



■ Sauli Valkonen

Sauli Valkonen

Viljelykuusikoiden alkukehityksen malli

Valkonen, S. 1997. Viljelykuusikoiden alkukehityksen malli. Metsätieteen aikakauskirja – Folia Forestalia 3/1997: 321–347.

Tutkimuksessa laadittiin kangasmaiden puhtaiden, ilman sekapuuston tai tuhojen aiheuttamia häiriöitä kasvaneiden 0,5–10 m valtapituisten viljelykuusikoiden alkukehitystä kuvaava malliperhe. Siihen kuuluvat yksittäisten kasvatuskelpoisten kuusten pituus- ja paksuuskasvun ja kuolemistodennäköisyyden mallit sekä metsikön valtapituuskehityksen, pituusjakauman ja läpimitan mallit. Tutkimusaineisto koostui 36 tuoreen ja lehtomaisen kankaan istutusmetsiköstä, jotka sijaitsivat tasaisesti Suomen alueella pohjoisinta osaa lukuun ottamatta. Kesto- ja kertakoealoina mitatut metsiköt oli valittu osin subjektiivisesti, osin monivaiheisella otannalla. Niiden ikä vaihteli tutkimusjakson lopussa 11–36 vuoden, valtapituus 1,5–10,8 m ja kasvatuskelpoisten taimien runkoluku 933–3 560 kpl ha⁻¹ välillä. Aineistosta puuttuivat epäonnistuneet viljelykset. Mallit testattiin riippumattomalla aineistolla. Mallien mukaista puuston kehitystä verrattiin kasvu- ja tuotostaulukoiden ja varttuneiden viljelykuusikoiden kasvumallien mukaiseen kehitykseen.

Asiasanat: kuusi, *Picea abies*, malli, kasvu, tuotos, kuolleisuus, kokojakauma, metsänviljely, taimikon käsittely

Kirjoittajan yhteystiedot: Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus, PL 18, 01301 Vantaa, puh. (09) 857 051, faksi (09) 857 05 361, sähköposti sauli.valkonen@metla.fi

Hyväksytty 24.4.1997

Merkinnät

Puun tunnuksat

d	kuorellinen läpimitta rinnankorkeudella, cm
h	pituus, m
g	kuorellinen poikkileikkauspinnan ala rinnankorkeudella, cm ²
i_g	rinnankorkeudelta mitatun poikkileikkauspinta-alan kasvu tulevalla 5-vuotisjaksolla, cm ² (5v) ⁻¹
i_h	pituuskasvu tulevalla 5-vuotisjaksolla, m (5v) ⁻¹
t	biologinen ikä, vuotta

Metsikön tunnuksat

D	aritmeettinen keskiläpimitta rinnankorkeudella, cm
D_g	poikkileikkauspinta-aloilla painotettu keskiläpimitta rinnankorkeudella, cm
G	pohjapinta-ala, m ² ha ⁻¹
H	aritmeettinen keskipituus, m
H_{dom}	valtapituus (100 paksuimman puun/ha ⁻¹ keskipituus), m
IH_{dom}	metsikön valtapituuden kasvu tulevalla 5-vuotisjaksolla, m/ (5v) ⁻¹
H_{100}	kuusen valtapituus 100 vuoden iällä, m (valtapituusboniteetti)
H_{25}	kuusen valtapituus 25 vuoden iällä, m (valtapituusboniteetti)
N	runkoluku, kpl ha ⁻¹
T	puiden biologinen ikä, vuotta
V	puuston runkotilavuus, m ³ ha ⁻¹
OMT	Oxalis-Myrtillus -tyyppi (Cajander 1909)
MT	Myrtillus -tyyppi (Cajander 1909)

Tilastolliset tunnuksat

S_m	selitettävän muuttujan keskiahajonta
S_f	mallin jäännöshajonta
R^2	mallin selitysaste
r	korrelaatiokerroin
n	havaintojen lukumäärä
y_i	havaittu arvo
\hat{y}_i	ennustettu arvo
\hat{y}_k	ennustettujen arvojen keskiarvo
$b = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) / n$	ennusteen harha
$b_s = \sum_{i=1}^n ((y_i - \hat{y}_i) / \hat{y}_i) / n$	ennusteen suhteellinen harha
$RMSE = \left(\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / n \right)^{0,5}$	ennusteen keskineliöpoikkeaman neliöjuuri
$RMSE_r = \left(\sum_{i=1}^n ((y_i - \hat{y}_i) / \hat{y}_i)^2 / n \right)^{0,5}$	ennusteen suhteellinen RMSE

1 Johdanto

Metsätalouden ekologisen kestävyuden lisäämiseksi ja kustannusten säästämiseksi suositetaan nykyisin luontaista uudistamista ja sekametsiä (Metsätalous ja ympäristö 1994, Parviainen ja Sepänen 1994). Kuusen viljely on kuitenkin edelleen hyvä uudistamisvaihtoehto viljavilla kasvupaikoilla. Viljelyllä saadaan keskimäärin 6–15 vuoden aikavoitto luontaiseen uudistamiseen verrattuna ja hyvä uudistamistulos saavutetaan varmemmin (Räsänen ym. 1985). Puhtaan viljelykuusikon ja kuusi-rauduskoivu -sekametsän tuotto on kilpailukykyinen luontaisten puulajien ja lehtikuusen kanssa. Viljelytaimikosta syntyy helposti sekametsä antamalla muiden puulajien kasvaa aukkojen täydentäjinä tai verho- ja ylispuustona (Karjula ym. 1982, Mielikäinen 1985, Mielikäinen ja Valkonen 1995, Saksa 1992).

Taimikon kehitystä kuvaavilla malleilla voidaan vertailla vaihtoehtoisia uudistamis- ja kasvatusmenetelmiä. Puhtaan taimikon kehitystä voidaan käyttää referenssitasona, johon muita vaihtoehtoja verrataan. Voidaan olettaa, että hyvin onnistuneessa, puhtaassa viljelykuusikossa saavutetaan kuusen taimikon nopein mahdollinen alkukehitys kasvupaikan ominaisuuksien asettamissa rajoissa kaikkein varhaisinta vaihetta lukuun ottamatta (Oliver ja Larson 1990, Kellomäki 1991, Kaila 1994).

Puhtaita kuusikoita ja kuusisekametsiä varten on olemassa suomalaisia kasvu- ja tuotostaulukoita ja kasvumalleja (Vuokila 1983, Mäkelä ja Salminen 1991, Pukkala ym. 1994, Mielikäinen ja Valkonen 1995). Seuraavassa luetellaan tärkeimpiä viljelykuusikkomalleja ja niiden soveltamista rajoittavia piirteitä nykyisiin tutkimustarpeisiin ja käytännön menetelmiin nähden.

Cajander (1934) esitti eteläisimmän Suomen viljelykuusikoiden kehitystä koskeneen tutkimuksen tulokset metsikkökohtaisina taulukkoina ja graafeina. Taimikoiden viljelytekniikka poikkesi selvästi nykyisestä: neljäsosa taimikoista oli kylvetty, ja istutuksen viljelytiheys oli ollut keskimäärin 4 000 kpl ha⁻¹. Vuokilan ja Väliahon (1980) metsikkökohtaiset mallit kuvaavat hoidettujen, puhtaiden viljelykuusikoiden kehitystä 10 metrin valtapituudesta eteenpäin.

Mielikäinen (1985) mallitti yksijaksoisten kuusi-koivu -sekametsiköiden kasvua Etelä-Suomessa. Mallien käyttöalue ei ulotu taimikoihin. Mielikäinen ja Valkonen (1995) mallittivat kaksijaksoisen kuusi-koivu -sekametsiköiden kasvua Etelä-Suomessa. Mallit eivät ennusta alusta lähtien vapaana kasvaneiden kuusten kasvua luotettavasti. Hiltusen (1981) turvemaiden kuusen taimikoiden malleilla ei aineiston suppeuden takia ole yleistä käyttöä. Nyssösen ja Mielikäisen (1978) kasvumallien käyttöalue ei ulotu alle 20-vuotiaisiin taimikoihin. Metsäntutkimuslaitoksen MELA-järjestelmän luonnonprosesseja kuvaavia malleja ollaan uusimassa etenkin metsikön varhaiskehitystä kuvattaessa (Ojanen ym. 1991, Hynynen 1995a, 1996).

Ruotsissa nuorten metsiköiden kehityksen ennustamiseen on yleensä käytetty HUGIN-hankkeen aineistoista laadittuja malleja (Elfving 1982, Nyström ja Gemmel 1988, Nyström ja Kexi 1996). Fryk (1984) laati metsikkökohtaiset kasvumallit harvoille nuorille metsiköille.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on laatia mallit puhtaana kasvatettavien kivennäismaiden kuusen viljelytaimikoiden kehityksen kuvaamiseksi 10 metrin valtapituusvaiheeseen saakka. Taimien kuolleisuuteen ja kasvuun vaikuttavat tärkeimmät tekijät, joiden vaikutusta ennustetaan malleilla, ovat puiden luontainen kasvurytmi, kasvupaikan ominaisuudet ja puiden välinen kilpailu. Aivan varhaisimman vaiheen kehitykseen voimakkaasti vaikuttavia tekijöitä (esim. maanpinnan käsittely, taimimateriaali, taimien kunto ja pintakasvillisuuden kilpailu) sekä luontaisten taimien syntymistä ja tuhoa ei käsitellä malleissa eksplisiittisesti, koska tutkimusaineistossa ei ole niitä koskevia luotettavia tietoja. Mallien käyttötarkoitus on kuusikoiden uudistamis- ja kasvattamisvaihtoehtojen vertailu tutkimustyössä ja metsätalouden suunnittelussa. Vaihtoehtojen vertailuun asti ei edetä vielä tässä tutkimuksessa. Muita vaihtoehtoja kuvaavia malleja on täydennettävä ennen kuin pätevät vertailut ovat mahdollisia.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Aineiston hankinta

Tutkimusaineisto koottiin kahdesta osa-aineistosta. KERTA-aineisto oli hankittu talousmetsien viljelytaimikoissa mitatuilta kertakoealoilta varhaiskehityksen mallitusta varten (Varmola 1993). TINKA-aineisto käsitti Metsäntutkimuslaitoksen kestokoeverkostoon sisältyneet kuusen viljelytaimikot. Valtakunnan metsien 7. inventointiin tukeutuneella ositetulla otannalla valitut TINKA-kokeet on perustettu talousmetsien taimikoiden kehityksen mallittamiseksi (Gustavsen ym. 1988). Aineistot on esitetty yksityiskohtaisesti em. raporteissa. Seuraavassa käsitellään ainoastaan tämän tutkimuksen kannalta olennaisina pidetyt kohdat.

Koemetsiköt sijoittuivat kivennäismaille tasaisesti koko maan alueelle Perä-Pohjolaa ja sitä pohjoisempia metsäkasvillisuusvyöhykkeitä ja rannikkoalukuun ottamatta (kuva 1). Aineistoihin oli hyväksytty vain onnistuneita istutuksia, joissa viljelykuuset muodostivat kasvatettavaksi kelpaavan, riittävän tiheän vallitsevan puujakson. Osaa taimikoista oli hoidettu perkauksin ja ylispuuhakkuin.

KERTA-aineisto kerättiin vuosina 1968–71. Kuhnkin taimikkoon rajattiin tasaiseen, täystiheään kohtaan vaihtelevan kokoinen suorakaiteen muotoinen koeala, johon kuului vähintään 200 viljelytaimikkoa. Koealan puut luettiin puulajeittain. Puiden luvun yhteydessä valittiin systemaattisesti 40 viljelytaimikkoa. Niistä puolet valittiin koealaksi siten, että ne jakautuivat tasaisesti koealalle ja edustivat runkolukusarjan läpimittajakaunaa. Koealasta mitattiin mm. pituus, rinnankorkeusläpimitta, kuoren paksuus sekä vuosittaiset pituus- ja sädekasvut 15 vuotta taaksepäin.

TINKA-taimikot mitattiin ensimmäisen kerran vuosina 1984–86 ja toisen kerran tasan viiden vuoden kuluttua 1989–91. Kuhnkin metsikköön rajattiin kolme vaihtelevan kokoista ympyräkoelaa. Kolmella osakoealalla valittiin kasvatuskelpoisiksi yhteensä n. 100 puuta, tavoitetiheytenä 3 000 kpl ha⁻¹. Kasvatuskelpoisia olivat sellaiset puut, joiden ajateltiin jäävän kasvamaan ensiharvennukseen asti mahdollisen taimikonhoidon jälkeenkin. Kasvatuskelpoisiksi hyväksyttiin pieni määrä muitakin puu-

lajeja kuin kuusia (keskimäärin 5 % kasvatuskelpoisten runkoluvusta). Puiden sijainti kartoitettiin, ja niistä mitattiin puutunnuksia (Gustavsen ym. 1988).

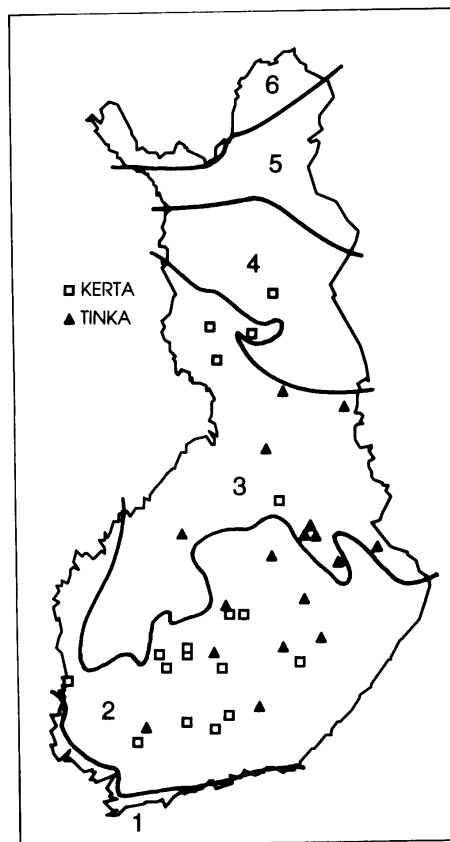
Puiden kasvu laskettiin peräkkäisissä mittauksissa todettujen pituuksien ja läpimittojen erotuksena. Puiden pituuskasvusta poistettiin kesken olleen kasvukauden pituuskasvu ja käytettiin jakson alun tilannetta. Jos kasvukausi oli jo päättynyt (1. elokuuta), käytettiin jakson lopun tilannetta. Kunkin metsikön toistomittaus oli pyritty tekemään samana ajankohtana kuin ensimmäinen mittaus, jotta puiden läpimittahavainnot olisivat peräisin samasta kasvuvaiheesta. Koska puun paksuuskasvu ei etene yhtä nopeasti eri kasvukausina, sama mittausajankohta ei kuitenkaan takaa täysin harhatonta kasvuhavaintoa peräkkäisten mittausten erotuksena. Metsiköistä 4 mitattiin läpimitan kasvukauden ulkopuolella (ennen 1. kesäkuuta tai 31. heinäkuuta jälkeen). Kasvukauden aikana mitatuista 13 metsiköstä mittaussajankohtien välinen ero oli vähäinen (alle 7 vrk) 8 metsikössä. Tätä suurempi ajankohtien ero oli 5 metsikössä. Kolmea viikkoa suurempia poikkeamia ei esiintynyt. Poikkeamien vaikutusta pidettiin niin vähäisenä ettei havaintoja korjattu millään tavoin.

2.2 Tutkimusaineisto ja sen käsittely

KERTA-aineistoon sisältyi 22 ja TINKA-aineistoon 20 kuusen viljelytaimikkoa, joista oli käytävissä tarvittavat tiedot. Tutkimusaineistoon valittiin 36 taimikkoa, jossa kasvatuskelpoiset puut olivat saaneet kasvaa ainakin viimeiset 5 vuotta muiden puulajien kilpailusta lähes täysin vapaina ja joita ei ollut perattu tai harvennettu tutkimusjakson aikana (kuva 1, taulukko 1).

Mallien laadinta-aineistoina käytettiin kasvatuskelpoisten lukupuiden joukkoa ja koepuita sen osajoukkona. Kuusen koepuiden läpimittajakauma vastasi hyvin kuusen lukupuiden läpimittajakaumaa, koska keskimäärin 94 % taimikoiden kuusista oli kasvatuskelpoisia. Kasvatuskeltottomat puut laskettiin mukaan metsikkökohtaisiin tunnuksiin.

KERTA-aineistossa oli mitattu puiden pituus- ja sädekasvu 15 vuotta taaksepäin. Niistä arvottiin käytettäväksi joko viimeistä tai toiseksi viimeistä



Kuva 1. Tutkimusmetsiköiden sijainti ja metsäkasvillisuusvyöhykkeet (Lehto 1978). 1 = Saaristo-Suomi, 2 = Etelä-Suomi, 3 = Pohjanmaa-Kainuu, 4 = Peräpohjola, 5 = Metsä-Lappi, 6 = Tunturi-Lappi.

5-vuotiskautta. Kuoreton läpimitta jakson alussa muutettiin kuorelliseksi kuorimallilla. Koepuuna-aineistoon sovitettu kuorimalli oli muotoa

$$\hat{g} = \frac{g_b}{(b_0 t^{b_2})^{-b_1}} \quad (1)$$

\hat{g} = puun kuorellinen poikkileikkauspinnan ala, cm²

g_b = puun kuoreton poikkileikkauspinnan ala, cm²

t = puun biologinen ikä, vuotta

$b_i, i = 0, 1, 2$ = parametreja

Mallilla laskettiin koepuiden kuorellinen pohjapinta-ala ja läpimitta kasvujakson alussa kuorettomasta läpimitasta. Malli kalibroitiin jokaiselle koepuulle erikseen kertomalla kasvujakson alun ennuste

Taulukko 1. Tutkimusaineiston metsikkötunnukset tutkimusjakson lopussa.

Metsikkö	Kasvu- paikkatyyppi	<i>T</i>	<i>N_{kuusi}</i>	<i>N_{seka}</i>	<i>N_{kasv}</i>	<i>H_{domku}</i>	<i>D_{gku}</i>	<i>G</i>
1	lmk	22	3930	0	3560	7,0	6,6	8,5
2	tuok	22	2176	0	1936	7,0	8,1	6,9
3	tuok	24	3168	0	2864	6,6	6,3	6,9
4	tuok	21	2542	1256	2109	6,9	6,2	4,8
5	tuok	20	1835	114	1680	7,0	6,5	3,8
6	tuok	20	3781	601	2698	7,9	6,4	7,3
7	lmk	23	2628	2632	2158	7,9	7,5	7,1
8	lmk	19	3220	2590	2375	7,6	7,2	6,8
9	lmk	20	3510	140	3060	7,3	7,4	10,8
10	lmk	17	2400	1830	2240	7,3	7,4	8,7
11	tuok	19	1970	30	1780	6,4	6,6	4,1
12	lmk	19	1830	3060	1800	5,2	5,6	3,8
13	tuok	22	2298	72	2286	8,3	9,4	12,4
14	lmk	21	2775	313	2707	6,4	7,2	8,8
15	tuok	36	2733	0	2137	6,3	6,2	4,8
16	tuok	36	2049	0	1792	6,3	6,5	4,1
17	tuok	33	1649	0	1517	7,0	8,9	6,5
18	tuok	34	1874	100	1716	7,0	6,4	4,1
19	tuok	28	1195	0	1020	5,4	6,2	2,1
20	lmk	23	2885	3316	2622	7,7	8,5	14,7
21	lmk	13	1320	6846	1333	1,6	1,3	1,4
22	tuok	27	1546	3618	1831	9,2	9,5	12,5
23	lmk	27	1650	2684	1667	10,8	11,3	12,8
24	lmk	12	1572	4615	1380	1,5	1,4	0,2
25	tuok	15	1982	6605	2032	2,5	2,0	0,6
26	tuok	26	1627	2705	1851	6,6	7,4	6,8
27	tuok	21	1566	5949	2015	5,2	3,5	7,5
28	lmk	28	2087	3264	2205	7,9	7,5	9,8
29	tuok	26	1905	3792	1905	9,8	11,2	16,1
30	tuok	14	2083	7966	1716	2,9	2,4	0,3
31	tuok	14	1396	9404	1334	2,8	3,3	0,4
32	tuok	22	3164	7333	2497	5,1	6,0	4,7
33	tuok	11	2110	34038	2110	2,4	1,5	0,2
34	lmk	18	1390	1877	933	4,0	4,7	2,1
35	tuok	24	3041	2628	3169	5,9	2,2	6,7
36	tuok	27	2096	3428	2096	7,6	7,2	5,5

Kasvupaikkatyypit (Lehto 1978):
 lmk = lehtomainen kangas
 tuok = tuore kangas

T = viljelytaimien biologinen ikä, vuotta
N_{kuusi} = kuusen runkoluku, kpl ha⁻¹
N_{seka} = muiden puulajien kuin kuusen runkoluku, kpl ha⁻¹
N_{kasv} = kasvatuskelpoisten puiden runkoluku, kpl ha⁻¹
H_{domku} = kuusen valtipuu, m
D_{gku} = kuusen pohjapinta-aloilla painotettu keskiläpimitta, cm
G = puuston pohjapinta-ala, m² ha⁻¹

mittaushetken todellisen kuorellisen läpimitan ja sen mallilla lasketun ennusteen suhteella.

Kuusikon valtipuudet laskettiin metsiköittäisten pituuskyriä ja runkolukusarjojen perusteella. Kuusikoepuiden perusteella laadittiin metsiköittäiset pituuskyrät mittaushetkellä ja kasvujakson alussa Näslundin (1936) malleilla. Yksittäisiä metsi-

köiden suurimpia puita, joiden läpimittaluokka oli vähintään 2 cm suurempi kuin seuraavaksi suurimman puun läpimittaluokka, ei otettu mukaan valtipuutta laskettaessa (Vuokila ja Väliaho 1980).

Kasvumallien aineistona käytetyt viiden vuoden pituiset kasvujaksot päättyivät vuosiin 1962–1965, 1967–1970 ja 1988–1990. Puuston kasvun ilmastol-

lisen vaihtelun vaikutus otetaan yleensä huomioon joko korjaamalla mitatut kasvuhavainnot kasvui- indekseillä tai ottamalla kasvun vaihtelua kuvaavia muuttujia mallien selittäviksi muuttujiksi. Puun pi- tuuden kasvulle ei ole laadittu tutkimusjaksoa katta- via indeksejä. Läpimittan kasvua varten oli olemassa julkaistuja indeksejä, mutta ne eivät kattaneet yhtei- näisesti koko tutkimusjaksoa (Tiihonen 1979, 1983, 1984, 1985, 1986, Henttonen 1990). Timosen ja Ruotsalaisen (1994) indeksit olivat aineistoa käsitel- täessä vasta alustavia eikä niitä tekijöiden mukaan ollut vielä syytä käyttää kasvuhavaintojen korjaami- seen. Kasvun vaihtelu otettiin kuusen pohjapinta- alan kasvumalleissa huomioon kasvujaksoa edusta- van kiinteän luokkamuuuttujan avulla.

2.3 Testiaineisto

Riippumattomana testiaineistona käytettiin Metsän- tutkimuslaitoksen INKA-kestokoeaineistoa. INKA- koeverkosto on perustettu valtakunnallisesti katta- vien, kivennäismaiden talousmetsiä edustavien kas- vu- ja tuotostutkimusaineistojen tuottamiseksi. Koe- alaverkosto on sidottu Valtakunnan metsien 7. in- ventoinnin otantasysteemiin. Kuhunkin metsikköön on sijoitettu kolmen ympyräkoealan ryväs, jotka käsittävät yhteensä n. 100 lukupuuta. Lukupuista on mitattu mm. läpimitta mutta ei pituutta. Kol- masosa puista on mitattu koepuina kunkin koealan keskelle sijoitetuilla pienemmillä ympyräkoealoil- la. Koepuista on mitattu mm. pituus. Mittaukset on toistettu viiden vuoden välein. Aineiston ja mittau- ksen yksityiskohdat on selostettu julkaisussa Gus- tavsen ym. (1988).

INKA-aineistosta poimittiin kuusen viljelytami- kot, joiden valtapituus oli kasvujakson alussa kor- keintaan 9 metriä. Nämä 11 metsikköä sijoituivat tasaisesti Kajaanin eteläpuoliselle alueelle. Testiai- neisto koostui varttuneemmista metsiköistä kuin kasvumallien laadinta-aineisto (taulukko 2). Testi- aineistosta puuttuivat alle 1,0 cm paksuiset puut joita ei ollut mitattu. Testiaineisto ei poikennut merkittävästi mallien laadinta-aineistosta kasvu- paikkajakauman ja sekapuuosuuden suhteen. Testi- aineistona käytetyt koepuiden kasvu- ja kuollei- suustunnukset laskettiin ensimmäisen ja toisen mittauksen erotuksena.

Taulukko 2. Metsikön valtapituuden kehitysmallin sekä puun pituuden ja pohjapinta-alan kasvumallien testiai- neistot.

Muuttuja	Keskiarvo	Keskihajonta	Minimi	Maksimi
Metsikön valtapituuden kehitys (n = 11)				
H_{dom1}	5,04	1,65	2,66	8,22
H_{dom2}	7,73	1,74	3,68	9,94
T_1	17,8	3,66	13	26
$I\hat{H}_{dom}$	2,69	0,74	1,02	3,59
$\hat{I}H_{dom}$	2,87	0,71	1,45	3,89
Puun pituuskasvu (n = 323)				
H_{dom1}	5,47	1,64	2,66	8,22
h	3,51	1,47	1,30	9,20
i_h	2,32	0,85	0,50	4,30
\hat{i}_h	2,57	0,67	0,91	3,93
h/H_{dom}	0,65	0,18	0,23	1,27
Puun pohjapinta-alan kasvu (n = 319)				
H_{25}	10,10	2,60	4,70	14,30
G	3,69	2,03	0,24	6,57
d	3,90	2,36	0,40	12,50
i_g	32,36	21,57	3,90	131,8
\hat{i}_g	29,76	18,70	5,06	101,54

H_{dom1} = metsikön valtapituus jakson alussa, m

H_{dom2} = metsikön valtapituus jakson lopussa, m

T_1 = metsikön puiden biologinen ikä jakson alussa, vuotta

$I\hat{H}_{dom}$ = mitattu metsikön valtapituuden kasvu 5-vuotijaksolla, m (5v)⁻¹

$\hat{I}H_{dom}$ = mallilla ennustettu metsikön valtapituuden kasvu 5-vuotijaksolla, m (5v)⁻¹

h = puun pituus, m

i_h = mitattu puun pituuskasvu 5-vuotijaksolla, m (5v)⁻¹

\hat{i}_h = mallilla ennustettu puun pituuskasvu 5-vuotijaksolla, m (5v)⁻¹

H_{25} = metsikön valtapituusboniteetti, m

G = metsikön pohjapinta-ala, m²ha⁻¹

d = puun läpimitta rinnankorkeudella, cm

i_g = rinnankorkeudelta mitatun poikkileikkauspinta-alan mitattu

kasvu 5-vuotijaksolla, cm² (5v)⁻¹

\hat{i}_g = rinnankorkeudelta mitatun poikkileikkauspinta-alan mallilla

ennustettu kasvu 5-vuotijaksolla, cm² (5v)⁻¹

Testiaineiston 5 vuoden pituiset kasvujaksot päättyivät vuosiin 1985–1987. Kasvuhavaintoja ei korjattu kasvun vuotuista vaihtelua kuvaavilla indekseillä. Pituuskasvun pitkän ajan indeksejä ei ollut käytettävissä. Kuusen pituuskasvun taso oli testiaineistossa keskimäärin 1,035-kertainen jakson 1980–91 keskiarvoon verrattuna (Koistinen ja Valkonen 1993). Kuusen alustava, tarkistamaton sädekasvuindeksi oli testiaineiston 5-vuotisilla kasvujaksoilla keskimäärin 1,066. Vaihteluväli eri jaksojen välillä oli Etelä-Suomessa 1,060–1,084 ja Pohjois-Suomessa 0,960–1,122 (Timonen ja Ruotsalainen 1994).

2.4 Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksessa laadittiin malliperhe, jolla voidaan kuvata taimikon puusto laskelmien lähtötilanteessa pituusjakauma- ja läpimittamalleilla sekä puuston kehitys viiden vuoden pituisina jaksoina metsikön valtapituuden ja yksittäisten puiden pituus-, paksuuskasvu- ja kuolleisuusmallilla. Mallit ovat tyyppiltään empiirisiä. Puiden ja puuston tilaa ja kehittymistä kuvataan funktioilla, joiden selitettävät ja selittävät muuttujat sekä tilastollisin menetelmin estimoitavat parametrit perustuvat melko suoraviivaisesti mitattuihin puu- ja metsikkötunnuksiin (Hynynen 1995b).

Mallien parametrit estimoititiin käyttäen eri tilastollisia menetelmiä mallin käyttötarkoituksen, raketteen ja aineiston vaatimusten mukaan. Menetelmät ja niiden soveltaminen on käsitelty kunkin mallin kohdalla kappaleessa 3. Mallit testattiin riippumattomilla aineistoilla sekä vertailemalla niillä laskettuja tuloksia olemassa olleiden mallien antamiin tuloksiin. Mikäli tässä raportissa esitettävän lineaarisen regressio- tai sekamallin selitettävä muuttuja on logaritminen, mallin vakiotermin on lisäksi korjaustekijä $S_f^2/2$.

3 Mallit

3.1 Metsikön alkutilan kuvaus

3.1.1 Puuston kokojakauma

Metsikön kaikkien puiden tai otoksen puiden pituus ja läpimitta on tunnettava kun käytetään puukohtaisia kasvumalleja. Puiden kokojakauma voidaan myös estimoida käyttämällä jotain jakaumafunktiota, jonka parametrit ennustetaan puustotunnusten avulla. Puuston pituusjakaumaa kuvattiin Weibull-jakaumalla, jota on käytetty yleisesti puuston läpimittajakauman kuvaamiseen (Bailey ja Dell 1973, Kilkki ja Päivinen 1986, Magnussen 1986, Kilkki ym. 1989, Hökkä ym. 1991). Weibull-jakauman tiheysfunktio on

$$f(x) = \frac{\chi}{\beta} \left(\frac{x-\alpha}{\beta} \right)^{(\chi-1)} \exp \left[- \left(\frac{x-\alpha}{\beta} \right)^\chi \right],$$

kun $(\alpha \leq x \leq \infty)$ (2)

jossa x on muuttuja ja α , β ja χ ovat parametreja. Parametreista α määrittää jakauman alarajan eli minimipituuden, β jakauman leveyden ja χ jakauman muodon.

TINKA-aineiston metsiköittäisiin ($n = 17$) kasvatuskelpoisten kuusten pituusjakaumiin sovitettiin Weibull-jakaumat Maximum Likelihood -menetelmällä BMDP-ohjelmiston LE-proseduuria käyttäen (Dixon ym. 1990). Kasvatuskelpoiset luonnontaimet sisältyivät jakaumiin. Viljelytiheys oli ollut keskimäärin $2\,460$ kpl ha⁻¹ (min $1\,600$, max $5\,100$ kpl ha⁻¹), ja kasvatuskelpoisten kuusten määrä oli keskimäärin $1\,800$ kpl ha⁻¹. Kasvatuskelpoisten kuusten määrä ylitti viljelytiheyden 8 taimikossa, enimmillään 620 kpl ha⁻¹.

Kunkin mitatun ja sovitetun pituusjakauman yhteensopivuus testattiin log-likelihood -testisuureen (G^2) avulla (Ranta ym. 1989). Sovitusta pidettiin onnistuneena mikäli G^2 :n arvo oli pienempi kuin riskiä $\alpha = 0,05$ vastaava arvo. Yhteensopivuus testattiin myös Kolmogorovin-Smirnovin testillä ($\alpha = 0,05$) (Ranta ym. 1989). Sovitus onnistui molempien testien mukaan 16 metsikössä ja epäonnistui yhdessä.

Metsiköittäisille Weibull-jakauman parametreille α , β , ja χ laadittiin regressiomallit pienimmän neliösumman menetelmällä. Parametreja selittävinä muuttujina käytettiin metsikkötunnuksia (Hyink ja Moser 1983, Knoebel ja Burkhart 1991).

Pituusjakauman alaraja oli aineistossa sitä suurempi mitä suurempi oli taimikon keskipituus (H). Pieni runkoluku (N) merkitsi suurempaa minimipituutta. Parametrin α malli oli siten muotoa

$$\alpha = b_1 H / \ln(N) + \varepsilon \quad (3)$$

ε = virhetermi

Parametrin β arvo korreloi erittäin voimakkaasti taimikon keskipituuden kanssa ($r = 0,99$). Taimikon minimipituuden ja keskipituuden erotus vaikuttaa parametrin arvoon siten, että pienemmällä runkoluvulla jakauma on suppeampi. Havaitun mi-

nimipituuden asemasta voidaan käyttää parametria α (Gadow 1987). Tällöin

$$\ln(\beta) = b_2 \ln(H - \alpha) + \varepsilon \quad (4)$$

$$\ln(\beta) = b_2 \ln(H - (b_1 H / \ln(N)) + \varepsilon \quad (5)$$

Termillä $b_1 H / \ln(N)$ lasketaan mallia käytettäessä parametri α .

Kaikki jakaumat yhtä lukuunottamatta olivat vasemmalle vinoja. Jakauman vinous pieniä lievästi keskipituuden kasvaessa, jolloin χ -parametrin malli oli muotoa:

$$\chi = b_3 + b_4 H + \varepsilon \quad (6)$$

Mallien parametrit $b_1 \dots b_4$ estimoitiin lineaarisella ja epälinearisella regressioanalyysillä pienimmän neliösumman menetelmällä. Parametrit b_1 ja b_2 estimoitiin yhtäaikaaisesti yhtälön 5 mukaan. Aineistona käytettiin niiden 16 metsikön parametreja, joissa jakauman sovitus oli onnistunut (taulukot 3 ja 4).

Mallia käytettäessä simuloidun puuston keskipituus (\hat{H}) poikkeaa yleensä hieman syöttötietona annetusta keskipituudesta (H). Kaikki mallilla generoidut pituudet skaalataan korjauskertoimella

$$\hat{y} = \frac{H}{\hat{H}} \quad (7)$$

Malleilla 5–7 ennustetun pituusjakauman yhteensopivuus mitattuun pituusjakaumaan testattiin niissä 16 metsikössä, joiden perusteella mallit oli laadittu, samalla tavalla kuin metsiköittäin sovitettujen pituusjakaumien. Mallin mukainen jakauma tulkittiin sopivaksi 12 metsikössä ja sopimattomaksi 4 metsikössä.

Jakaumamallit testattiin käyttäen KERTA-aineiston metsiköiden lukupuiden kokojakaumia testiaineistona. Läpimittajakaumat muutettiin pituusjakaumiksi metsiköittäisillä pituusmalleilla. Mallilla generoidun pituusjakauman yhteensopivuus metsikön pituusjakauman kanssa testattiin Kolmogorovin-Smirnovin testillä ($\alpha = 0,05$). Sovituksen todettiin onnistuneen 12 metsikössä ja epäonnistuneen 7 metsikössä.

Weibull-jakauman maksimipituuden hallitsemista varten ei ole muuttujaa. Jakauma on mallia käytettäessä yleensä katkaistava. Tässä tutkimuksessa ja-

Taulukko 3. Puuston pituusjakauman parametreja ennustavien mallien laadinta-aineisto.

Muuttuja	Keski-arvo	Keskijajonta	Minimi	Maksimi
	(n=16)			
α	0,3653	0,4630	0,0000	1,154
β	1,803	1,457	0,1994	5,173
χ	2,144	0,3559	1,466	2,692
H	2,09	1,51	0,27	4,59
N	1733	550	580	2743

α, β, χ = metsiköiden pituusjakaumiin sovitettujen Weibull-jakaumien parametrit
 H = keskipituus, m
 N = runkoluku, kpl ha⁻¹

Taulukko 4. Puuston pituusjakauman parametreja ennustavien mallien parametrit.

Parametri	Arvo	Keskijajonta	t-arvo
Malli 5, selitettävä muuttuja: $\ln(\beta)$			
b_1	0,9279	0,246	–
b_2	1,0438	0,042	–
	$S_m = 0,977$		
	$S_f = 0,025$		
Malli 6, selitettävä muuttuja: χ			
b_3	1,883	0,149	12,66
b_4	0,127	0,060	2,11
	$R^2 = 0,254$		
	$S_m = 0,356$		
	$S_f = 0,102$		

Mallit ja muuttujien selitykset ks. teksti ja taulukko 3.

kauma katkaistiin kertymäfunktion 3 %:n kohdalla. Mallit antoivat laadinta-aineiston metsiköissä keskimäärin 2,8 % liian pienen keskipituus/valtapituus -suhteen. Tämä merkitsi mallin käyttöalueen ääriarajalla eli 4,5 metrin keskipituudella enintään 20 cm valtapituuden yliarviota.

Taulukko 5. Puun läpimittamallin (8) parametrit.

Parametri	Estimaatti	Keskihajonta
a. Kiinteä osa		
b_0	1,5663	0,0101
b_1	0,4559	0,0231
b_2	0,0324	0,0069
b. Satunnainen osa		
σ_b^2	0,000704	0,00033
σ_ε^2	0,004009	0,00020

σ_b^2 = satunnaisparametrin β_j varianssi
 σ_ε^2 = satunnaisparametrin ε_{ij} varianssi

3.1.2 Puiden läpimitta

Metsikön pituusjakaumamalleilla muodostettavan puujoukon puiden läpimittojen ennustamiseksi laadittiin sekamalli, jossa käytettiin metsiköiden välistä ja metsiköiden sisäistä vaihtelua kuvaavia satunnaistekijöitä (Henttonen 1990). Mallin parametrit estimoitiin puun pituuden ja pohjapinta-alan kasvumallien aineistosta kasvujakson alun tilanteessa käyttäen vain niitä metsiköitä jotka sisältyivät pituusjakaumamallien aineistoon (taulukko 5). Parametri α lisättiin malliin jäännösvarianssin homogenisoimiseksi (Henttonen 1989). Sen arvoksi valittiin kokonaisluku, joka johti homogeenisimpaan varianssiin puun pituuden vaihteluvälin muodostamissa luokissa ($\alpha = 5$).

$$\ln(d_{ij} + \alpha) = b_0 + b_1 \ln(h_{ij}) + b_2(h_{ij}) + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad (8)$$

missä

d_{ij} = metsikön j puun i rinnankorkeusläpimitta, cm

h_{ij} = metsikön j puun i pituus, m

b_0, b_2, α = kiinteitä parametreja

β_j = metsikön j satunnaisvaikutus

ε_{ij} = puun i satunnaisvaikutus metsikössä j

Metsikkö- ja puukohtaiset metsikön tiheyttä ja kasvupaikkaa kuvaavat selittävät muuttujat eivät saaneet merkitseviä kertoimia kokeilluissa malleissa.

3.2 Metsikön kehitys

3.2.1 Valtapituuden kehitys

Puuston pituuskehitys kuvattiin metsikön valtapituuskehityksen mallin ja yksittäisen puun pituuskasvumallin yhdistelmällä. Potentiaalista kasvua edustava valtapituuden kasvumallin ennuste kerrotaan puiden välisiä kasvueroja kuvaavan mallin ennusteella (Ek ja Monserud 1974, Hynynen 1995b).

Valtapituusmallina käytettiin Chapman-Richards-yhtälöä (Richards 1959):

$$H = f_1(1 - e^{-f_2 T})^{(1-f_3)^{-1}} + \varepsilon \quad (9)$$

H = metsikön puuston pituus

T = metsikön ikä

$f_i, i = 1..3$ = parametreja

ε = virhetermi

Metsiköiden valtapituuskehityksen malli laadittiin ns. *Difference equation* -menetelmällä, jossa puuston valtapituus mittaussjakson lopussa (H_{dom2}) lausutaan mittaussjakson alun valtapituuden (H_{dom1}) sekä jakson pituuden avulla (Clutter ym. 1983).

$$\hat{H}_{dom2} = H_{dom1} \left(\frac{1 - e^{-f_2 T_2}}{1 - e^{-f_2 T_1}} \right)^{(1-f_3)^{-1}} \quad (10)$$

H_{dom1} = metsikön valtapituus jakson alussa

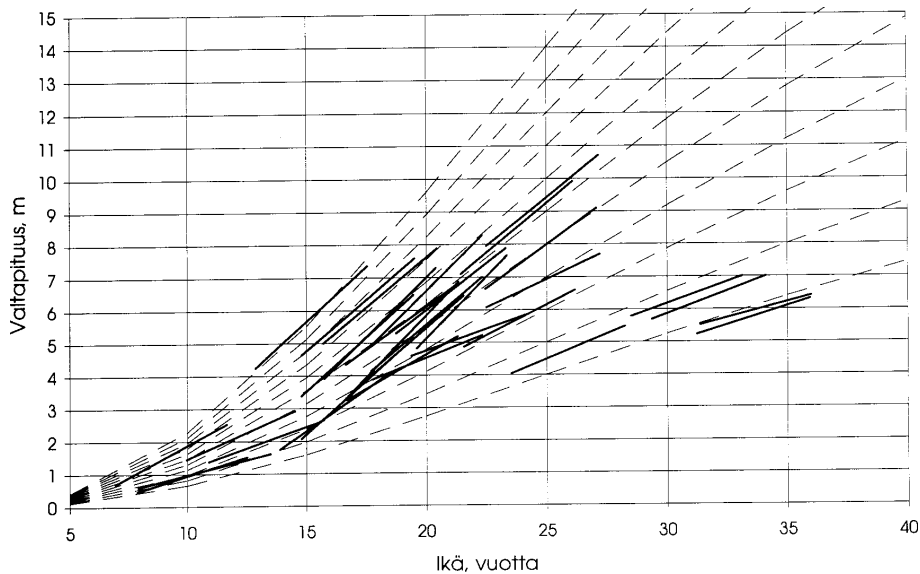
\hat{H}_{dom2} = metsikön valtapituus jakson lopussa

T_1 = metsikön ikä jakson alussa

T_2 = metsikön ikä jakson lopussa

Mallin parametrit f_2 ja f_3 estimoitiin metsikkökohtaisten valtapituushavaintojen sekä iän ja kasvujakson pituuden (5 vuotta) muodostamasta aineistosta (taulukko 6) tavallisella pienimmän neliösumman menetelmällä SAS-ohjelmiston NLIN-proseduurin DUD-metodilla (SAS Institute Inc. 1989). Kaksi metsikköä, joissa hallan aiheuttamat vauriot olivat johtaneet pituuskasvun voimakkaaseen hidastumiseen, poistettiin aineistosta. Parametriestimaatit:

Parametri	Estimaatti	Keskihajonta
f_2	0,04478	0,01291
f_3	0,6564	0,0472



Kuva 2. Valtapituuden kehityskäyrät ($4 \text{ m} < H_{25} < 14 \text{ m}$; katkoviivat) ja mallien laadinta-aineiston toteutuneet kasvujaksot (yhtenäiset viivat).

Taulukko 6. Metsikön valtappituuskehityksen mallien laadinta-aineisto ($n = 34$).

Muuttuja	Keski-arvo	Keskijajonta	Minimi	Maksimi
H_{dom1}	3,88	1,92	0,37	7,85
H_{dom2}	6,17	2,26	1,46	10,76
T_1	17,3	6,3	6	31

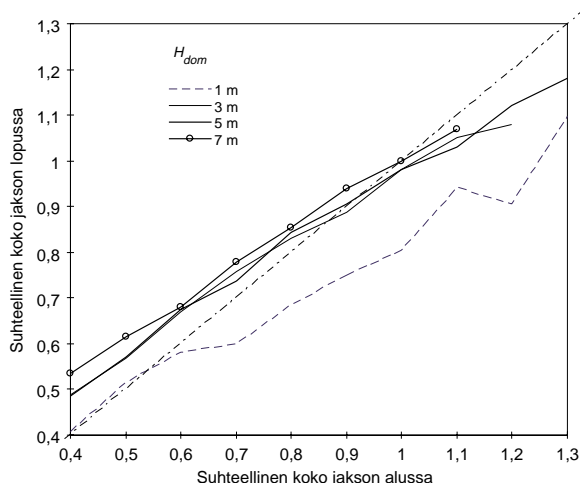
H_{dom1} = valtappituus jakson alussa, m
 H_{dom2} = valtappituus jakson alussa, m
 T_1 = viljelytaimien biologinen ikä jakson alussa, vuotta
 T_2 = $T_1 + 5$ vuotta

Malli antoi lähes harhattomia kasvuennusteita ($H_{dom2} - H_{dom1}$) laadinta-aineistossaan ($b = 0,015 \text{ m}$, $b_s = 2,5 \%$, $RMSE = 0,78$, $RMSE_r = 10,5 \%$). Mallin residuaalien tarkastelussa ei havaittu harhaisuutta iän tai valtappituuden suhteen.

Käytetty estimointimenetelmä ei tuota parametrin f_1 arvoa (yhtälö 9). Se on tasoparametri, jolla mallia skaalataan vapaasti valittavilla arvoilla tuotamaan käyriä jotka leikkaavat annetun havaintopisteen (esim. kuvan 2 käyrät).

Mallin realistisuutta muuttujien laadinta-aineistossa esiintyneen vaihteluvälin ulkopuolella ei voinut varmistaa. Malli antoi kuitenkin mielekkäitä tuloksia 100 vuoden iällä, jolloin mallin mukainen valtappituus oli tutkimusaineiston metsiköissä keskimäärin 24,4 m (vaihteluväli 12,2–42,4 m). Aineiston keskimääräistä valtappituuskehitystä edustaneen käyrän asymptootin arvo oli 25,3 m.

Valtappituuden kehityksen nopeutta käytettiin kasvupaikan puuntuotoskyvyn kuvaajana muissa malleissa. Mallilla muodostettiin käyrien alkupituutta (5 vuoden iässä) vaihtelemalla parvi valtappituuden kehityskäyriä, jotka osuivat 25 vuoden iällä tasametreihin (kuva 2). Käyrien avulla laskettuja valtappituuksia 25 vuoden iässä nimitetään jatkossa valtappituusboniteeteiksi (H_{25}). 25 vuoden ikä valittiin yleisesti käytetyn 100 vuoden sijasta, jotta boniteetin referenssi-ikä olisi mallin luotettavan käyttöalueen sisäpuolella. Kun metsikön biologinen ikä ja valtappituus tunnetaan, H_{25} :n arvo voidaan laskea kaavalla 10 asettamalla $T_2 = 25$ vuotta.



Kuva 3. Tutkimusaineiston kuusten suhteellinen koko (h/H_{dom}) kasvujakson alussa ja lopussa keskimäärin metsikön valtapituusluokittain. 1 m laajuiset tasaavat luokat, vain parittomat esitetty kuvassa.

3.2.2 Puun pituuskasvu

Yksittäisen puun pituuskasvu estimoidaan valtapituuden kasvun kerroinmallilla, joka kuvaa eri kokoisten puiden kasvueroja metsikön sisällä. Viljelytaimijoukkoon muodostuu taimien erilaisen kasvunopeuden ja luonnontaimien ikäeron takia kokoroja, ja puujoukko kehittyä enemmän tai vähemmän laajaksi kokojakaumaksi. Puiden kokosuhteiden (h/H_{dom}) kehittämisessä kahden ajankohdan välillä voidaan mallittamisen kannalta erottaa neljä komponenttia:

1. Puiden kokosuhteet tasoittuvat triviaalisti kaikkien puiden kasvaessa.
2. Puiden kasvurytmit ja kokonaiskasvut voivat olla pysyvästi erilaisia perinnöllisten tekijöiden tai metsikön sisäisen kasvupaikkavaihtelun takia.
3. Kasvun häiriöt kuten tuhot ja taimen joutuminen aluksi huonolle mikrokasvupaikalle aiheuttavat ohimeneviä kasvun vaihteluja taimien välille. Häiriön vaikutus poistuu taimen toipessa tuhosta, tai sen ulottuessa laajenevalla juuristollaan suotuisampaan maahan tai latvuksellaan pintakasvillisuuden yläpuolelle.
4. Voimakas puiden välinen kilpailu voi vaikuttaa ainakin alimpien latvuskerrosten puiden pituuskasvuun.

Puiden suhteellisen koon ero pieniä systemaattisesti kasvujakson aikana tutkimusaineistossa (kuva 3), mikä johtui sekä triviaalista komponentista (1) että aiemmin hitaammin kasvaneiden puiden kasvun nopeutumisesta (komponentit 2 ja 3). Puiden keskinäinen pituusjärjestys vaihteli kasvujaksosta toiseen, sitä enemmän mitä pienempi puuston valtapituus oli. Kilpailulla ei ilmeisesti ollut vielä ollut merkittävää vaikutusta puiden pituuskasvuun, eivätkä kokeiltujen, metsikkö- ja taimien lähiympäristökohtaisesti kilpailua kuvanneiden selittävien muuttujien kertoimet poikenneet merkitsevästi nolasta.

Puukohtainen pituuskasvumalli oli muotoa:

$$i_h = IH_{dom} (h / H_{dom})^{[a_1 H_{dom} + a_2 (h / H_{dom})^{a_3}]} + \varepsilon \quad (11)$$

jossa

h = puun pituus, m

i_h = puun pituuskasvu 5 vuoden jakson aikana, m

H_{dom} = valtapituus, m

IH_{dom} = valtapituuden lisäys 5 vuoden jakson aikana, m

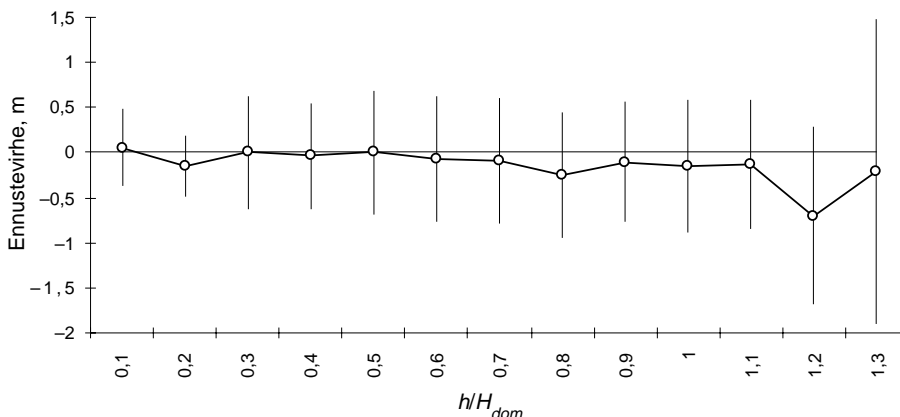
$a_1..a_3$ = parametreja

ε = virhetermi

Mallin parametrit estimoitettiin koepuuaineistosta (taulukko 7) tavallisella pienimmän neliösumman menetelmällä SAS-ohjelmiston NLIN-proseduurin DUD-metodilla (SAS Institute Inc. 1989):

Parametri	Estimaatti	Keskihajonta
$a_1 =$	-0,1040	0,0059
$a_2 =$	0,7740	0,0299
$a_3 =$	-0,2601	0,0249

Pituuskasvumalli antoi laadinta-aineistossaan harhattomia tuloksia ($b = -0,00286$, $b_s = -0,0181$ %). Residuaalitarkastelussa ei havaittu systemaattisia virheitä selittävien muuttujien arvojen suhteen. Valtapituusmallin ja yksittäisen puun pituuskasvumallin yhdistelmä antoi keskimäärin lähes harhattomia tuloksia laadinta-aineistossa ($b = -0,0622$ m, $b_s = -1,48$ %, $RMSE = 66,83$, $RMSE_r = 0,549$). Malli oli kuitenkin harhainen puuston suhteellisen koon suhteen (kuva 4). Suuri poikkeama kokoluokassa $h/H_{dom} = 1,2$ johtui satunnaisvirheestä. Metsikön valtapituuden lisäys kasvujakson aikana oli aineistossa systemaattisesti suurempi kuin jakson alun valtapuiden keskimääräinen pituuskasvu. Osa



Kuva 4. Metsikön valtapituusmallin (10) ja puun pituuskasvumallin (11) yhdistelmän ennustevirheet laadinta-aineistossa puun suhteellisen koon mukaan (keskiarvo \pm keskihajonta).

Taulukko 7. Puun pituuskasvumallin ja puun pohjapinta-alan kasvumallin laadinta-aineistot.

Muuttuja	Keskiarvo	Keskihajonta	Minimi	Maksimi
Puun pituuskasvu (N = 1896)				
h	2,06	1,64	0,10	8,53
i_h	1,49	0,90	0,01	4,26
H_{dom}	3,50	2,22	0,37	7,85
h/H_{dom}	0,60	0,24	0,05	2,96
IH_{dom}	2,06	0,78	0,92	3,75
Puun pohjapinta-alan kasvu (N = 1105)				
d	3,64	2,39	0,01	14,40
i_g	22,84	18,34	0,94	111,79
H_{25}	7,79	1,93	3,81	14,37
G	3,59	2,19	0	6,92

h	= puun pituus, m
i_h	= puun pituuskasvu tulevalla 5-vuotisjaksolla, $m(5v)^{-1}$
H_{dom}	= metsikön valtapituus, m
IH_{dom}	= metsikön valtapituuden kasvu tulevalla 5-vuotisjaksolla, $m(5v)^{-1}$
d	= puun läpimitta rinnankorkeudella, cm
i_g	= puun poikkileikkauksen pinta-alan kasvu rinnankorkeudella tulevalla 5-vuotisjaksolla, $cm^2(5v)^{-1}$
G	= metsikön pohjapinta-ala, $m^2 ha^{-1}$
H_{25}	= metsikön valtapituusboniteetti, m

kunkin metsikön valtapuista menetti asemansa valtapuiden joukossa ja korvautui aiemmin hitaammin kasvaneilla puilla.

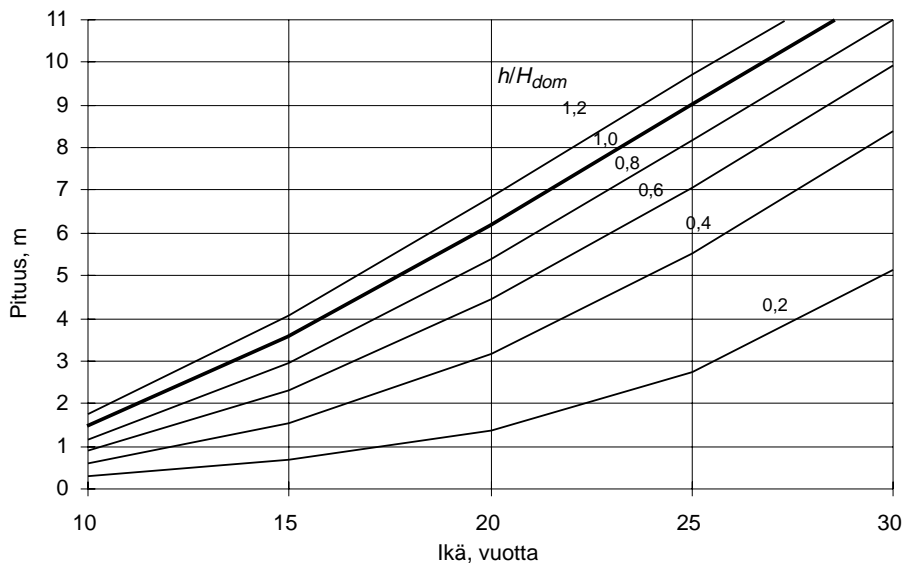
Mallin periaatteesta, jonka mukaan valtapuiden kasvu on yhtä suuri kuin valtapituuden kasvu, ei luovuttu, sillä harha oli vähäinen. Harhan vaikutusta valtapuujoukon kasvun estimaatteihin tutkittiin

herkkyysanalyysin tapaan kappaleessa 4 esitettyjen simulointien yhteydessä. Mallilla simuloitiin valtapituusboniteetiltaan MT:tä ja OMT:tä edustavien, puuston pituusjakaumamallilla laadittujen puujoukkojen kasvua 15–30 ikävuoden välillä 5 vuoden jaksoissa. Malleilla 10 ja 11 laskettua valtapuujoukon keskimääräistä pituuskasvua verrattiin valtapituusmallilla 10 laskettuun valtapituuden lisäykseen. Pituuskasvumallin harhaisuudesta aiheutunut valtapuiden kasvun virhe (b_s) oli kaikkien kuuden kasvujakson keskiarvona ainoastaan 0,004 %. Pituuskasvumallin toimintaa on havainnollistettu kuvassa 5, jossa on esitetty jakson alussa eri kokoisten puiden kehitys neljän 5 vuoden pituisen jakson ajalle.

3.2.3 Puun paksuuskasvu

Puun paksuuskasvua (i_g) selitettiin mallissa puun koolla (d), kasvupaikalla (H_{25}) ja metsikön pohjapinta-alalla (G). Havaintojen metsiköittäisen keskinäisen korrelaation vaikutuksen poistamiseksi käytettiin sekamallimenetelmää (Searle 1971, Lappi 1986, Henttonen 1990).

Läpimitan kasvun vuotuinen vaihtelu otettiin huomioon kasvujaksoa edustaneen kiinteän luokkamuuttujan avulla (Henttonen 1990). Mallin edustama kasvun taso vastasi aineiston keskimääräistä tasoa, kun kasvujakson luokkamuuttujien havain-



Kuva 5. Eri kokoisten puiden (h/H_{dom}) pituuskehitys valtapituus- ja pituuskasvumallin yhdistelmän mukaan neljän 5 vuoden kasvujakson aikana. $H_{25} = 9$ m, h/H_{dom} laskennan alussa 0,2–1,2 m.

tojen lukumäärällä painotettu vaikutus lisättiin mallin vakiotermiin. Tiihosen (1979, 1983, 1984, 1985, 1986) indeksien sekä Timosen ja Ruotsalaisen (1994) indeksien mukaan tutkimusaineiston keskimääräinen sädekasvuindeksi oli Etelä-Suomessa 99,8 % ja Pohjois-Suomessa 99,4 %.

Puun pohjapinta-alan kasvumalli oli siten muotoa:

$$\ln(i_{gijk}) = b_k + b_1 d_{ijk} + b_2 d_{ijk}^2 + b_3 \ln(H_{25j}) + b_4 G_{jk} + \beta_{jk} + \varepsilon_{ijk} \quad (12)$$

missä

i_{gijk} = puun i pohjapinta-alan kasvu metsikössä j jaksolla k , $\text{cm}(5\text{v})^{-1}$

b_k = jaksos k kiinteä vakiotermi

d_{ijk} = puun i läpimitta metsikössä j jaksos k alussa, cm

H_{25j} = metsikön j pituusboniteetti

G_{jk} = metsikön j pohjapinta-ala jaksos k alussa, $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$

$b_1 - b_4$ = kiinteitä parametreja

β_{jk} = metsikön j satunnaisvaikutus jaksos k

ε_{ijk} = puun i satunnaisvaikutus metsikössä j jaksos k

Mallin parametrit estimoitii koepuuaineistosta (taulukot 7 ja 8) Maximum Likelihood -menetelmällä SAS-ohjelmiston MIXED-proseduurilla (SAS In-

Taulukko 8. Puun pohjapinta-alan kasvumallin parametrit. Selitettävä muuttuja: $\ln(i_g)$

a. Kiinteä osa

Muuttuja	Kerroin	Keskivirhe	t-arvo
vakio	-0,06377	0,4606	-0,41
d	0,5068	0,01638	30,93
d_2	-0,02052	0,00152	-13,47
$\ln(H_{25})$	0,9810	0,2102	4,67
G	-0,1404	0,04587	-3,06

Merkinnät ks. taulukko 7.

b. Satunnainen osa

Parametri	Estimaatti
σ_b^2	0,1307
σ_e^2	0,1254

σ_b^2 = satunnaisparametris β_{jk} varianssi
 σ_e^2 = satunnaisparametris ε_{ij} varianssi

stitute Inc. 1996). Malli antoi laadinta-aineistossa harhattomia tuloksia, eikä residuaalitarkastelussa havaittu systemaattisia virheitä selittävien muuttujien suhteen.

3.2.4 Puiden kuolleisuus

Puiden säännöllinen kuolleisuus, johon ei kuulu äkillinen, satunnaisuonteinen taimikon tai sen suuren osan täydellinen tuhoutuminen jonkun ulkopuolisen tekijän vaikutuksesta, voidaan jakaa mallittamisen näkökulmasta kolmeen eri vaiheeseen (Avila ja Burkhart 1992, Amateis ym. 1993):

1. Taimien kunto, viljelytyön laatu ja sää ovat keskeisiä tekijöitä ensimmäisenä vuonna viljelyn jälkeen.
2. Pintakasvillisuuden, vesakon ja ylispuiden kilpailu sekä satunnaisuonteiset tuhot ovat tärkeimpiä tekijöitä toisesta vuodesta latvuston sulkeutumiseen asti.
3. Latvuston sulkeutumisen jälkeen puiden välinen kilpailu on yleensä merkittävin kuolleisuuden aiheuttaja tai edesauttaja.

Tutkimusaineiston taimikoiden ensimmäisen vaiheen kuolleisuudesta ei ollut käytettävissä tietoja. Aineiston varttuneiden taimikoiden ($D_g > 8$ cm) vertailu Hynysen (1993) esittämään kuusikon itseharvenemisrajaan osoitti, että kilpailu ei vielä ollut vaikuttanut merkittävästi puiden kuolemistodennäköisyyteen.

Kuusen taimien 2. vaiheen kuolleisuuden ennustamiseksi laadittiin malli, jossa yksittäisen puun eloonjäämistodennäköisyyttä selitettiin puun pituudella ja metsikön valtapituudella. Malli oli muodoltaan logistinen regressio (Hamilton 1974, Hamilton ja Edwards 1976, Monserud 1976, Katila 1990):

$$E(p) = \frac{e^Z}{1 + e^Z} \quad (13)$$

jossa

$$Z = b_0 + b_1 h + b_2 H_{dom} + \varepsilon \quad (14)$$

$E(p)$ = puun eloonjäämisen todennäköisyys
5 vuoden pituisen jakson aikana

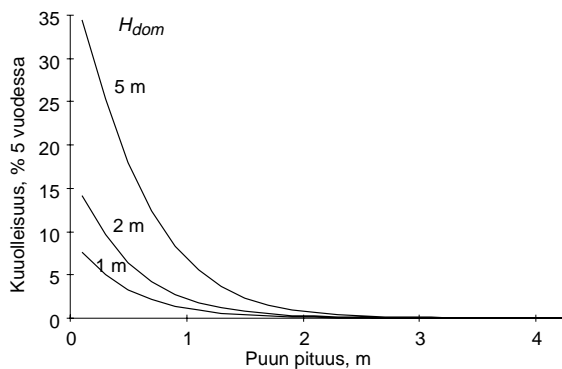
h = puun pituus, m

H_{dom} = metsikön valtapituus, m

b_0, b_1, b_2 = parametreja

ε = virhetermi

Mallin parametrit estimoitiin TINKA-aineistosta, jossa 3,5 % kuusen taimista oli kuollut 5 vuoden



Kuva 6. Puun kuolemistodennäköisyys tulevan 5-vuotijakson aikana kuolleisuusmallin mukaan. $H_{dom} = 1, 2$ ja 5 m.

pituisen jakson aikana. Estimointi tehtiin SAS-ohjelmiston LOGISTIC-ohjelmalla Maximum Likelihood -menetelmällä, jossa käytettiin kertymäfunktion logit-jakaumaoletusta (SAS Institute Inc. 1989). Mallin 14 parametrit:

Parametri	Estimaatti	Keskiahjonta
b_0	2,356	0,234
b_1	2,194	0,340
b_2	-0,386	0,0675

Puun kuolemistodennäköisyys on siten

$$E(1-p) = \frac{1}{1 + e^Z} \quad (15)$$

Mallin mukaan pienten puiden kuolemistodennäköisyys on sitä suurempi mitä pienempi puu on (kuva 6). Tietyn kokoisien puun kuoleminen todennäköisyys on sitä suurempi mitä suurempi on valtapituus. Metsikkötasolla valtapituuden lisäys johtaa kuolleisuuden vähenemiseen, kun pienten puiden määrä samalla pienenee. Pituusjakaumamallilla generoidun 2 000 kappaleen puujoukon kuolleisuus oli 20 simuloinnin keskiarvona 4,5 % valtapituudella 1 m. Kun puustoa kasvatettiin malleilla edelleen ($H_{25} = 9,2$), kuolleisuus oli 2,5 % 5 metrin valtapituudella ja 2 % 10 metrin valtapituudella.

Taulukko 9. Metsikön valtapituuden kehitysmallin testin tulokset. Selitettävä muuttuja IH_{dom} .

Testitunnus	Arvo
\hat{y}_k	2,69 m
b	-0,355 m
b_s	-10,8 %
$RMSE$	70,0
$RMSE_r$	25,5 %

\hat{y}_k = ennustettujen arvojen keskiarvo
 n = havaintojen lukumäärä
 b = ennusteen harha
 b_s = ennusteen suhteellinen harha
 $RMSE$ = keskineliöpoikkeaman neliöjuuri
 $RMSE_r$ = suhteellinen $RMSE$

Tilastollisten tunnusten kaavat ks. kohta Merkinnät.

Taulukko 10. Puun pituuden ja pohjapinta-alan kasvumallien testin tulokset.

Testitunnus	Puun pituus- kasvu i_h	Puun pohjapinta- alan kasvu i_g
\hat{y}_k	2,56 m	30,14 cm ²
b	-0,25 m	2,61 cm ²
b_s	-8,3 %	14,8 %
$RMSE$	0,81	13,19
$RMSE_r$	32,7 %	45,7 %

\hat{y}_k = ennustettujen arvojen keskiarvo
 n = havaintojen lukumäärä
 b = ennusteen harha
 b_s = ennusteen suhteellinen harha
 $RMSE$ = keskineliöpoikkeaman neliöjuuri
 $RMSE_r$ = suhteellinen $RMSE$

Tilastollisten tunnusten kaavat ks. kohta Merkinnät.

4 Mallien käyttö simuloinneissa

4.1 Simuloinnin kulku

Metsiköiden kehitystä simuloitiin mallien toiminnan demonstroimiseksi ja tulosten vertaamiseksi muihin tutkimustuloksiin. Puuston pituusjakaumamalleilla (5–7) ja läpimittamallilla (8) muodostettiin lähtötilanteen puujoukko. Puujoukon puiden kuolleisuus ja kasvu laskettiin peräkkäisinä 5 vuoden pituisina jaksoina kasvu- ja kuolleisuusmalleilla (10–12, 15). Edellisen jakson lopputilanteen puuja metsikkötunnuksia käytettiin seuraavan jakson lähtöarvoina ja mallien selittävien muuttujien laskentaperusteina. Kuolleisuusmallilla estimoitiin jakson alussa kaikkien puiden kuolleisuus. Tasa-jakaumasta poimittiin satunnaisluku (0,1). Jos se oli kuolleisuusmallin mukaista kuolemistodennäköisyyttä suurempi, puu poistettiin puujoukosta. Kun kaikkien puiden eloonjäanti tai kuoleminen oli ratkaistu, metsikkötunnuksia laskettiin uudelleen, eloon jääneiden puiden kasvu laskettiin kasvumalleilla, ja kasvu lisättiin puiden pituuteen ja läpimittaan.

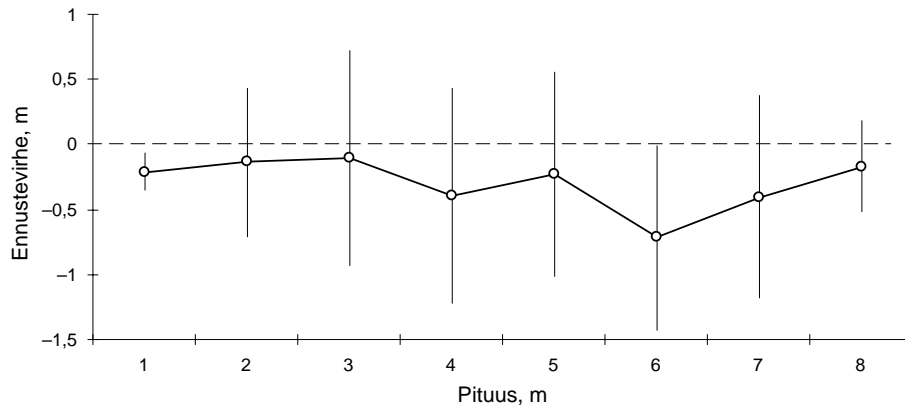
Lähtöpuusto muodostettiin kaikissa laskelmissa 10 vuoden iällä. Runkoluvuksi valittiin 1 900 kpl ha⁻¹, mikä vastasi simulointijaksojen keskiarvoina tutkimusaineiston kuusten runkolukua kun kuolleisuus otettiin huomioon. Puuston keskipituus 10 vuoden iällä valittiin siten, että valtapituuskehitys vas-

tasi 25 vuoden iässä valittua boniteettiarvoa. Metsätyyppien vastinboniteetteina käytettiin aineiston keskiarvoja (MT H_{25} = 8,35 m ja OMT H_{25} = 9,70 m). Puiden kokonaistilavuudet (rungen tilavuus maanpinnasta latvan huippuun) laskettiin Laasasenahon (1982) kahden tunnuksen polynomirunkokäyrillä. Pienten puiden tilavuudet laskettiin Ihalaisen laatimilla yhtälöillä (Snellman 1986).

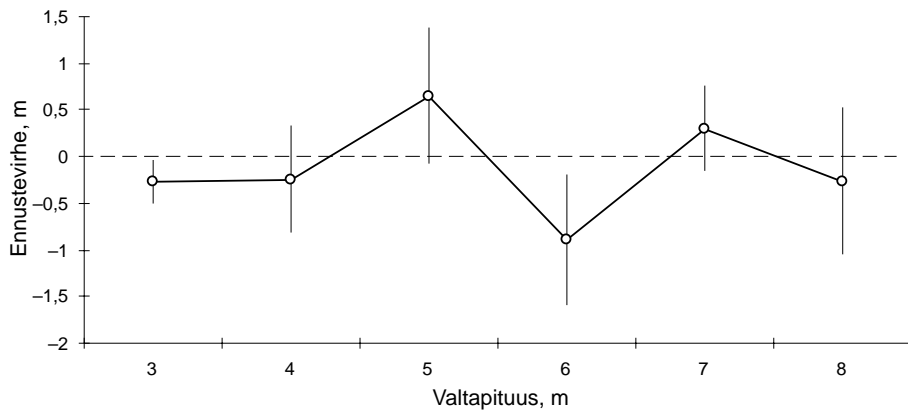
4.2 Mallien testaus riippumattomalla aineistolla

Puun kasvumallit (10–12) testattiin vertaamalla malleilla laskettuja kasvuja testiaineiston kasvuhavaintoihin (keskiarvo ja hajonta) sekä tutkimalla ennustevirheitä selittävien muuttujien suhteen residuaalikulvien perusteella. Testiaineisto oli liian pieni kuolleisuusmallin (15) testaamista varten. Testiaineisto ei soveltunut puiden kokojakaumamallien (5–8) testaamiseen, koska alle 1,3 m pituisia puita ei ollut mitattu. TINKA-aineistosta laaditut mallit testattiin KERTA-aineistolla.

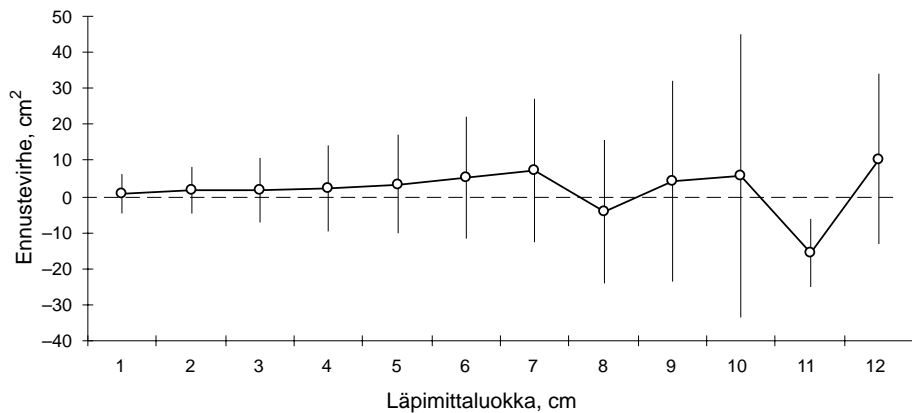
Kuusen valtapituuden kehitysmalli yliarvioi valtapituuden muutosta keskimäärin 10,8 % testiaineiston 11 metsikössä (taulukko 9). Kuusen pituuskasvumalli yliarvioi testiaineistossa pituuskasvua keskimäärin 7,4 %. Pohjapinta-alan kasvumalli aliarvioi testiaineistossa kasvua keskimäärin 14,3 % (taulukko 10). Osa aliarviosta aiheutui siitä, että



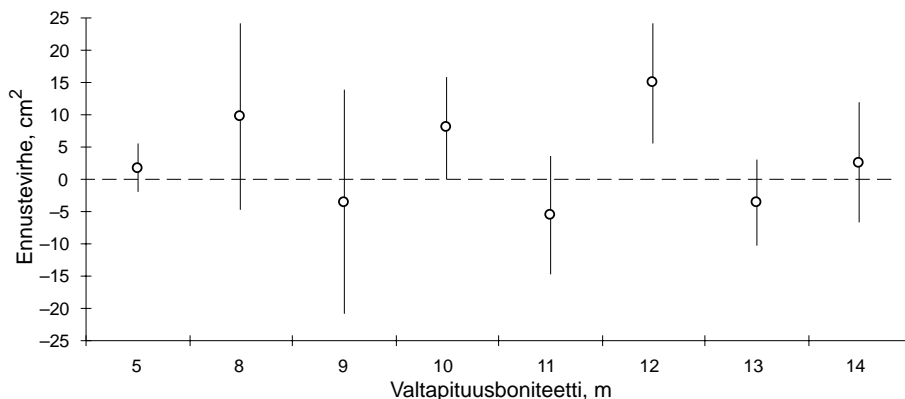
Kuva 7. Valtapituus- ja pituuskasvumallin yhdistelmän ennustevirheet 5 vuoden kasvujaksolla testiaineistossa puun pituusluokittain (keskiarvo \pm keskihajonta).



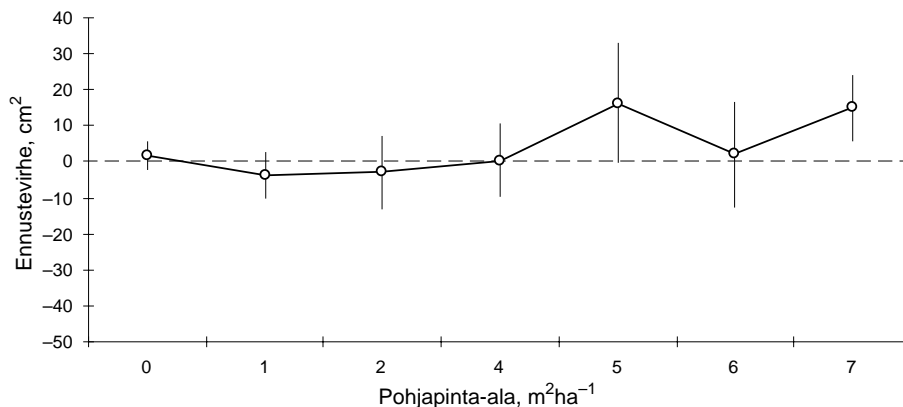
Kuva 8. Valtapituus- ja pituuskasvumallin yhdistelmän ennustevirheet 5 vuoden kasvujaksolla testiaineistossa metsikön valtapituusluokittain (keskiarvo \pm keskihajonta).



Kuva 9. Puun pohjapinta-alan kasvumallin ennustevirheet testiaineistossa 5 vuoden kasvujaksolla puun läpimittaluokittain (keskiarvo \pm keskihajonta).



Kuva 10. Puun pohjapinta-alan kasvumallin ennustevirheet testiaineistossa 5 vuoden kasvujaksolla metsikön pituusboniteettiluokittain (H_{25}) (keskiarvo \pm keskihajonta).



Kuva 11. Puun pohjapinta-alan kasvumallin ennustevirheet testiaineistossa 5 vuoden kasvujaksolla metsikön pohjapinta-alaluokittain (keskiarvo \pm keskihajonta).

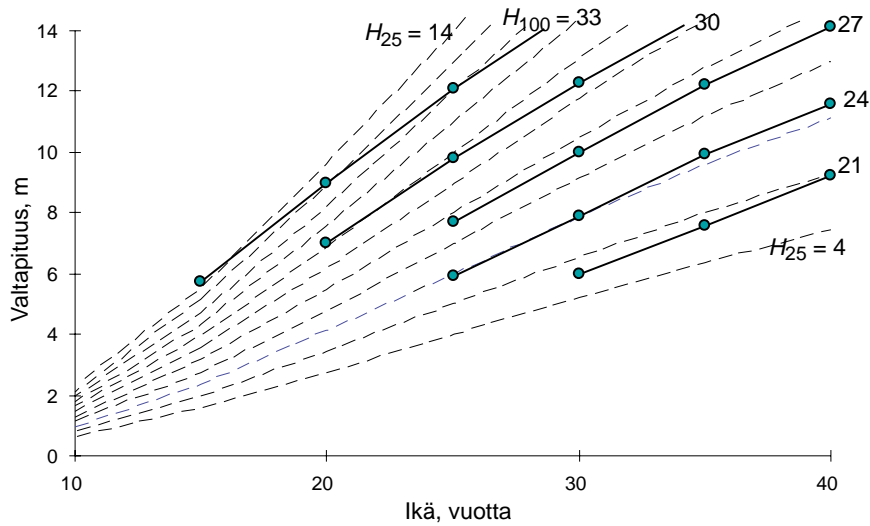
testiaineiston kasvun taso oli 1,066 ja laadinta-aineiston 0,996-kertainen 1900-luvun jälkipuoliskon keskimääräiseen tasoon nähden (Tiihonen 1979, 1983, 1984, 1985, 1986, Timonen ja Ruotsalainen 1994). Mallien residuaalien tarkastelussa ei havaittu systemaattisia virheitä mallien selittävien muuttujien arvojen suhteen (kuvat 7–11).

4.3 Mallin antamien tulosten vertailu muihin malleihin

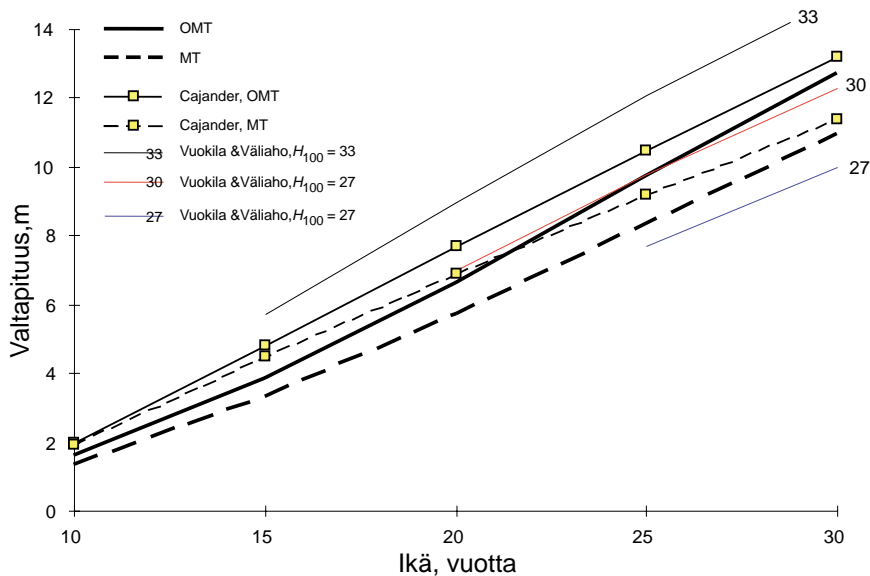
Mallin 10 mukaista valtapituuskehitystä verrattiin Vuokilan ja Väliahon (1980) mallin mukaiseen vil-

jelykuusikon valtapituuskehitykseen. Käyriä voi verrata suoraan ainoastaan niiden yhteisellä sovel-lutusalueella ($10 \text{ m} < H_{dom} < 11 \text{ m}$). Tässä vertailussa käytettiin kuitenkin kumpaakin mallia 3–5 m sallitun alueen ulkopuolella. Mallin 10 mukainen valta-pituuskehitys noudatti parhaiten Vuokilan ja Väli-ahon (1980) mallin muotoa alueella $5 \text{ m} < H_{25} < 10 \text{ m}$ ja $h < 11 \text{ m}$ (kuva 12). Suuremmilla H_{25} :n arvoilla vastaavuus oli huono etenkin yli 11 m:n pituudella.

Mallin 10 mukainen valtapituuskehitys kulminoituu n. 23 vuoden iässä eli 3–10 metrin valtapituudella kun $4 \text{ m} < H_{25} < 12 \text{ m}$. Vuokilan ja Väliahon (1980) mallilla laskettu kulminaatio ajoittuu n. 18–25 vuoden iälle eli 4,2–8,5 m valtapituudelle ja on yleensä



Kuva 12. Mallin 10 mukaisen valtapiisuuskehityksen vertailu Vuokilan ja Väliahon (1980) valtapiisuusmallin mukaiseen kehitykseen. Malli 10: $H_{25} = 4-14$ m, katkoviivat. Vuokila ja Väliaho: $H_{100} = 21-33$ m, yhtenäiset viivat ja ympyrät.

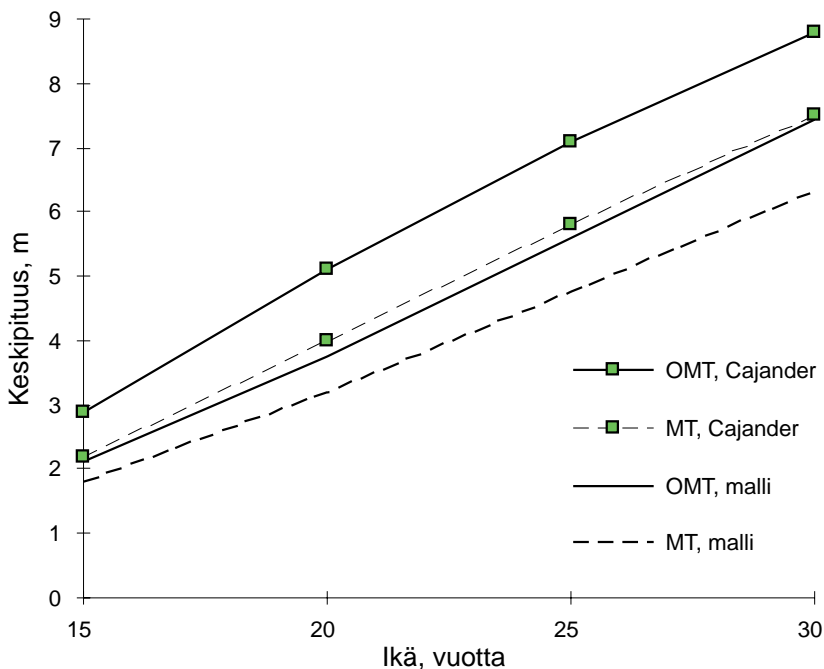


Kuva 13. Mallin 10 mukaisen valtapiisuuskehityksen vertailu Cajanderin (1934) esittämiin metsätyypittäisiin sekä Vuokilan ja Väliahon (1980) esittämiin pituusboniteettiluokittaisiin valtapiisuuskehityksiin.

aikaisempi kuin mallin 10 mukainen aivan pieniä boniteetteja ($H_{25} \leq 5$ m) lukuun ottamatta.

Mallin 10 mukaista valtapiisuuskehitystä verrattiin Cajanderin (1934) esittämään viljelykuusikoi-

den metsätyypittäiseen valtapiisuuskehitykseen Etelä-Suomessa. Käyrien muoto poikkesi vain vähän toisistaan (kuva 13). Mallin mukainen valtapiisuus oli samalla metsätyypillä aina pienempi kuin Ca-



Kuva 14. Puuston keskipituuden kehitys simuloinneissa verrattuna Cajanderin (1934) taulukoiden mukaiseen keskipituuden kehitykseen metsätyypeittäin. Laskelmien yksityiskohdat tekstissä.

janderin taulukoissa. Ero oli suurimmillaan 1,2 m (MT:llä kun $3 \text{ m} < H_{dom} < 4 \text{ m}$).

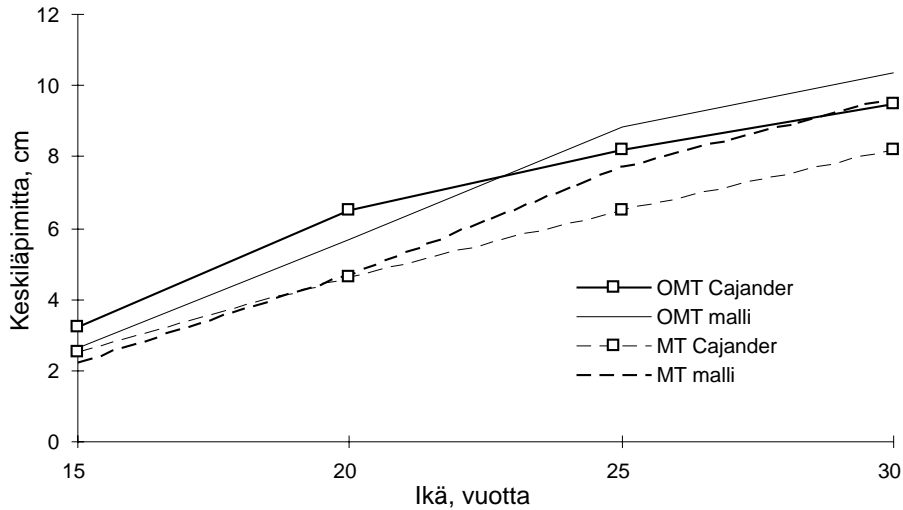
Simuloitua metsiköittäistä keskipituuden, runkoluvun, pohjapinta-alan ja tilavuuden kehitystä iällä 15–30 vuotta verrattiin Cajanderin (1934) sekä Vuokilan ja Väliahon (1980) esittämiin vastaaviin tunnuksiin. Malleilla simuloitu keskipituus oli pienempi kuin Cajanderin (1934) taulukoissa etenkin vanhemmissa taimikoissa (kuva 14). Tämä johtui taimikoiden rakenteen ja käytettyjen keskipituuskäsitteiden erosta. Cajanderin tutkimusaineistossa ei ollut mitattu rinnankorkeutta pienempiä puita. Keskipituus oli tasoitettu subjektiivisesti ”antaen enemmän painoa hoidetuille metsiköille” ja jättäen huonommin kasvaneet puut huomiotta. Mallilla simuloitaessa kaikki puut olivat mukana metsikkötunnuksissa.

Puuston aritmeettinen keskiläpimitta oli mallin mukaan 20–25 vuoden iästä lähtien suurempi kuin Cajanderin (1934) taulukoiden mukainen keskiläpimitta selvästi tiheimmissä metsiköissä (kuva 15). Sama laskentatapojen ero koski keskiläpimit-

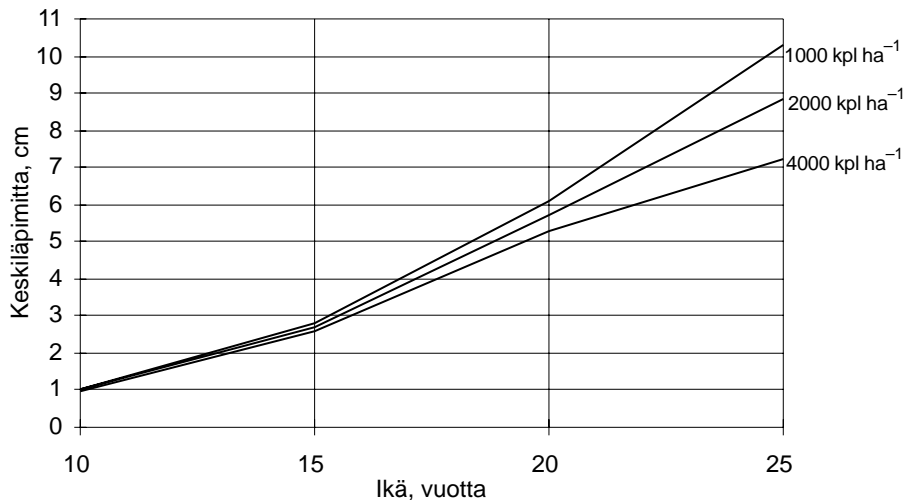
taa kuin keskipituuttakin.

Puuston simuloitu pohjapinta-ala ja tilavuus olivat aluksi selvästi pienempiä kuin Cajanderin (1934) esittämät (taulukko 11). Simuloitu pohjapinta-ala ja tilavuus olivat OMT:llä pienempiä kuin Vuokilan ja Väliahon (1980) boniteetin $H_{100} = 30$ kasvatusmallin mukainen tilavuus ja MT:llä hieman suurempia kuin boniteetin $H_{100} = 27$ mukaiset tunnuksat.

Vuokilan ja Väliahon kasvatusmalleissa runkoluku pysyy ensiharvennukseen asti viljelytiheyden mukaisena ($2\,200 \text{ kpl ha}^{-1}$). Cajanderin (1934) metsätyypeittäisissä kehityssarjoissa puuston luontainen täydentyminen ja kuolleisuus ovat mukana, mutta niiden suuruudesta, vaihtelusta ja vaikutuksesta ei ole esitetty lukuja. Puuston tiheys vaikuttaa malleilla simuloitaessa keskiläpimittaan. Runkoluvulla $4\,000 \text{ kpl ha}^{-1}$ aritmeettisen keskiläpimitan kehitys oli 20 vuoden iästä lähtien huomattavasti hitaampi kuin pienemmällä runkoluvulla (kuva 16). Tiheyden lisääminen johti siten suhteellisesti pienempään pohjapinta-alan kasvun lisäykseen (kuva 17).



Kuva 15. Puuston aritmeettisen keskiläpimitan kehitys simuloinneissa verrattuna Cajanderin (1934) taulukoiden mukaiseen keskiläpimitan kehitykseen metsätyypeittäin. Laskelmien yksityiskohdat tekstissä.

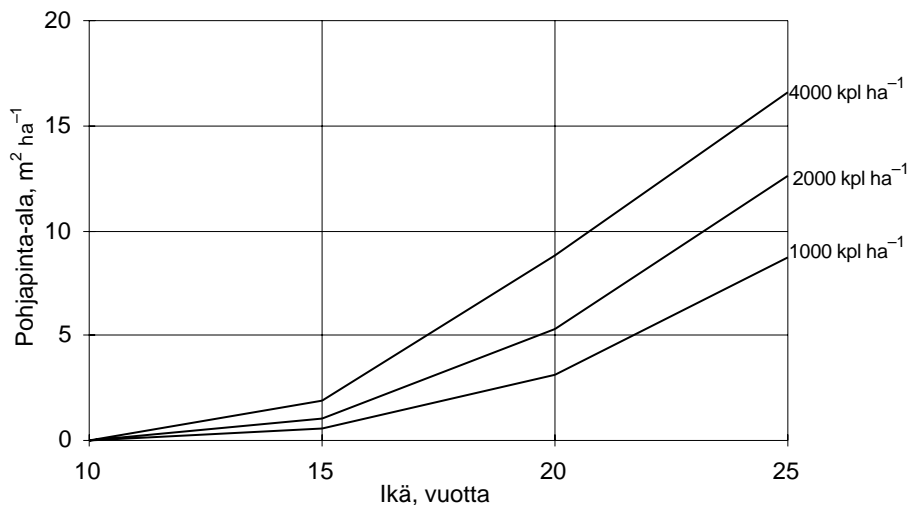


Kuva 16. Puuston aritmeettisen keskiläpimitan kehitys simuloinneissa runkolukuluokittain. OMT. Simuloinnin muut lähtötiedot kuten vertailussa Cajanderin (1934) kehityssarjoihin.

5 Tulosten tarkastelu

Tutkimuksen tarkoituksena oli laatia mallit puhtaiden, ilman sekapuuston tai tuhojen aiheuttamia häiriöitä kasvaneiden kuusen viljelytaimikoiden kehityksen kuvaamiseksi puukohtaisesti kangasmaiden kasvupaikoilla Suomessa.

Tutkimusaineisto muodostettiin yhdistämällä osin subjektiivisesti, osin monivaiheisella otannalla hankitut kerta- ja kestokoeaineistot. Koemetsiköt kattoivat maan etelä- ja keskiosat Pohjanmaan-Kainuun metsäkasvillisuusvyöhykkeen pohjoisosaan asti. Mallin käyttäminen maan pohjoisimmassa osassa voi johtaa harhaisiin tuloksiin, sillä sama pituusboniteetti tietyssä iässä ei välttämättä mer-



Kuva 17. Puuston pohjapinta-alan kehitys simuloinneissa runkolukuluokittain. OMT. Simuloinnin muut lähtötiedot kuten vertailussa Cajanderin (1934) kehityssarjoihin.

Taulukko 11. Malleilla simuloitujen puustotunnusten kehityksen vertailu Cajanderin (1934) sekä Vuokilan ja Väliahon (1980) esittämiin tunnuksiin. Laskelmien yksityiskohdat tekstissä (kpl 4).

Ikä	Malli		Cajander		Vuokila & Väliaho		
	Metsätyyppi	OMT	Metsätyyppi	OMT	H_{100}		
	MT	OMT	MT	OMT	24	27	30
Pohjapinta-ala, $m^2 ha^{-1}$							
15	0,7	1,1	2,5	6,0			
20	3,6	5,3	7,1	15,0			7,4
25	9,6	12,6	11,7	20,6	3,1	8,4	15,9
Tilavuus, $m^3 ha^{-1}$							
15	2	3	2	9			
20	11	18	17	49			26
25	35	51	47	96	10	31	70

kitse samanlaista kasvurytmiä ja puuntuotoskykyä maan eri osissa (Kilkki ja Ojansuu 1981).

Aineiston metsiköt edustivat puuston kasvun ja terveydentilan kannalta keskimääräistä nopeammin ja tasaisemmin kehittyneitä taimikoita. Sekä KERTA- että TINKA-aineistoon oli kelpuutettu ainoastaan hyvin onnistuneita, täystiheiksi luokiteltuja taimikoita. Tutkimusaineistoon kelpuutettiin ainoastaan voimakkaalta seka- tai ylispuuston kil-

pailulta säästyneitä taimikoita. Taimikot olivat hie- man tiheämpiä (keskimäärin $1\ 800\ kpl\ ha^{-1}$) kuin Räsänen ym. (1985) inventointitutkimuksen etelä-suomalaiset kuusen viljelytaimikot, joissa oli keskimäärin $1\ 500$ kuusta hehtaaria kohti 1–20 vuoden kuluttua viljelystä. Lapissa kuusen viljelytaimikoissa oli kuusia keskimäärin $1000\ kpl\ ha^{-1}$ 8–19 vuoden kuluttua viljelystä (Pohtila ja Valkonen 1985). KERTA-aineiston koealat sijoitettiin metsiköiden tasaisimpiin osiin, missä viljely oli onnistunut parhaiten (Varmola 1993). Aineiston taimikoita voitaneen luonnehtia käytännön metsätalouden tavoitetaimikoiksi.

Kummassakin osa-aineistossa valittiin kasvukoe- puiksi hyvin menestyneet, kasvatuskelpoiset puut. Tosiasiassa ne edustivat hyvin metsiköiden kaikkia kuusia, sillä 94 % kuusista luokiteltiin kasvatuskel- poisiksi. Niistä 94 % oli mittaushetkellä luokiteltu viljelykuusiksi.

Tutkimuksen lähestymistavaksi valittiin kasvun ja kuolleisuuden mallittaminen yksin puun. Nyt laadittuja malleja ja niitä täydentäviä, laadittavana olevia sekametsämalleja on tarkoitus käyttää tutkittaessa puuston ja sen osajoukkojen kehittymistä ja puiden välistä kilpailua tilajärjestykseltään ja kokajakaumaltaan vaihtelevissa sekataimikoissa. Täl- löin yksittäisten puiden mallit ovat metsikkömalle-

ja parempia, vaikka niillä ei yleensä päästäkään merkittävästi parempaan tarkkuuteen koko metsikön puuston tunnusten kuvaamisessa (Pukkala ja Kolström 1987, Daniels ja Burkhart 1988, Zeide 1993, Hasenauer 1994, Biging ja Dobbartin 1995).

Mikään Gustavsenin (1987) esittämistä kolmesta bonitointimenetelmästä ei soveltunut tämän tutkimuksen aineistoon. Vuokilan ja Väliahon (1980) viljelykuusikoiden valtapituussyhtälöä voidaan soveltaa vain yli 8 m valtapituudella. Vain yhdeksässä taimikossa oli kasvuhavaintoja siitä pituusvaiheesta, jossa tietyn pituusvaiheen kasvuun perustuva välipituusmenetelmää sovelletaan (Hägglund 1976, Varmola 1993). Metsätyypin alueellinen vastinboniteetti on liian karkea ja epäluotettava menetelmä mallittamista varten (Varmola 1993, 1996). Tässä tutkimuksessa kasvupaikan boniteetin kuvaajana käytetään laadittua valtapituusmallia. Taimikon valtapituus 25 vuoden referenssi-iässä on taimikon pituusboniteetti (H_{25}).

Valtapituusmallin mukaisille boniteeteille H_{25} ei ole suoria vastineita vallitsevassa H_{100} -bonitointimenetelmissä (Vuokila ja Väliaho 1980). Mallien käyttöalueet osuivat vain pieneltä osin päällekkäin, eikä Vuokilan ja Väliahon (1980) mallien realisuutta taimikoissa ole voitu varmistaa. Mitä H_{100} :n arvoa jokin mallin valtapituuskehityskäyrä edustaa riippuu iästä tai pituudesta jonka kohdalla vertailu tehdään. Valtapituusmallien vastaavuutta eri pituusvaiheessa voi arvioida kuvan 12 avulla.

Kasvupaikan puuntuotoskyky ja samalla pituusboniteetti vaihtelevat saman metsätyypin metsiköiden välillä, mikä johtuu paitsi kasvupaikkatekijöiden vaihtelusta myös metsätyypin määrittämisessä tapahtuvista virheistä (Ilvessalo 1920, Vuokila 1980). Tutkimusaineiston metsätyyppien ja pituusboniteettien (H_{25}) vastaavuuden (taulukko 12) luotettavuus jäi pienen aineiston takia epävarmaksi, mutta sen parantamiseen tarvittavaa laajempaa aineistoa ei ollut käytettävissä.

Metsätyypeittäin valtapituuskehitys oli hieman hitaampi kuin Cajanderin (1934) taulukoiden mukaan. Cajanderin tutkimat metsiköt sijaitsivat tämän tutkimuksen aineistoa eteläisemmällä alueella ja kasvoivat pääosin entisillä viljelymailla, vaikka ne olivatkin luokiteltu metsätyypeihin. Mallin mukainen valtapituuskehitys MT:llä vastasi sovellutusalueellaan likimäärin Vuokilan ja Väliahon mallin

Taulukko 12. Mallin laadinta-aineiston metsiköiden keskimääräiset valtapituusboniteetin (H_{25}) arvot kasvupaikkatyyppittäin ja metsäkasvillisuusvyöhykkeittäin.

Vyöhyke	Kasvupaikkatyyppi			
	Tuore kangas Keski- arvo	Keski- hajonta	Lehtomainen kangas Keski- arvo	Keski- hajonta
Etelä-Suomi	8,35	1,73	9,70	2,12
Pohjanmaa-Kainuu	6,15	1,76	7,25	1,76

arvoa $H_{100} = 28$, ja OMT:llä arvoa $H_{100} = 30$, sekä Pohjanmaan-Kainuun vyöhykkeen tuoreella kankaalla arvoa $H_{100} = 24$. Vuokilan ja Väliahon mukaan MT:n vastinboniteetti olisi kuitenkin $H_{100} = 24$ ja OMT:n $H_{100} = 27$, ja Pohjanmaa-Kainuun tuoreen kankaan $H_{100} = 21$. Cajanderin (1934) käyrien mukaan MT:n $H_{100} = 29,5$ ja OMT:n $H_{100} = 31,0$. Kun Vuokilan ja Väliahon malleilla laskettiin tutkimusaineiston varttuneimpien taimikoiden ($H_{dom} > 5$ m) H_{100} -arvo, saatiin keskimäärin noin 3 m suurempia arvoja kuin mitä vastinboniteeteiksi on ko. julkaisussa esitetty. Varmola (1993, 1996) havaitsi vastaavan yhtä suuren eron männyn taimikoissa. Vuokilan ja Väliahon (1980) esittämät metsätyypittaiset vastinboniteetit ovat ilmeisesti liian pieniä taimikoiden osalta sekä männyllä että kuusella.

Puiden pituusjärjestys vaihteli etenkin aineiston nuorimmissa taimikoissa kasvujaksosta toiseen. Varttuneemmissa metsissä puiden kokoerot yleensä säilyvät ja suurenevat voimakkaan kilpailun takia (Hynynen 1996). Männyn viljelytaimikoiden puiden pituusjärjestys vakiintuu n. 4,5 m keskipituudessa (Ruha ym. 1996) eli vasta lähellä tämän tutkimuksen mallien sovellutusalueen ylärajaa.

Puiden suhteelliset kokoerot tasoittuvat yksittäisen puun pituuskasvumallissa. Absoluuttiset kokoerot kuitenkin suurenevat tai pysyvät ennallaan mallin soveltamisalueella (vrt. Nyström ja Gemmel 1988). Puiden kokojärjestyksen ei sallita mallissa muuttuvan, jotta valtapuiden kasvu olisi yhtä suuri kuin valtapituuden kasvu. Tästä syystä malli yliarvioi valtapituutta suurempien puiden pituuskasvua mutta vain hyvin lievästi.

Tutkimusaineiston taimikot olivat kasvaneet pituutta hieman nopeammin kuin viljelytaimikot keskimäärin. Kasvatuskelpoisten kuusen viljelytaimi-

en keskipituus oli Räsänen ym. (1985) inventoimissa eteläisimmän Suomen kuusen viljelytaimikoissa 15 vuoden iässä MT:llä 1,5 m ja OMT:llä 2,0 m. Tässä tutkimuksessa laadittujen mallien mukaan keskipituus on MT:llä 1,8 m ja OMT:llä 2,1 m. Useissa suppeammissa inventointitutkimuksissa keskipituus on vaihdellut laajasti 1–2 m välillä (Karjula ym. 1982).

Puiden välisen kilpailun vaikutus niiden paksuuskasvuun oli tutkimusaineiston nuorissa metsiköissä vielä lievää. Aineiston suurimmatkaan runkoluvut eivät merkinneet voimakasta kilpailua, koska ne koostuivat pienistä lehtipuista. Puuston pohjapinta-ala oli kasvujakson alussa enimmillään 6,9 m² ha⁻¹. Mallia ei voi käyttää tätä tiheämmissä metsissä, joissa tulosten realistisuutta ei voitu varmistaa.

Pituusjakaumamallit laadittiin keinoksi yleistää tutkimusaineiston taimikoiden kokojakauma simuloitien lähtötilanteen muodostamiseksi. Ne eivät ole yleisiä kuusen viljelytaimikoiden rakenteen malleja. Ne tuottavat laadinta-aineiston keskimääräisiä ominaisuuksia vastaavia, muodoltaan varsin vähän vaihtelevia jakaumia. Harvennustamallia ei laadittu. Harvennusta voidaan kuvata poistamalla puujoukosta puita erikseen laadittavien sääntöjen mukaan (esim. Kahn 1995). Harvennus vaikuttaa mallissa jäljelle jääneiden puiden paksuuskasvuun pohjapinta-alan kautta ilman viivettä.

Puuston kuolleisuuden mallissa otettiin huomioon vain satunnaisuuskuoleminen (Avila ja Burkhart 1992, Amateis ym. 1993). Välittömästi viljelyä seuraavan parin vuoden kuolleisuus on arvioitava muista tietolähteistä ja otettava huomioon laskelmien lähtötilanteen runkoluvussa (esim. Karjula ym. 1982, Räsänen ym. 1985). Kuolleisuusmallien laadinta-aineisto edusti vain lyhyttä ajanjaksoa. Tämä pienentää kuolleisuusmallien yleistävyyttä, sillä ilmastollinen vaihtelu ja tuholaisien kannanvaihtelut voivat aiheuttaa suurta kuolleisuuden vaihtelua (Hasenauer 1994). Itseharvennustamallia (Hynynen 1993) ei tarvita tämän mallin yhteydessä, koska puiden välinen kilpailu oli vielä lievää.

6 Mallien käyttöalue

Laadittujen mallien muodostamalla kokonaisuudella voidaan ennustaa hyvin onnistuneiden, tasaikäisten, puhtaisten kuusen viljelytaimikoiden puuston kehitystä yksin puin. Mallia voidaan soveltaa joko mitatun koealan puustolle tai muodostamalla laskelmien lähtötilanteen puujoukko kokojakauma- ja läpimittamalleilla etukäteen valituista metsikkötunnuksista. Kasvu- ja kuolleisuusmallit ennustavat kehityksen 5 vuoden pituiselle jaksolle. Väliarvot voidaan laskea jollakin käyräviivaisella interpolointimenetelmällä. Lineaarista interpolointia ei pidä käyttää koska se johtaa harhaisiin väliarvojen ennusteisiin.

Malleja käytettäessä on yleensä pysyttävä kunkin selittävän ja selitettävän muuttujan laadinta-aineistossa havaitun vaihteluvälin sisällä. Lieviä poikkeamia sallitaan jos mallin on todettu toimivan realistisesti ko. vaihteluvälin ulkopuolella. Joidenkin tunnusten kohdalla on otettava huomioon kahden muuttujan yhteisvaihtelun rajoitukset. Tärkeimmät rajoitukset ja sallitut poikkeamat esitetään seuraavassa kunkin mallin kohdalla. Laadinta-aineisto rajoittaa mallin käyttöä sellaistenkin tekijöiden osalta, jotka eivät ole malleissa mukana. Nämä yleiset rajoitukset esitetään ensin.

Mallia voidaan soveltaa tuoreilla kankailla ja sitä paremmilla kivennäismaan kasvupaikoilla. Soistuneisuutta, kivisyttä tai muita kasvupaikan tuotoskykyä alentavia tekijöitä voi olla kohtuullisessa määrin, ja niiden vaikutus ilmenee ainoastaan alentuneena valtapituusboniteettina.

Mallia ei voida käyttää luotettavasti Perä-Pohjolan ja sitä pohjoisemmilla metsäkasvillisuusvyöhykkeillä. Mallin ennusteet ovat todennäköisesti varsin luotettavia vielä Perä-Pohjolan eteläosassakin, jos $4 \text{ m} \leq H_{25} \leq 8 \text{ m}$. Mallin luotettavuus rannikkoalueilla on epävarmaa.

Malli edustaa taimikoita, joissa kevyesti muokattuun (äestys, laikutus) tai muokkaamattomaan maahan on istutettu paljasjuuritaimia. Voimakkaamman maanmuokauksen ja laadultaan parantuneen taimimateriaalin vaikutusta ei voida kuvata. Ylispuuston, tiheän sekapuuston tai kuusen laadinta-aineistoon nähden liian suuren tiheyden aiheuttama voimakasta kilpailua ei saa esiintyä. Taimikon

tiheyden ja puiden maksimikoon suhde taimikon valta- ja keskipituuteen ei saa merkittävästi poiketa laadinta-aineistossa esiintyneestä vaihtelusta (taulukot 1 ja 3).

Kilpailun vaikutus yksittäisten puiden kasvuun on malleissa vähäinen, koska taimikot olivat harvahkoja ja tilajärjestykseltään tasaisia. Mallia voidaan käyttää vain sellaisille puille, jotka ovat kilpailuasemansa puolesta kasvatuskelpoisia. Tarkkoja kriteerejä on vaikea määrittellä, koska kasvatuskelpoisuuden käsite oli ollut tutkimusaineistossakin varsin epämääräinen.

Malleilla 5–7 voidaan muodostaa 0,3–4,7 m keskipituisten ($0,6 \text{ m} \leq H_{dom} \leq 8 \text{ m}$) puhtaisten taimikoiden pituusjakaumia edustamaan metsiköitä, joiden viljelytiheys vaihtelee välillä 2 000–3 000 kpl ha⁻¹ ja jotka ovat harventuneet tai täydentyneet luontaisesti tiheyteen 500–4 000 kpl ha⁻¹. Luonnontaimet sisältyvät pituusjakaumiin. Jakauma on katkaistava 3 % kohdalta ja jaettava jäljellä oleva todennäköisyysmassa pienempiin pituusluokkiin. Mallilla 8 lasketaan muodostetun puujoukon jokaiselle yli 1,3 m pitkälle puulle läpimitta. Puuston tiheys ei vaikuta mallissa puiden läpimittoihin, minkä takia puuston tiheyden ja valtapituuden suhde saa merkittävästi poiketa laadinta-aineistossa havaitusta.

Valtapituuden kehitysmallia (10) voidaan käyttää vain laadinta-aineiston valtapituuden vaihtelualueella, jossa $4 \text{ m} \leq H_{25} \leq 14 \text{ m}$, kasvujakson alun $0,4 \text{ m} \leq H_{dom} \leq 8,0 \text{ m}$ ja $T \leq 31$, sekä kasvujakson lopun $H_{dom} \leq 11,0 \text{ m}$. Mallilla 10 lasketaan myös metsikön valtapituusboniteetti asettamalla $T_2 = 25$ vuotta. Jos mallia käytetään puuston kehityksen vertailemiseen tietyllä kasvupaikkatyypillä ja metsäkasvillisuusvyöhykkeellä, simuloinnin lähtöarvot (N , H , ja T) valitaan siten että kokojakauma- ja pituuskehitysmallien yhdistelmällä laskettu valtapituuskehitys vastaa taulukon 12 mukaista H_{25} -arvoa.

Kasvatuskelvottomien, hyvin pienten ($h/H_{dom} \leq 0,05$ tai $h \leq 0,1 \text{ m}$) tai suurten ($h/H_{dom} \geq 1,4$ tai $h \geq 9 \text{ m}$) puiden kasvu ei voi ennustaa yksittäisen puun pituuskasvumallilla (11) luotettavasti, joskin malli antaa niillekin järkeviä tuloksia. Ylispuustoa tai mallin laadinta-aineiston rajat ylittävää tiheyttä, joka on voinut merkittävästi muuttaa eri kokoisten puiden kasvusuhteita, ei saa olla malleilla käsiteltävässä taimikossa laskentajakson aikana tai 5 vuoden jaksolla sitä ennen, koska toipumisreaktiolle ei ole mallia.

Mallilla 8 lasketaan kasvujakson aikana 1,3 m pituuden ylittävien puiden läpimitta kasvujakson lopussa. Paksuuskasvumallia (12) käytettäessä puun lähtötilanteen rinnankorkeusläpimitta voi olla laadinta-aineiston vaihteluvälin mukaan korkeintaan 14 cm, mutta mallin tulokset ovat mielekkäitä muutamia senttimetrejä tätä suuremmillekin puille. Pohjapinta-ala voi olla lähtötilanteessa korkeintaan 7 m² ha⁻¹. Tätä suuremmilla pohjapinta-aloilla malli aliarvioi kasvu. Kuolleisuusmallia voidaan käyttää muiden mallien käyttöalueella.

Kiitokset

Tutkimus on tehty Metsäntutkimuslaitoksen Vantaan tutkimuskeskuksessa osana tutkimushanketta ”Metsikön ja puiden varhaiskehityksen mallittaminen ja taimikonkäsittelyn puuntuotannolliset vaikutukset (3025)”.

MMK Hannu Salminen ja MMT Martti Varmola Rovaniemen tutkimusasemalta luovuttivat kerta-aineiston sekä TINKA- ja INKA-kestokoeaineistot tutkimuksen käyttöön. Jouni Hyvärinen esikäsitteli aineiston.

Varmola, MMT Jari Hynynen ja MMT Risto Ojansuu tukivat tekijää neuvoin työn eri vaiheissa, lukivat käsikirjoituksen ja tekivät siihen hyödyllisiä korjausehdotuksia. MML Hans Gustavsen, MMT Helena Henttonen, MMT Juha Lappi, MMK Jouni Siipilehto ja MMK Mauri Timonen opastivat erikoisalojensa kysymysten ratkaisussa. Marja-Liisa Herno tarkasti käsikirjoituksen kieliasun.

Esitän parhaat kiitokseni kaikille työn valmistumiseen myötävaikuttaneille.

7 Kirjallisuus

- Amateis, R., Liu, J. & Burkhart, H. 1993. Modeling survival in thinned and unthinned Loblolly pine plantations. Loblolly pine Growth and Yield Research Cooperative. Virginia Polytechnic Institute and State University, School of Forestry and Wildlife Resources. Report 75. 14 s. + liitteet.

- Avila, O. & Burkhart, H. 1992. Modeling survival of loblolly pine trees in thinned and unthinned plantations. *Canadian Journal of Forest Research* 22(12): 1878–1882.
- Bailey, R. & Dell, T. 1973. Quantifying diameter distribution with the Weibull function. *Forest Science* 19(2): 97–104.
- Biging, G. & Dobbertin, M. 1995. Evaluation of competition indices in individual tree growth models. *Forest Science* 41(2): 360–377.
- Cajander, A. 1909. Über Waldtypen. *Acta Forestalia Fennica* 1. 175 s.
- Cajander, E. 1934. Tutkimuksia Etelä-Suomen viljelykuusikoiden kehityksestä. Referat: Untersuchungen über die Entwicklung der Kulturfichtenbestände in Süd-Finnland. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 19(3). 101 s.
- Clutter, J., Fortson, J., Pienaar, L., Brister, G. & Bailey, R. 1983. *Timber management. A quantitative approach.* John Wiley & Sons, New York. 333 s.
- Daniels, R. & Burkhart, H. 1988. An integrated system of forest stand models. *Forest ecology and management* 23: 159–177.
- Dixon, W., Brown, M., Engelman, L. & Jennrich, R. (toim.) 1990. *BMDP Statistical Software Manual.* University of California Press, Berkeley. 738 s.
- Ek, A. & Monserud, R. 1974. Trials with program FOREST: Growth and reproduction simulation for mixed species even- or uneven-aged forest stands. *Julkaisussa: Fries, J. (toim.) Growth models for tree and stand simulation.* Royal College of Forestry, Research Notes 30: 56–73.
- Elfving, B. 1982. HUGIN's ungskogstaxering 1976–1979. Sveriges Lantbruksuniversitet, projekt Hugin. Rapport 27. 87 s.
- Fryk, J. 1984. Tillstånd och produktion i röjda ungsogar med låga stamantal. En studie utförd på AB Iggesunds bruks marker i Hälsingland. Summary: Wide spacing after cleaning of young forest stands – stand properties and yield. A study carried out at AB Iggesunds Bruk in central Sweden. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsproduktion. Rapport 13. 248 s. + liitteitä.
- Gadow, K. von. 1987. Untersuchungen zur Konstruktion von Wuchsmodellen für schnellwüchsige Plantagenbaumarten. *Forstliche Forschungsberichte München* 77. 147 s.
- Gustavsen, H. 1987. Kasvupaikan boniteetin määrittäminen. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 257: 80–107.
- , Roiko-Jokela, P. & Varmola, M. 1988. Kivennäismaiden talousmetsien pysyvät (INKA ja TINKA) kokeet. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 292. 212 s.
- Hamilton, D. 1974. Event probabilities estimated by regression. USDA Forest Service, Research Paper INT-152. 18 s.
- & Edwards, B. 1976. Modeling the probability of individual tree mortality. U. S. Department of Agriculture Forest Service. Research Paper INT-185. 22 s.
- Hasenauer, H. 1994. Ein Einzelbaumwachstumssimulator für ungleichaltrige Fichten-Kiefern- und Buchen-Fichten -Mischbestände. *Forstliche Schriftenreihe, Universität für Bodenkultur, Wien.* Band 8. 152 s.
- Henttonen, H. 1989. Pituus- ja ikämallit. *Julkaisematon käsikirjoitus.* Metsäntutkimuslaitos, Suonenjoen tutkimusasema. 14. s.
- 1990. Kuusen rinnankorkeusläpimitan kasvun vaihtelu Etelä-Suomessa. Summary: Variation in the diameter growth of Norway spruce in Southern Finland. *Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteen laitoksen julkaisuja* 25. 88 s.
- Hiltunen, J. 1981. Kuusitaimistojen kasvusta turvemaila. *Suometsätieteen laudaturtyö.* Helsingin yliopiston suometsätieteen laitos. 47 s.
- Hyink, D. & Moser, J. 1983. A generalized framework for projecting forest yield and stand structure using diameter distributions. *Forest Science* 29(1): 85–95.
- Hynynen, J. 1993. Self-thinning models for even-aged stands of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 8: 326–336.
- 1995a. Models for predicting the development of Finnish forests. IUFRO XX World Congress, 6–12 August 1995, Tampere, Finland. Abstracts of invited papers: 281–282.
- 1995b. Modelling tree growth for managed stands. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja – The Finnish Forest Research Institute. Research Papers* 576. Väitöskirja. 59 s. + osajulkaisut.
- 1996. Puuston kehityksen ennustaminen metsätalouden suunnittelulaskelmissa – katsaus MELA-järjestelmän uusiin kasvumalleihin. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 589: 59–67.
- Hägglund, B. 1976. Skattning av höjdboniteteten i unga tall- och granbestånd. Summary: Estimating site index in young stands of Scots pine and Norway spruce in Sweden. *Skogshögskolan, Institutionen för Skogsproduktion, Rapporter och Uppsatser* 39. 66 s.
- Hökkä, H., Piironen, M. & Penttilä, T. 1991. Läpimittajakauman ennustaminen Weibull-jakaumalla Pohjois-Suomen mänty- ja koivuvaltaisissa ojitusaluemetsäköissä. Summary: The estimation of basal area-dbh distribution using the Weibull-function for drained pine- and birch dominated and mixed peatland stands in north Finland. *Folia Forestalia* 781. 22 s.

- Ilvessalo, Y. 1920. Tutkimuksia metsätyyppien takso-
toorisesta merkityksestä, nojautuen etupäässä koti-
maiseen kasvutaulujen laatimistyöhön. Referat: Un-
tersuchungen über die taxatorische Bedeutung der
Waldtypen, hauptsächlich auf den Arbeiten für die
Aufstellung der neuen Ertragstabelfn Finnlands fus-
send. *Acta Forestalia Fennica* 15(3): 267 s.
- Kahn, M. 1995. Die Fuzzy Logik basierte Modellierung
von Durchforstungseingriffen. *Allgemeine Forst- und
Jagdzeitung* 166(9–10): 169–176.
- Kaila, S. 1994. Metsänviljelyn vertailulaskentasytee-
min rakenne ja laskentaperusteet. Oheismoniste met-
sätehon tiedotukseen 411. 65 s.
- Karjula, M., Kaila, S., Parviainen, J., Päivänen, J. &
Räsänen, P. 1982. Metsänviljelyn vaihtoehtojen va-
lintaperusteet kivennäismailla. Kirjallisuustarkastelu.
Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 56. 116 s.
- Katila, M. 1990. Luonnonpoistuman ennustaminen män-
nikössä kuolemistodennäköisyyden mallilla. *Metsän-
arvioimistieteen pro gradu -tutkielma*. Helsingin yli-
opiston metsänarvioimistieteen laitos. 55 s.
- Kellomäki, S. 1991. Metsäekologia. *Silva Carelica* 7.
391 s.
- Kilkki, P. & Ojansuu, R. 1981. Pituusbonitoinnin ongel-
mia. *Metsä ja puu* 1981(3): 26–28.
- & Päivinen, R. 1986. Weibull function in the estima-
tion of the basal area dbh-distribution. Seloste: Wei-
bull-funktio pohjapinta-alan läpimittajakauman esti-
moinnissa. *Silva Fennica* 20(2): 149–156.
- , Maltamo, M., Mykkänen, R. & Päivinen, R. 1989.
Use of the Weibull function in estimating the basal
area dbh-distribution. Tiivistelmä: Weibull-funktion
käyttö pohjapinta-alan läpimittajakauman estimoi-
nissa. *Silva Fennica* 23(4): 311–318.
- Knoebel, B. & Burkhart, H. 1991. A bivariate distributi-
on approach to modeling forest diameter distributions
at two points in time. *Biometrics* 47: 241–253.
- Koistinen, E. & Valkonen, S. 1993. Models for height
development of Norway spruce and Scots pine ad-
vance growth after release in southern Finland. Ti-
ivistelmä: Mallit kuusen ja männyn vapautettujen ali-
kasvostaimien pituuskehitykselle Etelä-Suomessa.
Silva Fennica 27(3): 179–194.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions
for pine, spruce and birch. *Communicationes Institutii
Forestalis Fenniae* 108. 74 s.
- Lappi, J. 1986. Mixed linear models for analyzing and
predicting stem form variation of Scots pine. *Com-
municationes Institutii Forestalis Fenniae* 134. 69 s.
- Lehto, J. 1978. Käytännön metsätyypit. Kirjayhtymä,
Helsinki. 98 s.
- Magnussen, S. 1986. Diameter distributions in *Picea*
abies described by the Weibull model. *Scandinavian
Journal of Forest Research* 1(4): 493–502.
- Metsätalous ja ympäristö. 1994. Metsätalouden ympä-
ristöohjelmatyöryhmän mietintö. Maa- ja metsätalous-
ministeriö, metsäpolitiikan osasto. Työryhmän mie-
tintö 1994(3). 100 s.
- Mielikäinen, K. 1985. Koivusekoituksen vaikutus kuu-
sikön rakenteeseen ja kehitykseen. Summary: Effect
of an admixture of birch on the structure and develop-
ment of Norway spruce stands. *Communicationes
Institutii Forestalis Fenniae* 133. 79 s.
- & Valkonen, S. 1995. Kaksijaksoisen kuusi-koivu -
sekametsikön kasvu. *Folia Forestalia* 1995(2): 81–
97.
- Monserud, R. 1976. Simulation of forest tree mortality.
Forest Science 22: 438–444.
- Mäkelä, H. & Salminen, H. 1991. Metsän tilaa ja muu-
toksia kuvaavia puu- ja puustotunnusmalleja. *Met-
säntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 398. 265 s.
- Nyström, K. & Gemmel, P. 1988. Models for predicting
height and diameter of individual trees in young *Picea*
abies (L.) Karst. stands. Teoksessa: Gemmel, P.
1987. Development of beeted seedlings in stands of
Picea abies (L.) Karts. in Southern Sweden. Swedish
University of Agricultural Sciences, Department of
Silviculture, Umeå. Väitöskirja. 98 s.
- & Kexi, M. 1996. Individual tree basal area growth
models for young stands of Norway spruce in Swe-
den. Teoksessa: Skovsgaard, J. P. & Johannsen, V. K.
(toim.). Modelling regeneration success and early
growth of forest stands. Proceedings from the IUFRO
Conference, Copenhagen, 10–13 June 1996. Danish
Forest and Landscape Research Institute. s. 231–245.
- Nyysönen, A. & Mielikäinen, K. 1978. Metsikön kas-
vun arviointi. Summary: Estimation of stand incre-
ment. *Acta Forestalia Fennica* 163. 40 s.
- Näslund, M. 1936. Skogsförsöksanstaltens gallringsfö-
sök i tallskog. Meddelenden från Statens Skogsfö-
söksanstalt 28(1).
- Ojansuu, R., Hynynen, J., Koivunen, J. & Luoma, P.
1991. Luonnonprosessit metsälaskelmassa (MELA)
– Metsä 2000 -versio. Metsäntutkimuslaitoksen tie-
donantoja 385. 59 s.
- Oliver, C. & Larson, B. 1990. Forest stand dynamics.
McGraw-Hill, New York. 467 s.
- Parviainen, J. & Seppänen, P. 1994. Metsien ekologinen
kestävyys ja metsänkasvatusvaihtoehdot. *Metsäntu-
kimuslaitoksen tiedonantoja* 511. 110 s.
- Pohtila, E. & Valkonen, S. 1985. Varttuneiden viljely-
taimikoiden tila Lapin piirimetsälautakunnan alueen
yksityismetsissä. Summary: Development and condi-
tion of artificially regenerated pine and spruce sap-

- ling stands in the privately owned forests of Finnish Lapland. *Folia Forestalia* 631. 19 s.
- Pukkala, T. & Kolström, T. 1987. Competition indices and the prediction of radial growth in Scots pine. *Silva Fennica* 21(19): 55–67.
- , Vettenranta, J., Kolström, T. & Miina, J. 1994. Productivity of mixed stands of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 9: 143–153.
- Ranta, E., Rita, H. & Kouki, J. 1989. *Biometria*. 2. korjattu painos. Helsinki. 569 s.
- Richards, F. 1959. A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany* 10(29): 290–300.
- Ruha, M., Hökkä, H., Varmola, M. & Salminen, H. 1996. Analyzing the stability of height positions in young naturally regenerated stands of Scots pine. *Julkaisussa: Skovsgaard, J. P. & Johannsen, V. K. (toim.) Modelling regeneration success and early growth of forest stands. Proceedings from the IUFRO Conference, Copenhagen, 10–13 June 1996. Danish Forest and Landscape Research Institute. s. 246–254.*
- Räsänen, P. K., Pohtila, E., Laitinen, E., Peltonen, A. & Rautiainen, O. 1985. Metsiemme uudistaminen kuuden eteläisimmän Piirimetsälautakunnan alueella. Vuosien 1978–1979 inventointitulokset. Summary: Forest regeneration in the six southernmost Forestry board districts of Finland. Results from the inventories 1978–79. *Folia Forestalia* 637. 30 s.
- Saksa, T. 1992. Männyn istutustaimikoiden kehitys muokatuilla uudistusaloilla. Abstract: Development of Scots pine plantations in prepared reforestation areas. Väitöskirja. 48 s. + liitteet.
- SAS Institute Inc. 1989. *SAS/STAT User's guide, Version 6, Fourth edition, Volume 2*. Cary, North Carolina. 846 s.
- 1996. *SAS/STAT Software: Changes and enhancements through release 6.11*. Cary, North Carolina. 1104 s.
- Searle, S. 1971. *Linear models*. New York. 532 s.
- Snellman, C. 1986. Muutoksia CRK-systeemiin 5.2.1986. Metsäntutkimuslaitos, Matemaattinen osasto. Moniste. 6 s.
- Tiihonen, P. 1979. Kasvun vaihtelu valtakunnan metsien 6. inventoinnin aineiston perusteella. Summary: Variation in tree growth in Finland based on the results of the 6th National Forest Inventory. *Folia Forestalia* 407. 12 s.
- 1983. Männyn ja kuusen kasvun vaihtelu Suomen eteläisimmässä osassa valtakunnan metsien 7. inventoinnin aineiston perusteella. Summary: Growth variation of pine and spruce in the southernmost part of Finland according to the 7th National Forest Inventory. *Folia Forestalia* 545. 8 s.
- 1984. Kasvun vaihtelu Pohjois-Karjalan ja Pohjois-Savon piirimetsälautakunnissa valtakunnan metsien 7. inventoinnin aineiston perusteella. Summary: Growth variation in the Forestry Board Districts of Pohjois-Karjala and Pohjois-Savo according to the 7th National Forest Inventory. *Folia Forestalia* 588. 8 s.
- 1985. Kasvun vaihtelu Keski-Suomen ja Etelä-Pohjanmaan piirimetsälautakunnissa valtakunnan metsien 7. inventoinnin aineiston perusteella. Summary: Growth variation in the Forestry Board Districts of Keski-Suomi and Etelä-Pohjanmaa according to the 7th National Forest Inventory. *Folia Forestalia* 615. 8 s.
- 1986. Kasvun vaihtelu Suomen pohjoispuoliskossa valtakunnan metsien 7. inventoinnin aineiston perusteella. Summary: Growth variation in North Finland according to the 7th National Forest Inventory. *Folia Forestalia* 658. 9 s.
- Timonen, M. & Ruotsalainen, K. 1994. (toim.) Lehtitikkeleitä kuusen kasvusta Etelä-Suomessa. Metsäntutkimuslaitos, Rovaniemen tutkimusasema, Metsänkasvatuksen tutkimusosasto. Kasvunvaihtelun tutkimushanke (3042). Artikkelikokoelma 2.
- Varmola, M. 1993. Viljelymänniköiden alkukehitystä kuvaava metsikkömalli. Summary: A stand model for early development of Scots pine cultures. *Folia Forestalia* 813. 43 s.
- 1996. Nuorten viljelymänniköiden tuotos ja laatu. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 585. Väitöskirja. 70 s. + osajulkaisut.
- Vuokila, Y. 1980. Metsänkasvatuksen perusteet ja menetelmät. WSOY, Porvoo. 256 s.
- 1983. Suomalaisen puuntuotostutkimuksen menneisyys ja tulevaisuus. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 89. 103 s.
- & Väliäho, H. 1980. Viljeltyjen havumetsiköiden kasvatusmallit. Summary: Growth and yield models for conifer cultures in Finland. *Communications Instituti Forestalis Fenniae* 99(2). 271 s.
- Zeide, B. 1993. Analysis of growth equations. *Forest Science* 39(3): 594–616.

79 viitettä