asettamat käytännön vaatimukset. Kuvioita oli koko kunnassa yhteensä n. 900.

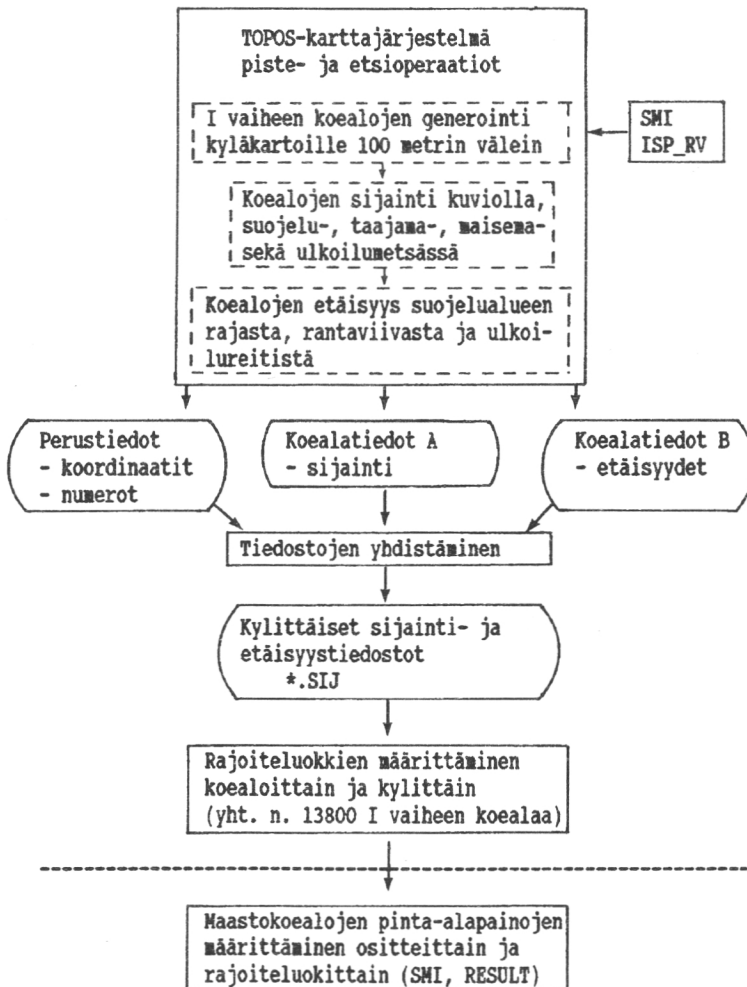
Varsinaisten kuvioiden lisäksi digitoitiin kartoille vesistöt, erityyppiset suojelualueet, taajamametsät, maisemallisesti merkittävät alueet, ulkoilualueet sekä tärkeimmät ulkoilureitit. Karttojen perusmateriaalin toimitti Sipoon kunta, jossa oli peruskartalle mittakaavassa 1:20000 merkitty nämä kunnan kannalta tärkeät erityisalueet. Erityisalueiden erottelun kriteereinä käytettiin kunnassa olemassaolevia yleiskaavamerkintöjä sekä seutukaavaliiton aluevarauksia.

Rajoitemetsien määrän ja sijainnin selvittäminen saatiin automatisoitua TOPOS-karttajärjestelmän avulla. Haluttua rajoitemuuttujaa kuvaavat alueet ja viivatyyppit digitoitiin kartalle eri viivatyypeillä

ja -tasoilla. TOPOS-järjestelmän etsi- ja pisteoperaatioita käyttämällä voitiin kunkin kyläalueen ensimmäisen vaiheen koaloille liittää koalan sijainnista kertovaa tietoa. Etsioperaation avulla voidaan kartalta hakea erityyppiset viivat ja alueet, pisteoperaatio taas liittää etsioperaation työn "tulokset" kullekin koalalle sen koordinaattien mukaan (Pekkonen 1989).

Kartalle generoiduista pisteistä eli ensimmäisen vaiheen koaloista selvitettiin niiden sijaintikuviolla, suojelumetsässä, taajamametsässä, maisemametsässä sekä ulkoilumetsässä. Varsinaisen sijaintitiedon lisäksi selvitettiin myös kunkin koalan etäisyydet suojelualueen rajasta, rantaviivasta sekä ulkoilureitistä. Tuloksena saatiin tiedosto, jossa kunkin pisteen paikka ilmaistaan yhtenäiskoordinaatein metrin tarkkuudella ja josta ilmenee pisteen sijainti em. alueilla sekä etäisyydet haluttuihin tunnuksiin. Varsinaisten metsänkäyttöluokkien (rajoiteluokkien) määrittäminen tehtiin FORT-RAN-ohjelmilla.

Kuvassa 1 esitetään sijaintitietojen määrittämisen työvaiheet. Suorakaiteet kuvaavat "työvaiheita" ja soikiot lähtö-, väli- ja tulostustiedostoja.



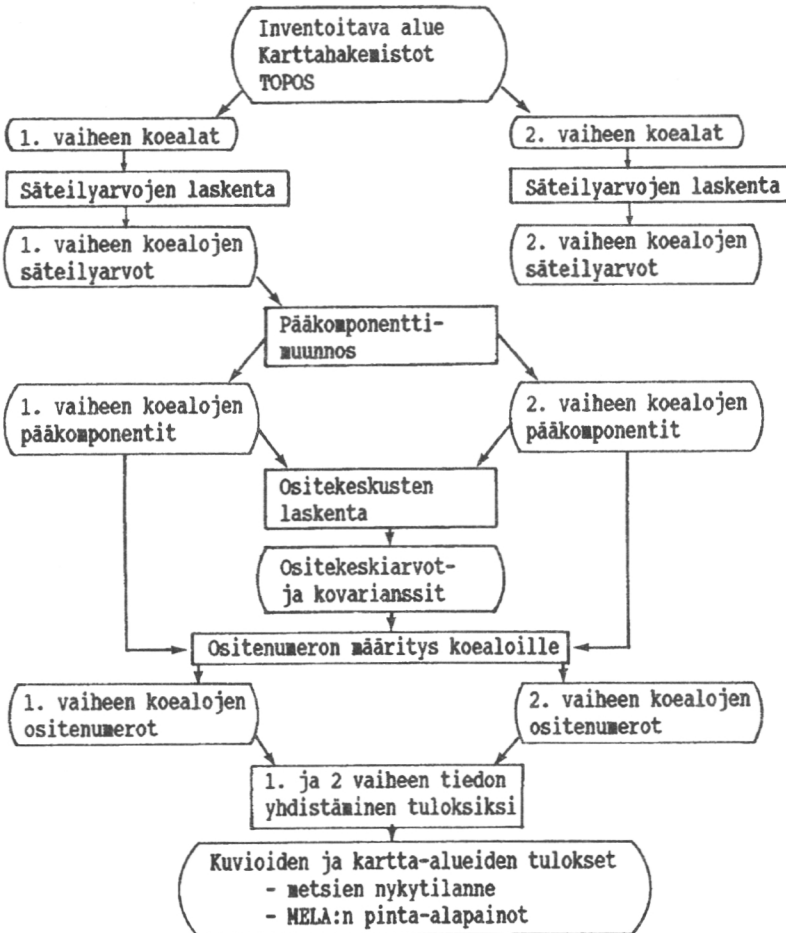
Kuva 1. Koealojen sijaintitietojen määrittäminen.

Satelliittikuvien hyödyntäminen

Sipoon metsien nykytilanne selvitettiin satelliittikuvatulkinnan avulla ja laskennassa käytettiin Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteen laitoksella kehitettyä SMI-ohjelmistoa. Menetelmä perustuu kaksivaiheiseen otantaan osituksella (Poso ym. 1987, Härmä 1988 ja 1989). Ensimmäisen vaiheen koealat generoitiin 100 metrin välein ja ne jaettiin satelliittikuvatiedon perusteella mahdollisimman homogeenisiin luokkiin eli ositteisiin.

Kustakin ositteesta valittiin 2-20 ensimmäisen vaiheen koealaa mitattaviksi maastossa toisen vaiheen koealoina. Maastokoealat valittiin suhteellisella allokoinnilla ensimmäisen vaiheen koealojen joukosta, toisin sanoen maastokoealojen jakautuminen ositteisiin vastasi ensimmäisen vaiheen koealojen ositejakaumaa. Maastokoealojen valinnassa kiinnitettiin huomiota myös koealojen maantieteelliseen edustavuuteen niin, että koealaverkosto kattoi koko kunnan alueen mahdollisimman tasaisesti.

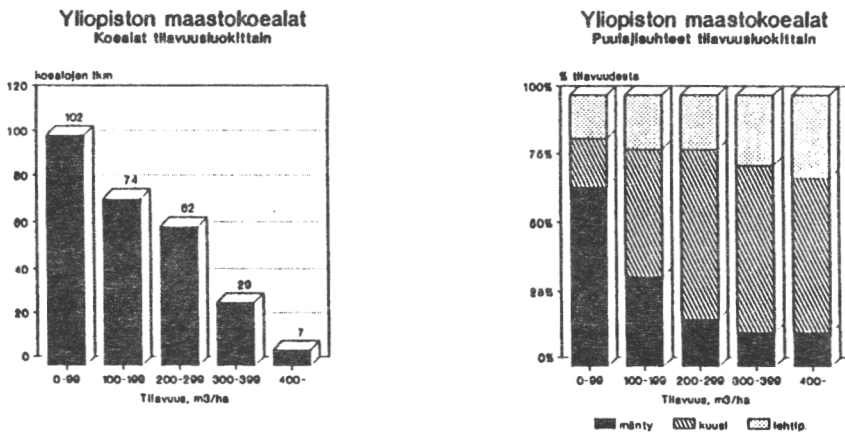
Kuvassa 2 esitetään laskennan eteneminen SMI-ohjelmistossa (Härmä 1989). Suorakaiteet kuvaavat "työvaiheita" ja soikiot lähtö- väli- ja tulostiedoista.



Kuva 2. SMI-ohjelmiston laskennan kuvaus (Härmä 1989)

Kesällä 1988 mitattiin Sipoossa 274 maastokoealaa rypäittäin siten, että kussakin lohossa oli 7 koealaa. Koealat mitattiin nk. rajoitettuina relaskoopikoealoina, joissa maksimisäde oli 15 metriä. Varsinaisen pääkoealan lisäksi mitattiin sekä tilapäisillä että pysyvillä koealoilla kaksi apukoealaa, joilta määritettiin puulajikohtaisia tunnuksia. Tietojen tallennus ja laskenta SMI-maastovektorin muotoon tehtiin Mark Waiten suunnittelemalla tietokantaohjelmistolla. Samaa ohjelmistoa käytettiin vastaavasti maastovektorin muuttamiseen MELA:aa varten VMI-muotoon.

Metsänarvioimistieteen laitoksen erityisesti tätä tutkimusta varten mittaamien maastokoealojen lisäksi käytettiin MELA:n aineistona Sipoossa ja sen välittömässä läheisyydessä sijaitsevia kesällä 1986 mitattuja valtakunnan metsien inventoinnin koealoja. Kaikkiaan metsälaskelmassa oli mukana 349 koealaa. Kuvassa 3 on esitetty eräitä tunnuksia yliopiston koealoista. Sipoon metsistä saa jo pelkästään maastokoealoja tarkastelemalla varsin hyvän kuvan.



Kuva 3. MARV:n laitoksen maastokoealojen lukumäärä ja puulajisuhteet tilavuusluokittain.

Satelliittikuvien rooli tässä tutkimuksessa oli kahdenlainen. Ensinnäkin metsälaskelman aineistona käytettyjen maastokoealojen valintaa pystyttiin satelliittikuvien avulla optimoimaan. Maastoaineisto jo sinällään kuvasi Sipoon metsiä edustavasti. Toisin sanoen satelliittikuvainformaation avulla voitiin jo ennen varsinaista inventointia parantaa käytettävän aineiston laatua ja lisätä sen käyttökelppoisuutta metsäsuunnitelman laadinnassa. Koska maastokoealojen lukumäärä hakkuulaskelman kannalta oli varsin vähäinen, oli aineiston edustavuus erityisen tärkeää.

MELA:aa varten tulee maastokoealoille antaa pinta-alapainot. Niiden määrittämiseen käytettiin SMI-ohjelmistoa. Kuten edellä mainittiin, erotettiin Sipoon metsistä seuraavat metsänkätöryhmät: luonnonsuojelu-, taajama-, maisema-, ulkoilu-, ranta- ja normaalit talousmetsät.

Tulosten laskennassa maastokoealojen mittaustiedot siirrettiin kaikille ensimmäisen vaiheen koealoille ositenumeron mukaan. Varsinaisten maastomuuttujien lisäksi kustakin ensimmäisen vaiheen koealasta tunnettiin sitä koskevat metsänkätöluokat, jotka oli määritetty edellä kuvatulla tavalla TOPOS-ohjelmistoa käyttäen. Kukin maastokoeala ikään kuin monistettiin ja jaettiin tarvittaviin rajoiteluokkiin satelliittikuva- ja karttainformaation perusteella. Kutakin metsänkätöluokkaa kuvattiin siis 349 maastokoealalla. TOPOS:n pisteoperaatioissa generoidut pisteet vastasivat koordinaateiltaan SMI-ohjelmistossa käytettyjen ensimmäisen vaiheen koealojen verkostoa.

Maastovektorin edustama pinta-ala voidaan tulostaa ositteittain SMI-ohjelmiston RESULT-ohjelmassa. Ositteeseen h kuuluvan maastokoealan edustama Pinta-ala p_{mh} lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$P_{mh} = (w_h * A) / m_h, \text{ missä}$$

w_h = ositteen h osuus inventoitavalla alueella eli $W_h = n_h / \sum n_h$

n_h = ensimmäisen vaiheen koealojen lukumäärä ositteessa h ko. alueella

A = inventoitavan alueen pinta-ala

m_h = maastokoealojen lukumäärä ositteessa h

Maastokoealat jaettiin rajoiteluokittain ja kyläryhmittäin useaksi tiedostoksi. Kunkin metsäluokan ja kyläryhmän maastokoealojen pinta-alapainot laskettiin erikseen. Tuloksena saatiin rajoiteluokittaiset kylä- ja kuntatason painokerrointiedostot. Kullekin osa-alueelle - koko kunnalle ja kuudelle kylälle - saatiin 7 erilaista painokerrointiedostoa. Perustiedostossa kaikki maastokoealat kuuluivat talousmetsäluokkaan; lopuissa 6 tiedostossa olivat rajoiteluokittaiset (puuntuotanto-, suojelu-, taajama-, maisema-, ulkoilu- ja rantametsät) pinta-alapainot.

Taulukossa 1 on esitetty kylittäin kunkin rajoiteluokan pinta-alat hehtaareina. Pinta-aloissa on mukana metsä-, kitu- ja joutomaa.

Taulukko 1. Metsäluokkien pinta-alat, hehtaaria.

KYLÄ	PUU	SUO	TAA	MAI	ULK	RAN	YHT.
BOXBY	2242	295	9	102	200	34	2883
GÄSTERBY	2507	208	166	81	848	7	3512
MIKKILÄ	2160	7	229	109	237	0	2742
ÖSTERSUND	1147	31	184	103	37	47	1549
HINDSBY	2885	454	0	511	1144	15	5009
PAIPPINEN	3154	205	0	264	285	7	3915
SIPOO YHT.	14095	1200	588	1170	2448	10	19611
%	71.9	6.1	3.0	6.0	12.5	0.6	100 %

Pinta-alapainojen määrittämisen jälkeen voitiin laskea rajoiteluokittain erilaisia keskitunnuksia. Taulukoissa 2 ja 3 esitetään esimerkkinä eräitä tunnuksia Östersundomin alueelta ja koko kunnasta. Taulukoista voidaan todeta, ettei rajoiteluokkien välillä ole suuria eroja.

Taulukko 2. Maastokoealojen keskitunnuksia Östersundomin kyläryhmästä.

ÖSTERSUNDOM, maastokoealoja 336 kpl

raj. lk	k-ikä v.	ppa m ² /ha	k-lpm cm	k-pit m	k-til	mä m ³ /ha	ku	lepu
puunt.	63.4	17.3	19.5	14.7	145.3	40.7	74.2	30.4
suoj.	69.0	18.8	21.1	15.8	162.0	43.2	85.2	33.5
taaj.	64.3	17.3	19.9	14.8	143.9	42.4	72.5	29.0
mais.	63.2	16.9	19.4	14.5	139.6	41.1	67.0	31.4
ulk.	57.8	14.0	17.6	12.9	110.2	34.2	51.6	24.3
rantam.	64.4	18.2	20.0	14.9	154.4	37.0	87.2	30.2

ÖSTERSUNDOM, % pinta-alasta

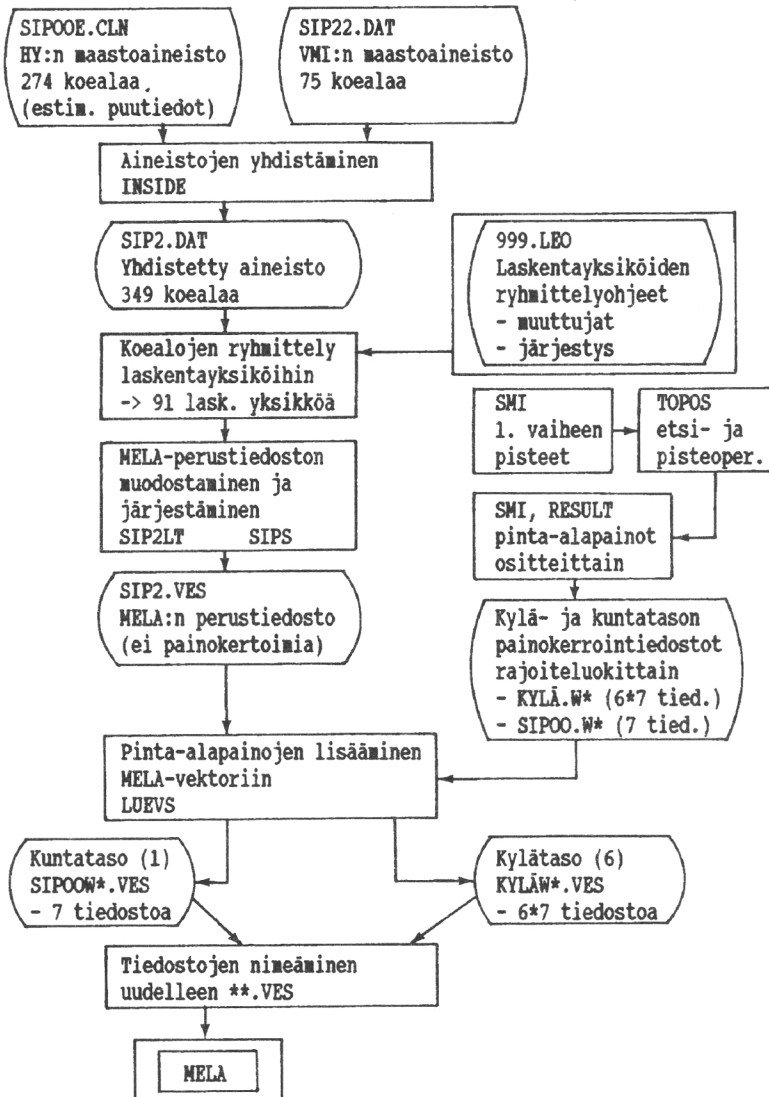
	verolk.						mets.laatu			
	IA	IB	II	III	IV	J	HY	TY	VÄ	VAJ
puunt.	17	33	23	9	14	5	53	33	6	7
suoj.	16	35	21	9	14	8	55	34	4	7
taaj.	17	32	22	11	14	4	55	32	6	7
mais.	18	31	21	10	16	4	53	34	7	7
ulk.	20	26	24	12	14	3	48	31	7	13
rantam.	22	33	19	9	12	5	50	40	5	5

Taulukko 3. Rajoiteluokittaiset pinta-alaosuuksilla painotetut keskitunnukset (koko kunta).

	k-ikä v.	k-til	mä m ³ /ha	ku	lepu
puunt.	63.4	164.7	36.6	95.6	32.5
suoj.	61.6	152.7	36.5	85.1	31.1
taaj.	63.5	157.8	39.2	87.2	31.4
mais.	63.4	162.1	37.8	91.2	33.1
ulk.	65.2	172.7	37.8	100.6	34.3
rantam.	65.3	165.2	38.2	96.3	30.7

Hakkuulaskelmien laadinta

Varsinainen metsäsuunnitelma laadittiin MELA-ohjelmiston avulla. Ennen pinta-alapainojen liittämistä maastovektoriin ryhmitettiin VMI-muodossa olevat koealat kaikkiaan 9 laskentayksikköön ja ajettiin tarvittavat ohjelmat MELA:n syöttötiedoston laskemiseksi (Kuva 4).



Kuva 4. Maastoaineistojen valmistaminen MELA:aa varten.

MELA:n toiminnot voidaan jakaa kahteen pääryhmään: tuotantovaihtoehtojen simulointiin ja halutun tuotanto-ohjelman valintaan lineaarista optimointia käyttäen.

Simulointivaihe

Simulointikaudeksi valittiin 30 vuotta. Simuloinnissa tutkimusaineistoa oli tarkoitus käsitellä kolmella tavalla. Ensin koko metsäalaa pidettiin normaalina talousmetsänä, jolle toimenpidevaihtoehdot simuloitiin. Metsätutkimuslaitoksessa käytettävien simulointiohjeiden mukaisesti. Toisessa menettelytavassa metsäalueita käsiteltiin metsäluokittain, joille käsittelyvaihtoehdot simuloitiin kullekin erikseen omien simulointiohjeidensa mukaisesti. Simuloinnin päättelysääntöjä muutettiin erityisesti uudistus- ja harvennushakkuiden osalta. Metsien kiertoaikoja pidennettiin oleellisesti varsinkin taajamametsissä. Kolmannessa menettelyssä koealoja on tarkoitus käsitellä edelleen erityisluokittain, mutta käsittelyvaihtoehdot simuloidaan kuitenkin kaikille luokille puuntuotantometsien simulointiohjeiden mukaisesti.

Optimointivaihe

Simuloinnin jälkeen käsittelyvaihtoehdoista valitaan annetun tavoitteen ja rajoitteiden suhteen paras yhdistelmä lineaarisella optimoinnilla. Koska MELA:ssa ei toistaiseksi voida antaa ositteittaisia (tässä metsäluokittaisia) rajoitteita ja tavoitteita, laadittiin kullekin metsänkäyttöluokalle oma "tuotanto-ohjelmansa". Näiden tuotanto-ohjelmien yhdistelmistä koottiin koko kuntaa koskeva hakkuulaskelma, jossa siis monikäytöstä aiheutuvat toimenpiderajoitukset ovat mukana. Perusohjelmassa koko metsäalaa käsiteltiin talousmetsien tavoin ilman erityisiä rajoitteita. Kolmannessa menettelytavassa em. simuloitua vaihtoehtotiedostoa yhdistettiin optimointitehtävää varten. Näin meneteltäessä ei voida antaa ositteittaisia rajoitteita. Jatkossa on edelleen tarkoitus laatia kullekin metsäluokalle talousmetsiä vastaava puuntuotanto-ohjelma. Tavoitteena on selvittää kunkin luokan vaikutus puuntuotannon määrään ja laatuun em. menettelyitä keskenään vertaamalla. Kaikissa optimointitehtävissä oli tavoitemuuttujana nettotulojen nykyarvo, jota pyrittiin maksimoimaan. Seuraavissa kappaleissa on lyhyesti kuvattu hakkuuohjelmien yleispiirteet kussakin metsäluokassa.

Puuntuotantometsät (ohjelmat N0, A0, A1, A2, A3)

Sipoon metsät ovat iäkkäitä ja kuusivaltaisia ja monin paikoin pahasti juurikäävän lahottamia. Hakkuumahdollisuuksia on jätetty paljolti käyttämättä, ja kunnassa onkin huomattavasti kiireellisiä uudistus- ja harvennushakkuukohteita. Tämän vuoksi talousmetsien hakkuiden tulisi olla suunnittelukauden alussa varsin voimakkaita. Tavoitteeksi otettiin puustopääoman alentaminen ja metsien nuorentaminen.

Suojelumetsät (ohjelma S0)

Kaikki luonnonsuojelumetsät jätettiin lepotilaan.

Taajamametsät (ohjelmat T1, T2, T3)

Taajamametsissä rajoitettiin avohakkuiden alaa voimakkaasti ja vastaavasti luontaista uudistamista suosittiin. Harvennushakkuiden osuutta hakkuualasta pyrittiin lisäämään. Koivun osuuden säilyminen puuston tilavuudesta varmistettiin rajoituksin. Keskimääräinen puustopääoma pidettiin suurempana kuin talousmetsissä.

Maisemametsät (ohjelmat M1, M2)

Maisemametsissä rajoitukset olivat taajamametsiä huomattavasti lievemmat. Uudistamisalaa ja erityisesti avohakkuiden määrää rajoitettiin.

Ulkoilumetsät (ohjelmat U1, U2)

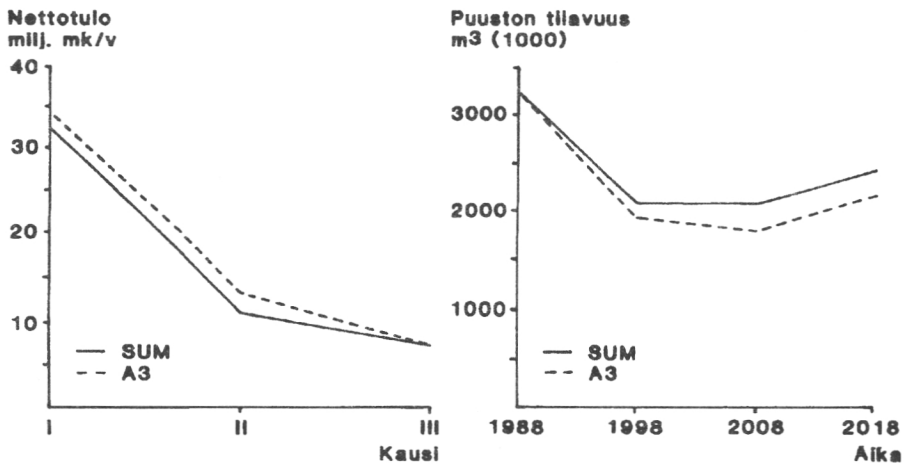
Ulkoilumetsissä puuntuotannon rajoitukset olivat varsin voimakkaat. Varsinkin avohakkuualaa rajoitettiin huomattavasti. Vanhoja metsiä säilytettiin suhteellisen paljon, mutta samalla turvattiin monipuolinen ikäluokkakajakauma lisäämällä nuorten metsien osuutta.

Rantametsät (ohjelmat R1, R2)

Rantametsissä rajoitettiin selvimmin avohakkuualaa ja lannoitusta. Harvennushakkuiden määrä pidettiin mahdollisimman korkeana. Hakkuuohjelmassa ei ole vaadittu tulojen tasaisuutta eri kymmenvuotiskausina. Hakkuuohjelmien vaihtoehtojen yksityiskohtaiset tulosteet ovat tarvittaessa saatavissa julkaisusta: Kähkönen, V. & Härmä, P. 1989. Korostettakoon, että tämä ohjelma ei ole optimoinnin tulos vaan kuuden eri optimointiohjelman summa. Tuloksista voidaan todeta, mikä on ollut erityisalueiden vaikutus puuntuotannon edellytyksiin koko kunnan tasolla. Nettotulojen ja tilavuuden kehittyminen on esitetty myös kuvassa 5. Kuvassa 6 on esitetty rajoiteluokittain puuston keskitilavuuden kehittyminen 30 vuoden suunnittelukaudella.

Nettotulot jäävät yhdistelmäohjelmassa hieman alhaisemmiksi kuin ”puhtaassa” puuntuotanto-ohjelmassa. 30 vuoden yhteenlasketut nettotulot ovat ”monikäyttöohjelmassa” 92,4 % puhtaan puuntuotanto-ohjelman nettotuloista. Varsinaisia talousmetsiä on Sipoon metsäalasta 72 % ja muita metsäluokkia loput 28 %. Mikäli koko metsäalalla noudatettaisiin erityisluokkien edellyttämiä puuntuotannon rajoituksia, pienensivät nettotulot 27 % puhtaasta puuntuotantovaihtoehdosta. Nettotulojen väliset erot olisivat vieläkin suuremmat, mikäli MELA:n kustannusmalleissa olisivat mukana esim. taajama- ja ulkoilmametsien hoidon intensiivisyydestä - esimerkiksi hakkuutähteiden poistosta - aiheutuvat lisäkustannukset. Luonnonpoistumamallit eivät myöskään antane täysin luotettavia tuloksia erityisesti luonnonsuojelumetsissä. Samoin lahovikaisuuden vaikutus puuston todelliseen arvoon jää vaille huomiota.

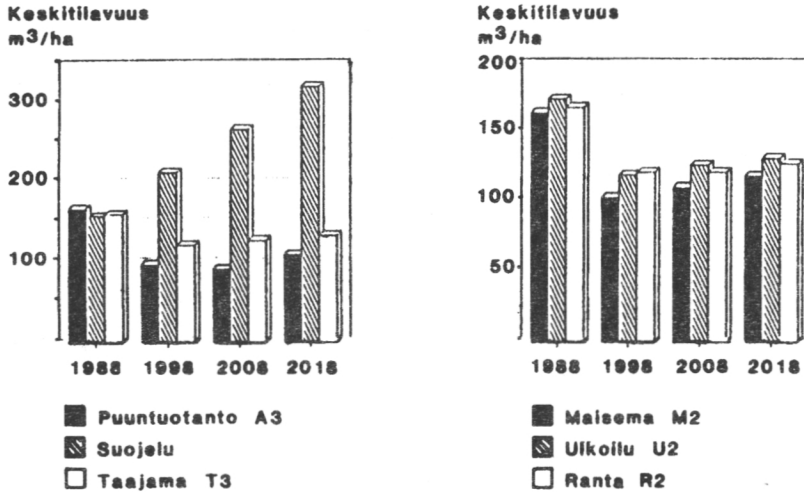
MONIKÄYTTÖ/PUUNTUOTANTO



Kuva 5. Nettotulojen ja tilavuuden kehittyminen puuntuotanto-ohjelmassa A3 sekä monikäyttöohjelmassa (erityisluokkien yhdistetty ohjelma) SUM.

Kausi I: 1988-1998, kausi II: 1998-2008, kausi III: 2008-2018.

METSÄLUOKAT



Kuva 6. Puuston keskitilavuudet rajoiteluokittain laadituissa käsittelyohjelmissä.

Hakkuumäärät ovat puhtaassa puuntuotanto-ohjelmassa monikäyttövaihtoehtoa hieman suuremmat. Hakkuut ovat kuitenkin myös jälkimmäisessä ohjelmassa varsin voimakkaat. Uusia tuotantovaihtoehtoja voidaan tarvittaessa laskea rajoitteita muuttamalla ja haluttaessa myöskin kyläryhmittäin.

Lopuksi

Metsälaskelman antamia tuloksia on tarkasteltava lähinnä suuntaa-antavina. Hakkuulaskelma toimii normatiivisen ja strategisen suunnittelun pohjana, kun taas operatiivisia, kuviotasolle kohdennettuja toimenpiteitä suunniteltaessa on kunkin kohteen erityispiirteet otettava huomioon yksityiskohtia myöten. Tutkimuksen tuloksia ei pitäisi tulkita absoluuttisina, koska eri työvaiheissa - esim. simuloinnin ohjeissa ja optimointitehtävän laadinnassa - on useita vaihtoehtoisia menettelytapoja. Sen sijaan erilaisia ratkaisuja voidaan keskenään verrata toisiinsa.

Koska MELA-ohjelmisto on laadittu lähinnä puuntuotannon suunnittelun apuvälineeksi, on siinä tämän työn kaltaisissa erityistarkoituksissa havaittavissa selviä puutteita. Toisaalta kartta- ja satelliitti-informaation käyttäminen metsätalouden ja monikäytön suunnittelussa antaa tutkimukselle menetelmällistäkin kiinnostavuutta. Metsätalouden suunnittelu vaatii tuekseen riittävän tarkkoja malleja tulevaisuuden puuntuotantomahdollisuuksien arvioimiseksi ja erilaisten käsittelyvaihtoehtojen vaikutusten selvittämiseksi. Kasvu- ja tuotosmallien kehittämistä tarvitaan - myös MELA:aa varten.

Monet toimenpiteet toteutetaan MELA:ssa varsin kaavamaisesti. Esim. harvennushakkuuta ei MELA:ssa toistaiseksi voida kohdistaa puulajeittain, vaan harventaminen tapahtuu aina kunkin metsikön vallitsevaa puulajia suosien. Siksi ei esimerkiksi lehtipuita suosivia harvennusvaihtoehtoja voitu simuloida erityisluokkien metsille. Toisaalta lehtipuiden kokonaismäärään voidaan vaikuttaa optimointitehtävän yhteydessä.

Lähteet

Härmä, P. 1988. Forest inventory with the SMI-workstation. Application of the system at the University of Helsinki. Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteen laitoksen tiedonantoja n:o 21.

Härmä, P. 1989. SMI-työaseman metsätunnusten laskennan käyttöohjeet. Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteenlaitos. Moniste 43 s.

Kähkönen, V. & Härmä, P. 1989. Sipoon metsien tutkimus ja seuranta. Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteen laitos. 28 s. + kyläkohtaiset raportit.

Pekkonen, T. 1989. TOPOS-karttajärjestelmä. Käyttäjän käsikirja. Moniste. Helsinki 17.5.1989.

Poso, S. , Paananen, R. ja Similä, M. 1987. Forest inventory by compartments using satellite imagery. Silva Fennica 21(1): 69-74.

KOEALAT METSÄTALOUDEN SUUNNITTELUSSA

Mark-Leo Waite

Johdanto

Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteen laitoksella on viime vuosina pyritty kehittämään koealoittaiseen tietoon perustuvaa metsätalouden suunnittelujärjestelmää. Järjestelmän kehittämisen päämääränä on parantaa metsätalouden suunnittelun laatua hyödyntämällä nykyisiä tietojen hankintaan ja käsittelyyn kehitettyjä välineitä ja menetelmiä. Tässä artikkelissa kuvataan koealoihin perustuvien suunnittelujärjestelmien yleisiä ominaisuuksia sekä sitä, miten koealakohtaista tietoa voidaan hyödyntää metsätalouden suunnittelussa.

Metsätalouden suunnittelu

Metsätalouden suunnittelulla pyritään ratkaisemaan metsän käyttöön liittyviä ongelmia. Suunnittelu kohdistuu useimmiten tiettyyn yhtenäiseen tai epäyhtenäiseen maantieteelliseen alueeseen. Alue jaetaan usein suunnittelun kannalta tarkoituksenmukaisiin yksiköihin. Suunnitteluyksiköiden luku, koko ja muoto vaihtelevat lähinnä suunnitteluongelman mukaan. Sama alue voidaan jakaa yksiköihin usealla eri tavalla. Yksiköiden rajat noudattavat usein luonnollisia rajoja. Niitä voidaan ryhmittää suuremmiksi tai pilkkoa pienemmiksi yksiköiksi. Yksiköiden rajat saattavat muuttua ajan mukana. Suunnitteluongelman ratkaisemiseksi jokaiselle suunnitteluyksikölle pyritään estimoimaan ongelman kannalta relevanttia suunnittelutietoa. Suunnittelutiedon kokonaismäärä on usein hyvin suuri. Toisaalta tietyn ongelman ratkaisemiseksi tarvittava tietomäärä voi olla hyvinkin pieni. Suunnitteluongelmat vaihtelevat suuresti. Useimmat liittyvät kuitenkin seuraavankaltaisiin kysymyksiin:

- A. Mitkä ovat suunnitteluyksikön tietyt suunnittelutiedot,
- B. Mitkä suunnitteluyksiköt täyttävät annetut ehdot ja
- C. Mikä on suunnitteluyksikön optimaalinen käyttöohjelma.

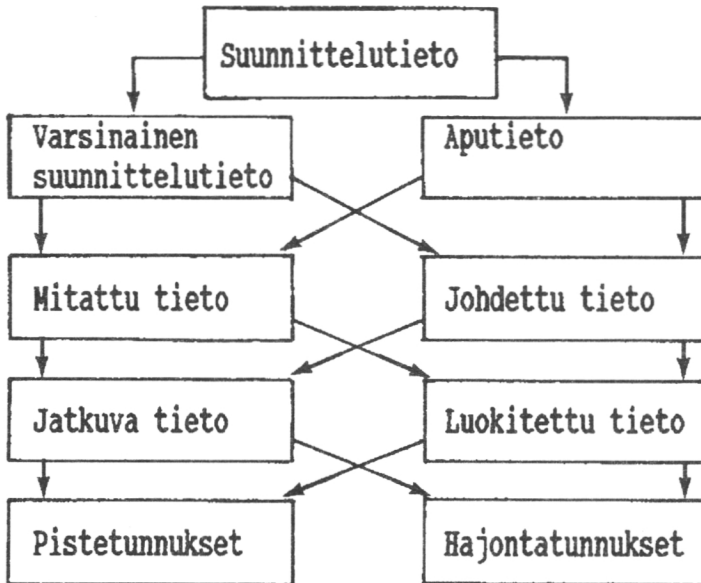
Suunnittelutiedot

Suunnittelutieto kuvaa suunnitteluyksikön määrättyä ominaisuutta tiettyinä ajankohtana. Kaikki suunnittelutieto voidaan siis paikallistaa sekä maantieteellisesti että ajallisesti. Tieto on pääosin joko jatkuvaa tai luokitettua. Jatkuva tieto on useimmiten positiivista kokonaislukutietoa. Luokitettussa tiedossa luokkien lukumäärä vaihtelee useimmiten 5 - 15. Tieto kuvaa suunnitteluyksikön tilaa tai tilan muutosta.

Tieto voidaan jakaa varsinaiseen suunnittelutietoon ja aputietoon. Varsinaista suunnittelutietoa käytetään ongelmien ratkaisemiseen ja aputietoa varsinaisten suunnittelutietojen estimoimiseen. Suunnitteluongelmasta riippuen jokin tieto on joko varsinaista suunnittelutietoa tai aputietoa.

Tiedot saadaan joko mittauksin tai johtamalla. Tiedon mittaukset vaihtelevat mitattavan tunnuksen, koealatyyppin sekä mittausvälineiden ja -menetelmien suhteen. Johdetut tiedot estimoidaan mitattujen tietojen ja muiden johdettujen tietojen avulla. Yleisin estimointimenetelmä on regressioanalyysi. Johdetun tiedon määrä on usein tuntuvasti suurempi kuin mitatun tiedon määrä. Johdettu tieto on suunnittelun kannalta usein myös tärkeämpää kuin mitattu tieto.

Kustakin suunnittelumuuttujasta voidaan estimoida sekä piste- että hajontatunnuksia. Jatkuvien muuttujien pistetunnuksia ovat keskiarvo, mediaani, minimi sekä maksimi ja hajontatunnuksia keskihajonta ja keskiarvon keskivirhe. Luokitettujen muuttujien pistetunnuksia ovat puolestaan moodi, mediaani, minimi sekä maksimi ja hajontatunnuksia moodiluokan keskihajonta. Hajontatunnuksilla voidaan kuvata, miten luotettavasti pistetunnukset on estimoitu.



Kuva 1. Suunnittelutiedon komponentit ja niiden väliset vuorovaikutussuhteet.

Koeala

Oletetaan, että suunniteltava alue on kokonaan jaettu samankokoisiin ja -muotoisiin perusyksiköihin. Perusyksiköt ovat kooltaan niin pieniä, että niiltä voidaan estimoida suunnittelutunnukset suhteellisen luotettavasti ja toisaalta niin suuria, että metsässä esiintyvä satunnaisvaihtelu ei niissä suuremmin vaikuta. Vaikka perusyksiköiden rajat eivät ole luonnollisia, ne ovat suunnittelutunnuksen kannalta usein varsin homogeenisia. Perusyksikön puuston kehitys riippuu pääosin yksikön sisäisistä ominaisuuksista.

Koeala voidaan nyt määritellä perusyksiköksi, jonka suunnittelutunnukset on estimoitu tai tullaan estimoimaan.

Koeala voi olla joko tilapäinen tai pysyvä. Pysyvien koealojen suunnittelutiedot estimoidaan useammalta ja tilapäisten puolestaan yhdeltä ajankohdalta. Pysyviä koealoja käytetään luotettavien muutostietojen hankkimiseen.

Koealojen luku on usein varsin pieni suhteessa perusyksiköiden lukuun. Koealat voidaan valita perusyksiköiden joukosta monin eri tavoin. Keskeistä kuitenkin on, että koealat muodostavat otoksen kaikista perusyksiköistä. Koealajoukko on otos, mikäli koealojen valinnassa kaikilla perusyksiköillä $p > 0$ (p = perusyksikön todennäköisyys tulla valituksi).

Yleisimmät metsätalouden otantamenetelmät ovat systemaattinen otanta ja systemaattinen ryväotanta. Muita mahdollisia menetelmiä on ositettu otanta. Mikäli osa koealoista on pysyviä, estimointia voidaan tehostaa erityisten CFI - estimaattoreiden avulla (CFI = Continuous Forest Inventory). Nämä hyödyntävät peräkkäisten mittaustietojen välistä korrelaatiota.

Koealajärjestelmät

Yleistä

Koealajärjestelmä on systeemi, jolla suunnittelija hallitsee koealakohtaisia tietoja. Nykyisin ne ovat poikkeuksetta tietokonejärjestelmiä. Järjestelmissä voidaan kiinnittää huomiota mm. mittausohjeeseen, syöttötietoihin, mittaustietojen tarkistamiseen ja editointiin, mittaustietojen jatkokäsittelyyn, tiedon esittämiseen sekä tiedon siirtoon.

Mittausohje

Mittausohje sisältää luettelon koealoilla mitattavista muuttujista, muuttujien määrittelyt sekä ohjeet muuttujien mittaamiseksi. Suomessa on tällä hetkellä käytössä useita toisistaan poikkeavia ohjeistoja, mikä on osaltaan vaikeuttanut mm. tutkimustulosten soveltamista käytännön suunnitteluun.

Syöttötiedot

Koealajärjestelmät käyttävät kolmentyyppistä syöttötietoa: mitattua tietoa, mallitietoa sekä parametritietoa.

Mitattu tieto on joko puu- tai koealakohtaista. Koealakohtainen tieto voidaan ryhmitellä mm. seuraavalla tavalla:

- A. Yleistiedot (esim. koealan koko ja muoto),
- B. Tunnistetiedot (esim. koealan numero, koordinaatit ja mittausajankohta),
- C. Kasvupaikkatiedot (esim. ravinteisuustaso, kuivatusaste, kivisyys metsänviljelyn kannalta),
- D. Puustotiedot (esim. kehitysluokka, puulajiryhmittäiset pohjapinta-alat),
- E. Monikäyttötiedot (esim. marjantuottokyky, maisema-arvo),
- F. Toimenpide-ehdotukset (esim. toimenpiteen laatu ja kiireellisyys) sekä
- G. Tapahdumatiedot (esim. tapahduman laatu ja ajankohta).

Regressiomalleissa on eduksi, jos mallien syöttötiedot ovat jatkuvia. Luokitetun tiedon osuus mittaustiedoista on kuitenkin nykyisin jatkuvan osuutta selvästi suurempi. Tämä on osaltaan johtanut siihen, että nykyisin käytettävät mallit ovat tarpeettoman sekavia ja monimutkaisia. Todennäköistä kuitenkin on, että mallien tehokkuuden takia niiden käyttö suunnittelutiedon estimoimiseen tulee jatkuvasti lisääntymään.

Eräissä malleissa voi esiintyä parametreja, joiden arvoja voidaan muuttaa suunnittelutilanteen mukaan. Esimerkkejä tällaisista parametritiedoista ovat tukki- ja kuitupuun minimilatuläpimitat ja yksikköhinnat.

Mittaustietojen tarkistaminen ja editointi

Tiedon tarkistamisessa voidaan ensiksikin selvittää, onko kunkin muuttujan arvo sallittu tai todennäköinen. Toiseksi voidaan tarkistaa, ovatko kahden tai useamman muuttujan arvot keskenään loogisia.

Jotta mitattujen tietojen luotettavuus paranisi, ne tulisi tarkistaa ja editoida jo mittaushetkellä. Tähän päästään taltioimalla tieto maastossa käsiteltäviin tietokoneisiin.

Mittaustietojen jatkokäsittely

Mittaustiedon jatkokäsittely voi koostua esim. johdetun tiedon tuottamisesta, johdetun tiedon kalibroimisesta sekä mittaustiedon automaattisesta päivittämisestä.

Johdettu tieto tuotetaan mittaustiedoista ja muusta johdetusta tiedosta malleilla. Puun puutavaralajeittaiset tilavuudet ovat hyvä esimerkki johdetusta tiedosta. Johdetulla tiedolla voidaan tehostaa ja joskus jopa tarkentaa suunnittelutunnusten estimointia. Johdettujen tunnusten laajempaa käyttöä estää nykyisin lähinnä käyttökelpoisten mallien puute.

Johdetussa tiedossa saattaa esiintyä harhaa esim. alueellisten erikoispiirteiden johdosta. Tätä harhaa voidaan poistaa kalibroimalla tietoa mitatulla tiedolla. Tiedon kalibroiminen on siten varsin keskeinen toiminto johdetun tiedon käyttökelpoisuuden kannalta. Mahdollisia kalibrointimenetelmiä on useita. Ensinnäkin voidaan laskea mallikohtainen korjauskerroin tai laatia regressioyhtälö, jonka selitettävänä muuttujana on korjauskerroin. Toinen tapa on tilastotieteellisin menetelmin korjata suoraan mallin kertoimia.

Koealatiedot muuttuvat ajassa vähittäisten ja äkillisten muutosten johdosta. Vähittäisiä muutoksia ovat esim. puuston kasvu ja äkillisiä muutoksia puolestaan puuston hakkuut. Äkillisten tapahtumien identifiointi voi perustua tapahtumarekistereihin, metsänkäsittelyohjeisiin tai alueellisiin tapahtumatodennäköisyyksiin. Kun äkillisten tapahtumien laatu ja ajankohta tunnetaan, koealan tiedot voidaan periaatteessa päivittää haluttuun ajankohtaan vähittäisten ja äkillisten muutosmallien avulla. Tällä hetkellä tällaisia malleja ei kuitenkaan ole tai niiden luotettavuutta ei tunneta. Koealatiетоjen päivittäminen on siten toistaiseksi pitkälti ratkaisematon ongelma.

Tiedon esittäminen

Kaikki suunnittelutieto voidaan esittää joko teksteinä tai grafiikkana. Graafinen esitys jaetaan edelleen karttoihin sekä tilastolliseen grafiikkaan. Kartat voivat olla joko kaksi- tai kolmiulotteisia. Tilastollisella grafiikalla tarkoitetaan tässä pylväikköjä, piirakoita, pistediagrammeja jne. Tiedot on mahdollista tulostaa näytölle, tiedostoon tai kirjoittimelle. Tulostettava tieto saattaa koskea joko yhtä

tai useampaa koealaa. Suunnitteluongelman ratkaisemisen kannalta saattaa olla tärkeää, että suunnittelija voi itse määrätä mitä, millä tavalla ja mihin tietoa tulostetaan.

Tiedon siirto

Mitattua tai johdettua tietoa on joskus tarpeen siirtää muihin järjestelmiin jatkokäsittelyä varten. Ulkopuolinen järjestelmä voi olla esim. jokin tilasto-, taulukkolaskenta- tai operaatioanalyysijärjestelmä. Tieto siirretään joko teksti- tai binääritiedostoina. Tietyn koealan arvot sijoitetaan tiedostoon siten, että kukin arvo on omalla rivillään tai kaikki arvot ovat samalla rivillä. Suunnittelijan tulisi itse pystyä määrittämään mitä ja missä muodossa tietoa siirretään. Tiedon siirtoa helpottaisi suuresti yhtenäinen tiedonsiirtostandardi.

Koealojen käyttö metsätalouden suunnittelussa

Koealoihin perustuvassa suunnittelussa varsinaisten suunnitteluyksiköiden tunnuksat estimoidaan koealakohtaisten tunnusten ja otosestimattoreiden avulla. Käytettävät estimaattorit riippuvat käytetystä otantamenetelmästä.

Jotta tietyn suunnitteluüksikön tunnusten estimointi olisi luotettavaa, siinä tulisi sijaita riittävästi koealoja. Tarvittava koealamäärä on sitä suurempi, mitä suurempi suunnitteluüksikön pinta-ala on, mitä suurempi tunnuksen vaihtelu on, mitä suurempia koealoittaiset varianssit ovat ja mitä korkeampia tarkkuusvaatimukset ovat. Käytännössä tarvittava koealamäärä suunnitteluüksikköä kohden vaihtelee esim. 5 - 1000.

Maastossa mitattuja koealoja on harvoin riittävä määrä. Siksi joudutaan valitsemaan suhteellisen tiheä otos lisäkoealoja. Niiltä mitataan aputietoa, jolle on tunnusomaista, että se korreloi hyvin varsinaisten suunnittelutunnusten kanssa ja että sen hankinta on suhteellisen edullista. Käyttökelpoisia aputietolähteitä ovat esim. satelliittikuvatieto (eri aallonpituusalueiden säteilyarvot) ja peruskarttatieto (korkeus merenpinnasta, maalaji ja maankäyttöluokka). Lisäkoealoille estimoidaan varsinaista suunnittelutietoa aputiedon sekä regressioon tai osituksen avulla. Näin voidaan estimoida mielivaltaiselle koealajoukolle tarvittavat suunnittelutiedot. Estimaattien luotettavuus riippuu pitkälti käytetyn aputiedon määrästä ja laadusta.

Päätelmät

Koealoihin perustuvassa metsätalouden suunnittelussa koealojen lukumäärä ja säilytettävän mittauksien määrä on suhteellisen pieni ja tiedon päivitys suhteellisen vaikeaa. Muutokset suunnitteluüksiköiden rajoissa eivät myöskään aiheuta suuria ongelmia. Koska koealajärjestelmät perustuvat otantaan, ne ovat tehokkaita ja niiden tuottama tieto on monipuolista ja harhatonta. Toisaalta niiden tuottama tieto on pienialaisissa suunnitteluüksiköissä vielä nykyisin epäluotettavaa. Tilanne muuttunee lähitulevaisuudessa uusien aputietolähteiden myötä.

Voidaan siis päätellä, että mikäli metsätalouden suunnittelun laatua ja tehokkuutta halutaan nykyisestä parantaa, koealoihin perustuvat järjestelmät saattaisivat tarjota siihen keinon. Toinen keino on pyrkiä nykyistä laajempaan standardointiin mm. muuttujamäärityksessä ja tiedon siirrossä.

KASVUN MALLITTAMISEN TARVE

Juhani Pyykkönen

Metsien teollinen käyttö perustuu yhteyttämiseen, solujen jakaantumiseen, syntymiseen ja kuolemiseen, kasvuun. Metsätaloudessa tarvitaan tietoa sekä yksittäisen puun ja sen osien, solujen, solukimppujen, kuitujen kasvusta että tietyn alueen, esimerkiksi metsikön, kunnan, Euroopan, puuston kasvusta erilaisissa olosuhteissa. Kasvutietoa tarvitaan menneiltä ajoilta, tältä hetkeltä ja ennenkaikkea tulevaisuudesta.

Kansainvälistynyt metsäteollisuus etsii sekä Suomesta että ympäri maailmaa alueita, joiden puuvarojen ja kasvun varaan voisi rakentaa puunjalostusta, sellu- ja paperitehtaita ja sahoja. Uusiutuvien luonnonvarojen kasvutiedoilla on laajoilla alueilla kysyntää.

Uhkatekijänä luonnonvarojen käytössä on kuitenkin metsien terveyden pettäminen, aiheuttajana niin maan ja ilman saastuminen, kasvihuoneilmiö kuin ilmaston jyrkät lyhytaikaiset vaihtelutkin. Stressitekijät ovat sekoittuneet vyyhdeksi, jonka vaikutuksista esimerkiksi hakkuumahdollisuuksien muutoksiin tulevana vuosikymmeninä ei ole kuvaa. Puuston ja kasvun reagointi mainittuihin muutoksiin tulee selvittää ja mallittaa, jotta **todennäköinen** tulevaisuuden kehityskulku hahmottuisi selvemmin. Pelkkä inventoinnein selvitetty metsien nykytila - hyvä tai huono - ei riitä, vaan tulevaisuudesta ja eri toimenpiteiden vaikutuksesta siihen tarvitaan ennusteita päätöksenteon tueksi.

Pitkän aikavälin puuntuotantomahdollisuuksia selvitetessä MELA-metsälaskelman kaltainen ohjelmisto on osoittanut käyttökelpoisuutensa. Laajaa kokonaisuutta, vuorovaikutussuhteita, uusien tutkimustulosten vaikutuksia ja laskennan tulosten, toimenpiteiden kohdistamista metsikkökuvioille tai koealoille ei muulla laskentamenetelmällä hallita. Vaikka laskelman oleellisimmassa osassa, kasvumalleissa onkin puutteita, niin suunnittelun taso ja puun kasvuprosessin ymmärrys biologiselta ja taloudelliselta kannalta katsoen on lisääntynyt. Suurimmat edut on saavutettu sillä, että laskelmasa on koottu tutkimustuloksia yhteen muodossa, jossa niiden vaikutusta voidaan tarkastella yhtäaikaisesti.

Kasvumalleja tarvitaan myös metsänhoito-ohjeiden laadinnassa. Ohjeiden laadinta on tavoitteiden asettelua, rajoitteiden toteamista, kehityksen simulointia kasvumallien avulla, tulosten kritisointia ja vaihtoehdon valintaa. Tutkimustulosten odottaminen kenttäkokeista kymmeniä vuosia, jopa kiertoajan verran, ei riitä, vaan kasvumalleilla on pystyttävä simuloimaan puiden kehitystä eri olosuhteissa niin, että päätökset voidaan tehdä ajoissa. Käytettäkään kenttäkokeita ja mittauksia lisäämään jatkuvasti mallien luotettavuutta. Ratkaisu muunmuassa biologis-taloudellis-ekologiseen kiistaan jatkuvan kasvatuksen hyvydestä saattaisi löytyä nopeimmin tätä kautta.

KASVUMALLIEN PERUSTEET

Kari Mielikäinen

Yleistä

Kasvumalleilla pyritään kuvaamaan puun tai puujoukon todellista kasvua mahdollisimman hyvin. Mallit voidaan jakaa selitys- ja ennustemalleihin. Selitysmalleissa ollaan kiinnostuneita kasvuun vaikuttavista ilmiöistä. Selitysmallit vastaavat kysymyksiin "miten?" tai "miksi?". Ennustemallien tavoitteena on pystyä ennustamaan tiettyjen puiden tai puujoukkojen todellinen kasvu mahdollisimman tarkkaan. Tällöin tärkeintä on lopputulos eikä niinkään yksittäisten kasvutekijöiden erillisvaikutukset. Metsätalouden suunnittelussa kasvumallien pääasiallinen käyttöalue on ennustaminen. Ennustejakson pituus vaihtelee yhdestä vuodesta koko kiertoaikaan saakka.

Kasvu- ja tuotostaulukot

Yksinkertaisin varsinainen kasvumalli on kasvun iänmukaisen trendin tasoittaminen. Suomen ensimmäiset tuotostaulukot laati A.G. Blomqvist jo vuonna 1872. Nämä tilapäiskoeloihin perustuvat, tuotoksen syleinä tynnyrialaa kohti esittävät taulukot ovat osoittautuneet yllättävän tarkoiksi.

Sittemmin tuotostaulukoita on laadittu sekä luonnontilaisille että eri tavoin hakatuille, luontaisesti tai viljellen syntyneille männiköille, kuusikoille ja koivikoille. Eri-ikäisrakenteisille metsille ei ole toistaiseksi olemassa tuotossarjoja.

Perinteisissä tuotostaulukoissa puuston keskittunnusten kehitys on kuvattu ainoastaan iän funktiona. Tämä rajoittaa tulosten käyttöä talousmetsissä, joissa puuston käsittelyllä on merkitystä puustotunnuksiin. Huomattava parannus tähän on kasvun taulukoiminen vähintään kahden tunnuksen, tavallisimmin puuston iän ja tilavuuden suhteen.

Menetelmän ongelmia ovat moniulotteisten taulukoiden esittäminen ja havaintojen riittämättömyys. Esimerkkinä voisi olla kasvun taulukointi puuston iän, tilavuuden ja keskiläpimitan suhteen metsätyypeittäin. Jos jaamme iän kymmeneen, tilavuuden viiteentoista, keskiläpimitan viiteen ja metsätyypin kolmeen luokkaan, on luokkien kokonaismäärä $10 \times 15 \times 3$ eli 2250. Jotta jokaiseen luokkaan saataisiin esim. 4 havaintoa, tarvittaisiin 9000 havainnon aineisto. Tästä huolimatta osa taulukon luokista voisi jäädä tyhjiksi.

Regressioanalyysi

Tulomuotoinen kasvumalli

Regressioanalyysi tarjoaa keinon kasvuaineistojen tasoittamiseen. Malleissa, joita on laadittu maassamme 1960-luvun alkupuolelta lähtien, puun absoluuttista tai suhteellista kasvua selitetään

puu-, puusto- ja kasvupaikkamuuttujilla. Yleisimmin on käytetty tulomuotoista kasvumallia (Baule 1917, Jonsson 1980). Mallissa tulomuodossa olevat "kasvukertoimet" saadaan lineaariseen muotoon logaritmuunnoksella. Malli on logaritmuodossaan seuraavanlainen :

$$\log(I) = a + b * \log(x_1) + c * \log(x_2) + d * \log(x_3) + e$$

missä I = kasvu

x₁, x₂, x₃ = kasvua ennustavat muuttujat

a = vakio

b, c, d = kertoimia

e = satunnaiskomponentti, jonka odotusarvo on 0

Metsikön vai puun kasvumalli

Ensimmäisissä regressioanalyysillä laadituissa kasvumalleissa selitettiin puuston suhteellista tilavuuskasvua kasvupaikoittain metsikön keskitunnuksilla (Kuusela ja Kilkki 1963). Kasvuprosentin kehitys käännepisteettömänä eksponentiaalisesti laskevana käyränä oli helpointa mallittaa. Tärkeimmät selittäjät olivat puuston ikä ja tilavuus. Ensimmäisissä malleissa kasvu ilmaistiin kuorettomana; nykyään kaikki puustotunnukset ovat kuorellisia, jollei toisin mainita. Eniten käytettyjä puuston tilavuuskasvun malleja ovat Gustavsenin (1977) sekä Nyysösen ja Mielikäisen (1978) laatimat mallit.

Mallituksen aloitus metsikkötasolta oli luonnollista. saatiinhan malleilla puuston tilavuuskasvu taulukoitua kätevästi entistä useampien metsikkötunnusten funktiona. Mallit olivat käyttökelpoisia metsätalouden suunnittelussa, koska kasvuennusteet saatiin suoraan metsässä silmävaraisesti arvioidavien puustotunnusten perusteella ilman työläitä lisämittauksia. Puuston kasvumallin käytön suurin vaikeus oli kasvun jakaminen puutarvalajeihin. Puiden järeyden (runkolukusarjan) tunteminen on ensiarvoisen tärkeää taloudellisissa suunnittelulaskelmissa.

Puun kasvumallien uskottiin sopivan tutkimuskäyttöön lähinnä puittain mitattujen koealojen laskennassa tai kasvu- ja tuotostaulukoiden laadinnassa. Puukohtaisten kasvumallien laadinnan pioneeri maassamme on Yrjö Vuokila, joka vuosina 1965 ja 1967 julkaisi puun kasvumallit ja niihin perustuvat tuotostaulukot Etelä-Suomen hakkuin käsitellyille männiköille.

Tietojenkäsittelyn kehittyessä kasvun mallitus on siirtynyt entistä enemmän puukohtaiseen kasvun tarkasteluun. Näillä malleilla on mahdollista ennustaa entistä tarkemmin erilaisten metsänkäsittelyjen tuotosvaikutuksia. Myös menetelmiä, joista ei ole olemassa suoranaisia kokeita, voidaan ainakin jossakin määrin simuloida. Simulaattoreita on maailmalla tehty mm. taimikonhoidosta, ajourista, systemaattisista harvennuksista sekä eri-ikäisen metsän kasvatuksesta. Suomessa puukohtaisten simulaattorien käyttö on ollut toistaiseksi melko suppeaa (Siitonen 1983, Mielikäinen 1985, Pukkala 1988). Ainoa tällä hetkellä käytännön mitassa sovellettava simulaattori on Markku Siitosen kehittämä MELA, jota on käytetty metsätalouden pitkän ajan suunnittelulaskelmissa (esim. Metsä 2000).

Mahdollisimman suuren tarkkuuden saavuttaminen puuston käsittelyjen simuloinneissa edellyttää puiden tilajärjestyksen kartoittamista ja puumalleja, joissa lähiympäristön kilpailu on selittäjien joukossa. Kartoitustieto parantaa tuloksia keskimääräisellä (hehtaari-) tasolla melko vähän, mutta puukohtaisesti poikkeuksellisissa olosuhteissa kilpailumuuttujien merkitys kasvaa. Simulointien lähtöpuustot voidaan poimia olemassaolevista aineistoista tai ne generoidaan mittaustietojen perusteella tietokoneella.

Myös käytännön metsätalouden suunnittelu on siirtynyt laskelmissaan suurelta osin puun kasvumallien käyttöön. Tätä varten metsässä arvioitavien puustotunnusten perusteella ennustetaan aluksi puuston runkolukusarja. Kunkin läpimittaluokan kasvut ennustetaan tämän jälkeen puun kasvumallilla. Menetelmän suurin etu on se, että puuston puutavaralajikehitys voidaan arvioida vapaasti valittavia järeyskriteerejä käyttäen.

Regressiomallien ongelmia

Regressiomalli ei voi olla koskaan aineistoaan parempi. Suurimman ongelman kasvumallien laadinnassa muodostavat selittävien muuttujien väliset riippuvuudet eli multikollineaarisuus. Tuloksena tästä on se, että selittävät muuttujat "varastavat" vaikutuksia toisiltaan ja vääristävät näin mallin kertoimia. Ääritapauksissa muuttujien kertoimet voivat olla jopa etumerkiltään "väävät". Puuston määrä ja järeys muodostavat iän ja kasvupaikan kanssa joskus sellaisen vyyhden, että kasvupaikkamuuttujan kerroin saattaa olla negatiivinen. Metsä kasvaa tällöin mallin mukaan karulla kasvupaikalla paremmin kuin viljavalla. Yhtenä puutteena on niin ikään se, että analyysitapa keskiarvoistaa mallin ennusteita vähentäen näin kasvuissa esiintyvää luonnon vaihtelua.

Riippuvuudet vaikeuttavat erityisesti mallien käyttöä selitysmalleina. Tällöinhän kiinnostuksen kohteena olevan selittäjän vaikutusta pyritään analysoimaan pitämällä mallin muiden muuttujien arvot vakioina. Menetelmänä muuttujien selityskyvyn "kirkastamiseen" on esitetty mm. harjaestimointia (ridge regression). Harjaestimointi kuuluu ns. harhaisten estimointimenetelmien joukkoon. Tämä merkitsee sitä, että laskentavaiheessa tehtävin toimenpitein saadaan aikaan malli, jossa selittävien muuttujien väliset riippuvuudet pienenevät. Käytännössä tämä näkyy paitsi muuttujien merkitsevyyksien (t-arvot) lisääntymisenä, myös mallin selitysasteen laskuna. Hyvä selitysmalli on näin ollen kompromissi tarkkuuden (harhattomuuden) ja mallin loogisuuden välillä.

Mallien laadinnan eräs ongelma on havaintojen korreloituneisuus. Tähän törmätään esim. mitattaessa useita puita samasta metsiköstä tai useita oksia tai vuotuisia sädekasvuja samasta puusta. Tavallinen pienimmän nelösunnan regressioanalyysi olettaa havaintojen olevan riippumattomia toisistaan. Tällaisten aineistojen analysointiin sopivana menetelmänä on viime vuosina käytetty sekamallitekniikkaa (Lappi 1986).

Prosessimallit

Kasvumallin yleistämiskelpoisuus riippuu siitä, kuinka hyvin mitattu aineisto vastaa metsiköitä, joihin mallia sovelletaan. Perinteisissä regressiomalleissa käytettävät selittävät muuttujat eivät myöskään ole kasvun varsinaisia selittäjiä, vaan kasvun kanssa korreloivia puu- ja metsikkötunnuksia. Parannuskeinona tähän on tarjottu ns. prosessimalleja.

Prosessimalleissa puun kasvua kuvataan fotosynteesiin perustuvana massan lisäyksenä, joka jaetaan puun rungon, juurten oksien ja neulasten kesken. Parhaimmillaan prosessimallilla on mahdollista ennustaa puun kaikkien osien kasvua ja samalla puun laatukehitystä. Valon, lämmön, ilmakehän rakenteen, veden ja ravinteiden mukaanotto mahdollistaa myös tulevaisuuden muuttuvan ympäristön kasvuvaikutusten jonkinasteisen ennustamisen.

Prosessimallit eivät ole vielä valmiita käytännön sovelluksiin. Prosessien tutkiminen vaatii mittauksia, jotka ovat monin verroin metsikön perinteisiä puustomittauksia työlämpiä. Myös prosessimalleissa ongelmana ovat eri prosessien väliset korrelaatiot (yhteisvaikutukset).

Päätelmiä

Kehitys kulkee kasvun mallituksessa kohti puun kasvumalleja, joissa kasvun selittäjät ovat entistä lähempänä kasvun todellisia biologisia prosesseja. Mallien etuna on niiden aiempaa parempi soveltuvuus aineiston ulkopuoliseen "varovaiseen" ekstrapolointiin. Myös puuston keskitunnuksiin perustuvia kasvumalleja tarvitaan edelleen alueellisesti ja kasvupaikoittain puuttuvan kasvatiedon tuottamiseksi ja puun kasvumallien testaamiseksi. Prosessimallit ja perinteiset regressiomallit eivät toistaiseksi kilpaile keskenään samassa sarjassa. Prosessimallit lisäävät ymmärrystämme vastaamalla kysymykseen "miten?" ja regressiomallit tietoaamme vastaamalla kysymykseen "kuinka paljon?".

Kirjallisuus :

Baule, B. 1917. Zu Mitscherlichs Gesetz der physiologischen Beziehungen. Landw. Jahrbuch 51: 363-385.

Blomqvist, A. G. 1872. Tabeller framställande utvecklingen af jemnåriga och slutna skogsbestånd af tall, gran och björk. Helsingfors.

Gustavsen, H. G. 1977. Valtakunnalliset kuutiokasvuyhtälöt. Abstract: Finnish volume increment functions. Folia For. 331: 1-37.

Jonsson, B. 1980. Funktioner för långsiktiga prognoser beträffande virkesförrådets storlek och sammansättning. Summary: Functions for long-term forecasting of the size and structure of timber yields. Rapp. Uppsats. Inst. biometri och skogsindelning. Sveriges Lantbrukshögsk. 7: 1-121.

Kuusela, K. & Kilkki, P. 1963. Multiple regression of increment percentage on other characteristics in Scots pine stands. Seloste: Kasvuprosentin ja muiden metsikkötunnusten välinen yhteiskorrelaatio männiköissä. Acta For. Fenn. 75.4: 1-40.

Lappi, J. 1986. Mixed linear models for analyzing and predicting stem form variations of Scots pine. Seloste: Männyn runkumuodon analysointi ja ennustaminen lineaaristen sekamallien avulla. Commun. Inst. For. Fenn. 134: 1-69.

Mielikäinen, K. 1985. Koivusekoituksen vaikutus kuusikon rakenteeseen ja kehitykseen. Summary: Effect of an admixture of birch on the structure and development of Norway spruce stands. Commun. Inst. For. Fenn. 133 : 1-79.

Nyyssönen, A. & Mielikäinen, K. 1978. Metsikön kasvun arviointi. Summary: Estimation of stand increment. Acta For. Fenn. 163: 1-40.

Pukkala, T. 1988. Studies on the effect of spatial distribution of trees on the diameter growth of Scots pine. Academic dissertation. University of Joensuu.

Siitonen, M. 1983. A long term forestry planning system based on data from the Finnish national forest inventory. Proceedings of the IUFRO Subject Group 4. 02 Meeting in Finland. September 5-9, 1983. Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteen laitoksen tiedonantoja N:o 17: 195-207.

Vuokila, Y. 1965. Functions for variable density yield tables of pine based on temporary sample plots. Selostus: Tilapäiskoealoihin perustuvat yhtälöt männyn kasvu- ja tuotostaulukoita varten. Commun. Inst. For. Fenn. 60.4: 1-86.

Vuokila, Y. 1967. Eriasteisin kasvatushakuin käsiteltyjen männiköiden kasvu- ja tuotostaulukot maan eteläistä sisäosaa varten. Summary: Growth and yield tables for pine stands treated with intermediate cuttings of varying degree for southern Central-Finland. Commun. Inst. For. Fenn. 63.2: 1-123.

PROSESSIMALLIN SOVELTAMINEN METSÄTALOUDEN TARKOITUKSIIN

Risto Sievänen

Johdanto

Pitkään on jo tutkittu ja rakennettu fysiologisiin prosesseihin perustuvia eli ns. prosessipohjaisia metsän kasvun ja kehityksen malleja (PP mallit), esimerkiksi Aber ym. (1982), Mäkelä ja Hari (1986) ja West (1987). PP kasvumallit ovat sellaisia, joissa puiden kasvu perustuu yhteytyksen ja kuiva-aineen kasautumisen tuntemiselle. Usein saattavat myös muiden toimintojen (ravinteiden otto yms.) vaikutukset olla mallissa mukana. Tämän vuoksi voidaan ajatella, että PP mallit pystyvät luotettaviin metsän kehityksen ennusteisiin, koska ne perustuvat metsän kasvun tosiasiallisiin mekanismeihin. Esimerkiksi Aber ym. (1982):

"The Complexity of forest ecosystem makes rational decisions difficult without some means of evaluating the effects of potential programs on all of the major interrelated processes including production, tree growth, decomposition, and nutrient cycling. Computer models offer a logical means of filling this need while also acting as a repository of quantitative information on the system under study and as a valuable guide to future research."

On kuitenkin huomattava, että kausaalinen perusta luo vasta mahdollisuuden luotettaviin ennustuksiin. On tehtävä työtä, ennen kuin PP mallien mahdollisuudet voidaan täysimittaisesti hyödyntää, tarvitaan esimerkiksi riittävän yksityiskohtaista tietoa mallin parametrien arvoista. Lisäksi mallin kokonaisuudessaan täytyy olla tarkoitukseensa, esimerkiksi metsätalouden suunnitteluun, sopiva. Kilkin (1983) mukaan metsätalouden suunnittelun tarpeisiin soveltuviin mallien pitäisi täyttää seuraavat vaatimukset:

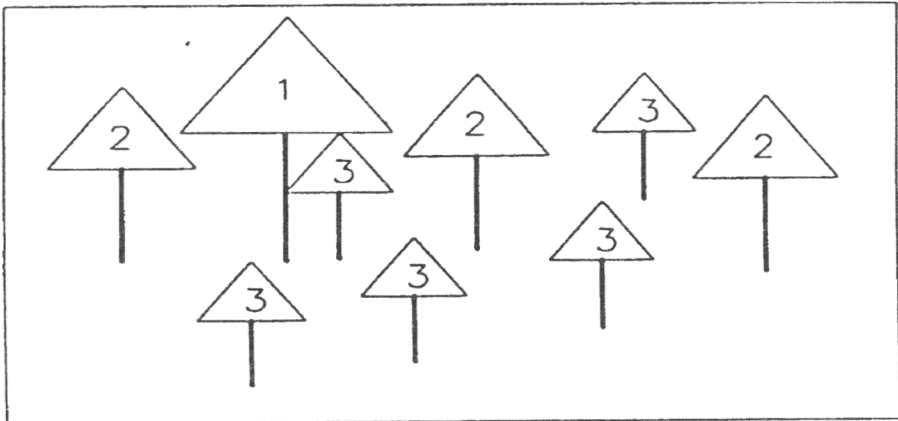
1. Mallien on kuvattava kohteena olevaa puuntuotantoprosessia riittävän luotettavasti.
2. Malleissa on oltava mukana kaikki päätöksentekijää kiinnostavat muuttajat.
3. Mallien on katettava kaikki sovellutustilanteet.
4. Mallien on oltava operationaalisia, ts. niissä ei saa esiintyä muuttujia, joiden mittaaminen on mahdotonta tai liian kallista käytännön metsäinventoinnista, eikä parametreja, joita ei voida estimoida kyllin luotettavasti. Mallien on oltava myös niin yksinkertaisia, että niitä voidaan soveltaa käytännössä.

Tämän luettelon keskeisin sanoma PP-malleille ehkä on, että metsätalouden käyttöön tarkoitettujen mallien on sallittava soveltaminen erilaisiin tilanteisiin, luotettavuuden testaus sekä käyttö melko vaatimattomilla lähtötiedoilla. Seuraavassa esitellään PP malli, jonka kehittämisessä on yritetty ottaa

huomioon yo. vaatimuksia. Malli on modifioitu aikaisemmin esitetystä (Sievänen ym. 1988) ja se on kehitystyön alainen. Tämän esittelyn tarkoitus on antaa kuva (eräs ratkaisu) siitä, kuinka voidaan laatia yhteytyksellä perusteltu metsätalouden käyttöön sopiva malli ja mitä asioita siinä joudutaan käsittelemään. Mallin yksityiskohtien toteuttaminen saattaa vielä muuttua työn edetessä. Tässä muodossa mallia on tarkoitus soveltaa tasakäisiin männiköihin.

Prosessimalli

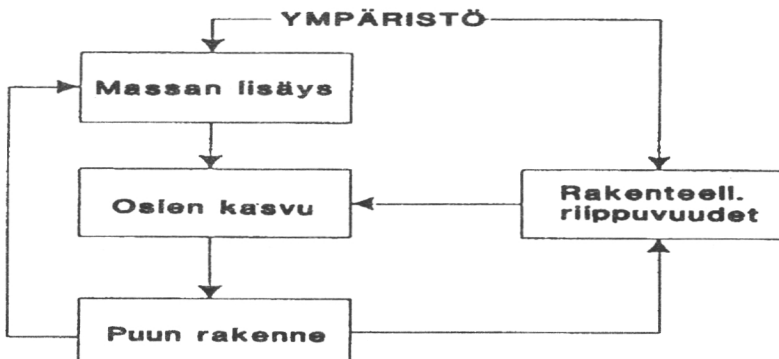
Metsä kuvataan puiden joukkona. Jokainen puu kuuluu johonkin kokoluokkaan, jonka jäsenet ovat identtisiä.



Kuva 1. Mallin käsittelemä metsän rakenne. Numerot puissa ilmoittavat kokoluokan.

Puiden kasvu kuvataan puukohtaisilla kasvumalleilla siten, että jokaisessa kokoluokassa puut kasvavat samalla tavalla. Lisäksi puiden kuolemiseksi kokoluokissa on malli. Muutokset tapahtuvat vuoden aika-askeleella, i. malli on diskreetti aika-askelena yksi vuosi. Koko metsää koskevat suuret saadaan summaamalla kokoluokat yhteen.

Periaatteessa useimmat puita kuvaavat muuttujat on määritelty puuluokalle i ja niiden arvoa tarkastellaan vuonna k , eli $X_i(k)$. Merkintöjen yksinkertaistamiseksi kokoluokkaa ilmaiseva alaindeksi ja aika-argumentti on jätetty muuttujista pois missä se vain on mahdollista ilman väärinkäsityksen vaaraa. Yhden puun kasvussa huomioon otetut vaikutussuhteet ovat kuvan 2 mukaiset.



Kuva 2. Yhteytyksen ja rakenteen muodostumisen vaikutussuhteet mallissa.

Kokonaismassan lisäys saadaan yhteytyksen perusteella ja se kuinka se muuttuu eri osien massan lisäyksiksi ja ulkomittojen muutoksiksi saadaan puun rakennetta kuvaavien yhtälöiden avulla. Ensiksi tarkastellaan massatasetta.

Massatase

Puun massa (kuivapaino) on jaettu lehtien, oksien, rungon, kannon ja paksujen juurten sekä hienojuurien kuivapainoiksi : W_l, W_o, W_r, W_k, W_h . Lähdetään liikkeelle yhteytyksestä ja puun yksinkertaisesta massatasemallista (tarkastellaan vain hiilen kiertoon liittyvää massatasetta). Puun vuotuiselle massataseelle pätee,

$$\text{massan kasvu} = \text{yhteytyys} - \text{hengitys} - \text{kuoleminen},$$

jossa kuoleminen tarkoittaa vain puun osien kuolemista. Yhtälön oikean puolen kaikille termeille esitetään seuraavassa yksinkertainen malli, jolloin puun kuivapainon kasvulle on malli puun rakenteen ja ympäristötekijöiden funktiona.

Oletetaan, että puun vuotuinen yhteytyys P on verrannollinen sen sitoman säteilyn määrään. Sulkeutuneessa metsikössä kasvavan puun sitoma säteilyn määrä Q on johdettu yleisesti käytetyn yksinkertaisen säteilyn sammumisen mallin avulla. Siinä säteilyn sammuminen riippuu metsän lehtipinta-alasta ja ns. sammumiskertoimesta ja se on esitetty julkaisussa Sievänen ym. (1988). Yhteytykselle on nyt voimassa,

$$P = p_0 Q,$$

jossa p_0 on vakio.

Hengitykselle R oletetaan,

$$R = r_l W_l + r_o W_o + r_r W_m + r_k W_k + r_h W_h,$$

jossa r_i 't ovat vakioita ja W_m on rungon mantopuun kuivapaino. Tässä on otettu huomioon, että kuollut sydänpuu ei hengitä. Mantopuun määrälle saadaan arvio, kun oletetaan, että mantopuun paksuus on (latvusrajan suhteellinen korkeus) * (puun säde) jokaisella korkeudella. Tämä vastaa karkeasti havaintoa, että kuolleiden vuosilustojen lukumäärä vastaa kuolleiden oksakiehkuroiden määrää (Hari ym. 1985). Tällöin pätee, kun x on latvusrajan suhteellinen korkeus,

$$\text{mantopuun tilavuus} = (1-x^2) * \text{rungon tilavuus},$$

josta olettaen samat tiheydet manto- ja sydänpuulle,

$$W_m = (1-x^2) W_r$$

Olellisesti samaan tulokseen päästään myös, jos oletetaan, että latvuksen sisällä kaikki puu on mantopuuta ja latvuksen alapuolella mantopuun paksuus on vakio (sama kuin latvusrajalla), mitä on myös esitetty (Brix ja Mitchell 1983). Kuolemisen S oletetaan, että kullekin puun osalle se on verrannollinen osan kokoon, ja että rungosta, kannosta ja paksuista juurista ei poistu kuiva-ainetta kuoleamisen kautta, siis,

$$s = s_l W_l + s_o W_o + s_h W_h$$

jossa s_i 't ovat vakioita. Nyt edellisen mukaan massan kasvulle pätee,

$$B = P - R - S$$

Puun kuivapainon muutokselle vuodesta k vuoteen $k+1$ voidaan lausua osien kuivapainojen avulla,

$$\sum_{i=l,o,r,k,h} [W_i(k+1) - W_i(k)] = B(k)$$

Rakenteelliset yhtälöt

Seuraavaksi on löydettävä muita ehtoja massataseen lisäksi, jotta puun osien kuivapainon muutoksille saadaan yhtälöt. Puusta on havaittu rakenteellisia säännönmukaisuuksia, joita käytetään hyväksi. Tässä tapauksessa käytetään seuraavia yhtälöitä:

Ensiksi, eräiden osien kuivapainojen välille oletetaan allometriset yhtälöt (ks. esim. Landsberg 1986):

$$W_o = a_o W_l$$

$$W_k = a_k W_r$$

$$W_h = a_h W_l,$$

jossa a_i 't ovat vakioita. Yleisesti allometriset yhtälöt sisältävät myös eksponentin (Landsberg 1986). Tässä on kokonaisuuden kannalta vähempiarvoisille oksille sekä kannolle ja paksuille juurille käytetty lineaarista yhtälöä laskelmien yksinkertaistamiseksi. Hienoille juurille yhtälö on lineaarinen luonnostaan (Mäkelä 1986). Seuraavaksi oletetaan, että puun neulaspinna-ala on verrannollinen rungon poikkileikkauspinta-alaan (ks. esim. Hari ym. 1985 ja Waring and Schlesinger 1985) latvusrajan alla, eli

$$wW_f = \beta D_c^2,$$

jossa β on vakio, w on neulasen pinta-ala/paino (eli puun lehti-pinta-ala on wW_f) sekä D_c on rungon läpimitta latvuksen alla, jolle pätee latvusrajan suhteellisen korkeuden x ja läpimitan (suhteellisella korkeudella 0, 2) avulla,

$$D_c = (1-x)^{1/2} D.$$

Tämä yhtälö on likimääräinen; jos haluttaisiin olla tarkkoja, pitäisi käyttää runkokäyrämallia. Virhe pohjapinta-alan laskemisessa on kuitenkin pieni verrattuna esimerkiksi Laasasenahon (1982) runkokäyrään, kun $x > 0, 1$, mikä on yleensä totta. Yhtälön yksinkertainen muoto helpottaa myöhempiä laskuja. Latvusrajan suhteelliselle korkeudelle pätee,

$$x = H_c/H,$$

jossa H_c on latvusrajan korkeus.

Rungon kuivapaino on tiheys t kertaa tilavuus, joka saadaan Laasasenahon (1982) runkokäyrämallin avulla, eli

$$W_r = t * vD^2H,$$

jossa vakio v määräytyy runkokäyräfunktion vakioista. Usein kasvumalleissa oletetaan, että puun pituus on läpimitan funktio (esim. Belcher ym. 1982). Tässä sitä oletusta ei ole tehty vaan lähdetään siitä, että pituuden lisäykset ovat verrannollisia läpimitan lisäyksiin:

$$H(k+1) - H(k) = e * [D(k+1) - D(k)],$$

jossa e on vakio. Tässä tapauksessa ei saada aina samaa riippuvuutta pituuden ja läpimitan välille, vaan suhde riippuu H :n ja D :n arvoista kasvujakson alussa. Yleisesti tiedetään, että puun pituuden ja paksuuden suhde riippuu mm. tiheydestä (esim. pituusmalli julkaisussa Päivinen 1987). Vakio e onkin tarkoitus korvata funktiolla, joka riippuu siitä ja muista metsikön sisäisistä tekijöistä. Tällöin pituuden ja paksuuden välinen suhde tulee riippuvaiseksi metsikön kasvatusolosuhteista.

Mallin yhtälöt

Puiden rakenteellisia säännönmukaisuuksia kuvaavista yhtälöistä havaitaan, että niiden avulla voidaan kaikki muut puuta kuvaavat suureet lausua muuttujien D , H ja H_c avulla (huomaa, että $x = H_c/H$). Puun kasvun hallitsemiseksi tarvitsee siis tietää vain näiden muuttujien kehitys. Tämä on ollutkin tavoitteena valittaessa rakenteellisia säännönmukaisuuksia kuvaavia yhtälöitä; yhteyttämisellä perusteltu kasvumalli voidaan lausua mahdollisimman hyvin metsätaloudessa käytettävien ja mitattavien muuttujien avulla. Metsikön kasvuun tarvitaan vielä puiden lukumäärät puuluokittain, N_i .

Metsän kasvumallin aikaansaamiseksi tarvitaan liikeyhtälöt tilamuuttujille D , H , H_c ja N . Ensin esitetään yhtälöt D :lle ja H :lle, jotka voidaan johtaa massataseen ja rakenteellisia ominaisuuksia kuvaavien yhtälöiden avulla. Latvusrajan kehittymisen oletetaan olevan metsikkötason ilmiö ja sille esitetään yhtälö tämän jälkeen. D :n ja H :n liikeyhtälöiden johto, jossa käytetään hyväksi puun kuivapainon vuotuisen muutoksen yhtälöä ja rakenteellisia säännönmukaisuuksia kuvaavia yhtälöitä, sisältää melko paljon matemaattisia yksityiskohtia, joita tässä ei ole tarkoituksenmukaista esittää (toimenpiteet ovat olennaisesti samat kuin julkaisussa Sievänen ym. 1988). Lopputuloksena:

$$D(k+1) = D(k) + \frac{\frac{P(k) - D(k)}{D(k)} \left\{ a_1 \left(1 - \frac{H_c(k)}{H(k)} \right) + a_2 \left(1 - \left[\frac{H_c(k)}{H(k)} \right]^2 \right) + \frac{h(k)}{H(k)} \right\}}{2 - \frac{H_c(k)}{H(k)} + a_3 (eD(k) + 2H(k))}$$

$$H(k+1) = H(k) + e \cdot \frac{\frac{P(k) - D(k)}{D(k)} \left\{ a_1 \left(1 - \frac{H_c(k)}{H(k)} \right) + a_2 \left(1 - \left[\frac{H_c(k)}{H(k)} \right]^2 \right) + \frac{h(k)}{H(k)} \right\}}{2 - \frac{H_c(k)}{H(k)} + a_3 (eD(k) + 2H(k))}$$

jossa h on latvusrajan korkeuden nousuun liittyvä funktio (ks. alla) sekä a_i 't ovat vakioita, jotka riippuvat mallin määrittelyssä käytetyistä vakioista seuraavasti:

$$a_1 = \frac{r_l + s_l + a_o(r_o + s_o) + a_h(r_h + s_h)}{1 + a_o + a_h}$$

$$a_2 = \frac{wtv(r_r + a_k r_k)}{\beta(1 + a_o + a_h)}$$

$$a_3 = \frac{wtv(1 + a_k)}{\beta(1 + a_o + a_h)}$$

Latvusrajan käyttäytymisen oletetaan olevan metsikkötason ilmiö. Latvusrajan nouseminen on ilmauspuiden kasvutilan rajoittumisesta. Puut kykenisivät kantamaan kokonsa puolesta toteutunutta suuremman lehtipinta-alan mutta varjostuksen takia eivät voi. Tätä tapahtumaa voi kuvaila mallilla, jossa metsikön latvusraja alkaa nousta, kun metsän lehtipinta-ala ylittää tietyn kriittisen rajan. Nousu voisi olla sitä nopeampaa, mitä enemmän raja on ylitetty. Seuraavassa formuloinnissa ei kuitenkaan käytetä lehtipinta-alaa, vaan tämän mallin henkeen paremmin sopivaa pohjapinta-alaa latvuksen alta, G_c . Latvusrajan korkeudelle pätee:

$$H_c(k+1) = H_c(k) + h(k),$$

jossa

$$h(k) = \begin{cases} 0 & , \text{ jos } G_c(k) \leq G_c^* \\ c(G_c(k) - G_c^*) & , \text{ jos } G_c(k) > G_c^* \end{cases}$$

jossa G_c^* on latvuksenalaisen pohjapinta-alan kriittinen arvo ja c vakio.

Oletetaan vielä, että puun latvussuhde $(1 - H_c/H)$ ei alita tiettyä alarajaa, eli suhteelliselle latvusrajan korkeudelle pätee $x < x_m$. Puiden lukumäärän kehitykselle kokoluokittain tarvitaan kuolleisuusmalli. Tähän se on otettu Mäkelän ja Harin (1986) mallista. Siinä oletetaan, että puuluokan puut alkavat kuolla, kun niiden lehtipinta-ala alkaa vähetä. Tässä mallissa poikkileikkauspinta-ala latvuksen alla on ekvivalentti lehtipinta-alan kanssa, joten tarkastellaan sitä. Pohjapinta-alan muutoksen määrää suureen D_c^2 muutos ΔD_c^2 (joka voidaan laskea käyttämällä yhtälöä D_c :lle), josta puiden lukumäärälle puuluokassa i :

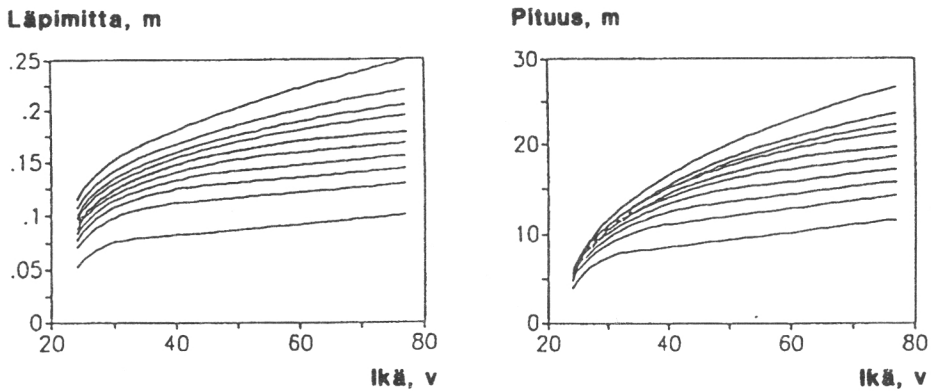
$$N_i(k+1) = \begin{cases} N_i(k), & \text{jos } \Delta D_c^2 \geq 0 \\ N_i(k) \left(1 - k_c \frac{\Delta D_c^2}{D_c^2}\right), & \text{jos } \Delta D_c^2 < 0, \end{cases}$$

jossa k_c on vakio. Mäkelän ja Harin (1986) mukaan on käytetty suhteellista muutosta $\Delta D_c^2/D_c^2$

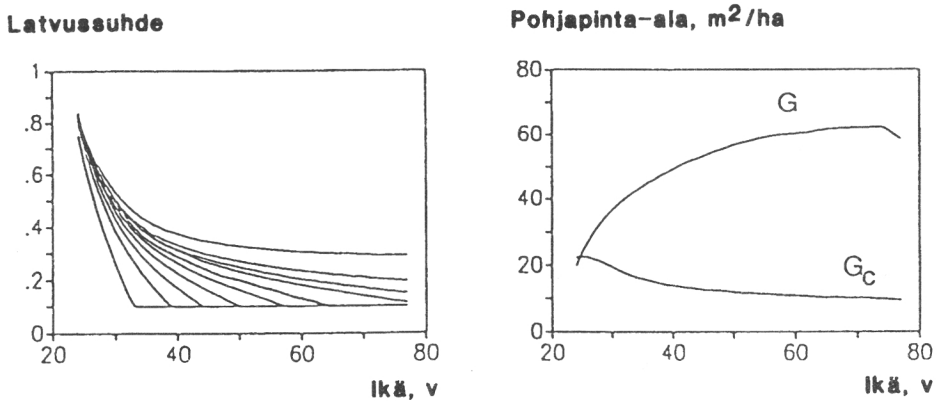
Yhteenveto

Yllä olevat yhtälöt määrittelevät metsikön kasvumallin. Jokaiselle puuluokalle i on liikeyhtälöt muuttujille D_i , H_i ja N_i . Lisäksi on metsikkötasolla liikeyhtälö muuttujalle H_c . Nämä ovat mallin tilamuuttujat. Vakioita näissä yhtälöissä ovat seuraavat: valon sammumiseen liittyvä parametri, joka tässä riippuu ns. valon sammumiskertoimesta ja vakiosta B , yhteytyksen vakio p_0 , puiden rakentamiseen liittyvät a_1 , a_2 , a_3 , e , ja x_m , latvusrajan kehitykseen liittyvät c , G_c^* , sekä puiden kuolemiseen liittyvä k_c , yhteensä 10. Alkuperäisessä mallin määrittelyssä käytettyjen vakioiden lukumäärä on vähentynyt huomattavasti, osa vakiosta on yhdistelmiä alkuperäisistä. Mikäli tulevaisuudessa päädytään erilaisiin osamalleihin eri asioille, saattaa niihin liittyvä parametrisointi tietenkin muuttua.

Seuraavissa kuvissa on esitetty esimerkkinä mallin antamia tuloksia eräillä vakioiden arvoilla:



Kuva 3. Mallin antama läpimitan ja piteuden kasvu eräillä vakioiden arvoilla puuluokittain (luokkia 10).



Kuva 4. Mallin antama latvussuhteen (10 puuluokalle), pohjapinta-alan (G) ja pohjapinta-alan latvusrajan alla (G_c) kehitys. Maksimaaliselle suhteellisen latvusrajan korkeudelle on käytetty arvoa 0.9.

Parametrien estimointi

Periaatteessa parametrien estimointi diskreetistä dynaamisesta mallista tapahtuu epälineaarisen regressioanalyysin menetelmin (esim. Bard 1974). Oletetaan, että käytettävissä on mittaukset läpimitoista (rinnankorkeudella), pituuksista ja latvusrajan suhteellisesta korkeudesta puuluokittain tietyltä ajanjaksolta: $D_{bmi}(k)$, $H_{mi}(k)$, $x_{mi}(k)$, kun k käy läpi mittaussajankohdat. Tällöin mallin vakioiden arvot voidaan estimoida minimoilla niiden suhteen neliösumma,

$$\sum_k \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{D_{bmi}(k) - D_{bi}(k)}{u_D} \right)^2 + \left(\frac{H_{mi}(k) - H_i(k)}{u_H} \right)^2 + \left(\frac{x_{mi}(k) - x_i(k)}{u_z} \right)^2 \right]$$

jossa k käy läpi mittaussajankohdat, u 't ovat painokertoimet ja d_i on mallista runkokäyrän avulla laskettu rinnankorkeusläpimita. Neliösumman minimointi on tehtävä iteroimalla käyttäen epälineaarisen funktion minimointiin tarkoitettua algoritmia (ks. esim. Bard 1974). Tällöin jokainen neliösumman arvon laskeminen tarkoittaa sitä, että malli ratkaistaan alkuhetkestä (käyttäen alkuarvoina esim. ensimmäisen mittauksen tuloksia) viimeisen mittauksen ajankohtaan. Mikään ei edellytä, että parametrien estimoimiseksi olisi oltava mittaukset juuri läpimitasta, pituudesta ja latvusrajan suhteellisesta korkeudesta. Kustannusfunktio voidaan minimoida yhtä hyvin, vaikka siinä olisi vain läpimitan mittaukset mukana. Tällöin tietenkin saattaa olla, ettei muihin muuttujiin liittyvien vakioiden arvojen estimointi onnistu. On huomattava, että kaikkien mallista johdettavien suureiden mittaukset voidaan hyödyntää lisäämällä minimoitavaan neliösummaan asianomainen termi. Tällainen suure voisi esimerkiksi olla pohjapinta-ala latvusrajalla. Näin ollen parametrien estimointi on joustavaa, kaikki saatavilla oleva informaatio voidaan hyödyntää.

Parametrien estimaateille on mahdollista saada luotettavuusarviot. Mikäli tehdään jakaumaoletukset mittauksille, voidaan parametrien estimaateille johtaa todennäköisyysjakaumat eräin oletuksin. Tämä asettaa lisävaatimuksia käytetyille minimointialgoritmeille.

Lopuksi

Yllä esitetty yhteytyksellä perusteltu puukohtainen kasvumalli on eräs ratkaisu ongelmalle tehdä fysiologispohjainen metsätalouden käyttöön sopiva kasvumalli. Eri mallien yksityiskohdissa voi olla isojakin eroja mutta tietyt ongelmat kaikkien täytyy ratkaista. Cannel (1989) esittää, että fysiologispohjaisen puun tuotoksen analyysin tulisi perustua seuraaville asioille:

- 1) Sidotun säteilyn määrä,
- 2) säteilyn hyödyntämistehokkuus ja hengitys,
- 3) yhteytystuotteiden jakaantuminen ja
- 4) kuolleisuudenvaikutus.

Edellä on käsitelty kaikkia näitä kohtia.

Huomionarvoista tässä mallissa on, että suuresta määrästä (fysiologisia) perusrippuvuuksia on yhdistetty puun kokoa kuvaavien muuttujien avulla määritellyksi kasvumalliksi. Tällöin myöskin suuri määrä (fysiologisia) vakioita on yhdistynyt lopullisen mallin harvoiksi vakioiksi. Saatu malli on suhteellisen yksinkertainen, ja sen vakioiden arvot voidaan (ainakin periaatteessa) estimoida metsän kasvun mittauksista. Tällöin sillä on mahdollisuuksia toteuttaa Kilkin vaatimuslistan eräitä kohtia. Parametrien estimoinnissa voidaan saada tietoa mallin luotettavuudesta (kohta 1). Rakenteensa vuoksi mallissa ovat ilmeisesti kaikki päätöksentekijää kiinnostavat kohdat mukana (kohta

2). Sen parametrit voidaan estimoida erilaisille olosuhteille, joten sitä voidaan soveltaa niihin (kohta 3). Kohdan 4 kaikkia vaatimuksia malli ei täytä. Voidaan kyllä ajatella, että se on tarpeeksi yksinkertainen, jotta sitä voidaan soveltaa käytännössä. Saattaa kuitenkin olla, että mallin kaikkien vakioiden arvojen määrittäminen edellyttää käytännön metsäinventointeja yksityiskohtaisempia mittauksia. Se on ehkä hinta, joka täytyy maksaa siitä, että malli on yhteyksellä perusteltu. Se voidaanko mallin kaikki parametrit estimoida kyllin luotettavasti ja onko malli kokonaisuudessaan tarpeeksi luotettava jäävät vielä avoimiksi kysymyksiksi.

Mallin kaikilla vakioilla on yhteys fysiologiaan ja puun rakenteeseen, joten sen lisäksi, että niiden arvot voidaan estimoida metsän kasvun mittauksista, ne voidaan määrittää myös fysiologisin tai puun rakenteen mittauksin. Tämä avaa mahdollisuuksia ekstrapolointiin. Jos esimerkiksi tiedetään, kuinka jokin ympäristötekijä vaikuttaa mallin vakioon, sen muutoksen mahdollista vaikutusta voidaan ennakoida muuttamalla vakion arvoa mallissa. Tällöin ekstrapoloinnilla on looginen perusta. Vertailut fysiologiaan perustuvien vakioiden arvojen kanssa saattavat paljastaa myös puutteita mallin rakenteessa; jos jonkin estimoidun vakion arvot muuttuvat epäloogisesti olosuhteiden mukaan, voidaan epäillä puutteita mallissa. Nämä ovat periaatteellisia etuja verrattuna malliin, jonka vakiot voidaan määrittää vain tilastollisesti.

Muuttujat

		yksikkö
B	puun kuiva-aineen vuotuinen lisäys	kg ka*
D	puun läpimitta suht. korkeudella 0, 2	m
D _b	rinnankorkeus IPm	m
D _c	läpimitta latvusrajalla	m
H	puun pituus	m
H _c	latvusrajan korkeus	m
N	puuluokkien lukumäärä	
P	vuotuinen yhteytys	kg ka
Q	puun sitoma säteilyn määrä	MJ
R	puun vuotuinen hengitys	kg ka
S	puun osien vuotuinen kuoleminen	kg ka
W _h	hienojen juurten kuivapaino	kg ka
W _k	kannon ja paksujen juurten kuivapaino	kg ka
W _l	lehvästön kuivapaino	kg ka
W _m	mantopuun kuivapaino	ka ka
W _o	oksien kuivapaino	kg ka
W _r	rungon kuivapaino	kg ka
x	latvusrajan suhteellinen korkeus (= H _c /H)	

Vakiot

		yksikkö
e	pituuden ja paksuuden muutosten suhde	
β	lehtipinta-alan / rungon poikkileikkauspinta-ala	
a ₁	lopullisen mallin vakio	
a ₂	lopullisen mallin vakio	m ⁻¹
a ₃	lopullisen mallin vakio	m ⁻¹
a _h	hienojen juurten ja lehtien kuivapainojen suhde	
a _k	runko / kanto sekä paksut juuret	
a _o	oksien ja lehtien kuivapainojen suhde	
c	latvusrajan nousuun liittyvä vakio	ha/m
G _c *	latvuksenalaisen pohjapinta-alan kriittinen arvo	m ² /ha
k _c	kuolleisuusparametri	
P ₀	yhteytystehokkuus	kg ka/MJ
r _h	hienojen juurten respiraatio vuodessa/ka yksikkö	
r _k	kannon ja paksujen juurten respiraatio vuodessa/ka yksikkö	
r _l	lehtien respiraatio vuodessa/ka yksikkö	
r _o	oksien respiraatio vuodessa/ka yksikkö	
r _r	rungon respiraatio vuodessa/ka yksikkö	
s _h	hienojen juurten kuoleminen vuodessa /ka yksikkö	
s _l	lehtien kuoleminen vuodessa /ka yksikkö	
s _o	oksien kuoleminen vuodessa /ka yksikkö	
t	rungon tiheys	kg/m ³
v	vakio rungon tilavuuden yhtälössä	
w	lehtien pinta-ala/paino	m ² /kg
x _m	pienin sallittu latvussuhde	

*ka = kuiva-ainetta

Kirjallisuus

- Aber, J.D. , Melillo, J.M., and Federer, C.A. 1982. Predicting the effects of rotation length, harvest intensity, and fertilization on fiber yield from northern hardwood forests in New England. *For. Sci.* 28 (1) : 31-45.
- Bard, Y. 1974. *Nonlinear parameter estimation*. Academic Press, New York and London, 341 p.
- Belcher, D.W., Holdaway, M.R., and Brand, G.J. 1982. A description of STEMS, the stand and tree evaluation and modelling system. U.S. For. Serv. Gen. Tech. Rep. NC-79.
- Brix, H. and Mitchell, A.K. 1983. Thinning and nitrogen fertilization effects on sapwood development and relationships of foliage quantity to sapwood area and basal area in Douglas-fir. *Can. J. For. Res.* 13: 384-389.
- Cannel, M.G.R. 1989. Physiological basis of wood production: a Review. *Scand. J. For. Res.* 4:459-490.
- Hari, P. , Kaipainen, L. , Korpilahti, E. , Mäkelä, A. , Nilson, T. , Oker-Blom, P. , Ross, J. ja Salminen, R. 1985. Structure, radiation and photosynthetic production in coniferous stands. Helsingin Yliopiston Metsänhoitotieteen Laitoksen Tiedonantoja N:o 54. 233 s.
- Kilki, P. 1983. Tutkimushanke metsien inventoinnin, metsätalouden suunnittelun ja niitä koskevan suunnittelun kannalta. Julkaisussa: Metsikön varhaiskehityksen dynamiikka. Seminaariraportti (Hämäläinen, J. , Räsänen, P.K. ja Suurnäkki, M. , toim.). Suomen Akatemian Julkaisuja 1/1983.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. *Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja* 108, 74 s.
- Landsberg, J. 1986. *Physiological ecology of forest production*. Academic Press, London, 198 p.
- Mäkelä, A. 1986. Implications of the pipe model theory on dry matter partitioning and height growth in trees. *J. Theor. Biol.* 123:103-120.
- Mäkelä, A. ja Hari, P. 1986. Stand growth model based on carbon uptake and allocation in individual trees. *Ecol. Modelling* 33:205-229.
- Päivinen, R. 1988. Metsäinventoinnin suunnittelumalli. Joensuun Yliopiston Luonnontieteellisiä julkaisuja N:o 11
- Sievänen, R. , Surk, T.E. , and Ek A.R. 1988. Construction of a stand growth model utilizing photosynthesis and respiration relationships in individual trees. *Can. J. For. Res.* 18: 1027-1035.
- Waring, R.H. ja Schlesinger, W.H. 1985. *Forest ecosystems. Concepts and management*. Academic Press, Orlando.

PUUN PITUUSKASVU JA BONITEETTI

Juha Lappi

Aluksi

Metsän kasvu riippuu monimutkaisella tavalla kasvupaikan primäärisistä maaperä- ja ilmastotekijöistä. Siksi on pyritty löytämään yksinkertaisia välillisiä tapoja, joilla voitaisiin kuvata kasvupaikan puuntuotantokykyä. Kasvupaikkojen luokittelu pintakasvillisuuden avulla metsätyypeiksi ja valtapuiden pituuskasvuun perustuva pituusbonitointi ovat yleisimmät menetelmät. Seuraavassa esittelen lyhyesti pituusbonitoinnin perusmallin sekä artikkeleissa Lappi ja Bailey (1987 ja 1988) esitetyn tilastollisen mallin valtapituuden ennustamiseksi. Lopuksi tarkastelen miten valtapituuden ennustaminen liittyy boniteettiin.

Pituusbonitointi

Pituusbonitointi perustuu siihen, että valtapuiden pituuskasvu riippuu metsikön tiheydestä vain hyvin tiheissä tai harvoissa metsiköissä (menetelmän yleisesittely on esim. teoksessa: Clutter *et al.* 1983). Pituusbonitointisysteemissä valtapituuden kehitystä kuvataan yhtälöllä:

$$H_k(t) = f(t, a_k),$$

missä $H_k(t)$ on metsikön k valtapituus t :n ikäisenä, f on valtapituuden kehitystä kuvaava funktio, ja a_k on metsikköä k kuvaava parametri. Yleisimmin metsikkökohtaiset valtapituuskäyrät erotellaan tasokertoimen avulla (nk. anamorfiset käyrästöt), eli $f(t, a_k)$ on muotoa $a_k g(t)$. Kun valtapituus iässä t_0 tunnetaan, niin yhtälöstä (1) ratkaistaan a_k , ja sen jälkeen valtapituus voidaan ennustaa mille iälle tahansa. Boniteetin mittarina voitaisiin käyttää metsikkökohtaista parametria a_k , mutta tapana on käyttää indeksi-iälle ennustettua pituutta.

Tilastolliselta kannalta perinteisessä pituusbonitointimallissa on seuraavia ongelmia:

- mallissa voi olla vain yksi metsikkökohtainen parametri
- metsiköiden valtapituuskäyrien tilastollista vaihtelua ei hyödynnetä (metsikköparametri on mallissa kiinteä)
- malli kulkee sokeasti poikkeavienkin mittaustulosten kautta
- vain yhden mittaajankohdan tiedot voidaan hyödyntää (nk. differenssimenetelmässä kahden)
- ennustevirheiden varianssille ei saada estimaattia

Tilastollinen valtapituuskehityksen analyysi

Tilastollisesti perustellumpi analyysi saadaan erottamalla tarkemmin valtapuiden pituuskehitykseen vaikuttavat kiinteät ja satunnaiset tekijät. Kiinteiksi tekijöiksi kannattaa tulkita mitattavissa (kuvattavissa) olevat metsikön geneettistä alkuperää, perustamistapaa ja kasvupaikkaa koskevat ominaisuudet. Mallin satunnaisosan avulla kuvataan satunnaisvaihtelun jakautuminen metsiköiden väliseen ja metsiköiden sisäiseen komponenttiin sekä autokorrelaatio ajan yli. Valtapuiden pituuskehityksen analysoimiseen tarvitaan kolme eri pituuskäyrätyyppiä:

- a) kiinteä populaation keskimääräinen pituuskäyrä (riippuu kiinteistä tekijöistä)
- b) satunnainen metsikön valtapituuskäyrä
- c) satunnainen puun pituuskäyrä

Metsikössä k oleva t :n ikäisen puun i pituus $h_{ki}(t)$ voidaan esittää muodossa:

$$h_{ki}(t) = \mu(t) + b_k(t) + e_{ki}(t)$$

missä $\mu(t)$ on populaatioon keskiarvo t :n ikäisille valtapuille, $b_k(t)$ on satunnainen metsikkötekijä ja $e_{ki}(t)$ on satunnainen puutekijä, joka ei korreloi metsikkötekijän kanssa. Sekä $b_k(t)$ että $e_{ki}(t)$ ovat korreloituneita ajan yli. Termi $\mu(t) + b_k(t)$ edustaa metsikön valtapituuskäyrää.

Jos mittauksia olisi tarpeeksi käytettävissä, edellä oleva malli voitaisiin estimoida monimuuttujamallina eli estimoimalla $\mu(t)$ ja satunnaisten metsikkö- ja puutekijöiden varianssit kullekin iälle erikseen sekä estimoimalla satunnaistekijöiden autokorrelaatio kullekin ikäparille. Kompaktimpi ja helpommin estimoitava malli saadaan esittämällä $\mu(t)$, $b_k(t)$ ja $e_{ki}(t)$ eksplisiittisesti iän funktiona.

Esiteltävässä tutkimuksessa (Lappi ja Bailey 1988) populaation keskiarvokäyränä käytettiin Richardsin funktiota:

$$\mu(t) = A[1 - \exp(-ct)]^d.$$

Käytetty aineisto ei antanut mahdollisuutta määrittää keskiarvofunktiota $\mu(t)$ kasvupaikka- ja alkuperätunnusten funktiona (paitsi implisiittisesti siten että estimoitu $\mu(t)$ on yhdelle puulajille yhdellä maantieteellisellä alueella).

On luontevaa olettaa, että metsikkö- ja puukäyrät noudattavat samaa muotoa, mutta parametrit vaihtelevat satunnaisesti metsiköittäin ja puittain. Epälineaaristen parametrien varianssien ja kovarianssien estimointiin ei ole vielä käytettävissä yksinkertaisia tilastollisia menetelmiä. Ongelma voidaan ratkaista linearisoimalla Richardsin funktio Taylorin sarjan avulla, eli esittämällä $h_{ki}(t)$ muodossa:

$$h_{ki}(t) = \mu(t) + \mathbf{g}(t)' \mathbf{\beta}_k + \mathbf{g}(t)' \boldsymbol{\alpha}_{ki} + e_{ki}(t),$$

missä $\mathbf{g}(t)$ on funktion $\mu(t)$ gradienttivektori parametrien suhteen (derivaattafunktioiden arvot lasketaan populaatioparametrien kohdalla), $\mathbf{\beta}_k$ on satunnaisten metsikköparametrien vektori, $\boldsymbol{\alpha}_{ki}$ on satunnaisten puuparametrien vektori ja $e_{ki}(t)$ on jäännösvirhe.

Analyysivaiheessa estimoidaan sopivan aineiston avulla kiinteät populaatioparametrit, satunnaisparametrien varianssit ja kovarianssit (eri metsikköparametrit ovat keskenään korreloituneita, ja eri puuparametrit ovat korreloituneita) sekä satunnaisvirheen varianssi. Kiinteät populaatioparametrit

voidaan estimoida pienimmän neliösunnan menetelmällä (epälineaarilla regressiolla). Varianssit ja kovarianssit voidaan estimoida soveltaen varianssikomponenttien estimointiin kehitettyjä menetelmiä.

Mallia voidaan soveltaa tilanteessa, missä jostakin metsiköstä on mitattu vähintään yhden valtapuun pituus vähintään yhdellä iällä. Tilastollisen ennustamisteorian avulla voidaan ennustaa satunnaiset metsikkö- ja puuparametrit (puuparametrille saadaan nolasta poikkeava ennuste vain jos ko. puusta on tehty vähintään yksi pituus- ja ikämittaus). Ennustettujen parametrien avulla voidaan ennustaa metsikön valtapituus ja yksittäisten valtapuiden pituus mille tahansa iälle. Sekä parametri- että pituusestimoitusten ennustamisvirheiden varianssit lasketaan.

Soveltamistilanteessa mallilla on seuraavia etuja perinteiseen pituusbonitointimenetelmään verrattuna:

- malli on tilastollisesti perusteltu, se sisältää satunnaisvaihtelun tärkeimmät komponentit
- hyödynnetään kaikki pituusmittaukset
- painotetaan optimaalisesti mittauksia ja etukäteisinformaatiota pituuskäyrien jakaumista
- ennustamisvirheitä voidaan tutkia teoreettisesti ennen mittauksien tekemistä ja näin optimoida koepuumittauksia (esim. päätettäessä minkä ikäisiä puita mitataan, mitataan-ko samoja puita uudelleen)
- ennustetut valtapuiden pituuskäyrät kulkevat automaattisesti mittauspisteiden kautta
- mittaamisvirheiden varianssi voidaan ottaa huomioon

Miten boniteetti pitäisi määritellä?

Edellä esitellyn mallin avulla voidaan ennustaa metsikön valtapituuden kehitystä. Ennustettaessa valtapituus jollekin indeksi-iälle, saadaan samanlainen pituusboniteetitunnus kuin perinteiselläkin pituusbonitointimenetelmällä. Näin saatu pituusboniteetti on hyödyllinen indikaattori verrattaessa metsiköitä, mutta sitä ei tarvita valtapituuden ennustamisessa parametrinä eikä minään boniteetin määrittelyä.

Mielestäni on turhaa yrittää määritellä boniteettia. Kasvupaikan kuvauksen varsinainen ongelma on se, miten mitattavien ja havaittavien tunnusten avulla voidaan ennustaa tulevaa metsän kehitystä (huom. tilastollisessa kielenkäytössä "ennustaminen" viittaa satunnaismuuttujan tai -parametrin estimointiin - ei tulevaisuuteen) tai sellaisia tunnuksia, joita ei voida mitata joko mittaamisongelmien tai kustannusten vuoksi. Tässä ennustamisessa tarvitaan tilastollisia malleja, joiden avulla voidaan kuvata sekä keskimääräiset riippuvuudet että esim. kasvupaikan puuntuotantokyvyn vaihtelun aiheuttamien satunnaispoikkeamien väliset korrelaatorakenteet. Korrelaatorakenteiden mallittamisessa voidaan käyttää avuksi esim. satunnaisparametrimalleja. Satunnaisparametrimallien avulla voidaan kätevästi siirtää tietoa yhtä yhtälöä koskevista mittauksista toisen yhtälön parametrien ennustamiseen (Lappi 1990a) tai mitattavien metsikkötunnusten ja metsikkökohtaisten parametrien välillä (Lappi 1990b).

Samalla tavalla metsätyyppien määrittelyjen hiominen on mielestäni hedelmätöntä. Varsinainen ongelma on se, miten metsän kehitystä voidaan ennustaa kasvilajien esiintymisen avulla. Tämän tutkimisessa kaikki tieto kasvivyhdyskuntien kehitysdynamiikasta on tietenkin tarpeen.

Viitteet:

Clutter, J. L., J. O. Fortson, L. V. Pienaar, G. H. Brister and R. L. Bailey. 1983. Timber Management - A Quantitative Approach. John Wiley, New York. 333 p.

Lappi, J. and Bailey R.L. 1988. Optimal prediction of dominant height curves based on an analysis of variance components and serial autocorrelation. in: Ek, A.R., S.R. Shifley and T.E. Burk (Eds.): Forest Growth Modelling and Prediction, Vol. 2, Proceedings of IUFRO Forest Growth Modelling and Prediction Conference, August 23-27, 1987, Minneapolis, Minnesota: 691-898.

Lappi, J. and Bailey, R. L. 1988. A height prediction model with random stand and tree parameters: an alternative to traditional site index methods. Forest Science 34(4): 907-927.

Lappi, J. 1990a. Calibration of height and volume equations with random parameters. Käsikirjoitus, ilmestynee Forest Science-sarjassa.

Lappi, J. 1990b. Statistical methods for changing and nonhomogeneous forests. Proceedings of the XIX IUFRO World Congress, Montreal, Canada.

MÄNNYN RUNKOMUODON MUUTOS

Risto Ojansuu

Johdanto

Puun kasvun mallituksessa on tähän asti päähuomio kohdistunut tilavuuskasvuun. Tilastolliset puun kasvumallit laaditaan usein erikseen läpimitan tai pohjapinta-alan ja pituuden kasvuille. Tilavuuskasvu saadaan läpimitan ja pituuden avulla laskettujen tilavuuksien erotuksena. Runkomuodon muutos on tällaisessa kasvumallissa mukana siltä osin kuin puun läpimitta ja pituus voivat sitä selittää.

Puun pituudesta H ja pohjapinta-alasta G riippumaton runkomuodon vaikutus tilavuuteen V kuvataan muotoluvulla:

$$F = \frac{V}{GH} \quad (1)$$

Kun muotoluvun määrittämiseen käytetään rinnankorkeuspohjapinta-alaa, muuttuu muotoluvun geometrinen merkitys puun pituuden kasvaessa, koska rinnankorkeus siirtyy puun latvasta kohti sen tyvää. Aidoissa muotoluvuissa ei tätä haittaa ole, koska pohjapinta-alan mittauskorkeus on suhteutettu puun pituuteen. Muotoluku ei kuitenkaan kuvaa runkomuotoa suoraan vaan ainoastaan runkomuodon vaikutuksen tilavuuteen.

Puun runkomuodon muutoksesta ja siihen vaikuttavista tekijöistä on olemassa runsaasti kuvailevaa tietoa. Vuokila (1960) on esittänyt varsin tarkan analyysin männyn iän mukaisesta läpimitan kasvusta mittauskorkeuden funktiona graafeina ja numerosarjoina. Runkomuototeoriat pyrkivät antamaan kausaalisen selityksen runkomuodolle ja sen muutokselle. Paras selitys runkomuodon kehitykselle pystytään tällä hetkellä antamaan mekaanisen runkomuototeorian ja vedenkuljetuskapasiteettiin perustuvan putkimalliteorian avulla.

Tässä esityksessä käsitellään ilmiötä puhtaan tilastollisesti. Rungon muodon ja sen muutoksen operationaaliseen analyysiin tarvitaan tunnuslukuja, jotka kuvaavat ne aidosti riippumattomina puun koosta ja koon muutoksesta eli kasvunopeudesta. Lappi (1986) esitti väitöskirjassaan selkeän tilastollisen ratkaisun rungon muodon analysointiin tältä pohjalta. Se perustuu osaltaan jo aiemmin biotieteissä esitettyihin periaatteisiin yleisestä koon ja muodon määrittelystä (Mosimann 1970 ja Sprent 1972). Seuraavassa tarkastellaan staattista runkomuodon kuvausta Lapin työn pohjalta ja kuinka siitä päästään operationaaliseen kasvunopeuden ja muodon muutoksen kuvaukseen.

Muodon tunnusluvut

Allometrisissä tutkimuksissa biologisen olion koko ja muoto voidaan määrittää käsitteiden mittafunktio (mittavektori), standardi koko ja muotovektori avulla.

Mittafunktio \mathbf{X} on vektori, joka muodostuu biologisesti homologisten eli samansyntyisten pisteiden suoraviivaisista etäisyyksistä. Standardilla koolla tarkoitetaan mittafunktiosta johdettua muuttujaa. Tavallisia tapoja määrittää standardi koko ovat mittafunktion alkioiden aritmeettinen tai geometrinen keskiarvo:

$$S(\mathbf{X}) = \left(\sum_{l=1}^p X_l \right) / k \quad (2a) \quad \text{tai} \quad S(\mathbf{X}) = \left(\prod_{l=1}^p X_l \right)^{1/k}, \quad (2b)$$

missä: $S(\mathbf{X})$ = mittafunktiota \mathbf{X} vastaava standardi koko
 p = mittafunktion alkioiden lukumäärä
 l = mittafunktion alkioiden indeksi

Muotovektori \mathbf{Z} saadaan jakamalla mittafunktion alkioiden arvot standardilla koolla:

$$Z_l = X_l / S(\mathbf{X}). \quad (3)$$

Oliot ovat saman muotoisia, jos niiden mittavektorit ovat suoraan verrannollisia.

Aineisto

Tässä artikkelissa esitetyt numeeriset esimerkit koskevat mäntyä ja perustuvat kertakoeala-aineistoon, joka on kerätty Vuokilan ja Väliahon (1980) "Viljeltyjen havumetsiköiden kasvatustavat" -tutkimusta varten. Aineisto sisältää 130 koalaa, joilta analyseissä on käytetty 705 runkoanalyysipuuta.

Runkomuoto

Mittafunktion ja standardin koon käyttö edellyttää, että puun rungon biologisesti homologiset pisteet voidaan määrittää yksiselitteisesti. Puun rungolla aidosti homologisia pisteitä ovat latvasilmu ja puun syntypiste. Täydentämällä biologisesti homologisten pisteiden avulla määriteltyä mittavektoria geometrisesti analogisilla pisteillä saadaan yksiselitteisesti määritelty runkomuodon kuvaukseen soveltuva mittavektori. Käytetään seuraavassa mittavektorin homologisista ja analogisista pisteistä nimitystä vastin piste.

Yleisimmin käytetyt vastin pisteiden ilmaisutavat runkokäyrätutkimuksissa ovat suorakulmaisessa koordinaatistossa puun **suhteellisten korkeuksien** (esim. Laasasenaho 1982) tai napakoordinaatistossa **vakiokulmien** (esim. Sloboda 1977) avulla määritetyt vastin pisteet. Molemmissa tapoissa koordinaatisto määritetään syntypisteen ja latvasilmun avulla. Suhteellisiä korkeuksia käytettäessä voidaan mittafunktio ilmaista niitä vastaavina läpimittoina ja puun pituutena seuraavasti:

$$\mathbf{X} = (D_1, D_2, D_3, \dots, D_{k-1}, H), \quad (4)$$

missä: D_i = suhteellisen korkeuden i läpimitta
 k = mittafunktion pituus
 H = puun pituus

Käytännön mittaustilanteessa suhteelliset korkeudet voidaan määrittää myös pystyvuista. Niiden käyttö edellyttää kuitenkin aina puun pituuden tuntemista.

Kiinteitä kulmia käytettäessä voidaan mittafunktio ilmaista kulmia vastaavien säteiden pituuksina:

$$\mathbf{X} = [R(u_1), R(u_2), R(u_3), \dots, R(u_k)], \quad (5)$$

missä: $R(u_i)$ = säteen pituus kulmassa u_i
 k = mittafunktion alkioiden lukumäärä.

Säteinä ilmaistut etäisyydet voidaan muuttaa läpimitoiksi ja pituuksiksi $D(u) = \cos(u)R(u)$, jolloin mittafunktio on

$$\mathbf{X} = (D(u_1), D(u_2), D(u_3), \dots, D(u_k)) \quad (6)$$

tai kun u_k on 90°

$$\mathbf{X} = [D(u_1), D(u_2), D(u_3), \dots, D(u_{k-1}), H]. \quad (7)$$

Napakoordinaatistossa tiettyä kulmaa vastaavan läpimitan mittaaminen ei ole käytännössä mahdollista. Muodon muutoksen tarkasteluun napakoordinaatistossa vakiokulmien avulla määriteltä mittafunktio kuitenkin sopii hyvin, koska siinä pituus ja läpimitat ovat samanarvoisia muuttujia. Pituutta ei tarvitse määrittää erikseen mittafunktion läpimittojen korkeuksien määrittämiseksi. Tässä käytetään vastin pisteiden määrittelyyn napakoordinaatistoa ja mittavektori on määritelty 13 kiinteän kulman avulla.

Kun logaritminen skaala ilmaistaan pienillä kirjaimilla, saadaan logaritmiseksi mittafunktioksi

$$\mathbf{x} = [d(u_1), d(u_2), d(u_3), \dots, d(u_{13})]. \quad (8)$$

Ottamalla logaritmi aritmeettisessä skaalassa geometrisena keskiarvona määritetystä standardista koosta saadaan aritmeettinen keskiarvo

$$s = \left[\sum_{i=1}^{13} d(u_i) \right] / 13. \quad (9)$$

Standardi koko voidaan määrittää myös mittafunktion alkioiden painotettuna keskiarvona

$$s = \left[\sum_{i=1}^{13} w_i d(u_i) \right] / 13. \quad (10)$$

Mittafunktion alkioiden kovarianssimatriisin ensimmäinen pääkomponentti tulkitaan yleisesti kooka kuvaavaksi pääkomponentiksi. Seuraavat pääkomponentit kuvaavat muodon poikkeamista keskimääräisestä. Tässä standardin koon painovektorina käytetään ensimmäisen pääkomponentin ominaisvektoria. Ensimmäisen pääkomponentin avulla määritellyn rungon koon ja tilavuuden välillä vallitsee kiinteä riippuvuus. Tässä aineistossa se on aritmeettiseen skaalaan muutettuna

$$\bar{V} = 0.074 S^{2.969}, \quad (11)$$

kun $S = e^s$. Ennusteen hajonta on 4.6 %.

Rungon muotovektorin alkio kulmassa u on

$$Z(u) = D(u)/S. \quad (12)$$

Logaritmiseen skaalaan muutettuna saadaan muotovektorin alkion arvo kulmassa u erotuksena

$$z(u) = d(u) - s. \quad (13)$$

Haluttaessa kuvata muodon vaihtelua populaatiossa on järkevää suhteuttaa se populaation keskimääräiseen muotoon. Merkitään koealalla k puun i muotovektoria z_{ik} , siinä kulmaa u vastaavaa alkioita $z_{ik}(u)$ ja populaation keskiarvoa kulmassa u $\bar{z}(u)$. Tällöin keskimääräiseen muotoon suhteutetun muotovektorin alkio on

$$z_{ik}^{\text{suht}}(u) = z_{ik}(u) - \bar{z}(u). \quad (14)$$

Koska rungon muoto muuttuu puun koon kasvaessa voidaan puun koosta johtuva trivიაali muodon muutos edelleen poistaa kuvaavasta suhteellisesta muotovektorista asettamalla se puun koon suhteen ehdolliseksi. Tällöin populaation keskiarvo kulmassa u korvataan koon suhteen ehdollisella odotusarvolla $E(z_{ik}(u) | s_{ik})$. Merkitään ehdollista muotovektoria e . Sen alkio kulmassa u on

$$e_{ik}(u) = z_{ik}(u) - E(z_{ik}(u) | s_{ik}). \quad (15)$$

Määritelmän mukaan $z_{ik}(u) = d_{ik}(u) - s_{ik}$ ja toisaalta ehdollinen muotovektori on logaritmisessa skaalassa ehdollisen mittavektorin ja koon erotus $[E(d_{ik}(u) | s_{ik}) - s_{ik}]$. Kaava 15 voidaan siis kirjoittaa muotoon

$$e_{ik}(u) = [d_{ik}(u) - s_{ik}] - [E(d_{ik}(u) | s_{ik}) - s_{ik}]. \quad (16)$$

supistamalla koko s pois saadaan edelleen

$$e_{ik}(u) = d_{ik}(u) - E(d_{ik}(u) | s_{ik}). \quad (17)$$

Näin ehdollinen muotovektori on määritelty mittavektorin ja ehdollisen mittavektorin avulla. Ehdollisen mittavektorin alkioita voidaan määrittää regressioanalyysillä solmukulmittain. Ehdollinen muotovektori muodostuu regressiomallien residuaaleista ja sen vaihtelu on suoraan regressiomallin kiinteän osan suhteen ehdollista muodon vaihtelua.

Metsänmittauksen aineistot kerätään yleensä koealaotannalla. Tällöin aineiston puut eivät ole toisistaan riippumattomia vaan saman koealan puiden ominaisuudet korreloivat keskenään voimakkaammin kuin eri koealojen. Ehdollinen muotovektori voidaan jakaa kahteen komponenttiin, koealojen väliseen ja koealojen sisäiseen:

$$e_{ik}(u) = v_k(u) + \varepsilon_{ik}(u) \quad (18)$$

$v_k(u)$ = poikkeama populaatiokeskiarvosta koealalla k
 $\varepsilon_{ik}(u)$ = puun i poikkeama koealan k keskiarvosta.

Muotoa kuvaavaksi malliksi saadaan

$$d_{ik}(u) = E(d_{ik}(u)|s_{ik}) + v_k(u) + \varepsilon_{ik}(u) . \quad (19)$$

Lopullinen rungon muotoa kuvaava malli koostuu vastinpisteitä vastaavista 13:sta yhtälöstä ja niiden koealavaikutusten (v) sekä erikseen puuvaikutusten (e) kovarianssimatriiseista. Mallien parametrit voidaan ratkaista lineaarisella sekamallitekniikalla. Mallin kiinteä osa on muotoa

$$E(d_{ik}(u)) = \alpha_0 + \alpha_1 s_{ik} + \alpha_2 s_{ik}^2 + \alpha_3 (s_{ik} - \bar{s}_k) . \quad (20)$$

Mallissa puun muoto on ehdollistettu koon lisäksi koealan rungon keskikoolle \bar{s} . Rungon koon ja koealan keskikoon logaritmien erotus kuvaa puun kilpailuasemaa koealalla.

Yleensä metsänmittaajaa kiinnostavat puujoukon (koealan, metsikön jne.) puiden ominaisuudet eikä niinkään yksittäisen puun ominaisuudet. Tässä esityksessä rajoitutaan runkomuodon ja sen muutoksen koealojen väliseen tarkasteluun. Se ilmaistaan koealan muotovektorin

$$\mathbf{v} = [v(u_1), v(u_2), \dots, v(u_{13})]$$

avulla. Analoginen tarkastelu voidaan tehdä myös koealan sisäisestä puiden muodon vaihtelusta puun muotovektorin

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon(u_1), \varepsilon(u_2), \dots, \varepsilon(u_{13})]$$

avulla.

Muotovektori on sellaisenaan epätaloudellinen tapa kuvata muotoa, koska se vaatii 13 periaatteessa saman arvoista muuttujaa. Pääkomponenttianalyysin avulla voidaan muodon kuvaus tiivistää muutamaa keskenään riippumattomaan muuttujaan. Lähtökohtana on koealan muotovektorin \mathbf{v} kovarianssimatriisi \mathbf{V} . Kolme ensimmäistä pääkomponenttia selittävät koealojen välisestä muodon vaihtelusta lähes 99 %.

Rungon kasvu ja runkomuodon muutos

Edellä rungon muoto on kuvattu koon suhteen ehdollisena. Siirrytään nyt tarkastelemaan rungon muodon muutosta. Lähtökohtana on kuoreton runkokäyrä kahtena peräkkäisenä hetkenä. Ilmaistaan yläindeksillä 1 runkokäyrää hetkellä t ja yläindeksillä 2 hetkellä $t-5$. Malli sisäkkäisille runkokäyriille muodostuu vastinpisteiden regressioista koon funktiona. Erillisiä regressiomalleja on siis 26 kappaletta. Sekä ulomman (21a) että sisemmän (21b) runkokäyrän selittäjänä käytetään kokoa hetkellä t :

$$d_{ik}^1(u) = E[d_{ik}^1(u) | s_{ik}^1] + v_k^1(u) + \varepsilon_{ik}^1(u) \quad (21a)$$

$$d_{ik}^2(u) = E[d_{ik}^2(u) | s_{ik}^1] + v_k^2(u) + \varepsilon_{ik}^2(u), \quad (21b)$$

missä: $d_{ik}^1(u)$ = kulmaa u vastaava ulomman runkokäyrän (yläindeksi 1) läpimitta

$d_{ik}^2(u)$ = kulmaa u vastaava sisemmän runkokäyrän (yläindeksi 2) läpimitta

$E[d_{ik}^1(u) | s_{ik}^1]$ = ulomman runkokäyrän kulmaa u vastaavan läpimitan odotusarvo
ulompaa käyrää vastaavan koon suhteen

$E[d_{ik}^2(u) | s_{ik}^1]$ = sisemmän runkokäyrän kulmaa u vastaavan läpimitan odotusarvo
ulompaa käyrää vastaavan koon suhteen.

Mallin kiinteän osan ratkaisun yhteydessä saadaan kovarianssimatriisi erikseen molempien sisäkkäisten runkokäyrien kulmien välille (V^1 , V^2) ja runkokäyrien välinen kovarianssimatriisi ($V^{1,2}$). Tällöin sisäkkäisten käyrien yhteinen muodon koelavaikutusten kovarianssimatriisi on

$$V = \begin{pmatrix} V^1 & V^{1,2} \\ V^{1,2} & V^2 \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Muodon muutos on $v^{1-2} = v^1 - v^2$. Kaavasta 22 voidaan ratkaista

$$V = \begin{pmatrix} V^1 & V^{1,(1-2)} \\ V^{1,(1-2)} & V^{1-2} \end{pmatrix}, \quad (23)$$

missä V^{1-2} on sisäkkäisten runkokäyrien koelavaikutusten erotusten [$v^1(u) - v^2(u)$] kovarianssimatriisi ja $V^{1,(1-2)}$ on ulomman runkokäyrän koelavaikutuste ja erotuskäyrän koelavaikutusten välinen kovarianssimatriisi.

Malliin voidaan lisätä myös kuori. Merkitään kuorellista logaritmita läpimittaa hetkellä td^0 . Samalla ehdollistetaan muoto rungon kuorelliselle koolle (s_{ij}^0) hetkellä t :

$$d_{ij}^0(u) = E(d_{ij}^0(u) | s_{ij}^0) + v_j^0(u) + \varepsilon_{ij}^0(u) \quad (24a)$$

$$d_{ij}^1(u) = E(d_{ij}^1(u) | s_{ij}^0) + v_j^1(u) + \varepsilon_{ij}^1(u) \quad (24b)$$

$$d_{ij}^2(u) = E(d_{ij}^2(u) | s_{ij}^0) + v_j^2(u) + \varepsilon_{ij}^2(u) \quad (24c)$$

Koelavaikutusten kovarianssimatriisiksi muodostuu

$$V = \begin{pmatrix} V^0 & V^{0,1} & V^{0,2} \\ V^{0,1} & V^1 & V^{1,2} \\ V^{0,2} & V^{1,2} & V^2 \end{pmatrix}, \quad (25)$$

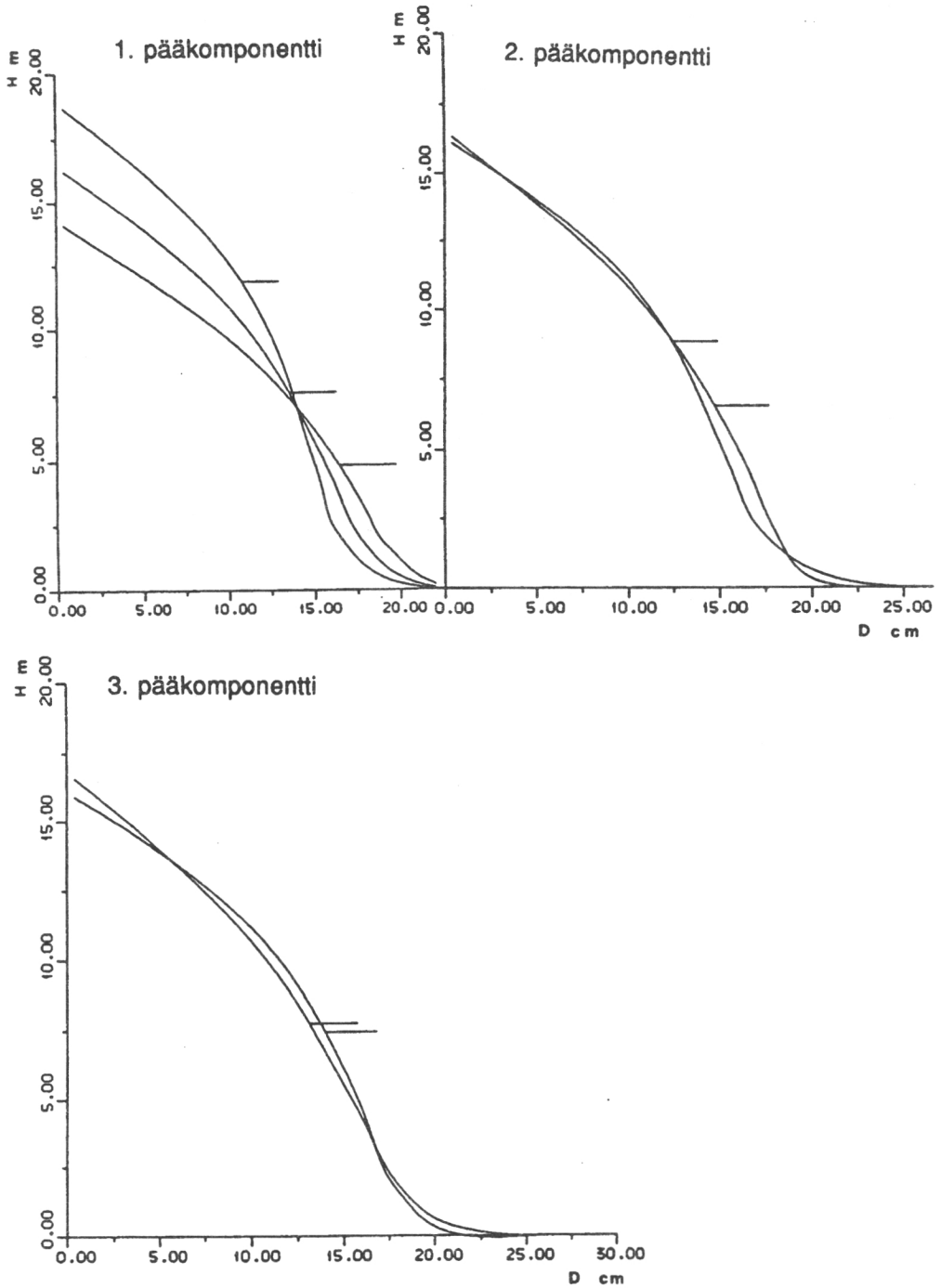
missä V^0 = kuorellinen runkokäyrä
 V^1 = kuoreton runkokäyrä
 V^2 = kuoreton runkokäyrä hetkellä $t - 5$.

Tästä saadaan edelleen muodostettua kovarianssimatriisi kuorellisen runkokäyrän muodon koelavaikutuksille, kuoren koelavaikutuksille ja menneen kasvun koelavaikutuksille:

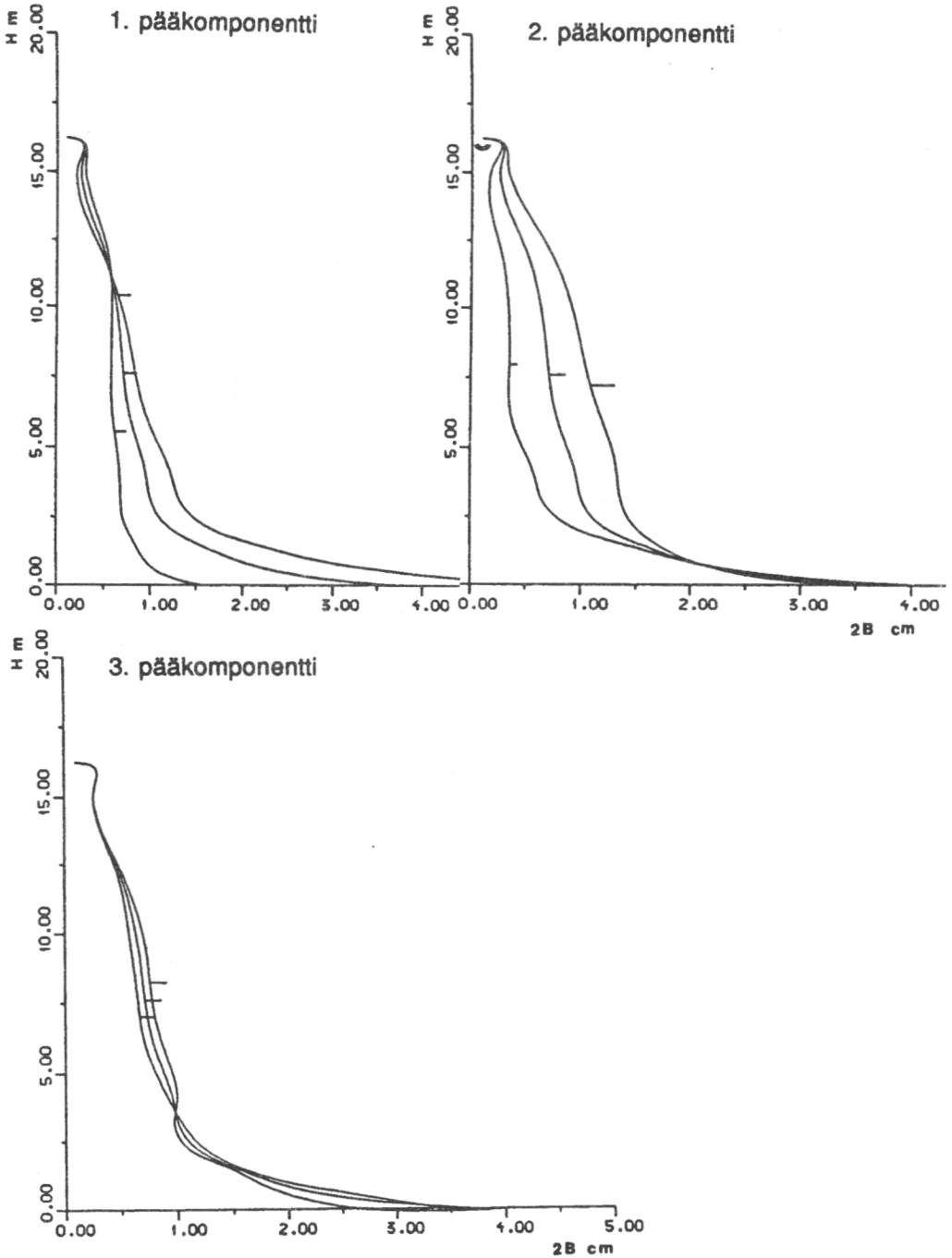
$$V = \begin{pmatrix} V^0 & V^{0,(0-1)} & V^{0,(1-2)} \\ V^{0,(0-1)} & V^{(0-1)} & V^{(0-1),(1-2)} \\ V^{0,(1-2)} & V^{(0-1),(1-2)} & V^{(1-2)} \end{pmatrix} \quad (26)$$

missä V^0 = kuorellisen runkokäyrän koelavaikutukset
 $V^{(0-1)}$ = kuorikäyrän koelavaikutukset
 $V^{(1-2)}$ = kasvukäyrän koelavaikutukset.

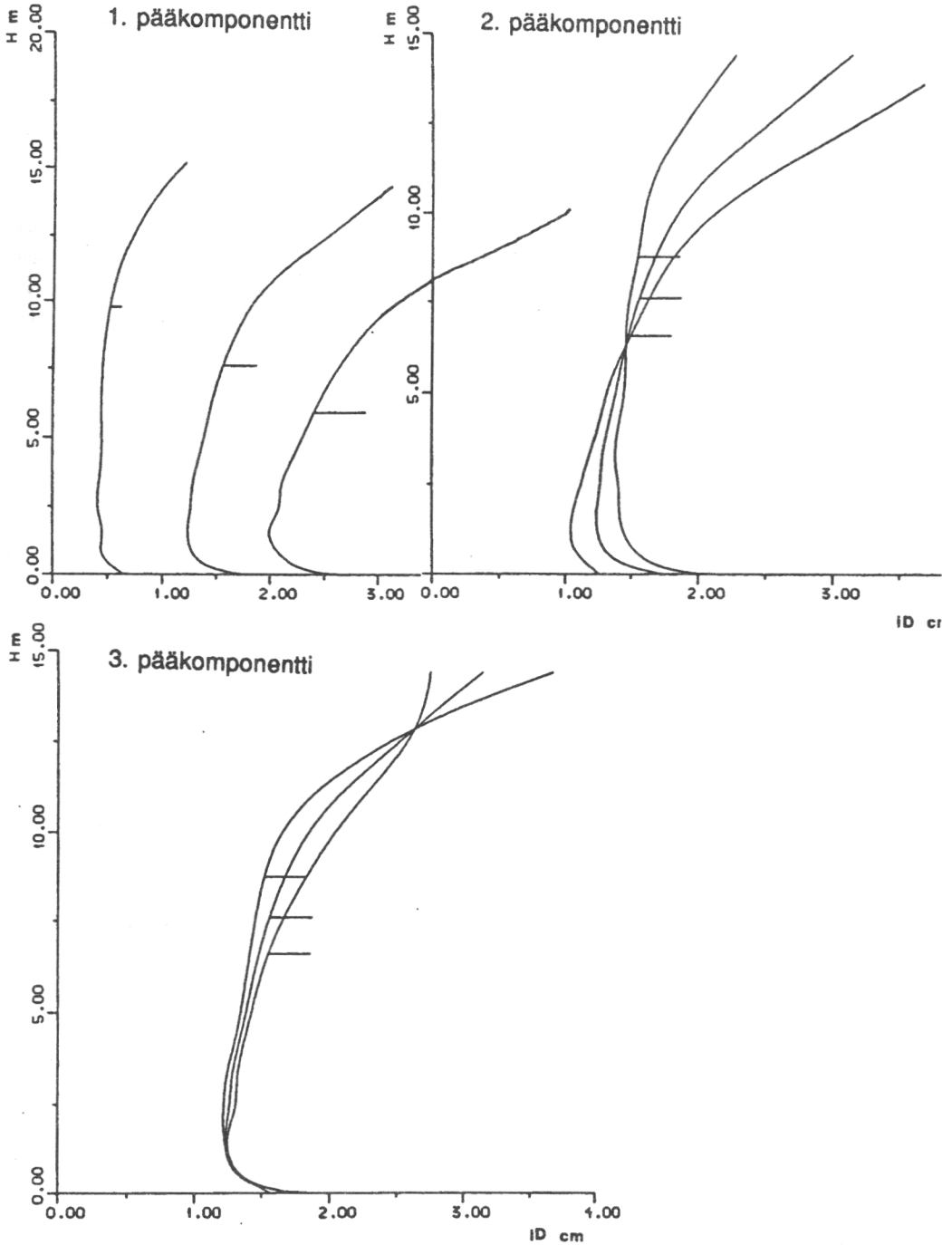
Matriisin V^0 pääkomponentit kuvaavat kuorellisen runkomuodon vaihtelua matriisin $V^{(0-1)}$ kuoren vaihtelua ja matriisin $V^{(1-2)}$ kasvun vaihtelua. Kuvissa 1-3 on esitetty näiden matriisien pääkomponenttianalyysin tuloksia. Mittarina on käytetty pääkomponentin vaihtelun kaksinkertaista standardipoikkeamaa. Muotomatriisin 1 pääkomponentti kuvaa solakkuuden vaihtelua. Se selittää 92.3 % muodon kokonaisvaihtelusta. Seuraavat pääkomponentit selittävät muuta runkomuodon vaihtelua siten, että kaksi ensimmäistä selittävät yhdessä 97.0 % ja kolme ensimmäistä 98.7 % muodon kokonaisvaihtelusta.



Kuva 1. Runkokäyrän koealavaikutukset kolmen ensimmäisen pääkomponentin suunnassa. Kuvissa on esitetty populaation keskiarvokäyrän molemmiin puolin pääkomponentin kaksinkertaisen standardipoikkeaman päässä olevat käyrät. Lisäksi pääkomponenttien arvoja vastaavat latvusrajan odotusarvot on esitetty lyhyillä poikkiviivoilla.



Kuva 2. Kuorikäyrän koealavaikutukset kolmen ensimmäisen pääkomponentin suunnassa. Kuvissa on esitetty populaation keskiarvokäyrät ja niiden molemmiin puolin pääkomponentin kaksinkertaisen standardipoikkeaman päässä olevat käyrät. Lisäksi pääkomponenttien arvoja vastaavat latvusrajan odotusarvot on esitetty lyhyillä poikkiviivoilla.



Kuva 3. Kasvukäyrän koelavaikutukset kolmen ensimmäisen pääkomponentin suunnassa. Kuvissa on esitetty populaation keskiarvokäyrät ja niiden molemmiin puolin pääkomponentin kaksinkertaisen standardipoikkeaman päässä olevat käyrät. Lisäksi pääkomponenttien arvoja vastaavat latvusrajan odotusarvot on esitetty lyhyillä poikkiviivoilla.

Kuoren ja kasvun koealavaikutusten kovarianssimatriisit sisältävät tilavuuden ja muodon vaihtelun. Kuoren ensimmäinen pääkomponentti kuvaa lähinnä kuoren paksuutta puun tyvellä, toinen kuoren paksuutta koko rungolla ja kolmas epäsäännöllisempää kuoren paksuuden korkeussuuntaista vaihtelua. Ensimmäinen pääkomponentti selittää 89.0 % kuoren kokonaisvaihtelusta, kaksi ensimmäistä 97.6 % ja kolme ensimmäistä 99.1 %.

Kasvun ensimmäinen pääkomponentti kuvaa selkeästi kasvun määrää eli kasvunopeutta. Toinen pääkomponentti kuvaa solakkuusasteen muutosta ja voidaan tulkita muotomatriisin ensimmäisen pääkomponentin muutokseksi ajassa. Kolmas ja sen jälkeiset pääkomponentit kuvaavat runkomuodon vähäisempää ja tulkinnallisesti epämääräistä vaihtelua. Ensimmäinen pääkomponentti selittää kasvun vaihtelusta 91.5 %, kaksi ensimmäistä 98.2 % ja kolme ensimmäistä 99.4 %. Jos poistetaan ensimmäisen pääkomponentin kuvaama kasvunopeuden vaihtelu, selittää toinen pääkomponentti 79 % muodon muutoksen vaihtelusta. Toinen ja kolmas pääkomponentti selittävät yhteensä muodon muutoksen vaihtelusta 93 %.

Muodon muutokseen vaikuttavat tekijä

Edellä esitetty tulos erottaa selkeästi puun kasvunopeuden ja muodonmuutoksen toisistaan riippumattomiksi muuttujiksi. Ne voidaan mallittaa toisistaan riippumattomasti. Esim. tilanteessa, jossa kasvunopeus saadaan massatasemallista, voidaan runkomuodon muutos mallittaa siitä riippumattomasti tilastollisella analyysillä. Kasvun koealavaikutuksen pääkomponenttien korrelaatioita joidenkin puu- ja koealatunnusten kanssa on esitetty taulukossa 1. Koealavaikutuksista on poistettu puun koon ja aseman suhteen ehdollinen vaihtelu mallin 20 avulla, joten korrelaatiokertoimet eivät ole vertailukelpoisia suoraan aineistosta laskettuihin puustotunnusten korrelaatiokertoimiin.

Kasvunopeuden kanssa voimakkaimmin korreloiva puutunnus on kuoren paksuus puun tyvellä. Mitä ohuempi kuori on puun tyviosassa, sitä suurempi kasvunopeus. Latvusrajan korkeus ja puun solakkuus korreloivat voimakkaasti kasvunopeuden kanssa. Latvusrajan ja solakkuuden välinen korrelaatiokerroin on -0.81. Tyvekkäillä puilla on pitkä latvus ja ne kasvavat nopeimmin. Kasvu- paikkaa kuvaava lämpösumma korreloi selvästi voimakkaammin kasvun kanssa kuin puustotunnukset ikä ja pohjapinta-ala.

Taulukko 1. Puun koon ja aseman suhteen ehdollisia rungon kasvun koealavaikutusten pääkomponenttien ja eräiden puu- sekä koealatunnusten välisiä korrelaatioita.

		Kasvun pääkomponentti		
		1	2	3
		(kasvu nopeus)	(solakkuuden muutos)	(muu muodon muutos)
Muodon pääkomponentit	1. (solakkuus)	-.24	-.24	-.12
	2.	.27	.34	.01
	3.	-.10	-.24	-.14
Kuoren pääkomponenti	1. (kuori tyvellä)	.50	.32	.07
	2.	.36	-.09	.24
	3.	-.15	-.07	.27
Latvusrajan korkeus		.46	.26	.25
Lämpösumma		-.40	.27	.25
Koealan keski-ikä		.27	.30	.26
Koealan pohjapinta-ala/ha		.24	-.05	-.29

Muodon muutoksen riippuvuus puu- ja koealamuuttujista on heikompi kuin kasvunopeuden. Puun solakkuus ja solakkuuden muutos korreloivat negatiivisesti, eli solakkuuden muutoksen suunta on keskimäärin kohti populaation keskiarvoa. Kuoren ensimmäisen pääkomponentin ja solakkuuden muutoksen välinen positiivinen korrelaatio merkitsee, että tyveltään paksukuoristen puiden läpimitan kasvu puun tyvellä on suhteellisesti heikompi kuin pituuskasvu. Mitä suurempi lämpösumma kasvupaikalla on tai mitä vanhempaa tietyn kokoinen puusto on, sitä voimakkaampaa on läpimitan kasvu puun tyvellä verrattuna pituuskasvuun.

Lopuksi

Edellä esitettyjä tuloksia arvioitaessa on muistettava, että ne on saatu mallilla sen omassa laadinta-aineistossa. Tulosten yleistäminen ja tarkempien johtopäätösten teko edellyttää mallin testaamista laadinta-aineistosta riippumattomaan aineistoon. Mallin perusrakenne antaa kuitenkin mahdollisuuden monipuoliseen tilastolliseen analyysiin puun runkomuodosta, sen muutoksesta ja puun tilavuuskasvusta. Tässä esitetyt kasvunopeuden ja runkomuodon muutoksen korrelaatiot ovat esimerkki analyyseistä, jota mallin avulla voidaan tehdä kasvunopeudesta ja puun ominaisuuksien välisestä riippuvuudesta. Jatkoanalyysit osoittavat, voidaanko menetelmällä parantaa tilastollisia kasvumalleja.

Kirjallisuutta

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.

Lappi, J. 1986. Mixed linear models for analysing and predicting stem form variation of Scots pine. Seloste: Männyn runkomuodon analysointi ja ennustaminen lineaaristen sekamallien avulla. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 134.

Mosimann, J.E. 1976. Size allometry: Size and shape variables with characterisations of lognormal and generalized gamma variabes. Journal of the American Statistical Association 65: 930-945.

Päivinen, R. ja Nousiainen, M. 1987. Koepuutunnusten mittausvirheet. Käsikirjoitus.

Sloboda, H. 1977. Die Beschreibung der Dynamik der Schaftformfortpflanzung mit Hilfe der Ähnlichkeitsdifferentialgleichung und Affinität. Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien 120: 53-60.

Sprent, P. 1972. The mathematics of size and shape. Biometrics 28: 23-37.

Vuokila, Y. 1960. Männyn runkomuodon muutoksesta. Metsätaloudellinen aikakauslehti 6.

Vuokila, Y. ja Väliaho, H. 1980. Viljeltyjen havumetsiköiden kasvumallit. Summary: Growth and yield models for conifer cultures in Finland. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 99.2.

KASVUMALLIEN KALIBROINTI KÄYTÄNTÖÄ VARTEN

Jarmo Leskinen

Kasvumallin kehittämissä vaiheissa maastotieto kerätään yleensä laajalta alueelta useampien vuosien aikana. Tällä tavoin rakennetut kasvumallit antavat luotettavia keskimääräisiä ennusteita laajoille alueille, mutta pienempien alueiden ja yksittäisten kuvioiden kannalta ennusteet saattavat olla harhaisia. Pääsyy tähän on se, että metsien rakenne voi olla hyvinkin erilainen eri alueilla. Lisäksi paikalliset ilmastolliset olosuhteet ja metsiköiden aikaisempi käsittely vaikuttavat selvästi metsikön tulevaan kehitykseen.

Monen kasvumallin laadinta-aineistona on käytetty koealoja, jotka ovat hyvälaatuisia ja joissa ei tavata lainkaan tai ainoastaan vähän tuhoja. Tällöin kasvumallin ennuste saadaan helposti todellisuutta suuremmaksi.

Kasvumallien kalibroinnin lähtökohdaksi on, että tarvitaan alueellisesti luotettavia kasvuennusteita. Niinpä kasvumallien kalibroinnilla pyritään hankkimaan paikalliselle alueelle soveltuvaa, luotettavaa tietoa metsien tulevasta kasvusta. Menetelmään liittyy olennaisesti lisäinformaation keräys maastomittausten avulla. Näiden maastomittauksien ja mallin antaman ennakkoinformaation avulla pyritään aikaansaamaan mahdollisimman hyviä kasvuennusteita. Kuvassa 1 on esitetty yleiskuvaus kasvumallin kalibroinnista.

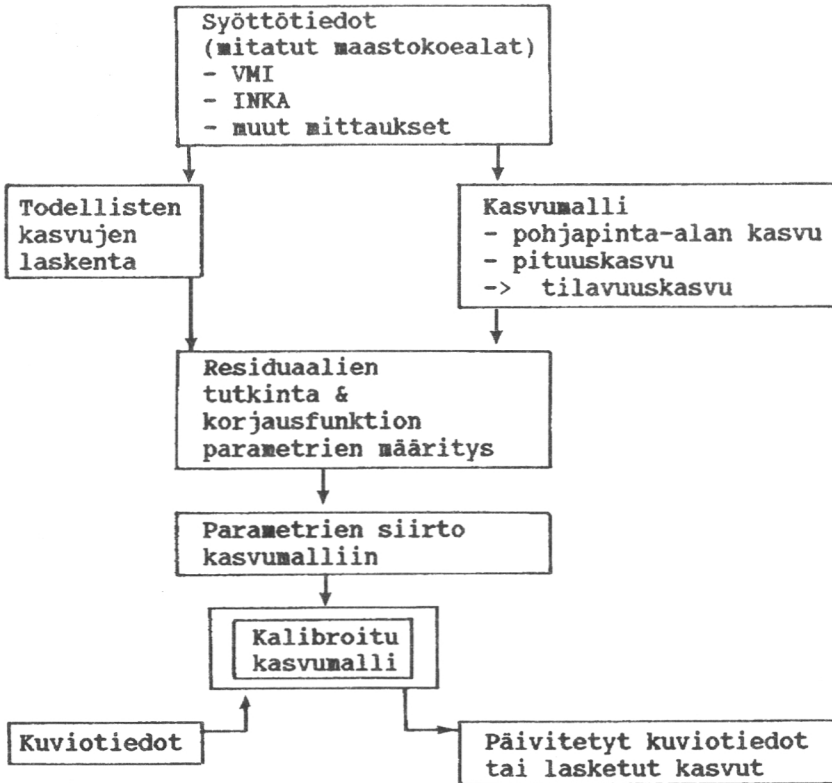
Maastoaineistona kalibroinnissa voidaan käyttää sekä kertakoealoja että pysyviä koealoja. Mitattujen säde- ja pituuskasvujen avulla johdetaan lasketut kasvutunnukset, joita käytetään todellisina kasvulukuina. Maastokoealojen mittauksessa on tärkeää, että mitattu maastoaineisto on edustavaa tutkittavan alueen kannalta. Maastomittaukset tulisi kuitenkin tehdä samana vuonna, sillä tällöin ilmaston aiheuttama vuotuinen kasvunvaihtelu ei vaikuta mittauksien yhdistämiseen.

Ilmastotekijä ei varsinaisesti vaikuta käytettävään kalibrointimenetelmään. Kuitenkin ilmastokorjaus tulisi ottaa huomioon silloin, kun halutaan keskimääräisiä kasvuennusteita.

Kasvunlaskentajaksona käytetään yleisesti viittä vuotta, joten mitatut maastokoealatiedot muutetaan vastaamaan kasvunlaskentajakson alun tietoja ennen kasvumalleihin siirtämistä. Kasvumallien avulla lasketaan estimoidut pohjapinta-ala, pituuden ja tilavuuden kasvuennusteet. Todellisten ja estimoitujen kasvujen residuaalien tarkastelulla pyritään määrittämään tarvittavan korjausfunktion muoto ja parametrit.

Lasketut parametrit siirretään kasvumalliin, jolloin tuloksena on valmis kalibroitu kasvumalli. Tälle parannelulle mallille syötetään kuviotietoja ja sen avulla lasketaan halutulle alueelle kasvutunnukset. Eli kasvumallin avulla lasketaan korjattuja kasvun ennusteita. Kasvumalleja on sekä metsikkötietoihin perustuvia että puittaisia malleja. Tämä täytyy ottaa huomioon myös kalibroin-

nissa. Niinpä kalibrointimenetelmiä on kehitetty erikseen puittain ja metsiköittäin. Useimmiten käytännön metsätaloudessa lopullisena tavoitteena on kuitenkin kuvioittaisten kasvatulosten harhattomuus, joten puittain korjattuja tuloksia tarkastellaan myös kuvioittaisiksi muunnettuna.



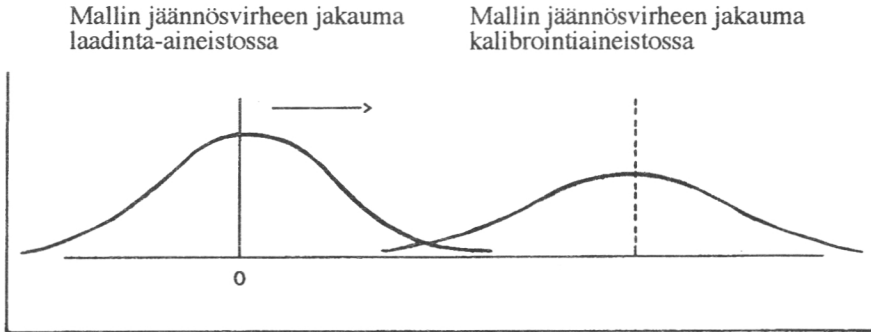
Kuva 1. Yleiskuvaus kasvumallin kalibroinnista

Perinteisesti kalibroinnissa käytettävä menetelmä on regressiomallit. Tällöin mallin ennustaman ja maastokoealoilta mitatun kasvun ero mallitetaan regressiomallien avulla. Toinen uudenaikaisempi menetelmä on puittaisen kasvun eron mallittaminen sekamallitekniikalla. Sekamallien etuna on, että niiden avulla voidaan paremmin ottaa huomioon kahden tason muuttujia, kasvumallien tapauksessa sekä puittaisia että kuvioittaisia.

Varsinaisen kalibroinnin lähtökohta on valmis kasvumalli, joka antaa suhteellisen luotettavia ennusteita suuralueille ja rakenteeltaan normaaleille metsiköille. Kalibroinnin avulla tavoitteena on löytää mitattujen maastokoealojen avulla sellaisia metsikkö- tai puutekijöitä, joiden avulla muodostetaan alkuperäisen kasvumallin korjausfunktiot.

Kalibrointimenetelmää määritettäessä on erityistä huomiota kiinnitettävä mitatun maastoaineiston määrään ja laatuun. On intuitiivisesti selvää, että mittausaineiston ollessa heterogeenistä se ei ole läheskään yhtä luotettavaa kuin homogeeninen, runsas maastoaineisto. Niinpä kasvujen eron mallitukseen liitetään painotustekijä, joka ottaa huomioon maastoaineiston määrän ja laadun.

Kuvassa 2 on havainnollistettu kalibroinnin painotusongelmaa. Kuvassa on kaksi eri jakaamaa: toinen mallille ja toinen mitatulle lisäinformaatille. Näiden jakaumien perusteella päätellään, miten kalibrointia on painotettava, että saataisiin luotettavampia kasvuennusteita. Kuvassa nuoli osoittaa tarvittavan korjauksen suunnan. Varsinaisen painotustekijän avulla pyritään säätämään korjauksen voimakkuutta siten, että korjauksesta tulisi luotettava.



Kuva 2. Kalibrointiongelman kuvaus.

Periaatteessa ongelmana on siis löytää oikea paino, jolla korjausta suoritetaan suhteessa mitattuun koelamäärään ja sen hajontaan. Jos koelamäärä on vähäinen tai koalojen hajonta on suurta korjauksen paino on luonnollisesti pieni, sillä tällöin mallin antama ennuste on luotettavampaa verrattuna vähäiseen heterogeeniseen maastomittaustietoon.

Kaavan 1.1 avulla on pyritty selvittämään painotustekijää ja koalojen lukumäärän sekä aineiston hajonnan vaikutusta siihen.

$$\frac{s^2}{s^2 + \tau \cdot s_i^2 / n_i} \quad (1.1)$$

, missä

- s^2 = varianssi kasvumallin laadinta-aineistossa
- s_i^2 = varianssi ositteessa i
- n_i = koalojen lukumäärä ositteessa i
- τ parametri

Kasvumallin laadinta-aineiston varianssin (s^2) avulla selitetään alkuperäisen mallin vaihtelua. Ositteen varianssi (s_i^2) ja koalojen lukumäärä (n_i) kuvaavat maastokoealojen vaihtelua. Kalibrointimenetelmän paino tulee suuremmaksi kun maastokoealoilta mitattu tieto on luotettavaa eli kun maastokoealoja on paljon tai ne ovat homogeenisia (niiden välinen hajonta ei ole suurta).

Kalibroinnin painotustekijään on metsiköiden vaihtelua kuvaavien termien eteen lisätty parametri τ (fii). Tämän parametrin avulla pyritään painotustekijä saattamaan sellaiseen muotoon, että se minimoisi kalibroidun aineiston harhan ja hajonnan.

Lopullinen kasvumalli kalibroidaan mallituksen avulla saadulla korjausfunktioilla. Sopivalla selitettävän ja selittävien tekijöiden muunnoksella voidaan tulosten tarkkuutta parantaa. Yleisesti kasvumalleissa käytetään logaritimuunnosta, sillä tällöin jakaumaoletukset saadaan hyödynnettyä

paremmin (esim. jäännösvaihtelun homogeenisoiminen). Lisäksi logaritmisoinnilla on muitakin hyödyllisiä ominaisuuksia, esimerkiksi kasvu ei voi olla nolaa pienempi, minkä logaritmin alaraja ottaa huomioon.

Kaavassa 1.2 on esitetty yksinkertainen esimerkki kalibrointifunktiosta. Tällöin on kyseessä kuvioittainen kalibrointi yksinkertaisella regressiomallilla, kun mukana on vain yksi selittävä tekijä. Lisäksi esimerkissä käytetään logaritmuunnosta.

$$(1.2) \quad \hat{Y}_{ij} = \hat{Y}_{ij} * e^{((\ln(\hat{R}_{ij}) + s_i^2/2) * \frac{s^2}{s^2 + \tau * s_i^2/n_i})}$$

$$\text{ja } \ln(R_{ij}) = \alpha_0 + \alpha_1 * \ln(Z_{ij}) + \ln(e_{ij})$$

$$R_{ij} = Y_{ij} / \hat{Y}_{ij}$$

,joissa :

Y_{ij} = korjattu kasvun ennuste ositteen i koealalla j

\hat{Y}_{ij} = mallin antama kasvun ennuste ositteen i koealalla j

Y_{ij} = todellinen (mitattu) kasvu ositteen i koealalla j

\hat{R}_{ij} = todellisen ja estimoidun kasvun suhteen estimaatti

R_{ij} = todellisen ja estimoidun kasvun suhde

Z_{ij} = selittävä muuttuja (esim. koealan pohjapinta-ala)

$s_i^2/2$ = logaritmisoinnin takaisinmuunnoksen korjaustermi

e_{ij} = yhtälön satunnainen virhetermi

α_0 ja α_1 parametrejä

Soveltamisvaiheessa kalibroinnin onnistumista pyritään lisäämään jakamalla suuri aineisto pienempiin ositteisiin. Tällöin jokaiselle ositteelle määritellään kalibrointifunktion avulla omat parametrit, joiden avulla lasketaan lopulliset kalibroidut kasvuennusteet.

Metsähallituksessa on tutkittu kalibroinnin onnistumista kokeilualueena Kainuu. Aineistona käytettiin metsähallituksen hallussa oleville alueille sattuneita VMI 6- ja VMI 7 - koealoja. Tutkimuksessa käytettiin MELA-ohjelmiston kasvumalleja.

Alkuperäisestä aineistosta rajattiin pois sellaiset koealat, joissa puustoa oli hakattu laskentajakson aikana. Lisäksi aineistosta poistettiin haaroittuneet, latvatuhoiset ja luononpoistumaan kuuluvat puut. Lopulliseen aineistoon kuuluu VMI 6: ssa kaikkiaan 220 ja VMI 7:ssä 215 koealaa.

VMI 7 -aineistossa alkuperäinen tilavuuskasvun harha oli 3.4 % ja keskihajonta 40.3 %. Mallin mukaan tilavuuskasvu oli keskimäärin 8.44 m³/5v ja mittausten mukaan 8.41 m³/5v. Harha oli jo ennen kalibrointia suhteellisen pieni, mutta residuaalien tarkastelussa korrelaatiodiagrammien avulla havaittiin, että koealan pohjapinta-alan tai tilavuuden kasvaessa residuaalien harha kasvoi muodostaen selvän trendin.

Kyseisessä aineistossa malli aliarvioi tilavuuskasvun vähäpuustoisilla tai pienen pohjapinta-alan omaavilla koealoilla. Sen sijaan suurilla koealan pohjapinta-alan arvoilla malli selvästi yliarvioi tilavuuskasvun.

MELA-ohjelmiston kasvumallit on tehty erikseen pituuden ja pohjapinta-alan kasvuille. Niinpä tutkimuksessa kalibroidaan sekä pituuskasvua että pohjapinta-alan kasvua paremman tilavuuskasvun estimaatin saamiseksi.

Varsinaisten korjausfunktion antamien tulosten luotettavuuden laskennassa käytetään seuraavaa menetelmää. Aluksi (1) poimitaan aineistosta satunnaisesti tietty määrä koealoja. Näille koealoille suoritetaan (2) kalibrointi eli lasketaan korjausfunktion kerrointen arvot. Kalibroidulla mallilla (3) lasketaan ennusteet lopuille koealoille eli korjaus yleistetään aineistoon, josta on poistettu kalibroinnissa käytetyt koealat.

Kalibroinnin vaikutusta voidaan tutkia empiirisesti laskemalla aineiston harha ja keskineliöpoikkeama (MSE) sekä ennen korjausta että sen jälkeen. Korjauksen keskimääräinen vaikutus saadaan selville toistamalla poimintaa useita kertoja ja laskemalla toistojen keskimääräiset harhat sekä keskineliöpoikkeamat. Korjausfunktion painotusermin vaikutusta voidaan tutkia laskemalla tuloksia eri koealamäärille. Samalla saadaan jonkinlainen kuva otosmäärän vaikutuksesta korjauksen onnistumiseen.

Lisäksi tulosten laskennassa on tutkittu menetelmää, jossa on tehty vain tilastollisesti merkittävät korjaukset. Menetelmänä on käytetty t-testiä mallin kertoimien merkitsevyyden testaamiseksi. Jos regressiokerroin ei ole merkitsevä, niin luotettavuuden laskennassa huomioidaan vain tasokorjaus eli vakiotermille lasketaan arvo estimoidun ja todellisen pohjapinta-alan kasvun erojen avulla.

Kyseisellä menetelmällä on laskettu tuloksia myös erilaisille ositteille, jotta saataisiin selville korjauksen vaikutus sekä homogeeniseen että heterogeeniseen kalibrointiaineistoon.

Kalibroinnin onnistumisesta on esimerkki kuvassa 3. Esimerkissä on tarkasteltu kuvioittaisen pohjapinta-alan kasvun simulointituloksia, kun koealamäärä on 3... 50. Aineistona on VMI 7:n kangasmaiden männiköt. Kuvasta havaitaan, että alkuperäinen harha säilyy luonnollisesti lähes vakiona kalibrointikoealamäärästä riippumatta. Korjauksen vaikutuksesta harha pienenee lukuunottamatta kalibrointikoealamäärää 4. Tällainen poikkeus johtuu siitä, että yritämme painottaa ainoastaan muutamalla koealalla koko aineistoa.

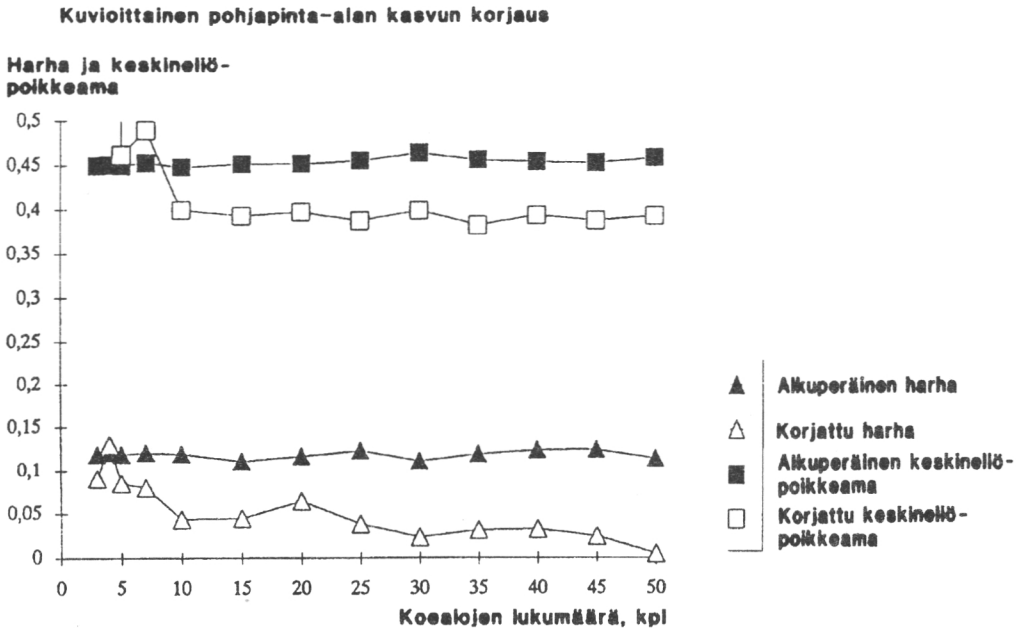
Tässä esimerkissä keskineliöpoikkeama on pienimmillään noin 20 % alhaisempi kalibroidussa aineistossa. Keskimääräisten kasvulukujen avulla saamme pienimmäksi harhan arvoksi 0.4 % (vastaava kalibroimaton 8.3 %) ja MSE:n suhteelliseksi arvoksi 28.5 % (kalibroimaton 33.2 %).

Tutkimuksen lopulliset tulokset lasketaan vastaavalla tavalla koko aineistolle. Pituuden ja pohjapinta-alan kasvut kalibroidaan siis ositteittain ja näistä tuloksista saadaan lopulliset tilavuuskasvun estimaatit.

Menetelmänä kalibroinnin tulisi soveltua sekä suurille että pienille alueille. Mallin perusidea kuitenkin on, että kalibrointi tehdään pienehköille alueille. Osittamisen tulisi kuitenkin noudattaa paikallisia olosuhteita. Jos jollakin alueella on runsaasti yhteen ositteeseen kuuluvia koealoja, voi kalibroinnin kannalta olla järkevää jakaa suuri osite kahteen tai useampaan pienempään ositteeseen.

Kalibroinnin avulla pyritään vähentämään alkuperäisen kasvumallin kasvuennusteiden harhaa ja hajontaa. Yksi tärkeimmistä kalibroinnin onnistumiseen vaikuttavista tekijöistä on käytettävä kasvumalli. Jos kasvumalli antaa valmiiksi luotettavia tuloksia, kalibroinnilla pystytään helposti varmistamaan vieläkin luotettavimmat kasvuennusteet. Sen sijaan varsinaisen kasvumallin antaessa selvästi harhaisia ennusteita luotettavien ja harhattomien tulosten saanti on epävarmaa kalibroinninkin avulla.

Kasvumallien kalibrointimenetelmä ei pysty kuitenkaan antamaan täysin harhattomia kasvuennusteita läheskään kaikissa tapauksissa, mutta periaatteena voidaan pitää, että kalibroinnin tulisi ainakin korjata kasvun tasoa oikeaan suuntaan.



Kuva 3. Esimerkki kalibroinnin luotettavuudesta. Kyseessä on kuvioittainen pohjapinta-alan kasvun korjaus.

KUIVATUKSEN VAIKUTUS SUOMÄNNIKÖN KASVUUN

Jari Miina

Johdanto

Puuston kasvuun ja kehitykseen ojitetulla turvemaalla vaikuttaa erityisesti kuivatuksen tehokkuus. Kuivatuksen tehokkuuteen vaikuttaa mm. sarkaleveys ja ojasyvyys (Huikari ym. 1966) sekä puuston tiheys ja elinvoimaisuus (Heikurainen ja Päivänen 1970). Mitä lähempänä ojaa puut ovat, sitä parempi on niiden kasvu (Lukkala 1929, Heikurainen 1959, 1980, Heikurainen ja Seppälä 1973). Puuston kasvun riippuvuutta etäisyydestä ojaan on käytetty mm. laskettaessa sarkaleveyden vaikutusta puuston ojituksen jälkeiseen kehitykseen (Keltikangas 1971, Seppälä 1972).

Puusto vaikuttaa pohjavedenpinnan syvyyteen pidättämällä osan sateesta, lisäämällä haihduntaa ja alentamalla lumipeitettä. Lisäksi turpeen vedenläpäisevyys saattaa parantua juuriston lisätessä turpeen huokoisuutta. Puuston vaikutusta pohjavedenpinnan syvyyteen on tutkittu kokeissa, joissa on selvitetty hakkuiden vaikutusta ojitusalueen vesitalouteen (Heikurainen 1967, Heikurainen ja Päivänen 1970, Päivänen 1982). Mitä enemmän puustosta on poistettu, sitä korkeammalle pohjavesipinta on noussut. Puuston kasvaessa sen vaikutus vesioloihin lisääntyy. Tämän vuoksi pohjavesipinta laskee puuston määrän lisääntyessä, jos oijen kuivatusteho ei heikkene.

Ojitusalueella puuston kasvu ei ole tasaista, sillä keskellä sarkaa kasvu on pienempi kuin oijen reunalla. Puuston kasvuerot aiheutuvat pohjavedenpinnan syvyyden vaihtelusta saralla. Pohjavesipinta on korkeimmillaan keskellä sarkaa ja syvimmillään oijen reunoilla. Pohjavedenpinnan syvyys määrää puiden juurien käytettävissä olevan tilan, mikä taas vaikuttaa juurien hapensaantiin ja kasvutilaan (Heikurainen 1957, Paavilainen 1967). Toisaalta pohjavedenpinnan syvyyden voidaan olettaa säätelevän puiden käytettävissä olevien ravinteiden määrää, koska maaperän biologinen aktiivisuus ja luontaisten ravinneverojen mobilisaatio lisääntyvät pohjavesipinnan alentumisen myötä (Karsisto 1979, Tuominen 1981). Pohjavedenpinnan syvyyden vaikutusta puuston kasvuun on selvitetty ojavesipintojen säännöstelykokeissa (Huikari ja Paarlahti 1967, Pelkonen 1975, Päivänen 1984, Silfverberg 1984).

Spatiaalishalla kasvumallilla voidaan ennustaa yksittäisen puun kasvua. Tämä mahdollistaa metsikön kasvun tarkastelun erityisesti silloin, kun kasvuun vaikuttavat tekijät - jotka on otettu kasvumallissa huomioon - vaihtelevat metsikön sisällä. Eräs tällainen kasvuun vaikuttava tekijä on puiden tilajärjestys (Pukkala ja Kolström 1987, Pukkala 1988, 1989a,c, Tham 1988). Puiden tilajärjestykseen perustuvalla kasvumallilla pystytään kuvaamaan puiden välinen kilpailu kasvutekijöistä, erityisesti säteilystä.

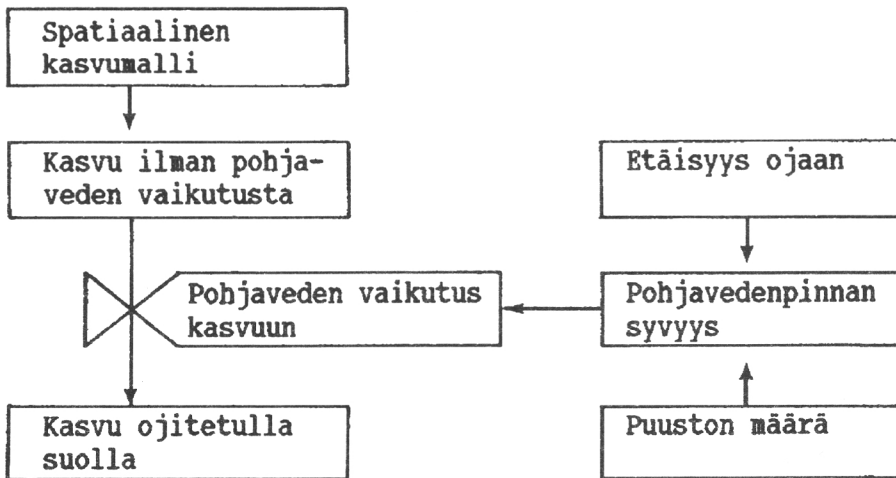
Tutkimuksen tavoitteena on tarkastella kuivatuksen vaikutusta suomännikön kasvuun simulointimallilla (Miina ym. 1990). Mallissa pohjavedenpinnan syvyys ja puiden välinen kilpailu kuvaavat puuston käytettävissä olevien kasvutekijöiden määrää turvemaan metsikössä.

Simulointimalli

Malli (Miina ym. 1990) koostuu neljästä keskeisestä osamallista:

- (1) ojen vaikutuksesta pohjavedenpinnan syvyyteen saralla,
- (2) puuston vaikutuksesta pohjavedenpinnan syvyyteen,
- (3) puiden keskinäisen kilpailun vaikutuksesta puuston kasvuun ja
- (4) pohjavedenpinnan syvyyden vaikutuksesta puuston kasvuun.

Spatiaalisella kasvumallilla laskettuun yksittäisen puun pohjapinta-alan kasvuun lisätään pohjavedenpinnan syvyyden vaikutus. Pohjavedenpinnan syvyys lasketaan jokaiselle puulle ojan etäisyyden ja ympäröivän puuston tilavuuden avulla (kuva 1).



Kuva 1. Mallin rakenne

Ojituksella ei saada lasketuksi pohjavesipintaa kovin syvälle saran keskellä, koska vesi liikkuu hitaasti turpeessa. Näin ollen pohjavesipinnan poikkileikkausprofiili saralla on enemmän tai vähemmän kupera (kuva 2). Ojen vaikutus pohjavedenpinnan syvyyteen saatiin Heikuraisen (1984) esittämästä pohjavesipinnan profiilista Viheriäisennevellä, jossa sarkaleveys oli ollut 40 m ja ojasyvyys 100 cm (kuva 2).

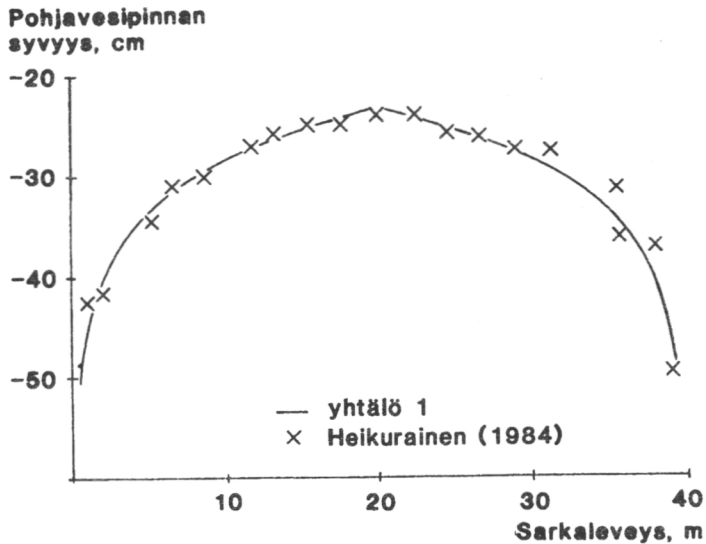
Pohjavedenpinnan syvyyden laskettiin riippuvan etäisyydestä lähimpään ojaan seuraavasti:

$$PVAVO = 62.8183 - 7.4818 * \ln(ET) \quad (1)$$

$$R^2 = 95.1\% \quad s_f = 1.67$$

missä PVAVO = pohjavedenpinnan syvyys ojen vaikutuksesta (cm),

ET = etäisyys lähimpään ojaan (dm) ja
 s_f = jäännöshajonta.



Kuva 2. Ojien vaikutus pohjavedenpinnan syvyyteen avosuolla. Ojasyvyys on 100 cm ja ojaväli on 40 m. Käyrä on laskettu yhtälöllä (1), havainnot Heikurainen (1984).

Puuston vaikutus pohjavedenpinnan syvyyteen

Turvemailla suoritettavat hakkuut nostavat pohjavesipintaa (Heikurainen 1967, Heikurainen ja Päivänen 1970, Päivänen 1982). Keväällä pohjavedenpinnan syvyyden ero käsittelemättömän ja hakatun alueen välillä on pieni, mutta myöhemmin kesällä hakatun alueen pohjavesipinta on selvästi korkeammalla kuin käsittelemättömällä alueella. Päiväsen (1982) tulokset voidaan esittää seuraavasti:

Pohjavedenpinnan syvyys avohakatulla alalla, cm	Puuston tilavuus, m ³ /ha		
	84	97	107
4	7	10	10
18	24	27	30
32	41	44	50

Havaitaan, että puuston vaikutus pohjavedenpinnan syvyyteen riippuu ojien vaikutuksesta: mitä syvemmällä pohjavesi on ojien vaikutuksesta, sitä suurempi on puuston vaikutus. Tulosten perusteella laskettiin puustoisien suon pohjavedenpinnan syvyyden riippuvuus puuston tilavuudesta ja pohjavedenpinnan syvyydestä ilman puustoa (= pohjavedenpinnan syvyys avohakkuukoelalla).

$$PVPUU = 0.06 + 0.2386 * \sqrt{V} * \sqrt{PVAVO} + 0.9856 * PVAVO \quad (2)$$

$R^2 = 98.2\% \quad s_f = 2.30$

missä PVPUU = pohjavedenpinnan syvyys puustoisella suolla (cm),
 V = puuston tilavuus (m³/ha) ja
 PVAVO = pohjavedenpinnan syvyys ojien vaikutuksesta (cm).

Simuloinneissa pohjavedenpinnan syvyys ojien vaikutuksesta (yhtälö 1) ja puuston vaikutuksesta (yhtälö 2) laskettiin jokaiselle puulle erikseen. Yhtälössä (2) puuston tilavuutena käytettiin 4 metrin säteiseltä ympyrältä laskettua puuston tilavuutta, kun tarkasteltava puu sijaitsee ympyrän keskipoikkeudessa.

Kasvumalli

Puiden kasvu ilman pohjaveden vaikutusta laskettiin Pukkalan (1989a) spatiaalisella kasvumallilla. Malli ennustaa puun pohjapinta-alan kasvua tulevan 5-vuotiskauden aikana.

$$\ln(i_g) = -3.093 - 0.1815 * d + 2.052 * \sqrt{d} + 38.85 * (1/(t+10)) - 0.009561 * \sum(d_j/s_j) + 1.043 * d/D_g - 0.01173 * G \quad (3)$$

missä i_g = puun pohjapinta-alan viiden vuoden kasvu (cm²),
 d = puun läpimitta (cm),
 t = puun rinnankorkeusikä (a),
 d_j = lähempänä kuin 5 m olevan naapuripuun läpimitta (cm),
 s_j = lähempänä kuin 5 m olevan naapuripuun etäisyys (m)
 D_g = lähempänä kuin 5 m olevien puiden (kohdepuu mukana) pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta (cm) ja
 G = metsikön pohjapinta-ala (m²/ha).

Yhtälö (3) perustuu kivennäismailta mitattuun aineistoon. Kasvupaikan viljavuus ei ole mallin selittäjänä. Mallia voidaan käyttää viljavuudeltaan erilaisten männiköiden kasvun laskennassa, koska kasvupaikan vaikutus voidaan ennustaa puun läpimitan ja iän avulla.

Pohjavedenpinnan syvyyden vaikutus puuston kasvuun

Pohjavedenpinnan syvyyden vaikutusta männikön kasvuun on tutkittu eri syvyyksille pysyvästi säädeltyjen ojavetasojen avulla (Silfverberg 1984). Puuston pohjapinta-alan kasvun ja pohjavedenpinnan syvyyden välinen yhteys on osoittautunut olevan kiintein loppukesästä (Pelkonen 1975, Leppänen 1983, Päivänen 1984). Mitä alempana pohjavesipinta on elokuussa ollut, sitä parempi on ollut seuraavan vuoden kasvu.

Silfverbergin (1984) tutkimuksessa seurattiin pohjapinta-alan vuotuista kasvua pohjavedenpinnan eri säännöstelysyvyyksillä (kuva 3). Säännöstelykokeissa mitatuille pohjapinta-alan vuotuiskasvuille laskettiin regressioyhtälö, jossa selittäjänä käytettiin koealalta mitattua pohjavedenpinnan syvyyttä elokuussa. Koska säännöstelykoealojen puusto näyttäisi mukautuneen uusiin olosuhteisiin vasta noin 10 vuotta kokeen perustamisesta, käytettiin yhtälön laskennassa vuoden 1971 jälkeisiä pohjapinta-alan kasvuja.

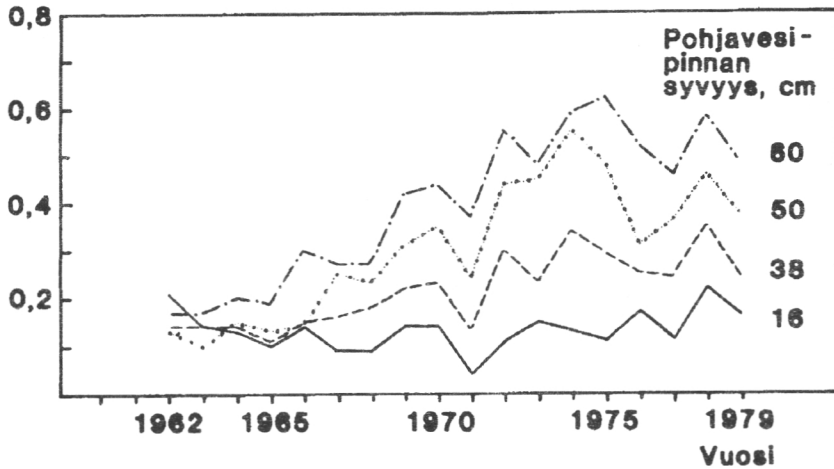
$$I_G = 0.1153 + 0.0001188 * PVPUU^2 \quad (4)$$

$$R^2 = 88.0\% \quad s_f = 0.056$$

missä I_G = puuston pohjapinta-alan vuotuinen kasvu (m²/ha)

PVPUU = pohjavedenpinnan syvyys puustoisella suolla (cm).

**Pohjapinta-alan kasvu
m²/ha/v**



Kuva 3. Puuston pohjapinta-alan vuotuinen kasvu eri pohjaveden pinnan syvyyksillä (elokuussa).

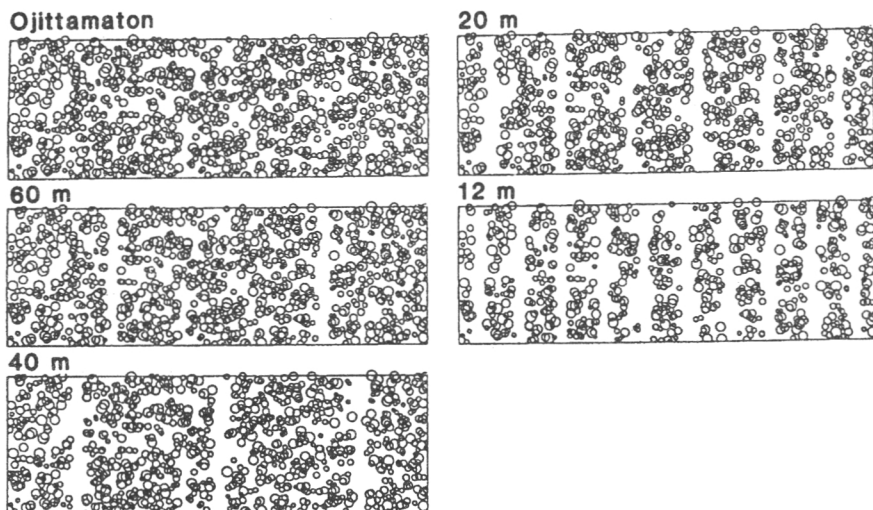
Pohjavedenpinnan syvyyden vaikutus kasvuun otettiin huomioon siten, että kasvumallilla saatu puun pohjapinta-alan viiden vuoden kasvu kerrottiin välille 0...1 skaalatulla kertoimella (yhtälö 5), joka laskettiin yhtälön (4) avulla seuraavasti:

$$\text{KERROIN} = \begin{cases} 1 & \text{jos PVPUU} \geq 60 \text{ cm} \\ I_G(\text{PVPUU}) / I_G(60) & \text{jos PVPUU} < 60 \text{ cm} \end{cases} \quad (5)$$

Spatiaalisella kasvumallilla laskettua puun pohjapinta-alan viiden vuoden kasvua pienennetään, jos pohjavesi rajoittaa puun kasvua, ts. pohjavedenpinnan syvyys on vähemmän kuin 60 cm. Mallissa oletetaan, että täydellinen kuivatusteho saavutetaan pohjavedenpinnan ollessa 60 cm:n syvyydessä, koska 60 cm oli suurin saavutettu säännöstelysyvyys Silfverbergin (1984) tutkimuksessa. Ei ole mittaustietoa siitä, kuinka tätä alhaisemmat pohjavedenpinnan tasot edelleen parantaisivat puiden kasvua. Toisaalta käytännön ojituksessa harvoin saavutetaan 60 cm:ä suurempaa pohjavedenpinnan syvyyttä.

Simuloinnit

Kuivatuksen vaikutusta suomännikön kasvuun tutkittiin siten, että simulointimallilla jäljiteltiin 60, 40, 20 ja 12 metrin ojaväleihin ojitetun sekä ojitamattoman männikön kasvua. Simulointeja varten generoitiin tasaikäinen riukuvaiheen männikkö, joka oli tilajärjestykseltään satunnainen (puiden välinen etäisyys vähintään 0.3 m). Mallimetsikkö oli 40 metriä leveä ojien suunnassa ja 120 metriä ojien poikkisuunnassa. Neljän metrin levyiset ojalinjat "hakattiin" mallimetsikköön siten, että koealan ojien suuntaiset sivut olivat saran keskellä (kuva 4).



Kuva 4. Metsiköiden latvuskartat.

Mallimetsikön puiden läpimitat ja pituudet laskettiin Pukkalan (1989b) kuvaamalla menetelmällä, jolla pystytään ennustamaan puiden läpimitat ja pituudet kun puiden tilajärjestys tunnetaan. Menetelmässä annetaan lähtötietoina puiden sijainnit, metsikön pohjapinta-ala ja runkoluku. Pohjapinta-alana käytettiin $16 \text{ m}^3/\text{ha}$ ja runkolukuna 2200 r/ha . Metsikön rinnankorkeusikänä käytettiin 25 vuotta. Käytetyillä lähtöarvoilla saatiin mallimetsikkö vastaamaan VT-männikköä.

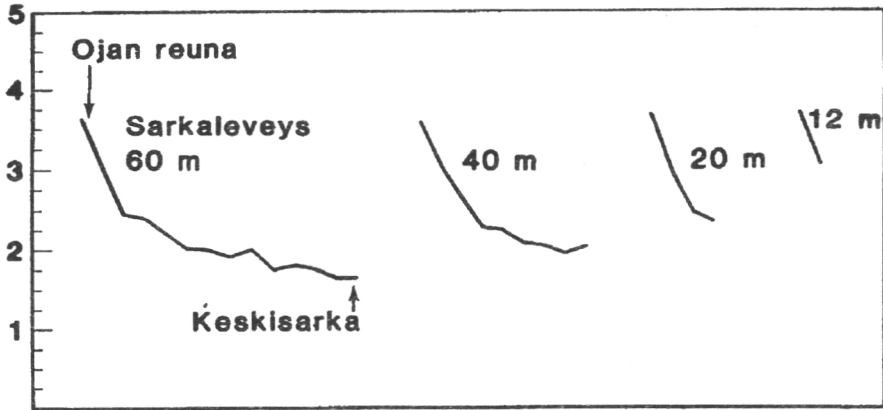
Ennen ojalinjoihin hakkuuta mallimetsikön pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitä on 11.6 cm , läpimitan vaihdellessa välillä $3.5 - 16.8 \text{ cm}$. Ojalinjoihin hakkuun jälkeen metsikön pohjapinta-ala on ojavälistä riippuen $10.7 - 15.0 \text{ m}^3/\text{ha}$ ja runkoluku $1465 - 2060 \text{ r/ha}$.

Mallimetsikön kasvua simuloitiin eri ojitustilanteissa 20 vuotta viiden vuoden jaksoissa. Viiden vuoden kasvatuksen jälkeen puiden uusia läpimittoja vastaavat pituudet laskettiin Pukkalan (1989a) pituusmallilla ja puiden tilavuudet Laasasenahon (1982) tilavuusyhtälöllä. Kun metsikön ($40 \times 120 \text{ m}$) ulkopuolisten puiden vaikutusta laskettiin, oletettiin, että metsikköä ympäröi joka puolelta samanlainen metsikkö.

Mallimetsikölle simuloituidut ojitukset osoittavat, että paras tilavuuskasvu saavutetaan ojavälillä 20 metriä . $60, 40, 20$ ja 12 metrin ojaväleihin ojitettujen metsiköiden 20 vuoden tilavuuskasvut ovat $72.6, 76.1, 85.5$ ja $85.1 \text{ m}^3/\text{ha}$. Simuloitaessa ojittamattoman metsikön kasvua oletettiin, että pohjavedenpinnan syvyys ilman puuston vaikutusta on 20 cm . Tällöin ojittamattoman metsikön tilavuuskasvu on $55.8 \text{ m}^3/\text{ha}/20 \text{ v}$.

Kasvun jakautumista saralla tarkasteltiin laskemalla puiden keskimääräinen rinnankorkeusläpimitan kasvu ojien suuntaisilla kahden metrin levyisillä kaistoilla (kuva 5). 60 ja 40 metrin ojaväleihin ojitetuissa metsiköissä on ojien reunoilla sijaitsevien puiden läpimitan kasvu oli noin kaksinkertainen verrattuna saran keskellä sijaitsevien puiden läpimitan kasvuun. 20 ja 12 metrin ojaväleihin ojitetuissa metsiköissä puiden kasvuerot saralla eivät ole niin suuria, koska ojien vaikutus ulottuu voimakkaana myös keskisaralle.

Läpimitan kasvu cm/20 v



Kuva 5. Keskimääräinen rinnankorkeusläpimitan kasvu (cm/20 v) ojien suuntaisilla kahden metrin levyisillä kaistoilla ojan reunalta keskelle sarkaa.

Tarkastelu

Tutkimuksessa käytetään simulointimallia (Miina ym. 1990) männikön kasvun ennustamisessa ojitetulla turvemaalla. Malli on koostettu erillisistä tutkimuksista, minkä vuoksi ei ole varmaa, että niiden yhdistäminen mallin muotoon antaa luotettavia tuloksia. Käytetty spatiaalinen kasvumalli perustuu kivennäismailta mitattuun aineistoon. Tällöin on oletettava, että turvemailla puiden välinen kilpailu kasvutekijöistä on samanlaista kuin kivennäismailla. Mallin luotettavuutta voitaisiin tarkastella vertaamalla mallilla laskettuja yksittäisten puiden kasvuennusteita turvemailla mitattuihin. Koska tällaisia mittaustuloksia ei ollut käytettävissä, tarkasteltiin mallilla laskettuja kasvuennusteita laajemmalla tasolla.

Ojitetun, VT-männikköä vastaavan mallimetsikön keskimääräinen vuotuinen tilavuuskasvuennuste ojavälistä riippuen oli 3.6 - 4.3 m³/ha. Nämä luvut vastaavat viljavuudeltaan kuivahkoon kankaaseen rinnastettavan varsinaisen sararämeen (VSR) keskimääräistä vuotuista tilavuuskasvua ojituksen jälkeen (Seppälä 1969, Heikurainen 1973, Heikurainen ja Seppälä 1973, Keltikangas ym. 1986). Ojittamattoman mallimetsikön keskimääräinen vuotuinen tilavuuskasvuennuste oli 2.8 m³/ha. Tämä vastaa luonnontilaisten kangas- ja korpisärmäiden puustojen tilavuuskasvuyhtälöllä mallimetsikölle laskettua keskimääräistä vuotuista tilavuuskasvua (Gustavsen ja Päivänen 1984).

Metsiköissä, joissa ojat sijaitsivat 60 ja 40 metrin välein, puiden keskimääräinen läpimitan kasvu ojan reunalla oli noin kaksinkertainen verrattuna keskisaralla sijaitsevien puiden läpimitan kasvuun. Lukkalan (1929) tutkimuksessa VSR:llä alle viiden metrin etäisyydellä ojasta sijaitsevien puiden läpimitan kasvu oli 12.5 mm/5 v alle 50-vuotiaissa metsiköissä. Muualla saralla läpimitan kasvu oli 7.2 - 7.4 mm/5 v. Heikuraisen (1980) tutkimuksessa ojan reunoille sijoitettujen koalojen puiden sädekasvu oli noin 1.5-kertainen verrattuna keskisaralle sijoitettujen koalojen puiden sädekasvuun. Sekä Lukkalan että Heikuraisen tutkimuksessa kasvuerot saralla olivat sitä suuremmat mitä karumpi oli suo.

Simuloinnit valituilla ojaväleillä osoittivat, että paras tilavuuskasvu saavutetaan, kun mallimetsikkö ojitetaan 20 metrin ojaväleihin. 12 metrin ojaväleihin ojitetun metsikön tilavuuskasvu oli lähes yhtä suuri kuin 20 metrin välein ojitetun metsikön, vaikka puuston kokonaistilavuus ennen simulointia on 23 % pienempi tiheämmän ojituksen vuoksi. Jos 20 metrin ojaväleihin ojitetun metsikön tilavuuskasvua merkitään luvulla 100, niin 40 ja 60 metrin ojaväleihin ojitetun metsikön suhteelliset tilavuuskasvut ovat 89 ja 85. Seppälä (1972) on esittänyt VSR:lle vastaaviksi luvuiksi koko maata koskien 96 ja 91.

Ojitusalueen puuston kasvua laskettaessa pitäisi ottaa huomioon, että puut parantavat kasvuaan asteittain ojituksen jälkeen (kuva 3). Mallissa oletetaan, että puusto reagoi välittömästi pohjavesipinnan alenemiseen. Kasvun asteittainen lisääntyminen voitaisiin sisällyttää malliin ajan myötä muuttuvan kertoimen avulla. Samalla parametrilla voitaisiin mallittaa myös ojien umpeutumisen aiheuttama kuivatustehon heikkeneminen sekä turpeen painuminen simulointijakson aikana.

Kirjallisuus

Gustavsen, H. G. ja Päivänen, J. 1986. Luonnontilaisten soiden puustot kasvullisella metsämaalla 1950-luvun alussa. Summary: Tree stands on virgin forested mires in the early 1950's in Finland. *Folia For.* 673:1-27.

Heikurainen, L. 1957. Rämemännikön juuriston rakenne ja kuivatuksen vaikutus siihen. Referat: Der Wurzel Aufbau der Kiefernbestände auf Reisermooböden und seine Beeinflussung durch die Entwässerung. *Acta For. Fenn.* 65(3):1-85.

- 1959. Tutkimus metsäojitusalueiden tilasta ja puustosta. Referat: Über waldbaulich entwässerte Flächen und ihre Waldbestände in Finnland. *Acta For. Fenn.* 69(1): 1-279.

- 1967. Hakkuun vaikutus ojitettujen soiden vesitalouteen. Summary: On the influence of cutting on the water economy of drained peat lands. *Acta For. Fenn.* 82(2): 1-45.

- 1973. Soiden metsänkasvatuskelpoisuuden laskentamenetelmä. Summary: A method for calculation of the suitability of peatlands for forest drainage. *Acta For. Fenn.* 13:1-35.

- 1980. Kuivatuksen tila ja puusto 20 vuotta vanhoilla ojitusalueilla. Summary: Drainage condition and tree stand on peatlands drained 20 years ago. *Acta For. Fenn.* 167: 1-37.

- 1984. Metsäojituksen alkeet. 3. uud. painos. Helsinki. 284 s.

- ja Päivänen, J. 1970. The effect of thinning, clear-cutting and fertilization on the hydrology of peatland drained for forestry. *Acta For. Fenn.* 104:1-23.

- ja Seppälä, K. 1973. Ojitusalueiden puuston kasvun jatkumisesta ja alueellisuudesta. Summary: Regionality and continuity of stand growth in old forest drainage areas. *Acta For. Fenn.* 132: 1-36.

Huikari, O., Paarlahti, K., Paavilainen, E. ja Ravela, H. 1966. Sarkaleveyden ja ojasyvyyden vaikutuksesta suon vesitalouteen ja valuntaan. Summary: On the effect of strip-width and ditch-depth on water economy and runoff on a peat soil. *Commun. Inst. For. Fenn.* 61(8): 1-39.

- ja Paarlahti, K. 1967. Results of field experiments on the ecology of pine, spruce and birch. Seloste: Kenttäkokeiden tuloksia männyn, kuusen ja koivun ekologiasta. *Commun. Inst. For. Fenn.* 64(1): 1-135.

Karsisto, M. 1979. Maanparannustoimenpiteiden vaikutuksista orgaanista ainetta hajoittavien mikrobin aktiivisuuteen suometsissä. Osa 1. Pohjaveden etäisyyden ja NPK-lannoituksen vaikutus Vilppulan ja Kivalon rämeellä ja korvessa. Summary: Effect of forest improvement measures on activity of organic matter decomposing micro-organisms in forested peatlands. Part 1. Effect of drainage and NPK- fertilization in the spruce and pine swamps at Kivalo and Vilppula. Suo 30: 81-91.

Keltikangas, M. 1971. Sarkaleveyden vaikutus ojitusinvestoinnin taloudelliseen tulokseen. Summary: Effect of drain spacing on the economic results of forest drainage investments. Acta For. Fenn. 123:1-70.

- , Laine, J. , Puttonen, P. ja Seppälä, K. 1986. Vuosina 1930-1978 metsäojitetut suot: ojitusalueiden inventoinnin tuloksia. Summary: Peatlands drained for forestry during 1930-1978: result from field surveys of drained areas. Acta For. Fenn. 193: 1-94.

Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Seloste: Männyn, kuusen ja koivun runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöt. Commun. Inst. For. Fenn. 108: 1-44.

Leppänen, K. 1983. Pohjavesisyvyyden vaikutus ojitusalueen puuston ja kasvipeitteen kehitykseen. Suometsätieteen pro gradu-tutkielma. Helsingin yliopisto. 71 s.

Lukkala, O. J. 1929. Tutkimuksia soiden metsätaloudellisesta ojituskelpoisuudesta erityisesti kuivatuksen tehokkuutta silmälläpitäen. Referat: Untersuchungen über die waldwirtschaftliche Entwässerungsfähigkeit der Moore mit besonderer Rücksicht auf den Trocknungseffekt. Commun. Inst. For. Fenn. 15(1): 1-301.

Miina, J. , Kolström, T. ja Pukkala, T. 1990. An application of a spatial growth model of Scots pine on drained peatland. For. Ecol. Manage. (In press).

Paavilainen, E. 1967. Männyn juuriston suhteesta turpeen ilmatilaan. Summary: Relations between the root system of Scots pine and the air content of peat. Commun. Inst. For. Fenn. 63(6): 1-21.

Pelkonen, E. 1975. Vuoden eri aikoina korkealla olevan pohjaveden vaikutus männyn kasvuun. Summary: Effects on Scots pine growth of ground water adjusted to the ground surface for periods of varying length during different seasons of the year. Suo 26(2) : 25-32.

Pukkala, T. 1988. Effect of spatial distribution of trees on the volume increment of a young Scots pine stand. Silva Fenn. 22(1): 1-17.

- 1989a. Predicting diameter growth in even-aged Scots pine stands with a spatial and non-spatial model. Silva Fenn. 23(2): 101-116.

- 1989b. Prediction of tree diameter and height in a Scots pine stand as a function of the spatial pattern of trees. Silva Fenn. 23(2): 83-99.

- 1989c. Methods to describe the competition process in a tree stand. Scand. J. For. Res. 4: 187-202.

- ja Kolström, T. 1987. Competition indices and the prediction of radial growth in Scots pine. Tiivistelmä: Kilpailutekijät ja männyn sädekasvun ennustaminen. Silva Fenn. 21(1): 55-67.

Päivänen, J. 1982. Hakkuun ja lannoituksen vaikutus vanhan metsäojitusalueen vesitalouteen. *Folia For.* 516: 1-19.

- 1984. The effect of runoff regulation on tree growth on a forest drainage area. *Proc., 7th Int. Peat Congr.* 3: 476-488.

Seppälä, K. 1969. Kuusen ja männyn kasvun kehitys ojitetuilla turvemailla. Summary: Post-drainage growth rate of Norway spruce and Scots pine on peat. *Acta For. Fenn.* 93: 1-88.

- 1972. Ditch spacing as a regulator of post-drainage stand development in spruce and pine swamps. Seloste: Sarkaleveys korpi- ja rämemetsiköiden ojituksen jälkeisen kehityksen säätelijänä. *Acta For. Fenn.* 123: 1-70.

Silfverberg, K. 1984. Kuivatustehon ja lannoituksen vaikutus rämemännikön kehitykseen. Summary: Effects of drainage intensity and fertilization in a pine bog stand. *Suo* 35: 86-90.

Tham, Å. 1988. Prediction of individual tree growth in managed stands of mixed Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and birch (*Betula pendula* Roth & *Betula pubescens* Ehrh.). Swedish Univ. Agric. Sci., Dept. of Forest Yield Research. Report no. 23. 22 s.

Tuominen, L. 1981. Selluloosan hajoaminen eräillä luonnontilaisilla räme- ja nevatyypeillä. Summary: Decomposition of cellulose in the peat of some pine bogs and fens. *Suo* 32(4-5): 130-133.

ISSN 0358-4283
ISBN 951-40-1161-9

Valtion painatuskeskus
Kampin VALTIMO
Helsinki 1991