



■ Esko Välimäki



■ Annika Kangas

Esko Välimäki ja Annika Kangas

Kasvumallien toiminnan validointi ylitieheissä metsiköissä

Välimäki, E. & Kangas, A. 2009. Kasvumallien toiminnan validointi ylitieheissä metsiköissä. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2009: 97–112.

Nykyisin lähes kaikki metsiä koskevat päätökset, yksittäisistä hakkuu- ja hoitopäätöksistä aina metsänhoito-suositusten muotoiluun ja metsäpoliittisiin päätöksiin perustuvat kasvusimulaattoreihin. Tutkimustietoa kasvun ja erityisesti luonnonpoistuman ennusteiden tarkkuudesta on kuitenkin vähän, etenkin pidemmiltä ennustejaksoilta. Luotettavuutta tyypillisesti arvioidaan keskimäärin koko testiaineistossa, jolloin tietoa mallin käyttäytymisestä soveltamisalueensa rajoilla on vähän. Tässä tutkimuksessa selvitettiin, miten MOTTI mallit ennustavat metsien kehitystä ylitieheissä metsiköissä. Erityisesti tarkasteltiin itseharvenemisen ennusteiden onnistumista. Tulokset osoittavat, että metsät voivat kasvaa luontaisesti huomattavasti tiheämpiä kuin käytetyt mallit ennustavat. Tällöin erityisen tiheiden metsien pohjapinta-alan kehitys aliarvioidaan, vaikka tavanomaisempien metsiköiden kasvunennusteet ovat melko tarkkoja. Se voi vaikuttaa paitsi yksittäisten metsiköiden käsittelysuosituksiin, myös mallien perusteella laadittuihin hoitosuosituksiin.

Asiasanat: ennustevirhe, kasvumalli, simulointi

Yhteystiedot: *Kangas*, Helsingin yliopisto, Metsävarojen käytön laitos, PL 27 00014 Helsingin yliopisto; *Välimäki*, Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio, Soidinkuja 4, 00700 Helsinki

Sähköposti [annika.kangas\(at\)helsinki.fi](mailto:annika.kangas(at)helsinki.fi)

Hyväksytty 11.3.2009

Saatavissa <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff09/ff092097.pdf>

I Johdanto

Kasvumallien ja -simulaattorien yleisimpiä käyttökohteita ovat metsävaratietojen päivitys, toimenpiteiden vaikutusten arviointi, metsäsuunnittelu ja hakkuiden ajoittaminen (Burkhart 1993). Tämän lisäksi niitä käytetään esimerkiksi optimoitaessa metsien käsittelyjä metsänhoito-suositusten muodostamisessa (esim. Pukkala ja Miina 1998, Hyytiäinen ja Tahvonen 2002, Hyytiäinen ym. 2006). Kasvusimulaattoreita käytetään myös yleisemmin metsäpoliittisessa päätöksenteossa, niihin perustuvat esimerkiksi arviot Suomen tulevista hakkuumahdollisuuksista (Nuutinen ym. 2005). Koska päätöksenteko metsätaloudessa perustuu vahvasti malleihin, niiden olisi hyvä olla mahdollisimman tarkkoja. Mallien tulokset ilmoitetaan näennäisen tarkkoina lukuarvoina, jotka voivat luoda liian optimistisen kuvan mallien toiminnasta (Haara 2002). Metsiä koskevat päätökset vaatisivat tuekseen lisää tietoa ennusteiden luotettavuudesta.

Puuston kasvua voidaan ennustaa joko metsikkötason, kokoluokkatason tai puutason malleilla (esim. Vanclay 1994). Näiden lisäksi puiden elintoimintoihin perustuvat prosessimallit ovat käyttökelpoinen tapa ennusteiden tuottamiseen (esim. Mäkelä ym. 2000, Mäkelä 2003). Metsikkötason- ja kokoluokkatason malleja on pidetty helpokäyttöisinä ja luotettavina (Gustavsen 1998). Puutason mallien ja prosessimallien on sen sijaan arvioitu kuvaavan puuston kasvua yksityiskohtaisemmin (Miina 2001). Aina 1980-luvun alkuun asti pääosa kasvuennusteista tuotettiin Suomessa metsikkötason kasvumalleilla. Tämän jälkeen pääpaino siirtyi kohti puutason malleja, jotka sittemmin vakiinnuttivat asemansa operationaalisella tasolla. Tavoitteena on ollut kuvata mahdollisimman tarkasti puiden keskinäistä vuorovaikutusta. Se mahdollistaa hakkuupäätösten seuraamusten arvioinnin.

Suomessa yleisesti käytetyn MELA-järjestelmän (Siitonen 1996) ja sen sisärjestelmän MOTIN (Salminen ym. 2005) simulointiosassa on sekä puu- että metsikkötason kasvumalleja (Hynynen ym. 2002). Malleissa ei käytetä tietoa puiden sijainneista ja ne ovat siten ei-spatiaalisia. Puiden kasvua ennustava malliketju koostuu pohjapinta-alan kasvumallista, metsiköiden valtapituuden kasvumallista, luonnon-

poistumaa kuvaavista malleista sekä uusien puiden syntymistä ja varhaiskehitystä kuvaavasta mallista. Luonnonpoistumamallit sisältävät sekä yksittäisten puiden satunnaista kuolemista kuvaavan todennäköisyysmallin että tiheydestä johtuvaa kuolemista kuvaavan itseharvenemisrajamallin (Hynynen ym. 2002, Salminen ym. 2005). Itseharvenemisraja kuvaa maksimirunkolukua, joka tietyn keskiläpimitan metsiköissä voi enintään olla (Hynynen 1993). Laskennassa rajan ylittäneiden metsiköiden runkolukua lasketaan itseharvenemisrajalle. Tavoitteena järjestelmällä on ennustaa kasvua harhattomasti kaikenlaisten kasvupaikkojen kaikenlaisille puustoille (Hynynen ym. 2002).

Kasvumallien luotettavuutta on arvioitu muutamissa tutkimuksissa. Yleisin tapa on arvioida luotettavuutta empiirisesti, eli vertaamalla olemassa olevaan aineistoon (esim. Haara ja Leskinen 2009). Tyypillisesti virhettä arvioidaan koko testiaineistoa keskimäärin kuvaavalla keskineliövirheellä (MSE) ja sen neliöjuurella (RMSE). Keskimääräinen tarkkuus on hyödyllinen tieto, mutta ei anna informaatiota siitä, mitkä ovat mallin suurimmat heikkoudet ja vahvuudet, eli mihin malli sopii ja mihin ei. Tämä menetelmä myös vaatii erittäin hyvän aineiston, kuten esimerkiksi valtakunnallisen inventointiaineiston ollakseen luotettava. Jos mallin ennustevirheitä mallinnetaan metsikön ominaisuuksien funktiona, saadaan tietoa siitä, miten malli eri tilanteissa käyttäytyy (esim. Kangas 1999, Haara 2002, Haara ja Leskinen 2009). Tämä lähestymistapa ei välttämättä tarvitse suurta ja edustavaa aineistoa, mutta sen sijaan tarvitaan aineisto jossa selittävien muuttujien, kuten puuston tiheyden, vaihtelu on mahdollisimman suuri (Lappi 1993). Kolmas mahdollisuus olisi tarkastella mallien virheitä Monte Carlo simuloinnilla (esim. Gertner 1987, Kangas 1997). Tämä lähestymistapa kuitenkin tuottaa lähinnä alarajan todellisille ennustevirheille (Kangas 1999).

Valtakunnallisen inventointiaineiston alueellisen kattavuus on hyvä, mutta ajallinen kattavuus on huono. Tuloksia saadaan tyypillisesti vain yhden 5-vuotiskauden ennusteiden luotettavuudesta (esim. Hynynen ym. 2002). Teoriassa mallien antamat ennusteet heikkenevät simulointikauden pituuden funktiona (esim. Kangas 1997), joten tarvitaan myös mittaustietoja pidemmiltä ajanjaksoilta. Haara ja Leskinen (2009) on tutkinut MOTTI-mallien

luotettavuutta INKA-aineistossa, jossa oli mahdollista selvittää luotettavuutta 10 vuoden periodilla. Pidemmän aikavälin ennusteista ei ole julkaistuja tutkimustuloksia.

MOTTI-ohjelmistossa käytetyt mallit on testattu ja kalibroitu VMI-aineiston avulla (Hynynen ym. 2002) ja testattu myös INKA-aineistossa (Haara ja Leskinen 2009). Mallien toiminnasta keskimäärin on siis melko hyvä käsitys: esimerkiksi tilavuuden RMSE INKA-aineistossa 5 vuoden periodilla oli 8% ja 10 vuoden periodilla 11.6%. Tutkimuksessa myös havaittiin, että sekä mallin harha että varianssi riippuvat metsikön ominaisuuksista: mallin luotettavuus siis vaihtelee olosuhteiden mukaan (Haara ja Leskinen 2009). VMI- ja INKA-aineisto kuitenkin sisältävät vain hyvin vähän erittäin tiheitä kohteita, eli kohteita joissa esiintyy myös luonnonpoistumaa. Esimerkiksi INKA-aineistossa maksimaaliset pohjapinta-alat eri kasvillisuusvyöhykkeillä vaihtelivat 25:stä 39:ään (Sironen et al. 2008). Kilpailun ja luonnonpoistuman kuvauksen merkityksestä kasvumallien tulosten luotettavuudelle ei siten ole kovin hyvää kuvaa, ei myöskään ennustuskauden pituuden merkityksestä ennusteiden luotettavuuteen.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on arvioida MOTTI-metsikkösimulaattorin (v. 1.1 19.1.2006) kasvuennusteiden luotettavuutta ylitiheissä metsiköissä. Tutkimuksessa tarkastellaan simulaattorin ennusteiden kehitystä 20 vuotta pitkällä ja toimenpiteettömällä simulointijaksolla. Ennusteita verrataan kerättyyn referenssiaineistoon ja simulointijakson loppuun kertyneet virheet kuvataan metsiköiden lähtötietojen suhteen. Virheitä tarkastellaan myös ennustajakson pituuden funktiona. Luokkiin jaettu aineisto antaa kuvauksen mahdollisista ongelma-kohteista.

2 Aineisto

2.1 Aineiston kartoitus ja keruumenetelmä

Tutkimusaineisto on kerätty UPM-Kymmenen paltoilta Helsingin yliopiston metsäaseman, Hyytiälän, läheisyydestä. Hyytiälää ympäröiviltä tiloilta etsittiin kaikki kuviot, joissa puusto kuviotietokirjan mukaan oli erityisen tiheää (pohjapinta-ala yli 35),

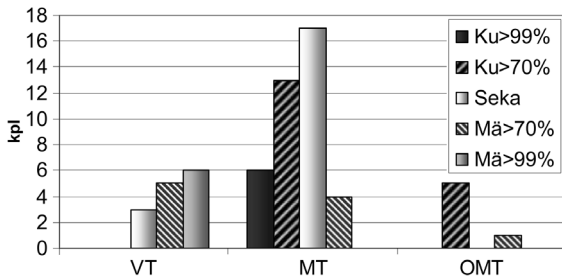
Taulukko 1. Lukupuukoealan säteenmääritystaulukko.

Puuston tiheys (kpl/ha)	Koealan säde (m)	Koealan koko (m ²)
400	15,45	750
800	10,93	375
1200	8,92	250
1600	7,73	188
2000	6,91	150
2400	6,31	125
2800	5,84	107
3200	5,46	94
3600	5,15	83
4000	4,89	75

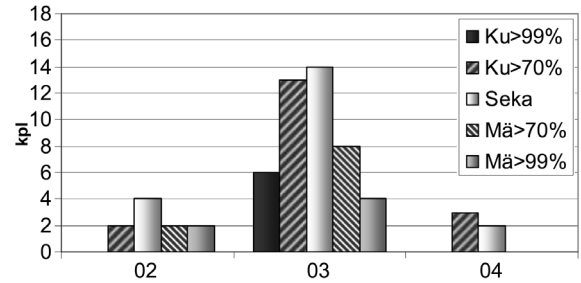
ja joita ei ollut käsitelty 20 vuoteen. Kehitysluokan osalta valittiin nuoria ja varttuneita kasvatusmetsiköitä. Näistä kohteista mitattiin kaikki, joita ei ollut myöhemmin hakattu ja joissa kuvio ei osoittautunut liian pieneksi, tahi puusto ei osoittautunut tarkastuksessa ennakoitua selvästi harvemmaksi. Kaksijaksoisia ja voimakkaasti sieni- tai hyönteistuhouista kärsineitä metsiköitä vältettiin. Myös mahdolliset lannoituskohteet jätettiin tarkastelun ulkopuolelle. Lisäksi mitattiin muutama kohde, joissa puusto oli harvempaa, jotta virheiden tiheysriippuvuuden muoto saatiin selväksi.

Aineiston keruumenetelmänä käytettiin mukaelmaa Gustavsenin ym. (1988) esittämistä INKA-koealojen keruumenetelmästä. Mukaelmassa kuviokohtaisten ympyräkoealojen määrää vähennettiin kolmesta kahteen. Koealojen sijoittelu toisiinsa nähden oli INKA-kokeita vastaava. (ks. tarkempi kuvaus Välämäki 2006). Kukin koeala sisälsi samankeskiset koealat lukupuulle ja koepuille. Lukupuukoeala oli suurempi ja sen koko riippui puuston tiheydestä siten, että kuhunkin koealaan kuului vähintään 30 puuta (taulukko 1). Koepuukoealan koko oli neljännes lukupuukoealan koosta.

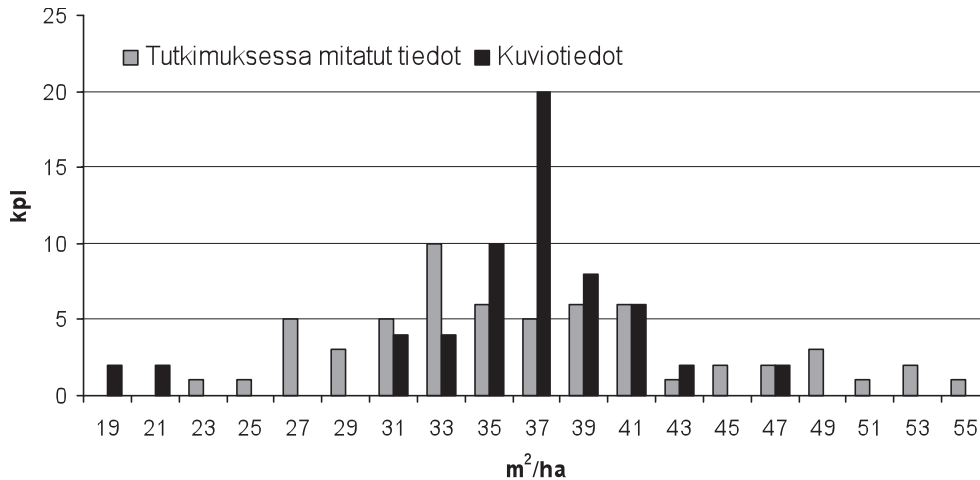
Lukupuukoealan puilta (sekä eläviltä että kuolleilta) mitattavia ja määritettäviä tunnuksia olivat rinnankorkeusläpimitta ja puulaji. Koepuilla (elävät havupuut) mitattiin näiden lisäksi pituus, latvusraja, kuoren paksuus ja jos mahdollista puun pituus 20 vuotta sitten. Koepuista kairattiin myös kasvukairalla lastut, joista laskettiin ikä ja 20 vuoden sädekasvu viiden vuoden jaksoissa. Jos koealalla oli luontaisesti kuolleita puuta, määritettiin puiden



Kuva 1. Tutkimuskoealojen jakautuminen puustoluokittain ja metsätyypeittäin.



Kuva 2. Tutkimuskoealojen jakautuminen puustoluokittain ja kehitysluokittain (02 = nuori kasvatusmetsikkö, 03 = varttunut kasvatusmetsikkö, 04 = uudistuskypsä metsikkö).



Kuva 3. Koealojen jakautuminen pohjapinta-alaluokkiin kuviotietojen ja tutkimuksessa mitattujen tietojen mukaan.

kuolinhetki silmämääräisesti asteikolla 1, 2, 5, 10, 15 tai yli 20 vuotta sitten. Koealakohtaisesti määritettäviä tunnuksia olivat metsätyyppi, koordinaatit, korkeus merenpinnasta ja lämpösumma. Lisäksi mahdollinen soistuneisuus, ojitustilanne tai kivisyys kirjattiin ylös.

Tutkimuksessa keskityttiin mänty- ja kuusivaltaisiin metsiköihin. Aineisto sisältää myös männyn, kuusen ja koivun muodostamia sekametsiköitä. Yksittäisinä puina koealoilla saattoi olla myös haapoja, leppiä tai pihlajia. Yhteensä aineistoon kuului koealoja 30 kuviolta eli koealoja oli 60 kappaletta. Puita aineistossa oli 2070, joista koeputia 490.

Koealat jaettiin vallitsevan puulajinsa mukaan puustoluokkiin, joita olivat puhtaat kuusikot, kuusivaltaiset metsiköt, sekametsiköt, mäntyvaltaiset met-

siköt ja puhtaat männiköt. Metsätyyppien osalta suurin osa koealoista sijaitsi tuoreilla kankailla (kuva 1). Kehitysluokiltaan koealojen puustot olivat pääosin varttuneita kasvatusmetsiköitä (kuva 2). Tutkimuksen kannalta tärkeä tunnus, puuston pohjapinta-ala, vaihteli koealoilla hehtaariohtaiseksi yleistettynä melko tasaisesti 23,1 m² ja 54,5 m² välillä (taulukko 2, kuva 3). Mukana on siis myös koealoja, joita ei voida sanoa ylitieheiksi. Mitatut pohjapinta-alat ovat kautta linjan suurempia kuin kuviotietojen malleilla päivitetty pohjapinta-alat.

Taulukko 2. Koealatieoista laskettujen metsikkötunnusten vaihtelua kuvaavia tunnuslukuja.

	Keskiarvo	Keskihajonta	Minimi	Maksimi
Pohjapinta-ala, m ² /ha	36,9	7,6	23,1	54,5
D _g , cm	21,0	4,2	13,1	30,2
H _g , m	18,90	4,16	10,27	26,63
Keski-ikä, a	63	17	31	90
Korkeus merenpinnasta, m	158	13	130	180
Lämpösumma, dd	1182	12	1160	1200

2.2. Aineiston esikäsittely

Aineiston esikäsittelyssä tuotettiin sekä vertailuaineisto että simulointien lähtöaineisto. Vertailuaineisto sisälsi koealojen puustotiedot nykyhetkellä sekä 5, 10 ja 15 vuotta sitten. Puustotiedot 20 vuotta sitten olivat simulointien lähtötietoina. Koepuiden osalta lähtötiedot perustuvat mittauksiin. Lukupuiden osalta lähtötiedot perustuvat malleihin, joilla koepuulta mitatut tiedot yleistettiin lukupuille. Tämä toteutettiin sekamallitekniikalla (esim. Lappi 1993). Nykyhetkelle yleistettäviä tietoja olivat kuorten paksuudet, puiden pituudet, latvusrajat sekä iät. Menneisyyden ajanhetkille yleistettiin edellisten lisäksi kuorettomat läpimitat.

Läpimittamalleja muodostettiin ajanhetkille 5, 10, 15 ja 20 vuotta sitten. Selittäjinä näissä kaikissa malleissa olivat nykyhetken kuorettomat läpimitat. Kuusen ja männyn välinen ero mallinnettiin valemuuttujalla. Koivuille ja muille lehtipuille sovellettiin männyn läpimittaennusteita. Läpimittamallit olivat muotoa

$$dkton_{xvsitten_ijk} = a_0 + a_1 dkton_{ijk} + a_2 dummy_ku_{ijk} + s_i + p_{ij} + e_{ijk} \quad (1)$$

missä

$dkton_{xvsitten_ijk}$ = metsikön i koealan j puun k kuoreton läpimitta x vuotta sitten

$dkton_{ijk}$ = metsikön i koealan j puun k kuoreton läpimitta nykyhetkellä

$dummy_ku_{ijk}$ = valemuuttuja, saa arvon 1 jos puulaji on kuusi, muuten 0

a_0, a_1, a_2, a_3 = mallin kiinteän osan parametrit

s_i = metsikön i metsikkökotekijä

p_{ij} = metsikön i koealan j koealatekijä

e_{ijk} = satunnainen virhetermi.

Mallit estimoitiin SAS-ohjelmiston PROC MIXED proseduurilla (kertoimet liitteessä 1). Ohjelman tuottamat estimaatit satunnaisille metsikkö- (s) ja koealatekijöille (p) huomioitiin ennusteissa, jotta kullekin metsikölle ja koealalle saatiin mahdollisimman tarkat ennusteet. Läpimittaennusteiden osalta oli huomioitava myös kasvatusjakson aikana kuolleet puut. Näille puille määritettiin kuolinhetkestä nykyhetkeen kertyneen kasvuennusteen perusteella niin sanotut kasvutappiot, joilla korjattiin läpimittojen yleistämisprosessin jälkeen kuolleiden puiden läpimitat oikeille tasoilleen (ks. Välimäki 2006).

Kuorten paksuutta selitettiin kahdella erillisellä logaritmisella mallilla, joista toisessa oli selittäjänä kuorellinen ja toisessa kuoreton läpimitta. Mallilla, jossa selittäjänä oli kuorellinen läpimitta, ennustettiin nykyhetken lukupuiden kuorten paksuudet, toinen malli soveltui menneisyyden kuorten paksuuksien ennustamiseen. Mallit ovat muotoa

$$\ln(b_{ijk}) = a_0 + a_1 \ln(d_{ijk}) + a_2 dummy_ku_{ijk} + a_3 dummy_ko_{ijk} + s_i + p_{ij} + e_{ijk} \quad (2)$$

Kuolleille puille määritettiin puun koosta ja kuolinhetkestä riippumatta kuoren paksuudeksi yksi millimetri, koska sen havaittiin olevan yleisin kuivuneiden kuorten paksuus.

Myös puiden pituuksia, kuten kuorten paksuuksiakin, yleistettiin kahdella mallilla. Pituuksien osalta yleinen malli soveltui kaikille puille ja kaikille ajanhetkille. Yleisessä pituusmallissa pituuden logaritmia selitettiin kuorettoman läpimitan logaritmin avulla. Malli sisälsi valemuuttujat sekä kuuselle että koivuille.

$$\ln(h_{ijk}) = a_0 + a_1 \ln(dkton_{ijk}) + a_2 dummy_ku_{ijk} + a_3 dummy_ko_{ijk} + s_i + p_{ij} + e_{ijk} \quad (4)$$

Koaloille, joiden männyistä oli saatu määritettyä mittauksin pituus 20 vuotta sitten, muodostettiin oma malli, joka ennusti muidenkin kyseisten koalojen mäntyjen pituuden logaritmia 20 vuotta sitten.

$$\ln(h_{20\text{vssitten_ijk}}) = a_0 + a_1 \ln(dkton_{20\text{vssitten_ijk}}) + s_i + p_{ij} + e_{ijk} \quad (5)$$

Tämän mallin selittäjäksi valittiin kuoreton läpimitta samalta ajanhetkeltä. Puulajikohtaisia valemuuttujia malli ei sisällä, koska kyse on vain männyistä.

Nykyhetken pituusennusteensa nämä männyt saivat yleisellä pituusmallilla. Muiden ajanhetkien osalta yleistä mallia ei voitu soveltaa, koska ajanhetkien erotusten perusteella lasketut kasvut olisivat saattaneet muodostua epäloogisiksi. Koska myöskään pituuden kehityksen sitominen läpimitan kehitykseen ei olisi täysin johdonmukaista (Assmann 1970), päädyttiin jakamaan mitattu/ennustettu 20 vuoden kasvu eri 5-vuotiskausille Vuokilan ja Väliahon (1980) esittämien kylvömanniköiden pituus-kasvujen kehityksen suhteissa. Valtapituuden sijaan näissä kylvömanniköiden kasvuyhtälöissä käytettiin kyseisten koalojen koepuiden keskipituutta. Näitä pituusarvioita käytettiin kuitenkin ainoastaan virheiden ajanmukaisen kehityksen seuraamiseen.

Myös latvusrajamalleja muodostettiin kaksi. Selittäjiksi malleihin valittiin eri vaihtoehtojen joukosta pituus, koska se tuotti loogisimmat ennusteet vaihtoehtoisin selittäjiin ja niiden yhdistelmiin verrattuna. Toinen malli tehtiin männyille ja toinen kuusille, lehtipuiden osalta sovellettiin männyille tehtyä mallia. Syynä kahden eri mallin muodostamiseen oli vain kuusten osalta havaittu virheen varianssin kasvu selittävän muuttujan arvojen kasvun myötä. Kuusen malli oli siten logaritminen,

$$\ln(latvusraja_{ijk}) = a_0 + a_1 \ln(h_{ijk}) + s_i + p_{ij} + e_{ijk} \quad (6)$$

männyn malli lineaarinen.

$$latvusraja_{ijk} = a_1 h_{ijk} + s_i + e_{ijk} \quad (7)$$

Männyn mallista puuttuvat kuusen malliin verrattuna vakiotermi sekä koelakohtainen tasokorjaus. Vakiotermin pois jättämisellä tavoiteltiin loogisempia tuloksia, mutta metsikkötekijän vuoksi mallissa on kuitenkin metsikkökohtainen vakio.

Lukupuiden nykyhetken rinnankorkeusiän logaritmi ennustettiin mallilla, jossa selittäjinä olivat pituus ja kuoreton läpimitta

$$\ln(ikä_{ijk}) = a_0 + a_1 \ln(h_{ijk}) + a_2 \ln(dkton_{ijk}) + a_3 \text{ dummy_ku}_{ijk} + s_i + p_{ij} + e_{ijk} \quad (8)$$

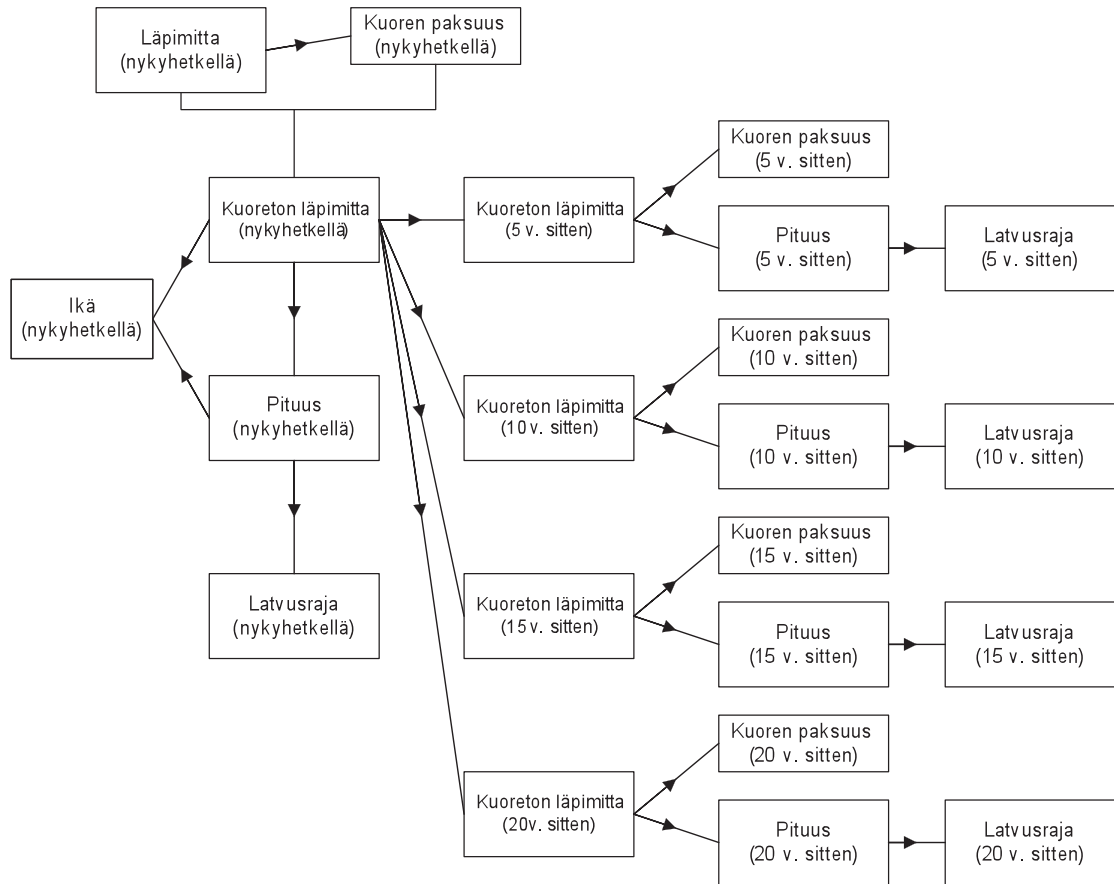
Rinnankorkeusiästä päästiin biologiseen ikään lisäämällä rinnankorkeusikään puulajeittain ja kasvupaikoittain taulukoidut rinnankorkeusikäisät (Tapion taskukirjan maastoliite 2002). Eri ajanhetkien ikä puulle saatiin vähentämällä vuosia nykyhetken iästä.

Yleistämisprosessin seuraava vaihe oli MOTTI-metsikkösimulaattorin syöttötietojen muodostaminen. Syöttötiedot kuvaavat laskentayksikön eli tässä tapauksessa koelan puuston simulointijakson alussa. Simulointijakson alku vastaa koelan puustotietoja ajanhetkellä 20 vuotta sitten. Simulaattorin kuvauspuilta vaatimia tietoja olivat kuvauspuun vastaama runkoluku hehtaarikohtaisena, puulaji, biologinen ikä, kuorellinen läpimitta, pituus ja latvussuhde. Näiden lisäksi syöttötietoihin kuuluivat koelan kasvupaikkaa, kasvupaikan lisämääreitä ja maantieteellisiä sijainteja kuvaavat suureet.

Aineiston esikäsittely tuotti siis sekä vertailuaineiston että simuloinnin lähtötiedot. Esikäsittelyn yhteydessä tehtyjen sekamallien selityssuhteet on esitetty kuvassa 4. Laatikoiden väliset viivat, joissa on nuoli, kertovat tunnusten välisen selityssuhteen ja sen suunnan. Viivat ilman nuolia kuvaavat vain tunnusten välistä laskennallista yhteyttä.

3 Menetelmät

Simulaattorin laskemien ennusteiden tarkkuutta tarkasteltiin runkolukujen, pohjapinta-alojen sekä pohjapinta-alalla painotettujen keskipituuksien ja keskiläpimittojen perusteella. Simulaattori tuottaa kyseiset tunnuksat suoraan simuloinnin tuloksena. Referenssiaineiston osalta tunnuksat laskettiin koelakohtaisesti. Erot ennusteiden ja vertailuaineiston välillä laskettiin prosentteina ennustetusta arvosta. Simulointijakson loppuun kertyneet ennustevirheet kuvattiin pisteparvina simulointijakson alun metsikkötunnusten suhteen, sekä ennustusjakson pituuden



Kuva 4. Selityssuhdekaavio.

suhteen. Pisteparviin sijoitettiin ennustevirheiden harhaa kuvaavat trendifunktiot.

Muodostettujen kuvaajien lisäksi ennusteiden tarkkuutta tarkasteltiin suhteellisen RMSE:n avulla, joka saatiin kaavalla

$$\text{RMSE}\% = 100 \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{k_i - \hat{k}_i}{\hat{k}_i} \right)^2 \frac{1}{N-1}} \quad (9)$$

jossa

k_i = tunnuksen k mitattu arvo koealalla i

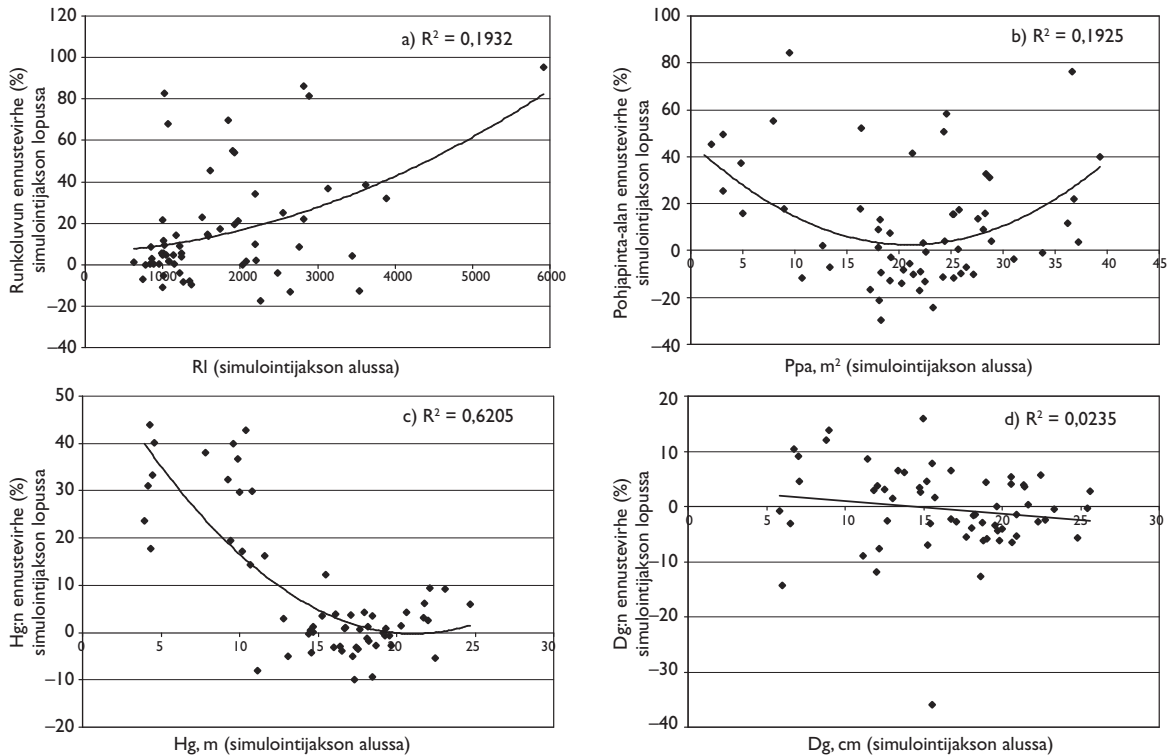
\hat{k}_i = tunnuksen k ennustettu arvo koealalla i

N = koealojen lukumäärä

4 Tulokset

Suurin osa runkoluvun ennustevirheistä oli positiivisia, eli toisin sanoen aliarvioita. Pisteparven ja siihen tasoitetun funktion kuvaajan perusteella voidaan havaita aliarvioiden kasvavan simuloitaessa alkutilaltaan tiheämpiä metsiköitä (kuva 5a). Alkutiheys selittää noin 19% ennustevirheen vaihtelusta. Alkutiheyden ollessa noin 1000 runkoa hehtaarilla ennusteet olivat tarkimmillaan.

Runkoluvun ennustevirheiden tapaan myös pohjapinta-alan ennustevirheet olivat aliarvioita (kuva 5b). Tämä selittyy suureksi osaksi tunnusten välisellä laskennallisella yhteydellä: pohjapinta-alan virhe koostuu runkoluvun ja puukohtaisen pohjapinta-alan kasvun ennustevirheistä. Pisteparveen sijoitetun funktion kuvaajan perusteella ennusteet



Kuva 5. Koealojen runkolukujen (a), pohjapinta-alan (b), keskipituuden (c) ja keskiläpimitan (d) prosentuaaliset ennustevirheet ko. tunnuksen simulointijakson alun arvon funktiona.

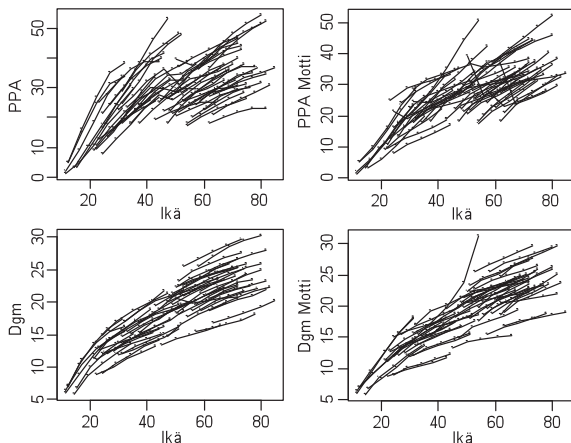
olivat tarkimmillaan metsiköiden pohjapinta-alojen ollessa välillä 15–25 m²/ha. Tämän vaihteluvälin ylä- ja alapuolella aliarviot kasvoivat. Alkutiheys selitti pohjapinta-alan virheiden trendistä n. 19%. Ennusteiden hajonta oli kauttaaltaan suurta.

Pohjapinta-alalla painotetun keskipituuden ennusteisiin syntyi aliarviota ennustettaessa alkutilaltaan keskimääräistä lyhyempiä metsiköitä. Keskipituuden kasvaessa ennusteet tarkentuivat ja ennusteiden hajonta pieneni huomattavasti (kuva 5c). Metsiköiden keskipituuden ollessa 15–20 metriä ennustevirheet olivat pienimmillään. Alkupituus selitti jopa 62% virheiden vaihtelusta.

Pohjapinta-alalla painotetun keskiläpimitan ennusteet olivat tarkasteltavista tunnuksista lähinnä referenssiaineistoa. Tämän tunnuksen ennustevirheissä ei ollut havaittavissa trendiä yli- eikä aliarvioiden suuntaan (kuva 5d). Alkutilanne selitti vain noin kaksi prosenttia ennustevirheen vaihtelusta. Ennustevirheiden hajonta ei myöskään muodostu-

nut merkittävän suureksi. Tarkkojen ennusteiden joukkoon poikkeuksen tekee kuitenkin yksi metsikkö, jonka simulointi on tuottanut erittäin suuren yliarvion. Tämä metsikkö ei ollut lähtötiedoiltaan erityisen poikkeava: OMT-metsikkö, jossa ikä oli 33 vuotta, runkoluku 1840, pohjapinta-ala 23 m²/ha, pituus 18 m ja keskiläpimitta 15 cm. Mahdollinen selitys havainnolle on se, että hyvä kasvu ja nopea itseharveneminen kiihdyttävät tässä metsikössä toisiaan. Mikäli tämä havainto poistetaan, on aineistossa heikko (selitysaste n. 3%) trendi siten, että alkutilanteen keskiläpimitan kasvaessa pienet yliarviot muuttuvat pieniksi aliarvioiksi.

Koealojen puuston kasvun mitattu ja MOTTI-ohjelmalla ennustettu kehitys iän funktiona on esitetty myös kuvassa 6. Kuvasta näkyy myös virheiden perusteella todettava ilmiö: pohjapinta-ala kehittyä MOTTI ennusteissa mitattua hitaammin, mutta keskiläpimitan suhteen trendit ovat yhtä koealaa lukuun ottamatta hyvin samanlaiset.



Kuva 6. Mitattu ja ennustettu koalojen keskiläpimitan ja pohjapinta-alan kehitys iän funktiona.

Kaikille koaloille laskettuna suurin RMSE% 20 vuoden jaksolla oli runkolukuennusteissa, 31,4% (taulukko 3). Jo 5 vuoden simulointijakson kuluttua virhe oli 23,2%, joten virheet simuloinnissa tapahtuivat heti simulointijakson alussa. Pohjapinta-alan ennustevirhe oli myös kohtalaisen suuri, 27,3%. Sekin oli 5 vuoden jakson kuluttua jo 22,4%. Runkoluvun ja pohjapinta-alan virheiden korrelaatio 20 vuoden kauden aikana oli 0.59, ja runkoluvun virhe selittääkin 40% pohjapinta-alan virheestä. Keskipituuden ja keskiläpimitan RMSE:t sen sijaan jäivät 20 vuoden jaksolla suhteellisen pieniksi (17,3% ja 7,8%). Kymmenen vuoden jakson jälkeen näiden tunnusten virheet olivat 12,3% ja 5,9%. Keskiläpimitan ja pitemmän virheiden keskinäinen korrelaatio oli myös korkea, 0.52, mutta molempien korrelaatiot runkoluvun kanssa ovat selvästi heikommat (0.12 ja -0.18). Myös korrelaatio pohjapinta-alan ja keskiläpimitan virheiden välillä oli korkea, 0.6.

Kasvupaikkakohtaisen tarkastelun perusteella tuoreiden kankaiden metsiköt saavat keskimäärin tarkimpia ennusteita (taulukko 4). Lehtomaisilla kankailla ongelmakohteina ovat etenkin runkoluku- ja keskiläpimitaennusteet. Keskiläpimitan arvion epäluotettavuuteen lehtomaisilla kankailla vaikuttaa kuitenkin jo aiemmin mainittu poikkeuksellisen suuri ennustevirhe yhden metsikön simuloinnissa. Kuivahkoilla kankailla keskipituuden ennustetarkkuus on heikko. Myös pohjapinta-alassa on muihin kasvupaikkoihin nähden huomattavasti

Taulukko 3. Prosentuaaliset RMSE:t laskettuna eripituusille ennustejaksoille.

Ennustejakso vuotta	RMSE (%)			
	RL	Ppa	Hg	Dg
20	31,39	27,30	17,29	7,85
15	33,17	28,50	15,05	6,37
10	30,85	27,50	12,35	5,86
5	23,24	22,43	7,73	5,10

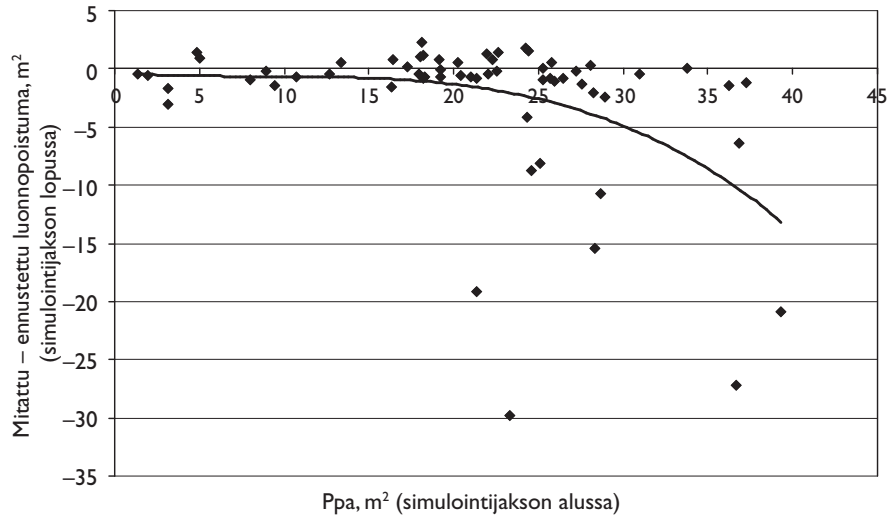
Taulukko 4. Prosentuaaliset RMSE:t metsätyypeittäin ja puustoluokittain laskettuna 20 vuoden ennustejaksolle.

	RMSE (%)			
	RL	Ppa	Hg	Dg
OMT	48,71	17,97	10,94	18,53
MT	29,75	24,09	9,31	5,02
VT	48,51	62,83	52,25	13,66
Kuusikot	6,79	11,85	2,44	5,26
Kuusivaltaiset	23,37	20,80	5,47	10,31
Sekametsiköt	39,20	36,52	10,15	7,29
Mäntyvaltaiset	42,34	27,57	28,21	7,00
Männiköt	25,71	27,34	39,93	6,87

suurempi ennustevirhe. Puustoluokkia tarkasteltaessa on havaittavissa kuusikoiden ja kuusivaltaisten metsiköiden selvästi muita tarkemmat ennusteet. Muissa puustoluokissa vähintään yhden tunnuksen RMSE on suuri.

Merkittäväksi ongelmaksi havaittua runkolukuennusteiden aliarvioitumista selvitettiin luonnonpoistuman ennustevirheiden avulla. Kuvassa 7 on esitetty pohjapinta-alan luonnonpoistuman absoluuttiset ennustevirheet simulointijakson alun elävän puuston pohjapinta-alojen suhteen. Kuvasta käy ilmi, että puuston pohjapinta-alan kasvaessa luonnonpoistumaennusteet yliarvioituvat, ja samalla myös virheiden hajonta kasvaa voimakkaasti. Pääosalla metsiköistä virheitä ei juurikaan synny, mutta yksittäiset ongelmakohteet aiheuttavat funktion kuvaajaan laskevan trendin.

Ilmiötä voidaan tutkia tarkemmin kuvaamalla metsiköiden runkoluvun kehitys keskiläpimitan funktiona ja vertaamalla sitä koelan pääpuulajin (kauden lopun tilanteessa) itseharvenemisrajaan. Kuvasta 8 erottuvat selkeästi ne metsiköt, jotka ovat itseharvenemisrajan yläpuolella jo mittauskauden alussa: niiden runkoluku tipahtaa MOTTI-ennusteissa hyvin jyrkästi ensimmäisellä kaudella, mutta jatkaa sitten



Kuva 7. Koealojen pohjapinta-alan luonnonpoistumien absoluuttiset ennustevirheet koealojen simulointijakson alun elävän puuston pohjapinta-alojen suhteen ($R^2 = 0.1838$).

itseharvenemisrajaa myöten. Tämä selittää suureksi osaksi luonnonpoistuman yliarvion ensimmäisellä 5-vuotiskaudella sekä runkoluvun virheen. Runkoluvun virheestä osan selittää myös se, että mitatuissa metsiköissä on havaittu sisäänkasvua kauden aikana, mutta ennusteissa sisäänkasvua ei tapahdu. Sekametsissä itseharvenemisraja ei noudata suoraan tätä laskennallisen pääpuulajin mukaista rajaa, mikä erottuu erityisesti mäntyvaltaisissa kohteissa.

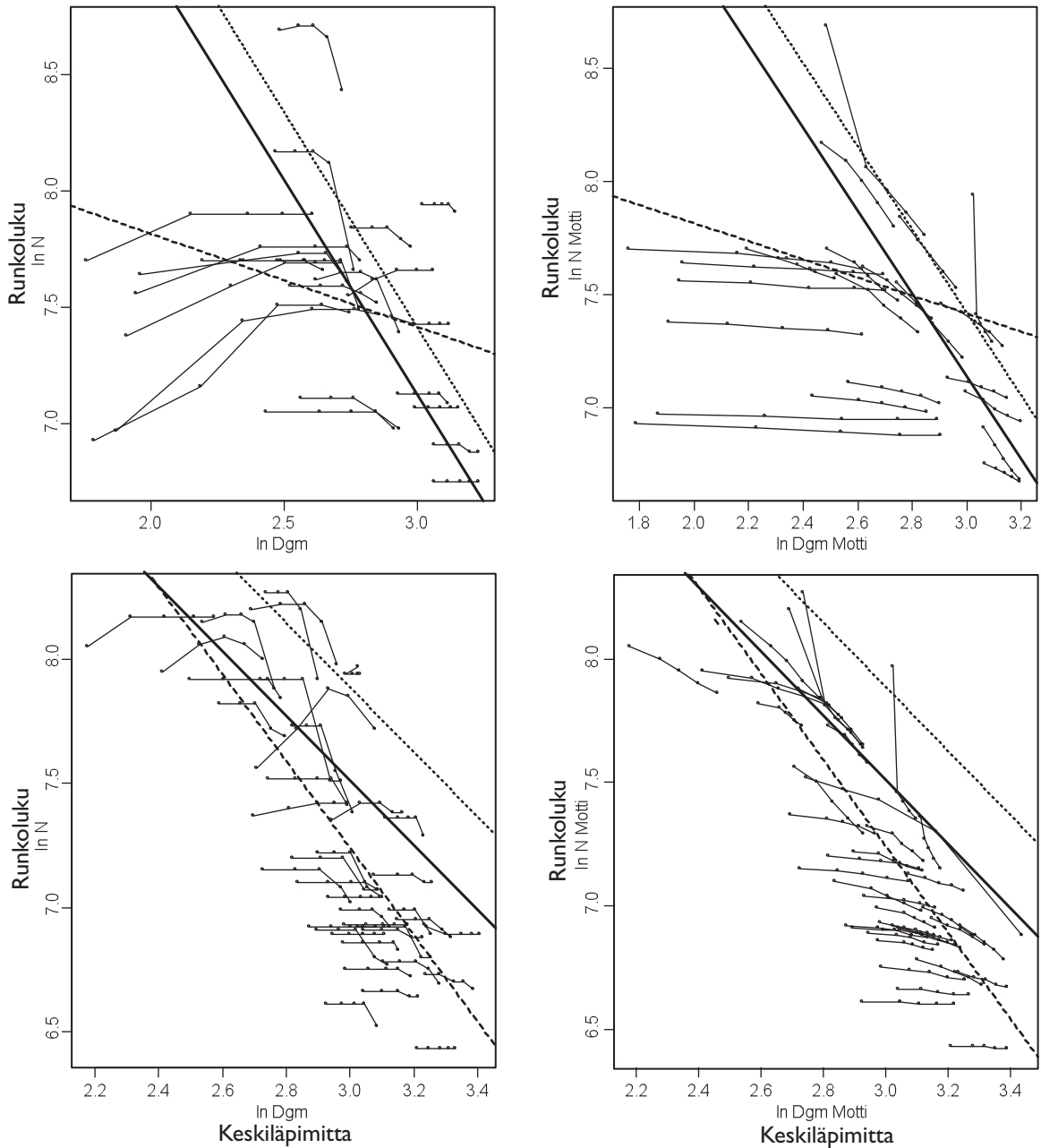
Itseharvenemisrajan alapuolella kauden alussa olleet metsiköt kehittyivät ennusteissa hyvin samankaltaisesti kuin mitatut: runkoluku vähenee hitaasti satunnaisten kuolemien vuoksi. Näitä metsiköitä on aineistossa enemmistö, koska keskimääräinen runkoluvun ja keskiläpimitan suhde koko kauden aikana on selkeästi Hynysen (1993) itseharvenemisrajan alapuolella (kuva 8). Siitä huolimatta, että kaikki metsiköt ovat siis itseharvenemisrajalla tai sen alla myöhemmillä 5-vuotiskausilla, ennustettu pohjapinta-alan luonnonpoistuma on tänä aikana edelleen 2.3-kertainen mitattuun verrattuna, vaikka noin 95% mitatusta luonnonpoistumasta tapahtuu näillä kausilla.

Kun verrattiin pohjapinta-alan kokonaiskehitystä näissä metsiköissä, eli siis huomioitiin sekä kuolleiden että elävien puiden pohjapinta-ala, mitattujen metsiköiden keskimääräinen pohjapinta-ala nykyhetkellä oli 36,92, ja ennustettu pohjapinta-ala taas

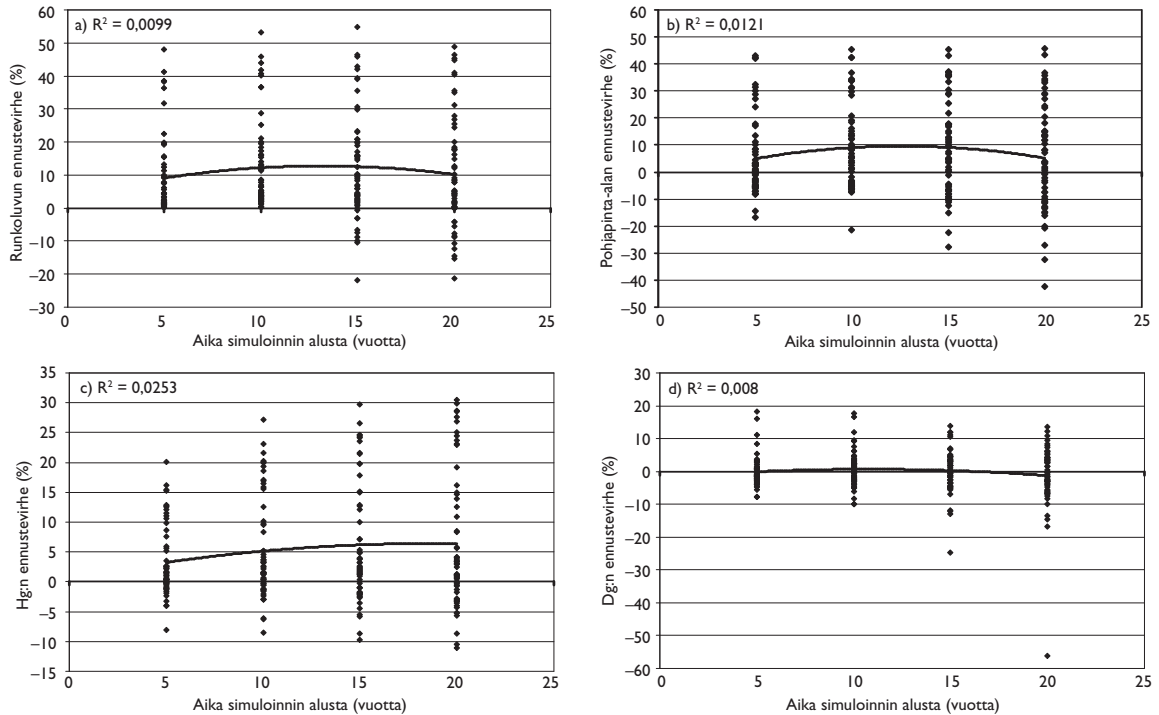
37,11, eli ennuste on ollut lähes harhaton. Tämäkin tukee sitä käsitystä, että pääasiallinen ongelma on jo lähtötilanteessa yliiheiden metsiköiden itseharvenemisen ennustaminen.

Tutkimuksessa selvitettiin myös metsiköiden iän vaikutusta eri tunnusten ennustevirheisiin. Metsiköiden iän osalta jokaisen tunnuksen kohdalla oli havaittavissa suhteellisten ennustevirheiden pieneminen iän kasvaessa. Keskiläpimitaennusteisiin metsikön iällä ei kuitenkaan ollut suurta merkitystä, sillä kyseisen tunnuksen ennusteet olivat tarkkoja millä tahansa metsikön iällä. Muiden tarkasteltavien tunnusten tapauksissa nuoret metsiköt saivat aliarvioituneita ennusteita. Iän ollessa noin 50 vuotta ennusteet olivat kuitenkin jo jokaisen tunnuksen tapauksessa asettuneet hyvin lähelle referenssiaineistoa.

Ennustevirheiden kehityksen tarkastelu simulointiajan suhteen osoitti runkoluvun osalta, että voimakkaat ennusteiden aliarviot syntyivät jo ensimmäisen viiden vuoden simulointijakson jälkeen (kuva 9a). Seuraavat kolme viisivuotista simulointijaksoa kasvattivat ennustevirheitä enää vähän ja pääosin vain yliarvioiden suuntaan. Tämä ilmiö on havaittavissa myös kuvasta 8. Sama runkoluvun yhteydessä havaittu trendi heijastui myös pohjapinta-alaennusteiden kehitykseen (kuva 9b). Keskipituus- ja keskiläpimitaennusteiden osalta virheet kasvoivat



Kuva 8. Mäntyvaltaisten (yllä) ja kuusivaltaisten (alla) metsäkoiden runkoluvun kehitys keskiläpimitan funktiona. Yhtenäisellä viivalla Hynysen (1993) itseharvenemisraja ja pisteviivalla (...) Hynysen mallin (1993) 99% prosenttipiste, pilkkuviivalla (---) keskimääräinen runkoluvun ja läpimitan suhde mitatussa aineistossa.



Kuva 9. Runkoluvun (a), pohjapinta-alan (b), keskipituuden (c) ja keskiläpimitan ennustevirheiden kehittyminen simulointijakson pituuden funktiona.

tasaisemmin koko simulointijakson ajan (kuvat 9c ja 9d). Minkään tunnuksen kohdalla virheissä ei ollut havaittavissa trendiä simulointiajan suhteen, vaan trendi selitti virheestä vain noin prosentista kahteen. Sen sijaan hajonnat kasvoivat kunkin tunnuksen suhteen (kuva 9, taulukko 3).

6 Tulosten tarkastelu

Tutkimuskuviot valittiin tässä työssä harkinnanvaraisesti, ja valinnassa painotettiin tiheitä, ennakkokäsitysten mukaan ”hankalasti ennustettavia” kohteita. Näin ollen taulukon 3 suhteelliset RMSE:t eivät ole yleistettävissä koskemaan muita tapauksia. Esimerkiksi Haaran ja Leskisen (2009) tutkimusaineistossa INKA-aineistossa käsittelemättömien kohteiden pohjapinta-alan RMSE oli 10 vuoden simulointijakson jälkeen 11,6%, mutta kahdessa muussa, pienemmässä testiaineistossa jopa 20,2% ja 18,6%. Siihen nähden nyt samalla jaksolla ha-

vaittu 27,3% on suurehko, eli tarkasteltavat kohteet todella olivat keskimääräistä hankalampia kohteita. INKA-aineistossa 10 vuoden jakson jälkeen havaitut pituuden ja keskiläpimitan RMSE:t olivat 10,4% ja 5,5%, ja testiaineistoissa 17,0%–18,7% pituudelle ja 13,3%–12,4% keskiläpimitalle (Haara ja Leskinen 2009). Nyt samalla simulointijaksolla havaitut 12,3% ja 5,9% ovat näihin verrattuna täysin vertailukelpoiset, jopa hieman tarkemmat. Näyttääkin siltä, että ylitiheys hankaloittaa erityisesti runkoluvun, mutta myös pohjapinta-alan tarkkaa ennustamista, mutta ei niinkään keskiläpimitan ja keskipituuden.

Laskettujen ennustevirheiden tarkkuus on suurelta osin sidoksissa referenssiaineiston luotettavuuteen. Aineiston epäluotettavin tunnus on puun kuolinhetki, jonka silmänvarainen arviointi etenkin yli kymmenen vuotta sitten kuolleiden puiden osalta osoittautui vaikeaksi. Ainoa mahdollisuus saada todellinen kuolinhetki olisi jokaisen puun kuolinajankohdan dendrokronologinen ajoitus, mihin ei ollut mahdollisuuksia. Kuvioiden historia kuitenkin tunnettiin, ja niiden toimenpiteettömyys takasi

sen, että kuolleet puut edelleen olivat metsiköissä. Virheet kuolinajankohdassa vaikuttavat lähinnä siihen, mille 5-vuotiskaudelle kuolleisuus sijoitetaan, mikäli kuolemishetki on ajoitettu oikein 20 vuoden jaksolle tai sen ulkopuolelle. Jos kuolinhetki on määritelty virheellisesti tapahtuneeksi ennen jakson alkua, vaikka puu on todellisuudessa kuollut jakson aikana, metsikön alkutila on arvioitu todellista harvemmaksi ja ennustetun itseharvenemisen pitäisi vähentyä. Tämä edelleen vahvistaisi nyt havaittua trendiä. Toisaalta mikäli kuolinhetki on virheellisesti määritelty tapahtuneeksi 20 vuoden jakson sisällä, vaikka puu on kuollut aiemmin, metsiköiden alkutila on arvioitu todellista tiheämmäksi. Se puolestaan kiihdyttäisi itseharvenemistä, ja voisi selittää osan tuloksista. Koska mitatusta luonnonpoistumasta vain alle 5% on arvioitu tapahtuneeksi 15–20 vuotta sitten, ja lähes 65% viimeisen 5 vuoden aikana, tämän ilmiön vaikutuksen tuloksiin voidaan olettaa olevan pieni.

Koepuumittausten yleistämisen osalta etenkin puiden pituuksiin ja latvusrajoihin liittyy epävarmuutta, koska menneisyyden ajanhetkien pituuksien yleistyksen suurimmaksi osaksi ja latvusrajan yleistyksen kokonaan perustuvat vain nykyhetken mitattuihin tietoihin. Pituuden vaikutus kasvuennusteiden virheisiin ei kuitenkaan ole kovin merkittävä, koska kasvumallit perustuvat lähinnä läpimitaan ja pohjapinta-alaan (Mäkinen ym. 2009). Sen sijaan latvusrajan virheillä voi olla kasvuennusteiden kannalta merkitystä. Latvusraja simulointijakson alussa on mahdollisesti ollut alempana (eli latvukset suhteessa pidempiä) kuin nykyhetken tiheyksissä tehdyistä mittauksista voidaan päätellä. Tämä ilmiö osaltaan parantaisi kasvua ja sitä kautta myös lisäisi itseharvenemistä. Mikäli lähtöhetken latvusrajoissa on aineistosta johtuvaa systemaattista virhettä, se siis olisi omiaan vahvistamaan nyt saatuja tuloksia.

Männyn mallien perusteella tehdyt ennusteet lehtipuulle heikentävät myös osaltaan referenssiaineiston luotettavuutta. Lehtipuiden osuus aineistossa on tosin suhteellisen pieni, joten tämän tekijän kokonaisvaikutus ei muodostu kovin merkittäväksi. Latvusrajojen ja lehtipuiden kasvun suhteen ei parempaa tietoa ole mahdollista saada ilman kestokoealoja.

Tehdyssä tutkimuksessa painotettiin erityisesti tiheyden merkitystä ennustamisen luotettavuuteen. Siihen kerätty aineisto soveltuu hyvin. Kattavampi

aineisto myös erittäin harvoista kohteista olisi luonnollisesti antanut vielä paremman kuvan tiheyden vaikutuksesta, mutta siihen ei ollut mahdollisuutta. Tutkimuksen merkittävimpiä havaintoja olikin luonnonpoistumamallin yliarvioituneet ennusteet. Mitä tiheämpi puusto kohteella oli, sitä todennäköisemmin luonnonpoistuman määrä yliarvioitui. Nämä yliarviot heijastuivat suoraan sekä pohjapinta-alaan että runkoluvun ennusteisiin, aiheuttaen niihin aliarviota. Malliketjussa luonnonpoistumaa ohjaa metsiköille laskettu itseharvenemisraja, jonka perusteella määräytyy metsiköiden suurin mahdollinen runkoluku. Runkoluku on osalla metsiköistä ollut jo simuloinnin alkuhetkellä tämän rajan yläpuolella, mikä aiheutti suuria virheitä jo simuloinnin ensimmäisellä askeleella. Nykyhetken mitattu hehtaarikohtainen runkoluku koealoilla keskimäärin (1642) oli selkeästi isompi kuin MOTIN ennuste viiden vuoden simuloinnin jälkeen (1575), joten mitattu kuolleisuuden ajankohta ei selitä tulosta. Kun otetaan myös sisäänkasvaneet puut huomioon, mitatussa puustossa runkoluku laski ylimmillään keskimääräisestä 1848 rungosta 206 runkoa hehtaarilla koko kaudella, ja ennusteissa ylimmillään keskimäärin 1755 rungosta 363 runkoa hehtaarilla, josta vielä 183 runkoa eli lähes koko mitattua kuolleisuutta vastaava määrä ensimmäisen kauden yhtäkkisen vähennyksen jälkeen.

Myös Hynynen (1993) sai itseharvenemismallia testatessaan tuloksen, että mallin avulla ennustetut runkoluvut olivat 13% liian pieniä männiköissä ja 9% liian pieniä kuusikoissa ja koivikoissa. Ongelmana luultavasti on mallin rakenne: kun itseharvenemisrajalla olevien metsiköiden perusteella lasketaan runkoluvun odotusarvo keskiläpimitan suhteen, ja mallia sovellettaessa leikataan odotusarvon ylittävien metsiköiden runkoluku odotusarvoon, tulos automaattisesti on, että ennusteiden keskiarvo on tuon odotusarvorajan alapuolella. Malli ei siis anna harhatonta ennustetta metsiköille, jotka ovat tuon itseharvenemisrajan yläpuolella.

Muulla maailmassa tehdyissä tutkimuksissa (esimerkiksi Wittwer ym. 1998, Lynch ym. 2007) itseharvenemisrajana käytetään populaation 99% kvantiilikäyrää, eikä keskiarvokäyrää. Kun kuvaan 8 sijoitettiin Hynynen (1993) mallista myös tämä 99% kvantiilikäyrä, voidaan nähdä että runkoluvun maksimiksi se soveltuu selvästi Suomessa sovellet-

tua keskiarvokäyrää paremmin. Tämäkään malli ei silti takaa harhatonta luonnonpoistuman ennustetta, mutta olisi melko helppoa etsiä luotettavimmat tulokset takaava kvantiili.

Nyt tarkastellun aineistossa puita mitattiin vähintään 30 jokaiselta koealalta, eli huomattavasti enemmän kuin esimerkiksi VMI-koealoilta, mutta suunnilleen saman verran kuin INKA-koealoilta. Osasy luonnonpoistuman virheisiin voi siitä huolimatta olla koealojen pieni koko. Erittäin suuret ja pienet tiheydet ovat pienillä koealoilla todennäköisempiä kuin suurilla. Siten kuvion keskimääräisiin tietoihin, eli suuremman alueen tietoihin, perustuvat ennusteet luonnonpoistumasta voisivat toimia paremmin. Myös luonnonpoistuman vaihtelua ja vaihtelun mittakaavaa olisikin tärkeää tutkia jatkossa tarkemmin.

Luonnonpoistumamalli harventaa pääosin metsiköiden pieniä ja siten kokonaispohjapinta-alan kannalta merkityksettömmiä puita. Luonnonpoistumamallin ennustevirheiden vaikutus ei olekaan pohjapinta-alan ennusteeseen niin suuri kuin runkoluvun ennusteeseen. Kokonaispohjapinta-ala voitiin ennustaa likimain harhattomasti, vaikkakin sisäänkasvu muodostaa osan mitatusta pohjapinta-alan kasvusta. Se tarkoittaa tosin myös sitä, että ylitteissä metsissä ennustettu kokonaiskasvu keskittyy harvemmillä puille kuin mitatussa aineistossa, eli yksittäisten puitten kasvu on ennusteissa mitattua suurempi. Myös sisäänkasvun vaikutus on samansuuntainen. Kuvasta 5b on puolestaan selvästi todettavissa puustoltaan harvojen metsien pohjapinta-alan kasvun aliarvioituminen, sillä näillä kohteilla luonnonpoistuman ennusteet olivat täsmällisiä. Se on kuitenkin aineiston valinnan vuoksi luontevaa: niistä metsiköistä, jotka kauden lopussa olivat ylitteitä, alkupuustoltaan harvimmat ovat olleet myös nopeakasvuisimpia. Alkupuustoltaan harvat, hidaskasvuiset puustot taas ovat pääosin jääneet aineiston ulkopuolelle. Tästä tutkimuksesta ei siis voida vetää mitään yleisempää johtopäätöstä mallin ennustamista pohjapinta-alan kasvuista pohjapinta-alaltaan harvoissa puustoissa.

Keskipituusennusteiden osalta suurimmat virheet syntyivät nuorissa metsiköissä. Tulosten kannalta tästä havainnosta tekee merkittävän se, että nämä nuoret metsiköt olivat suurelta osin niitä metsiköitä, joilta oli mitattua tietoa pituuskasvusta. Muissa met-

siköissä vertailuaineiston pituustiedot perustuivat nykyhetken puustotiedoista tehtyihin yleistyksiin. Pitäen mielessä pituuskasvun mittauksen epävarmuustekijät, voidaan kuitenkin todeta ennustevirheiden olevan suurimmillaan juuri pituuskasvun ennustamisen kannalta epävarmimmilla kohteilla, sillä nuorissa metsissä pituuskasvun vaihtelu on suurimmillaan. Keskiläpimitta on tulosten perusteella tarkimmin ennustettavissa oleva metsikkötunnus. Poikkeuksen tähän päätelmään tekee ainoastaan yksi jo aiemmin mainittu metsikkö, jonka ennustettu puiden läpimittojen kehitys on kasvanut liian suureksi.

Kaiken kaikkiaan näyttää siis siltä, että itseharveneminen ei ole ylitteissä kohteissa niin suurta kuin mallit osoittavat, ja pohjapinta-alan kehitys niissä metsissä aliarvioidaan. Tämä on hankala asia siksi, että metsänhoito-ohjeet perustuvat osaltaan mallien mukaiseen käsitykseen ylitteiden metsien kasvusta. Ilmeisesti luonnonpoistuman vaihtelu on luonnossa suurempaa kuin nykyisillä malleilla voidaan ennustaa. Luonnonpoistuman entistä tarkempi kuvaaminen vaatisi kuitenkin lisää tutkimuksia, erityisesti koska tässä työssä kuolinajankohta määritettiin silmänvaraisesti.

Kirjallisuus

- Assmann, E. 1970. The principles of forest yield study: studies in the organic production, structure, increment and yield of forests stands. Pergamon Press, Oxford. 506 s.
- Burkhardt, H.E. 1993. Tree and stand models in forest inventory. Julkaisussa: Nyyssönen, A., Poso, S. & Rautala, J. (eds.). Proceedings of Ilvessalo Symposium on National Forest Inventories. IUFRO S4.02. Metsäntutkimuksen tiedonantoja 444. s. 164–170.
- Gertner, G. 1987. Approximating precision in simulation projections: an efficient alternative to Monte Carlo methods. *Forest Science* 33: 230–239.
- Gustavsen, H.G. 1998. Volymtillväxten och övre höjdens utveckling i talldominerade bestånd i Finland – en utvärdering av några modellers validitet i nuvarande skogar. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 707. 190 s.
- , Roiko-Jokela, P. & Varmola, M. 1988. Kivennäis-

- maiden talousmetsien pysyvät (INKA ja TINKA) koeket. Suunnitelmat, mittausmenetelmät ja aineistojen rakenteet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 292. 212 s.
- Haara, A. 2002. Kasvuennusteiden luotettavuuden selvittäminen knn-menetelmällä ja monitavoiteoptimoinnilla. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 391–406.
- & Leskinen, P. 2009. The assessment of uncertainty of updated stand-level inventory data. *Silva Fennica* 43: 87–112.
- Hynynen, J. 1993. Self-thinning models for even-aged stands of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 8: 326–336.
- , Ojansuu, R., Hökkä, H., Siipilehto, J., Salminen, H. & Haapala, P. 2002. Models for predicting stand development in MELA System. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 835. 116 s.
- Hyytiäinen, K. & Tahvonen, O. 2002. Economics of forest thinnings and rotation periods for Finnish conifer cultures. *Scandinavian Journal of Forest Research* 18: 274–288.
- , Tahvonen, O. & Valsta, L. 2006. Taloudellisesti optimaalisista harvennuksista ja kiertoajoista männylle ja kuuselle. Metsätalouden kehittämisskeskus Tapio. Saatavissa: <http://www.metsavastaa.net/files/metsavastaa/pdf/tapioraportti.pdf>
- Kangas, A. 1997. On the prediction bias and variance of long-term growth predictions. *Forest Ecology and Management* 96: 207–216.
- 1999. Methods for assessing the uncertainty of growth and yield predictions. *Canadian Journal of Forest Research* 29: 1357–1364.
- Lappi, J. 1993. Metsäbiometriian menetelmiä. *Silva Carelica* 24. 182 s.
- Lynch, T.B., Wittwer, R.F., Stevenson, D.J. & Huebschmann, M.M. 2007. A maximum size-density relationship between Lorey's mean height and trees per hectare. *Forest Science* 53: 478–485.
- Miina, J. 2001. Kasvumallit. Julkaisussa: Maltamo, M. & Laukkanen, S. (toim.). *Metsää kuvaavat mallit*. *Silva Carelica* 36. s. 170–197.
- Mäkelä, A. 2003. Process-based modelling of tree and stand growth: towards a hierarchical treatment of multi-scale processes. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 398–409.
- , Landsberg, J., Ek, A.R., Burk, T.E., Ter-Mikaelian, M., Ågren, G., Chadwick, D.O. & Puttonen, P. 2000. Process-based models of forest ecosystem management: current state-of-art and challenges for practical implementation. *Tree Physiology* 20: 289–298.
- Mäkinen, A., Holopainen, M., Kangas, A. & Rasinmäki, J. 2009. Error characteristics of different inventory methods and their effect on forest growth projections. *European Journal of Forest Research* (in press).
- Nuutinen, T., Hirvelä, H. & Salminen, O. 2005. Valtakunnan metsien 9. inventointiin perustuvat hakkuumahdollisuusarviot vuosille 2003–2032 Lapin metsäkeskuksen alueella. *Metsätieteen aikakauskirja* 2B/2005: 289–305.
- Pukkala, T. & Miina, J. 1998. Tree-selection algorithms for optimizing thinning using a distance-dependent growth model. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 693–702.
- Salminen, H., Lehtonen, M. & Hynynen, J. 2005. Reusing legacy FORTRAN in the MOTTI growth and yield simulator. *Computers and Electronics in Agriculture* 49: 103–113.
- Siitonen, M. 1996. MELA ja metsien kehityksen ennustaminen. Julkaisussa: Hynynen, J. & Ojansuu, R. (toim.). *Puuston kehityksen ennustaminen – MELA ja vaihtoehtoja*. Tutkimusseminaari Vantaalla. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 612. s. 7–19.
- Sironen, S., Kangas, A., Maltamo, M. & Kalliovirta, J. 2008. Localizing of non-parametric growth models. *Forest Ecology & Management* 256: 674–684.
- Tapion taskukirjan maastoliite. 2002. Metsätalouden kehittämisskeskus Tapio. Kustannusosakeyhtiö Metsälehti.
- Vanclay, J.K. 1994. Modelling forest growth and yield. Applications to mixed tropical forests. CAB International. 312 s.
- Vuokila, Y. & Väliaho, H. 1980. Viljeltyjen havumetsiköiden kasvatusmallit. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 99(2). 271 s.
- Välimäki, E. 2006. Kasvumallien toiminnan validointi ylitiheissä metsiköissä. Helsingin yliopisto, metsävarojen käytön laitos. Pro gradu -työ. 62 s.
- Wittwer, R.F., Lynch, T.B. & Huebschmann, M.M. 1998. Stand density index for shortleaf pine (*Pinus echinata* Mill.) natural stands. Julkaisussa: Waldrop, T.A. (toim.) *Proceedings of the ninth biennial southern silvicultural research conference*. Clemson, South Carolina, February 25–27, 1997. General technical report SRS, 99-2447572-0. p. 590–596.

Liite IA. Puiden läpimittoja 5, 10 15 ja 20 vuotta sitten ennustavien mallien parametrien estimaatit sekä estimoinnin tarkkuutta ja merkitsevyyttä kuvaavat tunnusluvut (t-arvo kiinteät, z-arvo satunnaiset).

			Estimaatti	Se	t/z-arvo
5 v. sitten	kiinteät	a_0	-0,455	0,0876	-5,19
		a_1	0,9804	0,002878	340,69
		a_2	0,0151	0,05434	0,28
	satunnaiset	σ^2_S	0,07637	0,02585	2,95
		σ^2_P	0,01112	0,006794	1,64
		σ^2_e	0,1017	0,00784	12,97
10 v. sitten	kiinteät	a_0	-0,9372	0,189	-4,96
		a_1	0,9554	0,005301	180,22
		a_2	-0,04039	0,102	-0,4
	satunnaiset	σ^2_S	0,5352	0,1599	3,35
		σ^2_P	0,0388	0,02282	1,7
		σ^2_e	0,3314	0,02546	13,02
15 v. sitten	kiinteät	a_0	-1,3623	0,3469	-3,93
		a_1	0,9169	0,008831	103,83
		a_2	-0,3576	0,171	-2,09
	satunnaiset	σ^2_S	2,1216	0,6086	3,49
		σ^2_P	0,08603	0,0579	1,49
		σ^2_e	0,9163	0,07027	13,04
20 v. sitten	kiinteät	a_0	-1,9384	0,5536	-3,5
		a_1	0,8672	0,01313	66,07
		a_2	-0,5389	0,2548	-2,12
	satunnaiset	σ^2_S	5,8167	1,6584	3,51
		σ^2_P	0,3231	0,1643	1,97
		σ^2_e	1,9701	0,1511	13,04

Liite IB. Nykyhetken ja menneisyyden lukupuille tehdyn kuorimallin parametrien estimaatit sekä niiden tarkkuutta ja merkitsevyyttä kuvaavat tunnusluvut.

			Estimaatti	Se	t-arvo
Nykyhetki	kiinteät	a_0	-0,3861	0,07749	-4,98
		a_1	0,8434	0,02386	35,34
		a_2	-0,4842	0,03455	-14,02
	satunnaiset	a_3	-0,9396	0,06457	-14,55
		σ^2_S	0,007836	0,004246	1,85
		σ^2_P	0,003722	0,003166	1,18
Menneisyys	kiinteät	a_0	-0,2281	0,07874	-2,9
		a_1	0,8162	0,02493	32,74
		a_2	-0,5229	0,03608	-14,49
	satunnaiset	a_3	-0,997	0,06799	-14,66
		σ^2_S	0,00818	0,004591	1,78
		σ^2_P	0,004149	0,003549	1,17
	σ^2_e	0,06488	0,004769	13,6	

Liite IC. Kaikille puulajeille tehdyn yleisen pituusmallin sekä mäntyjen pituutta 20 vuotta sitten kuvaavan pituusmallin parametrien estimaatit sekä niiden tarkkuutta ja merkitsevyyttä kuvaavat tunnusluvut.

			Estimaatti	Se	t/z-arvo
Yleinen	kiinteät	a_0	0,5331	0,05148	10,36
		a_1	0,8332	0,01597	52,19
		a_2	-0,04867	0,02374	-2,05
	satunnaiset	a_3	0,1488	0,04211	3,53
		σ^2_S	0,004043	0,002325	1,74
		σ^2_P	0,003831	0,00198	1,94
	σ^2_e	0,02504	0,001834	13,65	
Mänty 20 v. eitten	kiinteät	a_0	1,4216	0,1395	10,19
		a_1	0,2436	0,03732	6,53
		σ^2_S	0,1514	0,07903	1,92
	satunnaiset	σ^2_P	0,0053	0,007117	0,74
		σ^2_e	0,0386	0,00742	5,2

Liite ID. Kuusten ja mäntyjen latvusrajoiden korkeuksia ennustavan mallin parametrien estimaatit sekä niiden tarkkuutta ja merkitsevyyttä kuvaavat tunnusluvut.

			Estimaatti	Se	t/z-arvo
Kuusi	kiinteät	a_0	-0,2706	0,1064	-2,54
		a_1	0,7442	0,03232	23,03
		σ^2_S	0,09052	0,0366	2,47
	satunnaiset	σ^2_P	0,02167	0,01053	2,06
		σ^2_e	0,0656	0,006247	10,5
		Mänty	a_1	0,6549	0,01054
σ^2_P	0,5974		0,3037	1,97	
σ^2_e	1,5298		0,2002	7,64	

Liite IE. Rinnankorkeusikää ennustavan mallin parametrien estimaatit sekä niiden tarkkuutta ja merkitsevyyttä kuvaavat tunnusluvut.

			Estimaatti	Se	t/z-arvo
Yleinen	kiinteät	a_0	2,6937	0,07655	35,19
		a_1	0,2284	0,04178	5,47
		a_2	0,1736	0,04519	3,84
	satunnaiset	a_3	0,02808	0,02416	1,16
		σ^2_S	0,08615	0,02399	3,59
		σ^2_P	0,004739	0,002045	2,32
	σ^2_e	0,01764	0,001358	12,99	