



Mervi Talvitie

Mervi Talvitie

Männyn pohjapinta-alan kasvumallien kalibrointi Pohjois-Pohjanmaan metsäkeskuksen alueelle

Talvitie, M. 2005. Männyn pohjapinta-alan kasvumallien kalibrointi Pohjois-Pohjanmaan metsäkeskuksen alueelle. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2005: 19–32.

Kasvumallien tarkoituksena on kuvata yksittäisen puun tai suuremman puujoukon kehitystä. Niiden käyttökelpoisuus riippuu suurelta osin siitä, miten luotettavasti puuston rakenne ja dynamiikka on saatu kuvattua. MOTTI-simulaattorissa käytettävät kasvumallit tuottavat harhattomia kasvun ennusteita valtakunnan tasolla, mutta pienemmillä, esim. metsäkeskusten alueilla, ennusteet voivat olla harhaisia. Tällaisillekin alueille olisi tärkeää saada kasvun arviot harhattomiksi metsävarojen kehityksen paikallista tilastointia ja puutaselaskelmia ajatellen.

Tässä tutkimuksessa kalibroitiin MOTTI-simulaattorissa käytettävät männyn kivennäis- ja turvemaiden pohjapinta-alan kasvumallit Pohjois-Pohjanmaan metsäkeskuksen alueelle, ja vertailtiin neljän eritasoisen kalibrointimallin vaikutusta kasvun ennusteeseen. Kalibrointimalleja olivat 1) vakiokalibrointi, 2) metsikkökalibrointi, 3) puukalibrointi ja 4) ikäkalibrointi, jotka estimoitiin sekamalleilla.

Kivennäismailla vakiokalibrointi korjasi pohjapinta-alan kasvun ennustetta noin 23 % pienemmäksi ja turvemaiden 17 % suuremmaksi valtakunnallisten kasvumallien ennusteisiin verrattuna. Puustotunnusmuuttujia sisältävät mallit (mallit 3 ja 4) olivat tilastollisesti parhaita, mutta laadinta-aineistosta johtuen niiden soveltuvuus kalibrointimalliksi oli kyseenalainen. Metsikkötunnusmallin jäännöshajonta oli suurempi kuin puustotunnusmallien sisältävien mallien, mutta kalibrointimalliksi se soveltui hyvin, sillä selittävät muuttujat olivat tunnuksia, jotka eivät muuttaneet alkuperäisen kasvumallin sisäistä dynamiikkaa.

Asiasanat: kalibrointi, kasvumalli, MOTTI-simulaattori, sekamalli
Yhteystiedot: Metsävarojen käytön laitos, PL 27, 00014 Helsingin yliopisto
Sähköposti mervi.talvitie@helsinki.fi
Hyväksytty 17.3.2005

I Johdanto

Kasvumallien käyttökelpoisuus riippuu suurelta osin siitä, miten luotettavasti puuston rakenne ja dynamiikka on niihin saatu kuvattua (Hynynen 2000). Malleissa pyritään kuvaamaan ilmiöön keskeisimmän vaikuttavat tekijät sekä niiden vaikutuksen voimakkuus ja muoto. Jos ennuste on yliarvio todellisesta kasvusta, simuloinnin tuloksena saatu hakattava puustopääoma olisi yliarvio todellisesta hakattavissa olevasta puustosta, ja ajan myötä pysty-puuston pienetessä myös hakkuumäärät ja -tulot tulisivat pienemmiksi. Vastaavasti kasvuennusteen aliarvio johtaa liian pieneen hakkuukertymään ja siten taloudelliseen tehottomuuteen (Leskinen 1991). Mallin käyttökelpoisuus riippuu suurelta osin siitä, millä alueella sen antamia ennusteita sovelletaan ja kuinka tarkkoja ennusteita puuston todellisesta kehityksestä tarvitaan (Gustavsen 1990).

MOTTI-simulaattorissa ja metsälaskelmassa (MELA) on käytössä samat mallit, joissa metsikön kehitys kuvataan yksittäisten puiden syntymistä, kasvua ja kuolemista kuvaavilla malleilla. Ensimmäiset MOTTI- ja MELA-simulaattoreissa käytettävät mallit kehitettiin 1970-luvun loppupuolella (Ojansuu ym. 1991). Nykyisin käytössä olevat mallit on tehty 1990-luvun lopulla, ja ne on otettu käyttöön vuonna 1997 (Hynynen ym. 2002). Merkittäviä muutoksia edellisiin malleihin on pituusboniteetti-indeksin ja metsikön itseharvenemismallin käyttöönotto. Tässä artikkelissa käytetään näistä malleista jatkossa nimitystä MOTTI-mallit.

Pohjapinta-alan kasvumalli kivennäismailla kuvaa yksittäisen puun pohjapinta-alan kasvua tulevalle 5-vuotiskaudella. Kasvuun vaikuttavia tekijöitä ovat puun koko, puiden välinen kilpailu, kasvupaikka, metsikön kehitysvaihe ja metsikössä tehdyt toimenpiteet (Hynynen 1996). Turvemaille on tehty omat pohjapinta-alan kasvumallit, koska puuston rakenne ja metsikkökehitys turvemaalla eroavat huomattavasti kivennäismaiden kasvusta (Paavilainen ja Tiuhonen 1988). Lisäksi kasvun taso riippuu mahdollisesta ojituksesta ja siitä kuluneesta ajasta. Kasvu vähenee, kun ojituksen kunto rappeutuu ja pohjaveden pinta nousee.

MOTTI-mallit tuottavat harhattomia kasvun ennusteita valtakunnan tasolla, mutta pienemmällä

alueilla ennusteet voivat olla suuriakin yli- tai aliarvioita (Hynynen ym. 2002). Tällaisillekin alueille olisi tärkeää saada kasvunarviot harhattomiksi metsävarojen kehityksen tilastointia ja puutaselaskelmia ajatellen (Siitonen 1996).

Kalibroinnin tarkoituksena on saattaa ennustettu kasvu keskimäärin samalle tasolle kuin mitatut kasvat tarkastelun kohteena olevalla alueella. Kasvumallien paikallisuuteen päästään joko mallinnuksella tai yleisten mallien paikallisella kalibroinnilla. Sironen ym. (2001) käyttivät ei-parametrasta menetelmää mallintaessa puun läpimittaa paikallisissa olosuhteissa Pohjois-Suomessa. Paikallista kalibrointia ovat käyttäneet tutkimuksissaan mm. Leskinen (1991) ja Zhang ja Shi (2004). Sekamalleilla tehtyjä kasvumalleja voidaan kalibroida metsikkökohtaisesti, jolloin h/d-käyrä ennustetaan uuteen metsikköön koepuista mitattujen puutunnusten avulla (Lappi 1993). Tässä tutkimuksessa sekamallin kalibrointavuutta ei kuitenkaan voitu käyttää hyväksi, sillä ominaisuus soveltuu alueellisen kalibroinnin sijasta ainoastaan metsiköittäiseen kalibrointiin.

Regressiomallin kalibrointi voi perustua ennustevirheen uudelleen mallittamiseen (Leskinen 1991). Kalibrointavalta alueelta kerätään sille soveltuva, luotettavaa tietoa metsistä ja niiden kehityksestä, joko maastomittauksin tai jo olemassa olevista tiedoista. Sekä alueellisten metsikkö- ja kasvutietojen että alkuperäisen mallin antaman ennusteen perusteella voidaan edelleen tutkia, riippuuko ennustevirhe jostain puu- tai metsikkötason muuttujasta tai kasvupaikkatekijöistä. Jos virhe ei riipu mistään yksittäisestä muuttujasta, kalibrointimalliksi saadaan ennustevirheen keskiarvo, ts. kalibroinniksi riittää tasokorjaus. Ennustevirheen mallinnuksessa on tavoitteena löytää sellaisia metsikkö- ja puutekijöitä, joiden avulla voidaan muodostaa kyseessä olevalle alueelle korjausfunktiot alkuperäiseen malliin.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli kalibroida MOTTI-simulaattorin männyn pohjapinta-alan kasvumallit Pohjois-Pohjanmaan metsäkeskuksen alueelle. Tavoitteena oli selvittää, miten erilaiset kalibrointimallit vaikuttavat kasvuennusteeseen, kalibroinnin merkitystä sekä siinä ilmeneviä ongelmia. Kasvumallit kalibroidiin Pohjois-Pohjanmaan metsäkeskuksen alueelle valtakunnan metsien 8. inventoinnin (VMI8) paikallisen aineiston avulla. Tässä julkaisussa tarkastellaan ainoastaan männyn

Taulukko 1. VMI8-aineiston kasvupaikka- ja puustotunnusten vaihtelu Pohjois-Pohjanmaan metsäkeskuksen alueella.

	Kivennäismaat		Turvemaat	
	Keskiarvo	Hajonta	Keskiarvo	Hajonta
Lämpösumma, d.d.	980	95	1025	50
Metsikön ikä, v	88	53	64	26
Metsikön pohjapinta-ala, m ² ha ⁻¹	16,5	10,0	10,0	7,3
Metsikön valtipituus, m	15,1	4,8	12,5	4,3
Puun läpimitta, cm	18,6	8,9	19,4	9,1
Puun pituus, m	12,5	4,7	9,4	3,8

Taulukko 2. Valtakunnan metsien 8. inventoinnin otantaan liittyvää tietoa Pohjois-Pohjanmaan metsäkeskuksen eri piirimetsälautakuntien osista.

	K-Pohjanmaa	P-Pohjanmaa	Koillis-Suomi
Ryväsväli, km	8 × 7	7 × 7	10 × 10
Koealaväli, m	200	300	300
Koealoja/rypäs, kpl	21	15	15
Koealatyyppi	relask.	relask. ja ympyrä	relask. ja ympyrä
Relask.kerroin (Q)	2	1,5	1,5
Max etäisyys, m	–	12,45	12,45
Koealan edustama ala, ha	266	328	664

pohjapinta-alan kasvumalleja, koska muiden MOT-TI-mallien kalibrointia koskevat ongelmat ja tulokset ovat hyvin samanlaisia (Talvitie 2003).

2 Aineisto

Tutkimuksen aineistona käytettiin VMI8:n maastotietoa Pohjois-Pohjanmaan metsäkeskuksen alueelta. Aineiston puusto- ja kasvupaikkatunnusten vaihtelu on kuvattu taulukossa 1. Pohjois-Pohjanmaan metsäkeskuksen alueella oli VMI8-aineistossa kaikkiaan 3876 mäntykoealaa, joista kivennäismaalla oli 54 % ja turvemaalla 46 %. VMI8-inventoinnissa nykyisen Pohjois-Pohjanmaan metsäkeskuksen kunnat jakautuivat entisten Pohjois-Pohjanmaan, Keski-Pohjanmaan ja Koillis-Suomen piirimetsälautakuntien kesken siten, että suurin osa kunnista kuului Pohjois-Pohjanmaan piirimetsälautakuntaan. Piirimetsälautakunnissa sovellettiin toisistaan poikkeavia otantamenetelmiä (taulukko 2).

Suurimpana erona piirimetsälautakuntien välillä oli koepuiden valinta: Etelä-Suomen piirimetsä-

lautakunnissa, joihin Keski-Pohjanmaa kuului, oli jokaisessa lohossa 3 koepuukoealaa, joilta mitattiin kaikki puut koepuina. Muissa piirimetsälautakunnissa koepuita mitattiin siten, että joka 7. puu oli koepuu juoksevasti yli koko koealaverkoston. Ainoa ero Pohjois-Pohjanmaan ja Koillis-Suomen piirimetsälautakuntien inventointiteknikassa oli naapurilohkojen vastinpisteiden etäisyys eli ryväsväli: Pohjois-Pohjanmaalla etäisyys oli 7 km ja Koillis-Suomessa 10 km sekä itään että pohjoiseen (Keski-Pohjanmaalla 8 km pohjoiseen ja 7 km itään). Joka loholla oli puustokoealoja 15 kpl (21 kpl) ja koealaväli oli 300 m (200 m). Koealatyypinä käytettiin relaskooppikoealaa 12,45 metrin maksimietäisyydellä ja puut luettiin relaskooppikertoimella 1,5 (2). Keski-Pohjanmaalla käytettiin pelkästään relaskooppikoealoja ilman maksimietäisyyttä. (Metsätilastollinen vuosikirja... 1993) Piirimetsälautakuntien erilaiset otantamenetelmät otettiin huomioon analyyseissä painottamalla niitä suhteessa koealan edustamaan pinta-alaan kullakin otanta-alueella.

3 Menetelmät

3.1 Menetelmien yleiskuvaus

Tutkimuksessa kalibroitiin MOTTI-simulaattoris- sovellettavia kasvumalleja Pohjois-Pohjanmaan metsäkeskuksen alueelle varianssikomponenttimalleilla. Mallit tehtiin SAS-tilasto-ohjelmalla (SAS Institute Inc. 1989). Alkuperäisen mallin rakennetta ei muutettu, vaan mallitettiin todellisen ja ennustetun kasvun eroa.

Kalibrointi muodostui neljästä vaiheesta: 1) ennustettiin käytössä olevilla valtakunnallisilla malleilla pohjapinta-alan kasvu kaikille puille kalibrointiaineistossa, 2) laskettiin ennustevirhe havaitun ja ennustetun kasvun erotuksena, 3) kehitettiin lineaarinen varianssikomponenttimalli ennustevirheelle ja 4) lisäämällä ennustettu virhe alkuperäiseen kasvuennusteeseen saatiin kalibroitu kasvuennuste (ks. Hynynen ym. 2002).

Tutkimuksessa vertailtiin neljän eri tasoisen mallin hyvyttä ennustettaessa puuston kasvua: vakio- kalibrointi (malli 1), metsikkökalibrointi (malli 2), malli, jossa oli metsikkötason muuttujien lisäksi yksi puu- tai puustotason muuttuja (puukalibrointi, malli 3) ja malli, joka sisälsi edellisten lisäksi puun tai metsikön iän (ikäkalibrointi, malli 4). Kasvu- paikkamuuttujien valinnan periaatteena oli saada kuvattua malliin havainnon maantieteellistä asemaa (lämpösomma, korkeus, järvisyys, merisyys) ja kasvupaikkaa (kasvupaikkatyyppi, veroluokkaa alentavat tekijät: soistuneisuus, kunttaisuus, kivi- syys) selittävät muuttujat.

Eri malleja vertailtiin keskivirheen avulla, joka sekamalleissa jakautuu sekä metsiköiden väliseen että metsikön sisäiseen vaihteluun. Sekamallitekniikka soveltuu hyvin tilanteisiin, joissa mallitettava aineisto on hierarkista (mm. Lappi 1993). Metsiköiden tapauksessa se huomioi aineiston vaihtelun sekä puu- että metsikkötasolla. Sekamalli on muotoa

$$y = Xb + Zc + \epsilon, \quad (1)$$

missä X on kiinteiden parametrien selittäjien arvot, Z on satunnaisten parametrien selittäjien arvot, b on kiinteät parametrit ja c on satunnaiset parametrit. Metsikön sisäinen virhetermi kuvaa yksittäisten

puiden selittämätöntä vaihtelua metsikön keskiarvon ympärillä. Metsiköiden välinen vaihtelu taas kuvaa yksittäisten metsiköiden poikkeamaa kaikkien metsiköiden keskiarvosta. Sekamallia, jossa satunnaiset parametrit ovat osoitinmuuttujien kertoimia, sanotaan varianssikomponenttimalliksi.

Kalibrointimallien ennusteita havainnollistettiin vertaamalla niiden suhteellisia harhoja valtakunnallisen mallin vastaavaan. Suhteellinen harha kuvaa todellisen ja ennusteen erotuksen suhdetta ennusteen arvoon (kaava 2).

$$\text{Suhteellinen harha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{x_i - \hat{x}_i}{\hat{x}_i} \quad (2)$$

missä

x_i = puun i todellinen arvo

\hat{x}_i = puun i ennusteen arvo

Lisäksi tarkasteltiin ennusteiden spatiaalista harhatomuutta suhteellisen harhan avulla.

Kalibrointimallia laadittaessa merkitsevät muuttajat haettiin ensin regressiomallilla. Kasvupaikkatyyppisiä yhdistettiin aineiston pienuuden vuoksi suuremmiksi luokiksi, ja tarkastelun ulkopuolelle jätettiin mallikohtaisesti sellaisia osoitinmuuttujia, joita esiintyi aineistossa alle 1 %. Aineistoon sovitettiin aluksi malli, jossa oli mukana kaikki potentiaaliset selittävät muuttujat. Eri selittäjien muunnoksista valittiin tilastollisesti paras mukaan malliin. Mallista poistettiin aina huonoimman merkitsevyydestään saanut muuttuja, jonka jälkeen malli testattiin jäljelle jääneillä muuttujilla. Valmiissa regressiomallissa kaikki muuttujat olivat merkitseviä 5 % riskitasolla. Lopuksi näin saaduista regressiomallin muuttujista estimoitettiin varianssikomponenttimalli. Varianssikomponenttimallin kiinteä osa oli sama kuin regressiomallissa, mutta virhe jaettiin metsiköiden sisäiseen ja väliseen vaihteluun.

MOTTI-mallien kalibroimatonta osaa kutsutaan tässä työssä perusmalliksi. Valtakunnallinen (VK-) kasvumalli koostuu perusmallista ja VMI8:aan perustuvasta valtakunnallisesta kalibrointimallista. Pohjois-Pohjanmaan lopullinen kasvumalli on nimetty Pohjois-Pohjanmaan (PP-) kasvumalliksi, ja se koostuu VK-kasvumallista ja Pohjois-Pohjanmaan kalibrointimallista.

Taulukko 3. Painokertoimet ja niiden laskenta eri alueilla.

Alue	Lautak.	Lohko (km ²) (A)	Kp-koealoja / lohko (N)	Koepuiden lkm	Q	max säde	w _A	w _f	w _Q	w _S
E-S		56	3	1	2	–	1,000	1,000	1,000	1,000
P-S	16–17	49	15	7	1,5	12,45	0,175	7,000	0,750	0,919
P-S	18–19	100	15	7	1,5	12,45	0,357	7,000	0,750	1,875

Q = relaskooppikerroin

$$w_A = \text{koepuukoealan edustama ala suhteessa Etelä-Suomeen} \left(w_A = \frac{(A)_{P-S}/(N)_{P-S}}{(A)_{E-S}/(N)_{E-S}} \right)$$

w_f = koepuufrekvenssi

$$w_Q = \text{relaskooppikertoimen paino suhteutettuna Etelä-Suomeen} \left(w_Q = \frac{Q_{P-S}}{Q_{E-S}} \right)$$

w_S = koepuun edustama ala suhteutettuna relaskooppikertoimeen (w_A × w_f × w_Q).

3.2 Havaintojen painottaminen

Tietyn kokoisien puun todennäköisyys tulla luetuksi vaihteli piirimetsälautakunnittain niiden erilaisten otantakehikoiden vuoksi (vrt. taulukko 2). Keski-Pohjanmaan otantakehikolla puulla oli suurin todennäköisyys tulla luetuksi ja Lapissa pienin. Otannasta johtuvan harhan eliminoimiseksi laskettiin puittain painokertoimet, jotka kuvasivat tietyn kokoisien puun edustamaa pinta-alaa Keski-Pohjanmaahan (E-S) verrattuna. Otannasta johtuvat painokertoimet (w_S) laskettiin suhteuttamalla Pohjois-Suomen otantakehikoilla otettujen koepuiden edustama ala (w_A) ja relaskooppikerroin (w_Q) Keski-Pohjanmaan vastaaviin (taulukko 3). Koepuufrekvenssi-termi (w_f) kuvaa sitä, että joka w_f:s puu on koepuu. Lisäksi Pohjois-Suomen inventoinnissa käytössä olevilla katkaistuilla relaskooppikoealoilla (max säde 12,45 m) yli 30 cm puille laskettiin painokertoimet puukohtaisesti suhteutettuna Etelä-Suomeen kaavalla

$$w_Q = \frac{d^2}{4Q_0 r_{\max}} \quad (3)$$

missä d on läpimitta (cm), Q₀ on relaskooppikerroin Etelä-Suomessa (Q₀ = 2) ja r_{max} on relaskooppikoealan maksimisäde (r_{max} = 12,45 m). Mitä paksumpi puu oli, sitä suuremman painokertoimen se sai. Esimerkiksi 35 cm paksuisen puun painokerroin oli 1,210 ja 45 cm paksuisen puun 2,000.

Relaskooppilla kertakoealalta luettujen puiden otantatodennäköisyys riippui puun läpimitasta inventointihetkellä. Jos useammalla puulla oli jakson alussa sama läpimitta, oli nopeimmin kasvavalla puulla suurin todennäköisyys tulla valituksi koe-

puuksi jakson lopussa (Lappi ja Bailey 1987), ja siten hyvin kasvaneet puut saivat suuremman painon otoksessa.

Puun koosta ja kasvunopeudesta riippuva harha poistettiin aineistosta ennen kalibrointia painottamalla kaikkia havaintoja puun alku- ja loppuläpimittojen suhteella (Lappi ja Bailey 1987). Tämä painokerroin kuvasi puun todennäköisyyttä tulla valituksi koealalle jakson alkuhetkellä, ja se laskettiin kaavalla

$$w_{T_0} = \frac{d_a}{d_a + i_d} \quad (4)$$

missä

w_{T₀} = puun saama painokerroin kasvujakson alussa

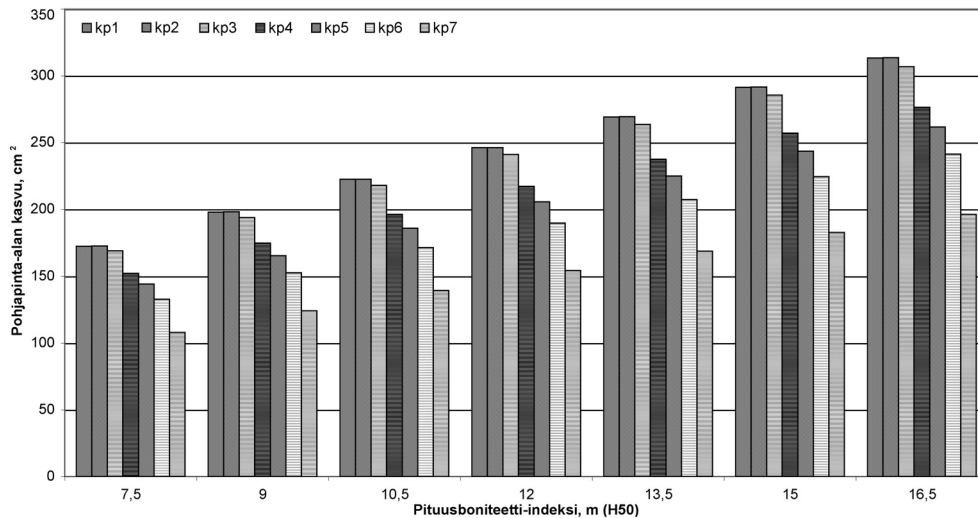
d_a = puun kuorellinen läpimitta jakson alkuhetkellä (cm)

i_d = puun läpimitan kasvu jakson aikana (cm)

Puun pohjapinta-alan kasvumalleissa käytetty painokerroin on otantatekniikoista johtuvan ja relaskooppiotantaan perustuvan painokertoimen tulo (w_S × w_{T₀}).

3.3 Selittävien muuttujien valinta

Kasvupaikkaluokat on kuvattu valtakunnallisissa pohjapinta-alan kasvumalleissa siten, että niillä on läpimitan kanssa yhteisvaikutus. Jättämällä kalibrointimalleista kasvupaikkaluokat kokonaan kalibroinnin ulkopuolelle varmistettiin se, että alkupe-
räisten mallien kasvupaikkatyyppien paremmuusjärjestys säilyi (kuva 1). Sen sijaan pituusboniteetti-



Kuva 1. Kasvupaikkaluokkien ja valtapituusindeksin (H50) vaikutus pohjapinta-alan kasvuun (ig) kivennäismailla valtakunnallisessa kasvumallissa, kun läpimitta (20 cm), latvussuhde (0,60), metsikön tiheysindeksi (0,75) ja puun kilpailuasema (0,2) ovat vakioita. kp1 = lehto, kp2 = lehtomainen kangas, kp3 = tuore kangas, kp4 = kuivahko kangas, kp5 = kuiva kangas, kp6 = karukkokangas, kp7 = kalliomaat ja hietikot.

indeksi voitiin ottaa malliin mukaan sekoittamatta tätä järjestystä. Jatkuvana muuttujana pituusboniteetti-indeksin kerroin muutti kasvun tasoa kaikilla kasvupaikoilla suhteessa saman verran.

Mallien laadinnassa selittävinä muuttujina käytettiin lisäksi kolmea eri tuholuokkaa kuvaavaa osoitinmuuttujaa: 1) lievä tuho, joka ei ole muuttanut metsikön laatua tai kehitysluokkaa, 2) todettava tuho, joka on alentanut hyvän tai tyydyttävän metsikön laatua yhdellä luokalla tai lisännyt merkittävästi vajaatuottoisen metsikön vajaatuottoisuutta ja 3) vakava tuho aiemmin kehityskelpoisessa metsikössä.

Ennustettaessa malleilla metsikön kehitystä ei yleensä tiedetä, onko metsikössä tuhoa tai min-kälaista ja -asteista tuho on. Kalibrointimalleihin liitettiin erillinen tuhovähennys, joka tuotti keskimääräisen tuhofrekvenssin mukaisen kasvun tason muutoksen. Tuhovähennys metsiköille laskettiin kalibrointimallissa merkittävänä muuttujana olleiden tuhomuuttujien avulla kaavalla 5 ja lisättiin saatu arvo vakioon, jotta kasvumallissa saataisiin huomioitua tuhon aiheuttamaa vähennys kaikissa metsiköissä. Tuhovähennykset on lisätty taulukoiden vakion arvoihin.

$$\text{Tuhovähennys} = \frac{n_1 k_1 + n_2 k_2 + n_3 k_3}{n_{\text{tot}}} \quad (5)$$

missä

k_i = tuholuokan i sekamallissa estimoitu vaikutus

n_1, n_2, n_3 = havaintojen lukumäärä tuholuokissa 1, 2 ja 3

n_{tot} = havaintojen kokonaismäärä kalibrointiaineistossa

3.4 Selitettävän muuttujan muunnoksen vaikutus

Perusmalli ja valtakunnallinen kalibrointimalli on laadittu logaritmisessa skaalassa mallin jäännösvarianssin homogeenoiseksi (Hynynen ym. 2002). Selitettävien muuttujien oletettiin siten vaikuttavan tulomuotoisesti selitettävään muuttujaan. Myös Pohjois-Pohjanmaan kalibrointimalli laadittiin logaritmisessa skaalassa, eli selitettävä muuttuja kuvasi todellisen arvon logaritmin ja ennustetun arvon logaritmin erotusta

Taulukko 4. Pohjapinta-alan kasvun eritasoiset kalibrointimallit männylle kivennäismaalla. Kork = korkeus merenpinnasta (m), meri = merisyysindeksi, h50 = pituusboniteetti-indeksi, d = puun läpimitta rinnankorkeudelta (cm), a = puun ikä rinnankorkeudelta (v), G = metsikön pohjapinta-ala (m²ha⁻¹)

	Malli 1		Malli 2		Malli 3		Malli 4	
	arvo	keskivirhe	arvo	keskivirhe	arvo	keskivirhe	arvo	keskivirhe
vakio	-0,227	0,0262	1,6137	0,3261	1,4258	0,3251	0,2765	0,0619
kork			-0,0019	0,0003	-0,0018	0,0003	-0,0007	0,0003
meri			-1,1359	0,2639	-1,0161	0,2564	-0,4674	0,2295
ln(h50)			-0,5891	0,1193	-0,5659	0,1182		
d ²					0,0003	0,0001	0,0003	0,0001
a							-0,0034	0,0004
G							-0,0127	0,0020
std(u)	0,3742		0,3448		0,3134		0,2764	
std(e)	0,6185		0,6057		0,6094		0,5822	
RMSE	0,7229		0,6970		0,6853		0,6444	
\bar{y}	-0,2270							
n	1434							
Varianssikorjaustermi:								
c _v	1,3331		1,3212		1,2910		1,1894	

$$\varepsilon = \ln(\hat{i}_g + 1) - \ln(\hat{i}_g + 1) \quad (6)$$

missä

ε = selitettävä virhe

\hat{i}_g = todellinen puun pohjapinta-alan kasvu (cm²)

\hat{i}_g = VK-kasvumallin ennuste (cm²)

Vakio (+1) lisättiin siksi, että pienillä kasvuilla muuttujan logaritmi oli hyvin pieni ja se olisi saattanut vaikeuttaa mallitusta. Lisäksi vakion lisääminen selitettävään muuttuun mahdollisti sen, että kasvu voi olla myös 0. Logaritmisessa skaalassa kalibroitu malli antoi harhattoman ennusteen pohjapinta-alan kasvun logaritmille, mutta ennuste piti saada harhattomaksi myös alkuperäiselle pohjapinta-alan kasvuille. Logaritminen kalibroitu pohjapinta-alan kasvuennuste muutettiin aritmeettiseen skaalaan kaavalla 7.

$$\hat{i}_{cal} = c_v \exp\left[\left(\hat{i}_g + 1\right) \exp(\hat{\varepsilon})\right] - 1 \quad (7)$$

missä

\hat{i}_{cal} = pohjapinta-alan kasvun ennuste Pohjois-Pohjanmaalle (cm²)

c_v = varianssikorjaustermi

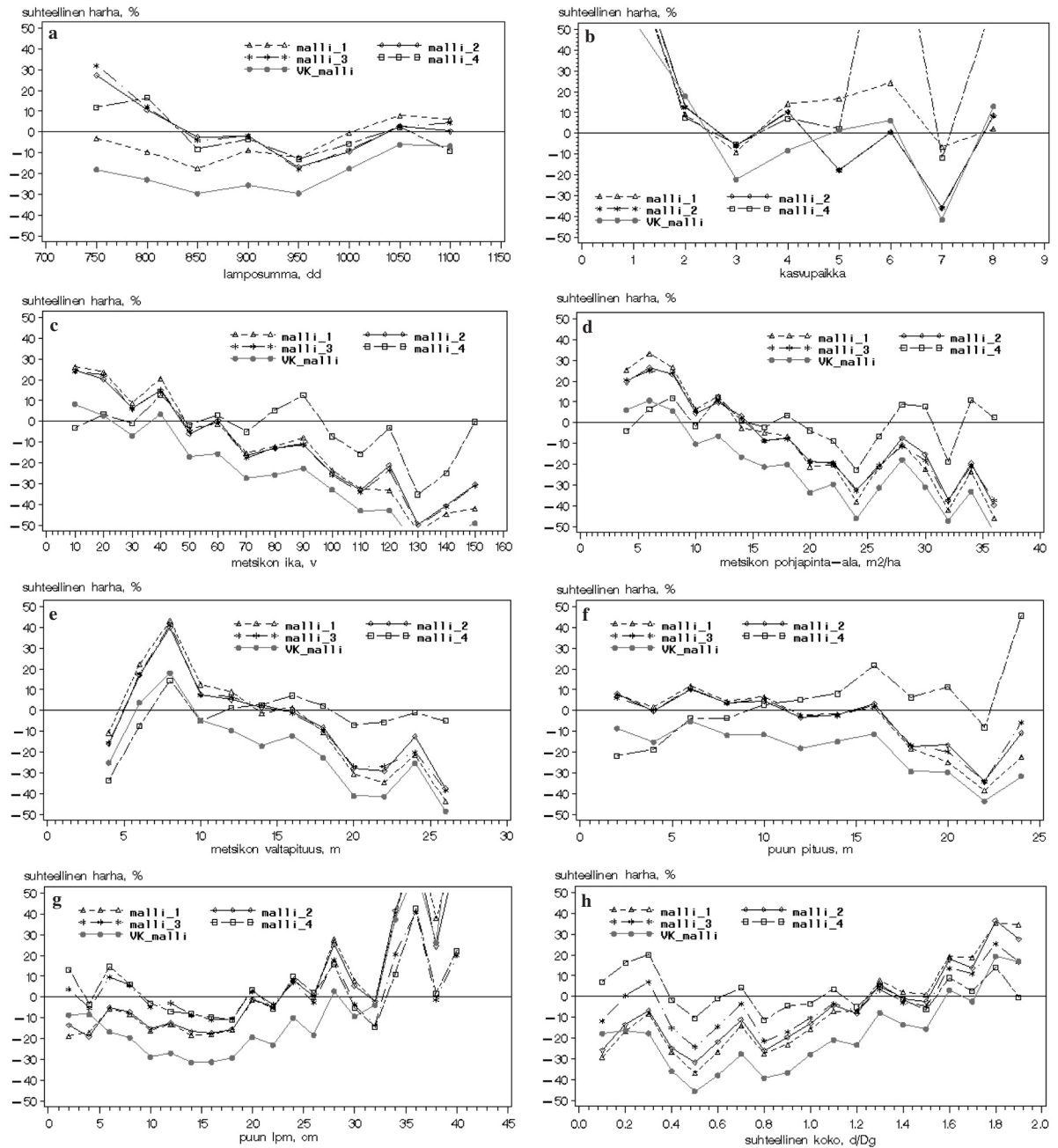
$\hat{\varepsilon}$ = virheen ennuste

Varianssikorjaustermi c_v saatiin aineiston todellisen pohjapinta-alan kasvun keskiarvon ja Pohjois-Pohjanmaan kalibrointimallin keskiarvon suhteesta (vrt. Hynynen ym. 2002), joka laskettiin kaikille PP-kalibrointimalleille erikseen. Varianssikorjaus lasketaan useissa tutkimuksissa mallin keskivirheestä (c_v = s_e²/2), kun aineisto oletetaan normaalijakautuneeksi (Lappi 1993). Tässä tutkimuksessa keskiarvojen suhde osoittautui kuitenkin tarkemmaksi varianssikorjaukseksi.

4 Tulokset

4.1 Kivennäismaat

PP-kalibrointimallit tuottivat keskimäärin noin 23 % pienemmän kasvuennusteen kuin VK-kasvumalli (taulukko 4, malli 1). Metsikkökalkibroinnin (malli 2) merkitsevinä muuttujina olivat korkeus merenpinnasta, merisyys ja pituusboniteetti-indeksin logaritmi (lnh50), joiden estimoitu vaikutus oli negatiivinen eli kasvun tasoa alentava (taulukko 4). Puukalibrointimallissa (malli 3) oli muuttujana lisäksi läpimitan neliö (d², cm²). Ikäkalibroinnin (malli 4) puu- ja puustotunnusmuuttujat (puun ikä ja läpimitta, metsikön pohjapinta-ala) pienensivät



Kuva 2. Puun pohjapinta-alan kasvun VK-mallin ja eritasoisten Pohjois-Pohjanmaan kalibrointimallien suhteelliset harhat kivennäismailla a) lämpösunnan, b) kasvupaikan, c) metsikön rinnankorkeusiän, d) metsikön pohjapinta-alan, e) metsikön valttapituuden, f) puun pituuden, g) puun rinnankorkeusläpimitan ja h) puun suhteellisen koon suhden.

Taulukko 5. Pohjapinta-alan kasvun eritasoiset kalibrintimallit männylle turvemaalla. TS = lämpösomma, kork = korkeus merenpinnasta (m), meri = merisyysindeksi, d = puun läpimitta rinnankorkeudelta (cm), A = metsikön ikä rinnankorkeudelta (v).

	Malli 1		Malli 2		Malli 3		Malli 4	
	arvo	keskivirhe	arvo	keskivirhe	arvo	keskivirhe	arvo	keskivirhe
vakio	0,1652	0,0392	2,0603	0,5794	1,6462	0,5366	1,4356	0,5485
(TS/1000) ²			-1,5426	0,4674	-1,3650	0,4293	-0,9883	0,4378
kork			-0,0024	0,0010	-0,0022	0,0010	-0,0023	0,0010
meri			-1,7589	0,6925	-1,8057	0,6532	-1,8960	0,7636
d ²					0,0005	0,0008	0,0005	0,2538
A							-0,0043	0,0012
std(u)	0,5174		0,5073		0,4186		0,4286	
std(e)	0,6658		0,6571		0,6729		0,6569	
RMSE	0,8432		0,8302		0,7925		0,7843	
\bar{y}	0,1652							
n	893							
Varianssikorjaustermi:								
c _v	1,1737		1,2291		1,1864		1,1571	

Pohjois-Pohjanmaan kalibrintimallin kasvuennusteen keskivirhettä.

Mallin 1 jäännöshajonnasta 0,37 (26,9 %) muodostui metsiköiden välisestä vaihtelusta. Vastaava arvo malleissa 2, 3 ja 4 oli 0,34, 0,31 ja 0,28 (24,5 %, 20,7 %, 18,4 %). Mallien 1 ja 2 jäännöshajonnan vaihtelun ero johtui todennäköisesti siitä, että mallin 2 muuttujat olivat metsikkökohtaisia muuttujia. Tässä tapauksessa metsiköiden välisen vaihtelun kuu- luikin pienetä. Mallin 3 olisi olettanut pienentävän metsikön sisäistä virhevaihtelua malleihin 1 ja 2 verrattuna, koska mallissa oli puun läpimittaa kuvaava tunnus; mallin varianssikomponentit pysyivät lähes samoina, kun puun läpimitan sijaan muuttujana oli metsikön keskiläpimitta. Ainoastaan mallissa 4, jossa oli selittäjinä lisäksi sekä puun ikä että metsikön keskiläpimitta, metsikön sisäinen virhevaihtelu oli selvästi pienempää kuin muissa malleissa. Myös metsiköiden välinen virhevaihtelu pieneni.

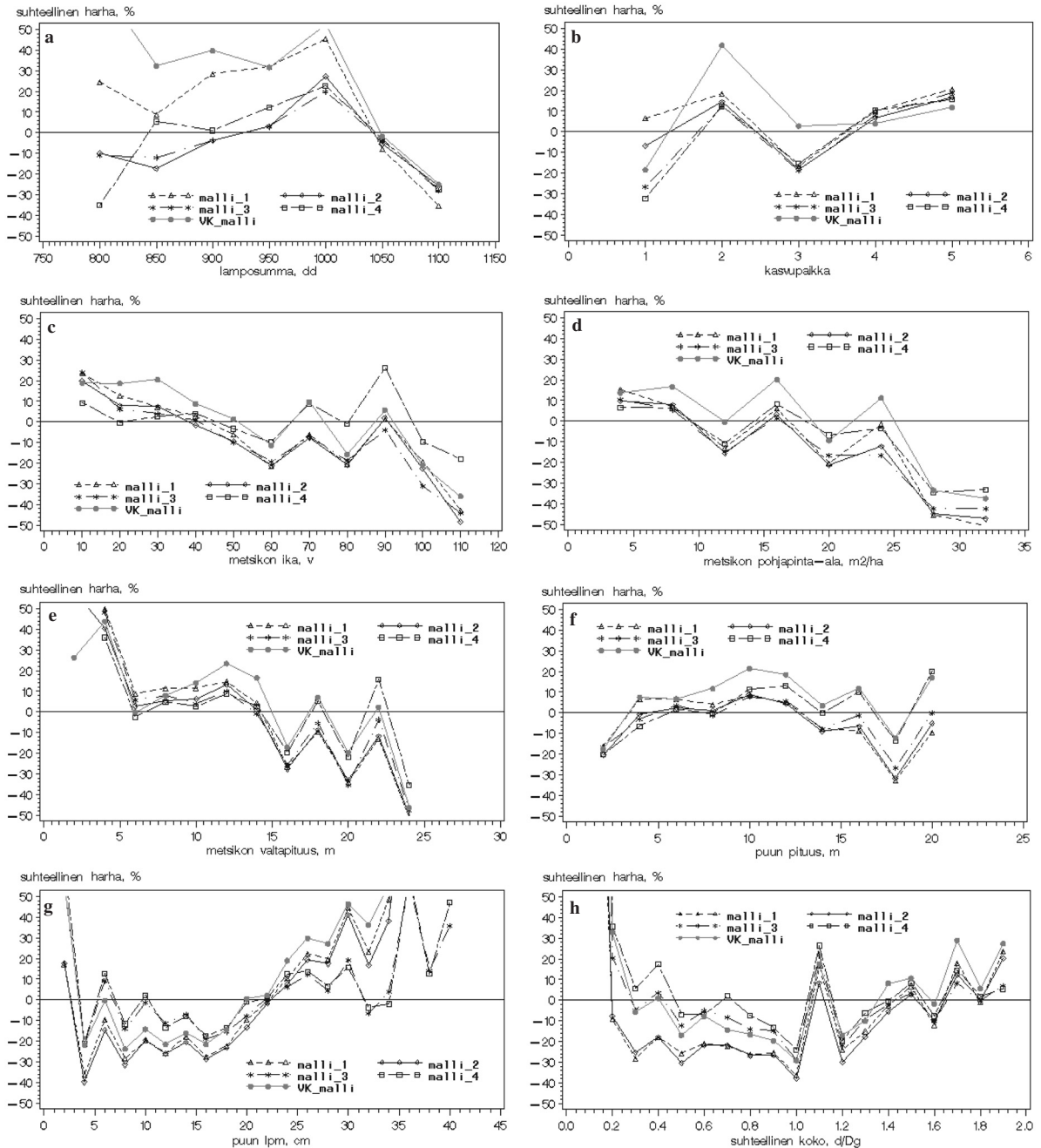
Mallilla 4 oli pienin suhteellinen harha tarkasteltaessa ennustetta eri muuttujien suhteen (kuva 2). Erityisesti tämä oli huomattavissa metsikön puustotunnusten ja puun läpimitan suhteen. Sekä muiden kalibrintimallien että valtakunnallisen mallin kasvuennusteilla oli näiden muuttujien suhteen joko nouseva tai laskeva trendi, jolloin ennuste muuttujan pienillä arvoilla oli yliarvio ja suurilla aliarvio tai päinvastoin. Lehdossa (kp = 1) sekä lakimetsissä

ja tuntureilla (kp = 8) kaikkien mallien ennuste oli hyvin suuri aliarvio. Lisäksi mallin 4 ennuste on suuri aliarvio myös karukkokankailla (kp = 6). Nämä suuret ennustevirheet johtuivat todennäköisesti siitä, että luokissa oli vain 2–3 havaintoa kussakin.

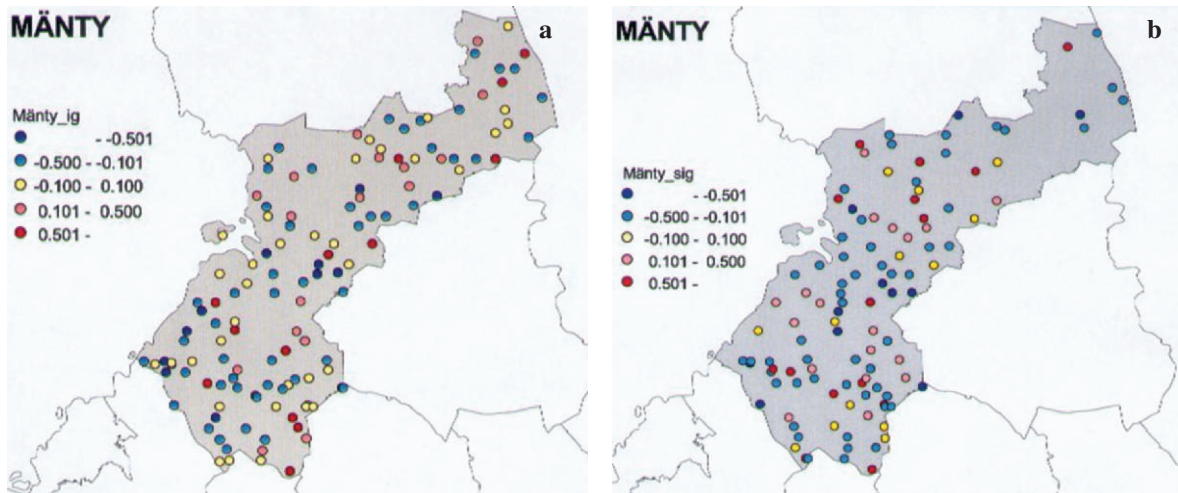
4.2 Turvemaat

Kalibrintimallit turvemaille tehtiin samoin kuin kivennäismaiden kasvumallit. Turvemaiden kalibrintimallit nostivat kasvuennustetta noin 17 % VK-malliin verrattuna (taulukko 5, malli 1). Mallin 2 merkitsevinä muuttujina olivat lämpösomma, korkeus merenpinnasta ja merisyysindeksi. Tilastollisesti merkitsevin kasvuun vaikuttava tekijä oli lämpösomma (t-arvo -3,3). Mallissa 3 oli edellä mainittujen muuttujien lisäksi puun läpimitan neliö (d², cm²), jolloin mallin keskivirhe metsikkötasolla pieneni edelleen. Mallin 4 merkitsevinä muuttujana edellisten lisäksi oli ainoastaan metsikön ikä rinnankorkeudella.

Mallin 1 jäännöshajonnasta 0,52 (37,7 %) muodostui metsiköiden välisestä vaihtelusta. Vastaavat arvot malleilla 2, 3 ja 4 olivat 0,51, 0,42 ja 0,43 (37,3 %, 27,9 % ja 29,8 %). Vähäinen ero mallien 1 ja 2 välillä saattoi kuvastaa mallin 2 muuttujien heikkoa kykyä selittää metsiköiden välistä vaihte-



Kuva 3. Puun pohjapinta-alan kasvun VK-mallin ja eritasoisten Pohjois-Pohjanmaan kalibrointimallien suhteelliset harhat turvemilla a) lämpösunnan, b) kasvupaikan, c) metsikön rinnankorkeusiän, d) metsikön pohjapinta-alan, e) metsikön valtipituuden, f) puun pituuden, g) puun rinnankorkeusläpimitan ja h) puun suhteellisen koon suhteen.



Kuva 4. Männyn kalibroidun pohjapinta-alan kasvuennusteen suhteellisen harhan spatiaalinen jakautuminen a) kivennäismailla ja b) turvemailla.

lua. Sen sijaan malli 3 kuvasi hyvin tätä vaihtelua, vaikka malliin lisättiin puutason muuttuja, d^2 . Tässä mallissa puun läpimitta selitti enemmän metsiköiden välistä kuin metsikön sisäistä vaihtelua, mikä saattoi johtua metsiköiden homogeenisuudesta aineistossa (vrt. Hökkä 1997).

Vertailtaessa kalibrointimallien suhteellisia harhoja eri muuttujien suhteen (kuva 3) mallin 4 ennuste ei turvemailla ollut yhtä harhaton kuin kivennäismailla, vaan suhteelliset harhat olivat kaikissa kalibrointimalleissa lähes samaa tasoa. Kalibroinnilla ei onnistuttu poistamaan useimpien muuttujien suhteen esiintyviä trendejä, vaan ainoastaan kasvuennusteiden taso nousi valtakunnalliseen malliin verrattuna. VK-kasvumallissakaan ei kalibroinnilla saatu täysin poistettua vastaavia valtakunnallisia trendejä (Hynynen ym. 2002). Mallit 3 ja 4 olivat eritasoisista kalibrointimalleista harhattomimpia.

4.3 Spatiaalinen tarkastelu

Kuvassa 4 on esitettyä kivennäis- ja turvemaiden kasvumallien ennusteiden suhteellisten harhojen spatiaalinen jakautuminen kalibroinnin jälkeen Pohjois-Pohjanmaan metsäkeskuksen alueella. Kalibrointimallina oli malli 2. Havaintolohkot (pisteet kartalla) kuvaavat kalibrointiaineiston samalla lohkolla olevien havaintojen suhteellisten harhojen keskiarvoa.

Kivennäismaiden kalibroidun kasvuennusteen suhteellisessa harhassa (kuva 4a) oli alueittain havaittavissa pientä yliarvioiden keskittymää Pohjois-Pohjanmaan lounaisosissa ja toisaalta myös keski-osissa. Ennusteet havainnoille, joiden suhteellinen harha oli alle 10 %, jakautuivat kuitenkin tasaisesti koko tarkasteltavalle alueelle. Havaintoja oli lohkolla keskimäärin 11.

Turvemaiden kalibroidut kasvuennusteet olivat yliarvioita lähes tasaisesti koko Pohjois-Pohjanmaan metsäkeskuksen alueella (kuva 4b). Suhteellinen harha vaihteli lohkoilla $-0,9$ ja $2,5$ välillä, joten suuret yliarviot keskittyivät vain muutamiin lohkoihin. Koska suhteellinen harha koko alueella oli $-0,003$, malli yliarvioi kasvun suuressa osin tarkasteltavaa aluetta. Havaintoja oli lohkolla keskimäärin 8,0.

5 Tulosten tarkastelu

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten eri kalibrointimallit vaikuttavat kasvuennusteeseen, kalibroinnin merkitystä sekä siinä ilmeneviä ongelmia. Pohjois-Pohjanmaan metsäkeskuksen alue on kasvulosuhteiltaan hyvin heterogeeninen (mm. Kiukaanniemi 1998), minkä vuoksi kalibrointi olisi voitu tehdä pienemmille alueille koko metsäkeskuksen alueen sijaan. Alueelle tehtiin kuitenkin vain yhdet kasvumallit sekä kivennäis- että turvemaalle, koska pienellä aineistolla tehdyissä kalibrointimalleissa ei onnistuta kuvaamaan riittävän hyvin kaikkia tarkastelun kohteena olevan alueen kasvulle ominaisia muuttujia. Suuremmalla aineistolla on mahdollista löytää malleihin enemmän merkitseviä muuttujia (Sironen ym. 2001).

Vakio- ja metsikkötunnusmalleilla (mallit 1 ja 2) kalibrointi ei muuttanut kalibrointimallin sisäistä dynamiikkaa, vaan mallin muoto säilyi samanlaisena. Sen sijaan puustotunnusmalleilla (mallit 3 ja 4) kalibrointi muutti kalibrointimallin muotoa siten, että ennusteen suhteellinen ero valtakunnalliseen mallin ennusteeseen verrattuna ei pysynyt vakiona yli vertailtavien tunnusten.

Malli 4 oli tilastollisesti paras sekä kivennäis- että turvemailla, ja sen ennusteet olivat harhattomia usean tarkasteltavan muuttujan suhteen. Mallien laadinta-aineistosta johtuen sen soveltuvuus kalibrointimalliksi oli kyseenalainen. Koska kalibrointiaineistossa oli vain vähän vanhoja puita hyvillä kasvupaikoilla, oli mahdollista, että iän sisältänyt malli antoi harhaisia ennusteita vanhoille puille. Mallin ennuste painottui vanhojen, huonoilla kasvupaikoilla kasvanneiden puiden mukaan (Ojansuu 1996). Tällöin mallin virhe korreloi selittäjien kanssa, mikä on vastoin regressioanalyysin taustaoletuksia. Puutunnusmuuttujan sisältävät kalibrointimallit (3 ja 4) saattoivat muuttaa alkuperäisen mallin dynamiikkaa, minkä vaikutusta kasvun ennusteeseen pitkällä aikavälillä ei tässä tutkimuksessa kuitenkaan selvitetty. Kalibrointiaineiston koealat eivät olleet riittävät suuria onnistuakseen kuvaamaan metsikön tiheyttä ja sen vaikutusta yksittäiseen puuhun. Jos koealan koko on pienempi kuin tarkasteltavan puun kilpailualueen laajuus, koeala ei pysty selittämään kohdepuuhun kohdistuvaa kokonaiskilpailua (Hynynen ja Ojansuu

2003). Mallitettaessa tällaisella aineistolla metsikön sisäinen dynamiikka voi vääristyä.

Malli 1 korjasi vain valtakunnallisen mallin kasvun tason kalibrointiaineiston keskiarvoon, eikä huomionnut ennustevirheen ja aineiston muuttujien välisiä riippuvuuksia.

Mallin 2 jäännöshajonnat olivat suurempia kuin mallien 3 ja 4. Kuitenkin tämän mallin muuttujat olivat tunnuksia, jotka eivät muuttaneet valtakunnallisen kasvumallin sisäistä rakennetta metsikössä. Tämän vuoksi metsikkötunnusmalli oli tutkimuksessa suosittelavin kalibrointimalliksi.

Eritasoisten mallien vertailussa havaittiin, että puu- tai puustotunnusmuuttujan lisääminen malliin pienensi ennusteen keskivirhettä. Puutunnuksen mukaan ottamisen pitäisi lisätä mallin selityskykyä metsiköiden sisällä, mutta tässä tutkimuksessa se paransi keskivirhettä merkittävästi vain metsiköiden välillä kivennäismaiden mallissa. Tutkimuksen aineiston koko saattoi vaikuttaa tulokseen: pienessä aineistossa erityisesti metsiköiden välinen vaihtelu on pientä (Sironen ym. 2001).

Pohjois-Pohjanmaalle kalibroidun kivennäismaiden pohjapinta-alan kasvumallin ennuste oli 23 % valtakunnallisen kasvumallin ennustetta pienempi. Pääosa valtakunnallisen mallin laadinta-aineistosta oli Etelä-Suomesta, ja Pohjois-Suomen huonommissa kasvulosuhteissa pohjapinta-alan kasvunennuste saattaa olla yliarvioitua (Hynynen ym. 2002). Vastaavasti turvemaiden Pohjois-Pohjanmaalle kalibroitu kasvumalli ennusti 17 % suuremman kasvun kuin valtakunnallinen malli. Eräs syy tälle saattoi olla valtakunnallisen mallin laadinta-aineisto; havainnot olivat keskittyneet hajanaisemmin ja enemmän Pohjois-Suomeen kuin Etelä-Suomeen. Pohjois-Pohjanmaalla on viime vuosina tehostettu turvemaiden puuston ottamista yhä enemmän talouskäyttöön (Kiukaanniemi 1998), ja tästä johtuvan kasvun lisääntymisen vuoksi myös kalibrointimallin ennuste voisi olla suurempi kuin valtakunnallisen kasvumallin antama.

Vertailussa kivennäismaiden ja turvemaiden kalibrointimallit erosivat toisistaan keskivirheen suuruudella: kivennäismailla metsikkötunnusmallin keskivirhe oli 0,70, kun turvemailla se oli 0,83. Kivennäismaat ovat ominaisuuksiltaan keskimäärin tasaisempia kuin turvemaat (Hökkä 1997), ja tästä johtuen mallin keskivirhe oli suurempi turvemailla.

Lisäksi turvemailla kasvumalli pyrki yliarvioimaan ennustetta, mikä saattoi johtua havaintoaineistossa muista poikkeavista muuttujista. Mallit antavat luotettavia ennusteita parhaiten mallitettavan muuttujan keskiarvon läheisyydessä, ja mitä kauempana muuttujan arvo on keskiarvosta, sitä vaikeammin ennustettava se on. Lisäksi kasvupaikan vaikutus puuston kasvuun on merkittävä, ja se on huomioitava kasvumalleja tehtäessä tai kalibroitaessa.

Kalibroituja kasvumallien käyttö Pohjois-Pohjanmaalla antaa entistä tarkemman arvion metsäkeskuksen alueen hakkuumahdollisuuksista. Jos käytettävissä olisi ollut vielä uudempaa kalibrointia-aineistoa (VMI9), vastaisi kalibrointitulokset paremmin nykypuuston kasvun tasoa. Vanhemmallakin aineistolla voitiin kuitenkin luoda mallit, jotka kuvastivat Pohjois-Pohjanmaan metsäkeskuksen puiden kasvun tasoa ja ominaispiirteitä valtakunnallista mallia paremmin.

Kasvumallin paikallisella kalibroinnilla on mahdollista saada tarkempia kasvuennusteita tarkastelun kohteena olevan alueen puustosta. Harhattomilla kasvun ennusteilla on mahdollista tehdä luotettavia ennusteita tulevasta puuston määrästä ja tätä kautta kestäviä hakkuusuunnitteita. Kasvumallien kalibroinnista saatavasta mahdollisesta lisähyödystä ja sen suuruudesta ei ole toistaiseksi tutkimustuloksia. Pohjois-Pohjanmaan metsäkeskus on tällä hetkellä ainoa metsäkeskus, jolle kasvumallit on kalibroitu MOTTI-simulaattorissa. Talvitien (2003) opinnäytteessä on esitetty pohjapinta-alan kalibrointimallit myös kuusen, rauduskoivun, hieskoivun ja muiden lehtipuiden osalta, sekä puulajeittaiset kalibrointimallit metsikön valtapituudelle, puun pohjapinta-alan kasvulle turvemailla ja puun pituudelle turvemailla.

Kirjallisuus

- Gustavsen, H.G. 1990. Puuston kasvumallit. Julkaisussa: Saramäki, J., Mäkkeli, P. (toim.). Metsätalouden suunnittelu. Metsäntutkimuspäivä Joensuussa 1990. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 357: 13–23.
- Hynynen, J. 1996. Puuston kehityksen ennustaminen MELA-järjestelmässä. Julkaisussa: Hynynen, J., Ojansuu, R. (toim.). Puuston kehityksen ennustaminen – MELA ja vaihtoehtoja. Tutkimusseminaari Vantaalla. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 612: 59–67.
- 2000. Kasvu- ja tuotostutkimuksen muuttuvat haasteet – eilisen tutkimusta huomisen metsissä? Metsätieteen aikakauskirja 1/2000: 54–58.
- & Ojansuu, R. 2003. Impact of plot size on individual-tree competition measures for growth and yield simulators. *Canadian Journal of Forest Research* 33(3): 455–465.
- , Ojansuu, R., Hökkä, H., Siipilehto, J., Salminen, H. & Haapala, P. 2002. Models for predicting stand development in MELA System. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 835. 116 s.
- Hökkä, H. 1997. Height-diameter curves with random intercepts and slopes for trees growing on drained peatlands. *Forest Ecology and Management* 97: 63–72.
- Hiikaanniemi, E. 1998. Puunkäytön merkitys Pohjois-Pohjanmaan aluetaloudessa. Julkaisussa: Meriläinen, A., Piironen, M.-L., Niemistö, P. & Murtovaara, I. (toim.). Metsätalouden kestävyys ojitusalueilla ja puuvarojen hyödyntäminen Pohjanmaalla. Metsäntutkimuspäivä Muhoksella 1998. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 699. 60 s.
- Lappi, J. 1993. Metsäbiometriian menetelmiä. *Silva Carelica* 24. 182 s.
- & Bailey, R.L. 1987. Estimation of the diameter increment function or other tree relations using angle-count samples. *Forest Science* 33(3): 725–739.
- Leskinen, J. 1991. Kasvumallien kalibrointi. Metsänarvioimistieteen pro gradu-tutkielma. 52 s. + liitteet. Metsätalostollinen vuosikirja 1992. 1993. Metsäntutkimuslaitos. 317 s.
- Ojansuu, R. 1996. Kangasmaiden kasvupaikan kuvaus MELA-järjestelmässä. Julkaisussa: Hynynen, J. & Ojansuu, R. (toim.). Puuston kehityksen ennustaminen – MELA ja vaihtoehtoja. Tutkimusseminaari Vantaalla. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 612. 116 s.
- , Hynynen, J., Koivunen, J. & Luoma, P. 1991.

- Luonnonprosessit metsälaskelmassa (MELA) – Met-
sä 2000-versio. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja
385. 59 s.
- Paavilainen, E. & Tiihonen, P. 1988. Suomen suometsät
vuosina 1951–1984. *Folia Forestalia* 714. 29 s.
- SAS Institute Inc. 1989. SAS/STAT user's guide, Version
6, Fourth Edition, Volume 2 Gary, NC. 846 p.
- Sironen, S., Kangas, A., Maltamo, M. & Kangas, J. 2001.
Estimating individual tree growth with the k-nearest
neighbour and k-most similar neighbour methods.
Silva Fennica 35(4): 453–467.
- Siitonen, M. 1996. MELA ja metsien kehityksen en-
nustaminen. Julkaisussa: Hynynen, J. & Ojansuu, R.
(toim.). Puuston kehityksen ennustaminen – MELA ja
vaihtoehtoja. Tutkimusseminaari Vantaalla. Metsäntu-
kimuslaitoksen tiedonantoja 612. 116 s.
- Talvitie, M. 2003. MOTTI-järjestelmässä sovellettavien
kasvumallien kalibrointi Pohjois-Pohjanmaan metsä-
keskuksen alueelle. Metsänarvioimistieteen Pro gradu-
tutkielma. 80 s.
- Zhang, L. & Shi, H. 2004. Local modeling of tree growth
by geographically weighted regression. *Forest Science*
59(2): 225–244.

19 viitettä