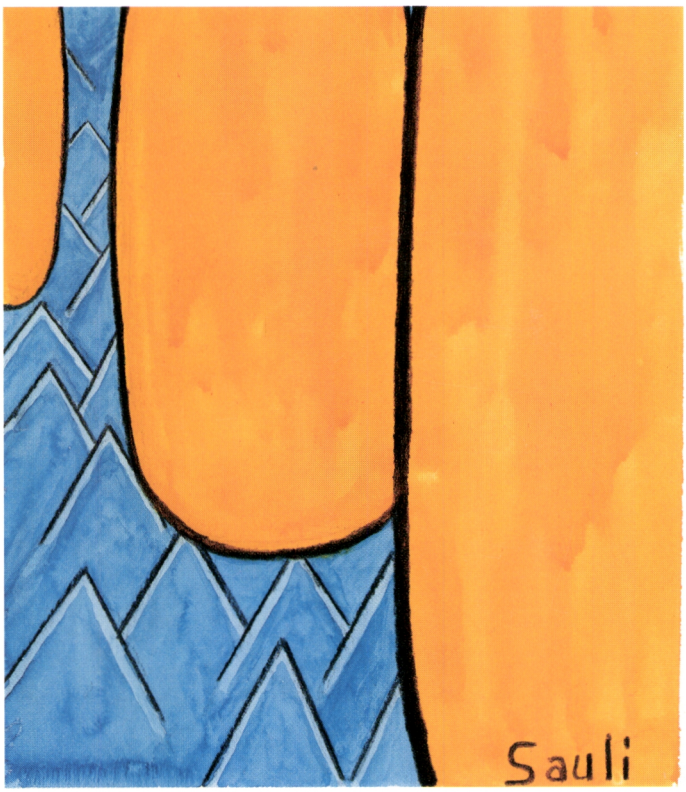
METSÄNTUTKIMUSLAITOKSEN TIEDONANTOJA 763, 2000

Kuusen taimikon kasvattamisen vaihtoehdot Etelä-Suomen kivennäismailla: Puhdas kuusen viljelytaimikko, vapautettu alikasvos ja kuusi-koivusekataimikko

Sauli Valkonen



VANTAAN TUTKIMUSKESKUS

METLA

METSÄNTUTKIMUSLAITOKSEN TIEDONANTOJA 763, 2000

METSÄNTUTKIMUSLAITOS
Jakelutuosasto

Kuusen taimikon kasvattamisen vaihto-ehdot Etelä-Suomen kivennäismailla: Puhdas kuusen viljelytaimikko, vapautettu alikasvos ja kuusi-koivusekataimikko.

Sauli Valkonen

Akateeminen väitöskirja
Esitetään Helsingin yliopiston maatalous-metsätieteellisen tiedekunnan luvalla julkisesti tarkastettavaksi Metsätalon luentosalissa MT II, Unioninkatu 40 B, perjantaina 7. huhtikuuta 2000, kello 12

VANTAAN TUTKIMUSKESKUS

Työn ohjaaja:	Professori Pasi Puttonen Helsingin yliopisto, Metsäekologian laitos
Esitarkastajat:	MMT Hannu Hökkä Metsäntutkimuslaitos, Rovaniemen tutkimusasema
	MMT Jari Miina Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta
Vastaväittäjä:	MMT Martti Varmola Metsäntutkimuslaitos, Rovaniemen tutkimusasema

Merjalle

Valkonen, S. 2000. Kuusen taimikon kasvattamisen vaihtoehdot Etelä-Suomen kivennäismailla: Puhdas kuusen viljelytaimikko, vapautettu alikasvos ja kuusi-koivusekataimikko. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 763. 83 s. + 4 osajulkaisua. ISBN 951-40-1721-8. ISSN 0358-4283.

Tutkimuksessa tarkastellaan voivatko vapautettu kuusialikasvos, kuusikon aukkojen täydentäminen luontaisilla koivuilla ja kaksijaksoinen sekametsä olla kilpailukykyisiä vaihtoehtoja puhtaan viljelykuusikon kasvattamiselle kivennäismaan viljavilla kasvupaikoilla Etelä-Suomessa.

Tutkimuksen lähestymistapa on puiden ja metsiköiden kehityksen mallittaminen ja vaihtoehtojen vertailu malleilla tehtävien laskelmien avulla. Vertailukriteerinä on taimikoiden puuntuotannollinen arvo, jonka osatekijöitä ovat taimikoiden tiheys, kokojakauma, puulajisuhteet, toimenpiteiden tarve ja kustannukset, puuntuotoskyky ja taloudellinen kannattavuus. Työ koostuu neljästä osajulkaisusta ja niiden yhdistelmästä.

Vanhan kuusikon alta vapautettujen hyväkuntoisten alikasvoskuusten pituuskasvu alkoi nopeutua noin 4–5 vuoden kuluttua vapauttamisesta. Niiden pituuskasvu ei vielä 10 vuoden kuluttuakaan ollut saavuttanut yhtä pitkien viljelykuusten pituuskasvua. Alikasvostaimien pitäisi olla vapauttamishetkellä vähintään 1,0–1,5 m pitkiä, jotta ne pärjäisivät pituuskehityksessä samaan aikaan viljeltyjen kuusen taimikoiden valtataimille. Alikasvostaimikoiden kokojakaumat olivat selvästi viljelytaimikoita leveämpiä ja vinompia.

Jos kuusen taimikon perkaus voidaan lykätä kymmenen vuoden ikään asti ja aukkoja täydentävät rauduskoivut valitaan kuusen valtapituutta vastaavien puiden joukosta, täydennyskoivun pituusetumatka säilyy riittävän pienenä yksijaksoisen sekametsikön muodostumiseksi. Kuusen kanssa samanikäiset siemensyntyiset hieskoivut eivät näytä uhkaavan pituuskehityksensä puolesta kuusen valta-asemaa. Tiheä, kookas koivikko voi kuitenkin hidastaa kuusen kasvua niin merkittävästi, että syntyy kaksijaksoinen metsikkö.

Koivuvesojen pituuskasvu on aluksi selvästi koivun siementaimia ja kuusia nopeampi, mutta hidastuu nopeasti. Ennen viljelyä raivattujen koivujen kannoista syntyneiden vesojen ja kuusen taimien pituusero oli suurimmillaan rauduksella 4–5 m ja hieksellä 2,5–3 m.

Luontaisesti syntyneen koivikon kasvattaminen kuusikon verhopuustona ja poistaminen keskenkasvuisena ilman hakkuutuloja vaikuttaa taloudellisesti kannattamattomalta silloin kun hallasuojaa ei tarvita. Koivuylispuuston kasvattamista kannattaa mieluummin jatkaa rauduksella noin 40 vuoden ja hieksellä 45–50 vuoden ikään saakka. Koivujakson tuotos ylittää selvästi kuusen kasvun hidastumisesta ja korjuuvaurioista aiheutuneet kasvutappiot. Koivusta saatavat aikaiset hakkuutulot lisäävät metsikön kiertoajan nettotulojen nykyarvoa huomattavasti etenkin rauduksella.

Avainsanat: Alikasvos, *Betula pendula*, *Betula pubescens*, kaksijaksoinen metsikkö, kannattavuus, kasvu, mallit, *Picea abies*, sekametsä, simulointi, taimikon hoito.

Julkaisija: Metla, Vantaan tutkimuskeskus. Hyväksynyt tutkimusjohtaja Matti Kärkkäinen 8.2.2000.
Kansikuva: Sauli Valkonen
Taitto: Marja-Liisa Herno
Painopaikka ja vuosi: Hakapaino Oy, 2000
Tilaukset: Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus, kirjasto, PL 18, FIN-01301 Vantaa, puh. 09-857 051, faksi 09-8570 5582, sähköposti kirjasto@metla.fi. Hinta 150 mk.
Kirjoittajan yhteystiedot: Sauli Valkonen, Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus, PL 18, FIN-01301 Vantaa, puh. 09-857 051, faksi 09-8570 5361, sähköposti sauli.valkonen@metla.fi.

Copyright: Metsäntutkimuslaitos

Alkusanat

Idea kuusen taimikoiden kasvattamisvaihtoehtojen tutkimisesta syntyi jo 1990-luvun alussa keskustellessani metsänhoidon ongelmista professori Matti Leikolan kanssa. Ajatukset tarkentuivat väitöskirjatyöksi kuusikkotutkimusten edetessä yhteistyössä MML Esa Koistisen, professori Kari Mielikäisen ja professori Lauri Valstan kanssa. Professori Carl Johan Westman ja professori Pasi Puttonen ohjasivat työtäni sen eri vaiheissa. Esitän heille kaikille parhaat kiitokseni miellyttävästä yhteistyöstä.

Tämä työ on tehty Metsäntutkimuslaitoksen Vantaan tutkimuskeskuksessa. Kiitän tutkimuslaitoksen ja Vantaan tutkimuskeskuksen johtoa ja kollegoitani mahdollisuudesta tehdä työtä erinomaisten resurssien turvin jatko-opintoihin kannustavassa ilmapiirissä. Kiitän Niemi-säätiötä työni tukemisesta apurahalla.

Tämän työn osatutkimuksissa käytettyjen kokeiden perustamiseen ja aineistojen hankkimiseen ovat osallistuneet niin lukuisat ihmiset, etten pysty tässä edes luettelemaan heitä kaikkia. Suunnittelija Jouni Hyvärinen, MML Esa Koistinen, professori Kari Mielikäinen, MMM Hannu Salminen ja MMT Martti Varmola tarjosivat pääosan aineistoista käytettäväkseni. Olen iloinen, että voin tässä esittää osajulkaisusta III painovirheen takia pois jääneet kiitokset Kari Haapiaiselle ja Heikki Valkoselle kaksijaksoisten sekametsien aineiston hankkimisesta.

Monet kollegat ovat osallistuneet työni edistymiseen uhraamalla aikaansa ja asiantuntemustaan keskusteluihin ja käsikirjoituksieni lukemiseen. MMT Hans Gustavsenin, MMT Helena Henttosen, MMT Jari Hynysen, MMT Taneli Kolströmin, MMT Juha Lapin, MMM Pentti Niemistön, MMT Risto Ojansuun, MML Arto Rummukaisen, MMT Liisa Saarenmaan, MML Jouni Siipilehdon, MMT Matti Sirénin, MMM Mauri Timosen, MMT Martti Varmolan ja professori Erkki Verkasalon arvokkaat neuvot auttoivat ratkaisemaan monia vaikeiltakin tuntuneita ongelmia. Myös esitarkastajien MMT Hannu Hökän ja MMT Jari Miinan neuvot auttoivat parantamaan käsikirjoitusta huomattavasti. Marja-Liisa Herno hoiti kirjan viimeistelyn verrattomalla ammattitaidolla. Kiitän kaikkia lämpimästi ystävällisestä tuesta.

Vantaalla 21.2.2000

Sauli Valkonen

Väitöskirjan osajulkaisut ja tekijän osuus yhteisjulkaisuissa

Tämä väitöskirja perustuu seuraaviin osajulkaisuihin, joihin viitataan tekstissä roomalaisin numeroin I–IV.

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

Painettu Metsätieteen aikakauskirjan toimituksen luvalla.

II. Koistinen, E. & Valkonen, S. 1993. Models for height development of Norway spruce and Scots pine advance growth after release in Southern Finland. Tiivistelmä: Mallit kuusen ja männyn vapautettujen alikasvostaimien pituuskehitykselle Etelä-Suomessa. Silva Fennica 27(3): 179–194.

Koistinen suunnitteli, perusti ja mittasi tutkimuksessa käytetyt kestokokeet. Tekijät suunnittelivat tutkimusraportissa esitetyn kasvututkimuksen yhdessä. Valkonen muokkasi mittausaineistosta tutkimusaineiston, laati mallit, hankki käyttöön ja käsitteli kasvunvaihtelun tarkastelussa käytetyn VAPU-aineiston, ja laski tutkimusraportissa esitetyt tulokset. Tekijät kirjoittivat käsikirjoituksen suomenkielisen version yhdessä. Valkonen käänsi käsikirjoituksen englannin kielelle. Painettu Silva Fennican toimituksen luvalla.

III. Mielikäinen, K. & Valkonen, S. 1995. Kaksijaksoisen kuusi-koivu -sekametsikön kasvu. Metsätieteen aikakauskirja – Folia Forestalia 1995(2): 81–97.

Mielikäinen suunnitteli ja toteutti tutkimuksen kertakoeala-aineiston hankkimisen ja aineiston käsittelyn. Mielikäinen laati aineistosta alustavat mallit. Valkonen hankki käyttöön ja käsitteli testiaineistona käytetyt Metlan kerta- ja kestokoeaineistot, testasi mallit ja korjasi niitä testien tulosten perusteella. Valkonen laski tutkimusraportissa esitetyt tulokset. Tekijät kirjoittivat tutkimusraportin yhdessä. Painettu Folia Forestalian toimituksen luvalla.

IV. Valkonen, S. & Valsta, L. 2000. Productivity and economics of mixed two-storied spruce and birch stands in Southern Finland simulated with empirical models. Forest Ecology and Management. (Accepted 21 January 2000).

Valkonen suunnitteli tutkimuksessa käytetyn simulaattorin, valitsi ja sovelsi laskennassa käytettävät valmiit mallit, laati uudet mallit sekä ohjelmoi ja testasi simulaattorin. Tekijät suunnittelivat taloudellisten laskelmien perusteet ja menetelmät yhteistyössä ja suorittivat taloudelliset laskelmat yhdessä. Tekijät kirjoittivat tutkimusraportin yhdessä. *© Elsevier Science Ltd. Reprinted with kind permission from Elsevier Science.*

Sisällys

1 Johdanto 9
1.1 Kuusen ja koivun tuotosbiologia 9
1.2 Kuusen ja koivun asema Suomen metsätaloudessa 10
1.3 Puhtaan kuusikon kasvattaminen 10
1.4 Kuusialikasvoksen hyödyntäminen 11
1.5 Kuusi-koivu -sekametsikön kasvattaminen 12
1.6 Tutkimuksen viitekehys 17
1.6.1 Yleistä 17
1.6.2 Uudistamisen ja kasvattamisen tulos 19
1.6.3 Puiden kasvu ja kuolleisuus 20
1.7 Tutkimusongelmat 24

2 Menetelmät 27
2.1 Lähestymistapa 27
2.2 Empiiristen mallien soveltaminen 29
2.2.1 Metsikkö- ja puutason mallit 29
2.2.2 Kokojakauma 30
2.2.3 Tilajärjestys ja kilpailu 31
2.2.4 Kasvupaikka 32
2.2.5 Vapautusreaktio 34
2.2.6 Syntytapa 34
2.2.7 Kasvun vaihtelu 34
2.2.8 Muut tekijät 35
2.3 Mallien laadinta, testaus ja käyttö 35
2.4 Täydentävät mallit 37
2.4.1 Alikasvoskuusikoiden pituusjakaumamalli 37
2.4.2 Viljelykuusikon aukkoja täydentävien koivujen pituus-kasvumalli 38
2.4.3 Muiden mallien käyttö 40

3 Aineistot 41
3.1 Aineiston valinta ja mittaukset 41
3.1.1 Yleistä 41
3.1.2 Kuusen viljelytaimikot 42
3.1.3 Kuusialikasvokset 43
3.1.4 Kaksijaksoiset sekametsiköt 45
3.1.5 Täydentävät mallit 46
3.2 Aineiston käsittely ja käyttö 46

4 Tutkimuksen tulokset 48
4.1 Vapautettu alikasvos 48
4.2 Koivusekoitus, yksijaksoinen metsikkö 52
4.3 Koivusekoitus, kaksijaksoinen metsikkö 57

5 Tarkastelu 59
6 Päätelmät 67
Kirjallisuus 70

Yhteenveto-osassa käytetyt merkinnät

Puun tunnukset

d	kuorellinen läpimitta rinnankorkeudella, cm
d_k	kuorellinen läpimitta kannonkorkeudella, cm tai mm
h	pituus, m
h_k	kannon korkeus, cm
h_{max}	koealan pisimmän puun pituus, dm
hsum	havupuiden pituussumma 19,6 m^2 ympyräkoealalla, dm ($h > 1$ m, $h > 0{,}5 * h_{max}$)
i_{h5}	pituuskasvu tulevalla 5-vuotisjaksolla, m $(5a)^{-1}$
i_h	vuotuinen pituuskasvu, m a^{-1}
n_v	vesojen lukumäärä kannossa (yli 1 cm tyviläpimittaisia), kpl
t	biologinen ikä, a

Metsikön tunnukset

D_g	poikkileikkauspinta-aloilla painotettu keskiläpimitta rinnankorkeudella, cm
G	pohjapinta-ala rinnankorkeudella, m^2 ha^{-1}
H	aritmeettinen keskipituus, m
H_{dom}	valtapituus (hehtaaria kohden 100 paksuimman puun keskipituus), m
H_{100}	valtapituus 100 vuoden iällä, m (valtapituusboniteetti)
H_{50}	valtapituus 50 vuoden iällä, m (valtapituusboniteetti)
H_{25}	valtapituus 25 vuoden iällä, m (valtapituusboniteetti)
MT	Myrtillus-tyyppi (Cajander 1909)
OMT	Oxalis-Myrtillus -tyyppi (Cajander 1909)
N	runkoluku, kpl ha^{-1}
T	biologinen ikä, a

Tilastolliset tunnukset

n	havaintojen lukumäärä
R^2	mallin selitysaste (R = yhteiskorrelaatiokerroin)
s_b	regressiokertoimen estimaatin keskivirhe
S_m	selitettävän muuttujan keskihajonta
S_f	mallin jäännöshajonta
σ_p^2	metsiköiden välinen jäännösvarianssi
σ_e^2	metsikön sisäinen jäännösvarianssi

1 Johdanto

1.1 Kuusen ja koivun tuotosbiologia

Kuusi (*Picea abies* (L.) Karst.) pystyy varjoa sietävänä puulajina valtaamaan valopuulajien metsiköt alikasvosasemasta tai alemmasta puujaksosta käsin useimmilla metsämaan kasvupaikoilla Etelä-Suomessa, jos kehitys ei keskeydy luontaisen häiriön tai ihmisen toimenpiteen takia. Hyväkuntoisia kuusialikasvoksia voidaan hyvän toipumiskykynsä ansiosta usein hyödyntää seuraavan puusukupolven lähtökohtana viljavien kasvupaikkojen talousmetsissä. Kuusen taimet kestävät myös pintakasvillisuuden, vesakon ja valta-asemaan päässeen lehtipuuston kilpailua verrattain hyvin. Kuusikko kasvaa nuorena pioneeripuulajeja hitaammin, mutta sen kasvu kiihtyy keski-iässä nopeasti. Kuusikon kiertoajan keskimääräinen tilavuuskasvu on tuoreilla kankailla ja sitä viljavammilla kivennäismaan kasvupaikoilla yhtä suuri tai suurempi kuin muiden kotimaisten puulajien metsiköiden. Karummilla kasvupaikoilla mänty on yleensä kuusta tuottoisampi (Koivisto 1959, Vuokila ja Väliaho 1980, Oikarinen 1983, Siipilehto 1997). Juurikäävän (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.) aiheuttama lahoisuus on yksi kuusikoiden kasvattamisen suurimmista ongelmista Etelä-Suomessa (Tamminen 1985).

Rauduskoivu (*Betula pendula* Roth) ja hieskoivu (*Betula pubescens* Ehrh.) ovat tyypillisiä pioneeripuulajeja. Ne uudistuvat helposti paljastetulle avomaan kivennäismaapinnalle ja kasvavat nuorina nopeasti. Liian tiheä koivun taimikko tai vesakko on usein ongelmana havupuuvaltaisiksi tarkoitetuissa taimikoissa. Molemmat koivulajit menestyvät ja kasvavat Etelä-Suomessa parhaiten kivennäismaiden viljavilla kasvupaikoilla. Raudus ei menesty turvemailla kuten hies, joka on saavuttanut valta-aseman monien ojitusalueiden ensimmäisenä talouspuusukupolvena.

Rauduskoivikon kiertoajan tilavuustuotos ja järeän puun tuotos ei yllä viljelykuusikon tasolle (Koivisto 1959, Vuokila ja Väliaho 1980, Oikarinen 1983, Siipilehto 1997). Viljellyn rauduskoivikon kiertoajan keskimääräinen tilavuuskasvu on Etelä-Suomen lehtomaisella kankaalla Oikarisen (1983) mukaan keskimäärin 17 % pienempi kuin viljelykuusikon. Tukkipuun tuotoksessa vastaava ero on noin 30 %. Vertailu perustui koivun ja kuusen rinnakkaisviljelykokeista laskettuun boniteettien vastaavuuteen, jonka mukaan OMT:llä koivun H_{50} = 26 m ja kuusen H_{100} = 30 m. Vuokilan ja Väliahon mukaan OMT:llä H_{100} = 27 m.

Hies on raudukseen nähden toissijainen puulaji kivennäismaan kasvupaikoilla. Hieskoivikon tuotos on niillä vain 75–80 % rauduskoivikon tuotoksesta (Koivisto 1959, Ilvessalo ja Ilvessalo 1975, Siipilehto 1997). Järeän laatupuun osuus on hieskoivulla raudusta pienempi, mutta ei suinkaan vähäteltävä. Hakkuukypsien hieskoivikoiden tukkipuuosuus oli Pohjanmaan tuoreilla kankailla keskimäärin 57 % (Verkasalo 1997).

1.2 Kuusen ja koivun asema Suomen metsätaloudessa

Kuusen asema kivennäismaiden viljavien kasvupaikkojen talousmetsien uudistamisen ja kasvattamisen pääpuulajina on vahvistunut Suomessa 1990-luvulla. Kuusen taimien osuus oli 45 % vuonna 1997 viljellystä taimimäärästä, kun se vuonna 1980 oli 16 % ja vuonna 1990 31 %. Kotimaisen kuusen kysyntä on nykyisin vakaa ja kuitupuun hinta mäntyä ja koivua korkeampi. Kuusiraakapuuta käytettiin vuonna 1997 kuiduttavassa teollisuudessa 10,3 milj. m^3, vaneri- ja viiluteollisuudessa 1,7 milj. m^3 ja sahateollisuudessa 13,6 milj. m^3. Kuusen osuus teollisuuden raakapuun käytöstä oli 37,8 % vuonna 1997 (Metsätilastollinen vuosikirja 1998).

Koivu on säilyttänyt asemansa suosituimpana ja taloudellisesti lupaavimpana lehtipuulajina Suomessa (Metsätalous ja ympäristö 1994, Metsäkeskus Tapio 1995, Verkasalo 1998, Kansallinen metsäohjelma 1999). Koivun kysyntä puunjalostusteollisuudessa on ollut suuri ja vakaa. Koivuraakapuuta käytettiin vuonna 1997 kuiduttavassa teollisuudessa 11,8 milj. m^3, vaneri- ja viiluteollisuudessa 1,3 milj. m^3 ja sahateollisuudessa 0,2 milj. m^3. Lehtipuun osuus teollisuuden raakapuun käytöstä oli 23,6 % vuonna 1997 (Metsätilastollinen vuosikirja 1998). Muiden puulajien kuin koivun osuus lehtipuiden teollisesta käytöstä on Suomessa marginaalinen, vain 2 % vuonna 1993 (Louna ja Valkonen 1995). Järeästä koivuraakapuusta maksetaan hyvin. Koivutukkien keskimääräinen hankintahinta oli 120,2 % kuusitukin hinnasta vuonna 1997. Koivukuitupuun hinta sen sijaan oli vain 72,2 % kuusikuitupuun hankintahinnasta v. 1997 (Metsätilastollinen vuosikirja 1998).

1.3 Puhtaan kuusikon kasvattaminen

Puhdasta viljelytaimikkoa pidettiin 1980-luvun loppupuolelle asti uuden kuusisukupolven parhaana lähtökohtana kankaiden viljavilla kasvupaikoilla. Kuusen taimet pysyvät yleensä hyvin elossa ja epäonnistumisen riski on pieni (Räsänen ym. 1985, Valkonen 1992). Kuusella yleisesti käytetystä 1 500–2 500 kpl ha^{-1} viljelytiheydestä ei seuraa kuusella liiallista oksikkuutta ja laatuongelmia kuten männyllä. Kuusen aktiivinen luontainen uudistaminen on epävarmaa ja riskialtista, ja viljelyllä saavutetaan keskimäärin 6–15 vuoden aikavoitto luontaiseen uudistamiseen verrattuna (Hänninen ym. 1972, Räsänen ym. 1985, Leinonen ym. 1989). Puhtaan tasaisen taimikon ja nuoren metsän kehitystä on helppo hallita selväpiirteisillä perkauksilla ja harvennuksilla. Keskeisiä käytännön ongelmia ovat perkausten ajoittaminen ja mahdollisuudet käyttää lehtipuita taimikon aukkojen täydennyksenä. Kuusen ja lehtipuiden pituuskasvujen suhde ja keskinäisen kilpailun vaikutus taimien ja taimikon kehitykseen tunnetaan huonosti.

Kivennäismaiden puhtaiden luontaisten ja viljeltyjen kuusikoiden kehitystä on kuvattu monissa suomalaisissa kehityssarjoissa, kasvu- ja tuotostaulukoissa ja kasvumalleissa (ks. Vuokila 1983, Mäkelä ja Salminen 1991, Hynynen 1995b, 1996). Alkukehityksen osuus 5–10 m valtapituuteen asti puuttuu kuitenkin kehityssarjoista ja mallien soveltamisalueesta. Cajander (1934b) tosin laati kehityssarjat

eteläisimmän Suomen viljelykuusikoiden varhaiskehitykselle. Niiden soveltaminen nykyisiin kuusentaimikoihin on vaikeaa, koska viljelyn tekniikka on muuttunut monessa suhteessa. Tuolloin istutettiin paljasjuurisia taimia muokkaamattomaan maahan ja kuustakin kylvettiin. Viljelytiheys oli Cajanderin (1934b) aineistossa keskimäärin 4 000 kpl ha^{-1}. Ruotsissa yleisimmin käytetyt viljelykuusikon varhaiskehityksen mallit ovat mm. Elfvingin (1982), Nyströmin ja Gemmelin (1988) sekä Nyströmin ja Kexin (1996) laatimia. Niiden soveltaminen suomalaisten taimikoiden kehityksen kuvaamiseen vaatisi perusteellisen testauksen.

1.4 Kuusialikasvoksen hyödyntäminen

Kiinnostus kuusen luontaista uudistamista ja alikasvoksen hyödyntämistä kohtaan kasvoi uudelleen 1990-luvun alussa, kun kustannusten vähentäminen otettiin keskeiseksi tavoitteeksi metsänuudistamisessa. Kuusen luontaisen uudistamisen yleisimmät menetelmät ovat Suomessa suojuspuuhakkuu ja kaistalehakkuu. Alikasvoksella tarkoitetaan vallitsevan puujakson alle ennen varsinaista uudistamishakkuuta syntynyttä taimikkoa. Alle 10 cm pituista vaihtuvaa taimiainesta ei yleensä lasketa alikasvokseen (Hyppönen ym. 1998). Rajanveto suojuspuuhakkuun ja alikasvoksen hyödyntämisen välillä on epäselvä. Ennen suojuspuuhakkuuta tapahtuvalla taimettumisella on näet keskeinen merkitys suojuspuumenetelmässä. Keskimäärin 60–85 % kuusen taimista oli syntynyt ennen suojuspuuhakkuuta Hännisen ym. (1972), Räsäsen ym. (1985) ja Leinosen ym. (1989) tutkimuksissa inventoiduilla onnistuneilla uudistusaloilla.

Kuusialikasvosta voi esiintyä minkä tahansa puulajin metsikössä tai sekametsikössä (Koistinen 1985, Saksa ym. 1998b). Sitä voidaan hyödyntää seuraavan puusukupolven lähtökohtana, jos kasvupaikka sopii kuuselle. Vastoin Sarvaksen (1951) käsitystä Vuokilan (1977) mukaan kuivahkolla kankaalla saattaa olla järkevää kasvattaa tiheä, hyväkuntoinen kuusialikasvos 90–100 vuoden ikäiseksi, jos se on päässyt kehittymään yli viiden metrin valtapituiseksi. Alikasvospuiden täytyy olla elpymiskykyisiä, jotta ne selviäisivät kasvuympäristön muutoksesta ja kiihdyttäisivät kasvuaan nopeasti. Taimikon tiheys ja tasaisuus (tilajärjestys ja kokojakauma) vaikuttavat sen tuotos- ja tuotto-odotuksiin ja kehityskelpoisuuteen, samoin kuin puunkorjuun edellytykset ja taimikolle aiheutuvat vauriot sekä puunkorjuun ja taimikonhoidon kustannukset. Alikasvoksen ei tarvitse muodostaa uutta puusukupolvea koko uudistettavalle alalle ollakseen kehittämiskelpoinen. Hyväkuntoinen alikasvosryhmä sopii usein osaksi viljelytaimikkoa. Aukkoinen alikasvostaimikko voidaan joskus täydentää viljelemällä, jos täydennystaimilla on kehittymisen edellytykset ja taimien pituuskehityksessä ei ole liian suurta eroa. Myös maiseman- ja riistanhoidolliset tavoitteet voivat motivoida alikasvosten hyödyntämiseen (Saksa ym. 1998a).

Kuusialikasvoksien rakennetta ja kehittymistä koskevat suomalaiset tutkimukset ovat peräisin pääasiassa vuosisadan alkupuoliskolta (Tikka 1928, Pöntynen 1929, Cajander 1934a, Sarvas 1944, 1950). Alikasvoksia ei ole Suomessa tutkittu kovin intensiivisesti viime vuosikymmeninä (Seppälä ja Keltikangas 1978, Heikurainen

1985). Ruotsalaisissa ja norjalaisissa tutkimuksissa kuusialikasvoksia on lähestytty sekä osana suojuspuuhakkuun taimettumisprosessia (Tirén 1949, Skoklefald 1967), että viljelytaimikkoa täydentävinä elementteinä (Bergan 1971, Andersson 1988, Fries 1990). Kirjallisuuskatsaukset ruotsalaisiin alikasvostutkimuksiin ovat tehneet Andersson (1988) sekä Hannerz ja Gemmel (1994).

Käsitteiden alikasvos ja alempi puujakso ero ei ole yksiselitteinen. Määrittely voidaan tehdä metsikön kasvatuksen ja toimenpiteiden tavoitteiden perusteella. Alikasvos on valtapuuston alle ennen uudistushakkuuta itsestään syntynyt taimikko. Toimenpiteet tehdään uudistushakkuuseen saakka valtapuuston ehdoilla. Uudistushakkuun yhteydessä päätetään yritetäänkö alikasvos säästää osaksi seuraavaa puusukupolvea. Kaksijaksoisessa metsikössä toimitaan yhtaikaa sekä ylispuuston että taimikon hyväksi, ja alemman jakson kehittyminen on vähintään samanarvoinen tavoite kuin ylemmän jakson.

1.5 Kuusi-koivu -sekametsikön kasvattaminen

Sekametsän aikaansaaminen ja kasvattaminen asetettiin 1990-luvun metsänhoidossa etusijalle puhtaisiin havupuumetsiköihin nähden. Sekametsiä pidetään yhtenä tärkeimmistä metsätalouden ekologisen kestävyyden ja metsäluonnon monimuotoisuuden tavoitteiden saavuttamisen välineenä (Metsätalous ja ympäristö 1994, Parviainen ja Seppänen 1994, Metsäkeskus Tapio 1995, UPM-Kymmene Metsä 1996, 1999, Seppänen 1997, Kansallinen metsäohjelma 1999). Lehtipuusekoitus lisää myös metsän maisemallista arvostusta monotoniseen havumetsään verrattuna (Savolainen ja Kellomäki 1981, Pukkala ym. 1988, Almgren 1990). Rauduskoivua pidetään nykyisin suositeltavimpana havupuumetsiköiden lehtisekapuuna. Hieskoivuakin suositellaan kasvatettavaksi taimikoiden aukkojen täydentäjänä etenkin soiden kasvupaikoilla ja Pohjois-Suomen vaikeasti uudistuvilla alueilla (Metsäkeskus Tapio 1995).

Lehtipuusekoituksen hyödyt ja haitat puuntuotannolle ovat yksi metsänhoidollisen keskustelun kestävimmistä aiheista (Kärkkäinen 1984, Seppänen 1997). Sekapuuston kasvattamisella näyttää olevan mahdollista saavuttaa metsänhoidollisia, puuntuotannollisia ja taloudellisia etuja havupuuvaltaisissa metsissä, mutta haittapuoliakin varmasti on. Pohjoismaisten sekametsikkötutkimusten tulokset osoittavat, että männyn, kuusen ja rauduskoivun muodostamien kahden puulajin sekametsiköiden kokonaistuotos on suunnilleen yhtä suuri tai jopa suurempi kuin puhtaiden havumetsiköiden tuotos molemmille puulajeille sopivalla kasvupaikalla (Lappi-Seppälä 1930, Jonsson 1961, Fries 1964, 1974, Mielikäinen 1980, 1985, Folkesson ja Bärring 1982, Frivold 1982, Agestam 1985, Hägg 1988, Tham 1988a, 1988b, Valsta 1988, Vähäpesola 1989, Pukkala ym. 1994, Carlsson 1995, Vettenranta 1996, 1999). Hieskoivusekoitus sen sijaan pienentää tuotosta kivennäismaiden havupuumetsiköissä, joissa hieskoivun tuotoskyky on havupuita pienempi (Mielikäinen 1980, 1985). Sama koskee periaatteessa kaikkien vähäarvoisten tai hidaskasvuisten puulajien pitkäaikaista kasvattamista tuottavien ja taloudellisesti arvokkaiden puulajien metsiköissä.

Positiivisen sekametsävaikutuksen tärkeimpinä aiheuttajina pidetään mm. kasvuresurssien tehokkaampaa käyttöä, sekametsän parempaa terveydentilaa sekä lehtisekapuuston maan ravinnetaloutta parantavaa vaikutusta (Assman 1961, Schmidt-Vogt 1986, Kramer 1988, Kelty 1992). Jos sekametsikön puulajien kasvuresurssien hyväksikäytön optimi ja vaihteluväli poikkeavat toisistaan, puiden välinen kilpailu on pienempi kuin puhtaassa metsikössä. Kuusen ja koivun välillä on eroja mm. juuristojen syvyydessä, fotosynteesin valovasteessa sekä valonpidätyksessä etenkin kun koivu on lehdetön keväällä ja syksyllä (Laitakari 1935, Kalela 1949, Heikurainen 1958). Jos puulajien kasvurytmit ovat erilaiset, niiden maksimaalinen kasvuresurssien tarve ajoittuu eri ikäkausille. Kilpailussa alakynteen jääneen alemman kuusijakson kasvuresurssit voivat myöhemmin lisääntyä, kun ylemmän jakson valopuun kasvu ja kilpailukyky alkavat vähentyä kuusta aikaisemmin.

Lehtipuusto voi parantaa kuusimetsän mikroilmastoa ja maaperän ravinnetaloudellisia ominaisuuksia mm. ravinteisen ja helposti hajoavan lehtikarikkeen, typensidontakyvyn (leppä) ja pienemmän säteilynpidätyksen ansiosta (Mikola 1954, 1958, 1985, Sirén 1955, Lähde 1974, Tamminen 1991). Vaikutuksen suuruudesta ja kestosta ei kuitenkaan ole varmuutta. Sekametsiköiden terveydentilan ja tuhonkestävyyden on usein arveltu olevan puhtaita metsiköitä paremman. Osa sekametsikön puulajeista voi olla tiettyä tuhonaiheuttajaa kohtaan vastustuskykyisempi tai kokonaan immuuni. Lehtisekapuuston kasvattamisesta saattaa olla hyötyä juurikäävän (*Heterobasidion annosum*) torjumisessa Etelä-Suomen kuusikoissa (Kurkela 1994), mutta tieteellistä näyttöä puoleen tai toiseen on vielä hyvin vähän.

Kuusen ja koivun sekataimikoiden kasvattamisessa voidaan nähdä kolme vaihtoehtoista peruslinjaa toimenpiteiden tavoitteiden, sekoituksen määrän ja metsikön rakenteen mukaan:

1. Puhdas kuusikko, jossa koivut perataan pois ennen kuin kuusen kasvu kärsii liikaa kilpailusta tai mekaanisista vaurioista. Jos perkaus tehdään liian aikaisin, se joudutaan uusimaan.
2. Tasakokoinen sekataimikko, jossa suuria koivuja poistetaan ja pieniä koivuja jätetään täydentämään kuusikon aukkoja. Ns. reikäperkauksessa koivuja poistetaan vain kuusten lähiympäristöstä kustannusten säästämiseksi ja sekapuuston osuuden säilyttämiseksi. Menetelmä vaatii jatkuvaa taimikon tarkkailua ja useita toimenpidekertoja.
3. Kaksijaksoinen sekametsikkö, jossa koivikon annetaan kasvaa vallitsevaan asemaan verhopuustoksi tai ylemmäksi jaksoksi puun tuottamiseksi. Koivikkoa täytyy yleensä harventaa, jotta kuusi menestyisi alempana jaksona.

Kaksijaksoinen metsikkö syntyy myös istuttamalla kuusikko hakkuukypsyyttä lähenevän koivikon alle seuraavan sukupolven kiertoajan lyhentämiseksi. Tätä on kuitenkin pidettävä pikemminkin ennakkoviljelynä kuin sekametsän kasvattamisena.

Yksijaksoisen koivu-kuusi -sekametsän perustamiseen ja kasvattamiseen liittyy usein ongelmia, jotka johtuvat koivun nopeasta nuoruusvaiheen kasvusta kuuseen verrattuna. Samanikäinen tai muutamia vuosia vanhempi kuusi jää helposti koivusta jälkeen pituuskasvussa, ja koivu pääsee vallitsevaan asemaan eten-

kin jos koivun osuus on suuri. Eteläsuomalaisissa varttuneissa kuusi-koivu -sekametsissä kasvaneet raudus- ja hieskoivut olivat saavuttaneet 1,3 metrin pituuden keskimäärin 4,3–5,5 vuodessa (Mielikäinen 1985). Vaihteluväli liittyi kuusen valtapituusboniteettiin (H_{100} = 24–30 m). Kuusen hidas alkukehitys oli yhteydessä koivun suureen osuuteen tilavuudesta. Kun koivun tilavuusosuus oli varttuneessa puustossa alle 25 %, kuusella oli kulunut 1,3 metrin pituuden saavuttamiseen 8,2–11,0 vuotta. Kun koivun osuus oli 75 %, aikaa kului 10,6–14,2 vuotta.

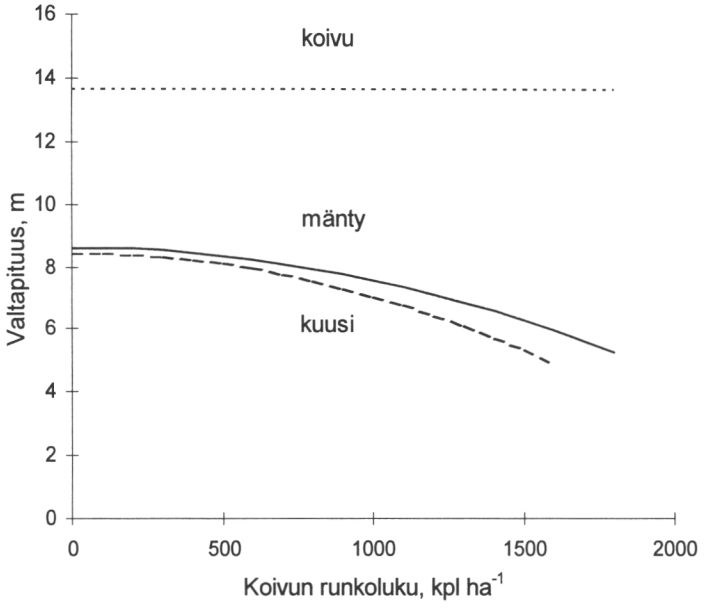
Istutetun rauduskoivikon vaikutus samaan aikaan istutetun kuusen pituuteen riippui Pukkalan (1981) tutkimassa kestokoeaineistossa voimakkaasti koivun runkoluvusta (kuva 1). Kuusten kuolleisuus oli kuitenkin pieni, varsinkin mäntyyn verrattuna (kuva 2).

Kuusen ja koivun pituuskasvujen ero voi kehittyä erityisen suureksi silloin kun koivut ovat syntyneet vesoista. Kuusen taimien ja koivuvesojen kasvunopeudesta ei tosin ole tehty perusteellisia vertailututkimuksia. Vesasyntyisten koivujen alkukehityksen tiedetään kuitenkin olevan keskimäärin vieläkin nopeampaa kuin siemensyntyisten koivujen (Kauppi ym. 1988). Koivu voi vaikuttaa kuusten kasvuun paitsi kilpailemalla resursseista myös suoraan fyysisesti. Vieressä kasvavan koivun oksat voivat piiskata kuusta ja pahimmassa tapauksessa estää sen pituuskasvun. Kaksijaksoinen sekametsikkö, jossa kuusen ja koivun latvukset ovat selvästi eri korkeudella, saattaa sen vuoksi olla yksijaksoista sekametsää helpommin hallittava vaihtoehto (Jonsson 1961, Fries 1964, 1974).

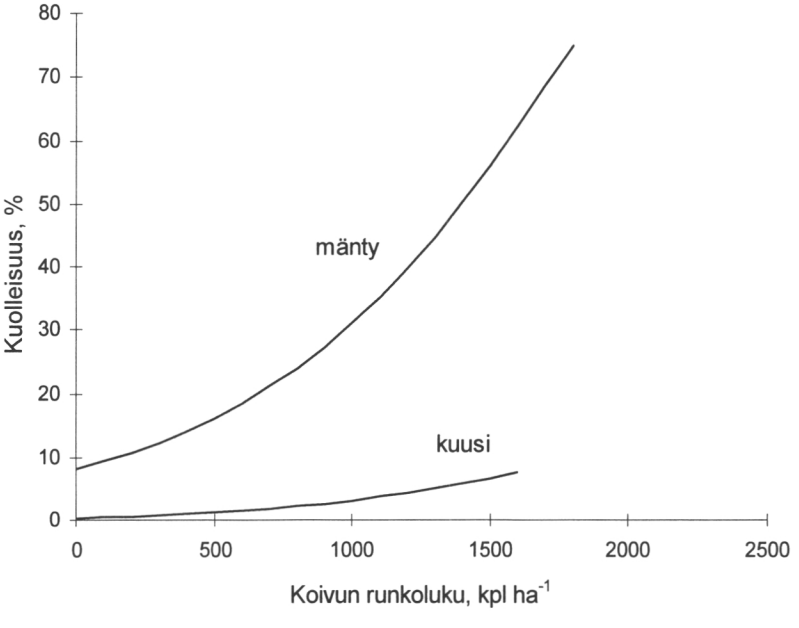
Verhopuustoa on käytetty perinteisesti hallan tuhojen torjumiseksi kuusen taimikoissa. Riittävän tiheästä verhopuustosta (latvuspeittävyys >70 %) voi olla merkittävää hyötyä ulossäteilyhallaa vastaan Etelä-Suomessa (Multamäki 1942, Juutinen 1962, Leikola ja Pylkkö 1969, Leikola ja Rikala 1983, Andersson 1984, Heikurainen 1985, Lundmark ja Hällgren 1987). Pohjois-Suomessa verhopuustosta ei ole yhtä suurta hyötyä, sillä ulossäteilyhallat ovat siellä harvinaisempia. Tiheimpienkin lehtipuustojen latvusto on Lapissa liian aukkoinen tehokasta hallasuojaa varten (Leikola 1975). Verhopuusto voi myös vähentää taimikon vesottumista ja perkaustarvetta (Andersson 1984) sekä pintakasvillisuuden kilpailua ja torjuntatarvetta (Heikinheimo 1941).

Verhopuusto kilpailee kuusten kanssa kasvuresursseista ja hidastaa niiden kasvua. Kasvuvaikutuksia ovat tutkineet mm. Kalela (1936), Heikinheimo (1941), Hannelius (1978), Andersson (1984), Heikurainen (1985), Bergan (1987) ja Tham (1988a). Kuusten laatu voi kärsiä ranganvaihdoksista ja oksikkuudesta hyvin hitaan pituuskasvun tai piiskauksen takia (Heikinheimo 1941). Kuusi pysyy verrattain hyvin elossa tiheänkin koivuylispuuston alla (kuva 2).

Koska hallan torjuntaa on pidetty verhopuuston ensisijaisena ja usein ainoana tarkoituksena, tutkimusraporttien päätelmissä (Hannelius 1978, Heikurainen 1985), metsänhoidon oppikirjoissa (Heikinheimo 1941) ja metsänhoitosuosituksissa on yleensä suositeltu verhopuuston poistamista ajoissa ja kokonaan. Latvakasvaimen hallavauriot vähenevät kuusen pituuden lisääntyessä mutta ne ovat mahdollisia aina 4–5 metrin pituuteen asti (Leikola ja Rikala 1983). Käytännössä tarkoituksenmukaisimpana poistamisajankohtana on pidetty 2–3 metrin keskipituutta.



Kuva 1. Samaan aikaan istutettujen männyn, kuusen ja rauduskoivun valtapituuden riippuvuus koivun runkoluvusta viljelykokeissa (Pukkala 1981).



Kuva 2. Männyn ja kuusen kuolleisuuden riippuvuus samaan aikaan istutettujen rauduskoivujen runkoluvusta (Pukkala 1981). Kuolleisuus edustaa kuvan 1 osoittamaa pituusvaihetta.

Ylemmän koivujakson kasvattamista on usein jatkettu hallasuojan tarpeen loputtua polttopuun tai teollisuuspuun tuottamiseksi tai tahattomasti. Kaksijaksoisen metsikön kasvattamista pidetään uusimmissa metsänhoitosuosituksissakin realistisena vaihtoehtona (Metsäkeskus Tapio 1995, UPM-Kymmene Metsä 1999). Koivun tuotoksen ja kuusen tuotostappion suhde on aiempien tutkimustulosten mukaan niin edullinen, että koivun kasvattaminen kuitupuuksi tai jopa järeäksi puuksi saattaa olla järkevää (Cajander 1934a, Eriksson 1976, Andersson 1984, Bergan 1987, Tham 1988a, 1994, Carlsson 1990, Niemistö 1995b, Mård 1996, 1997).

Perusteellista kasvu- ja tuotostutkimusta tiheydeltään, iältään ja järeydeltään vaihtelevan koivujaksojen kehityksestä ja vaikutuksesta kuusijaksoon ei kuitenkaan ole tehty Suomessa. Menetelmän taloudellista kannattavuutta ei ole selvitetty. Puuston tilavuuskasvun lisäksi siinä on otettava huomioon ainakin puiden dimensiot, laatu ja hinta, korjuun edellytykset, tekniikka ja kustannukset, korjuuvaurioiden vaikutus ja hoitokustannukset.

Osa kuusen taimista vaurioituu väistämättä ylispuuston kaadossa ja maastokuljetuksessa. Maukosen (1987) tutkimuksessa keskimäärin 2,4 metrin pituisissa kuusen taimikoissa vaurioitui 31 % taimista, josta 79 % kehityskelvottomiksi, kun niiden päältä poistettiin keskimäärin 133 m^3ha^{-1} sekapuustoa moottorisahahakkuuta ja metsätraktorikuljetusta käyttäen. Frilanderin (1985) tutkimissa taimikoissa (keskimääräinen keskipituus 2,1 m) vaurioitui samoilla menetelmillä tehdyssä pienikokoisen verhopuuston poistossa (keskimääräinen runkotilavuus 53 $m^3 ha^{-1}$) 33 % kuusen taimista, joista kolmannes kehityskelvottomiksi. Thesslund (1976) raportoi samanlaisesta vaurioprosentista (27 %) hieman varttuneempien kuusikoiden (keskipituus 5,5–12 m) koivuylispuuston poistossa, jossa käytettiin vinssausta nykyaikaisen pitkälle ulottuvan kuormaimen sijasta. Korjuuvaurioiden puuntuotannollisesta merkityksestä ei ole tehty laskelmia. Alemman jakson varominen aiheuttaa korjuussa lisäkustannuksia, rajoittaa menetelmien valintaa ja saattaa vähentää leimikon ostohalukkuutta vähemmän riskialttiisiin leimikoihin verrattuna. Koneellisen korjuun soveltumista alikasvos- ja kaksijaksoismetsiköihin epäillään yleisesti. Peltoniemen (1991) tutkimuksessa konekorjuu kuormainharvesterilla osoittautui kuitenkin toimivaksi ja miestyötä hiukan edullisemmaksi vaihtoehdoksi, kun 1–3 metrin pituisten taimikoiden päältä poistettiin tiheä sekasuojuspuusto (runkotilavuus 167–313 $m^3 ha^{-1}$). Konekohteissa vaurioitui 19–26 %, miestyökohteissa 11–23 % ja yhdistelmäkohteessa 26 % taimista.

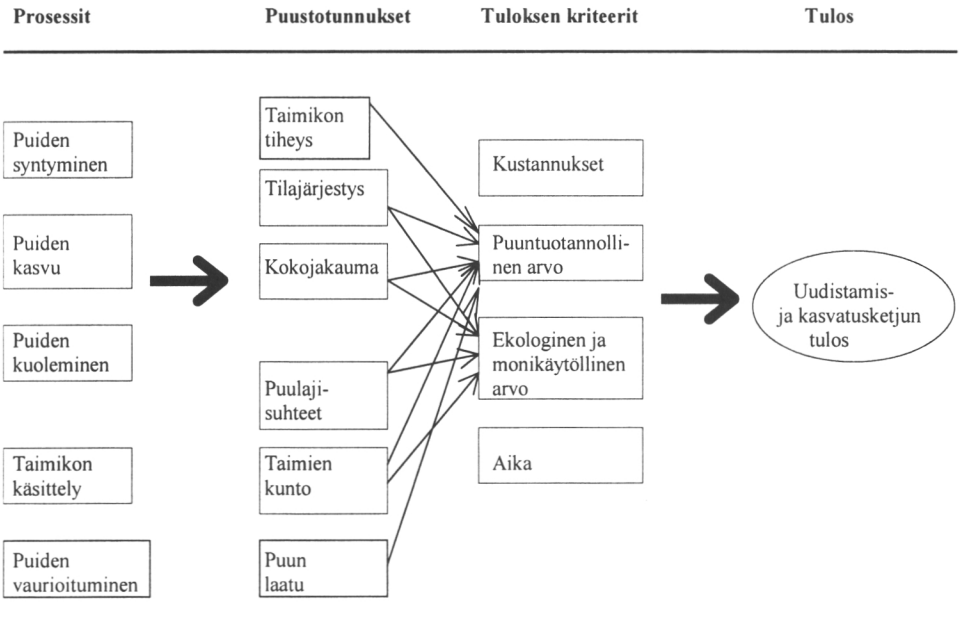
Koivujakson päätehakkuutulot saadaan aikaisessa vaiheessa, kuusikon kiertoajan keskivaiheilla. Varhaisuus lisää niiden arvoa taloudellisissa laskelmissa, sitä enemmän mitä korkeampaa diskonttokorkoa käytetään. Ylispuukoivikon optimaalista tiheyttä ja kasvattamisaikaa ei kuitenkaan ole tutkittu.

1.6 Tutkimuksen viitekehys

1.6.1 Yleistä

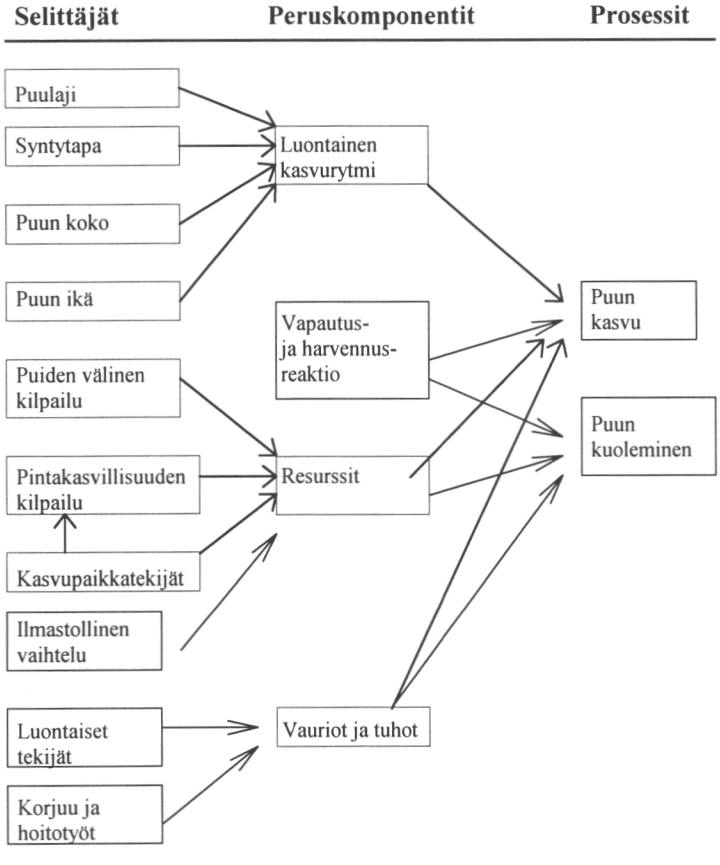
Kuvissa 3 ja 4 on esitetty tämän tutkimuksen viitekehys yksinkertaisen metsänuudistamisen ja taimikon varhaiskehityksen käsitemallin muodossa. Niissä on muiden tekijöiden luvalla mukailtu käsikirjoitusvaiheessa olevaa metsänuudistamisen käsitemallia tämän työn tutkimusongelmiin sovittaen ja muuttaen (Saarenmaa ym. 1997, Valkonen 1998). Kuvan 3 osuus tehtiin yhteisenä ryhmätyönä. Tämän tutkimuksen tekijä vastasi kuvan 4 osuudesta.

Käsitemallin tarkoituksena on havainnollistaa taimikon kehityksen ja käsittelyn asemaa metsikön koko kiertoajan uudistamis- ja kasvatusketjussa. Kuvassa 3 on esitetty metsänuudistamisen tuloksen arviointiin ja mittaamiseen käytettävät kriteerit, niiden arvioimiseksi tarvittavat puustotunnukset sekä puustotunnusten kehittymistä säätelevät prosessit. Kuvassa 4 on esitetty taimikoiden kehitystä säätelevät kasvun ja kuolleisuuden prosessit ja tämän tutkimuksen kannalta olennaisina pidetyt tekijät. Taimien syntymisprosessia ei esitetä yksityiskohtaisesti, koska sillä ei ole merkittävää roolia tämän tutkimuksen kohteena olevissa vakiintuneissa taimikoissa.



Kuva 3. Metsänuudistamistuloksen ja taimikon varhaiskehityksen viitekehys, osa 1: Tulos ja sen tekijät. Sovellettu ja mukailtu Saarenmaan ym. (1997) ja Valkosen (1998) esittämistä käsitemalleista.

Tietyn tekijän tai ilmiön syy tai siihen vaikuttava tekijä on kuvissa kohteen vasemmalla puolella. Vaikutussuunta on esitetty nuolella. Paksu nuoli korvaa ohuet nuolet tapauksissa, joissa kaikista tai lähes kaikista sen vasemmalla puolella olevista käsitteistä on yhteys jokaiseen tai lähes jokaiseen oikealla puolella olevaan. Malliin sisältyy myös takaisinkytkentöjä, jotka voitaisiin esittää oikealta vasemmalle osoittavilla nuolilla. Ne jätettiin kuitenkin esityksen yksinkertaistamisen vuoksi pois kuvista. Seuraavissa luvuissa määritellään lyhyesti käytetyt käsitteet. Kuvien 3 ja 4 käsitteet on alleviivattu tekstissä siinä kohdassa kun niiden sisältö selitetään tai itsestään selvään käsitteeseen viitataan ensimmäisen kerran.



Kuva 4. Metsänuudistamistuloksen ja taimikon varhaiskehityksen viitekehys, osa 2: Kasvun ja kuolleisuuden prosessit. Sovellettu ja mukailtu Saarenmaan ym. (1997) ja Valkosen (1998) esittämistä käsitemalleista.

1.6.2 Uudistamisen ja kasvattamisen tulos

Taimikon puuntuotannollisella arvolla tarkoitetaan taimikon puuntuotos- tai tuottokykyä. Metsänuudistamis- ja kasvatusketjun tulosta voidaan arvioida vertaamalla metsikön tuotos- ja tuottoennusteita kasvupaikan potentiaaliin. Tätä varten tarvitaan kiertoajan kattavia tuotosennusteita, joita voidaan tuottaa esimerkiksi kasvumalleilla. Tuoton laskemiseen tarvitaan lisäksi menetelmät kustannusten ja tulojen arviointiin. Uudistamis- ja taimikonhoitovaihetta koskevissa tutkimuksissa riittää usein tarkastelun ulottaminen ainoastaan ensiharvennukseen asti, jos puustojen kehitys vertailtavissa vaihtoehdoissa on siitä eteenpäin samanlainen.

Jos tiettyyn vaihtoehtoon päteviä, kiertoajan kattavia tuotosmalleja ei ole käytettävissä, taimikon puuntuotannollista arvoa on arvioitava sen taimikkovaiheen puustotunnusten perusteella. Tällöin kysytään voidaanko taimikosta kehittää kasvupaikan puuntuotoskyvyn täysin hyödyntävä ja taloudellisen tuoton maksimoiva puusto vaihtoehtoisilla taimikonhoitotoimilla. Taimikon tiheyden lisäksi sen puuntuotoskykyyn ja kehittämiskelpoisuuteen vaikuttaa kunkin puuyksilön kasvatuskelpoisuus. Taimikon tilajärjestys, kokojakauma, puulajisuhteet ja taimien kunto määräävät millainen kasvatuskelpoisten taimien joukko taimikosta voidaan muodostaa.

Taimikon optimaalinen tiheys ja rakenne (tilajärjestys, kokojakauma ja puulajisuhteet) vaihtelevat metsikölle asetettavien puuntuotannollisten, teknisten, taloudellisten ja ekologisten tavoitteiden ja rajoitteiden mukaan, eikä yksiselitteisiä tavoitetaimikoita voi määritellä. Kysymystä voidaan kuitenkin lähestyä yleisesti Oliverin ja Larsonin (1990) kasvutila -käsitteen kautta. Kasvutila tarkoittaa kasvupaikan kasvuresursseja. Se vastaa samalla fysikaalista kasvutilaa joko pinta-alana tai tilana sekä maanpinnan ylä- että alapuolella. Kasvupaikan kasvuresurssien voidaan ajatella olevan puuntuotannon kannalta optimaalisessa käytössä silloin, kun kaikki kasvutila on taloudellisesti arvokkaiden, hyväkuntoisten, taimikkoon kokonsa ja kasvunopeutensa puolesta sopivien puuyksilöiden hallussa. Aukkoisuus aiheuttaa tilavuuskasvutappioita (Pukkala 1988, Pukkala ja Kolström 1991) ja ylitiheys vaatii korjaavia perkaus- tai harvennuskäsittelyjä.

Puuston tilavuustuotoksen tai ensiharvennuksen kannattavuuden maksimoivat taimikot eivät kuitenkaan ole välttämättä optimaalisia metsätalouden kokonaisuuden kannalta. Liian alhaisesta tiheydestä seuraava puiden huono laatu voi johtaa huonoon taloudelliseen tulokseen, vaikka runkopuun tilavuustuotos olisikin suuri. Ensiharvennustulot maksimoivaa tiheyttä huomattavasti suurempi tiheys voi olla männyn taimikoissa laadun kannalta optimaalinen aina 5–8 metrin valtapituuteen asti (Varmola 1996).

Osa uudistettavien metsiköiden kasvutilasta käytetään nykyisin säästöpuiden kasvattamiseen, jotta saavutettaisiin metsäluonnon ekologisen kestävyyden säilyttämiseksi asetettuja tavoitteita. Tällöin lisätään metsikön ekologista arvoa. Metsikkötasolla ekologinen arvo tarkoittaa metsäluonnon ekologisen kestävyyden ja kasvupaikan tuottokyvyn kestävyyden turvaamiseen tähtäävien elementtien läsnäoloa ja niiden säilymistä metsikössä metsätalouden toimenpiteissä. Näitä

elementtejä ja niille asetettavia tavoitteita on määritelty esim. metsälainsäädännössä, metsänkäsittelysuosituksissa, ympäristöohjelmissa ja puun sertifiointikriteereissä. Metsikkötason puustotunnuksista tällaisia voivat olla esimerkiksi puulajisuhteet, tiettyjen puulajien esiintyminen sekä suurten vanhojen puiden, kuolleen, lahon ja tulen tappaman puun määrä hehtaaria tai uudistusalaa kohti (Annila 1998).

Monikäytöllinen arvo käsittää metsikön muut kuin puuntuotannolliset tuotteet ja hyödyt, joita se tuottaa esim. porotaloudelle, riistanhoidolle, luonnontuotteiden keräilylle, maisemalliselle arvolle, virkistyskäytölle ja suojavaikutuksille.

Uudistamiseen kuluvaa aikaa voidaan ajatella kustannustekijäksi suorien kustannusten lisäksi. Uudistamisajan (uudistushakkuusta tavoitteet täyttävän taimikon aikaan saamiseen) suuri osuus kiertoajasta pienentää metsikön keskimääräistä puuntuotosta ja tuottoa. Kun käytetään nykyarvolaskelmia metsälötason käsittelyvaihtojen vertailussa, uudistamiseen kuluvan ajan lisääntyminen lykkää metsiköstä saatavia tuloja kauemmas tulevaisuuteen. Niiden nykyarvo pienenee, sitä enemmän mitä suurempaa diskonttokorkoa laskelmissa käytetään. Lapin (1983) simulointitutkimuksen mukaan uudistamisajan taloudellisten vaikutusten tarkastelu kestävän metsätalouden oletuksin metsälötasolla antoi yhtäpitäviä tuloksia metsikkötasolla käytetyn nykyarvomenetelmän kanssa.

Taimikon kehityksen määräämiä dynaamisia luontaisia tekijöitä (syntyminen, kasvu, kuolleisuus, tuhot ja vauriot) sekä ihmisen toimenpiteitä (käsittely) nimitetään käsitemallissa yhteisnimellä prosessit. Käsittely edustaa niitä metsänhoidon toimenpiteitä, joilla vaikutetaan välittömästi taimikon puustotunnuksiin (perkaus, harvennus, ylispuiden poisto tai harvennus) tai puiden laatuun (pystykarsinta). Samoilla toimenpiteillä voi olla myös välillisiä vaikutuksia puiden kasvuun, laatuun, kuolleisuuteen ja syntymiseen. Ne kuvataan tämän käsitemallin mukaisessa lähestymistavassa ympäristötekijöiden tai kilpailun muutoksesta seuraavan palautteen perusteella.

1.6.3 Puiden kasvu ja kuolleisuus

Puun kasvunopeutta sen koon tai iän funktiona ja siitä seuraavaa kehityskäyrää voidaan kutsua puun luontaiseksi kasvurytmiksi. Tällöin ajatellaan, että puun perinnölliset tekijät määräävät sen kasvunopeuden kasvupaikan tarjoamien resurssien rajoissa, kun ulkopuolisia häiritseviä tekijöitä ei ole (kilpailu, vauriot ja tuhot). Täysin häiriötön kehitys on pelkästään hypoteettinen käsite. Voidaan kuitenkin olettaa, että tasaisen, hyvin hoidetun, puhtaan viljelytaimikon valtapuiden pituuskehitys on hyvin lähellä luontaisen kasvurytmin mukaista kehitystä. Vaikka puuyksilöiden ja puulajien luontaiset kasvurytmit poikkeavat toisistaan, niiden kaikkien kasvuun vaikuttaa ratkaisevasti yhteyttämistuotteiden nettotuotoksen ja niiden kulutuksen suhteen kehittyminen. Puun koon kasvaessa sen yhteyttävien osien (lehdet) koko ja nettotuotos kasvavat hitaammin kuin yhteyttämättömien osien koko ja niiden ylläpitoon kuluvien yhteyttämistuotteiden kulutus (Waring 1987, Givnish 1988). Kasvua varten käytettävissä oleva yhteyttämistuotteiden osuus pienenee ja suhteellinen kasvu hidastuu. Tätä yksinkertaistettua mallia puun koon ja

kasvun riippuvuudesta on hyödynnetty laajasti kasvututkimuksissa edustamassa luontaista kasvurytmiä empiiristen mallien perusyhtälöissä (Assman 1961, Hunt 1982, Jeffers 1988, Zeide 1993).

Puun iällä saattaa olla merkitystä kasvutekijänä puu koon ja kunnon sekä kasvupaikan lisäksi. Ilman ylispuustoa säännöllisesti kehittyneiden metsiköiden puiden ikä ja koko ovat vahvasti korreloituneita, eikä niiden vaikutusta ole pystytty eikä niitä ole tarvinnut erotella kasvututkimuksissa. Tunnuksia on käytetty malleissa toistensa vaihtoehtoina. Puun ikään saattaa kuitenkin liittyä kasvua ja elpymiskykyä heikentäviä rakenteellisia ja toiminnallisia muutoksia (Assman 1961). Niillä saattaa olla merkitystä alikasvostaimikoissa, joissa pienet puut voivat olla verrattain vanhoja (Vaartaja 1951, Oliver 1985, McCaughey ja Ferguson 1988, Oliver ja Larson 1990, Hannerz ja Gemmel 1994).

Puulajien erilainen kasvunopeus voi johtaa taimikkovaiheessa suuriin koon ja kilpailuaseman eroihin. Rauduskoivu kasvaa kankailla hieskoivua nopeammin (Koivisto 1959, Gustavsen ja Mielikäinen 1984, Siipilehto 1997). Puun syntytavalla on myös suuri merkitys: vesat kasvavat aluksi olemassa olevan juuristonsa avulla samankokoisia siementaimia nopeammin, mutta vesojen kasvu hidastuu nopeasti ja pituusero tasoittuu ajan mittaan (Andersson 1984, Ferm 1990). Puhtaan viljelymetsikön puiden välille voi syntyä jo taimien kasvatusvaiheessa tai pian viljelyn jälkeen kokoeroja, jotka suurenevat kilpailun voimistuessa (Ford 1984).

Puun käytettävissä olevat kasvuresurssit määräävät sen kasvunopeuden luontaisen kasvurytmin puitteissa. Kasvupaikkatekijöihin voidaan lukea kuuluvaksi kaikki se puiden kasvun fysikaalisten primääritekijöiden vaihtelu, jonka kasvupaikan ominaisuudet määräävät eri mittakaavoissa ja hierarkiatasoilla. Metsänuudistamisen ja -kasvatuksen tutkimuksissa kasvupaikkatekijöitä tarkastellaan useimmiten metsikkötasolla. Metsämaan ominaisuudet ja mikroilmasto voivat kuitenkin vaihdella merkittävästi metsikön sisällä (Tamminen 1991, Kuuluvainen ym. 1993). Lisäksi se tila maassa tai ilmassa, josta taimi ottaa kasvuresurssinsa, suurenee taimen ja sen latvuksen ja juuriston kasvaessa, joten yhden puun potentiaaliset kasvuresurssit eivät pysy vakiona sen eri ikävaiheissa.

Kasvuresurssien määrä vaihtelee kasvukausien ilmastollisen vaihtelun mukana. Tästä aiheutuu puiden kasvuun vuotuista ja jaksottaista ilmastollista vaihtelua. Lämpötilan ja sademäärän vaihteluja pidetään tärkeimpinä kasvun vuotuisten vaihtelujen aiheuttajina Etelä-Suomessa (Mikola 1950, Mielikäinen ym. 1998). Ennustetun ilmaston muutoksen tai ilman epäpuhtauksien ei ole havaittu aiheuttaneen Suomessa puiden kasvun trendinomaista muutosta luontaiseen pitkän ajan kasvun vaihteluun verrattuna (Nöjd 1990, Mielikäinen ja Sennov 1996, Spiecker ym. 1996).

Puiden välinen kilpailu kasvuresursseista ja fyysisestä tilasta pienentää kunkin puun käytettävissä olevia resursseja ja hidastaa kasvua. Nuoressa taimikossa pintakasvillisuuden kilpailulla on merkitystä puiden välisen kilpailun lisäksi. Samankokoisten puiden välinen kilpailu ei yleensä hidasta eikä nopeuta vallitsevien puiden pituuskasvua kuin poikkeuksellisen tiheissä nuorissa metsiköissä (Assman 1961). Suurempien puiden kilpailu pienentää alakynteen jääneiden puiden,

alikasvosten tai alemman jakson puiden pituuskasvua merkittävästi. Vaikutus riippuu puun ja puulajin rakenteellisista ja toiminnallisista ekofysiologisista ominaisuuksista. Puulajin kykyä menestyä alikasvosasemassa on yleensä kutsuttu varjonsietokyvyksi ja puulajeja on luokiteltu valo- ja varjopuiksi. Varjonsietokyky on määritelty mm. puun kyvyksi maksimoida nettoyhteyttäminen ja selvitä alikasvosasemassa (Spurr ja Barnes 1980) tai geneettiseksi tai fysiologiseksi kapasiteetiksi kehittyä ympäristössä, jonka merkittävin piirre on vähäinen valaistus (Daniel ym. 1979) sekä puun rakenteellisiksi tai toiminnallisiksi ominaisuuksiksi, jotka antavat sille kyvyn kasvaa varjostettuna alikasvoksena (Messier ym. 1999).

Varjonsietokyky on kuitenkin virheellinen nimitys, kun sitä käytetään synonyymina puun kyvylle menestyä alikasvosasemassa. Kyse ei ole pelkästään valokilpailun vaikutuksesta. Lehden ja puun tason vasteet paitsi valon myös ravinteiden ja veden saatavuuteen määräävät puun menestymisen ja kasvun alikasvosasemassa (Givnish 1988). Valo- ja juuristokilpailun vaikutuksen osuutta alikasvosten kehitykseen ei ole juuri tutkittu, koska niiden erottaminen on tutkimuksellisesti vaikea tehtävä. Kalela (1948) havaitsi kokeissaan juuristokilpailun eliminoimisen lisäävän kuusialikasvosten pituuskasvua merkittävästi.

Vauriot voivat häiritä taimen luontaisen kasvurytmin ja kasvuresurssien mukaista kehitystä. Taimet voivat vaurioitua luontaisten tekijöiden tai puunkorjuun ja metsänhoidon toimenpiteiden yhteydessä. Vaurio voi johtaa puun kuolemiseen (tuho), kilpailukyvyn menetykseen, laadun huononemiseen tai mennä ohi pysyviä vaikutuksia aiheuttamatta.

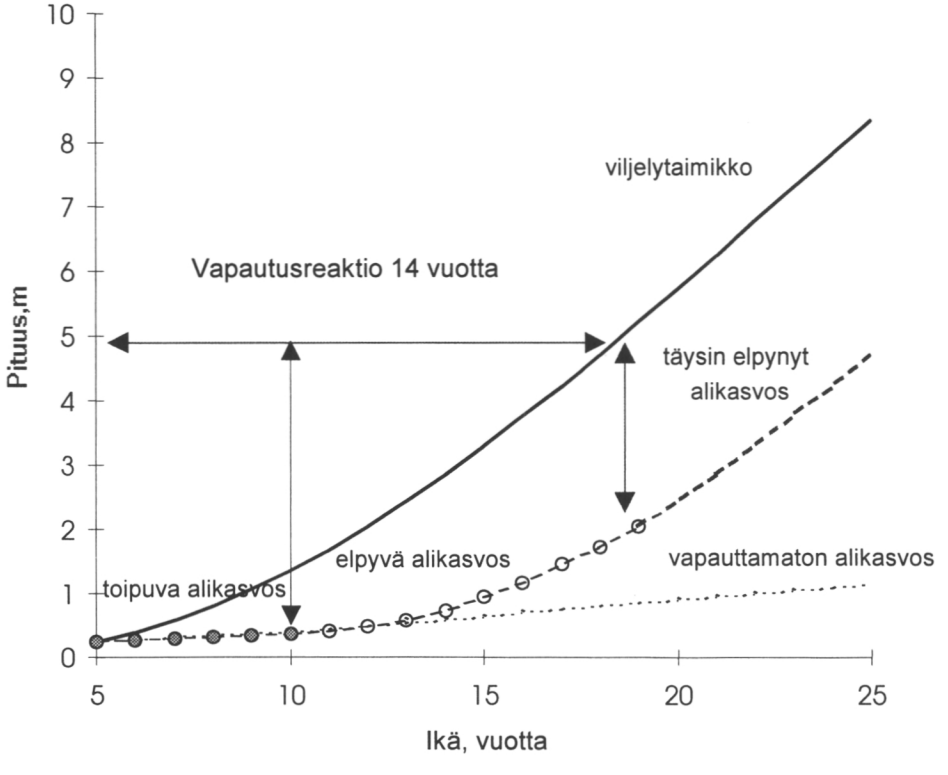
Kun puun fysikaalinen ympäristö ja kilpailutilanne muuttuvat äkillisesti esimerkiksi harvennuksessa tai alikasvospuun vapautuksessa, puut eivät välittömästi kasva yhtä nopeasti kuin samankokoiset, pitkään samoissa oloissa kasvaneet puut. Puut eivät pysty heti käyttämään vapautuneita kasvuresursseja tehokkaasti hyväkseen, eivätkä niiden rakenne ja elintoiminnot ole uuden ympäristön kannalta optimaaliset. Vapautettujen puiden kasvu alkaa jonkin ajan kuluttua kiihtyä, kunnes saavutetaan lisääntyneiden resurssien edellyttämä taso. Käytettävissä olevien resurssien muutoksen lisäksi muuttuvat muutkin ympäristön ominaisuudet kuten lämpötila, ilman kosteus, tuulen nopeus, lumipeite, tuholaisten esiintyminen. Ne vaikuttavat puun elintoimintoihin ja kasvureaktioon (Leopold ja Kriedemann 1975, Spurr ja Barnes 1980, Kimmins 1987, McCaughey ja Ferguson 1988, Oliver ja Larson 1990, Hannerz ja Gemmel 1994, Larcher 1995, Ruel ym. 1995). Tätä aikaisemman ympäristöolojen vaikutusta kasvuun ja sen väistymistä puun sopeutuessa uuteen ympäristöön kutsutaan vapautus- ja harvennusreaktioksi.

Puu sopeutuu uuteen ympäristöönsä muuttamalla päivittäisiä elintoimintojaan ja kasvattamalla uusia toiminnallisia osia. Suuri latvussuhde (latvuksen pituuden osuus puun koko pituudesta) merkitsee suurta ja usein hyväkuntoista latvusta, jonka avulla puu toipuu nopeammin kuin pienilatvuksinen puu. Nopea kasvu ennen vapauttamista ennustaa myös nopeaa toipumista (Oliver 1985, Seidel 1985). Muita nopeaa toipumista ennustavia tunnuksia ovat nuoruus, kasvun nopeutuva trendi ennen vapauttamista sekä hyvä terveys (Ruel ym. 1995).

Iän vaikutuksesta alikasvospuiden elpymiskykyyn on vaihtelevia tietoja.

Vanhemmat puut näyttävät yleensä reagoivan vapautukseen hitaammin kuin nuoremmat (Vaartaja 1951, Andersson 1988, McCaughey ja Ferguson 1988, Hannerz ja Gemmel 1994). Ilmiön ei kuitenkaan tarvitse välttämättä liittyä suoranaisesti ikään, vaan se voi olla seurausta pienemmästä resurssien tarjonnasta kilpailun tai kasvupaikkatekijöiden vaihdellessa metsikön sisällä. Puun ikään saattaa tosin liittyäkin elpymiskykyä heikentäviä rakenteellisia ja toiminnallisia muutoksia, mutta niiden merkityksestä on hyvin vähän tutkimustietoa (Oliver ja Larson 1990). Pienten ikäerojen merkitys toipumiskyvyn ja kasvureaktion ennustajana on käytännössä vähäinen ja vaikea todeta.

Vapautetun alikasvostaimen kasvureaktio voidaan jakaa eri vaiheisiin sen kasvunopeuden perusteella (kuva 5). Alikasvoksen kasvu pysyy vapauttamisen jälkeen aluksi ennallaan tai jopa hidastuu hieman. Tätä voidaan kutsua toipumisvaiheeksi. Jakson pituus vaihtelee alikasvoksen kunnon ja poistetun ylispuuston tiheyden mukaan. Suhteellisen hyväkuntoisilla, kehittämiskelpoisilla kuusialikasvoksilla jakson pituus on useissa tutkimuksissa ollut 2–7 vuotta (Cajander 1934a, Vaartaja 1951, Skoklefald 1967, Bergan 1971, Andersson 1988). Koivuylispuuston alta vapautettu kuusikko toipuu ja elpyy ylispuuston poistamisen jälkeen nopeammin kuin kuusikon alta vapautettu (Andersson 1984, Bergan 1987, Tham 1988a).



Kuva 5. Kaavakuva vapautetun alikasvoksen kasvun vaiheista. Ikä tarkoittaa sellaisen puhtaan viljelytaimikon valtapuun ikää, jonka pituus oli alikasvoksen vapautushetkellä (5 vuotta) sama kuin alikasvostaimen pituus.

Toista vaihetta voidaan kutsua elpymiseksi. Se kestää siihen saakka, kunnes vapautettu alikasvospuu kasvaa pituutta yhtä nopeasti kuin yhtä pitkä, aina vapaana kasvanut puu kasvaisi samassa ympäristössä (Oliver ja Larson 1990). Elpymisvaiheen pituutta kuusella ei ole juuri tutkittu Suomessa. Sen määrittäminen onkin vaikeaa. Elpyneen alikasvoksen ja vapaana kasvaneen puuston kasvujen yhtäsuuruutta on kentällä mahdotonta todeta ja mitata. Puiden kehityshistoria, geneettiset erot ja kasvupaikkavaihtelut aiheuttavat suuria metsiköiden välisiä ja metsiköiden sisäisiä puiden kasvun ja koon vaihteluja.

Vapautettujen, harvennettujen ja vapaana kasvaneiden puiden kasvujen vertailun tulokset riippuvat myös siitä, mitä mittoja vertaillaan. Alikasvospuun ja tiheässä taimikossa kasvaneen puun rungon ja latvuksen mittasuhteet poikkeavat vapaana kasvaneesta puusta. Vapautettujen puiden paksuuskasvu voi olla nopeampi kuin yhtä pitkien vapaana kasvaneiden puiden, sillä paksuuskasvu reagoi vapauttamiseen nopeammin kuin pituuskasvu (Vaartaja 1951, Fries 1964, Andersson 1984). Paksuuskasvua vertailtaessa on otettava huomioon, että puun runkomuoto on erilainen eri kilpailutilanteessa (Oliver ja Larson 1990).

1.7 Tutkimusongelmat

Tämän työn tarkoituksena on vertailla kuusen taimikoiden yleisimpiä kasvattamisvaihtoehtoja kivennäismaan viljavilla kasvupaikoilla (lehto, lehtomainen ja tuore kangas) Etelä-Suomessa (Oulun läänin etelärajan eteläpuolinen valtakunnan osa ja meren saaristo pois lukien). Tutkimuksen näkökulma on metsänhoidon tekniikkaan, metsiköiden puuntuotokseen ja taloudelliseen tuottoon liittyvien tekijöiden vertailu ja ongelmien ratkaiseminen kvantitatiivisin menetelmin. Tarkasteltavat kuusen taimikoiden kasvattamisen vaihtoehdot ja niihin liittyvät ongelmat ja tutkimustehtävät ovat seuraavat:

1. Puhtaana kasvatettava kuusen istutustaimikko

   Puhdas viljelykuusikko edustaa metsänhoidollisesti yksinkertaisinta vaihtoehtoa ja kuusen kannalta häiriöttömintä kehitystä kasvupaikkatekijöiden määräämissä rajoissa. Voidaan olettaa, että onnistuneesta viljelystä syntyneessä puhtaassa viljelykuusikossa saavutetaan kuusen taimikon nopein alkukehitys kaikkein varhaisinta, pintakasvillisuuden kilpailulle altista pituusvaihetta ehkä lukuun ottamatta (Oliver ja Larson 1990, Kaila 1994). Puhdas kuusikko on siten looginen referenssi kuusen taimikoiden kasvatusvaihtoehtojen vertailussa. Luontaisesti syntyvän lehtipuuston harventaminen on usein välttämätöntä kuusen viljelytaimikoissa. Lehtipuun kannoista syntyy usein runsaasti vesoja, varsinkin kun mekaaninen perkaus on lähes täysin syrjäyttänyt kemialliset ja mekaanis-kemialliset menetelmät. Käytännön kannalta on tärkeää tutkia
   - miten nopeasti hies- ja rauduskoivun siementaimet ja vesat kasvavat pituutta kuusen taimiin verrattuna
   - missä pituusvaiheessa taimikko kannattaa perata etteivät vesat enää ehdi kasvaa vallitsevaan asemaan.

   Ongelmien tarkastelemiseksi tehdään malleilla vertailulaskelmia puiden pituuskasvusta erilaisista lähtötilanteista (pituusero, perkausajankohta, koivulaji). Tutkimus koskee

ainoastaan asetelmaa, jossa koivuja on niin vähän ettei niiden kilpailu vaikuta kuusen pituuskasvuun.

2. Kuusialikasvoksen kasvattaminen

Uudistuskypsän kuusikon alta vapautettu hyväkuntoinen, elpymiskykyinen kuusialikasvos voidaan kasvattaa seuraavan puusukupolven lähtökohtana tai täydentävänä viljelytaimikon osana (Saksa ym. 1998a). Käytännön kannalta keskeisimpiä kysymyksiä ovat
- miten nopeasti vapautetun alikasvoksen pituuskasvu elpyy
- miten pitkään vapautusreaktio kestää
- miten nopeasti vapautetut alikasvostaimet kasvavat kuusen viljelytaimiin verrattuna
- millaiseksi alikasvoksen kokojakauma kehittyy viljelytaimikoihin verrattuna
- mikä on alikasvoksen tiheyden ja tilajärjestyksen merkitys sen kasvattamiskelpoisuudelle.

Edellä esitettyihin kysymyksiin pyritään vastaamaan laskemalla malleilla eri kokoisten alikasvostaimien pituuskasvua ja -kehitystä viljelytaimikoiden puihin verrattuna. Laskelmissa arvioidaan, millä nopeudella alikasvospuiden pituuskasvu lähestyy samankokoisten viljelytaimien kasvua, ja miten alikasvosten pituusjakauma kehittyy viljelykuusikoihin verrattuna. Alikasvoksen tiheyden ja tilajärjestyksen vaikutusta ei kuitenkaan tutkittu, koska käytettävissä ei ollut tutkimusaineistoa.

3. Luontaiset koivut kuusen viljelytaimikon täydentäjinä

Tutkimuksen lähtökohtana on, että siemensyntyisiä koivuja voidaan kasvattaa viljelytaimikoihin jääneiden aukkojen täydennyksenä. Kuusen ja täydentävien koivujen pituuden pitäisi kehittyä suunnilleen yhtä nopeasti, jotta koivut eivät kasvaisi ylispuiksi. Käytännön kannalta keskeinen kysymys on, minkä kokoisia koivun siementaimia pitäisi jättää kuusen taimikon aukkojen täydennykseksi, jotta ne eivät kasvaisi liian nopeasti ja saavuttaisi hallitsevaa asemaa kuuseen nähden. Malleilla tehdään vertailulaskelmia puiden pituuskasvusta erilaisista alkutilanteista lähtien (pituusero, koivulaji). Ne koskevat asetelmaa, jossa kuusten kanssa suunnilleen samankokoiset koivut kasvavat yksittäin niin suurissa aukoissa, ettei koivujen kilpailu vaikuta kuusten pituuskasvuun eikä kuusten kilpailu koivujen.

4. Koivuverhopuuston kasvattaminen kuusen viljelytaimikossa

Kuusen taimikkoon luontaisesti syntynyttä lehtipuustoa voidaan joutua perkaamaan useampaan kertaan, jos kuusikko halutaan kasvattaa puhtaana. Perkaamisen asemesta koivikko voidaan harventaa ja kasvattaa verhopuustona noin 15–20 vuoden ikään saakka hallatuhojen torjumiseksi sekä pintakasvillisuuden ja vesakon kilpailun vähentämiseksi. Käytännön kannalta keskeisiä kysymyksiä ovat:
- kuinka paljon koivikko vaikuttaa kuusikon kasvuun
- millaiset vauriot ja kustannukset sen harventamisesta ja poistamisesta aiheutuvat
- miten paljon hallavauriot vaikuttavat kuusen kasvuun. Tätä ei kuitenkaan voitu tutkia, koska käytettävissä ei ollut tutkimusaineistoa.

Ongelmien ratkaisemiseksi malleilla tehtävissä laskelmissa vertaillaan verhopuustoisen ja puhtaan viljelykuusikon kasvua, tuotosta, kustannuksia ja tuottoja ja taloudellista kannattavuutta olettaen, ettei hallalla ollut vaikutusta.

5. Kaksijaksoinen sekametsikkö, jossa koivuylispuusto kasvatetaan ainespuuksi

Verhopuustona tai muusta syystä kuusen taimikossa kasvatetun nuoren ylemmän koivujakson kasvattamista voidaan jatkaa kuusen ohitettua hallatuhoille alttiin

pituusvaiheen. Koivikko voidaan kasvattaa poltto- tai kuitupuuksi tai järeäksi puuksi taloudelliseen hakkuukypsyyteensä saakka. Koivikko hidastaa kuusikon kasvua mutta tuottaa puuta. Sen korjaaminen on vaikeaa ja kallista ja voi vaurioittaa kuusikkoa. Käytännön kannalta keskeisiä kysymyksiä ovat:

- kannattaako koivuylispuusto poistaa heti kun kuusi on ohittanut hallalle alttiin pituusvaiheen vai kannattaako sen kasvattamista jatkaa puun tuottamiseksi
- miten nopeasti ylempi koivujakso kasvaa ja paljonko se tuottaa puuta eri lähtötiheydellä
- miten paljon tiheydeltään erilainen koivuylispuusto vaikuttaa kuusijakson kasvuun
- millaiset korjuuvauriot koivuylispuuston harvennuksesta tai poistamisesta aiheutuu kuusikolle ja miten suuri tuotostappio korjuuvaurioista seuraa
- mikä on koivujakson lisätuotoksen ja kuusen kasvun hidastumisesta ja korjuuvaurioista aiheutuvan tuotostappion erotus, suhde ja taloudellinen arvo
- mikä on koivujakson tuottavin kasvatustiheys ja kasvatusaika
- millainen tuotos- ja kannattavuusero on hies- ja rauduskoivun välillä.

Ongelmien ratkaisemiseksi vertaillaan malleilla tehtävissä laskelmissa kaksijaksoisen ja puhtaan viljelykuusikon kasvua, tuotosta, kustannuksia ja tuottoja ja taloudellista kannattavuutta, kun koivujakson puulajia ja tiheyttä vaihdellaan.

Työ perustuu neljään osatutkimukseen, joihin viitataan jatkossa roomalaisilla numeroilla I–IV. Osatutkimuksilla oli seuraavat yleistavoitteet:

I Laatia mallit puhtaana kasvatettavien kivennäismaiden viljelykuusikoiden kehityksen kuvaamiseksi 10 metrin valtapituusvaiheeseen saakka
II Laatia mallit vapautettujen alikasvostaimien pituuskasvun kuvaamiseksi
III Laatia kaksijaksoisen kuusi-koivu -sekametsikön puiden kasvumallit ja selvittää kuinka paljon tiheydeltään ja kooltaan vaihteleva koivuylispuusto tuottaa puuta ja kuinka paljon se hidastaa kuusikon kehitystä
IV Tutkia malleilla simuloimalla onko taloudellisesti kannattavaa kasvattaa nuoressa viljelykuusikossa luontainen koivuylispuusto sen taloudelliseen hakkuukypsyyteen asti

Osatutkimusten I–IV tulosten lisäksi työssä käytetään seuraavia täydentäviä malleja:

1. Kuusen alikasvostaimikoiden pituusjakaumien mallit (luku 2.4.1)
2. Kuusen viljelytaimikoiden aukkoihin täydennykseksi jätettyjen hies- ja rauduskoivujen pituuskasvumallit (luku 2.4.2)

2 Menetelmät

2.1 Lähestymistapa

Tämän työn ja sen osatutkimusten lähestymistapa on metsiköiden ja puiden tilan ja kehityksen mallittaminen ja vaihtoehtojen vertailu malleilla tehtävien laskelmien avulla. Kasvattamisvaihtoehtojen vertailukriteereinä ovat taimikoiden puuntuotannollinen arvo, jonka mittareita ovat puuntuotoskyky ja rahallinen tuotto. Jos luotettavia, koko kiertoajan kattavia tuotos- ja tuottoennusteita ei pystytä laskemaan malleilla, taimikon puuntuotannollista arvoa tarkastellaan sen rakenteen (tiheys, kokojakauma, puulajisuhteet) ja kasvunopeuden perusteella. Näiden tunnusten perusteella arvioidaan taimikon kehittämiskelpoisuutta ja ennakoidaan sen tuotos- ja tuottokykyä sekä toimenpidetarvetta. Tutkimus koskee runkoluvultaan vakiintuneita taimikoita, joissa taimikon kehitykseen olennaisesti vaikuttavia puita ei enää synny vesoja lukuun ottamatta. Taimettumisvaihe noin 0,5–1 metrin valtapituuteen asti ei kuulu tämän tutkimuksen piiriin. Kuusikon sekapuulajeista käsitellään ainoastaan koivua.

Metsäntutkimuksessa mallituksen ja simuloinnin lähestymistapa ja mallien muoto valitaan tutkimuskohteen, tutkimusongelmien sekä käytettävissä olevien aineistojen mukaan (Blake ym. 1990, Varmola 1996). Seuraavassa tarkastellaan lyhyesti erilaisia metsikön puuston ja puiden tilan ja niiden kehityksen kuvaamiseksi käytettyjä mallityyppejä nuorten metsien mallittamisen näkökulmasta ja esitetään perustelut tässä työssä käytetyille malleille.

Malli -nimitystä on käytetty metsäntutkimuksessa varsin vapaamielisesti. Yhtä yhtälöä, useiden yhtälöiden muodostamaa rekursiivista systeemiä, monimutkaisia malleista koostuvia simulointisysteemejä sekä tiettyä käyttökohdetta varten laadittua, yhdessä tutkimusraportissa esitettyä mallijoukkoa on kaikkia kutsuttu lyhyesti malleiksi.

Kasvu- ja tuotosmallit voidaan jakaa prosessimalleihin ja empiirisiin malleihin. Prosessimalleissa kuvataan yksittäisten puiden elintoimintoja, rakennetta ja kasvua perustoimintojen kuten hiili-, ravinne- tai vesitaseiden tasolla. Puun sisäisiä sekä puun ja ympäristön välisiä vuorovaikutuksia pidetään kausaalisina tai mekanistisina (Godfrey 1983, Mäkelä ja Hari 1986, Blake ym. 1990, Nikinmaa 1992). Suomessa prosessimalleja on tehty runsaasti lähinnä taimikkovaihetta varttuneempien metsiköiden puille, mäntyyn keskittyen (Hari ym. 1982, Mäkelä ja Hari 1986, Oker-Blom 1986, Mäkelä 1988, 1997, Oker-Blom ym. 1989, Kellomäki ym. 1992b, 1997, Nikinmaa 1992, Sievänen 1992, Pukkala ym. 1993, Salminen ym. 1994, Kellomäki 1995, Berninger 1996, Hari 1996, Nikinmaa ja Hari 1996, Perttunen ym. 1996, Perttunen ja Nikinmaa 1998). Prosessimalleja on niiden monimutkaisuuden takia käytetty vielä melko vähän käytännön metsätalouden päätöksenteon ja käsittelyvaihtoehtojen vertailun välineinä.

Tässä tutkimuksessa sovellettiin empiirisiä malleja. Empiirisessä lähestymistavassa kuvataan tutkimuskohteessa havaittuja ilmiöitä ja siitä mitatussa tutkimus-

aineistossa havaittuja muuttujien välisiä riippuvuussuhteita tilastomatemaattisilla malleilla käytännön kannalta käyttökelpoisessa ja teoreettisesti pätevässä muodossa (Munro 1974, Blake ym. 1990). Mallien rakenne perustuu tietoon puiden elintoimintojen ja kasvun perustekijöiden suhteista. Mallien teoreettisissa perusteluissa ja rakenteen muotoilussa voitiin tässä tutkimuksessa hyödyntää varttuneempien metsien ja nuorten männiköiden mallittamisen kotimaista paradigmaa, josta ovat julkaisseet katsauksia Vuokila (1983), Kangas ym. (1990), Mäkelä ja Salminen (1991) sekä Hynynen (1995b, 1996).

Luontaisten ja viljeltyjen puhtaiden kuusikoiden kehitykselle on olemassa useita suomalaisia metsikkö- ja puutason malleja (Gustavsen 1977, 1980, Mielikäinen 1978, Nyyssönen ja Mielikäinen 1978, Vuokila ja Väliaho 1980, Pukkala ja Kolström 1988, 1991, Henttonen 1990, Ojansuu ym. 1991, Kolström 1992, 1993, Hynynen 1995b, 1996, Hökkä 1997b, Hökkä ym. 1997, Pukkala ym. 1997). Mallien aineistosta ja käyttöalueesta puuttuu kuitenkin systemaattisesti varhaiskehityksen osuus (T <20 vuotta, H_{dom}<5–10 m). Ruotsissa käytetään kuusikoiden kehityksen ennustamiseen Erikssonin (1976) ja Elfvingin (1982) laatimia varttuneiden kuusikoiden malleja sekä Nyströmin (1988) ja Nyströmin ja Kexin (1996) laatimia kuusikoiden varhaiskehityksen malleja.

Varhaiskehityksen malleja on Suomessa laadittu lähinnä vain puhtaille männiköille. Tavallisimpien puu- ja metsikkötunnusten lisäksi niissä on käytetty eräitä vain varhaiskehitykseen vaikuttavia tekijöitä, kuten viljelytapa ja pintakasvillisuuden tai vesakon kilpailu. Varmola (1989) laati männyn istutustaimikoille puukohtaisen lustonleveysmallin, ja Salminen ja Varmola (1990) nuoren kylvömännikön keskiläpimitan kasvumallin. Varmola (1993) laati nuorten puhtaiden viljelymännikköiden metsikkökohtaisen mallin laajasta kerta-aineistosta ja käytti sitä osana viljelymännikköiden kasvun ja laadun simulointitutkimusta (Varmola 1996). Luontaisille männiköille ei ole laadittu yleistä kehitysmallia. Ruha ym. (1997) tutkivat mallittamalla luontaisen männikön puiden pituusaseman pysyvyyttä. Nuorten männiköiden mallittamista on kehittänyt myös Kolström (1991) käyttäen suppeaa tutkimusaineistoa. Nuorten männiköiden kasvua ja laatua mallittamalla lähestyneen tutkimushankkeen menetelmät ja keskeiset tulokset on esitetty hankkeen loppuraportissa (Kellomäki ym. 1992a).

Kuusikoiden varhaiskehityksen kuvaamiseksi ei ole laadittu yleisiä malleja Suomessa. Cajanderin (1934b) laatimia eteläisimmän Suomen puhtaiden viljelykuusikoiden varhaiskehityssarjoja voidaan pitää mallien edeltäjinä. Niiden soveltamista nykyisiin kuusentaimikoihin vaikeuttaa mm. erilainen viljelytekniikka (paljasjuuritaimien istutus ilman maanmuokkausta, kylvö) ja viljelytiheys (keskimäärin 4 000 kpl ha^{-1}). Graafisesti tasoitettuja ja taulukoituja kehityssarjoja on hankala käyttää.

Metsäntutkimuslaitoksen Mela-järjestelmään kuuluvissa luonnonprosessien malleissa on kuvattu taimikoiden varhaiskehitystä malleilla, jotka ovat varttuneempiin metsiin keskittyneen aineistonsa takia epävarmat alle viiden metrin valtapituudella. Varhaisin kehitys kuvataankin niissä rinnankorkeusiän saavuttamiseen kuluvana aikana (Ojansuu ym. 1991, Hynynen 1995b, 1996). Hiltusen (1981)

laatimilla turvemaiden kuusen taimikoiden malleilla ei aineiston suppeuden takia ole yleistä käyttöä. Kailan (1994) metsänviljelyn vaihtoehtojen vertailusysteemissä on taimikoiden kehityksen kuvaamiseksi mallit yli 5 vuoden ikäisille taimille. Yhtälöiden kertoimet ovat asiantuntija-arvioita, eivät empiirisistä aineistoista estimoituja parametreja.

Sekametsien mallitusta on tehty Suomessa 1980-luvulta lähtien. Mielikäinen (1980, 1985) mallitti yksijaksoisten mänty-koivu- ja kuusi-koivu -sekametsiköiden kasvua. Malleista puuttui varhaisimman kehityksen osuus, jossa ratkeaa tuleeko metsiköstä yksi- vai kaksijaksoinen. Pukkalan (1981) laatimat mallit kuvasivat havupuu-koivu -sekataimikoiden tilaa neljältä istutuskokeelta hankitussa poikkileikkausaineistossa. Kokeissa oli istutettu koivu jomman kumman havupuun kanssa yhtaikaa. Mallit kuvasivat havupuiden kuolleisuutta sekä kaikkien puulajien metsikkökohtaista pituutta, läpimittaa ja tilavuutta vain yhtenä ajankohtana, koivun 14–16 metrin valtapituusvaiheessa. Pukkala ym. (1994, 1997) ja Vettenranta (1996, 1999) ovat mallittaneet ja tutkineet simuloinnein mänty-kuusi -sekametsiköiden kehitystä. Taimikkovaiheen edustavuus ja varhaiskehityksen mallit puuttuvat kuusen sekametsiköidenkin osalta. Mela-järjestelmän kasvumallit toimivat myös sekametsissä (Hynynen 1995b, 1996). Empiirisiä malleja on käytetty hyvin yleisesti sekametsien rakenteen ja kehityksen tutkimuksissa Pohjois-Amerikassa (ks. Seppänen 1997), Pohjois-Euroopassa (Agestam 1985, Ekö 1985, Tham 1988a, 1988b, 1994) ja Keski-Euroopassa (Pretzsch 1992, Hasenauer 1994, Sterba ym. 1995).

Alikasvoksien kehitykselle ei ole tehty malleja Suomessa, eikä juuri muuallakaan Euroopassa. Pohjois-Amerikassa, etenkin lännessä, on ollut jonkin verran kiinnostusta vapautetun alikasvoksen kehityksen ja kasvureaktion mallitukseen (Oliver 1985, Seidel 1985, Morin ja Gagnon 1992, Tesch ja Korpela 1992, Pothier ym. 1995, Ruel ym. 1995,).

2.2 Empiiristen mallien soveltaminen

2.2.1 Metsikkö- ja puutason mallit

Empiiriset mallit voidaan jakaa metsikkötason ja puutason malleihin. Metsikkötason malleissa kuvataan metsikön puuston keski- ja jakaumatunnusten kehittymistä ajan ja toimenpiteiden funktiona. Metsikkötason malleilla voidaan kuvata luotettavasti tasaikäisten ja tasarakenteisten taimikoiden kehitystä. Yksittäisten puiden malleilla ei silloin yleensä saavuteta merkittävää hyötyä metsikkötason malleihin verrattuna.

Yksittäisen puun kehityksen malleja tarvitaan rakenteeltaan epätasaisten metsiköiden ja sekametsiköiden kasvun ja kehityksen ennustamiseen. Tällöin on usein välttämätöntä tutkia puiden kehityksen vaihtelua ja keskinäistä vuorovaikutusta metsikön sisällä. Niillä ei tosin päästä merkittävästi parempaan tarkkuuteen metsikkökohtaisten, koko puustoa koskevien tunnusten kuvaamisessa (Pukkala ja Kolström 1987, Daniels ja Burkhart 1988, Zeide 1993, Hasenauer 1994, Biging ja Dobertin 1995, Varmola 1996).

Puuston kokojakauman kehityksen ennustemalleja voidaan pitää metsikkötason mallien erikoistapauksena. Niissä ennustetaan puuston kokojakauman kehitystä mm. ajan ja käsittelyn funktiona (Bailey 1980, Clutter ym. 1983, Hyink ja Moser 1983, Saramäki ja Sekeli 1984, Daniels ja Burkhart 1988, Saramäki 1992). Siirtymämatriisimalleissa ennustetaan puiden siirtymistodennäköisyyksiä kokoluokista seuraaviin puun läpimitan funktiona (Leslie 1945, Usher 1966, 1969, Pukkala ja Kolström 1988, Kolström 1992). Kummallakin tavalla tuotetuista jakaumista voidaan poimia otos puita ja käyttää puukohtaisia staattisia malleja esimerkiksi puun dimensioiden, tilavuuden ja puutavaralajien osuuksien ennustamiseen. Tavoitteena on saada tarkempia ennusteita kuin pelkkiä metsikkötunnuksia käyttävillä malleilla.

Tässä tutkimuksessa käytettiin puutason kasvumalleja. Tutkimuksen tavoitteena oli vertailla eri kokoisten, eri tavalla syntyneiden ja eri puulajien puiden kehitystä metsikön sisällä ja tarkastella sitä kautta metsiköiden rakenteen kehitystä ja käsittelytarvetta. Metsikkötason malleja käytettiin metsikkötason ilmiöiden, kuten puuston kokojakauman, kuolleisuuden ja korjuuvaurioiden kuvaamiseen, sekä puhtaiden kuusikoiden taimikkovaiheen jälkeisen kehityksen ennustamiseen.

2.2.2 Kokojakauma

Yksittäisten puiden kasvumallien käyttö edellyttää yleensä täydennyksekseen mallit, joilla muodostetaan laskelmien lähtötilanteen puujoukon puukohtaiset tunnukset metsikkötason tunnuksista. Kokojakaumia on yleisesti kuvattu sovittamalla koealoittaisiin havaintoihin jokin jakaumafunktio. Läpimittajakaumia varten on käytetty mm. Weibull -jakaumaa (Bailey ja Dell 1973, Kilkki ja Päivinen 1986, Magnussen 1986, Kilkki ym. 1989, Hökkä ym. 1991), Beta-jakaumaa (Päivinen 1980, Siipilehto 1988, Maltamo ym. 1995) ja Johnsonin SB-funktiota (Hafley ja Schreuder 1977, Mönness 1982, Tham 1988b, Siipilehto 1996). Kaksiulotteisella Johnsonin SBB-jakaumalla on kuvattu samalla kertaa pituus- ja läpimittajakauma (Hafley ja Schreuder 1977, Hafley ja Buford 1985, Siipilehto 1996). Empiirisiin aineistoihin sovitettujen jakaumien parametrien tai muiden jakaumaa kuvaavien tunnusten ja metsikkötunnusten yhteyden perusteella on laadittu malleja, joilla generoidaan kokojakaumia metsikkötason tunnuksista. Weibull- jakaumilla menetelmää ovat käyttäneet mm. Hyink ja Moser (1983), Kilkki ja Päivinen (1986) ja Kilkki ym. (1989).

Pituusjakauma voi olla taimikoissa läpimittajakaumaa käyttökelpoisempi kokojakauman edustaja. Nuorissa metsissä koealan kaikista puista mitataan yleensä pituus läpimitan sijasta. Pieniä puita, joilla ei ole vielä rinnankorkeusläpimittaa, on viljelytaimikoissa vielä runsaasti valtapuiden saavutettua 2–3 metrin pituuden. Rinnankorkeusläpimitan sijasta voitaisiin periaatteessa käyttää kantoläpimittaa. Se on kuitenkin hankala mitata, eikä sitä juuri käytetä kasvumalleissa.

Tässä työssä taimikon kokojakauma ja lähtötilanteen generointi tehtiin pituusjakauman perusteella. Taimikoiden metsikkökohtaisiin pituusjakaumiin sovitettiin Weibull-jakauma. Sen parametrit on helppo estimoida luotettavasti, ja niillä on looginen ja ennustemallien laatimisen kannalta käyttökelpoinen yhteys metsikkö-

kohtaisiin puustotunnuksiin. Weibull-jakauman tiheysfunktio on

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

jossa x on muuttuja ja α, β ja χ ovat parametreja. Niistä a määrittää jakauman alarajan eli minimipituuden, β jakauman leveyden ja χ jakauman muodon (Kangas ym. 1990). Parametrien ennustamiseksi laadittiin regressiomallit puhtaiden kuusikoiden aineistossa (I). Näitä malleja käytettiin myös kaksijaksoisten sekametsien kuusijaksoille (III), koska niiden havaittiin testissä toimivan hyvin myös kaksijaksoisissa metsiköissä (IV). Alikasvoskuusikoiden pituusjakaumiin sovitettiin Weibull- jakaumat ja parametrien ennustamiseksi laadittiin regressiomallit (luku 2.4.1). Kaksijaksoisten sekametsiköiden koivujaksojen läpimittajakaumat generoitiin normaalijakaumalla (IV).

Kun pituus- tai läpimittajakaumalla on generoitu puille pituus tai läpimitta, toinen tunnus ennustetaan yleensä erillisellä mallilla, joka kuvaa puun pituuden ja läpimitan suhteen. Selittävinä muuttujina on käytetty myös puu- ja metsikkötason tunnuksia (Näslund 1936, Varmola 1980, Kilkki 1983, Veltheim 1987, Henttonen 1989, Hökkä 1997a). Tässä työssä pituusjakaumasta poimituille puille ennustettiin rinnankorkeusläpimitat tutkimusaineistoista laadituilla malleilla (I, III, IV). Jäännösvaihtelu jaettiin sekamallitekniikalla metsikkö- ja puutason vaihteluun (I, IV).

2.2.3 Tilajärjestys ja kilpailu

Yksittäistä puuta kuvaavat empiiriset mallit voidaan jakaa puiden välisestä etäisyydestä riippuviin ja etäisyydestä riippumattomiin malleihin sen mukaan, kuvataanko puiden välinen kilpailu spatiaalisilla vai ei-spatiaalisilla indekseillä (Munro 1974). Spatiaaliset indeksit ovat puukohtaisia. Ne kuvaavat puuhun kohdistuvaa kilpailua sen lähiympäristön puuston tiheyden, koon ja etäisyyden funktiona. Ei-spatiaaliset indeksit ovat metsikkökohtaisia. Välimuotona voidaan pitää indeksejä, joissa kilpailutunnus lasketaan kohdepuun lähiympäristöön rajoitetulta pieneltä kiinteäsäteiseltä koealalta ottamatta huomioon puiden etäisyyttä kohdepuusta tai tilajärjestystä koealan sisällä. Tällainen indeksi ottaa huomioon spatiaalisen vaihtelun puiden lähiympäristöjen välillä mutta ei niiden sisällä.

Taimikon tilajärjestystä ei käytetty tässä tutkimuksessa puiden kasvun ennustamiseen. Spatiaalista tietoa oli mitattu vain aineistojen IB ja III kasvatuskelpoisista taimista. (Osatutkimuksen I aineistot IA ja IB on esitelty luvussa 3.1.2). Puukohtaisten mallien kilpailumuuttujat olivat metsikkökohtaisia. Puukohtaisilla, etäisyydestä riippuvilla indekseillä ei yleensä saavuteta etuja metsikkökohtaisiin verrattuna, jos puuston tilajärjestys ja kokojakauma ovat tasaiset (Biging ja Dobertin 1995, Pretzsch 1995). Puuston tilajärjestyksen plottaaminen ja silmävarainen tarkastelu osoittivat, että kuusen viljelytaimikoiden (IB, III) ja koivuylispuuston (III) tilajärjestykset olivat hyvin tasaisia. Tarkastelun tulokset olivat yhtäpitäviä taimikoiden ja nuorten metsiköiden tilajärjestystä koskeneiden tutkimusten tulosten

kanssa: viljelytaimikot perustetaan yleensä Poissonin satunnaisjakaumaa säännöllisempään tilajärjestykseen. Jos kuolleisuus on vähäinen eikä luontaista täydennystä tule tai se poistetaan, muokkaamattomaan tai äestettyyn tai laikutettuun maahan viljeltyjen nuorten kuusen taimikoiden tilajärjestys on satunnaista säännöllisempi (Pohtila 1980). Nuorten kuusivaltaisten metsiköiden (D_g <10 cm) tilajärjestykset ovat Tompon (1986) mukaan säännöllisempiä kuin männiköiden. Myös hyvin onnistuneiden taimikoiden valitseminen tutkimusaineistoon ja koealojen sijoittaminen tasaisiin, täystiheisiin kohtiin johtivat tasaisen tilajärjestyksen korostumiseen tutkimusaineistoissa (I, III).

Puukohtaisia kilpailuindeksejä tosin kokeiltiin kuusen viljelytaimikoiden puukohtaisissa kasvumalleissa (I) ja niitä täydentävien koivujen malleissa (luku 2.4.2). Kilpailuindekseinä kokeiltiin puun lähiympäristökoealan puiden pituussummaa puun kokoa eri tavoilla painottaen. Ne eivät saaneet merkitseviä kertoimia kokeilluissa malleissa eikä niitä käytetty lopullisissa malleissa. Tärkein syy niiden heikkoon korrelaatioon puun kasvun kanssa oli ilmeisesti taimikoiden ja ylispuustojen tasainen tilajärjestys ja kokojakauma sekä vähäinen sekapuusto. Heikko korrelaatio saattoi osittain aiheutua liian pienestä lähiympäristökoealasta aineistossa IB (ympyrän säde yksi metri). Siitä aiheutui satunnaista ja systemaattista virhettä selittävän kilpailumuuttujan arvoon, mikä pienensi indeksin regressiokertoimen ja t-arvon itseisarvoa.

2.2.4 Kasvupaikka

Kasvupaikkojen luokittelussa metsätalouden tarpeita varten on käytetty Suomessa Cajanderin (1909) teorian mukaisia metsätyyppejä ja niistä johdettuja kasvupaikkatyyppejä. Ne toimivatkin hyvin metsänuudistamisen päätöksenteon pohjana ja niiden välillä on johdonmukaiset erot puuntuotantokyvyssä (Ilvessalo 1920, Ilvessalo ja Ilvessalo 1975). Metsätyyppeihin liittyy kuitenkin ongelmia kasvun mallituksessa. Metsätyypin määritys voi taimikossa ja sekametsässä olla epävarmaa. Kasvupaikan ja puuntuotoskyvyn vaihtelu metsätyypin sisällä voi olla hyvin suuri (Tamminen 1993). Karkea metsätyypin luokkamuuttujan käyttäminen ei ole tilastomatemaattisissa malleissa läheskään niin joustavaa kuin jatkuvien muuttujien (Vuokila 1983). Kasvun mallituksessa onkin Suomessa siirrytty käyttämään valtapituusboniteetteja Vuokilan (1965) tutkimuksesta lähtien. Metsätyyppejä käytetään kuitenkin rinnan niiden kanssa määrittämällä mitä pituusboniteettia kukin metsätyyppi tietyn puulajin valtapituuskehityksen mukaan vastaa.

Valtapituusboniteetin (puuston valtapituus tietyllä referenssi-iällä) käyttö kasvupaikan puuntuotoskyvyn kuvaajana perustuu puuston pituuskasvun ja puuntuotoskyvyn välillä vallitsevaan hyvin vahvaan korrelaatioon. Valtapituuskehitys on lähes riippumaton puuston tiheydestä ja alaharvennuksen voimakkuudesta tasaikäisissä, tasakokoisissa metsiköissä (Assman 1961, Sterba 1982, Clutter ym. 1983). Toinen keskeinen olettamus on, että puuston potentiaalisen tilavuuden kehitys korreloi vahvasti valtapituuden kehityksen kanssa (Sterba 1982). Todellinen puuntuotos ja sen kokojakauma riippuvat lisäksi puuston tiheydestä ja käsittelystä

puiden välisen kilpailun ilmentyminä (Assman 1961, Clutter ym. 1983).

Pituusboniteetin määrittämiseen ja pituusboniteetin käyttämiseen kasvupaikan puuntuotoskyvyn indikaattorina liittyy taimikoissa enemmän ongelmia kuin varttuneissa metsiköissä. Koska valtapituuden ja iän suhde edustaa taimikoissa lyhyen ajanjakson kasvua, kasvun vaihtelut vaikuttavat taimikon kasvuun suhteellisesti enemmän kuin varttuneissa metsissä (Hägglund 1976). Alkuvaiheen pituuskehitys on myös herkkä pintakasvillisuuden ja vesakon kilpailulle ja tuhoille sekä kasvupaikan mikrovaihteluille. Valmiiden ikä-valtapituuskäyrien suoran soveltamisen lisäksi taimikoissa voidaan käyttää metsätyyppien alueellisia pituusboniteetteja tai tietyn ajanjakson ja pituusvaiheen pituuskasvua eli ns. välipituusmenetelmää (Hägglund 1976, Gustavsen 1987, Varmola 1996).

Mikään kasvu- ja tuotostutkimuksessa yleisesti käytetyistä kolmesta bonitointimenetelmästä (Gustavsen 1987) ei soveltunut suoraan puhtaiden viljelykuusten mallin (I) aineistoon. Vuokilan ja Väliahon (1980) viljelykuusikoiden valtapituusyhtälöä voidaan soveltaa vain yli kahdeksan metrin valtapituudella. Vain yhdeksässä taimikossa 36:sta oli aineistossa kasvuhavaintoja siitä pituusvaiheesta, jossa välipituusmenetelmää sovelletaan (Hägglund 1976, Varmola 1993). Metsätyypin alueellista vastinboniteettia pidettiin liian karkeana ja epäluotettavana menetelmänä mallittamista varten (Varmola 1993, 1996). Lisäksi tutkimuksessa (I) sovellettiin yleisesti käytettyä pituuskehityksen mallin muotoa, jossa puun pituuskasvu estimoitiin kertomalla valtapituuden kasvu puun kokoa ja kilpailuasemaa kuvaavalla kerroinmallilla (Hynynen 1995a). Kasvupaikan puuntuotoskyvyn kuvaajana käytettiin metsikön valtapituusmallia, jonka mukainen taimikon valtapituus 25 vuoden referenssi-iässä oli taimikon pituusboniteetti (H_{25}). Tätä tunnusta käytettiin joissakin kasvumalleissa selittävänä muuttujana (I ja luku 2.4.2).

Suoraa ikä-valtapituus -bonitointia ei voitu tehdä kuusialikasvokselle (II), eikä sekametsikön alemmalle kuusijaksolle (III), sillä ylispuusto oli ilmeisesti vaikuttanut pituuskasvuun. Pituusboniteettihan ei kuvaa suoraan kasvupaikan tuottokykyä vaan kasvupaikan ja puuston yhdistelmän tuottokykyä (Kilkki ja Ojansuu 1981). Alikasvosmetsiköissä määritettiin valtapituusboniteetti H_{100} ylispuuston tunnuksista luontaisesti syntyneiden metsiköiden mallilla (Gustavsen 1980). Kaksijaksoisissa sekametsissä pituusboniteetti määritettiin ylispuukoivikon valtapituuden ja iän perusteella (H_{50}) Gustavsenin ja Mielikäisen (1984) mallilla. Kuusen valtapituusboniteetti (H_{100}) laskettiin koivun ja kuusen boniteettien vastaavuuden perusteella (Mielikäinen 1985). Koivikoiden mukaan määritettyihin boniteettiarvoihin saattoi sisältyä puuston aiemmasta käsittelystä aiheutunutta tuntematonta vaihtelua.

Vertailulaskelmissa käytettiin tutkimusten II ja III malleja rinnan sellaisten mallien kanssa, joissa boniteetti oli mukana selittävänä muuttujana. Boniteettia ei tällöin vaihdeltu, vaan sille käytettiin ainoastaan yhtä, aineiston keskimäärää vastannutta vakioarvoa. Malleja rinnakkain käytettäessä oli huolehdittava siitä, että tulokset edustivat samaa kasvupaikkaa ja siitä, ettei mallien muotojen erosta aiheutunut harhaa vertailun tuloksiin. Harhattomuus ja yhteensopivuus varmistettiin testaamalla mallien antamat pituuskehityksen ennusteet ristiin ja vertaamalla niitä muiden tutkimusten mukaisiin kehityskäyriin (I, III, IV).

2.2.5 Vapautusreaktio

Alikasvoksen ja ylispuuston alta vapautetun taimikon kasvureaktion mallittamisen loogisin ja tulosten kannalta selkein lähestymistapa olisi laatia kerroinmalli vapaana kasvaneiden puiden mallin yhteyteen. Tätä varten olisi kuitenkin tiedettävä tarkasti, mitä vapaana kasvaneen taimen kasvukäyrää vapautetun taimen kasvukäyrä lähestyy elpymisen edistyessä (kuva 5). Tämä ei ole yleensä mahdollista. Muut tekijät vakioivia koeaineistoja ei ole ollut käytettävissä. Niinpä kasvureaktio on yleensä kuvattu pituuden ja läpimitan kasvumalleihin lisättyjen selittävien muuttujien avulla. Potentiaalisen kasvun ja kasvureaktion erottaminen on tällöin vaikeaa. Selittävinä muuttujina on käytetty mm. kasvua ennen vapauttamista, kasvupaikkaluokkia, puun ikää, latvussuhdetta, latvuksen leveyttä ja puun kokoa (Oliver 1985, Seidel 1985, Tesch ja Korpela 1992). Tämän tutkimuksen vapautettujen alikasvosten pituuskasvumallissa (II) käytettiin puun koon ja kasvun suhdetta yhtälön perusmuotona (Zeide 1993). Kasvureaktion suuruutta ja kestoa kuvasi poistetun puuston pohjapinta-ala ja vapauttamisesta kulunut aika.

Koivuylispuuston alta vapautettujen kuusikoiden mallin (III) aineisto oli liian pieni, jotta vapautusreaktiota kuvaava tekijä olisi voitu ottaa mukaan malleihin. Vapautusreaktion vaikutus kasvuun arvioitiin simuloinneissa kuuden ylispuustosta vapautetun kuusikon puiden pituuskasvureaktion graafisen tarkastelun, mallien I ja III ristiin testauksen ja kirjallisuuden perusteella. Harvennuksen jälkeistä kasvureaktiota ei kuvattu malleissa. Sen vaikutusta voidaan pitää merkityksettömänä tässä tutkimuksessa käsitellyissä nuorissa, puhtaissa taimikoissa ja harvoissa ylispuukoivikoissa.

2.2.6 Syntytapa

Koivun syntytapaa ei voitu ottaa huomioon kuusen taimikoita täydentävien koivujen malleissa (luku 2.4.2), koska kasvatuskelpoisiksi ja sitä kautta kasvukoepuiksi kelpuutettiin aineistossa lähes pelkästään siemensyntyisiä taimia. Puukohtaista vesaaineistoa ei ollut riittävästi. Koivun vesojen pituuskasvun kuvaamiseen käytettiin ruotsalaisia koivuvesojen kasvumalleja (Björkdahl 1983). Malleissa oli eräitä Ruotsissa käytettyjä mutta meillä harvinaisia muuttujia, joiden arvot korvattiin vakioilla. Kasvupaikkojen vastaavuus saatiin Varmolan (1993) tutkimuksesta.

2.2.7 Kasvun vaihtelu

Kasvun vaihtelu otetaan puun tai metsikön empiirisiä kasvumalleja laadittaessa yleensä huomioon korjaamalla laadinta-aineiston kasvuhavainnot kasvuindeksillä, joka on vuoden tai vuosijakson kasvun suhde indeksin laadinta-ajanjakson keskimääräiseen tasoon (Mikola 1950, Henttonen 1990, Mielikäinen ym. 1998). Indeksejä on Suomessa laadittu ja käytetty ainoastaan läpimitan kasvulle mutta ei pituuskasvulle.

Osatutkimuksen III viisivuotisjaksoittaiset läpimitan kasvuhavainnot korjattiin indekseillä. Osatutkimuksessa I ei ollut käytettävissä validia kasvuindeksiä koko tutkimusjakson (1958–1990) ajalle. Kasvun vaihtelu otettiin kuusen läpimitan kasvumallissa (osatutkimuksen I malli 12) huomioon kasvujaksoa edustavan kiinteän luokkamuuttujan avulla Henttosen (1990) esittämällä sekamallitekniikalla. Mallin estimaatit saatettiin näin vastaamaan aineiston keskimääräistä tasoa. Validien ja tekeillä olleiden alustavien kasvuindeksien perusteella aineiston keskimääräisen kasvun tason laskettiin olleen hyvin lähellä pitkän ajan keskimääräistä tasoa. Osatutkimusten I ja II pituuskasvumallit selittivät 5 vuoden jakson kasvua, mikä eliminoi osan vuotuisista vaihteluista. Pituuskasvun tason arvioimiseksi ei ollut käytettävissä riippumattomia aineistoja.

Osatutkimuksessa II käsiteltiin ainoastaan pituuskasvua. Riippumattomasta eteläsuomalaisesta suurten puiden kaatopuuaineistosta laskettiin kasvuindeksin tapaan tutkimusjakson (1980–1991) vuosien pituuskasvun vuosittainen taso jakson keskiarvoon verrattuna. Puiden pituuden muutos otettiin huomioon korjausmallilla. Aineisto ei riittänyt pitkän ajan normaalitason määrittelyyn, eikä havaintoja korjattu vuosivaihteluilla aineistojen puustojen rakenteellisen ja alueellisen eron takia.

2.2.8 Muut tekijät

Taimikonhoito- ja puunkorjuukustannukset estimoitiin Rummukaisen ym. (1995) malleilla tai arvioitiin kirjallisuudesta (IV). Ekologista ja monikäytöllistä arvoa ja puun laatua ei käsitelty. Taimien kunnon ja terveydentilan vaikutusta ei kuvattu malleissa. Kasvumallien (I, III) aineistoihin sisältyi ainoastaan kuntonsa puolesta kasvatuskelpoisiksi arvioituja taimia. Alikasvosaineistoon (II) sisältyi huonokuntoisiakin taimia, joista suurin osa tosin poistettiin harvennuksessa heti vapautuksen jälkeen. Puiden syntymistä ja pintakasvillisuuden kilpailua ei käsitelty, koska uudistumisvaihe oli tutkimuksen kohteena olleissa taimikoissa jo ohi. Puiden kuolleisuutta mallitettiin viljelytaimikoissa (I). Kuolleisuuden merkitys arvioitiin tulosten perusteella niin vähäiseksi, ettei sitä otettu huomioon vertailulaskelmissa (IV), eikä taimia tappaneita tai niiden kasvuun merkittävästi vaikuttaneita tuhoja ja vaurioita ollut esiintynyt tutkimusaineistojen metsiköissä tutkimusjakson aikana. Tällaisia metsiköitä ei ollut kelpuutettu aineistoihin (I–III). Alikasvosmetsiköissäkin taimia oli kuollut hyvin vähän vapautusta seuranneina yhdeksänä kasvukautena. Ylispuiden korjuusta taimikoille aiheutuneet vauriot ennustettiin malleilla (Frilander 1985, Maukonen 1987) vertailulaskelmissa (IV).

2.3 Mallien laadinta, testaus ja käyttö

Mallien muoto valittiin mallitettavan ilmiön, mallin käyttötarkoituksen ja käytettävissä olleiden aineistojen mukaan. Periaateratkaisut on esitetty luvussa 2.2 ja yksityiskohdat kunkin mallin kohdalla (osatutkimukset I–IV ja luku 2.4). Tilastotieteellisinä menetelminä käytettiin lineaarista ja epälineaarista regressiomallia (Draper ja Smith 1981, Ranta ym. 1989, Lappi 1993) ja sekamallia (Searle 1971,

Henttonen 1990, Lappi 1993). Sekamallissa on regressiomallin kiinteiden vaikutusten parametrien lisäksi satunnaisvaikutusten parametreja, jotka edustavat johonkin havaintojen luokkaan liittyvää satunnaista vaihtelua (Lappi 1993). Niitä käytettiin havaintojen autokorrelaation vaikutuksen poistamiseen kun havainnot olivat peräisin hierarkkisista otosyksiköistä (I, II, IV ja luku 2.4) sekä puun läpimitan metsiköiden välisen ja sisäisen satunnaisvaihtelun erottamiseen puuston kokojakauman generoinnissa (I, IV).

Mallien parametrien estimoinnin yksityiskohdat on käsitelty kunkin mallin kohdalla (I–IV ja luku 2.4). Mallit testattiin riippumattomilla aineistoilla silloin kun niitä oli käytettävissä (I, III) Lisäksi malleilla laskettuja tuloksia vertailtiin olemassa olleiden mallien antamiin tuloksiin. Mallien yhteensopivuus ja validointi peräkkäiseen ja rinnakkaiseen käyttöön vertailulaskelmissa on esitetty tapaus kerrallaan.

Jos lineaarisen regressiomallin selitettävä muuttuja oli logaritminen, mallin vakiotermiin lisättiin korjaustekijä $S_f^2/2$, sekamallissa $(\sigma_p^2 + \sigma_e^2)/2$. σ_p^2 on metsiköiden välinen jäännösvarianssi ja σ_e^2 metsikön sisäinen jäännösvarianssi.

Mallien yksi tyypillinen käyttötapa on interpolointi. Malleilla simuloidaan käsittelyjä, joita ei tutkimusaineistossa esiinny, mutta jotka sisältyvät mallien muuttujien vaihtelualueelle. Mallien testauksella (I–IV ja luku 2.4) varmistettiin, että ne antoivat laadinta-aineistoissaan täysin tai lähes harhattomia tuloksia mallin muuttujien ja lisäksi tärkeinä pidettyjen taustamuuttujien suhteen. Malleja ei käytetty tapauksiin, joissa selittävien muuttujien arvot olivat kukin erikseen laadinta-aineiston vaihteluvälin sisällä, mutta muuttujien arvojen yhdistelmänä selvästi sen ulkopuolella (Draper ja Smith 1981 s. 8).

Ekstrapolointi mallin muuttujien laadinta-aineiston ulkopuolisilla arvoilla voi olla joskus mahdollista. Hyvän mallin muoto on looginen ja sen estimaatit ovat realistisia ainakin jonkin verran laadinta-aineiston ulkopuolellakin (Hynynen 1995a). Testi riippumattomassa aineistossa voi osoittaa ekstrapoloimisen hyväksyttäväksi. Tämän tutkimuksen mallit laadittiin aineistoista, joissa kuusikoiden valtapituus rajoittui välille 0,4–11,7 m. Mallien käyttöalueelle asetettiin rajoitukset selittävien ja selitettävien muuttujien suhteen, eikä niitä ylitetty laskelmissa. Testaamisella riippumattomissa aineistoissa (I), mallien tulosten keskinäisellä vertailulla (IV) sekä vertailulla varttuneiden metsiköiden kasvumalleihin niiden yhteisellä sovellutusalueella (I, II, IV) varmistettiin, että lievä ekstrapolointikaan ei olisi johtanut harhaisiin tuloksiin. Vapautetun alikasvoksen pituuskasvun (II) ekstrapolointia ei kuitenkaan pidetty mahdollisena.

2.4 Täydentävät mallit

2.4.1 Alikasvoskuusikoiden pituusjakaumamalli

Alikasvoksen pituusjakauman kuvaamiseksi laskelmien lähtötilanteessa käytettiin osatutkimuksen I aineistoa vapauttamista edeltäneessä tilanteessa, jossa ei vielä ollut tehty taimikoiden käsittelyä. Kituvat ja kuolleet taimet poistettiin ennen jakaumien sovitusta. Alle 10 cm pituisia taimia ei ollut mitattu. Pituusjakaumiin sovitettiin Weibull-jakaumat koealakohtaisesti (n = 32). Parametrit estimoitiin Maximum Likelihood -menetelmällä BMDP LE-proseduurilla (Dixon ym. 1990). Aineiston tunnukset ja sovitettujen Weibull-jakaumien parametrit on esitetty taulukossa 1.

Sovitettujen parametrien riippuvuutta metsikkötunnuksista tutkittiin regressioanalyysillä, jotta niiden arvoja voitaisiin interpoloida simulointien lähtötilanteiden jakaumien generoimiseksi. Weibull-jakauman parametrien α ja β arvot riippuivat suoraviivaisesti taimikon keskipituudesta. Niiden ennustamiseksi laadittiin regressiomallit. Vakiotekijät eivät olleet merkitseviä kokeilluissa malleissa.

$$\beta = 0{,}9412*H+\varepsilon,\ s_b = 0{,}0204,\ \text{t-arvo} = 46{,}14,\ R^2 = 0{,}999 \quad (2)$$

$$\alpha = 0{,}1251*H+\varepsilon,\ s_b = 0{,}0184,\ \text{t-arvo} = 6{,}77,\ R^2 = 0{,}938 \quad (3)$$

H = puiden aritmeettinen keskipituus, m
α, β = Weibull-jakauman parametrit
ε = virhetermi
s_b = regressiokertoimen estimaatin keskivirhe

Parametrin χ arvo ei juuri vaihdellut aineistossa. Sen arvona käytettiin aineiston keskiarvoa $\chi = 1{,}226$. Weibull-parametrien arvot eivät korreloineet merkitsevästi metsikön runkoluvun kanssa. Malleilla simuloitaessa jakauma katkaistiin 3 %:n kohdalta kuten osatutkimuksessa I.

Taulukko 1. Alikasvoskuusikoiden pituusjakaumien tunnukset ja Weibull- jakaumien parametrit metsiköittäin. Aineistona osatutkimuksen II kuusikot.

Metsikkö	N	H	α	β	χ
2	5 200	1,60	0,116	1,599	1,272
3	4 830	2,78	0,412	2,543	1,251
4	7 140	1,43	0,139	1,389	1,203
5	2 650	0,70	0,106	0,650	1,178

N = Metsikön alikasvoskuusten runkoluku, kpl ha^{-1}
H = Metsikön alikasvoskuusten aritmeettinen keskipituus, m
α, β, χ = Weibull-jakauman parametrit

2.4.2 *Viljelykuusikon aukkoja täydentävien koivujen pituuskasvumalli*

Tutkimuksen I TINKA-osa-aineiston (IB) viljelykuusikoiden aukkoihin oli jätetty täydennykseksi kasvatuskelpoisia siemensyntyisiä koivuja, joille laadittiin pituuskasvumallit. Kasvatuskelvottomia koivuja ei voitu käyttää aineistona, koska niitä ei ollut mitattu puittain.

Aineistoon (taulukko 2) sovitettiin lineaarinen regressiomalli pienimmän neliösumman menetelmällä. Aineistoon ei sisältynyt tarpeeksi havaintoja pituuskasvun kulminoitumisen jälkeisestä pituusvaiheesta. Pituuskasvun kulminoitumisen kuvaamiseksi kokeiltiin malleja, joissa oli kaksi pituuskasvumuuttujaa. Pituuden logaritmi (ln(h)) edusti kasvun kiihtyvää komponenttia ja pituus (h) hidastuvaa komponenttia. Ne saivat sovitetuissa malleissa loogiset kertoimet, jotka eivät kuitenkaan poikenneet merkitsevästi nollasta. Lopullisessa mallissa käytettiin vain yhtä pituusmuuttujaa.

$$\ln(i_{h5}) = a_0 + a_1\ln(h) + a_2\ln(H_{25}) + a_3 HIES + \varepsilon \qquad (4)$$

i_{h5} = puun pituuskasvu tulevalla 5-vuotisjaksolla, m $(5a)^{-1}$
h = puun pituus, m
H_{25} = metsikön pituusboniteetti (kuusen valtapituus 25 vuoden iässä), m
HIES = hieskoivun dummymuuttuja (hies = 1, raudus = 0)
$a_{i,i=1\ldots3}$ = parametreja
ε = virhetermi

Mallin parametrit ovat taulukossa 3. Residuaalien tarkastelussa ei havaittu harhaa selitettävän tai selittävien muuttujien arvojen suhteen.

Taulukko 2. Kuusen viljelytaimikoiden aukkoja täydentävien koivun pituuskasvumallin laadinta-aineiston tunnukset.
n = 24

Muuttuja	Keski-arvo	Keski hajonta	Minimi	Maksimi
i_{h5}	2,00	0,75	0,97	3,40
h	5,53	1,76	0,98	7,80
H_{25}	7,68	1,07	6,30	9,56

Muuttujien selitykset yhtälön 4 yhteydessä.

Taulukko 3. Kuusen viljelytaimikoiden aukkoja täydentävien koivujen pituuskasvumallin parametrit (yhtälö 4).

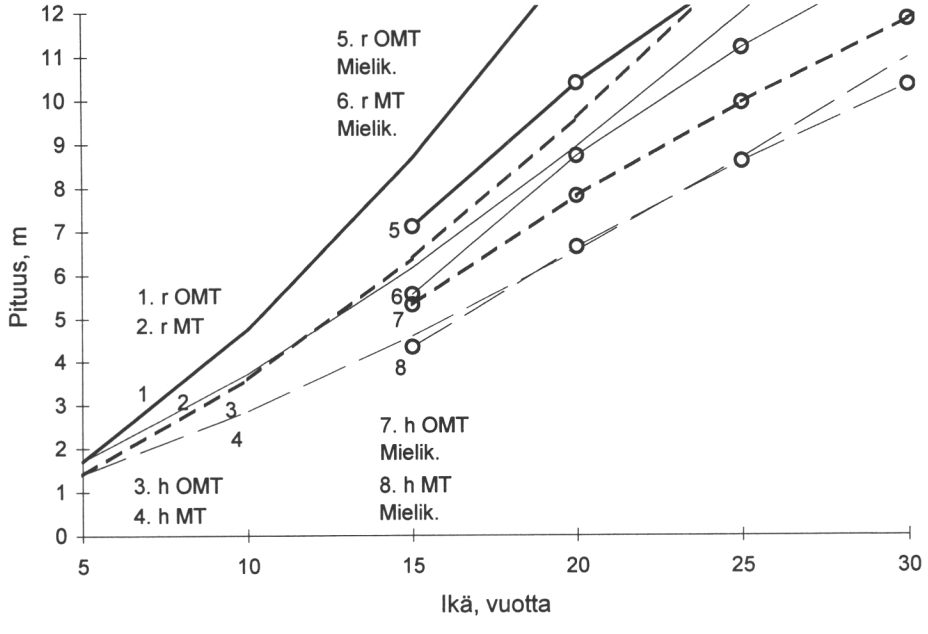
Muuttuja	Kerroin	Keskivirhe	p-arvo
vakio	–3,2472	0,8409	0,0011
ln(h)	0,2472	0,1074	0,0328
$\ln(H_{25})$	1,8512	0,3817	0,0001
HIES	–0,4128	0,1127	0,0016

R^2 = 0,71
S_m = 0,431
S_f = 0,224

Muuttujien selitykset yhtälön 4 yhteydessä.

Mallin testaamiseksi ei ollut käytettävissä riippumatonta aineistoa. Mallin mukaista kehitystä verrattiin Mielikäisen (1985) esittämään kuusi-koivu -sekametsien koivujen kasvumallien (mallit 8, 9, 11 ja 12) mukaiseen keskipituuden kehitykseen. Mielikäisen (1985) mallien soveltaminen alle 30 vuoden ikäisissä puustoissa oli tosin epävarmaa, sillä aineistossa oli vain neljä rinnankorkeusiältään alle 30-vuotiasta metsikköä. Puiden lähtöpituudet asetettiin mallia 4 sovellettaessa vastaamaan Mielikäisen (1985) taulukon 4 mukaan rinnankorkeuden saavuttamiseen kuluvaa aikaa (MT 4,9 vuotta, OMT 4,6 vuotta). Vastinboniteetteina käytettiin Mielikäisen (1985) tutkimuksen mukaisesti MT:llä $H_{100} = 27$ ja OMT:llä $H_{100} = 30$, ja MT:llä $H_{25} = 8{,}35$ ja OMT:llä $H_{25} = 9{,}7$ (I).

Vertailu (kuva 6) osoitti, että käyrien muoto oli hyvin samanlainen mallien sovellutusalueella (laskentajakson lopun h <12 m). Suuremmilla pituuksilla malli 4 antoi yliarvioita. OMT:llä raudukset kasvoivat nopeammin kuin Mielikäisen (1985) tutkimuksessa, mutta muuten saatiin hyvin samanlaisia tuloksia. Malleja voidaan käyttää laadinta-aineiston rajoissa (taulukko 2). Ekstrapolointi ei ole mahdollista. Pienen aineiston ja testiaineiston puuttumisen takia malleja ei voi pitää yleisinä koivusekapuiden malleina, vaan ne sopivat hyvin vain tutkimuksen I kuusimallien yhteydessä käytettäväksi.



Kuva 6. Viljelykuusikkoa täydentävien koivujen pituuskehitys MT:llä ja OMT:llä Etelä-Suomessa. Laskettu mallilla 4. Vertailuna koivun keskipituus Mielikäisen (1985) tutkimuksen malleilla 8, 9,11 ja 12. r = raudus, h = hies, Mielik. = Mielikäisen malli.

2.4.3 Muiden mallien käyttö

Simuloinneissa ja vertailulaskelmissa käytettiin muissa tutkimuksissa laadittuja malleja seuraavasti:

1. Kaksijaksoisten metsiköiden koivujen pituuskasvu ennustettiin yksijaksoisten kuusi-koivu -sekametsien malleilla (Mielikäinen 1985, mallit 49 ja 51), joiden käyttö on esitetty osatutkimuksessa III.
2. Varttuneiden viljelykuusikoiden (H_{dom} >10 m) puutason kehityksen malliperhe (Vuokila ja Väliaho 1980) (IV).
3. Puunkorjuun tuottavuus- ja kustannusmallit (Rummukainen ym. 1995) (IV).
4. Koivuylispuuston poistamisesta aiheutuvien korjuuvaurioiden mallit (Frilander 1985, Maukonen 1987) (IV).
5. Puiden ja puutavaralajien tilavuudet laskettiin kaikissa osissa Laasasenahon (1982) kahden tunnuksen polynomirunkokäyrillä. Pienten puiden tilavuudet laskettiin Ihalaisen laatimilla yhtälöillä (Snellman 1986).
6. Koivun vesojen pituuskehitys kuvattiin Björkdahlin (1983) ruotsalaisilla malleilla. Mallit olivat seuraavat:
   Raudus:
   $$\ln(h) = -6{,}17611 + 0{,}80625\ln(t) + 0{,}21458\ln(d_k) + 1{,}35371\ln(H_{100}) \quad (5)$$
   $$+ 0{,}15395\,SEDI + 0{,}29367\,LOKO + 0{,}10494\,ENTVES$$
   Hies:
   $$\ln(h) = -6{,}78474 + 0{,}71329\ln(t) + 0{,}13321\ln(d_k) + 1{,}46015\ln(H_{100}) \quad (6)$$
   $$+ 0{,}16944\ln(h_k) + 0{,}02278\ln(n_v) - 0{,}05437\,hsum^2$$

   joissa

   h = vesan pituus, dm
   t = vesan ikä, kasvukautta vesan syntymisestä
   d_k = vesojen emokannon läpimitta 10 cm korkeudella maanpinnasta, mm
   H_{100} = männikön valtapituusboniteetti (metsikön 100 paksuimman puun keskipituus 100 vuoden iällä), dm (Hägglund 1976)
   SEDI = sedimenttimaan luokkamuuttuja (1 = sedimentti, 0 = muu)
   LOKO = lokaalikontinentaalin ilmastoalueen luokkamuuttuja (1 = kontinentaali, 0 = muu)
   ENTVES = vesan emokannon syntytavan luokkamuuttuja (1 = vesa, 0 = ei vesa)
   h_k = vesan emokannon korkeus maanpinnasta, cm
   n_v = vesojen lukumäärä emokannossa (yli 1 cm tyviläpimittaisia), kpl
   hsum = havupuiden pituussumma 19,6 m^2 ympyräkoealalla, dm ($h > 10$ dm, $h > 0{,}5 * h_{max}$)
   h_{max} = koealan pisimmän puun pituus, dm

   Seuraaville muuttujille käytettiin vakioarvoja:

   H_{100} = Mallissa käytetyn ruotsalaisen valtapituusmallin (Hägglund 1976) vastinboniteetit eteläsuomalaisilla metsätyypeillä: kuivahko kangas H_{100} = 24,5, tuore kangas 25,9, lehtomainen kangas 27,1 (Varmola 1993).

SEDI = 0 (ei sedimentti)
LOKO = 0 (ei lokaalikontinentaalinen alue)
h_k = 10 cm
n_v = 2

Vesan emokannon läpimitta arvioitiin puun pituuden perusteella osatutkimuksen I koivuaineistosta 1 metrin pituusluokittain laskettujen keskiarvojen perusteella.

3 Aineistot

3.1 Aineiston valinta ja mittaukset

3.1.1 Yleistä

Tämän työn osatutkimuksissa I–III käytettiin taulukossa 4 kuvattuja mallitus- ja testiaineistoja. Koska aineistot kerättiin monentyyppisiltä koealoilta, mittausmenetelmät vaihtelivat. Yhteistä niille kaikille oli pyrkimys tuottaa taimien kasvun tutkimiseen ja mallitukseen sopivaa aineistoa puutasolla. Kiinteäsäteisiltä tai -sivuisilta koealoilta mitattiin systemaattinen otos taimista (II) tai kaikki taimet ja ylispuut (I, III). Puukohtaiset tiedot mitattiin ja talletettiin vain taimikon tuotantopuustoon kuuluvista kasvatuskelpoisista puista. Kokonsa, puulajinsa, sijaintinsa tai terveydentilansa puolesta kasvatuskelvottomat puut ja muiden puulajien puut mitattiin ja kirjattiin koealakohtaisesti (I) tai jätettiin tuotantopuuston kannalta merkityksettöminä mittaamatta (III). Osatutkimuksessa II mitattiin puiden luvun lisäksi koealan keskipistettä lähinnä sijainneen taimen puukohtaiset tunnukset kasvatuskelpoisuudesta riippumatta. Koealat sijoitettiin ja puut mitattiin koealoilla kaikissa tutkimuksissa riittäväksi arvioidun vaipan ympäröimiksi reunavaikutuksen eliminoimiseksi.

Taulukko 4. Tutkimusaineistojen yleiskuvaus.

Tutkimus	Metsäkasvillisuusvyöhykkeet	Kasvupaikkajakauma % metsiköistä	Otanta	Koejärjestely	Metsiköitä kpl	Koealoja kpl	Puita kpl
I	E-S,P-K,P-P	tk 64,lmk 36	IA:Subj.	IA:Kertakoe	19	19	380
			IB:Syst.	IB:Kestokoe	17	53	1 516
II	E-S	tk 50,lmk 50	Subj.	Kestokoe	4	32	294
III	E-S	tk 45,lmk 39,lh 16	Subj.	Kertakoe	31	31	472
IV	E-S	tk 45,lmk 39,lh 16	Subj.	Kertakoe	31	31	472
Yhteenveto-osa							
Alikasvoksen pituusjakauma	E-S	tk 50,lmk 50	Subj.	Kestokoe	4	32	–
Koivun pituuskasvu	E-S	tk 45,lmk,lh	Subj.	Kertakoe	6	11	24

Metsäkasvillisuusvyöhykkeet (Lehto 1978): E-S = Etelä-Suomi, P-K = Pohjanmaa-Kainuu, P-P = Perä-Pohjola
Kasvupaikkatyypit (Lehto 1978): tk = tuore kangas, lmk = lehtomainen kangas, lh = lehto
Koealoja: Metsikön jälkeen korkeimman tason otantayksiköiden määrä koko aineistossa
Puita: Kasvumallien laadinta-aineiston puiden lukumäärä

3.1.2 Kuusen viljelytaimikot

Kuusen viljelytaimikoiden varhaiskehityksen mallittamiseksi (I) koostettiin tutkimusaineisto kahdesta osa-aineistosta. Ensimmäinen osa-aineisto (IA) hankittiin kertamittauksella talousmetsien varttuneista (valtapituus 5–10 m) viljelytaimikoista niiden varhaiskehityksen mallittamista varten vuosina 1968–71. Tutkimusalueena oli koko maa suojametsäaluetta lukuun ottamatta. Taimikot valittiin subjektiivisesti käytännön metsänhoito-organisaatioille suunnatun tiedustelun tuloksena. Aineistoon hyväksyttiin kuusen kasvattamiseen sopivien kivennäismaiden kasvupaikkojen hyvin onnistuneita, täystiheiksi luokiteltuja taimikoita, jotka olivat säästyneet voimakkaalta sekapuuston tai ylispuuston kilpailulta perkausten avulla tai ilman niitä. Harvennuksesta piti olla kulunut vähintään kolme vuotta. Aineisto käsitti 22 kuusen istutustaimikkoa.

Osa-aineiston IA kuhunkin taimikkoon rajattiin subjektiivisesti valittuun tasaiseen, täystiheään kohtaan vaihtelevan kokoinen suorakaiteen muotoinen koeala, johon kuului vähintään 200 viljelytainta. Koealan puut luettiin puulajeittain. Puiden luvun yhteydessä valittiin systemaattisesti 40 viljelytainta. Niistä puolet valittiin koepuiksi siten, että ne jakautuivat tasaisesti koealalle ja edustivat runkoluku-sarjan läpimittajakaumaa. Koepuista mitattiin mm. pituus, rinnankorkeusläpimitta, kuoren paksuus sekä vuosittaiset pituus- ja sädekasvut 15 vuotta taaksepäin. Kasvumallien aineistona käytettiin viimeisen tai toiseksi viimeisen 5-vuotisen kasvujakson havaintoa arvonnan mukaan.

Toinen osa-aineisto (IB) käsitti Metsäntutkimuslaitoksen TINKA-kestokoeverkostoon sisältyneet kuusen viljelytaimikot, joihin oli perustettu kestokoealat vuosina 1984–86 talousmetsien taimikoiden kehityksen mallittamiseksi (Gustavsen ym. 1988). Koemetsiköt valittiin Valtakunnan metsien 7. inventoinnin (VMI 7) aineistosta metsälautakunnan, puulajin, syntytavan ja kasvupaikan suhteen ositetulla otannalla. Vain kehityskelpoiset, havupuuvaltaiset taimikot tuoreella ja lehtomaisilla kankailla kelpuutettiin otantaan. Otanta keskittyi valtapituudeltaan alle 5-metrisiin taimikoihin. Aineistoon sisältyi 20 viljelykuusikkoa, joista oli käytettävissä kaikki mallituksessa tarvittavat tiedot.

Osa-aineiston IB taimikot mitattiin ensimmäisen kerran vuosina 1984–86. Kuhunkin metsikköön rajattiin kolme taimikon tiheyden mukaan vaihtelevan kokoista ympyräkoealaa (50–700 m^2). Ensimmäinen sijoitettiin taimikkoon sattuneen VMI 7:n koealan keskipisteeseen. Kaksi muuta sijoitettiin systemaattisesti 40 m päähän niihin pääilmansuuntiin joihin koealat sopivat. 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 jälkeen. Kasvatuskelpoisiksi hyväksyttiin pieni määrä muitakin puulajeja kuin kuusia (keskimäärin 5 % kasvatuskelpoisten runkoluvusta). Puiden sijainti kartoitettiin, ja niistä mitattiin suuri joukko puutunnuksia (Gustavsen ym. 1988). Tämän tutkimuksen kannalta keskeisiä olivat pituus, läpimitat eri korkeuksilla, ikä ja terveydentila. Kasvatuskelvottomien puiden ja vaihtuvan taimiaineksen määrä mitattiin puulajin, syntytavan ja

pituuden mukaan määritellyissä luokissa viiden koealan keskelle ja piirille sijoitetun 4 m^2 ympyräkoealan rypäältä. Jokainen kasvatuskelpoinen puu keskipisteenä mitattiin 4 m^2 ympyrän muotoinen lähiympäristökoeala kilpailutekijöiden selvittämiseksi. Siltä mitattiin puulajin ja syntytavan mukaisissa luokissa kasvatuskelvottomien puiden lukumäärä, keskipituus ja keskimääräinen kantoläpimitta. Mittaukset toistettiin tasan viiden kasvukauden kuluttua 1989–91. Kasvatuskelpoiset puut tunnistettiin ja mitattiin uudelleen. Ryväs- ja lähiympäristökoealat mitattiin uudelleen. Kasvatuskelvottomista puista ei saatu puukohtaista kasvutietoa.

Aineistot IA ja IB yhdistettiin tutkimusaineistoksi I. Koska tarkoituksena oli mallittaa puhtaiden kuusikoiden kehitystä, aineistosta poistettiin viimeistä mittausta edeltäneen 5 vuoden aikana peratut tai harvennetut taimikot sekä ne kuusi taimikkoa, joissa oli ylispuita, sekapuustoa tai vesakkoa yli 20 % pohjapinta-alasta. Tutkimusaineistoon kelpuutettiin siten 36 taimikkoa, joissa kasvatuskelpoiset puut olivat saaneet kasvaa ainakin viimeiset viisi vuotta muiden puulajien kilpailusta lähes täysin vapaina ja joita ei ollut perattu tai harvennettu tutkimusjakson aikana. Metsiköt sijoittuivat tasaisesti kuusen kasvupaikoille Etelä-Suomen ja Pohjanmaa-Kainuun metsäkasvillisuusvyöhykkeille (taulukko 4). Perä-Pohjolan vyöhykkeestä oli lisäksi yksi metsikkö. Metsiköt edustivat ilmeisesti keskimääräistä nopeammin ja tasaisemmin kehittyneitä viljelytaimikoita, joissa viljely oli onnistunut hyvin. Niitä voitaneen luonnehtia käytännön metsätalouden tavoitetaimikoiksi.

Puhtaiden kuusikoiden mallien testiaineistona käytettiin Metsäntutkimuslaitoksen INKA-kestokoeaineistoa (Gustavsen ym. 1988). Koesarja on perustettu valtakunnallisesti kattavien, kivennäismaiden yli 25-vuotiaiden talousmetsien kasvu- ja tuotostutkimusaineistojen tuottamiseksi. Koealaverkosto on sidottu Valtakunnan metsien 7. inventoinnin otantasysteemiin. INKA-aineistosta poimittiin 11 kuusen viljelymetsikköä, joiden valtapituus oli kasvujakson alussa korkeintaan 9 metriä. Ne sijoittuivat tasaisesti Kajaanin eteläpuoliselle alueelle. Testiaineisto koostui varttuneemmista metsiköistä kuin kasvumallien laadinta-aineisto. Siitä puuttuivat kokonaan rinnankorkeudelta alle 1,0 cm läpimittaiset puut, joita ei ollut mitattu. Testiaineisto ei poikennut merkittävästi mallien laadinta-aineistosta kasvupaikkajakauman ja sekapuuosuuden suhteen.

Koivuylispuuston lähtöpuuston generoimiseksi laadittiin koivun läpimittajakauma- ja pituusmallit (IV). Aineistona käytettiin osan III koeala-aineiston koivulukupuita.

3.1.3 Kuusialikasvokset

Kuusen alikasvostaimien vapautusreaktion ja pituuskasvun sekä alikasvostaimikoiden rakenteen kehityksen tutkimiseksi hankittiin aineisto kestokoesarjasta (II). Koesarjaa perustettaessa tutkimusmetsiköt valittiin subjektiivisesti Metsäntutkimuslaitoksen tutkimusmetsien uudistuskypsistä kuusivaltaisista metsiköistä, joissa oli kehittämiskelpoinen, hyväkuntoinen kuusialikasvos kuuselle sopivalla kasvupaikalla. Männyn tilavuusosuus oli yhdessä metsikössä kuusta suurempi. Neljä koemetsikköä valittiin Etelä-Suomessa Lapinjärven ja Padasjoen kunnissa. Valittuja

metsiköitä ei ollut käsitelty hakkuin ainakaan 15 vuoteen. Ylispuusto poistettiin kevättalvella 1982.

Kuhunkin koemetsikköön sijoitettiin ennen vapautusta 3–8 kpl 400 m^2 kokoista neliökoealaa. Koealat sijoitettiin subjektiivisesti tarpeeksi suurten, tiheiden alikasvosryhmien kohdalle tyhjien koealan osien minimoimiseksi. Kunkin koealan kuusialikasvos harvennettiin 1–5 toistona tiheyteen 1 000, 2 000 ja 4 000 kpl ha^{-1}. Lisäksi perustettiin harventamaton kontrolliala joka metsikköön. Käsittelyt arvottiin koealoihin, mutta joitakin käsittelyjä jouduttiin vaihtamaan keskenään kun tavoiterunkoluku ei täyttynyt lähtötilanteessa. Alhaisten lähtötiheyksien takia käsittelyä 4 000 ha^{-1} tuli koesarjaan vain kaksi koealaa, joiden keskimääräinen tiheys oli vain 3 050 kpl ha^{-1}. Lannoitus- ja täydennysviljelykäsittelyjä tehtiin osalla koealoja, mutta niillä ei todettu olleen vaikutusta taimikon kehitykseen etenkin kun melkein kaikki täydennystaimet kuolivat muutaman vuoden kuluessa (II s. 181). Koska alle 10 cm mittaisia taimia ei ollut otettu huomioon ensimmäisessä mittauksessa ja käsittelyssä, käsittelyjen väliset tiheyserot tasoittuivat myöhemmissä mittauksissa lähelle toisiaan (tavoite 1 000: toteutunut 2 125 ha^{-1}, 2 000: 2 360 ha^{-1}, 4 000: 3 050 ha^{-1}, käsittelemätön: 3 730 ha^{-1}).

Aineiston edustavuus talousmetsissä tavattaviin kuusialikasvoksiin nähden oli hyvin rajallinen. Eteläisimmän Suomen neljään subjektiivisesti valittuun koemetsikköön keskittynyt aineisto oli pieni. Poistetut ylispuustot olivat talousmetsien uudistuskypsyyttä vanhempia (94–156 vuotta) ja järeämpipuustoisia. Niihin voidaan olettaa sisältyneen uudistuskypsiä talousmetsiä enemmän latvus- ja juuristoaukkoja, joissa alikasvoksella oli suotuisat kehittymisen edellytykset (Kalela 1949). Alikasvokset edustivat ilmeisesti keskimääräistä hyväkuntoisempia ja nopeampikasvuisia alikasvoksia, jotka olivat kehittämiskelpoisuudeltaan parhaasta päästä. Metsiköt edustivat alueen yleisimpiä kasvupaikkoja (taulukko 4). Alikasvostaimien pituusvaihtelu oli varsin suuri koealojen välillä (H = 0,9–3,7 m) ja koealojen sisällä (variaatiokerroin 52–89 %).

Alikasvostaimikot mitattiin ensimmäisen kerran ennen vapautusta syksyllä 1981. Kullekin koealalle sijoitettiin systemaattisesti tasaisin välimatkoin 25 kpl 4 m^2 ympyräkoealaa, joilta mitattiin kaikkien taimien lukumäärä puulajeittain. Keskipistettä lähimmästä kuusen taimesta mitattiin pituus, kantoläpimitta, elävän latvuksen alaraja sekä viiden edeltäneen vuoden vuotuiset pituuskasvut latvakasvaimista. Mittaukset toistettiin vapautuksen jälkeen keväällä 1982, harvennuskäsittelyjen jälkeen kesällä 1983 sekä syksyllä 1990 yhdeksän kasvukauden kuluttua vapautuksesta. Koska ympyräkoealoja ja koetaimia ei ollut merkattu maastoon, toistomittaukset koskivat eri koealoja ja puita. Ainoastaan viimeisen mittauksen tietoja käytettiin mallien laadinta-aineistona. Viimeisessä mittauksessa (1990) mitattiin 10 edeltäneen kasvukauden vuosittaiset pituuskasvut latvakasvaimista. Menetelmään sisältyi kohtalainen virhemahdollisuus kaikkein hidaskasvuisimpien taimien pituuskasvun arvioimisen vaikeuden takia. Metsikön osia tasaisesti edustaen, mutta osien sisällä sattumanvaraisesti, valittiin viisi 90–109 cm pituista ja 2–3 pitempää kuusen tainta kaadettavaksi jokaisesta metsiköstä. Niiden ikä laskettiin kantoleikkauksesta lustomikroskoopilla erikokoisten ali-

kasvospuiden keskimääräisen iän arvioimiseksi.

Alikasvosmetsiköiden ylispuustosta mitattiin ennen hakkuuta metsikkökohtainen valtapituus sekä pohjapinta-ala kunkin koealan keskipisteestä relaskoopilla. Puiden ikä laskettiin kannoista muutaman puun sattumanvaraisesta otoksesta koealoittain.

3.1.4 Kaksijaksoiset sekametsiköt

Kaksijaksoisten kuusi-koivu -sekametsiköiden kasvumallien laatimiseksi kerättiin kesällä 1984 kertamittausaineisto 31 kivennäismaan metsiköstä Etelä-Suomessa (III). Koemetsiköt valittiin metsälautakunnille ja metsähallituksen hoitoalueille suunnatun tiedustelun tulosten ja paikallisten metsäammattilaisten opastuksen avulla. Kasvupaikan tuli olla tuore kangas tai sitä viljavampi kasvupaikka, joka ei saanut olla soistunut tai erityisen kivinen. Kasvattamiskelpoisen luontaisen (3 metsikköä) tai viljellyn (28 metsikköä) kuusijakson tuli olla keskipituudeltaan vähintään 1,3 m. Aineistoon pyrittiin löytämään tiheydeltään, järeydeltään ja tilajärjestykseltään erilaisia puhtaita koivuylispuustoja. Viimeisen 20 vuoden aikana voimakkaasti harvennettuja metsiköitä ei kelpuutettu. Ylispuustoisten metsiköiden (25 kpl) lisäksi mitattiin kuusi metsikköä, joista koivujakso oli poistettu kokonaan vähintään neljä kasvukautta ennen mittausta.

Subjektiivisesti valittu metsikköaineisto edusti hyvin kuusen ja koivun kasvattamiseen sopivaa kasvupaikkajakaumaa Järvi-Suomeen painottuneella alueella (taulukko 4). Vaikka aineisto oli pieni, se sisälsi mallittamisen kannalta edullisesti varsin laajaa vaihtelua kuusen ja koivun pituus- ja ikäeron, tiheyden ja järeyden suhteen. Koivun kehityshistorian puutteellinen tuntemus vaikeutti pituusboniteetin käyttöä kasvupaikan puuntuotoskyvyn kuvaajana. Kuusijaksot edustivat tasaisia, hyväkuntoisia, kehityskelpoisia viljelytaimikoita, mutta niihin sisältyi myös tuntemattomista syistä hyvin harvoiksi jääneitä viljelytaimikoita (minimi 444 kpl ha^{-1}) Luontaiset taimikot (3 metsikköä) vastasivat rakenteeltaan ja tiheydeltään viljelytaimikoita. Vapautettujen taimikoiden (6 kpl) aineisto oli liian pieni vapautusreaktion mallittamiseen. Testiaineistona käytettiin osatutkimuksen I kuusen pituuskasvumallien laadinta-aineistoa.

Jokaiseen kaksijaksoiseen metsikköön (III) sijoitettiin yksi 12–15 metrin säteinen ympyräkoeala. Koeala sijoitettiin sellaiseen kohtaan, että sen koko alueella kasvoi kuusia ja vähintään 30 ylispuukoivua. Koealan yli 1,3 m pituisten puiden sijainti kartoitettiin ja niiden rinnankorkeusläpimitta, pituus ja elävän latvuksen alaraja mitattiin. Luetuista kuusista valittiin tasavälein 20 kpl koepuuehdokkaiksi. Kukin koepuuehdokas keskipisteenä rajattiin 4 m^2:n kokoinen neliö. Varsinaiseksi koepuuksi valittiin neliön sisältä yksi kasvatuskelpoinen kuusi. Kasvatuskelpoiseksi arvioitiin terve ja normaalikasvuinen kuusi, joka kokonsa ja sijaintinsa perusteella sopi parhaiten kasvamaan neliöllä mahdollisen taimikonkäsittelyn jälkeen. Kuusikoepuista mitattiin latvuksen suurin leveys sekä vuotuiset pituuskasvut niin pitkälle taaksepäin kuin pystyttiin ilman virhemahdollisuutta. Luettujen koivujen runkolukusarja jaettiin läpimitan vaihteluvälin mukaan kolmeen yhtä suureen osaan.

Jokaisesta osasta valittiin läpimitan mediaanipuu koepuuksi, josta kairattiin rinnankorkeudelta ytimeen ulottuva lastu, josta mitattiin laboratoriossa ikä ja vuotuiset sädekasvut ytimeen asti. Viljelykuusikoiden biologinen ikä selvitettiin viljelytiedoista. Luontaisissa kuusikoissa kaadettiin muutamia satunnaisesti valittuja kuusia iän määrittämistä varten. Kuuset olivat liian pieniä rinnankorkeusläpimitan kasvun mittaamiseen: viiden vuoden pituisen jakson kasvuhavaintoa ei olisi saatu kuin pienestä osasta puita.

Koealojen sijoittelussa vältettiin aukkoisia osia, mikä johti kuusille keskimääräistä paremmat uudistumis- tai menestymisedellytykset tarjonneiden kohtien valintaan. Kasvukoepuiksi valitut kuuset edustivat koealan kasvatuskelpoista osaa mutta eivät kuitenkaan pelkästään parhaita valtataimia. Nämä kohdat eivät kuitenkaan edustaneet koivikon aukkoisimpia tai harvimpia osia eivätkä siten koivun kilpailun takia kuuselle poikkeuksellisen edullisia kasvupaikkoja. Kasvumallien aineistona käytettiin viimeisen 5-vuotisjakson havaintoja. Koivujakson kokojakaumamallien aineistona (IV) käytettiin osassa III mitattujen koivujen pituus- ja läpimittahavaintoja tutkimusjakson lopussa.

3.1.5 Täydentävät mallit

Luvussa 2.4 esitellyissä täydentävissä malleissa käytettiin osatutkimusten I ja II aineistoja. Viljelykuusikkoa täydentävien koivujen pituuskasvumallissa käytettiin aineistona tutkimuksen I osa-aineiston IB viljelykuusikoiden aukkoihin täydennykseksi jätettyjä kasvatuskelpoisia siemensyntyisiä koivuja. Niille laadittiin pituuskasvumallit. Kasvatuskelvottomia koivuja ei voitu käyttää aineistona koska niitä ei ollut mitattu puittain. Vain kuudessa metsikössä oli jätetty ja mitattu kasvatuskelpoisia koivuja (metsiköt 22, 23, 25, 27, 28, 31). Ne edustivat metsikkötunnuksiltaan hyvin tutkimuksen I kuusen mallin aineistoa, mutta kasvatuskelpoisten taimien tiheyden ja kasvupaikkojen suhteen hajonta oli suppeampi (III). Mallin testaamiseksi ei ollut käytettävissä riippumatonta aineistoa.

Alikasvoskuusikoiden pituusjakaumamallin aineistona käytettiin osan II kuusikoista ennen vapautushakkuuta mitattua puidenlukuaineistoa. Tämä tarkasteluajankohta valittiin siksi, etteivät vapautushakkuu ja käsittely olleet muuttaneet alikasvosten tiheyttä ja kokojakaumaa. Pituusjakaumat sovitettiin metsiköittäin ja niihin luettiin kaikki mitatut ($h \geq 10$ cm) alikasvoskuuset.

3.2 Aineiston käsittely ja käyttö

Mallien selittävien muuttujien arvojen laskemiseksi tarvittiin puiden tunnukset ja niistä lasketut metsikkökohtaiset tunnukset kasvujakson alussa. Kertakoeaineistoissa (IA ja III) laadittiin kasvukoepuiden datasta puiden pituuden ja läpimitan kasvua taaksepäin kuvaavat mallit ja kuoren paksuuden mallit, joilla estimoitiin jokaisen lukupuun dimensiot kasvujakson alkutilanteessa. Puun kokoa, boniteettia ja pohjapinta-alaa käytettiin selittävinä muuttujina regressiomalleissa. Selitettävä

muuttuja oli puun mittausta edeltäneen viisivuotisjakson pituuden tai poikkileikkauspinta-alan kasvu. Mallit kalibroitiin metsiköittäin. Puiden vähäiseksi arvioidun kuolleisuuden ja syntymisen takia vakiintuneiden runkolukujen ja kasvatuskelvottomien puiden pienen osuuden takia voidaan olettaa, että alkutilanteen metsikkötunnukset saatiin estimoitua suhteellisen luotettavasti. Kestokoeaineistoissa (IB ja II) lähtötilanteen tunnukset laskettiin suoraan mittaustiedoista.

Puhtaiden kuusikoiden kestokoeaineistossa (IB) puiden pituuden ja läpimitan viisivuotisjakson kasvut laskettiin kahden perättäisen mittauksen erotuksena. Pituuskasvussa ei otettu mukaan keskeneräistä vuosikasvainta. Metsiköt oli mitattu lähes tarkalleen samoina päivinä tasan 5 vuoden välein. Kasvukauden paksuuskasvun erilaisesta etenemisestä kasvukauden aikana johtuvan mahdollisen virheen poistamiseen ei nähty tarvetta eikä mahdollisuuksia.

Kuusen viljelytaimikoiden kasvumallien (I) laadinta-aineistoina käytettiin kasvatuskelpoisten lukupuiden joukkoa ja koepuita sen osajoukkona. Kasvatuskelpoiset kuuset edustivat hyvin metsiköiden kaikkia kuusia, sillä vain 6 % luku- ja koepuukuusista oli luokiteltu kasvatuskelvottomiksi. Kasvatuskelvottomat puut laskettiin mukaan metsikkökohtaisiin tunnuksiin ja niitä käytettiin kokojakauma- ja kuolleisuusmallien aineistoissa.

Alikasvostaimien pituuskasvumallin (II) aineistona käytettiin vapauttamista seuranneiden 9 vuoden kasvukausittaisia pituuskasvuja. Jokaisesta puusta käytettiin vain yksi arvottu havainto. Aikasarjamallia ei käytetty, koska puun pituuden, ajan ja vapautuksesta kuluneen ajan keskinäistä riippuvuutta ei pystytty erottamaan kokeilluissa alustavissa sekamalleissa. Muut tarvittavat tunnukset saatiin peräkkäisten mittausten tiedoista. Alikasvoskuusikoiden pituusjakaumamallin (luku 2.4.1) aineistona käytettiin metsikköittäisiä runkolukusarjoja tutkimusjakson alussa. Aineisto oli pieni ja siitä laaditut mallit edustavat luotettavasti vain laadinta-aineistonsa taimikoiden rakennetta.

Kuusen viljelytaimikoiden aukkoja täydentävien koivujen pituuskasvumallin (luku 2.4.2) aineisto valittiin ja käsiteltiin samoin kuin kuusiaineisto tutkimuksessa I. Aineisto ja malli edustivat vain aukkoihin jätettyjä, kuusikkoon pituutensa puolesta sopivia koivuja, joihin kohdistuu korkeintaan heikko kilpailu kuusten tai muiden puulajien yksilöiden taholta. Koivukoepuita oli ainoastaan 24 kpl.

4 Tutkimuksen tulokset

4.1 Vapautettu alikasvos

4.1.1 Menettely

Alikasvoksen osalta tässä työssä on saatu tuloksia vain kuusen vapautettujen alikasvostaimien pituuskasvusta ja taimikon kokojakaumasta. Tyypilliset esimerkit vapautettujen alikasvostaimien pituuskasvusta sekä taimen koon ja vapautusta edeltäneen pituuskasvun vaikutuksesta on esitelty osatutkimuksen II kuvissa 7 ja 8. Alikasvoksen pituuskehityksen mallin antamia tuloksia verrattiin Cajanderin (1934a) esittämien vapautettujen alikasvosten pituuskehityssarjoihin tulosten yleistettävyyden arvioimiseksi. Vapautettujen alikasvostaimien pituuskasvua verrattiin samankokoisten viljelytaimien pituuskasvuun ja -kehitykseen. Tutkimuksessa II laaditulla pituuskasvumallilla (osatutkimuksen II malli 4) laskettua vapautettujen alikasvosten pituuskasvua verrattiin viljelykuusikon valtapuiden (osatutkimuksen I malli 10) pituuskasvuun. Tarkoituksena oli arvioida alikasvosten kehitysnopeutta viljelytaimikoihin verrattuna sekä alikasvoksen täydentämismahdollisuuksia pituuskehityksen tasaisuuden näkökulmasta. Vapautetun alikasvostaimikon ja kuusen viljelytaimikon rakennetta tarkasteltiin vertailemalla niiden pituusjakaumaa ja sen kehitystä. Malleilla 2 ja 3 (luku 2.4.1) generoitiin vapautetun alikasvostaimikon pituusjakauma, ja siitä poimittuja puita kasvatettiin alikasvoksen kasvumallilla (osatutkimuksen II malli 4) 10 vuotta. Viljelykuusikon pituusjakauma generoitiin osatutkimuksen I malleilla 4–7 ja puita kasvatettiin osatutkimuksen I malleilla 10 ja 11.

4.1.2 Tulokset

Vapautettujen alikasvoskuusten pituuskasvu alkoi yleensä lisääntyä toisena tai kolmantena kasvukautena vapauttamisen jälkeen (osatutkimuksen II kuva 8), mutta merkittävä nopeutuminen alkoi keskimäärin vasta neljäntenä tai viidentenä kasvukautena. Jo ennen vapauttamista verrattain nopeasti kasvaneiden ($i_h \geq 25$ cm a^{-1}) taimien kasvu kiihtyi vain vähän tai ei lainkaan. Hitaimmin kasvaneiden ($i_h \leq 5$ cm a^{-1}) kasvu elpyi hitaasti. Pisimpien luokkien puiden ($h \geq 7$ m) pituuskasvu ei juuri kiihtynyt. Niiden kasvu oli ollut nopeaa jo ennen vapautusta (osatutkimuksen II kuva 7). Puut olivat kuusen luontaisen kasvurytmin perusteella arvioiden jo hidastuvan pituuskasvun vaiheessa. Pienimpien ($h \leq 1$ m) puiden pituuskasvu elpyi kaikkein hitaimmin.

Elpymis- ja toipumisjakson keston selvittämiseksi verrattiin vapautettujen alikasvostaimien pituuskasvun ja samankokoisten viljelytaimien pituuskasvun suhdetta toisiinsa (kuva 7). Alikasvostaimien pituuksiksi vapautushetkellä valittiin 0,3, 0,5, 0,9, 2,0 ja 4,0 metriä, jotta vertailu edustaisi samaa asetelmaa kuin kuvassa 8. Poistetun puuston pohjapinta-alana käytettiin osatutkimuksen II mallin 4 laadinta-aineiston keskiarvoa ($G = 25$ m^2 ha^{-1}). Boniteetiksi valittiin alikasvos-

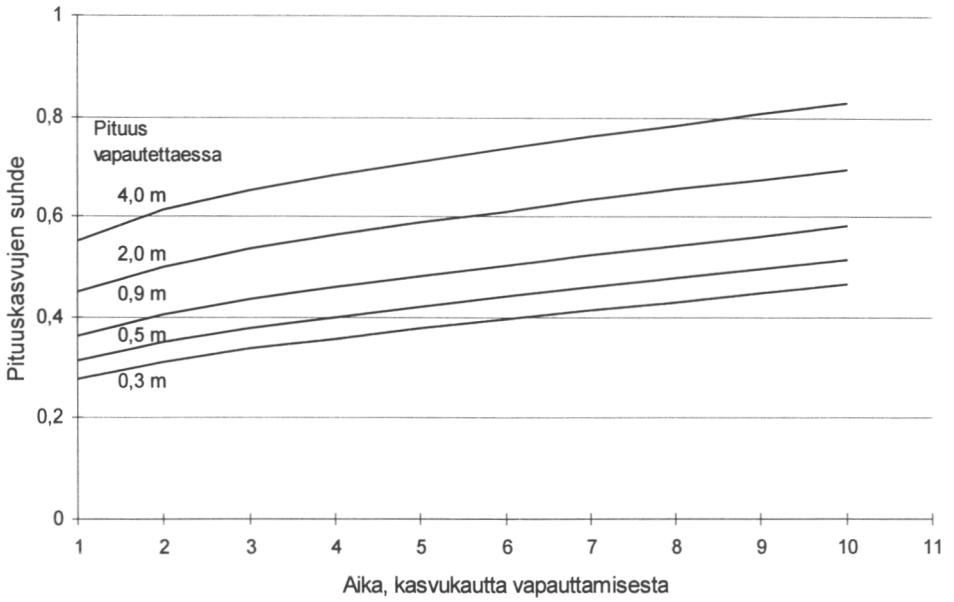
mallin aineiston metsätyyppien vastinboniteettien keskiarvo (H_{25} = 9,0). Kunkin viljelykuusen pituudeksi jokaisen kasvukauden alussa asetettiin vertailtavan alikasvostaimen pituus ja iäksi saman kokoisen viljelytaimen ikä ko. boniteetin valtapituuskäyrän mukaan. Tarkastelu alkoi vuodesta 1, koska osatutkimuksen II mallin 4 muuttuja T ilmaisee, kuinka mones kasvukausi vapauttamisesta on menossa. Tulokset viittasivat siihen, ettei alikasvosten vapautusreaktio ollut ohi vielä kymmenessä vuodessa vertailun pisimpänä vapautetuilla alikasvoksillakaan: puut eivät olleet saavuttaneet yhtä pitkien viljelykuusten pituuskasvua. Pienimpänä vapautetun (h = 0,3 m) alikasvostaimen pituuskasvu oli 10. kasvukautena vasta 47 % yhtä pitkän viljelykuusikon valtataimen kasvusta.

Kuvassa 8 on verrattu eri kokoisina (h = 0,3–4,0 m) vapautettujen alikasvosten pituuskehitystä viljelykuusikon valtataimien pituuskehitykseen. Kasvut laskettiin samalla tavalla kuin kuvassa 7, paitsi että viljelytaimien pituuskehitys laskettiin viiden vuoden jaksoissa edellisen jakson lopputilanne lähtöpituutena. Taimet viljeltiin kaksivuotiaina vapauttamista seuranneen kasvukauden alussa. Tulokset viittasivat siihen, että noin 1,0–1,5 m pituiset alikasvostaimet menettivät pituusetumatkansa 10 vuoden kuluessa mutta niiden kasvunopeus lähestyi jo viljeltyjä valtataimia. Sitä pienemmät alikasvostaimet jäivät viljellyistä valtataimista jälkeen.

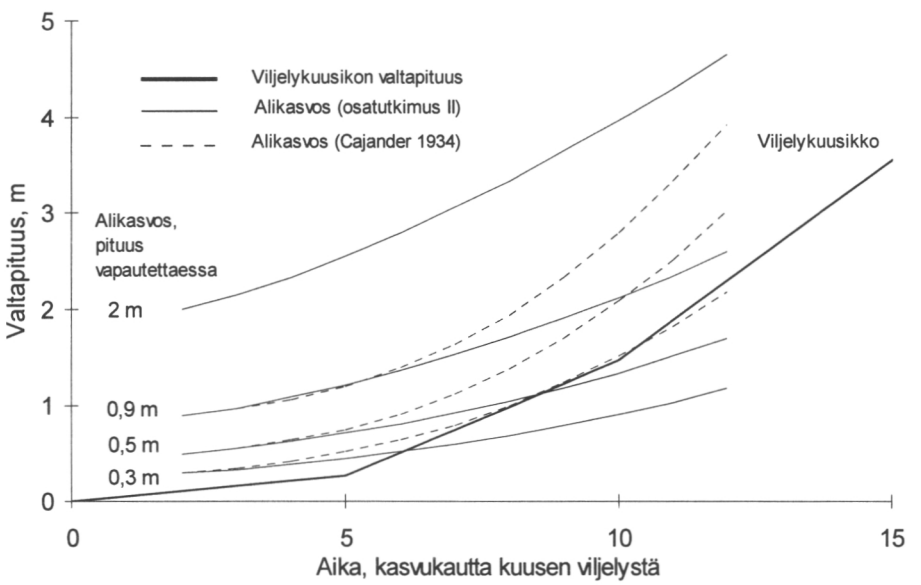
Kuvassa 8 on esitetty myös Cajanderin (1934a) kehityssarjat vapautetun kuusialikasvoksen pituuskehitykselle. Asetelma poikkeaa osatutkimuksen II kuvassa 12 esitetystä vastaavasta asetelmasta, jossa Cajanderin kehityssarjat oli esitetty erehdyksessä väärin. Oikea vertailu kuvassa 8 osoittaa, että Cajanderin tutkimat alikasvostaimet elpyivät selvästi nopeammin kuin osatutkimuksen II alikasvokset. Ne kasvoivat noin viidennestä vapauttamisen jälkeisestä vuodesta lähtien nopeammin kuin saman kokoiset viljelykuusikon valtataimet OMT:llä.

Vapautetun alikasvostaimikon ja kuusen viljelytaimikon pituusjakaumaa ja sen kehitystä on verrattu toisiinsa kuvissa 9 ja 11 ja taulukossa 5. Juuri vapautetun alikasvoksen pituus ja tiheys asetettiin vastaamaan 10-vuotiaan kuusikon tunnuksia (H = 1,8, N = 2 000 kpl ha^{-1}), ja siitä poimittuja puita kasvatettiin alikasvoksen kasvumallilla 10 vuotta. Poistetun ylispuuston pohjapinta-ala oli 25 m^2/ha. Samaa keskipituutta ja runkolukua vastaavan viljelykuusikon pituusjakauma generoitiin pituusjakaumamalleilla ja puita kasvatettiin pituuskasvumalleilla kymmenen vuotta. Boniteetiksi valittiin alikasvostaimikoiden kasvupaikkajakaumaa vastaava H_{25} = 9,0 m. Jakaumaa kuvattiin frekvenssijakauman toisella (variaatiokerroin) ja kolmannella (vinous) keskusmomentilla (Ranta ym. 1989 s. 39–42).

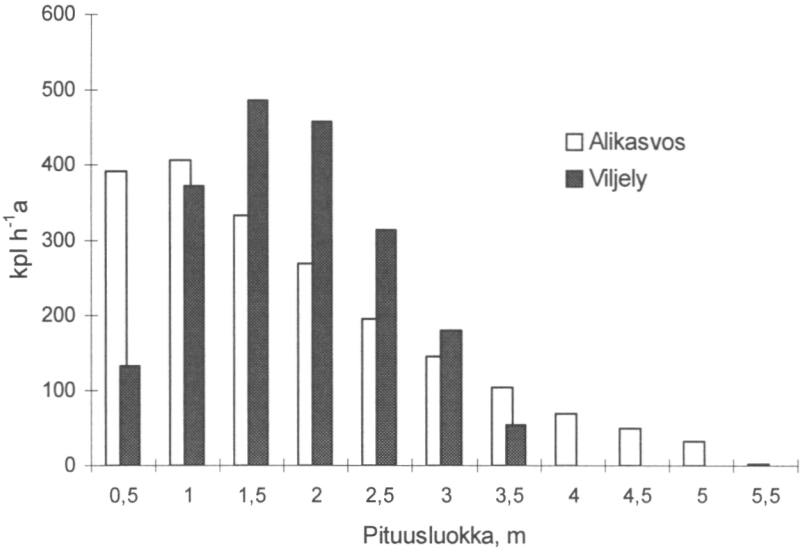
Alikasvoksen pituusjakauma oli lähtötilanteessa huomattavasti vinompi ja leveämpi kuin viljelytaimikon (kuva 9, taulukko 5). Alikasvoksen valtapituus oli 1,3 m suurempi kuin viljelytaimikon samalla keskipituudella. Viljelytaimikko kasvoi nopeammin sekä valta- että keskipituudella mitaten. Se otti alikasvoksen valtapituusetumatkan kiinni 10 vuodessa (kuva 11). Pituusjakaumat kehittyivät kasvujakson aikana alkutilannetta symmetrisemmiksi, erityisesti alikasvoksella (kuva 10). Jakaumien laajuus suureni pituusvaihtelulla ja keskihajonnalla mitaten, mutta pieneni tai säilyi variaatiokertoimella mitaten (taulukko 5).



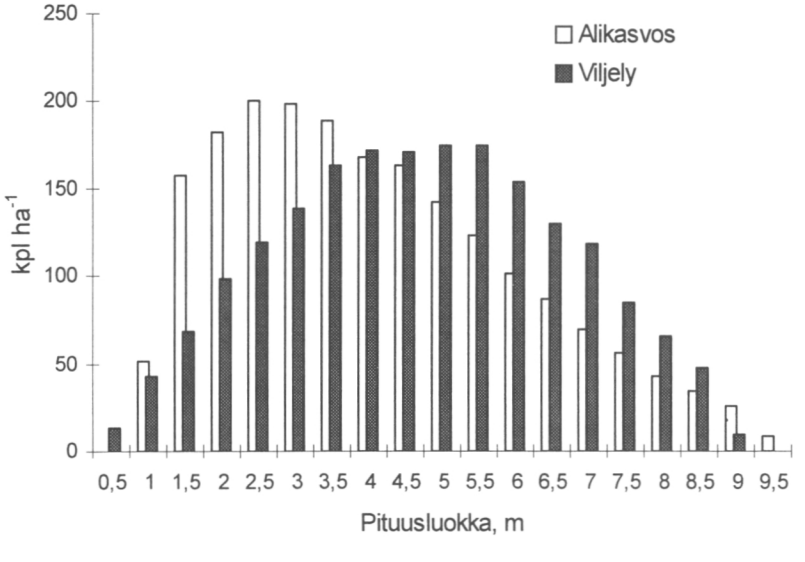
Kuva 7. Eri pituisina vapautettujen alikasvostaimien pituuskasvun suhde (osatutkimuksen II malli 4) saman pituisten vapaana kasvaneiden viljelykuusikoiden valtataimien pituuskasvuun (osatutkimus I, mallit 10 ja 11). Alikasvoksen ja viljelytaimen pituus yhtä suuri jokaisen kasvukauden alussa.



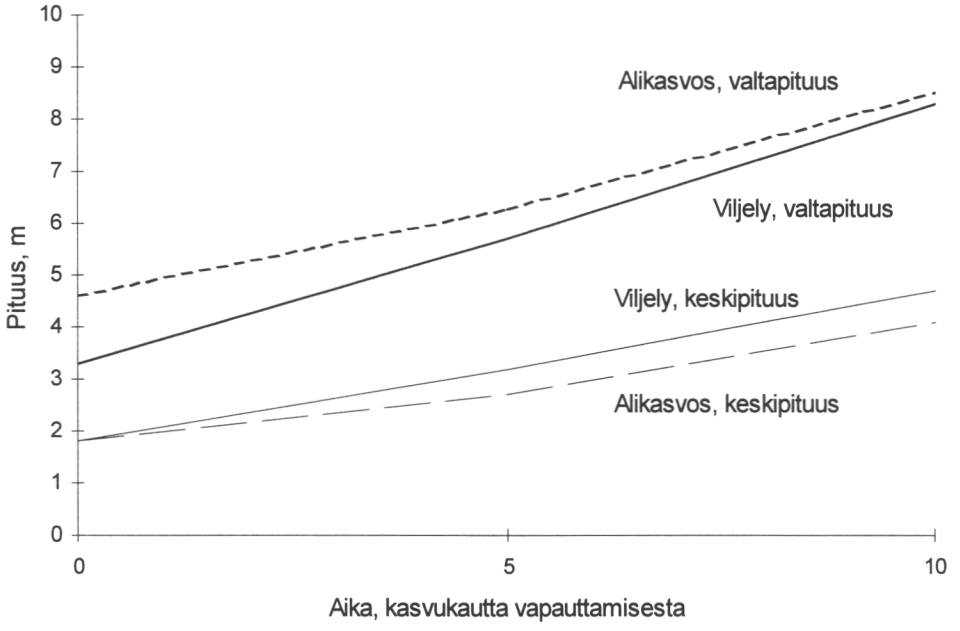
Kuva 8. Vapautettujen kuusen alikasvosten pituuskehitys osatutkimuksen II mallin 4 mukaan ja Cajanderin (1934a) kehityssarjojen mukaan. Vertailuna kuusen viljelytaimikoiden valtapituuskehitys (osatutkimus I, malli 10). Viljelytaimien ikä viljeltäessä 2 vuotta.



Kuva 9. Alikasvoskuusikon pituusjakauma (mallit 2 ja 3) vapautushetkellä kuusen viljelytaimikkoon verrattuna (osatutkimus I, mallit 4–7). Alikasvoksella ja viljelykuusikolla on sama keskipituus.



Kuva 10. Alikasvoskuusikon pituusjakauma 10 vuotta vapautuksen jälkeen kuusen viljelytaimikkoon verrattuna. Lähtötilanne esitetty kuvassa 9. Puiden pituuskasvu ennustettu osatutkimuksen I malleilla 10 ja 11 sekä osatutkimuksen II mallilla 4.



Kuva 11. Vapautetun alikasvoskuusikon ja viljelykuusikon valta- ja keskipituuden kehitys 10 vuoden kasvujakson aikana. Vertailun perusteet esitetty kuvien 9 ja 10 yhteydessä.

Taulukko 5. Vapautetun alikasvoskuusikon ja lähtötilanteessa keskipituudeltaan samanlaisen viljelykuusikon pituusjakauman tunnukset vapautushetkellä ja 10 vuoden kuluttua vapautuksesta.

Jakauma	Keskipituus m	Variaatio-kerroin	Vinous
Alikasvos 0 vuotta	1,80	0,64	5,07
Alikasvos 10 vuotta	4,11	0,48	0,56
Viljely 0 vuotta	1,80	0,41	2,18
Viljely 10 vuotta	4,71	0,41	0,02

4.2 Koivusekoitus, yksijaksoinen metsikkö

4.2.1 Menettely

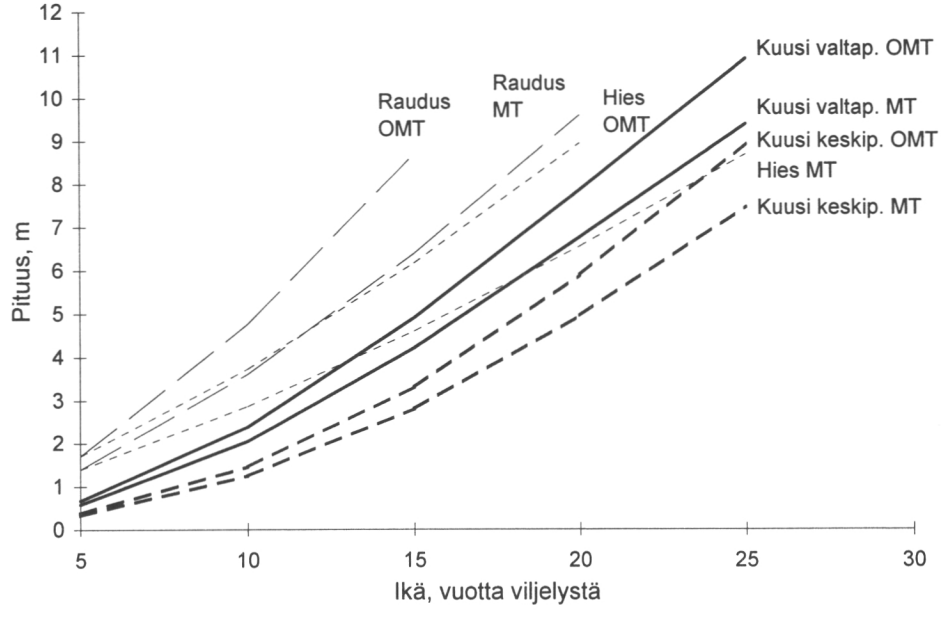
Yksijaksoista kuusi-koivu -sekametsikköä koskevia tuloksia on tässä työssä saatu viljelykuusikon kehityksen lisäksi siemensyntyisten hies- ja rauduskoivujen pituuskasvusta. Kuusen viljelytaimikon aukkoja täydentämään jätettyjen siemensyntyisten raudus- ja hieskoivujen pituuskehitystä ennustettiin koivun mallilla 4 (luku 2.4.2). Sitä verrattiin kuusikon valta- ja keskipituuden kehitykseen, jotka laskettiin osatutkimuksen I malleilla 10 ja 11. Koivun vesojen pituuskehitystä ennustettiin

Björkdahlin (1983) vesojen kasvumallilla (ks. luku 2.4.3) ja vertailtiin kuusten kasvuun samoin kuin siementaimilla. Hiesvesojen mallien kilpailumuuttuja (h_{sum}) estimoitiin kuusikon valtapituuden ja kuusikon pituusjakaumamalleilla (I, mallit 4–7) ennustetun pituusjakauman perusteella.

4.2.2. Tulokset

Kuusen taimikon aukkoja täydentämään jätettyjen siemensyntyisten raudus- ja hieskoivujen pituuskehitys viljelykuusikon valta- ja keskipituuteen verrattuna on esitetty kuvassa 12 erikseen MT:lle (H_{25} = 8,35 m) ja OMT:lle (H_{25} = 9,7 m). Koivun alkupituus viiden vuoden iässä arvioitiin kuusi-koivu -sekametsiköissä koivun 1,3 metrin pituuden saavuttamiseen kuluvan ajan perusteella (Mielikäinen 1985 taulukko 4). Koivun ja kuusen pituussuhde lähtötilanteessa $h_{koivu}/H_{dom(kuusi)}$ = 2,41–2,53 oli suurempi kuin mallin 4 laadinta-aineistossa (1,40). Pituussuhde tasoittui triviaalisti absoluuttisten pituuksien kasvaessa. Se oli 10 vuoden kohdalla 1,36–1,97.

Kuvan 12 vertailun mukaan siemensyntyinen raudus kasvoi kuusta selvästi nopeammin. Kuusikon viljelyvuonna kasvunsa aloittanut, viisivuotiaana 1,7 metrin pituinen koivu saavutti 15 vuoden kuluttua viljelystä noin neljän metrin etumatkan kuuseen verrattuna. MT:llä vastaava etumatka oli pienempi, vain hieman

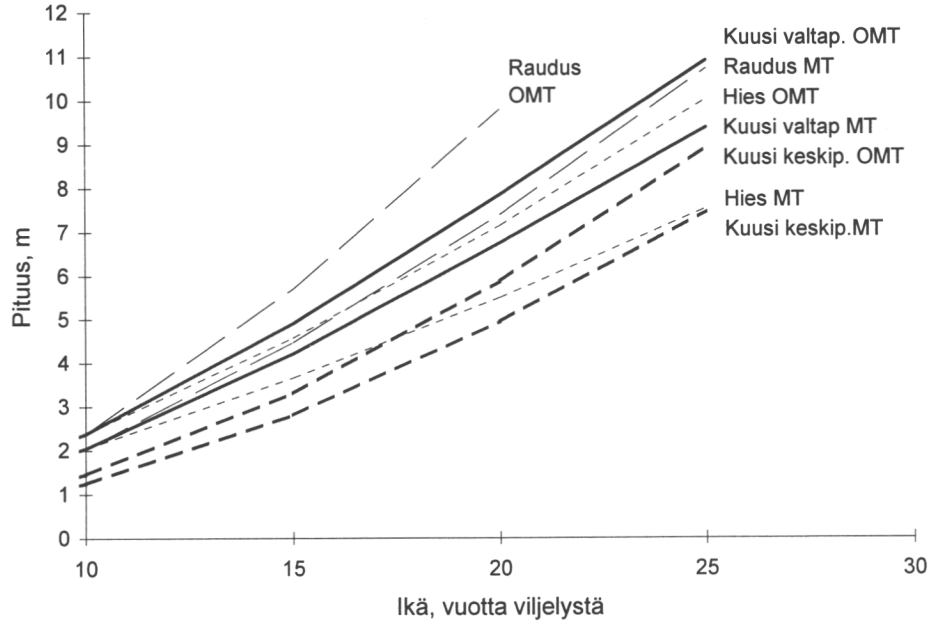


Kuva 12. Viljelykuusikkoa täydentävien koivujen keskimääräinen pituuskehitys Etelä-Suomen tuoreella (MT) ja lehtomaisella kankaalla (OMT) (malli 4) viljelykuusikoiden valta- ja keskipuihin (osatutkimus I, mallit 10 ja 11) verrattuna. Kuusen taimien ikä viljelyhetkellä 2 vuotta. Koivun lähtöpituus 5 vuotta kuusen viljelystä: MT 1,4 m, OMT 1,7 m (Mielikäinen 1985).

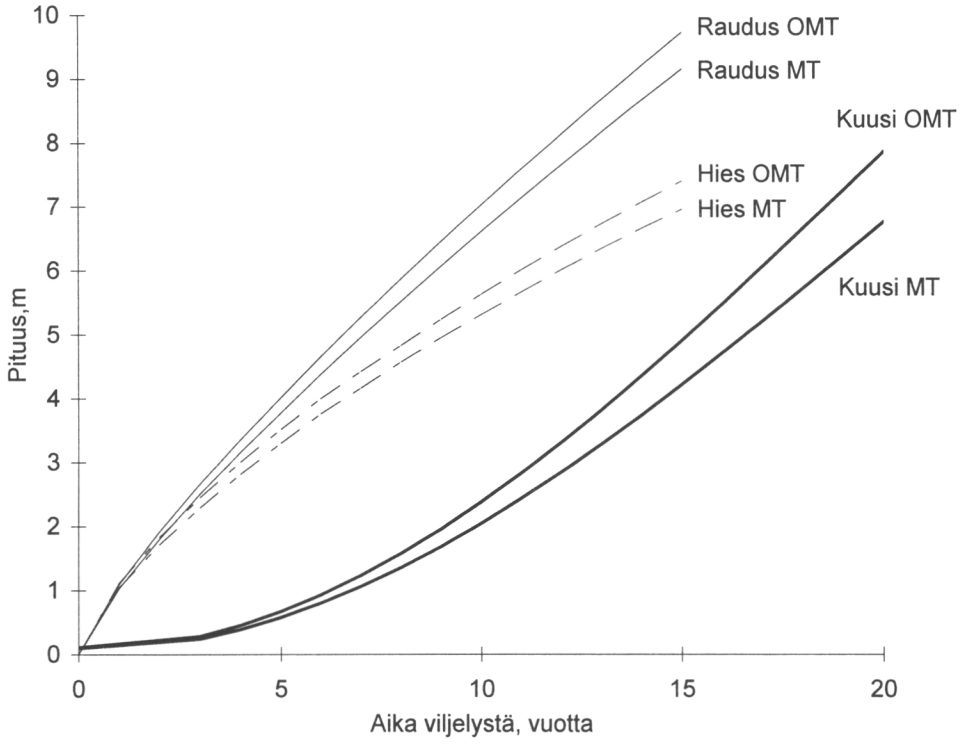
yli kaksi metriä. Mallilla ei voinut laskea pituuskehitystä luotettavasti tämän pidemmälle. Hieskoivun kehitys taas oli kuusen keskipuita nopeampaa ainoastaan ensimmäisten 5–10 vuoden ajan, jonka jälkeen pieni pituusero säilyi OMT:llä ja pieneni MT:llä. Kuusikon valtapuut kasvoivat ensimmäistä viisivuotisjaksoa lukuun ottamatta nopeammin kuin hieskoivut ja olivat laskentajakson lopussa OMT:llä hieman lyhyempiä ja MT:llä hieman pitempiä kuin hieskoivut.

Kuvan 13 asetelma edustaa tilannetta, jossa kuusikon aukkoihin jätettäisiin 10 vuoden iällä kuusen valtapuiden pituisia täydentäviä koivuja. Laskenta oli muuten sama kuin kuvassa 12 paitsi että koivun pituudeksi asetettiin kuusen valtapituus 10 vuoden kuluttua viljelystä ko. kasvupaikalla. Rauduskoivun etumatka laskentajakson lopussa kuusen valtapituuteen nähden jäi raudusvaihtoehdoissa alle kahden metrin. Hies jäi kuusen valtapituuskehityksestä jälkeen.

Raivauspuustosta syntyneiden koivun vesojen pituuskehitystä on verrattu kuusen valtataimien valtapituuskehitykseen kuvassa 14. Viljely tehtiin 2-vuotiailla taimilla. Raivaus tehtiin viljelykevättä edeltäneenä talvena. Vesojen pituuskasvu estimoitiin Björkdahlin (1983) ruotsalaisilla malleilla, ks. luku 2.4.3. Raivatun puuston kannon läpimitaksi (d_k) asetettiin 10 cm, joka oli hieman pienempi kuin yleisesti käytetty kuitupuun vähimmäismitta. Kuusikon runkoluku oli 2 000 kpl ha^{-1}. Vesojen pituuskehitys laskettiin vain 15 vuodelle mallin sovellutusalueen rajoittamana.



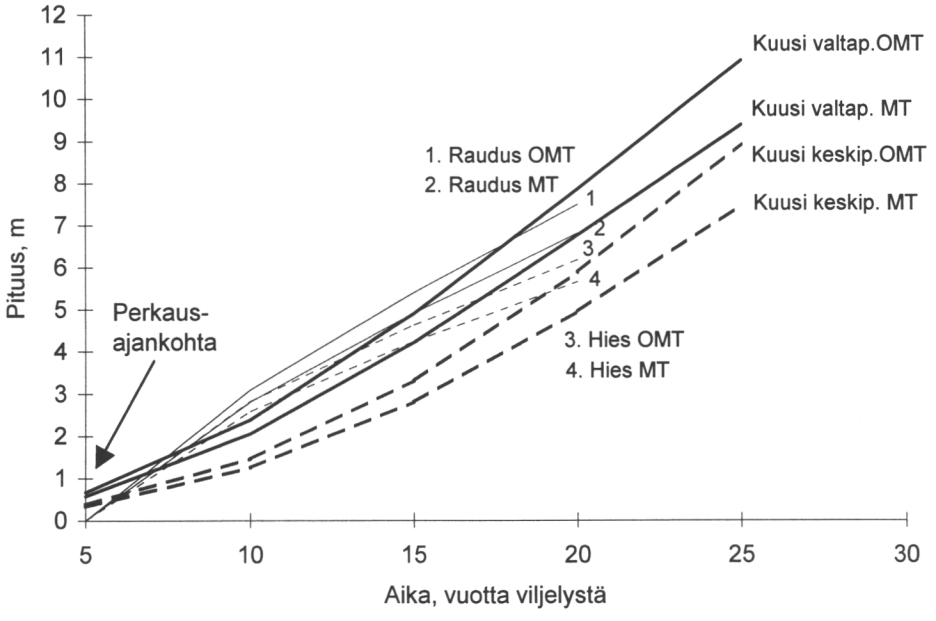
Kuva 13. Viljelykuusikkoa täydentävien koivujen keskimääräinen pituuskehitys Etelä-Suomen tuoreella (MT) ja lehtomaisella kankaalla (OMT) (malli 4) viljelykuusikoiden valta- ja keskipuihin (osatutkimus I, mallit 10 ja 11) verrattuna. Kuusen taimien ikä viljelyhetkellä 2 vuotta. Koivun lähtöpituus 10 vuoden kuluttua viljelystä on sama kuin viljelytaimien valtapituus.



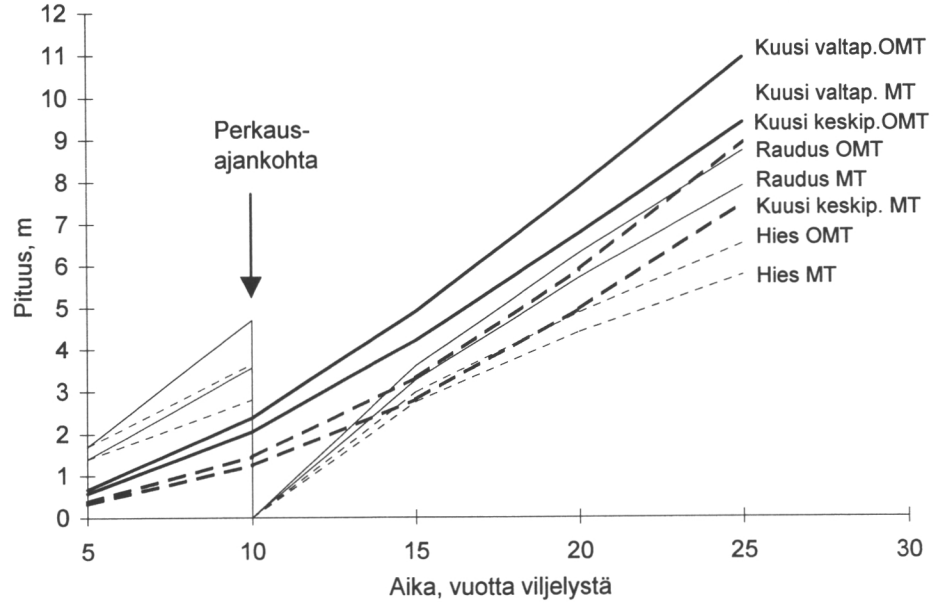
Kuva 14. Raivauskannoista syntyneiden raudus- ja hieskoivun vesojen pituuskehitys Björkdahlin (1983) mallien mukaan kuusen istutustaimien valtapituuteen verrattuna (osatutkimus I, malli 10) Etelä-Suomen tuoreella (MT) ja lehtomaisella kankaalla (OMT).

Koivun vesat saavuttivat 10 vuotta viljelyn jälkeen 3–5 metrin pituusetumatkan kuusen valtapituuteen ja 4–6 metrin etumatkan kuusen keskipituuteen verrattuna. Sen jälkeen pituusero pysyi rauduksella samana mutta alkoi pienentyä hieksellä. Kannon koko vaikuttaa mallissa voimakkaasti vesojen pituuskasvuun. Viiden senttimetrin läpimittaisen koivun kannon raudusvesat olisivat 10 vuoden kohdalla 1–1,5 m ja hiesvesat noin 0,5 m lyhyempiä kuin 10 cm läpimittaisesta kannoista syntyneet. Kasvupaikkojen ero koivuvesojen kasvussa on mallissa vähäinen. On huomattava, että kilpailu ei kuvan 14 tarkastelussa vaikuttanut kuusen pituuskasvuun. Toisaalta kuusikon tiheys vaikuttaa mallissa hieskoivun pituuskehitykseen vain lievästi. Hiesvesojen pituus olisi 10 vuoden kohdalla ilman kuusia vain 0,1–0,15 metriä suurempi kuin mitä kuvassa 14 esitetty käyrä osoitti.

Kuvissa 15 ja 16 on esitetty tilanne, jossa kuvan 12 siemensyntyiset koivut perattaisiin 5 tai 10 vuoden kuluttua viljelystä. Niiden kehitystä kuvattiin siitä eteenpäin vesojen kasvumallilla (Björkdahl 1983) samoin kuin kuvassa 14. Vertailu osoitti, että koivujen kannoista syntyvät vesat eivät enää kasvaneet riittävän nopeasti uhatakseen kuusen valta- tai keskitaimien kehitystä kummassakaan perkausajankohdan vaihtoehdossa.



Kuva 15. Viljelykuusikkoa täydentävien koivujen pituuskehitys viljelykuusikon valta- ja keskipuihin (osatutkimus I, mallit 10 ja 11) verrattuna. Koivujen pituuskehitys perkauksen jälkeen (5 vuotta kuusen viljelystä) laskettu Björkdahlin (1983) mallilla. Kuusen ja koivun pituuden lähtötiedot ja kasvupaikat samat kuin kuvassa 12.



Kuva 16. Viljelykuusikkoa täydentävien koivujen pituuskehitys viljelykuusikon valta- ja keskipuihin (osatutkimus I, mallit 10 ja 11) verrattuna. Koivujen pituuskehitys ennen perkausta (10 vuotta kuusen viljelystä) laskettu mallilla 4 ja sen jälkeen Björkdahlin (1983) mallilla. Kuusen ja koivun pituuden lähtötiedot ja kasvupaikat samat kuin kuvassa 12.

4.3 Koivusekoitus, kaksijaksoinen metsikkö

4.3.1 Menettely

Tässä työssä on saatu tuloksia kaksijaksoisen kuusi-koivu -sekametsiköiden kasvusta ja tuotoksesta sekä menetelmän taloudellisesta kannattavuudesta metsikkötasolla erilaisissa käsittely- ja kasvattamisvaihtoehdoissa. Kaksijaksoisen sekametsikön kuusten ja koivujen kasvumallit laadittiin osatutkimuksessa III. Niitä käytettiin käsittelyvaihtoehtojen simulointiin osatutkimuksessa IV, jossa laadittiin myös täydentäviä malleja. Simuloinneissa käytettiin osatutkimuksen III mallien lisäksi osatutkimuksen I malleja sekä muissa tutkimuksissa laadittuja kasvu-, tuotos-, korjuuvaurio-, korjuukustannus-, tilavuus- ja runkokäyrämalleja. Tutkimuksissa käytetyt mallit, niiden soveltaminen ja tulokset on esitetty yksityiskohtaisesti osajulkaisussa II ja IV ja tämän yhteenvedon luvussa 2.4.3. Tähän lukuun on koottu keskeisiä päätuloksia, jotka koskevat tämän yhteenveto-osan luvussa 1.7 esitettyjä tutkimusongelmia.

Osatutkimuksen III tutkimusraportissa (Mielikäinen ja Valkonen 1995) on kirjoitusvirhe rauduskoivun läpimitan kasvumallissa (osatutkimuksen III malli 2, taulukko 4, sivu 86). Tekijän $\ln(G_{ko})$ oikea muoto on G_{ko}. Oikea malli on siis

$$\ln(i_{g5}) = -3{,}1851 + 0{,}9810\ln(d) + 1{,}7104\ln(H_{50}) - 0{,}0708\,G_{ko} \qquad (7)$$

4.3.2 Tulokset

Kuusen taimikon päällä kasvatettava koivujakso hidasti kuusen pituuskasvua sitä enemmän mitä tiheämpi koivikko oli pohjapinta-alalla mitaten. Pohjapinta-alan vaikutus oli sitä pienempi mitä pienempi koivikon runkoluku oli. Vaikutus kuusten kasvuun oli siis samalla pohjapinta-alalla sitä pienempi mitä suuremmista koivuista ylispuusto koostui (osatutkimuksen III malli 1). Kuusten läpimitan kasvumallia ei voitu laatia ko. aineistosta puiden pienen koon takia. Koivikon tiheydellä ei havaittu olleen vaikutusta kuusten pituuden ja rinnankorkeusläpimitan väliseen riippuvuuteen, ja läpimitta riippui ainoastaan puun koosta (osatutkimuksen III malli 4).

Puusto- ja kasvupaikkatunnuksiltaan aineiston tyypillistä nuorta ja vanhaa koivikkoa edustaneilla metsiköillä tehtiin simulointilaskelmat mallien mukaisen keskimääräisen kehityksen havainnollistamiseksi. Ne osoittivat, että nuori koivujakso (jakson alun N = 1 019 kpl ha^{-1}, G = 16, m^2 ha^{-1}, H = 13,3 m) vähensi 15-vuotisen simulointijakson aikana kuusen keskipituuden kasvua keskimäärin 18 cm a^{-1} eli 37,5 % ja tilavuuskasvua 4,4 m^3 ha^{-1} a^{-1} eli 65,7 %. Tilavuuskasvun vertailu ei tosin ole kovin informatiivista näin nuoressa kuusikossa. Vanhempi koivikko (N = 442 kpl ha^{-1}, G = 19,3 m^2 ha^{-1}, H = 21,0 m) vaikutti kuusten kasvuun selvästi vähemmän kuin nuori. Pituuskasvu väheni keskimäärin 12 cm a^{-1} eli 22,6 % ja tilavuuskasvu 2,8 m^3 ha^{-1} a^{-1} eli 52,8 %. Koivikon alaharvennus puoleen pohjapinta-alasta pienensi pituuskasvutappion nuoressa metsikössä 6,3 %:iin ja vanhassa 1,9 % ja tilavuuskasvutappion vastaavasti 20,9 % ja 11,3 %:iin. Harventa-

mattoman nuoren koivikon tilavuuskasvu oli samana aikana keskimäärin 11,2 m^3 ha^{-1} a^{-1}, harvennetun 8,7 m^3 ha^{-1} a^{-1}. Vanhassa koivikossa kasvu oli 6,3 m^3 ha^{-1} a^{-1} ja 3,5 m^3 ha^{-1} a^{-1} (osatutkimuksen III taulukko 7). Kuuselle aiheutettu tilavuuskasvutappio kompensoitui ja ylittyi selvästi koivun kasvuna sekä harvennetussa että harventamattomassa koivikossa.

Osatutkimuksen III aineisto sisälsi kuusi ylispuustosta 2–16 kasvukautta aiemmin vapautettua metsikköä. Pituuskasvun vapautusreaktio oli niissä hyvin vaihteleva. Kasvu näytti pysyneen samana tai vähenevän ensimmäisenä 2–3 kasvukautena vapauttamisen jälkeen ja kiihtyvän nopeasti seuraavina 3–4 kasvukautena (osatutkimuksen III kuva 4). Läpimitan kasvusta ei ollut mittaustietoja. Elpymisreaktion vaikutusta ensimmäisen vapautusta seuranneen viisivuotisjakson kasvuun arvioitiin niiden neljän metsikön havaintojen avulla, joissa kuuset oli vapautettu vähintään viisi vuotta ennen mittausta. Täysin elpyneiden puiden viisivuotisjakson kasvuksi arvioitiin jakson viimeisen vuoden kasvu kertaa viisi. Vapautettujen kuusten pituuskasvu oli keskimäärin 65 % täysin elpyneiden puiden kasvusta.

Kaksijaksoisen kuusi-koivusekametsikön puuntuotosta ja kasvattamisen kannattavuutta tutkittiin simulointilaskelmin (IV). Vertailtavina vaihtoehtoina olivat puhtaana kasvatettava kuusikko, 15 vuoden ikään asti kasvatettava ja taimikonhoitona poistettava verhopuusto sekä verhopuuston kasvattaminen 100–1 000 kpl ha^{-1} tiheyteen harvennettuna taloudelliseen hakkuukypsyyteen asti. Viimeksi mainitun vaihtoehdon osalta täydet simuloinnit voitiin ulottaa vain kuusikon kasvumallien sovellutusalueen ylärajalle 30 vuoden ikään asti. Myöhempää kehitystä simuloitiin ainoastaan koivulla sen optimaalisen hakkuuajan arvioimiseksi. Koivuvaihtoehdot laskettiin erikseen raudukselle ja hiekselle. Kuusikon kasvattamista jatkettiin kaikissa vaihtoehdoissa kuusikon kiertoajan (70–85 v.) loppuun saakka metsikkötason malleilla.

Koivikon kasvattaminen verhopuustona kuusen kahden metrin keskipituuteen asti ja poistaminen taimikonhoitotyönä ilman hakkuutuloja johti pienimpiin nettotulojen nykyarvoihin kaikissa laskentavaihtoehdoissa. Kuusikolle aiheutui kilpailun ja korjuuvaurioiden takia 27–35 m^3 ha^{-1} (4,1–6,3 %) tuotostappio ja 3,0–7,4 % tuottotappio puhtaaseen kuusikoon verrattuna (osatutkimuksen IV taulukko 4). Laskelmassa oletettiin, ettei hallatuhoja esiintynyt missään vaihtoehdossa.

Kaksijaksoisen sekametsikön kasvattaminen 30 vuoden ikään asti oli kaikilla tiheyksillä ja kummallakin koivulajilla puhdasta kuusikkoa kannattavampaa, kun tulosta mitattiin kiertoajan nettotulojen nykyarvolla 4 % korolla (osatutkimuksen IV kuva 4). Rauduskoivu-kuusi -sekametsikön tuotto oli parhaassa vaihtoehdossa 151 % ja hieskoivu-kuusikon 113 % puhtaan kuusikon tuotosta. Koivikon päätehakkuu tehtiin maksimaalisen tuoton kannalta liian aikaisin mallien rajoitusten takia. Koivikon jatkokehityksen simuloinnin ja kuusikolle aiheutuvan haitan arvioinnin yhdistetyt tulokset viittasivat siihen, että rauduskoivikkoa kannattaisi kasvattaa 40 vuoden ja hieskoivikkoa 45–50 vuoden ikään asti. Koivikon tiheysvaihtoehtojen väliset erot olivat pienet, mutta laskelmissa käytetty maksimi 1 000 kpl ha^{-1} antoi parhaat taloudelliset tulokset laskelmissa. Niin suuren tiheyden arvioitiin kuitenkin olevan liian suuri 5–20 vuoden jatkokasvatusta varten.

Koivujakson kasvattamisen suuret nettotulojen nykyarvot johtuivat suurelta osin koivikon aikaisesta päätehakkuusta. Mitä suurempaa diskonttokorkoa käytettiin, sitä enemmän koivikon hakkuutulot korostuivat laskelmassa. Samalla tosin kuusikon ensiharvennuksen siirtäminen 10–15 vuotta ja yhden harvennuskerran poisjääminen ylispuuvaihtoehdoissa korostuivat. Diskonttokorolla 0 % ylispuuvaihtoehtojen tuotot olivat rauduksella puhdasta kuusikkoa suurempia tai yhtä suuria (+0,6 – +1,8 %) mutta hieksellä pienempiä (-1,17 – -3,88 %) (osatutkimuksen IV kuva 4). Tämä oli seurausta kuusen kasvutappioista, jotka aiheutuivat kilpailusta ja korjuuvaurioista. Kuusen tilavuustuotos oli ylispuuvaihtoehdoissa 61–93 m^3ha^{-1} (9,1–16,8 %) puhdasta kuusikkoa pienempi. Koivun tuotos oli 54–173 m^3ha^{-1}, mikä kompensoi kuusen tilavuuskasvutappion yhtä vaihtoehtoa lukuun ottamatta. Hieskoivikko tiheydellä 200 kpl ha^{-1} tuotti 6–9 m^3 ha^{-1} kokonaiskasvutappion (osatutkimuksen IV taulukko 3). Frilanderin (1985) ja Maukosen (1987) malleilla lasketut korjuuvaurioiden ennusteet vaihtelivat ylispuuvaihtoehdoissa välillä 382–581 kpl ha^{-1}, kun kuusikon lähtötiheys oli 1 900 kpl ha^{-1} (osatutkimuksen IV taulukko 4).

Tulosten herkkyyttä eri tekijöille tarkasteltiin vaihtoehtolaskelmin. Kuusen kiertoajan lisääminen 70 vuodesta 85 vuoteen ei vaikuttanut vaihtoehtojen kannattavuusjärjestykseen. Koivun tienvarsihinnan laskeminen 25 % kuusen hinnan pysyessä ennallaan pienensi ylispuuvaihtoehtojen kannattavuutta niin että kaksijaksoisen metsikön nettotulojen nykyarvo oli puhdasta kuusikkoa pienempi rauduksella kun koivikon tiheys oli pienempi kuin 300 kpl ha^{-1}, hieksellä kaikilla tiheyksillä. Koivun tienvarsihinnan alentaminen 50 %:lla teki kaikista koivuvaihtoehdoista puhdasta kuusikkoa vähemmän tai korkeintaan yhtä kannattavan. Jos koivikosta ei saataisi lainkaan tukkia vaan ainoastaan kuitupuuta, koivuvaihtoehtojen nykyarvot tulivat tiheyksillä N >400 kpl ha^{-1} puhdasta kuusikkoa pienemmiksi.

5 Tarkastelu

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää kuusen taimikon aukoissa kasvatettavan koivutäydennyksen, kaksijaksoisen kuusi-koivu sekametsikön sekä vapautetun kuusialikasvoksen käyttökelpoisuutta puhtaan kuusen istutustaimikon kasvattamisen vaihtoehtoina tai sitä täydentävinä elementteinä. Tutkimuksessa pyrittiin arvioimaan taimikoiden puuntuotannollista arvoa niiden kasvun, rakenteen, ennustetun kehityksen ja toimenpidetarpeen perusteella. Kaksijaksoisen sekametsän osalta tarkastelussa edettiin vaihtoehtojen taloudellisen kannattavuuden laskelmiin asti. Työn ja sen osatutkimusten (I–IV) lähestymistapa oli empiirinen mallittaminen ja malleilla simulointi.

Empiiristen mallien edustavuus ja käyttömahdollisuudet ovat vahvasti sidoksissa niiden laadinta-aineistoihin. Mallien antamat tulokset koskevat periaatteessa vain laadinta-aineistoa. Kaikki laajemmat yleistykset perustuvat arvioon mallitettujen ilmiöiden yleisestä säännönmukaisuudesta (Lappi 1993). Metsiköiden ja puiden kehitystä ja käsittelyvaihtoehtoja koskevissa tutkimuksissa on vain hyvin harvoin mahdollista käyttää satunnaisesti valittuja aineistoja. Otannan

perusjoukon muodostaminen paikallistamalla ensin kaikki kysymykseen tulevat metsiköt kautta koko tutkimusalueen on taloudellisista ja tietoteknisistä syistä mahdotonta. Tutkimusmetsiköille, niiden koealoille ja niissä tehtäville mittauksille on yleensä asetettava niin yksityiskohtaisia vaatimuksia, ettei muu kuin subjektiivinen valinta ole mahdollista. Tulosten käytännön sovellettavuuden kannalta on tärkeämpää, että tutkittavia ilmiöitä pystytään kuvaamaan luotettavasti ja tarkasti valitun aineiston asettamien rajoitusten sisällä kuin että tulokset edustaisivat mahdollisimman laajaa kirjoa erilaisia metsällisiä olosuhteita (Vuokila 1983).

Tulosten luotettavuutta ja yleistettävyyttä pyritään lisäämään testaamalla malleja riippumattomissa aineistoissa ja vertailemalla niillä laskettuja tuloksia aikaisempiin tutkimustuloksiin. Aineistojen rajoitusten ja tulosten yleistettävyyden arvioiminen on erityisen tärkeä osa tutkimusprosessia. Mallit kuvaavat ainoastaan keskimääräistä kehitystä selittävien muuttujiensa arvojen edustamassa tapauksessa laadinta-aineistossa. Aineistoon sisältyvä vaihtelu on todennäköisesti aina suppeampi kuin määrittelemättömän, hypoteettisen perusjoukon. Luottamusvälien tai muiden jäännöshajontaa kuvaavien tunnusten estimointi ja käyttö tulosten laskennassa ei yleensä ole tarkoituksenmukaista, vaan voi pikemminkin harhauttaa tulosten käyttäjää aliarvioimaan vaihtelun.

Tässä työssä käytettiin subjektiivisesti valittuja kerta- ja kestokoeaineistoja osaa I lukuun ottamatta. Siinä käytettiin osa-aineistona (IB) Valtakunnan metsien 7. inventoinnin aineistosta ositetulla otannalla valittua TINKA-kestokoeaineistoa ja testiaineistona samalla periaatteella valittua INKA-kestokoeaineistoa (Gustavsen ym. 1988). Kaikki muut aineistot olivat peräisin subjektiivisesti valituista metsiköistä mitatuilta kerta- tai kestokoealoilta. Tutkimusmetsiköt oli hankittu joko käytännön metsäorganisaatioiden tai Metsäntutkimuslaitoksen tutkimusmetsäorganisaation avustuksella tiedustellusta joukosta valitsemalla. Tutkimukseen kelpaaville metsiköille oli ennakkoon asetettu kriteerit, jotka eivät kuitenkaan aina olleet kovin tiukat tai yksityiskohtaisen selkeät. Kaikissa osa-aineistossa pyrittiin valitsemaan talousmetsien kasvattamisen kannalta relevantteja, vähintään tyydyttävässä tilassa olevia, kehittämiskelpoisia metsiköitä kuuselle sopivilla kasvupaikoilla siten, että aineistoon sisältyisi käytännön tilanteet kattavaa vaihtelua kasvupaikka- ja puustotunnusten suhteen. Valintaa tehtiin myös metsiköiden sisällä. Koealat sijoitettiin osatutkimuksissa IA, II ja III metsiköiden tasaisia, hyvin onnistuneita osia edustaviin kohtiin. Koealojen ja metsiköiden sisäinen puuston vaihtelu muodostui ilmeisesti käytännön talousmetsiä pienemmäksi.

Puhdasta kuusen viljelytaimikkoa käytettiin muiden kasvattamis- ja käsittelyvaihtoehtojen vertailukohtana. Tutkimusaineisto edusti keskimääräistä tasaisempia, paremmin onnistuneita talousmetsiä lehtomaisilla ja tuoreilla kankailla Etelä-Suomen ja Pohjanmaa-Kainuun metsäkasvillisuusvyöhykkeillä. Sekapuuston osuus rajoittui aukkojen täydennykseen sekä metsiköiden jatkokehityksen kannalta vähäiseen kasvatuskelvottomaan lehtisekapuustoon.

Aineiston I kuusten valtapituus oli kasvanut nopeammin kuin Vuokilan ja Väliahon (1980) viljelykuusikoille ilmoittamat vastinboniteetit olisivat edellyttäneet. Ne olivat Etelä-Suomessa MT:n H_{100} = 24 m ja OMT:n 27 m. Tutkimuksen I

mallien mukainen kehitys vastasi MT:llä likimain boniteettia H_{100} = 28 m ja OMT:llä H_{100} = 30 m. Ero ei ollut mallien välinen vaan aineiston (I) ja Vuokilan ja Väliahon (1980) vastinboniteettien välinen. Mallien muoto oli sallitulla yhteisellä sovellutusalueella varsin samanlainen, vain metsätyypeittäinen taso oli erilainen. Kun Vuokilan ja Väliahon (1980) malleilla laskettiin tutkimuksen I aineiston H_{100} -arvot metsätyypeittäisten havaintojen keskiarvoina, saatiin systemaattisesti noin 3 m suurempia arvoja kuin em. vastinboniteetit olisivat edellyttäneet. Varmola (1993) havaitsi samansuuruisen eron tutkimuksensa viljelymänniköiden ja Vuokilan ja Väliahon (1980) esittämien vastinboniteettien välillä. Osatutkimusten I ja II mallien mukaisen valtapituuskehityksen keskinäinen vertailu (IV) viittasi vahvasti siihen, että tutkimuksen I metsätyyppien vastinboniteetit eivät olleet liian korkeita. Mallien I testiaineiston korkea boniteettien keskiarvo kasvupaikkajakaumalla MT = 42%, OMT = 58 % metsiköistä viittasi samaan. Boniteettien keskiarvo H_{25} = 10,1 m (osatutkimuksen I taulukko 2) vastasi Vuokilan ja Väliahon (1980) mallien mukaan suunnilleen arvoa H_{100} = 31 m. Cajanderin (1934b) tutkimien taimikoiden valtapituuskehitys oli metsätyypeittäin vieläkin nopeampi: MT:n H_{100} = 29,5 m ja OMT:n 31,0 m. Tulokset viittasivat vahvasti siihen, että Vuokilan ja Väliahon (1980) metsätyyppien vastinboniteetit olivat liian pienet tämän tutkimuksen nuorissa viljelykuusikoissa havaittuihin arvoihin verrattuna. Erosta ei seurannut potentiaalista virhelähdettä viljelykuusikon ja muiden vaihtoehtojen vertailuun, sillä kyseisiä vastinboniteetteja ei käytetty missään rinnakkain kasvupaikkojen vastaavuuden perusteena.

Vapautettujen kuusialikasvosten pituuskehitystä ja taimikoiden kokojakaumaa verrattiin viljelykuusiin ja -kuusikoihin. Epävarmuus kasvupaikkojen vastaavuudesta ja alikasvosmallin jäykkyys vaikeuttivat luotettavien päätelmien tekemistä alikasvoksen vapautusreaktion kestosta ja alikasvosten pituuskehityksen suhteesta viljelykuusiin. Poistetun puuston pohjapinta-alan määritys oli alikasvostutkimuksessa tehty relaskoopilla koeruudun keskipisteestä. Tunnuksen huono edustavuus metsikön sisäiseen vaihteluun nähden sekä vaihtelun pienuus metsiköiden välillä aiheuttivat sen, että pohjapinta-alan vaikutus näytti aliarvioituneen osatutkimuksen II mallissa 4. Mallia voitiin käyttää ainoastaan laadinta-aineiston keskiarvoa (G = 25 m^2 ha^{-1}) lähellä olevilla pohjapinta-alan arvoilla (20–30 m^2 ha^{-1}), jossa tulokset olivat vähiten harhaisia. Alikasvostutkimuksen malleja voitiin käyttää vain aineistonsa keskimääräistä kasvupaikkajakaumaa (MT:n ja OMT:n keskiarvo) vastaavien tapausten laskemiseen.

Puun pituuskasvun ja koon suhde sekä vapautusreaktio sekoittuivat alikasvosaineistossa ja -malleissa. Eri kokoisten taimien välillä oli varsin pienet ikäerot. Isot puut olivat isoja siksi, että ne olivat kasvaneet nopeammin sen lisäksi, että ne olivat hieman vanhempia. Ne olivat ilmeisesti kasvaneet vähäisemmän kilpailun alaisina aukoissa tai muuten keskimääräistä suotuisammissa kohdissa. Niiden toipumisen ja elpymisen edellytykset olivat siten keskimääräistä paremmat. Aineistossa ei ollut mitattu tarpeellisia tunnuksia, jotta mallissa olisi voitu käyttää taimien keskinäistä kilpailua kuvaavia muuttujia. On todennäköistä, että hyväkuntoiset, nopeakasvuiset suuret puut olivat jo alkaneet vaikuttaa pienimpien puiden kas-

vuun. Alikasvostaimien pituuskasvun vapautusreaktio ei näyttänyt päättyneen tutkimusaineistossa vielä 10 vuoden kuluttuakaan vapauttamisesta, suurimpia taimia lukuun ottamatta.

Erillinen vuotuisten pituuskasvujen tarkastelu riippumattomassa aineistossa viittasi siihen, että tutkimusjakson loppupuolen pituuskasvun taso (1987–90) oli kuusella jakson alkua alhaisempi mutta vuonna 1991 taas korkeampi. Tämä saattoi johtaa kasvun elpymisnopeuden lievään aliarviointiin alikasvostaimien pituuskasvun malleissa.

Alikasvosaineisto (II) edusti ilmeisesti verrattain vanhoja mutta kuitenkin talousmetsien keskimääräistä hyväkuntoisempia ja nopeammin elpyviä alikasvoksia, mutta ei kuitenkaan mitään poikkeustapauksia. Cajanderin (1934a) tutkimat verrattain nuoret (10–30 vuotta) alikasvostaimet elpyivät selvästi nopeammin kuin tutkimuksen II vanhemmat (40–60 vuotta) alikasvokset. Saman kokoinen puu aineistossa II kuului kilpailuasemaltaan, kasvunopeudeltaan ja kunnoltaan paljon huonompaan taimikon osaan kuin Cajanderin (1934a) aineistossa. Tulosten vertailtavuutta vaikeutti Cajanderin (1934a) aineiston sijoittuminen selvästi viljavammille kasvupaikoille: kaikki taimikot olivat OMT:llä. Lisäksi Cajanderin (1934a) tulokset olivat todennäköisesti harhaisia aineiston jälkikäteen tehdyn valikoinnin takia. Taimien pituus laskettiin aluksi taaksepäin vapautushetkeen asti. Tämän jälkeen aineistosta poistettiin ne taimet, jotka olivat vapautettaessa yli yhden metrin pituisia. Hitaasti kasvaneet taimet poistettiin siis systemaattisesti aineistosta. Cajanderin (1934a) tutkimusraportissa ei myöskään ollut tietoja ylemmän jakson puuston tiheydestä ja puulajisuhteista.

Vertailu viljelykuusikoiden taimien pituuskehitykseen osoitti, että tutkimusaineiston II 1,0–1,5 m pituiset alikasvostaimet pystyivät tasapäiseen pituuskehitykseen samaan aikaan viljeltyjen kuusikoiden valtataimien kanssa. Cajanderin (1934a) kehityssarjojen mukaan alikasvostaimet elpyivät selvästi nopeammin ja kasvoivat noin viidennestä vapauttamisen jälkeisestä vuodesta lähtien jopa nopeammin kuin saman kokoiset viljelykuusikon valtataimet. Hannerzin ja Gemmelin (1994) esittämä ohje, että kuusen alikasvostaimien pituuskasvun pitäisi olla 3–10 cm jotta vapauttamista kannattaisi harkita, vaikuttaa tulosten perusteella järkevältä. Alikasvostaimikoiden kokojakaumat olivat selvästi viljelytaimikoita leveämpiä ja vinompia. Ero tasoittui jonkin verran vapautuksen jälkeisinä 10 vuotena.

Alikasvosten hyödyntämisen mahdollisuudet seuraavan puusukupolven lähtökohtana tai osana eivät riipu pelkästään pituuskasvusta ja taimikon kokojakaumasta. Tässä tutkimuksessa ei käsitelty mm. puuston tilajärjestystä, tuotos- ja tuotto-odotuksia, puunkorjuun edellytyksiä ja kustannuksia, korjuuvaurioita sekä eri puulajeilla tehtävän täydennyksen edellytyksiä ja tulosodotuksia. Andersson (1988) tutki Keski-Ruotsissa kuusikon alta vapautetun, kuusella täydennetyn (538 kpl ha^{-1}) alle 1 m keskipituisen kuusialikasvoksen ja kontrolliksi perustetun viljelykuusikon perustamiskustannuksia ja tuotoseroja. Perustamiskustannukset olivat alikasvosvaihtoehdossa vain 17 % viljelykustannuksista. Alikasvostaimikon kokonaistuotos oli 24 vuodessa 30 m^3ha^{-1} suurempi kuin viljelytaimikon. Päätelmien mukaan koe viittasi alikasvosten hyvään käyttökelpoisuuteen, mutta tekijä muistutti usein

kohdatuista vaikeuksista ja huonoista tuloksista huonokuntoisilla alikasvoksilla ja väärillä kasvupaikoilla.

Etelä-Suomen metsiä yleisesti vaivaavan juurikäävän infektioiden yleisyydestä kuusialikasvoksissa ei ole vielä varmoja tietoa. Jos alikasvostaimet infektoituvat yleisesti jo ennen vapauttamista ja vapauttavan hakkuun jättämien kantojen kautta, kuusikoiden kuusialikasvosten käyttökelpoisuus on kyseenalainen.

Kuusen taimikon aukkoja täydentämään jätettyjen siemensyntyisten koivujen pituuskasvua ja suhdetta kuusen pituuskasvuun vertailtiin tutkimuksen I koealojen koivuaineistosta tehdyllä mallilla. Täydentävien koivujen pituuskasvumallin aineisto (luku 2.4.2) oli erittäin pieni ja tulokset edustavat vain niitä koivun kasvu- ja metsikköympäristöjä joihin koivuja oli jätetty tutkimuksen I metsiköissä. Ne olivat viljelykuusikon aukkoja, joissa kuuset ja koivut voivat kasvaa keskinäisen kilpailun vaikuttamatta toisiinsa ennen 10 metrin valtapituusvaihetta. Mallia ei voi käyttää pienissä aukoissa tai kuusten väleissä kasvavien pienten koivujen kehityksen ennustamiseen. Erilaisia kuusen taimikon koivusekapuustoja edustavien mallien laatiminen ei ollut mahdollista tässä työssä, eikä sellaisia ollut saatavissa muistakaan lähteistä. Koivun pituuskasvun kulminaatiota ei esiintynyt aineistossa tarpeeksi voimakkaana, jotta se olisi voitu kuvata luotettavasti mallissa. Mallia ei voi käyttää laadinta-aineistoa pitemmille koivuille (alkutilan pituus alle 7,8 m).

Täydentävät rauduskoivun siementaimet kasvoivat selvästi valtakuusia nopeammin. Niiden etumatka oli 15 vuoden kuluttua OMT:llä neljä metriä ja MT:llä kaksi metriä. Ero oli keskikokoisiin kuusiin verrattuna vielä 1,4–1,7 m enemmän. Nämä erot eivät estä tasapainoista pituuskehitystä yksijaksoiseksi sekametsäksi, jos koivun tiheys on pieni. Mielikäinen (1985) vertasi kasvu- ja tuottotaulukoiden mukaisia puhtaiden, harvennuksin käsiteltyjen kuusikoiden (Vuokila 1956) ja -koivikoiden (Koivisto 1959) keskipituuden kehityksiä toisiinsa Etelä-Suomen lehtomaisella kankaalla. Niiden mukaan koivun keskipituus oli 20 vuoden rinnankorkeusiällä 13 m ja kuusen yhdeksän metriä. Kun rinnankorkeusiän ja biologisen iän ero (kuusi + 5 vuotta) otetaan huomioon, koivu oli 25 vuoden biologisella iällä noin seitsemän metriä kuusta pitempi (13 m vs. 6 m). Kuusen kasvun suhteellisen nopeutumisen takia ero pieneni 70 vuoden ikään mennessä 1,5–2 metriksi. Hieskoivun siementaimien pituuskehitys oli tämän tutkimuksen tulosten mukaan selvästi raudusta hitaampi. Sen etumatka kuusen valtapuihin verrattuna pysyi kaikissa laskelmissa riittävän pienenä yksijaksoisen sekametsän kehittämistä varten.

Mekaanisesti poistettujen koivujen kantovesojen pituuskasvu oli ruotsalaisten pituuskehitysmallien (Björkdahl 1983) mukaan aluksi selvästi kuusia nopeampi, mutta hidastui pian. Huomattavasti pienemmästä pituudestaan huolimatta valtakuuset kasvoivat hiesvesoja nopeammin noin 5–10 vuoden ja raudusvesoja nopeammin 10–15 vuoden kuluttua viljelystä. Pituusero oli vertailuissa suurimillaankin kohtuullinen, rauduksella 4–5 m ja hieksellä 2,5–3 m.

Björkdahlin (1983) malleilla tehdyt laskelmat voivat oikeuttaa vain suuntaa-antaviin päätelmiin. Aineiston edustavuus Suomen oloihin nähden, kasvupaikkojen vastaavuus ja Suomessa harvinaisten muuttujien arvojen määrittely ovat suuria epävarmuustekijöitä. Mallit olisi pystyttävä jatkossa testaamaan laajahkolla

suomalaisella aineistolla, josta voitaisiin myös laatia kokonaan uudet mallit.

Kaikkien edellä esitettyjen kuusen ja koivun vertailujen oletuksena oli, että puiden välinen kilpailu oli niin vähäinen, ettei se vaikuttanut pituuskasvuun. Tiheä koivikko voi kuitenkin hidastaa kuusen kehitystä hyvin voimakkaasti. Mielikäisen (1985) tutkimuksessa koivun yli 75 % tilavuusosuus puustosta varttuneissa sekametsissä oli yhteydessä siihen, että kuusella oli kulunut 6–9 vuotta enemmän aikaa 1,3 m pituuden saavuttamiseen kuin puhtaassa kuusikossa. Pukkalan (1981) mallien mukaan samaan aikaan istutetun rauduskoivikon vaikutus kuusen pituuteen riippui voimakkaasti koivun runkoluvusta. Koivikon tiheydellä 1 600 kpl ha^{-1} ja 14 m valtapituudella kuusen valtapituus oli mallin mukaan noin 4,9 m, mutta puhtaassa kuusikossa 8,4 m. Osatutkimuksen III kaksijaksoisissa, 15–39 vuoden ikäisissä, 3,0–8,2 m valtapituisissa kuusikoissa ± 5 vuoden tarkkuudella samanikäisten koivujaksojen pituusetumatka oli keskimäärin 10,6 m (17,8 vs. 6,1 m). Jos koivikko on jo ehtinyt hidastaa kuusen kasvua ja heikentänyt taimien elpymiskykyä merkittävästi, perkauksen jälkeinen pituuskasvujen suhde voi olla kuuselle vieläkin epäedullisempi. Perkauksen toistamiseen johtavan kehityksen todennäköisyys kasvaa. Toisaalta kuusta pienempien koivujen kasvu tiheän kuusikon pienissä aukoissa tai taimien väleissä on varmasti tässä esitettyjä asetelmia hitaampi.

Kaksijaksoisen sekametsikön tutkimisessa käytetty subjektiivisesti valittu kertakoeaineisto (III) oli verrattain pieni (31 metsikköä). Se rajoittui kivennäismaiden kuuselle ja koivulle sopiville kasvupaikoille. Tutkimuskohteiksi valittiin metsiköitä siten, että aineistoon sisältyi laajaa vaihtelua koivujaksojen iän ja puuston määrän suhteen sekä hies- että rauduskoivulla. Aineiston heikkoutena oli se, ettei koivujaksojen alkuperää ja aiempaa käsittelyä tunnettu tarkasti. Pienten valtapituusboniteetin arvojen perusteella on todennäköistä, että koivujakso oli muutamissa vanhimmissa hieskoivumetsiköissä peräisin nuorena vallitussa asemassa kasvaneesta puustosta. Valtapituusboniteetin kyky kuvata kasvupaikan puuntuotoskykyä oli huono, eikä se korreloinut kuusten kasvun kanssa merkitsevästi vaikka aineistossa oli verrattain suuri kasvupaikkavaihtelu. Valtapituusboniteettia ei tästä syystä vaihdeltu malleilla laskettaessa. Kaikki esitetyt tulokset edustivat aineiston keskimääräistä kasvupaikkaa. Jakaumasta oli 8 % lehtoja, 60 % lehtomaista kangasta ja 32 % tuoretta kangasta.

Aineiston (III) toinen heikkous oli se, että kuusikon vapautuksen jälkeisen kehityksen mallittaminen ei ollut mahdollista aineiston pienuuden ja ja puuttuvien puustotietojen takia. Vapautusreaktion kestoa ja suuruutta pystyttiin kuitenkin jossain määrin arvioimaan kuuden vapautetun metsikön pituuskasvutietojen avulla. Kuusten pituuskasvu alkoi lisääntyä vasta 2–3 vuoden kuluttua vapautuksesta. Sen jälkeen vuotuinen pituuskasvu lisääntyi erittäin nopeasti kuusikon alta vapautettuihin alikasvoksiin verrattuna (II ja Cajander 1934a, Skoklefald 1967, Bergan 1971) ja oli ohi viimeistään 7–8 vuoden kuluttua vapauttamisesta. Tässä tutkimuksessa ei voitu koetella Erikssonin (1976), Berganin (1987) ja Thamin (1988a) esittämiä, melko vähäiseen empiiriseen evidenssiin perustuvia päätelmiä, joiden mukaan koivikon alta vapautetut kuuset kasvavat elpymisjakson jälkeen nopeammin kuin saman kokoiset vapaana kasvaneet kuuset.

Kasvututkimuksen tulokset osoittivat, että koivikon kasvu korvasi ja ylitti selvästi kuusikolle aiheutetun tilavuuskasvutappion (III). Tilavuuskasvu on kuitenkin huono taimikoiden vertailuperuste. Vasta tulevien vuosikymmenten nopean tilavuuskasvun vaiheessa todetut erot merkitsevät jotain olennaista puuntuotoksen ja taloustuloksen kannalta. Jatkokehityksen ja kuusen koko kiertoajan kannalta on mielekkäämpää yrittää arvioida, kuinka monta vuotta kuusikon kehitys jää puhtaasta kuusikosta jälkeen koivun kasvattamisen takia. Esitetyissä esimerkkilaskelmissa pituuden ja läpimitan kasvun jälkeenjääneisyys vastasi 36 vuoden iässä korkeintaan 5–6 vuoden kasvua. Nuoren koivikon asetelma edusti hyvin voimakasta koivun kilpailua. Voidaan olettaa, ettei koivun vaikutus ylitä 5 vuoden kasvua taloudellisesti järkevissä tiheysvaihtoehdoissa.

Koko kiertoajan tuotos- ja tuottolaskelmissa (IV) käsiteltiin ainoastaan kuusen kanssa yhtä aikaa syntyneestä koivikosta muodostettua verhopuustoa ja sen jatkokasvattamista taloudelliseen hakkuukypsyyteen saakka. Jätepuustosta kasvatettua verhopuustoa ei sisältynyt aineistoon. Koivikon kasvu ja kehitys ovat vanhan koivikon alle tehdyssä kuusen ennakkoistutuksessa huomattavasti kuusen taimikon kehitystä tärkeämpiä tekijöitä puuntuotoksen ja taloudellisen tuloksen kannalta. Ennakkoistutetun kuusikon kehityksen tutkiminen ei siten vaikuttanut relevantilta kysymykseltä tässä tutkimuksessa. Tutkimusaineisto ei myöskään kattanut kuusikon varhaisinta kehitysvaihetta.

Tulokset osoittivat, että koivikon kasvattaminen verhopuustona kuusen kahden metrin keskipituuteen asti ja poistaminen taimikonhoitotyönä ilman hakkuutuloja on taloudellisesti huono vaihtoehto, jos hallasuojaa ei tarvita. Kuusikolle aiheutui 15 vuoden aikana 4,1–6,3 % tilavuustuotostappio ja 3,0–7,4 % tuottotappio (ilman diskonttausta) puhtaaseen kuusikkoon verrattuna. Tilanne voi olla toinen hallanaroilla kasvupaikoilla, joilla verhopuustosta voi olla merkittävää hyötyä kuusikon kehitykselle. Tulokset eivät kuitenkaan tukeneet käsitystä, että koivujakso kannattaa poistaa heti, kun hallasuojaa ei enää tarvita (Heikinheimo 1941, Hannelius 1978, Heikurainen 1985). Hannelius (1978) päätteli yhden kestokokeen perusteella, ettei koivun rahallinen tuotto korvaa kuuselle aiheutunutta kasvutappiota. Kokeessa kasvatettiin koivua vain 16 vuoden ajan, jolloin hakkuutulot jäivät luonnollisesti vähäisiksi. Hanneliuksen (1978) tutkimuksessa ei käsitelty mahdollisuutta kasvattaa koivikko tukkipuustoksi.

Tulokset näyttivät tukevan kasvututkimusten perusteella esitettyjä käsityksiä siitä, että koivun kasvattaminen kannattaa hallasuojan tarpeen väistyttyäkin (Eriksson 1976, Andersson 1984, Bergan 1987, Tham 1988a, 1994, Carlsson 1990, Niemistö 1995b, Mård 1996, 1997). Kun tulosta mitattiin nettotulojen nykyarvolla 4 % korolla, kuusi-rauduskoivikon kasvattamisen tuotto oli parhaassa ylispuuvaihtoehdossa 151 % ja kuusi-hieskoivikon 113 % puhtaan kuusikon kiertoajan tuotosta. Sekametsikön tuotto ei jäänyt missään tiheysvaihtoehdossa (200–1 000 kpl ha^{-1}) puhdasta kuusikkoa pienemmäksi. Kuusen kasvumallien sovellutusalueen (III) loppuminen 30 vuoden iässä selvästi ennen koivun kasvatuksen optimiajan saavuttamista heikensi simulointitutkimuksen tulosten arvoa. Koivun malleilla voitiin kuitenkin arvioida sen optimaalinen kasvatusaika rauduksella noin 40 vuodek-

si ja hieksellä 45–50 vuodeksi. Koivun optimaalinen runkoluku jäi epäselväksi. Laskelmissa käytetty maksimi 1 000 kpl ha^{-1} antoi parhaan tuloksen. Se arvioitiin kuitenkin liian suureksi 10–25 vuoden jatkokasvatusta varten. Optimi on ilmeisesti välillä 500–800 kpl ha^{-1}. Carlssonin (1990) laskelmien mukaan rauduskoivujakson optimaalinen kasvatustiheys olisi 300–600 kpl ha^{-1} ja kasvattamisaika 40–50 vuotta. Tham (1988a) piti tiheyttä 800 kpl ha^{-1} parhaana. Hyvin pitkä koivun kasvattamisaika voi aiheuttaa kuusten kasvun voimakkaamman hidastumisen kuin mitä tässä tutkimuksessa oletettiin, jos kuuset ovat niin pitkiä että ne alkavat kasvaa koivujen latvusten sisään. Kuusi menestyy koivun kanssa sekametsässä vain, jos puulajit kasvavat tasaväkisesti vierekkäin tai jos kuusi on selvästi alemmassa latvuskerroksessa tai kuusilla on riittävästi kasvutilaa koivujen välissä (Heikinheimo 1941, Jonsson 1961, Fries 1964, 1974).

Ylispuuvaihtoehtojen edullisuus perustui pitkälti koivun poistamisesta saatuihin suuriin, aikaisiin hakkuutuloihin. Rauduskoivuylispuuston kasvattaminen kuusen kanssa tuotti ilman diskonttausta vain 0,6–1,8 % puhdasta kuusikkoa suuremmat tuotot. Hieskoivikon kasvattaminen tuotti vastaavasti tappiota 1,2–3,9 %. Koivujakson kasvu kompensoi ja ylitti korjuuvaurioista seuranneesta runkoluvun alentumisesta ja kasvun hidastumisesta aiheutuneet kuusen kasvutappiot kaikkein pienintä hieskoivikon tiheyttä lukuun ottamatta.

Koivikon puunkorjuu moottorisahahakkuuna oli mallilaskelmien mukaan keskimäärin 2,0 kertaa niin kallista kuin kuusen korjuu monitoimikoneen hakkuuna. Koivun tienvarsihinta kuutiometriä kohti, josta oli vähennetty korjuukustannukset, oli siten vain 50,0–68,9 % kuusen hinnasta (IV). Ennustettu ihmistyövaltaisten korjuumenetelmien kustannusten nousu ja metsuripula (Kansallinen metsäohjelma 1999) voivat tulevaisuudessa rajoittaa kaksijaksoisen metsikön kasvattamisen mahdollisuuksia. Jos koneellinen korjuu osoittautuu soveltuvan kaksijaksoisiin metsiköihin, mihin Peltoniemen (1991) tutkimus näyttäisi viittaavan, niiden kasvattamisen kannattavuus lisääntyy merkittävästi. Ylispuujakson taitamattomasta, väärin tehdystä korjuusta voi varmasti aiheutua huomattavasti malleilla estimoitua (kuusen kuolleisuus 382–581 kpl ha^{-1}) suuremmat korjuuvauriot (Frilander 1985, Maukonen 1987). Toisaalta voidaan olettaa, että huolellisella ja varovaisella työllä ja sopivin menetelmin voidaan selvitä tässä esitettyä pienemmin vaurioin.

Harvana kasvatettavan koivuylispuuston laatu voi olla oksikkuuden takia huonompi kuin normaalitiheyksissä koivun viljelymetsiköissä (Niemistö 1995a, 1998). Tukkipuun laatu voi olla huonompi ja tukkipuuosuuskin mahdollisesti pienempi. Hieskoivun tukkipuuosuus on kivennäismaan kasvupaikoilla pienempi ja laatu huonompi kuin rauduksen (Verkasalo 1997). Näitä laatutekijöitä ei voitu ottaa huomioon simulointilaskelmien runkojen pölkytyksessä. Herkkyysanalyysin tyyppiset laskelmat osoittivat, että vaikka koivuista ei saataisi lainkaan tukkipuuta vaan ainoastaan kuitupuuta, kaksijaksoisen metsikön kasvattaminen olisi silti puhdasta kuusikkoa kannattavampaa sekä hies- että rauduskoivulla tiheyksillä yli 300 kpl ha^{-1}.

Ylispuukoivikon samoin kuin minkä tahansa koivusekametsikön kasvattamisen kannattavuus riippuu pitkällä aikavälillä koivun kysynnästä ja puulajien hintasuhteista. Koivun kysynnän vähenemistä ja hinnan laskua sen haapaa ja monia

tropiikin lyhytkiertoisia lehtipuita huonompien kuituominaisuuksien takia on jo ennakoitu (Ranua 1999). Kaksijaksoinen sekametsikkö ei kuitenkaan menettäisi kannattavuusetumatkaansa (nettotulojen nykyarvo 4 % korolla) puhtaaseen kuusikkoon verrattuna, vaikka koivun tukki- ja kuitupuun hinnat laskisivat 25 % kuusen hinnan pysyessä ennallaan. 50 % hinnanalennus tekisi jo koivun kasvattamisen kannattamattomaksi.

6 Päätelmät

Työn tarkoituksena oli selvittää kuusen taimikon aukoissa kasvatettavan koivutäydennyksen, kaksijaksoisen kuusi-koivu sekametsikön sekä vapautetun kuusialikasvoksen käyttökelpoisuutta puhtaan kuusen istutustaimikon kasvattamisen vaihtoehtoina tai sitä täydentävinä elementteinä.

Tutkimuksessa laadittujen empiiristen mallien käyttömahdollisuudet ovat vahvasti sidoksissa niiden laadinta-aineistoihin. Ne sopivat vain laadinta-aineistossa esiintyviä tapauksia muistuttavien metsiköiden kehityksen ennustamiseen. Koemetsiköt edustivat kuusen kasvattamiseen riittävän viljavina pidettyjä kivennäismaiden kasvupaikkoja tuoreesta kankaasta lehtoon. Laaditut mallit edustavat talousmetsien keskimääräisiä metsiköitä jonkin verran parempaa metsänhoidollista tilaa.

Puhtaiden kuusen viljelytaimikoiden malleilla (I) voidaan ennustaa puuston kehitystä tuoreilla kankailla ja sitä paremmilla kivennäismaan kasvupaikoilla Etelä-Suomesta Pohjanmaan-Kainuun metsäkasvillisuusvyöhykkeelle asti. Laskennan lopputilanteen suurin valtapituus on 11–12 m. Kuusen taimikon aukkoja täydentämään jätettyjen siemensyntyisten koivujen pituuskasvumallissa kuuset ja koivut kasvavat niin erillään toisistaan, etteivät ne kilpaile merkittävästi keskenään. Vapautetun alikasvoksen pituuskasvun mallit kuvaavat verrattain vanhoina (40–60 vuotta) mutta hyväkuntoisina vapautettujen alikasvoskuusten pituuskehitystä tuoreen ja lehtomaisen kankaan kasvupaikoilla Etelä-Suomessa. Kaksijaksoisten kuusi-koivusekametsiköiden malleilla voidaan ennustaa ainoastaan aineiston keskimääräistä kasvupaikkaa edustavien metsiköiden kasvua Etelä-Suomessa. Raudustai hieskoivikko voi olla iältään, tiheydeltään ja puiden kooltaan laajasti vaihteleva, mutta sillä täytyy olla selvä pituusero kuuseen verrattuna. Koivikko ei saa olla peräisin jätepuustosta tai harsitusta tai voimakkaasti yläharvennetusta metsiköstä.

Tutkimuksen tulosten perusteella voidaan tehdä seuraavia käytännön kannalta keskeisiä päätelmiä:

1. Alikasvoskuusten pituuskasvu alkaa merkittävästi nopeutua keskimäärin vasta 4–5 kasvukauden kuluttua vapauttamisesta. Pituuskasvun vapautusreaktio (ajanjakso, jolloin elpyvän taimen pituuskasvu on hitaampi kuin saman kokoisen aina vapaana kasvaneen taimen kasvun) saattaa hyväkuntoisilla alikasvoksillakin kestää ainakin 10 vuotta. Pituudeltaan 1,0–1,5 m alikasvostaimet olivat 10 vuoden kuluttua yhtä pitkiä kuin samaan aikaan viljellyt kuusikoiden valtataimet. Suuri koko ja nopea kasvu ennen vapauttamista ennustivat nopeaa elpymistä ja

pituuskasvua alikasvostaimikoissa, joissa suuri koko ei liittynyt merkittävästi suurempaan ikään.

2. Alikasvostaimikoiden kokojakaumat olivat selvästi viljelytaimikoita leveämpiä ja vinompia. Ero tasoittui jonkin verran vapautuksen jälkeisinä 10 vuotena. Suuret kokoerot yhdistyneenä epätasaiseen tilajärjestykseen merkitsevät sitä, että runkoluvulla mitaten yhtä tiheän alikasvoksen puuntuotannollinen arvo on pienempi kuin viljelytaimikon. Ensiharvennuksen taloudellisuus on huonompi metsikössä, jossa suuri osa poistettavista rungoista on pieniä.
3. Kuusen viljelytaimikoiden aukkoja täydentämään jätetyt rauduskoivun siementaimet saavuttivat kuusikon valtataimiin verrattuna eteläsuomalaisella OMT:llä neljän metrin ja MT:llä kahden metrin pituusetumatkan 15 vuodessa viljelyn jälkeen. Näin pienet erot eivät estä tasapainoista pituuskehitystä yksijaksoiseksi sekametsäksi. Koivu ei tutkimusaineiston metsiköissä kilpaillut kuusen kanssa. Nopeasti kasvava, tiheä koivikko voi kuitenkin hidastaa kuusen kehitystä hyvin voimakkaasti, jolloin syntyy kaksijaksoinen sekametsikkö jos perkausta ei tehdä. Viiden vuoden tarkkuudella samanikäisissä kaksijaksoisissa kuusi-koivusekametsiköissä, joissa kuusen valtapituus oli 3,0–8,2 metriä, koivu oli saavuttanut keskimäärin 10,6 metrin valtapituusetumatkan. Koivun taimien pituuskasvumallit perustuivat pieneen aineistoon ja niiden antamiin tuloksiin on syytä suhtautua varovasti kunnes ne pystytään testaamaan laajemmalla aineistolla.
4. Jos kuusen taimikon perkaus voidaan kuusen kehityksen merkittävästi hidastumatta lykätä kuusen 10 vuoden ikään asti ja aukkoja täydentävät rauduskoivut voidaan valita suunnilleen kuusen valtapituutta (n. 2–2,5 m) vastaavien puiden joukosta, täydennyskoivun pituusetumatkan kasvamisesta liian suureksi ei ole suurta vaaraa. Siemensyntyiset, aukkojen täydennykseksi jätetyt, kuusen kanssa samanikäiset hieskoivut eivät uhkaa pituuskehityksensä puolesta kuusen valtaasemaa, vaikka ne saavuttavatkin ensimmäisinä viljelyn jälkeisinä vuosina noin metrin pituusetumatkan kuusikon valtapuihin verrattuna.
5. Koivujen kantovesojen pituuskasvu on aluksi selvästi koivun siementaimia ja kuusia nopeampi, mutta hidastuu nopeasti. Ennen viljelyä raivattujen koivujen kannoista syntyneiden vesojen ja kuusen taimien pituusero oli rauduksella suurimmillaan 4–5 m ja hieksellä 2,5–3 m. Tällainen pituusero ei ole kuuselle sellaisenaan vaarallinen. Vesakon tiheys on ratkaiseva tekijä perkaustarvetta harkittaessa. Vesojen syntymistä voidaan vähentää kemiallisilla torjunta-aineilla, joskin niiden käyttö on nykyisin vähäistä.
6. Koivikon kasvattaminen kuusikon verhopuustona ja poistaminen taimikonhoitotyönä ilman hakkuutuloja on taloudellisesti kannattamatonta, jos hallasuojaa ei tarvita. Tilanne voi olla toinen hallanaroilla kasvupaikoilla, joilla verhopuustosta voi olla merkittävää hyötyä kuusikon kehitykselle.
7. Kuusikon päällä kasvatettavan rauduskoivuylispuuston tuotos 30 vuoden ikään asti oli suurimmillaan 173 $m^3 ha^{-1}$ ja hieskoivulla 91 $m^3 ha^{-1}$. Maksimituotos saavutettiin laskelmissa käytetyllä suurimmalla runkoluvulla 1 000 kpl ha^{-1}. Tuotosluvut aliarvioivat koivun tuotospotentiaalia, koska simuloinnit jouduttiin keskeyttämään optimia pienemmällä iällä kuusen mallin sovellutusalueen päätty-

essä. Lisälaskelmat osoittivat, että jos koivujakson kasvattamista jatketaan sen taloudelliseen hakkuukypsyyteen asti, sen kokonaistuotosta voidaan lisätä selvästi.

8. Koivun ylispuujakson kasvattamisesta järeäksi ainespuuksi ja korjaamisesta kuusen taimikossa seuraa kuuselle kasvutappiota. Kasvutappio oli 30 vuoden ikään mennessä rauduskoivulla suurimmillaan 93 $m^3 ha^{-1}$ eli 16,8 % puhtaan kuusikon tuotoksesta ja hieskoivulla 72 $m^3 ha^{-1}$ eli 10,8 % laskelmien maksimirunkoluvulla (1 000 kpl ha^{-1}). Kasvutappiot aiheutuivat kuusikon kasvun hidastumisesta kilpailun takia sekä kuusikon runkoluvun pienenemisestä korjuuvaurioiden takia. Koivujakson harvennuksessa ja poistamisessa aiheutettiin kuusikossa 382–581 kpl ha^{-1} suuruinen runkoluvun vähennys. Jos koivujakson kasvattamista jatketaan sen taloudelliseen hakkuukypsyyteen asti, kuusen kasvutappiot ovat suuremmat.
9. Ylemmän koivujakson kasvattaminen järeäksi ainespuuksi kuusen taimikossa on kannattavaa. Kun tulosta mitattiin nettotulojen nykyarvolla 4 % korolla, rauduskoivikosta saatava lisätuotto oli parhaassa ylispuuvaihtoehdossa +51 % puhtaan kuusikon tuotosta ja hieskoivikon +13 % kun koivikko päätehakattiin 30 vuoden iässä. Lisälaskelmat osoittivat, että jos koivujakson kasvattamista jatketaan sen taloudelliseen hakkuukypsyyteen asti, sen taloudellista kannattavuutta voidaan lisätä selvästi.
10. Koivusta saatavat suuret, aikaiset hakkuutulot ovat ylispuuvaihtoehtojen edullisuuden tärkein tekijä. Ihmistyövaltaisesta, vaikeasta puunkorjuusta sekä korjuuvaurioiden ja kilpailun aiheuttamasta kuusen kasvutappiosta aiheutuvat rahalliset menetykset olivat laskelmissa suunnilleen yhtä suuret kuin koivusta saadut lisätulot, kun molemmat laskettiin ilman korkoa.
11. Koivun optimaalinen kasvatusaika on nykyisillä hintasuhteilla rauduksella noin 40 vuotta ja hieksellä 45–50 vuotta. Koivun optimaalinen runkoluku on ilmeisesti välillä 500–800 kpl ha^{-1}.

Kirjallisuus

Agestam, E. 1985. En produktionsmodell för blandbestånd av tall, gran och björk i Sverige. Summary: A growth simulator for mixed stands of pine, spruce and birch in Sweden. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsproduktion. Rapport 15. 76 s. + 74 liitesivua.

Almgren, G. 1990. Lövskog: björk, asp och al i skogsbruk och naturvård. Skogsstyrelsen, Jönköping. 261 s.

Andersson, O. 1988. Granmarbuskar som inslag vid beståndsanläggning. Summary: Severely suppressed trees of Picea abies as complement at forest regeneration. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsproduktion. Rapport 24. 48 s.

Andersson, S.-O. 1984. Om lövröjning i plant- och ungskogar. Sveriges Skogsvårdsförbunds tidskrift 82 (3–4): 69–95.

Annila, E. 1998. Uusittujen metsänkäsittelymenetelmien vaikutus uhanalaisiin lajeihin. Julkaisussa: Annila, E. (toim.). Monimuotoinen metsä. Metsäluonnon monimuotoisuuden tutkimusohjelman väliraportti. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 705: 198–221.

Assman, E. 1961. Waldertragskunde. München. 490 s.

Bailey, R. 1980. Individual tree growth derived from diameter distribution models. Forest Science 26(4): 626–632.

— & Dell, T. 1973. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. Forest Science 19(2): 97–104.

Bergan, J. 1971. Skjermforyngelse av gran samenlignet med plantning i Grane i Nordland. Summary: Natural Norway spruce regeneration under shelterwood compared with plantations at Grane in Nordland. Meddelser fra det Norske skogforsöksvesen 28(104): 194–211.

— 1987. Virkningen av björkeskjerm på etablering og vekst hos bartraer utplantet i Nord-Norge. Summary: The influence of birch shelter trees on establishment and growth of conifers planted in North Norway. Norsk Institutt for Skogsforskning. Rapport 10. 47 s.

Berninger, F. 1996. Acclimation and adaption as determinants of growth in Scots pine. Helsingin yliopiston metsäekologian laitoksen julkaisuja 77. 54 s.

Biging, G. & Dobertin, M. 1995. Evaluation of competition indices in individual tree growth models. Forest Science 41(2): 360–377.

Björkdahl, G. 1983. Höjdutveckling hos stubbskott av vårt- och glasbjörk samt tall och gran efter mekanisk röjning. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsproduktion. Stencil 18. 54 s.

Blake, J., Somers, G. & Ruark, G. 1990. Perspectives on process modeling of forest growth responses to environmental stress. Julkaisussa: Dixon, R., Meldahl, R., Ruark, G. & Warren, W. (toim.). Process modeling of forest growth responses to environmental stress. Timber Press, Portland, Oregon. s. 9–17.

Cajander, A.K. 1909. Über Waldtypen. Acta Forestalia Fennica 1. 175 s.

Cajander, E. 1934a. Kuusen taimistojen vapauttamisen jälkeisestä pituuskasvusta. Referat: Über den Höhenzuwachs der Fichtenpflanzenbestände nach der Befreiung. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 19(5). 59 s.

— 1934b. Tutkimuksia Etelä-Suomen viljelykuusikoiden kehityksestä. Referat: Untersuchungen über die Entwicklung der Kulturfichtenbestände in Süd-Finnland. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 19(3). 101 s.

Carlsson, D. 1990. Economic optimization of forest management in mixed stands of Norway spruce (Picea abies) and birch (Betula pendula). Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsekonomi. Arbetsrapport 113. 27 s. + 19 liites.

— 1995. Optimisation of even-age stand management, with an emphasis on mixed stand. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsekonomi. Rapport 114. 105 s. + liitteet.

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.

Daniel, T., Helms, J. & Baker, F. 1979. Principles of silviculture. McGraw-Hill, New York. 500 s.

Dixon, W., Brown, M., Engelman, L. & Jennrich, R. 1990. BMDP Statistical Software Manual. University of California Press, Berkeley. 738 s.

Draper, N. & Smith, H. 1981. Applied regression analysis. John Wiley & Sons, New York. 709 s.

Ekö, P. 1985. En produktionsmodell för skog i Sverige, baserad på bestånd från riksskogstaxeringens provytor. Summary: A growth simulator for Swedish forests, based on data from the national forest survey. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för Skogsskötsel. Rapport 16. 224 s.

Elfving, B. 1982. HUGIN's ungskogstaxering 1976–1979. Sveriges Lantbruksuniversitet, projekt Hugin. Rapport 27. 87 s.

Eriksson, H. 1976. Granens produktion i Sverige. Summary: Yield of Norway spruce in Sweden. Skogshögskolan, Institutionen för Skogsproduktion. Rapporter och uppsatser 41. 291 s.

Ferm, A. 1990. Coppicing, aboveground woody biomass production and nutritional aspects of birch with specific reference to Betula pubescens. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 348. 35 s. + 9 osajulkaisua.

Folkesson, B. & Bärring, U. 1982. Exempel på en riklig björkförekomsts inverkan på utvecklingen av unga tall- och granbestånd i norra Sverige. Summary: Some examples of the influence of an abundant occurrence of birch on the development of young Norway spruce and Scots pine stands in north Sweden. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skoglig herbologi. Rapport 1. 64 s.

Ford, E. 1984. The dynamics of plantation growth. Julkaisussa: Bowen, G. & Nambiar, E. (toim.). Nutrition of plantation forests. Academic Press, London. s. 17–52.

Fries, C. 1990. Utveckling hos beståndsföryngrad gran och kompletteringsplanterade granar och tallar i ett kärvt klimatläge. Summary: development of advance growth of Norway spruce and supplementary planted spruce and Scots pine in a harsh climate. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsskötsel. Rapporter 30. 40 s.

Fries, J. 1964. Vårtbjörkens produktion i Svealand och södra Norrland. Summary: Yield of Betula verrucosa Ehrh. in Middle Sweden and southern North Sweden. Studia Forestalia Suecica 14. 303 s.

— 1974. Björk och gran. I: Framtidsskogen-Skogsproduktionens mål och medel. Skogshögskolan, Institutionen för skogsproduktion. Rapporter och uppsatser 33: 30–37.

Frilander, O. 1985. Pienikokoisen lehtiverhopuuston korjuun kuusentaimikolle aiheuttamat vauriot. Helsingin yliopiston metsäteknologian laitos. Pro gradu -työ. 75 s.

Frivold, L. 1982. Bestandsstruktur og produksjon i blandingsskog av björk (Betula verrucosa

Ehrh.) og gran (Picea abies (L) Karst.) i sydost-Norge. Summary: Stand structure and yield of mixed stands of birch (Betula verrucosa Ehrh.) and spruce (Picea abies (L) Karst.) in southeast Norway. Meldinger fra Norges Lantbrukshögskole 90(3): 108 s.

Givnish, T. 1988. Adaptation to sun and shade: a whole-plant perspective. Australian Journal of Plant Physiology 15: 63–92.

Godfrey, K. 1983. Compartmental models and their applications. Academic Press, New York. 291 s.

Gustavsen, H. 1977. Valtakunnalliset kuutiokasvuyhtälöt. Summary: Finnish volume increment functions. Folia Forestalia 331. 37 s.

Gustavsen, H. 1980. Talousmetsien kasvupaikkaluokittelu valtapituuden avulla. Abstract: Site index curves for conifer stands in Finland. Folia Forestalia 454. 31 s.

— 1987. Kasvupaikan boniteetin määritys. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 257: 80–107.

— & Mielikäinen, K. 1984. Talouskoivikoiden kasvupaikkaluokittelu valtapituuden avulla. Summary: Site index curves for natural birch stands in Finland. Folia Forestalia 597. 20 s.

— , Roiko-Jokela, P. & Varmola, M. 1988. Kivennäismaiden talousmetsien pysyvät (INKA ja TINKA) kokeet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 292. 212 s.

Hafley, W. & Buford, M. 1985. A bivariate model for growth and yield prediction. Forest Science 31(1): 237–247.

— & Schreuder, H. 1977. Statistical distributions for fitting diameter and height data in even-aged stands. Canadian Journal of Forest Research 7(3): 481–487.

Hannelius, S. 1978. Istutuskuusikon tiheys – tuotoksen ja edullisuuden tarkastelua. Summary: Initial tree spacing in Norway spruce timber growing-an appraisal of yield and profitability. Folia Forestalia 359. 51 s.

Hannerz, M. & Gemmel, P. 1994. Granföryngring under skärm – en litteraturstudie med kommentarer. SkogForsk. Redogörelse 4. 51 s.

Hari, P. 1996. Photosynthesis. Julkaisussa: Hari, P., Ross, J. & Mecke, M. (toim.) Production process of Scots pine; Geographical variation and models. Acta Forestalia Fennica 254: 27–38.

— , Kellomäki, S., Mäkelä, A., Ilonen, P., Kanninen, M., Korpilahti, E. & Nygrén, M. 1982. Metsikön varhaiskehityksen dynamiikka. Summary: Dynamics of early development of tree stand. Acta Forestalia Fennica 177. 42 s.

Hasenauer, H. 1994. Ein Einzelbaumwachstumssimulator für ungleichaltrige Fichten-Kiefern- und Buchen-Fichten -Mischbestände. Universität für Bodenkultur, Wien. Forstliche Schriftenreihe 8. 152 s.

Heikinheimo, O. 1941. Metsänistutusmenetelmistä. Referat: Versuche mit waldbaulichen Pflanzmethoden. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 29(4): 63 s.

Heikurainen, L. 1958. Sekametsiköiden juuristoista ojitetulla suolla. Referat: Der Wurzelaufbau in Mischwäldern auf entwässerten Moorböden. Acta Forestalia Fennica 67(2). 32 s.

— 1985. Verhopuuston vaikutus kuusitaimikon kehitykseen. Summary: The influence of birch nurse crop (Betula pubescens) on the growth of spruce (Picea abies) seedling stands on drained peatlands. Silva Fennica 19 (1): 81–88.

Henttonen, H. 1989. Pituus- ja ikämallit. Metsäntutkimuslaitos, Suonenjoen tutkimusasema, Suonenjoki. Käsikirjoitus. 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 turvemailla. Helsingin yliopiston suometsätieteen laitos. Pro gradu -työ. 47 s.
Hunt, R. 1982. Plant growth curves. Edward Arnold, London. 248 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. 1995a. Modeling tree growth for managed stands. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 576. 59 s. + 76 liites.
— 1995b. Models for predicting the development of Finnish forests. IUFRO XX World Congress, 6–12 August 1995, Tampere, Finland. Abstracts of invited papers. 281–282 s.
— 1996. Puuston kehityksen ennustaminen metsätalouden suunnittelulaskelmissa – katsaus MELA-järjestelmän uusiin kasvumalleihin. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 589. 59–67.
Hyppönen, M., Saksa, T. & Valkonen, S. 1998. Alikasvokset ja nykypäivän metsänhoito. Julkaisussa: Moilanen, M. & Saksa, T. (toim.). Alikasvokset metsän uudistamisessa – varjosta valoon. Metsälehti kustannus ja Metsäntutkimuslaitos. Pihlaja-sarja 3: 13–17.
Hägg, A. 1988. Lönsamheten av björkinblandning i barrskog. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för virkeslära. Rapport 201. 62 s.
Hägglund, B. 1976. Skattning av höjdboniteten 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.
Hänninen, T., Räsänen, P. & Yli-Vakkuri, P. 1972. Männyn ja kuusen luontaisen uudistamisen antamista tuloksista Etelä-Suomen kangasmailla. Helsingin yliopiston metsänhoitotieteen laitoksen tiedonantoja 7. 96 s.
Hökkä, H. 1997a. Height-diameter curves with random intercepts and slopes for trees growing on drained peatlands. Forest Ecology and Management 97: 63–72.
— 1997b. Models for predicting growth and yield in drained peatland stands in Finland. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 651. 45 s. + 3 osajulkaisua.
— , Alenius, V. & Penttilä, T. 1997. Individual-tree basal area growth models for Scots pine, Pubescent birch and Norway spruce on drained peatlands in Finland. Silva Fennica 31(2): 161–178.
— , Piiroinen, M. & Penttilä, T. 1991. Läpimittajakauman ennustaminen Weibull-jakaumalla Pohjois-Suomen mänty- ja koivuvaltaisissa ojitusaluemetsiköissä. 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 taksatoorisesta merkityksestä, nojautuen etupäässä kotimaiseen kasvutaulujen laatimistyöhön. Referat: Untersuchungen über die taxatorische Bedeutung der Waldtypen, hauptsächlich auf den Arbeiten für die Aufstellung der neuen Ertragstafeln Finlands fussend. Acta Forestalia Fennica 15(3). 267 s.
— & Ilvessalo, M. 1975. Suomen metsätyypit metsiköiden luontaisen kehitys- ja puuntuottokyvyn valossa. Summary: The forest types of Finland in the light of natural development and yield capacity of forest stands. Acta Forestalia Fennica 144. 101 s.

Jeffers, J. 1988. Practitioners handbook on the modelling of dynamic change in ecosystems. John Wiley & Sons. 181 s.

Jonsson, B. 1961. Om barrblandskogens volymproduktion. Summary: Yield of mixed coniferous forests. Meddelanden från statens skogsforskningsinstitut 50(8). 143 s.

Juutinen, P. 1962. Tutkimuksia metsätuhojen esiintymisestä männyn ja kuusen viljelytaimistoissa Etelä-Suomessa. Referat: Untersuchungen über das Auftreten von Waldschäden in den Kiefern- und Fichtenkulturen Südfinnlands. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 54(5). 80 s.

Kaila, S. 1994. Metsänviljelyn vertailulaskentasysteemin rakenne ja laskentaperusteet. Oheismoniste metsätehon tiedotukseen 411. Metsäteho, Helsinki. 65 s.

Kalela, E. 1936. Tutkimuksia Itä-Suomen kuusi-harmaaleppä -sekametsiköiden kehityksestä. Referat: Untersuchungen über die Entwicklung der Fichten-Weisserlen-Mischbestände in Ostfinnland. Acta Forestalia Fennica 44(2). 206 s.

— 1948. Juuristokilpailun merkityksestä kuusikon uudistamisessa. Metsätaloudellinen aikakauslehti 11: 320–323.

— 1949. Männiköiden ja kuusikoiden juurisuhteista. Summary: On the horizontal roots in pine and spruce stand. Acta Forestalia Fennica 57(2). 79 s.

Kangas, A., Kangas, J., Korhonen, K., Maltamo, M. & Päivinen, R. 1990. Metsää kuvaavat mallit. Silva Carelica 7. 143 s.

Kansallinen metsäohjelma 1999. Kansallinen metsäohjelma 2010. MMM:n julkaisuja 2/1999. 38 s.

Kauppi, A., Kiviniitty, M. & Ferm, A. 1988. Growth habits and crown architecture of Betula pubescens Ehrh. of seed and sprout origin. Canadian Journal of Forest Research 18: 1603–1613.

Kellomäki, S. 1995. Computations on the influence of changing climate on the soil moisture and productivity in Scots pine stands in Southern and Northern Finland. Climatic Change 29: 35–51.

— , Lämsä, P., Oker-Blom, P. & Uusvaara, O. 1992a. Männyn laatukasvatus. Summary: Management of Scots pine for high quality timber. Silva Carelica 23. 133 s.

— , Väisänen, H., Hänninen, H., Kolström, T., Lauhanen, R., Mattila, U. & Pajari, B. 1992b. Sima: A model for forest succession based on the carbon and nitrogen cycles with application to silvicultural management of the forest ecosystem. Silva Carelica 22. 91 s.

— , Väisänen, H. & Kolström, T. 1997. Modeling the dynamics of the boreal forest ecosystems for climate change studies in the boreal conditions. Ecological Modelling 97: 121–140.

Kelty, M. 1992. Comparative productivity of monocultures and mixed species stands. Julkaisussa: Kelty, M., Larson, B. & Oliver, C. (toim.). The technology and and silviculture of mixed species stands. Forestry Sciences (40): 125–141.

Kilkki, P. 1983. Sample trees in timber volume estimation. Seloste: Koepuut puuston tilavuuden estimoinnissa. Acta Forestalia Fennica 182. 35 s.

— & Ojansuu, R. 1981. Pituusbonitoinnin ongelmia. Metsä ja puu 1981(3): 26–28.

— & Päivinen, R. 1986. Weibull function in the estimation of the basal area dbh-distribution. Seloste: Weibull-funktio pohjapinta-alan läpimittajakauman estimoinnissa. 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 estimoinnissa. Silva Fennica 23(4): 311–318.

Kimmins, J. 1987. Forest ecology. Macmillan Publishing Company, New York. 531 s.
Koistinen, E. 1985. Alikasvosten esiintyminen eräissä Lounais-Suomen ja Pirkka-Hämeen yksityismetsissä. Helsingin yliopiston metsänhoitotieteen laitos. Lisensiaattityö. 147 s.
Koivisto, P. 1959. Kasvu- ja tuottotaulukoita. Summary: Growth and yield tables. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 51(8). 49 s.
Kolström, T. 1991. Modelling early development of a planted pine stand: An application of object-oriented programming. Forest Ecology and Management 41: 63–77.
— 1992. Dynamics of uneven-aged stands of Norway spruce: a model approach. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 411. 29 s.+ 4 osajulkaisua.
— 1993. Modelling the development of an uneven-aged stand of Picea abies. Scandinavian Journal of Forest Research 8(3): 373–383.
Kramer, H. 1988. Waldwachstumslehre. Paul Parey Verlag, Hamburg. 374 s.
Kurkela, T. 1994. Metsän taudit. Metsäpatologian perusteet. Otatieto Oy, Helsinki. 320 s.
Kuuluvainen, T., Hokkanen, T.J., Järvinen, E. & Pukkala, T. 1993. Factors related to seedling growth in a boreal Scots pine stand: a spatial analysis of a vegetation-soil system. Canadian Journal of Forest Research 23: 2101–2109.
Kärkkäinen, M. 1984. Miten koivuun tulisi suhtautua metsätaloudessa? Summary: The proper attitude towards birch in forestry. Silva Fennica 18(1): 71–100.
Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 108. 74 s.
Laitakari, E. 1935. Koivun juuristo. Summary: The root system of birch (Betula verrucosa and odorata). Acta Forestalia Fennica 41(2). 216 s.
Lappi, J. 1983. Metsänuudistamisen vaatiman ajan merkitys uudistamispäätöksissä. Summary: Evaluation of the time factor in reforestation decisions. Silva Fennica 17(3): 259–272.
— 1993. Metsäbiometrian menetelmiä. Silva Carelica 24. 182 s.
Lappi-Seppälä, M. 1930. Untersuchungen über die Entwicklung gleichaltriger Mischbestände aus Kiefer und Birke. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 15. 243 s.
Larcher, W. 1995. Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of function groups. Springer Verlag, New York. 506 s.
Lehto, J. 1978. Käytännön metsätyypit. Kirjayhtymä, Helsinki. 98 s.
Leikola, M. 1975. Verhopuuston vaikutus metsikön lämpöoloihin Pohjois-Suomessa. Summary: The influence of the nurse crop on stand temperature conditions in Northern Finland. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 85 (7). 33 s.
— & Pylkkö, P. 1969. Verhopuuston tiheyden vaikutus metsikön minimilämpötiloihin hallaöinä. Summary: On the influence of stand density on the minimum temperatures during frost nights. Silva Fennica 3(1): 20–32.
— & Rikala, R. 1983. Verhopuuston vaikutus metsikön lämpöoloihin ja kuusen taimien menestymiseen. Summary: The influence of the nurse crop on stand temperature conditions and the development of Norway spruce seedlings. Folia Forestalia 559. 33 s.
Leinonen, K., Leikola, M., Peltonen, A. & Räsänen, P. 1989. Kuusen luontainen uudistaminen Pirkka-Hämeen metsälautakunnassa. Summary: Natural regeneration of Norway spruce in Pirkka-Häme Forestry Board District, Southern Finland. Acta Forestalia Fennica 209. 53 s.
Leopold, A. & Kriedemann, P. 1975. Plant growth and development. McGraw-Hill, New York. 587 s.

Leslie, P. 1945. On the use of matrices in certain population mathematics. Biometrika 33: 183–212.
Louna, T. & Valkonen, S. 1995. Kotimaisen raaka-aineen asema lehtipuiden teollisessa käytössä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 553. 38 s.
Lundmark, T. & Hällgren, J. 1987. Effects of frost on shaded and exposed spruce and pine seedlings planted in the field. Canadian Journal of Forest Research 17: 1197–1201.
Lähde, E. 1974. Rate of decomposition of cellulose in forest soils in various parts of the Nordic countries. Reports of the Kevo Subarctic Research Station 11: 72–78.
Magnussen, S. 1986. Diameter distributions in Picea abies described by the Weibull model. Scandinavian Journal of Forest Research 1(4): 493–502.
Maltamo, M., Puumalainen, J. & Päivinen, R. 1995. Comparison of beta and Weibull distribution for modelling basal area diameter distribution in stands of Pinus sylvestris and Picea abies. Scandinavian Journal of Forest Research 10(3): 284–295.
Maukonen, A. 1987. Ylispuuhakkuun taimikolle aiheuttamat vauriot. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 244. 30 s.
McCaughey, W. & Ferguson, D. 1988. Response of advance regeneration to release in the inland mountain west: a summary. Future forests of the mountain west. A stand culture symposium. USDA Forest Service, Intermountain Research Station, General Technical Report INT-243: 255–266.
Messier, C., Doucet, R., Ruel, J., Claveau, Y., Kelly, C. & Lechowicz, M. 1999. Functional ecology of advance regeneration in relation to light in boreal forests. Canadian Journal of Forest Research 29 (6): 812–823.
Metsäkeskus Tapio 1995. Luonnonläheinen metsänhoito. Metsänhoitosuositukset. Metsäkeskus Tapion julkaisuja 6/1994. 72 s.
Metsätalous ja ympäristö 1994. Metsätalous ja ympäristö. Metsätalouden ympäristöohjelmatyöryhmän mietintö. Maa- ja metsätalousministeriö, metsäpolitiikan osasto. Työryhmän mietintö 1994(3). 100 s.
Metsätilastollinen vuosikirja 1998. Skogsstatistisk årsbok. Finnish statistical yearbook of forestry. Metsäntutkimuslaitos, Helsinki. 344 s.
Mielikäinen, K. 1978. Puun kasvun ennustettavuus. Abstract: Predictability of tree growth. Folia Forestalia 363. 15 s.
— 1980. Mänty-koivusekametsiköiden rakenne ja kehitys. Summary: Structure and development of mixed pine and birch stands. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 99(3). 82 s.
— 1985. Koivusekoituksen vaikutus kuusikon rakenteeseen ja kehitykseen. Summary: Effect of an admixture of birch on the structure and development of Norway spruce stands. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 133. 79 s.
— & Sennov, S. 1996. Growth trends of forests in Finland and North-Western Russia. Teoksessa: Spiecker, H., Mielikäinen, K., Köhl, M. & Skovsgaard, J. P. (toim.). Growth trends in European forests. Studies from 12 countries. Springer, Berlin. European Forest Institute Research Report 5: 19–28.
— , Nöjd, P., Pesonen, E. & Timonen, M. 1998. Puun muisti. Kasvun vaihtelu päivästä vuosituhanteen. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 703. 71 s.
Mikola, P. 1950. Puiden kasvun vaihteluista ja niiden merkityksestä kasvututkimuksissa. Summary: On variations in tree growth and their significance to growth studies. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 38(5). 131 s.

— 1954. Kokeellisia tutkimuksia metsäkarikkeiden hajaantumisnopeudesta. Summary: Experiments on the rate of decomposition of forest litter. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 43(1). 50 s.
— 1958. Liberation of nitrogen from alder leaf litter. Selostus: Typen vapautuminen lepän lehtikarikkeista. Acta Forestalia Fennica 67(1). 10 s.
— 1985. The effect of tree species on the biological properties of forest soil. Naturvårdsverket. Rapport 3017. 27 s.
Morin, H. & Gagnon, R. 1992. Comparative growth and yield of layer- and seed-origin black spruce (Picea mariana) in Quebec. Canadian Journal of Forest Research 22: 465–473.
Multamäki, E. 1942. Kuusen taimien paleltuminen ja sen vaikutus ojitettujen soiden metsittymiseen. Referat: Das Erfrieren der Fichtenpflanzen und seine Wirkung auf die Bewaldung der entwässerten Moore. Acta Forestalia Fennica 51(1). 352 s.
Munro, D. 1974. Forest growth models – a prognosis. Julkaisussa: Fries, J. (toim.). Growth models for tree and stand simulation. Royal College of Forestry, Department of forest yield study, Copenhagen. s. 7–21.
Mård, H. 1996. The influence of a birch shelter (Betula spp) on the growth of young stands of Picea abies. Scandinavian Journal of Forest Research 11: 343–350.
— 1997. Stratified mixture of young Norway spruce and birch as an alternative to pure stands of Norway spruce. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae Silvestria 35. 29 s. + 4 osajulkaisua.
Mäkelä, A. 1988. Models of pine stand development: An ecophysiological systems analysis. Helsingin yliopisto, Metsänhoitotieteen laitos. Julkaisuja 62. 267 s.
— 1997. A carbon balance model of growth and self-pruning in trees based on structural relationships. Forest Science 43 (1): 7–24.
— & Hari, P. 1986. Stand growth model based on carbon uptake and allocation in individual trees. Ecological Modelling 33: 205–229.
Mäkelä, H. & Salminen, H. 1991. Metsän tilaa ja muutoksia kuvaavia puu- ja puustotunnusmalleja. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 398. 265 s.
Mönness, E. 1982. Diameter distributions and height curves in uneven-aged stands of Pinus sylvestris. Norwegian Forest Research Institute. Reports 36(15). 43 s.
Niemistö, P. 1995a. Influence of initial spacing and row-to-row distance on the crown and branch properties and taper of Silver birch (Betula pendula). Scandinavian Journal of Forest Research 10: 235–244.
— 1995b. Turvemaan hieskoivikon tiheyden vaikutus alikasvoskuusikon kehitykseen. Julkaisussa: Poikolainen, J. & Väärä, T. (toim.). Metsäntutkimuspäivä Kuusamossa 1994. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 552: 87–103.
— 1998. Istutustiheyden ja rivivälin vaikutus rauduskoivun kasvuun ja ulkoiseen laatuun. Julkaisussa: Niemistö, P. & Väärä, T. (toim.). Rauduskoivu tänään – ja tulevaisuudessa. Tutkimuspäivä Tampereella 12.3.1997. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 668: 17–36.
Nikinmaa, E. 1992. Analyses of the growth of Scots pine; matching structure with function. Seloste: Analyysi männyn kasvusta; rakenteen sopeutumista aineenvaihduntaan. Acta Forestalia Fennica 235. 68 s.
— & Hari, P. 1996. Stand model. Teoksessa: Hari, P., Ross, J. & Mecke, M. (toim.). Production process of Scots pine; Geographical variation and models. Acta Forestalia Fennica 254: 79–96.
Nyström, K. & Gemmel, P. 1988. Models for predicting height and diameter of individual

trees in young Picea abies (L.) Karst. stands. Teoksessa: Gemmel, P. 1998. Development of beeted seedlings in stands of Picea abies (L.) Karts. in Southern Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Silviculture, Umeå. 98 s.

— & Kexi, M. 1996. Individual tree basal area growth models for young stands of Norway spruce in Sweden. Teoksessa: Skovsgaard, J. P. & Johannsen, V. K. (toim.). IUFRO Conference Modelling regeneration success and early growth of forest stands, Copenhagen, 10–13 June 1996. Danish Forest and Landscape Research Institute. s. 231–245.

Nyyssönen, A. & Mielikäinen, K. 1978. Metsikön kasvun arviointi. Summary: Estimation of stand increment. Acta Forestalia Fennica 163. 40 s.

Näslund, M. 1936. Skogsförsöksanstaltens gallringsförsök i tallskog. Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt 28(1).

Nöjd, P. 1990. Detecting forest growth responses to environmental changes – a review of Finnish studies. Teoksessa: Kauppi, P., Anttila, P. & Kenttämies, K. (toim.). Acidification in Finland. Springer, Berlin. s. 507–522.

Oikarinen, M. 1983. Etelä-Suomen viljeltyjen rauduskoivikoiden kasvatusmallit. Summary: Growth and yield models for Silver birch (Betula pendula) plantations in Southern Finland. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 113. 75 s.

Ojansuu, R., Hynynen, J., Koivunen, J. & Luoma, P. 1991. Luonnonprosessit metsälaskelmassa (MELA) – Metsä 2000 -versio. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 385. 59 s.

Oker-Blom, P. 1986. Photosynthetic radiation regime and canopy structure in modelled forest stands. Acta Forestalia Fennica 197. 44 s.

— , Pukkala, T. & Kuuluvainen, T. 1989. Relationship between radiation interception and photosynthesis in forest canopies: effect of stand structure and latitude. Ecological Modelling 49: 73–87.

Oliver, C. & Larson, B. 1990. Forest stand dynamics. McGraw-Hill, New York. 467 s.

Oliver, W. 1985. Growth of California red fir advance regeneration after overstory removal and thinning. Pacific Southwest Forest And Range Experiment Station, USDA Forest Service, Research Paper PSW-180. 6 s.

Parviainen, J. & Seppänen, P. 1994. Metsien ekologinen kestävyys ja metsänkasvatusvaihtoehdot. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 511. 110 s.

Peltoniemi, T. 1991. Ylispuiden poisto konetyönä, miestyönä ja niiden yhdistelmänä. Metsätehon katsaus 18/1991. 4 s.

Perttunen, J., Nikinmaa, E., Salminen, H., Saarenmaa, H. & Väkevä, J. 1996. LIGNUM: A Tree Model Based on Simple Structural Units. Annals of Botany 77: 87–98.

— , Sieväen, R. & Nikinmaa, E. 1998. LIGNUM: A Model Combining the Structure and the Functioning of Trees. Ecological Modelling 108: 189–198.

Pohtila, E. 1980. Havaintoja taimikoiden ja nuorten metsien tilajärjestyksen kehityksestä Lapissa. Summary: Spatial distribution development in young tree stands in Lapland. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 98(1). 35 s.

Pothier, D., Doucet, R. & Boily, J. 1995. The effect of advance regeneration height on future yield of black spruce stands. Canadian Journal of Forest Research 25: 536–544.

Pretzsch, H. 1992. Konzeption und Konstruktion von Wuchsmodellen für Rein- und Mischbestände. Forstliche Forschungsberichte München 115. 358 s.

— 1995. Zum Einfluss des Baumverteilungsmusters auf den Bestandeszuwachs.

Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 9–10: 190–201.
Pukkala, T. 1981. Nuoren viljelysekametsikön kehitys. Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteen laitos. Pro gradu -työ. 86 s.
— 1988. Effect of spatial distribution of trees on the volume increment of a young Scots pine stand. Tiivistelmä: Puiden tilajärjestyksen vaikutus nuoren männikön tilavuuskasvuun. Silva Fennica 22(1): 1–17.
— & Kolström, T. 1987. Competition indices and the prediction of radial growth in Scots pine. Silva Fennica 21(19): 55–67.
— & Kolström, T. 1988. Simulation of the development of Norway spruce stands using a transition matrix. Forest Ecology and Management 25: 255–267.
— & Kolström, T. 1991. Effect of spatial pattern of trees on the growth of Norway spruce stand. A simulation model. Tiivistelmä: Tilajärjestyksen vaikutus kuusen kasvuun. Simulointimalli. Silva Fennica 25(3): 117–131.
— , Kellomäki, S. & Mustonen, E. 1988. Prediction of the amenity of a tree stand. Scandinavian Journal of Forest Research 3(4): 535–544.
— , Kuuluvainen, T. & Stenberg, P. 1993. Below-canopy distribution of photosynthetically active radiation and its relation to seedling growth in a boreal Pinus sylvestris stand. Scandinavian Journal of Forest Research 8: 313–325.
— , Miina, J., Kurttila, M. & Kolström, T. 1997. A spatial yield model for optimizing the thinning regime of mixed stand of Pinus sylvestris and Picea abies. Scandinavian Journal of Forest Research 13: 31–42.
— , 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.
Päivinen, R. 1980. On the estimation of stem diameter distribution and stand characteristics. Folia Forestalia 442. 28 s.
Pöntynen, V. 1929. Tutkimuksia kuusen esiintymisestä alikasvoksina Raja-Karjalan valtionmailla. Referat: Untersuchungen über das Vorkommen der Fichte (Picea excelsa) als Unterwuchs in den finnischen Staatswäldern von Grenz-Karelien. Acta Forestalia Fennica 35(1). 235 s.
Ranta, E., Rita, H. & Kouki, J. 1989. Biometria. Yliopistopaino, Helsinki. 569 s.
Ranua, J. 1999. Haavan käyttö paperin raaka-aineena. Teoksessa: Hynynen, J. & Viherä-Aarnio, A. (toim.). Haapa – monimuotoisuutta metsään ja metsätalouteen. Asp – mångfald i skog och skogsbruk. Vantaan tutkimuskeskuksen tutkimuspäivä Tammisaaressa – Forskningsdag i Ekenäs, 12.11.1998. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 725: 101–106.
Ruel, J., Doucet, R. & Boily, J. 1995. Mortality of balsam fir and black spruce advance growth 3 years after clear-cutting. Canadian Journal of Forest Research 25: 1528–1537.
Ruha, M., Hökkä, H., Varmola, M. & Salminen, H. 1997. Stability of height positions in young naturally regenerated stands of Scots pine. Forest Ecology and Management 97: 155–163.
Rummukainen, A., Alanne, H. & Mikkonen, E. 1995. Wood procurement in the pressure of change – resource evaluation model till year 2000. Acta Forestalia Fennica 248. 98 s.
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.

Saarenmaa, L., Hokkanen, T., Kinnunen, K., Lauhanen, R., Rummukainen, A., Saarinen, M., Saksa, T. & Valkonen, S. 1997. Conceptual analysis of the processes affecting forest regeneration. Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus. Käsikirjoitus. 21 s.

Saksa, T., Hyppönen, M. & Valkonen, S. 1998a. Miten suhtautua alikasvoksiin. Julkaisussa: Moilanen, M. & Saksa, T. (toim.). Alikasvokset metsän uudistamisessa – varjosta valoon. Metsälehti kustannus ja Metsäntutkimuslaitos. Pihlaja-sarja 3: 77–84.

— , Saarinen, M. & Valkonen, S. 1998b. Alikasvoksen monet kasvot. Julkaisussa: Moilanen, M. & Saksa, T. (toim.). Alikasvokset metsän uudistamisessa – varjosta valoon. Metsälehti kustannus ja Metsäntutkimuslaitos. Pihlaja-sarja 3: 19–30.

Salminen, H. & Varmola, M. 1990. Puolukkatyypin kylvömänniköiden kehitys taimikon myöhäisestä harvennuksesta nuoren metsän ensiharvennukseen. Summary: Development of seeded Scots pine stands from precommercial thinning to first commercial thinning. Folia Forestalia 752. 29 s.

— , Saarenmaa, H., Perttunen, J., Sievänen, R., Nikinmaa, E. & Väkevä, J. 1994. Modelling Trees Using an Object-Oriented Scheme. Mathematical and Computer Modelling 20 (8): 49–64.

Saramäki, J. 1992. A growth and yield prediction model of Pinus kesiya (Royle ex Gordon) in Zambia. Tiivistelmä: Pinus kesiyan kasvun ja tuotoksen ennustemalli Sambiassa. Acta Forestalia Fennica 230. 68 s.

— & Sekeli, P.M. 1984. The effect of spacing and thinning on the growth and yield of E. cloeziana. The Zambia Forest department, Division of forest research. Research note 34. 19 s.

Sarvas, R. 1944. Tukkipuun harsintojen vaikutus Etelä-Suomen yksityismetsiin. Referat: Einwirkung der Sägestämmeplenterungen auf die Privatwälder Südfinnlands. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 33(1). 268 s.

— 1950. Tutkimuksia Perä-Pohjolan harsimalla hakattujen yksityismetsien uudistamisesta. Summary: Investigations into the natural regeneration of selectively cut private forests in northern Finland. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 38(1). 95 s.

— 1951. Tutkimuksia puolukkatyypin kuusikoista. Summary: Investigations into the spruce stands of Vaccinium type. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 39(1). 82 s.

Savolainen, R. & Kellomäki, S. 1981. Metsän maisemallinen arvostus. Summary: Scenic value of forest landscape. Acta Forestalia Fennica 170. 74 s.

Schmidt-Vogt, H. 1986. Die Fichte. Ein Handbuch in zwei Bänden II/1. Verlag Paul Parey, Hamburg. 563 s.

Searle, S. 1971. Linear models. John Wiley & Sons, New York. 532 s.

Seidel, K. 1985. Growth response of suppressed True fir and Mountain hemlock after release. Pacific Northwest Forest And Range Experiment Station, USDA Forest Service. Research Paper PNW-344. 22 s.

Seppälä, K. & Keltikangas, M. 1978. Alikasvokset Pohjanmaan ojitusalueiden hieskoivikoissa. Suo 29(1): 11–16.

Seppänen, P. 1997. Sekametsät Suomen metsätaloudessa ja metsäntutkimuksessa. Metsätieteen aikakauskirja 2/1997: 298–301.

Sievänen, R. 1992. Construction and identification of models for tree and stand growth.

Helsinki University of Technology, Automation Technology Laboratory, Series A: Research Reports 9. 52 s. + 5 liitettä.

Siipilehto, J. 1988. Metsätalouskuvioiden läpimittajakauman ennustaminen betafunktiolla. Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteen laitos. Pro gradu -työ. 54 s.

— 1996. Metsikön läpimitta- ja pituusjakauman kuvaaminen kaksiulotteisen todennäköisyystiheysfunktion avulla. Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteen laitos. Lisensiaattityö. 71 s.

— 1997. Koivun kasvumallit ja niiden mukaiset tuotosennusteet. Teoksessa: Niemistö, P. & Väärä, T. (toim.). Rauduskoivu tänään – ja tulevaisuudessa. Tutkimuspäivä Tampereella 12.3.1997. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 668: 85–101.

Sirén, G. 1955. The development of spruce forest on raw humus sites in Northern Finland and its ecology. Lyhennelmä: Pohjois-Suomen paksusammalkankaiden kuusimetsien kehityksestä ja sen ekologiasta. Acta Forestalia Fennica 62(4). 408 s.

Skoklefald, S. 1967. Fristilling av naturlig gjenvekst av gran. Summary: Release of natural Norway spruce regeneration. Meddelser fra det Norske skogforsöksvesen 23(85): 385–409.

Snellman, C. 1986. Muutoksia CRK-systeemiin 5.2.1986. Metsäntutkimuslaitos, Matemaattinen osasto. Moniste. 6 s.

Spiecker, H., Mielikäinen, K., Köhl, M. & Skovsgaard, J.P. 1996. Discussion. Teoksessa: Spiecker, H., Mielikäinen, K., Köhl, M. & Skovsgaard, J. P. (toim.). Growth trends in European forests. Studies from 12 countries. European Forest Institute Research Report 5. Springer, Berlin. s. 355–366.

Spurr, S. & Barnes, B. 1980. Forest ecology. John Wiley & Sons, New York. 687 s.

Sterba, H. 1982. On forest's yield theory. Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteen laitoksen tiedonantoja 15. 12 s.

— , Moser, M. & Monserud, R. 1995. Prognaus – Ein Waldwachstumssimulator für Rein- und Mischbestände. Österreichische Forstzeitung 5/1995: 1–2.

Tamminen, P. 1985. Butt-rot in Norway spruce in Southern Finland. Seloste: Kuusen tyvilahoisuus Etelä-Suomessa. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 127. 52 s.

— 1991. Kangasmaan ravinnetunnusten ilmaiseminen ja viljavuuden alueellinen vaihtelu Etelä-Suomessa. Summary: Expression of soil nutrient status and regional variation in soil fertility in Southern Finland. Folia Forestalia 777. 28 + 11 s.

— 1993. Pituusboniteetin ennustaminen kasvupaikan ominaisuuksien avulla Etelä-Suomen kangasmailla. Summary: estimation of site index for Scots pine and Norway spruce stands in South Finland. Folia Forestalia 819. 26 s.

Tesch, S. & Korpela, E. 1992. Douglas-fir and white fir advance regeneration for renewal of mixed-conifer forests. Canadian Journal of Forest Research 23: 1427–1437.

Tham, Å. 1988a. Yield prediction after heavy thinning of birch in mixed stands of Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.) and birch (Betula pendula Roth & Betula pubescens Ehrh.). Sammanfattning: Produktionsförutsägelser vid kraftiga gallringar av björk i blandbestånd av gran (Picea abies (L.) Karst.) och björk (Betula pendula Roth & Betula pubescens Ehrh.). Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Yield Research. Report 23. 36 s.

— 1988b. Structure of mixed Picea abies (L.) Karst. and Betula pendula Roth. and Betula pubescens Ehrh. stands in south and middle Sweden. Scandinavian Journal of Forest Research 3(3): 355–370.

— 1994. Crop plans and yield predictions for Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.)

and birch (Betula pendula Roth and Betula pubescens Ehrh.) mixtures. Studia Forestalia Suecica 195. 21 s.
Thesslund, O. 1976. Tutkimus kookkaan kuusitaimiston vaurioitumisesta ylispuiden poistossa. Summary: On damages in young spruce stands due to removal of superior trees. Helsingin yliopiston metsäteknologian laitoksen tiedonantoja 32. 54 s.
Tikka, P. 1928. Havaintoja kuusen esiintymisestä ja kehityksestä Pohjois-Suomen kuivissa kangasmetsissä. Silva Fennica 10. 83 s.
Tirén, L. 1949. Om den naturliga föryngringen i obrända hyggen i norrländsk granskog. Meddelenaden från Statens Skogsforskningsinstitut 38(9). 43 s.
Tomppo, E. 1986. Models and methods for analysing spatial paterns of trees. Seloste: Malleja ja menetelmiä puiden tilajärjestyksen analysoimiseksi. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 138. 65 s.
UPM-Kymmene Metsä 1996. Metsän uudistaminen. UPM-Kymmene Metsä, Valkeakoski. 64 s.
— 1999. Taimikon perkaus ja uudistusalan raivaus. UPM-Kymmene Metsä, Valkeakoski. 25 s.
Usher, M. 1966. A matrix approach to the management of renewable resources, with special reference to the selection forests. Journal of Applied Ecology 3: 355–367.
— 1969. A matrix model for forest management. Biometrics 25: 309–315.
Vaartaja, O. 1951. Alikasvosasemasta vapautettujen männyn taimistojen toipumisesta ja merkityksestä metsänhoidossa. Summary: On the recovery of released pine advance growth and its silvicultural importance. Acta Forestalia Fennica 59(3). 133 s.
Valkonen, S. 1992. Metsien uudistaminen korkeilla alueilla Pohjois-Suomessa. Summary: Forest regeneration at high altitudes in Northern Finland. Folia Forestalia 791. 84 s.
— 1998. Miten syntyy uudistamistulos? Metsätieteen aikakauskirja 2/1998: 231–234.
Valsta, L. 1988. Optimizing species composition in mixed, even-aged stands. IUFRO Conference on Forest growth modelling and prediction, Minneapolis, Minnesota, August 23–27, 1987. USDA Forest Service. General Technical Report 2: 913–920.
Waring, R. 1987. Characteristics of trees predisposed to die. BioScience 37: 569–574.
Varmola, M. 1980. Männyn istutustaimistojen ulkoinen laatu. Summary: The external quality of pine plantations. Folia Forestalia 451. 21 s.
— 1989. Männyn istutustaimikoiden lustonleveysmalli. Abstract: A model for ring width of planted Scots pine. Silva Fennica 4: 259–269.
— 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. Abstract: Yield and quality of young Scots pine cultivations. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 585. 70 s. + 6 liitettä.
Veltheim, T. 1987. Pituusmallit männylle, kuuselle ja koivulle. Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteen laitos. Pro gradu -työ. 59 s.
Verkasalo, E. 1997. Hieskoivun laatu vaneripuuna. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 632. 542 s.
— 1998. Koivu, haapa ja leppä mekaanisen puuteollisuuden raaka-aineena: käytön näkymiä ja tutkimuksen ongelmanasettelua. Metsätieteen aikakauskirja 2/1998: 254–257.
Vettenranta, J. 1996. Effect of species composition on economic return in a mixed stand of Norway spruce and Scots pine. Silva Fennica 30(1): 47–60.

— 1999. Distance-dependent models for predicting the development of mixed coniferous forests in Finland. Silva Fennica 33(1): 51–72.

Vuokila, Y. 1956. Etelä-Suomen hoidettujen kuusikoiden kehityksestä. Summary: On the development of managed spruce stands in Southern Finland. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 48(1). 138 s.

— 1965. Functions for variable density yield tables of pine based on temporary sample plots. Selostus: Tilapäiskoealoihin perustuvat yhtälöt männyn kasvu- ja tuotostaulukoita varten. Communicationes Insituti Forestalis Fenniae 60(4). 86 s.

— 1977. Puolukkatyyppi kuusen kasvupaikkana. Folia Forestalia 324. 14 s.

— 1983. Suomalaisen puuntuotostutkimuksen menneisyys ja tulevaisuus. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 89. 103 s.

— & Väliaho, H. 1980. Viljeltyjen havumetsiköiden kasvatusmallit. Summary: Growth and yield models for conifer cultures in Finland. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 99 (2). 271 s.

Vähäpesola, J. 1989. Kuusi-rauduskoivusekametsikön taloudellisesti edullisin hakkuuohjelma. Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteen laitos. Pro gradu -työ. 87 + 26 liites.

Zeide, B. 1993. Analysis of growth equations. Forest Science 39(3): 594–616.

246 viitettä.

I

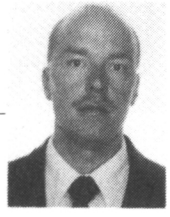
Valkonen, S. 1997

Viljelykuusikoiden alkukehityksen malli

Metsätieteen aikakauskirja 3/1997: 321–347
Painettu Metsätieteen aikauskirjan toimituksen luvalla

Metsätieteen
aikakauskirja

tutkimusartikkeli



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 tunnukset

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 tunnukset

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 tunnukset

S_m selitettävän muuttujan keskihajonta
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 kestävyyden lisäämiseksi ja kustannusten säästämiseksi suositaan nykyisin luontaista uudistamista ja sekametsiä (Metsätalous ja ympäristö 1994, Parviainen ja Seppänen 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 kuusikoivu -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. Nyyssösen ja Mielikäisen (1978) kasvumallien käyttöalue ei ulotu alle 20-vuotiaisiin taimikoihin. Metsäntutkimuslaitoksen MELA-järjestelmän luonnonprosesseja kuvaavia malleja ollaan uusimassa etenkin metsikön varhaiskehitystä kuvattaessa (Ojansuu ym. 1991, Hynynen 1995a, 1996).

Ruotsissa nuorten metsiköiden kehityksen ennustamiseen on yleensä käytetty HUGIN-hankkeen aineistoista laadittuja malleja (Elfving1982, 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 tuhoja 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.

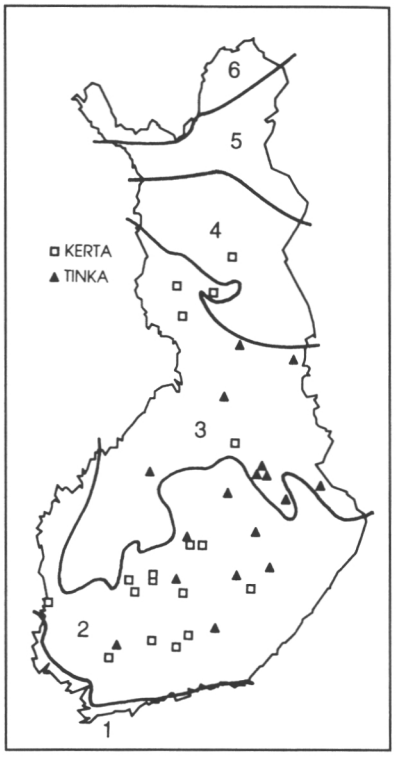
Koemetsiköt sijoittuivat kivennäismaille tasaisesti koko maan alueelle Perä-Pohjolaa ja sitä pohjoisempia metsäkasvillisuusvyöhykkeitä ja rannikkoa lukuun ottamatta (kuva 1). Aineistoihin oli hyväksytty vain onnistuneita istutuksia, joissa viljelykuuset muodostivat kasvatettavaksi kelpaavan, riittävän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

KERTA-aineisto kerättiin vuosina 1968–71. Kuhunkin taimikkoon rajattiin tasaiseen, täystiheään kohtaan vaihtelevan kokoinen suorakaiteen muotoinen koeala, johon kuului vähintään 200 viljelytainta. Koealan puut luettiin puulajeittain. Puiden luvun yhteydessä valitiin systemaattisesti 40 viljelytainta. Niistä puolet valittiin koepuiksi siten, että ne jakautuivat tasaisesti koealalle ja edustivat runkolukusarjan läpimittajakaumaa. Koepuista 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. Kuhunkin metsikköön rajattiin kolme vaihtelevan kokoista ympyräkoealaa. 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 mittausajankohtien välinen ero oli vähäinen (alle 7 vrk) 8 metsikössä. Tätä suurempi ajankohtien ero oli 5 metsikössä. Kolmea viikkoa suurempia poikkemia ei esiintynyt. Poikkeamien vaikutusta pidettiin niin vähäisenä ettei havaintoja korjattu millään tavoin.



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.

2.2 Tutkimusaineisto ja sen käsittely

KERTA-aineistoon sisältyi 22 ja TINKA-aineistoon 20 kuusen viljelytaimikkoa, joista oli käytettävissä 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. Kasvatuskelvottomat puut laskettiin mukaan metsikkökohtaisiin tunnuksiin.

KERTA-aineistossa oli mitattu puiden pituus- ja sädekasvu 15 vuotta taaksepäin. Niistä arvottiin käytettäväksi joko viimeistä tai toiseksi viimeistä 5-vuotiskautta. Kuoreton läpimitta jakson alussa muutettiin kuorelliseksi kuorimallilla. Koepuuaineistoon sovitettu kuorimalli oli muotoa

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

$\hat{g}$ = puun kuorellinen poikkileikkauspinnan ala, cm^2
g_b = puun kuoreton poikkileikkauspinnan ala, cm^2
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	Kasvupaikkatyyppi	T	N_{kuusi}	N_{seka}	N_{kasv}	H_{domku}	D_{gku}	G
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 valtapituus, m
D_{gku} = kuusen pohjapinta-aloilla painotettu keskiläpimitta, cm
G = puuston pohjapinta-ala, m^2 ha^{-1}

mittaushetken todellisen kuorellisen läpimitan ja sen mallilla lasketun ennusteen suhteella.

Kuusikon valtapituudet laskettiin metsiköittäisten pituuskäyrien ja runkolukusarjojen perusteella. Kuusikoepuiden perusteella laadittiin metsiköittäiset pituuskäyrät mittaushetkellä ja kasvujakson alussa Näslundin (1936) malleilla. Yksittäisiä metsiköiden suurimpia puita, joiden läpimittaluokka oli vähintään 2 cm suurempi kuin seuraavaksi suurimman puun läpimittaluokka, ei otettu mukaan valtapituutta 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 kasvuindekseillä tai ottamalla kasvun vaihtelua kuvaavia muuttujia mallien selittäviksi muutujiksi. Puun pituuden kasvulle ei ole laadittu tutkimusjaksoa kattavia indeksejä. Läpimitan kasvua varten oli olemassa julkaistuja indeksejä, mutta ne eivät kattaneet yhtenäisesti koko tutkimusjaksoa (Tiihonen 1979, 1983, 1984, 1985, 1986, Henttonen 1990). Timosen ja Ruotsalaisen (1994) indeksit olivat aineistoa käsiteltäessä vasta alustavia eikä niitä tekijöiden mukaan ollut vielä syytä käyttää kasvuhavaintojen korjaamiseen. Kasvun vaihtelu otettiin kuusen pohjapinta-alan kasvumalleissa huomioon kasvujaksoa edustavan kiinteän luokkamuuttujan avulla.

2.3 Testiaineisto

Riippumattomana testiaineistona käytettiin Metsäntutkimuslaitoksen INKA-kestokoeaineistoa. INKA-koeverkosto on perustettu valtakunnallisesti kattavien, kivennäismaiden talousmetsiä edustavien kasvu- ja tuotostutkimusaineistojen tuottamiseksi. Koealaverkosto on sidottu Valtakunnan metsien 7. inventoinnin otantasysteemiin. Kuhunkin metsikköön on sijoitettu kolmen ympyräkoealan ryväs, jotka käsittävät yhteensä n. 100 lukupuuta. Lukupuista on mitattu mm. läpimitta mutta ei pituutta. Kolmasosa puista on mitattu koepuina kunkin koealan keskelle sijoitetuilla pienemmillä ympyräkoealoilla. Koepuista on mitattu mm. pituus. Mittaukset on toistettu viiden vuoden välein. Aineiston ja mittauksen yksityiskohdat on selostettu julkaisussa Gustavsen ym. (1988).

INKA-aineistosta poimittiin kuusen viljelytaimikot, joiden valtapituus oli kasvujakson alussa korkeintaan 9 metriä. Nämä 11 metsikköä sijoittuivat tasaisesti Kajaanin eteläpuoliselle alueelle. Testiaineisto koostui varttuneemmista metsiköistä kuin kasvumallien laadinta-aineisto (taulukko 2). Testiaineistosta puuttuivat alle 1,0 cm paksuiset puut joita ei ollut mitattu. Testiaineisto ei poikennut merkittävästi mallien laadinta-aineistosta kasvupaikkajakauman ja sekapuuosuuden suhteen. Testiaineistona käytetyt koepuiden kasvu- ja kuolleisuustunnukset laskettiin ensimmäisen ja toisen mittauksen erotuksena.

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

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
IH_{dom}	2,69	0,74	1,02	3,59
$\hat{IH}_{dom}$	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
IH_{dom} = mitattu metsikön valtapituuden kasvu 5-vuotisjaksolla, m $(5v)^{-1}$
$\hat{IH}_{dom}$ = mallilla ennustettu metsikön valtapituuden kasvu 5-vuotisjaksolla, m $(5v)^{-1}$
h = puun pituus, m
i_h = mitattu puun pituuskasvu 5-vuotisjaksolla, m $(5v)^{-1}$
$\hat{i}_h$ = mallilla ennustettu puun pituuskasvu 5-vuotisjaksolla, m $(5v)^{-1}$
H_{25} = metsikön valtapituusboniteetti, m
G = metsikön pohjapinta-ala, m^2ha^{-1}
d = puun läpimitta rinnankorkeudella, cm
i_g = rinnankorkeudelta mitatun poikkileikkauspinta-alan mitattu kasvu 5-vuotisjaksolla, cm^2 $(5v)^{-1}$
$\hat{i}_g$ = rinnankorkeudelta mitatun poikkileikkauspinta-alan mallilla ennustettu kasvu 5-vuotisjaksolla, cm^2 $(5v)^{-1}$

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 tyypiltään 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 estimoitiin käyttäen eri tilastollisia menetelmiä mallin käyttötarkoituksen, rakenteen 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 vakiotermiin on lisätty 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

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

$$\text{kun } (\alpha \le x \le \infty) \qquad (2)$$

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.

Metsiköttäisille 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

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

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 pieneni lievästi keskipituuden kasvaessa, jolloin χ-parametrin malli oli muotoa:

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

Mallien parametrit $b_1 ... b_4$ estimoitiin lineaarisella ja epälineaarisella regressioanalyysilla pienimmän neliösumman menetelmällä. Parametrit b_1 ja b_2 estimoitiin yhtäaikaisesti 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 sovitetut pituusjakaumat. 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 jakauma katkaistiin kertymäfunktion 3 %:n kohdalta. Mallit antoivat laadinta-aineiston metsiköissä keskimäärin 2,8 % liian pienen keskipituus/valtapituus -suhteen. Tämä merkitsi mallin käyttöalueen äärirajalla eli 4,5 metrin keskipituudella enintään 20 cm valtapituuden yliarviota.

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

Muuttuja	Keski-arvo	Keski-hajonta	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	Keski-hajonta	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.

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_e^2	0,004009	0,00020

σ_b^2 = satunnaisparametrin β_i varianssi
σ_e^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

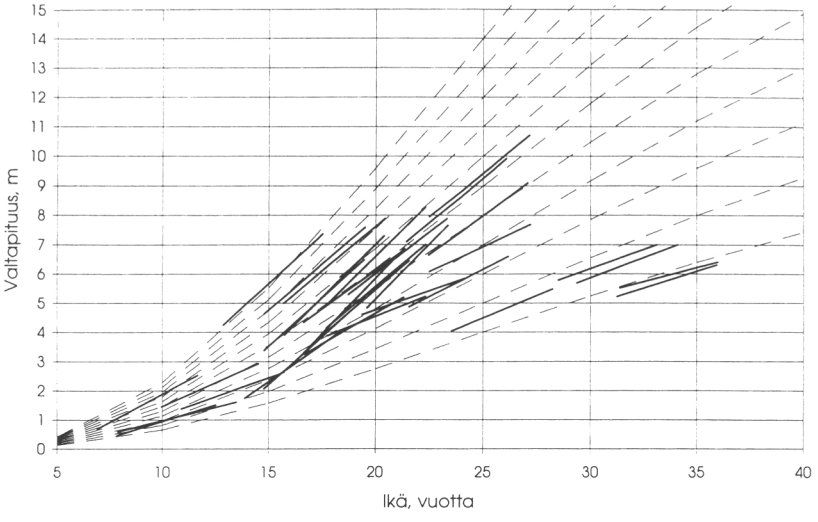
Metsiköiden valtapituuskehityksen malli laadittiin ns. *Difference equation* -menetelmällä, jossa puuston valtapituus mittausjakson lopussa (H_{dom2}) lausutaan mittausjakson alun valtapituuden (H_{dom1}) sekä jakson pituuden avulla (Clutter ym. 1983).

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

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 m < H_{25} < 14 m; katkoviivat) ja mallien laadinta-aineiston toteutuneet kasvujaksot (yhtenäiset viivat).

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

Muuttuja	Keski-arvo	Keski-hajonta	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

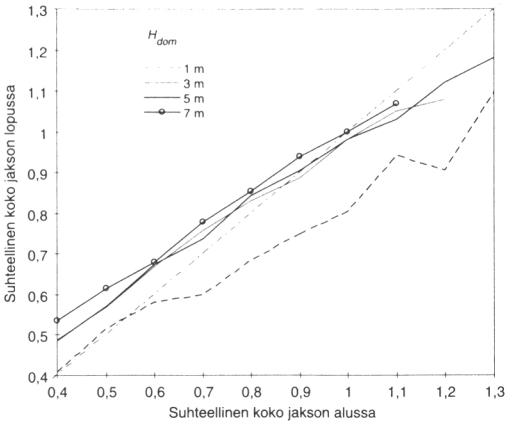
H_{dom1} = valtapituus jakson alussa, m
H_{dom2} = valtapituus jakson alussa, m
T_1 = viljelytaimien biologinen ikä jakson alussa, vuotta
T_2 = T_1+5 vuotta

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

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

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

Valtapituuden kehityksen nopeutta käytettiin kasvupaikan puuntuotoskyvyn kuvaajana muissa malleissa. Mallilla muodostettiin käyrien alkupituutta (5 vuoden iässä) vaihtelemalla parvi valtapituuden kehityskäyriä, jotka osuivat 25 vuoden iällä tasametreihin (kuva 2). Käyrien avulla laskettuja valtapituuksia 25 vuoden iässä nimitetään jatkossa valtapituusboniteeteiksi (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 valtapituus 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. I 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 kokoeroja, ja puujoukko kehittyy enemmän tai vähemmän laajaksi kokojakaumaksi. Puiden kokosuhteiden (h/H_{dom}) kehittymisessä 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 toipuessa 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 pieneni 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 nollasta.

Puukohtainen pituuskasvumalli oli muotoa:

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

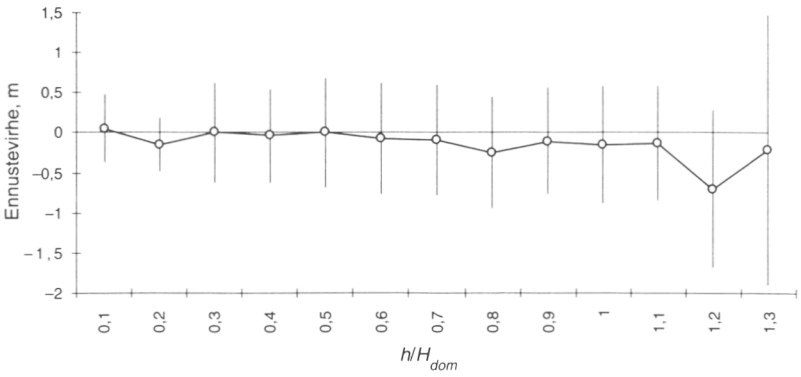
jossa

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 estimoitiin 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 ± keskihajonta).

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

Muuttuja	Keski-arvo	Keski-hajonta	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 poikkileikkauspinta-alan kasvu rinnankorkeudella tulevalla 5-vuotisjaksolla, cm^2 $(5v)^{-1}$
G = metsikön pohjapinta-ala, m^2 ha^{-1}
H_{25} = metsikön valtapituusboniteetti, m

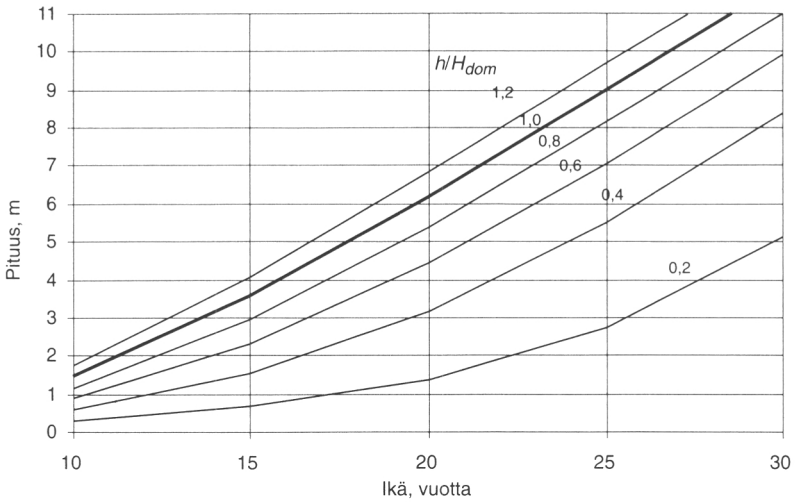
kunkin metsikön valtapuista menetti asemansa valtapuiden joukossa ja korvautui aiemmin hitaammin kasvaneilla puilla.

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, cm(5v)$^{-1}$
b_k = jakson k kiinteä vakiotermi
d_{ijk} = puun i läpimitta metsikössä j jakson k alussa, cm
H_{25j} = metsikön j pituusboniteetti
G_{jk} = metsikön j pohjapinta-ala jakson k alussa, m^2 ha^{-1}
$b_1 - b_4$ = kiinteitä parametreja
β_{jk} = metsikön j satunnaisvaikutus jaksolla k
ε_{ijk} = puun i satunnaisvaikutus metsikössä j jaksolla k

Mallin parametrit estimoitiin koepuuaineistosta (taulukot 7 ja 8) Maximum Likelihood -menetelmällä SAS-ohjelmiston MIXED-proseduurilla (SAS Institute Inc. 1996). Malli antoi laadinta-aineistossa harhattomia tuloksia, eikä residuaalitarkastelussa havaittu systemaattisia virheitä selittävien muuttujien suhteen.

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 = satunnaisparametrin β_{jk} varianssi
σ_e^2 = satunnaisparametrin ε_{ij} varianssi

3.2.4 Puiden kuolleisuus

Puiden säännöllinen kuolleisuus, johon ei kuulu äkillinen, satunnaisluonteinen 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 satunnaisluonteiset 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):

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

jossa

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

$E(p)$ = puun eloonjäämisen todennäköisyys 5 vuoden pituisen jakson aikana
h = puun pituus, m
H_{dom} = metsikön valtapituus, m
$b_0..b_2$ = parametreja
ε = virhetermi

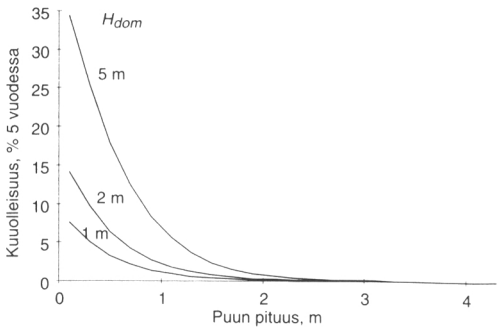
Mallin parametrit estimoitiin TINKA-aineistosta, jossa 3,5 % kuusen taimista oli kuollut 5 vuoden pituisen jakson aikana. Estimointi tehtiin SAS-ohjelmiston LOGISTIC-ohjelmalla Maximum Likelihood -menetelmällä, jossa käytettiin kertymäfunktion logit-jakaumaoletusta (SAS Institute Inc. 1989). Mallin 14 parametrit:

Parametri	Estimaatti	Keskihajonta
b_0	2,356	0,234
b_1	2,194	0,340
b_2	–0,386	0,0675

Puun kuolemistodennäköisyys on siten

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

Mallin mukaan pienten puiden kuolemistodennäköisyys on sitä suurempi mitä pienempi puu on (kuva 6). Tietyn kokoisen puun kuolemisen 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.



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

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 pituuskasvu 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

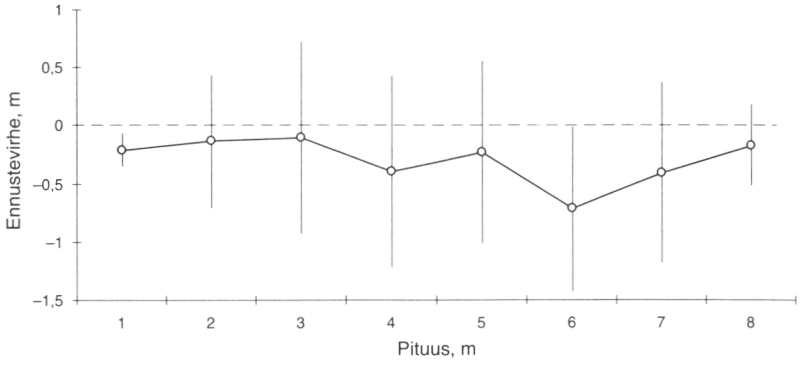
Metsiköiden kehitystä simuloitiin mallien toiminnan demonstroimiseksi ja tulosten vertaamiseksi muihin tutkimustuloksiin. Puuston pituusjakaumamalleilla (5–7) ja läpimittamallilla (8) muodostettiin lähtötilanteen puujoukkko. Puujoukon puiden kuolleisuus ja kasvu laskettiin peräkkäisinä 5 vuoden pituisina 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. Tasajakaumasta poimittiin satunnaisluku (0,1). Jos se oli kuolleisuusmallin mukaista kuolemistodennäköisyyttä suurempi, puu poistettiin puujoukosta. Kun kaikkien puiden eloonjäänti tai kuoleminen oli ratkaistu, metsikkötunnukset 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 vastasi 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 (rungon tilavuus maanpinnasta latvan huippuun) laskettiin Laasasenahon (1982) kahden tunnuksen polynomirunkokäyrillä. Pienten puiden tilavuudet laskettiin Ihalaisen laatimilla yhtälöillä (Snellman 1986).

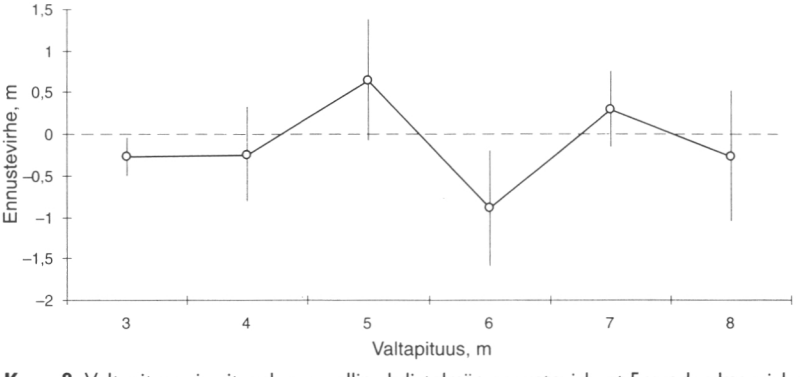
4.2 Mallien testaus riippumattomalla aineistolla

Puun kasvumallit (10–12) testattiin vertaamalla malleilla laskettuja kasvuja testiaineiston kasvuhavaintoihin (keskiarvo ja hajonta) sekä tutkimalla ennustevirheitä selittävien muuttujien suhteen residuaalikuvien 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.

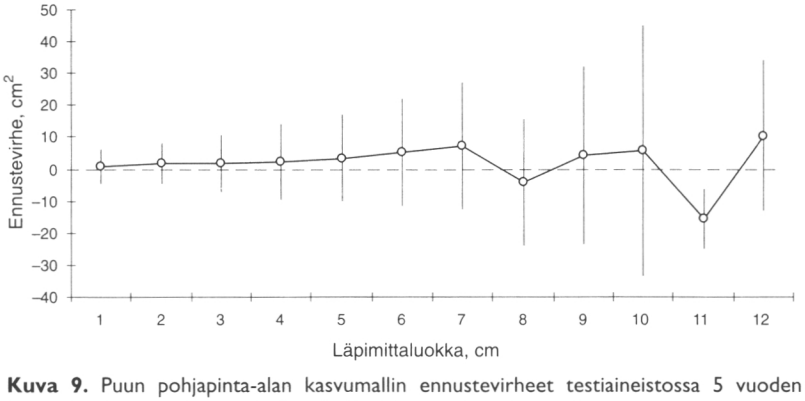
Kuusen valtapituuden kehitysmalli yliarvioi valtapituuden muutosta keskimäärin 10,8 % testiaineiston 11 metsikössä (taulukko 9). Kuusen pituuskasvumalli yliarvioi testiaineistossa pituuskasvua keskimäärin 7,4 %. Pohjapinta-alan kasvumalli aliarvioi testiaineistossa kasvua keskimäärin 14,3 % (taulukko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



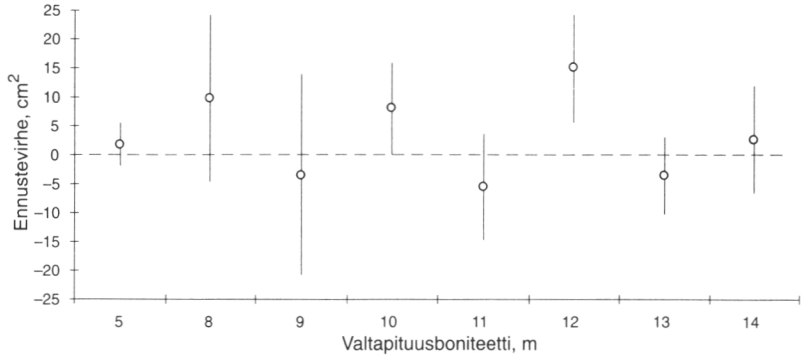
Kuva 7. Valtapituus- ja pituuskasvumallin yhdistelmän ennustevirheet 5 vuoden kasvujaksolla testiaineistossa puun pituusluokittain (keskiarvo ± keskihajonta).



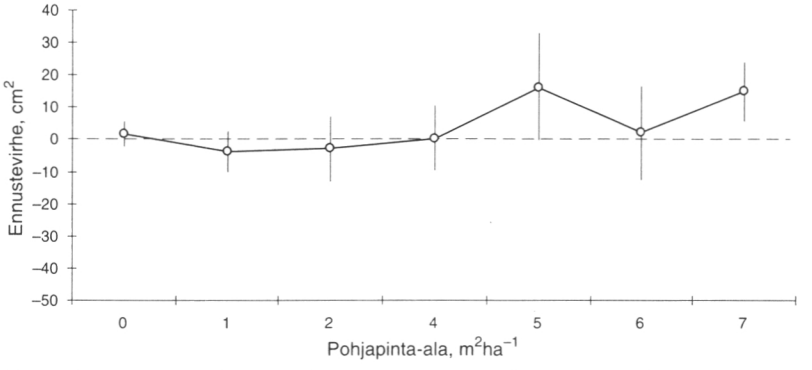
Kuva 8. Valtapituus- ja pituuskasvumallin yhdistelmän ennustevirheet 5 vuoden kasvujaksolla testiaineistossa metsikön valtapituusluokittain (keskiarvo ± keskihajonta).



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



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



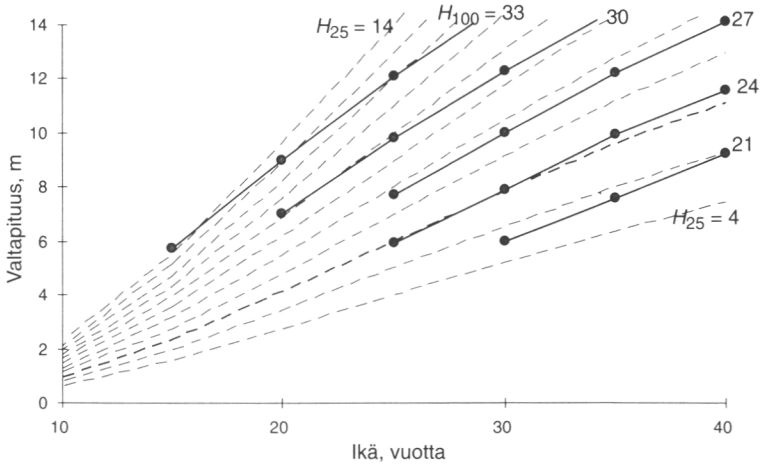
Kuva 11. Puun pohjapinta-alan kasvumallin ennustevirheet testiaineistossa 5 vuoden kasvujaksolla metsikön pohjapinta-alaluokittain (keskiarvo ± keskihajonta).

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).

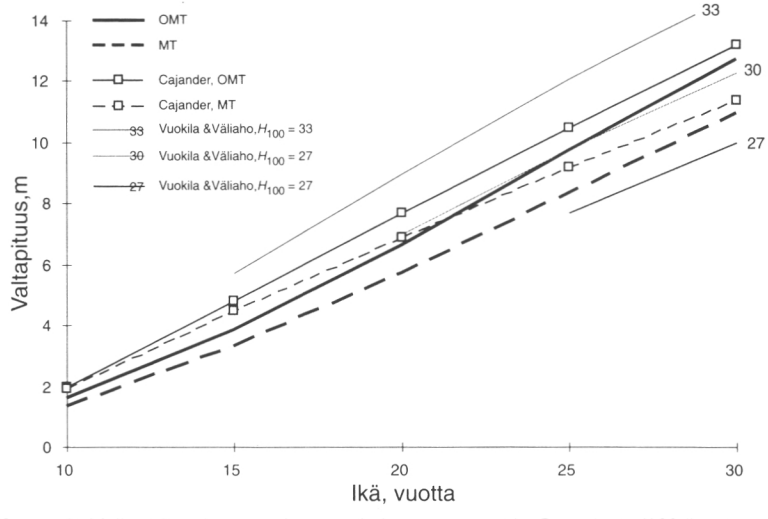
4.3 Mallin antamien tulosten vertailu muihin malleihin

Mallin 10 mukaista valtapituuskehitystä verrattiin Vuokilan ja Väliahon (1980) mallin mukaiseen viljelykuusikon valtapituuskehitykseen. Käyriä voi verrata suoraan ainoastaan niiden yhteisellä sovellutusalueella (10 m < H_{dom} < 11 m). Tässä vertailussa käytettiin kuitenkin kumpaakin mallia 3–5 m sallitun alueen ulkopuolella. Mallin 10 mukainen valtapituuskehitys noudatti parhaiten Vuokilan ja Väliahon (1980) mallin muotoa alueella 5 m < H_{25} < 10 m ja h < 11 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 m < H_{25} < 12 m. Vuokilan ja Väliahon (1980) mallilla laskettu kulminaatio ajoittuu n. 18–25 vuoden iälle eli 4,2–8,5 m valtapituudelle ja on yleensä



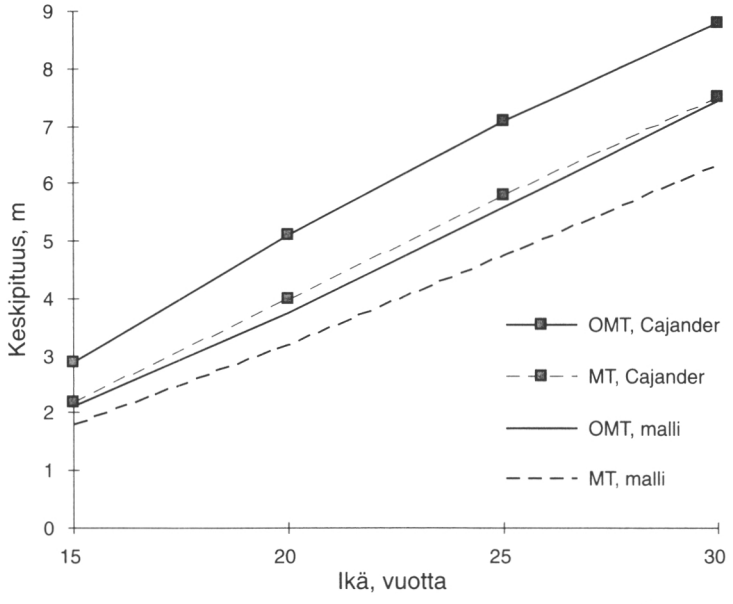
Kuva 12. Mallin 10 mukaisen valtapituuskehityksen vertailu Vuokilan ja Väliahon (1980) valtapituusmallien mukaiseen kehitykseen. Malli 10: H_{25} = 4–14 m, katkoviivat. Vuokila ja Väliaho: H_{100} = 21–33 m, yhtenäiset viivat ja ympyrät.



Kuva 13. Mallin 10 mukaisen valtapituuskehityksen vertailu Cajanderin (1934) esittämiin metsätyypeittäisiin sekä Vuokilan ja Väliahon (1980) esittämiin pituusboniteettiluokittaisiin valtapituuskehityksiin.

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

Mallin 10 mukaista valtapituuskehitystä verrattiin Cajanderin (1934) esittämään viljelykuusikoiden metsätyypittäiseen valtapituuskehitykseen Etelä-Suomessa. Käyrien muoto poikkesi vain vähän toisistaan (kuva 13). Mallin mukainen valtapituus oli samalla metsätyypillä aina pienempi kuin Ca-



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

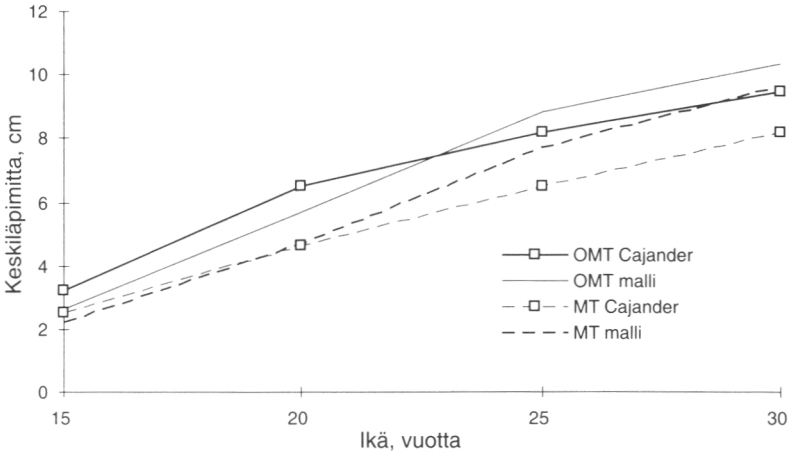
janderin taulukoissa. Ero oli suurimmillaan 1,2 m (MT:llä kun 3 m < H_{dom} < 4 m).

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.

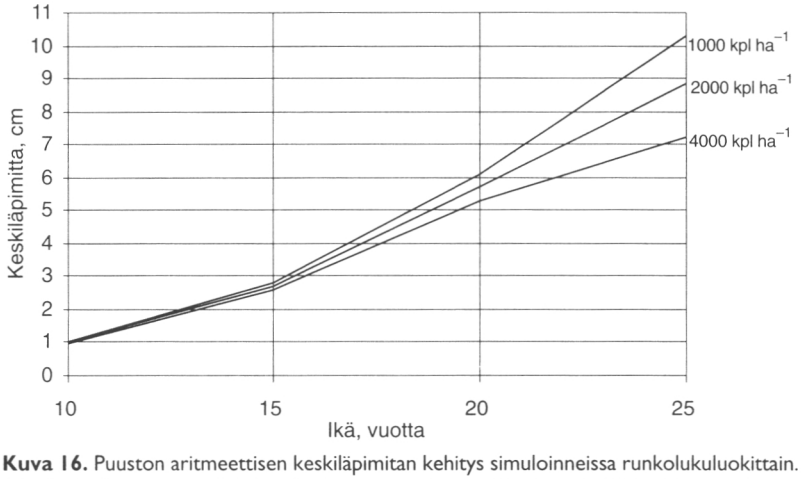
Puuston aritmeettinen keskiläpimitta oli mallin mukaan 20–25 vuoden iästä lähtien suurempi kuin Cajanderin (1934) taulukoiden mukainen keskiläpimitta selvästi tiheämmissä metsiköissä (kuva 15). Sama laskentatapojen ero koski keskiläpimittaa kuin keskipituuttakin.

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 tunnukset.

Vuokilan ja Väliahon kasvatusmalleissa runkoluku pysyy ensiharvennukseen asti viljelytiheyden mukaisena (2 200 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 kpl ha^{-1} aritmeettisen keskiläpimitan kehitys oli 20 vuoden iästä lähtien huomattavasti hitaampi kuin pienemmillä 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.

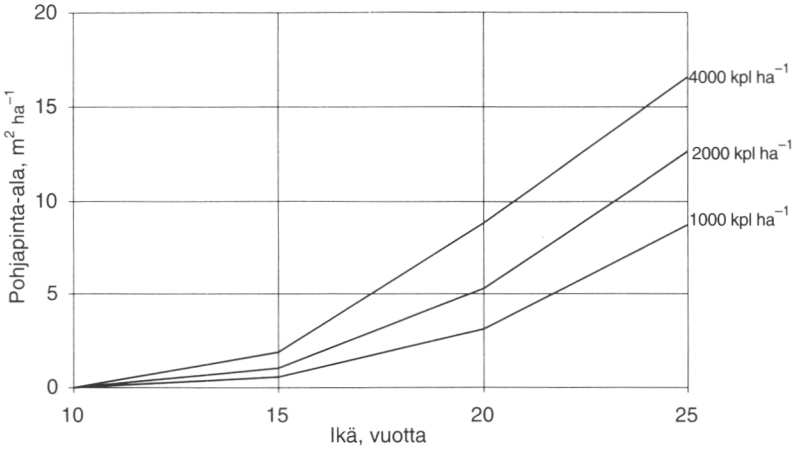


Kuva 16. Puuston aritmeettisen keskiläpimitan kehitys simuloinneissa runkolukuluokittain. OMT. Simuloinnin muut lähtötiedot kuten vertailussa Cajanderin (1934) kehityssarjoihin.

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 Metsätyyppi		Cajander Metsätyyppi		Vuokila & Väliaho 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 kilpailulta säästyneitä taimikoita. Taimikot olivat hieman tiheämpiä (keskimäärin 1 800 kpl ha^{-1}) kuin Räsäsen ym. (1985) inventointitutkimuksen eteläsuomalaiset 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 kasvukoepuiksi hyvin menestyneet, kasvatuskelpoiset puut. Tosiasiassa ne edustivat hyvin metsiköiden kaikkia kuusia, sillä 94 % kuusista luokiteltiin kasvatuskelpoisiksi. Niistä 94 % oli mittaushetkellä luokiteltu viljelykuusiksi.

Tutkimuksen lähestymistavaksi valittiin kasvun ja kuolleisuuden mallittaminen yksin puin. Nyt laadittuja malleja ja niitä täydentäviä, laadittavana olevia sekametsämalleja on tarkoitus käyttää tutkittaessa puuston ja sen osajoukkojen kehittymistä ja puiden välistä kilpailua tilajärjestykseltään ja kokojakaumaltaan vaihtelevissa sekataimikoissa. Tällöin 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 Dobbertin 1995).

Mikään Gustavsenin (1987) esittämistä kolmesta bonitointimenetelmästä ei soveltunut tämän tutkimuksen aineistoon. Vuokilan ja Väliahon (1980) viljelykuusikoiden valtapituusyhtälöä voidaan soveltaa vain yli 8 m valtapituudella. Vain yhdeksässä taimikossa oli kasvuhavaintoja siitä pituusvaiheesta, jossa tietyn pituusvaiheen kasvuun perustuvaa 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 realistisuutta 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.

Metsätyypeittäinen 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 metsätyyppeihin. Mallin mukainen valtapituuskehitys MT:llä vastasi sovellutusalueellaan likimäärin Vuokilan ja Väliahon mallin

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

Vyöhyke	Kasvupaikkatyyppi			
	Tuore kangas		Lehtomainen kangas	
	Keski-arvo	Keski-hajonta	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 metsätyypittäiset 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 Räsäsen 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 m^2 ha^{-1}. Mallia ei voi käyttää tätä tiheämmissä metsissä, joissa tulosten realistisuutta ei voitu varmistaa.

Pituusjakaumamallit laadittiin keinoksi yleistää tutkimusaineiston taimikoiden kokojakauma simulointien lähtötilanteen muodostamiseksi. Ne eivät ole yleisiä kuusen viljelytaimikoiden rakenteen malleja. Ne tuottavat laadinta-aineiston keskimääräisiä ominaisuuksia vastaavia, muodoltaan varsin vähän vaihtelevia jakaumia. Harvennusmallia 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 satunnaisluonteinen kuoleminen (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 yleistettävyyttä, sillä ilmastollinen vaihtelu ja tuholaisten kannanvaihtelut voivat aiheuttaa suurta kuolleisuuden vaihtelua (Hasenauer 1994). Itseharvenemismallia (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, puhtaiden 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, kivisyyttä 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 m H_{25} 8 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 aiheuttamaa 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 määritellä, koska kasvatuskelpoisuuden käsite oli ollut tutkimusaineistossakin varsin epämääräinen.

Malleilla 5–7 voidaan muodostaa 0,3–4,7 m keskipituisten (0,6 m H_{dom} 8 m) puhtaiden 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 m H_{25} 14 m, kasvujakson alun 0,4 m H_{dom} 8,0 m ja T 31, sekä kasvujakson lopun H_{dom} 11,0 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} 0,05 tai h 0,1 m) tai suurten (h / H_{dom} 1,4 tai h 9 m) puiden kasvua 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 m^2 ha^{-1}. Tätä suuremmilla pohjapinta-aloilla malli aliarvioi kasvua. 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.

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 ungskogar 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 määritys. 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. Reseach 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 turvemailla. 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 höjdboniteten 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., Piiroinen, M. & Penttilä, T. 1991. Läpimittajakauman ennustaminen Weibull-jakaumalla Pohjois-Suomen mänty- ja koivuvaltaisissa ojitusalueemetsiköissä. 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 taksatoorisesta merkityksestä, nojautuen etupäässä kotimaiseen kasvutaulujen laatimistyöhön. Referat: Untersuchungen über die taxatorische Bedeutung der Waldtypen, hauptsächlich auf den Arbeiten für die Aufstellung der neuen Ertragstafeln Finnlands fussend. 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 vertailulaskentasysteemin rakenne ja laskentaperusteet. Oheismoniste metsätehon tiedotukseen 411. 65 s.

Karjula, M., Kaila, S., Parviainen, J., Päivänen, J. & Räsänen, P. 1982. Metsänviljelyn vaihtoehtojen valintaperusteet kivennäismailla. Kirjallisuustarkastelu. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 56. 116 s.

Katila, M. 1990. Luonnonpoistuman ennustaminen männikössä kuolemistodennäköisyyden mallilla. Metsänarvioimistieteen pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteen laitos. 55 s.

Kellomäki, S. 1991. Metsäekologia. Silva Carelica 7. 391 s.

Kilkki, P. & Ojansuu, R. 1981. Pituusbonitoinnin ongelmia. Metsä ja puu 1981(3): 26–28.

— & Päivinen, R. 1986. Weibull function in the estimation of the basal area dbh-distribution. Seloste: Weibull-funktio pohjapinta-alan läpimittajakauman estimoinnissa. 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 estimoinnissa. Silva Fennica 23(4): 311–318.

Knoebel, B. & Burkhart, H. 1991. A bivariate distribution 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 advance growth after release in southern Finland. Tiivistelmä: Mallit kuusen ja männyn vapautettujen alikasvostaimien pituuskehitykselle Etelä-Suomessa. Silva Fennica 27(3): 179–194.

Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 108. 74 s.

Lappi, J. 1986. Mixed linear models for analyzing and predicting stem form variation of Scots pine. Communicationes Instituti 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 ympäristöohjelmatyöryhmän mietintö. Maa- ja metsätalousministeriö, metsäpolitiikan osasto. Työryhmän mietintö 1994(3). 100 s.

Mielikäinen, K. 1985. Koivusekoituksen vaikutus kuusikon rakenteeseen ja kehitykseen. Summary: Effect of an admixture of birch on the structure and development of Norway spruce stands. Communicationes Instituti 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 muutoksia kuvaavia puu- ja puustotunnusmalleja. Metsäntutkimuslaitoksen 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 Sweden. 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.

Nyyssönen, A. & Mielikäinen, K. 1978. Metsikön kasvun arviointi. Summary: Estimation of stand increment. Acta Forestalia Fennica 163. 40 s.

Näslund, M. 1936. Skogsförsöksanstaltens gallringsförsök i tallskog. Meddelenden från Statens Skogsförsöksanstalt 28(1).

Ojansuu, R., Hynynen, J., Koivunen, J. & Luoma, P. 1991. Luonnonprosessit metsälaskelmassa (MELA) – Metsä 2000 -versio. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 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. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 511. 110 s.

Pohtila, E. & Valkonen, S. 1985. Varttuneiden viljelytaimikoiden tila Lapin piirimetsälautakunnan alueen yksityismetsissä. Summary: Development and condition 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.) Lehtiartikkeleita 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.

— & Väliaho, H. 1980. Viljeltyjen havumetsiköiden kasvatusmallit. Summary: Growth and yield models for conifer cultures in Finland. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 99(2). 271 s.

Zeide, B. 1993. Analysis of growth equations. Forest Science 39(3): 594–616.

79 viitettä

II

Koistinen, E. & Valkonen, S. 1993

Models for height development of Norway spruce and Scots pine advance growth after release in southern Finland

Tiivistelmä: Mallit kuusen ja männyn vapautettujen alikasvostaimien pituuskehitykselle Etelä-Suomessa

Silva Fennica 27(3): 179–194
Painettu Silva Fennican toimituksen luvalla

Silva Fennica 1993, Vol. 27 N:o 3: 179–194

Models for height development of Norway spruce and Scots pine advance growth after release in southern Finland

Esa Koistinen & Sauli Valkonen

TIIVISTELMÄ: MALLIT KUUSEN JA MÄNNYN VAPAUTETTUJEN ALIKASVOSTAIMIEN PITUUSKEHITYKSELLE ETELÄ-SUOMESSA

Koistinen, E. & Valkonen, S. 1993. Models for height development of Norway spruce and Scots pine advance growth after release in southern Finland. Tiivistelmä: Mallit kuusen ja männyn vapautettujen alikasvostaimien pituuskehitykselle Etelä-Suomessa. Silva Fennica 27(3): 179–194.

Mixed linear models were constructed to describe the height development of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) advance growth after release. The models relate density of the overstory, time elapsed since release cutting and tree size with annual height increment. Parameters of preliminary models were estimated from a limited data set to judge the feasibility of the approach for further studies.

Tutkimuksessa laadittiin lineaariset sekamallit kuusen (*Picea abies* (L.) Karst.) ja männyn (*Pinus sylvestris* L.) alikasvostaimien pituuskehitykselle. Alikasvostaimien pituus, poistetun ylemmän puujakson tiheys ja vapauttamisesta kulunut aika selittivät malleissa alikasvostaimien vuotuista pituuskasvua. Mallien parametrit estimoitiin pienestä näyteaineistosta jatkotutkimuksen suunnittelua varten.

Keywords: advance growth, growth models, *Picea abies*, *Pinus sylvestris*, Finland.
FDC 56 + 243

Authors' address: The Finnish Forest Research Institute, Department of Forest Production, P.O.Box 18, FIN-01301 Vantaa, Finland.

Accepted November 11, 1993

Symbols

Stand characteristics

G	Basal area at breast height, $m^2\ ha^{-1}$
G_s	Basal area at stump height, $m^2\ ha^{-1}$
H	Mean height, cm
H_{100}	Site index; dominant height at total age of 100 years, m
H_{dom}	Dominant height; mean height of 100 thickest trees per hectare
H_{gM}	Height of a tree of the median diameter class estimated with the height model of the stand
I_{Hdom}	Annual increment of dominant height
$I_{Hdom(5)}$	5-year increment of dominant height
N	Number of trees per hectare
$P_{main(N)}$	Proportion of the main tree species of the total number of stems, %
T	Time elapsed from the release cut, number of growing seasons
ETS	Effective temperature sum; sum of mean daily temperatures exceeding 5 °C of the growing season, average value for the period 1951–80 estimated by the model of Ojansuu and Henttonen (1983), degree days

Tree characteristics

h	Height, cm
i_h	Annual height increment, cm

1 Introduction

Advance growth established in mature forest stands plays an important role in the natural regeneration of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in Finland (Mikola 1966, Rikala and Smolander 1984). The amount and quality of advance growth has been assessed in the national forest inventories, but the possibilities to utilise advance growth in southern Finland have not been studied in recent years (Ilvessalo 1956, Kuusela and Salminen 1991). New trends in forestry and the need to reduce the costs of regeneration call for more flexibility in the application of various silvicultural practices (Bradshaw and Gemmel 1992, Hagner 1992, Lähde 1992). Knowledge about the effects of various forest management activities is becoming increasingly important (Jeansson et al. 1989, Lund 1993, Pohtila 1993).

Norway spruce trees can survive in a suppressed position in a stand for decades in extreme cases. They may show little growth, but after a period of adaptation following a release cutting, they may recover and show a remarkable incremental acceleration (e.g. Schütz 1969, Indermühle 1978). Scots pine tolerates much less shading than Norway spruce and does not tolerate suppression as well as spruce (Vaartaja 1952, Mayer 1984).

In order to study the feasibility of utilising advance growth, it is essential to establish models that predict the development of advance growth trees under different management practices. Height growth has been commonly used to measure the recovery capacity of tree, and to compare the development of planted and natural seedlings (Cajander 1934, Vaartaja 1952, Fries 1990, Ferguson and Adams 1980).

According to Cajander (1934), size of the advance growth tree, its increment prior to release, density of the overstory and time elapsed since the release cut are the main factors affecting the height growth of Norway spruce advance growth after release in southern Finland. The results were presented graphically as curves of average height development. Vaartaja (1952) conducted similar studies with Scots pine, but did not present detailed results on height growth.

The purpose of this study is to construct pre-

liminary models for the prediction of height increment of released advance growth trees, using a small data set to formulate a model and to estimate its parametres. It will be considered if the model could serve as a basis for further research in terms of model form, data requirements, and applications.

2 Materials and methods

2.1 Study sites and stands

The sites for experiments were subjectively selected in three experimental forests of the Finnish Forest Research Institute among mature stands in which a dense advance growth was present in 1981. No attempt was made to select a sample of stands that would represent the whole population of silviculturally important advance growth in southern Finland. Therefore, the results of this study cannot be generalised to represent other locations, sites or stand structures than those included in the experiments.

The experimental stands grew on common forest sites on mineral soil in the Vilppula (62°01' N, 24°30' E, 150 m above sea level; stand 1), Vesijako (61°28' N, 25°02' E, 140 m; stands 2,3 and 4) and Lapinjärvi (60°38' N, 26°13'E, 50 m; stand 5) experimental areas in southern Finland (Table 1). The estimates of the mean temperature sum (ETS) were 1175 degree days for Vilppula, 1217 d.d. for Vesijako, and 1321 d.d. for Lapinjärvi.

Site indices (H_{100}) of the Norway spruce stands were determined according to Gustavsen (1980) before the release cut. Stands 2 and 4 were so old that the site index curves had to be extrapolated manually.

Thinnings or other treatments had not been carried out in the stands later than 15 years before the release cut. They were dominated by the same species as the advance growth, except for stand 3, where the dominating species was Scots pine. In addition to Norway spruce and Scots pine, the species composition of the stands included birches (*Betula pendula* Roth. and *Betula pubescens* Ehrh.). The release cut was carried out in spring 1982 in all stands except for stand 1, where it took place in spring 1980.

Three to seven square plots (20 m × 20 m) were systematically placed in each stand after release. The advance growth stands were thinned to different goal densities; trees that were less than 10 cm high were ignored (Tables 2 and 3). The treatments for each plot were chosen randomly. However, a few treatments had to be relocated because the initial density was considerably smaller than what was required for the treatment. Fertilisation with ash (5 t ha^{-1}) and some supplementary planting with deciduous species was carried out on 11 plots. The effect of the treatments on height growth of the advance growth trees was assumed negligible, because very few of the initially small number of planted seedlings had survived for more than a couple of years.

Table 1. Characteristics of the overstory stands before removal.

Stand no.	Site index (H_{100})	Site type	Age years	N no ha^{-1}	$P_{main(N)}$ %	G m^2/ha	H_{dom} m
1	-	VT	-	248	72	42 *	-
2	26	OMT (vs)	156	353	90	31	31
3	30	MT	100	262	72	25	29
4	30	MT	130	273	99	22	32
5	26	OMT (c)	94	405	80	23	25

* = G_S instead of G
Forest site types (Cajander 1909):
OMT = *Oxalis-Myrtillus*-type; (vs) = very stony, (c) = clayey soil
MT = *Myrtillus*-type
VT = *Vaccinium*-type

Table 2. Stand characteristics of the advance growth (h ≥ 10 cm) before the release cut.

Stand no.	N no./ha	SE	H cm	SE
1	7900	10600	53	39
2	6150	6810	136	103
3	16500	9510	370	192
4	8400	8230	160	133
5	3880	5400	90	80

SE = Standard error of mean

Table 3. Number of plots with different treatments.

Stand no.	Target density (no. of stems ha^{-1})			
	1000	2000	4000	No treatment
1	3	2	1	1
2	2	4	1	1
3	1	1		1
4	3	2	1	1
5	2			5

2.2 Data collection

The advance growth was assessed for the first time in spring 1981. In stand 1, the overstory had already been removed, but in other stands it was still present. Basal area of the overstory was measured by a relascope count at the midpoint of each plot. In stand 1, stump diameter was used instead of breast-height in the relascope count, and the result was expressed as G_s (Table 1).

A systematic grid of 25 circular sample plots, 4 m^2 each, was placed on each treatment plot. The number of trees of each species was counted on each circular plot. Of the tree closest to its midpoint, height, height of the lowest living branch, stump diameter and height increments of the preceding five growing seasons were measured. The measurements were repeated after the release cut in 1982, after the treatments of the advance growth in 1983, and once again in August 1990 nine (Norway spruce) or eleven (Scots pine) growing seasons after release. Height increments in the ten previous growing seasons were also measured at the latest instance.

2.3 Data structure

The amount of advance growth and seedlings established after release of the main species were calculated in the data of 1990 and converted into average stand densities by treatments. The stands substantially overshot the target densities for each treatment, probably because a large number of advance growth lower than 10 cm had been ignored in the thinning (Table 4). Besides, a number of seedlingds were probably not yet present at the time of release.

The spatial distribution of trees in a stand was described by the Index of dispersion (I) (Fisher et al. 1922) based on the measurements of the numbers of trees on the circular plots (4 m^2) in 1990:

$$I = S_x^2/x \qquad (1)$$

where
S_x^2 = between-plot variance of the number of stems
x = average number of stems per plot.

If the trees of a stand are completely randomly distributed, I = 1, and the stand is called a "Poisson forest". If I > 1, the distribution is aggregated, and trees form groups more frequently than in a Poisson forest. If 0 < I < 1, trees are more

Table 4. Density of the advance growth stands at the end of the study period.

Target density no./ha	N	Actual density		I	Empty plots	
		no./ha	SD		%	SD
Scots pine						
1000	3	5100	2270	2.44	28	8
2000	2	4400	2840	2.89	55	28
4000	1	5900	-	1.30	20	-
No treatment	1	11300	-	5.81	16	-
Norway spruce						
1000	8	2125	890	1.52	46	14
2000	7	2360	740	1.36	38	8
4000	2	3050	50	1.35	36	4
No treatment	8	3730	3250	3.88	49	28

Target density = Number of advance growth trees taller than 10 cm after release
N = Number of plots within treatment
SD = Standard deviation of plot mean
I = Index of dispersion (Fisher et al. 1922), see text (mean value of plots)

Table 5. Mean age and age range of approximately 1 m high advance growth at release.

Age years	Stand, species				
	1 Spruce	2 Spruce	3 Spruce	4 Spruce	5 Pine
Mean	16	37	34	40	35
Range	13–19	30–41	26–40	35–52	30–43

homogeneously distributed than in a Poisson forest. The observed I values indicated that the stands were aggregated (Table 4). This was also indicated by the large proportion of empty plots.

To get a general idea of the age of the advance growth, five trees belonging to the height class 90–109 cm were cut in autumn 1981 in each stand (Table 5). They were chosen randomly just outside the plots, and their age was counted from annual rings at stump. A few taller trees in broader height classes were chosen and treated in the same manner in the Norway spruce stands. Their mean ages were:

Stand	n	Height class m	Mean age years
2	2	3.5–4.4	48
2	1	4.5–6.4	62
3	1	5.5–6.4	44
3	1	9.5–10.4	58
4	2	3.5–4.4	57
4	1	4.5–6.4	63
5	1	2.5–3.4	52
5	2	3.5–5.4	60

The height distributions of advance growth that was present on the circular plots both at the beginning (spring 1981) and at the end (spring 1990) of the study period are shown in Figs. 1 and 2. All Scots pine sample trees were shorter than 250 cm at release, and the great majority was less than 50 cm high. The height range was very much broader for the Norway spruce (up to 16.5 m). Height distributions became broader towards the end of the study period.

In all analyses, only trees that were alive at the beginning of the study period in spring 1981 were used. The Scots pine data covered a period from the second through to the eleventh growing season, and the Norway spruce study from the first through to the ninth growing season after release. The Scots pine height growth data set included 613 observations from 64 trees and the Norway spruce data set 2646 observations from 294 trees. Seven Scots pine observations were removed because of measurement errors.

2.4 Climatic variation and height increment

Variation in annual height increment due to climatic factors could have had a large effect on the results of the study, because the release cut took place in the same year (except for the Scots pine stand no. 1).

Growth index for each year was calculated as the size corrected mean height increment in that year of all trees divided by the size corrected mean height increment of the whole period of the same trees. Growth trend due to increasing

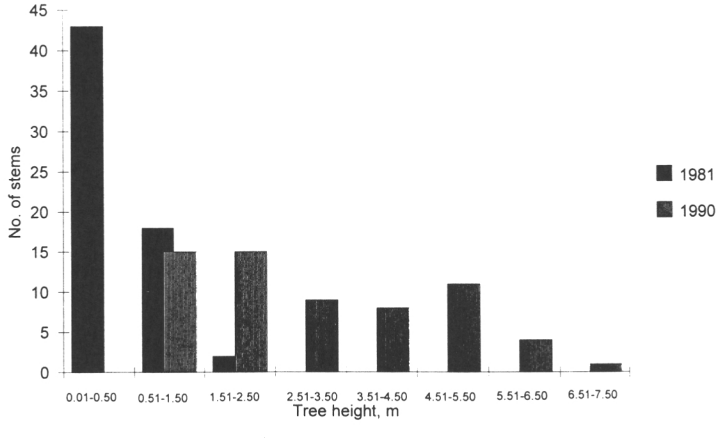


Fig. 1. Height distribution of Scots pine advance growth. Nearest tree to the plot midpoint on each circular plot in stand no. 1 in spring 1981 and in spring 1990.

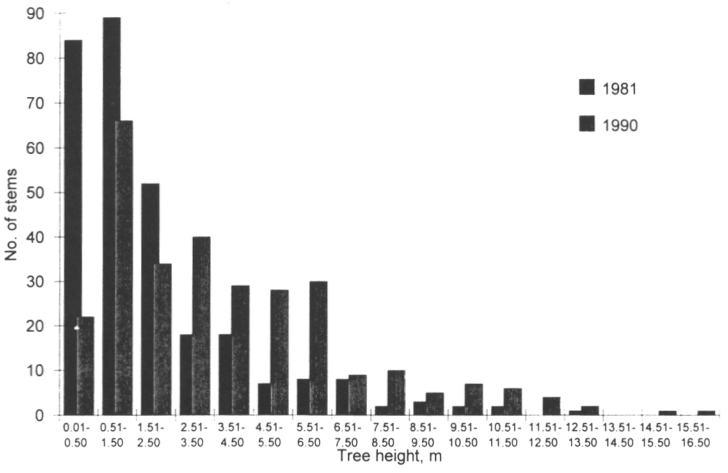


Fig. 2. Height distribution of Norway spruce advance growth. Nearest tree to the plot midpoint on each circular plot in stands 2, 3, 4 and 5 in spring 1981 and in spring 1990.

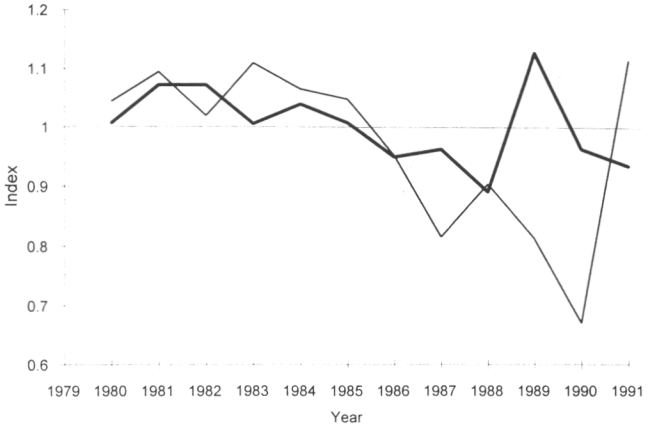


Fig. 3. Variation in height increment in 1980–91 in the data of the National Tree Research Project. See text for details on the index variable.

size of trees towards the end of the period was eliminated by applying a correction model. The calculated indices were compared with growth trends of Scots pine and Norway spruce in southern Finland in 1980–91 with an independent data set by Korhonen and Maltamo (1990), and Mäkelä and Korhonen (1992).

A diminutive trend in the height increment of Norway spruce was found (Fig. 3). However, it was not certain how well the growth trend curves represented those of advance growth trees, because they were derived from a data set consisting mainly of dominant trees. Consequently, it was decided not to use the indices to adjust the advance growth height increment data.

2.5 Calculations

Because the consecutive height increment observations for each tree were mutually dependent and the effect of increasing height and the re-

Table 6. Description of the data used in estimating parameters for models 3 and 4.

Variable	Mean	Standard deviation	Minimum	Maximum
Scots pine (n = 64)				
i_h (cm)	25	18	2	62
h (cm)	150	130	4	525
G_s (m^2 ha^{-1})	41	3	37	47
T (no.)	6.5	2.9	2	11
Norway spruce (n = 294)				
i_h (cm)	20	18	1	90
h (cm)	268	277	5	1515
G (m^2 ha^{-1})	26	7	15	43
T (no.)	5.2	2.6	1	9

lease effect could not be separated from each other, only one increment observation per tree was randomly selected for use in modelling (Table 6).

Observations on a plot and in a stand were mutually dependent. The effect of this interdependence was eliminated in the models by the application of a mixed linear model in the manner of Henttonen (1990). For a presentation of mixed linear models and their application see Searle (1971), and Lappi (1986).

The values of the increment observations were assumed to deviate from the expectation value of the model according to the following pattern:

$$id_{kjt} - E(id_{kjt}) = u_{1k} + u_{2kj} + e_{kjt} \quad (2)$$

where

id_{kjt} = natural logarithm of the annual height increment of tree t on plot j in stand k

u_{1k} = random stand effect (assumed to be sampled from a normal distribution with mean zero and variance σ_1^2)

u_{2kj} = random plot effect in stand k (assumed to be sampled from a normal distribution with mean zero and variance σ_2^2)

e_{kjt} = random effect corresponding to error (assumed to be sampled from a normal distribution with mean zero and variance σ_e^2)

Each random parameter vector u_i is thus connected with a parameter σ_i^2. The parameters σ_i^2, i = 1,r, are called variance components. The deviation of a single random parameter (u) from the general level defined by the fixed part of the model was uninteresting. The estimates of the variance components (σ_i^2) were used to examine the amount of total variance and its origin from different sources. The choice of the variables in the fixed part of the model was based on the results of an ordinary least squares regression analysis performed prior to the application of each mixed model design.

3 Results

3.1 Height growth trends

Figs. 4 and 5 show an example of the height development of advance growth after release. In Figs. 6 and 7, average height increment is shown by height classes defined by initial height in spring 1981. Norway spruce advance growth that had been growing well before release, continued to grow relatively well after a few years of equal or reduced growth (Fig. 8). The greatest increase in height increment was shown by trees that had grown 8 to 22 cm per year before release. Trees that had grown very slowly ($i_h < 8$ cm) increased their growth only slightly. The growth decrease in the ninth growing season in 1990 was probably related to an overall poor growing season for spruce (Fig. 3).

The growth of Scots pine reacted similarly to that of Norway spruce. However, the lag between release and the acceleration of height increment seemed to be shorter in Scots pine. Furthermore, differences in increment seemed to persist to a greater extent (Fig. 9).

3.2 Height growth models

Parameters of the height increment model (2) were estimated separately for both species. Tree height and a variable describing the effect of the removed overstory were used to predict the height increment in the models 3 and 4 (Table 7). The Norway spruce model (4) contained both ln(h) and h as independent variables. The coefficient

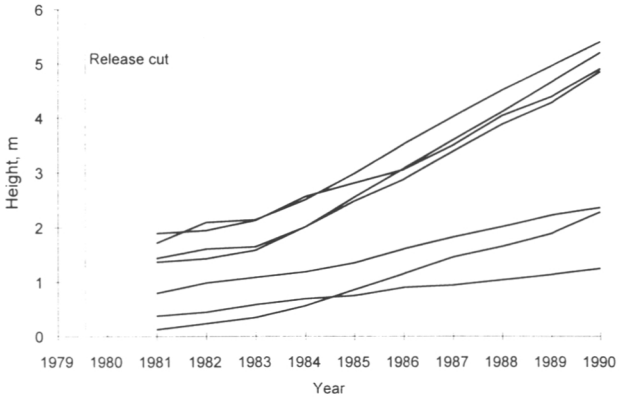


Fig. 4. Example of typical height development of Scots pine advance growth trees. Height of each tree at the end of each growing season in stand 1, plot 1.

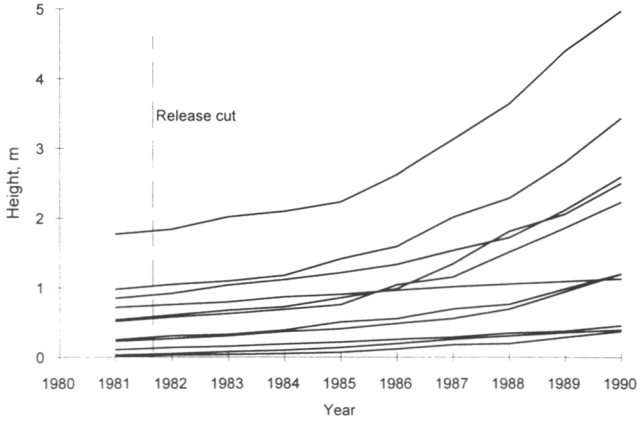


Fig. 5. Example of typical height development of Norway spruce advance growth trees. Height of each tree at the end of each growing season in stand 2, plot 1.

Table 7. Fixed part of the height increment models.

Dependent variable: $\ln(i_h + 0.01)$				
Constant or independent variable	Model 3		Model 4	
	Coefficient	p-value	Coefficient	p-value
Constant	1.00646	0.153	–0.83183	< 0.001
ln(h + 0.01)	0.49527	< 0.001	0.76707	< 0.001
h			–0.00046	0.125
$G_{\sqrt{}}/T$	–0.01332	0.504		
G/T			–0.01917	0.002

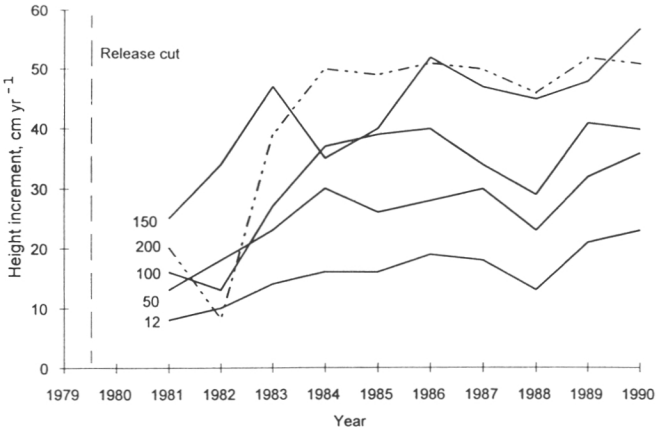


Fig. 6. Mean height increment of Scots pine advance growth in each growing season by initial height classes. Class indicated by class midpoint (cm), class interval 50 cm (first class 1–25 cm).

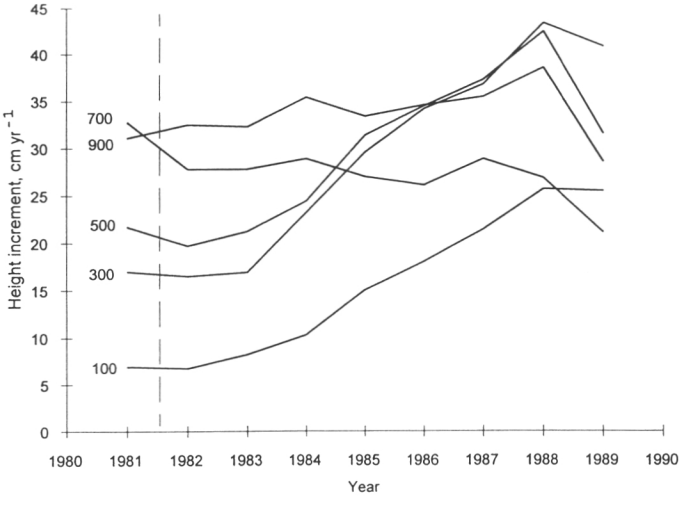


Fig. 7. Mean height increment of Norway spruce advance growth in each growing season by initial height classes (cm). Class indicated by class midpoint (cm), class interval 200 cm.

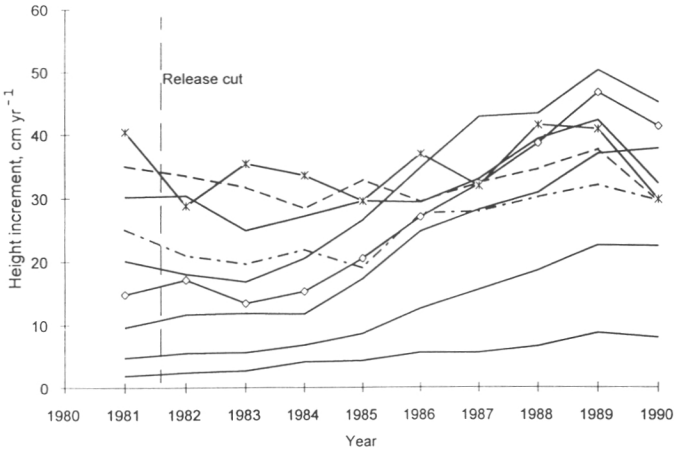


Fig. 8. Mean height increment of Norway spruce advance growth each growing season in classes of initial height increment in 1981. Class interval 5 cm (first class 0.1–2.5 cm yr^{-1}).

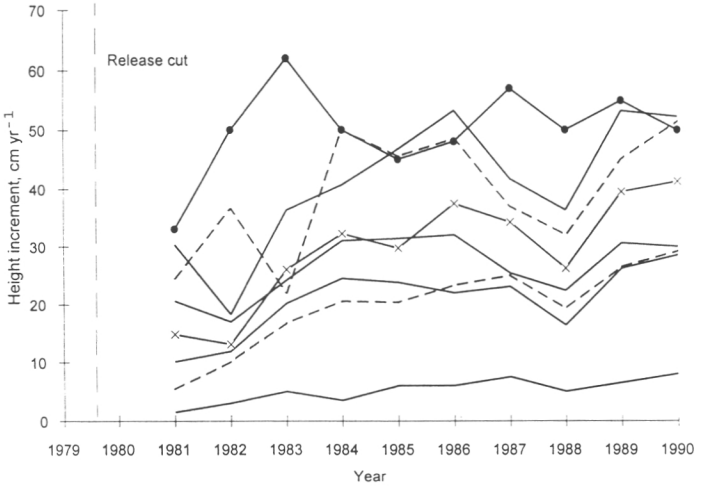


Fig. 9. Mean height increment of Scots pine advance growth each growing season in classes of height increment in 1981. Class interval 5 cm (first class 0.1–2.5 cm yr^{-1}).

of h was negative, because it represented the effect of diminishing increment after culmination. Since the Scots pine trees were considerably smaller and younger, there were very few height increment observations from the period after culmination. Consequently, the model did not include h but only ln(h). Therefore, the Scots pine model (3) should not be applied on trees that are taller than 7 m, where there were no observations. A model that could predict the growth of taller trees more reliably could be constructed only after the height increment has levelled out and begun to decrease for the majority of the trees.

The effect of the overstory density (expressed as basal area) on height increment was assumed to be negative and its absolute value to be diminishing during the whole study period. The overstory effect diminished in proportion to the time elapsed from release. Coefficients of the varia-

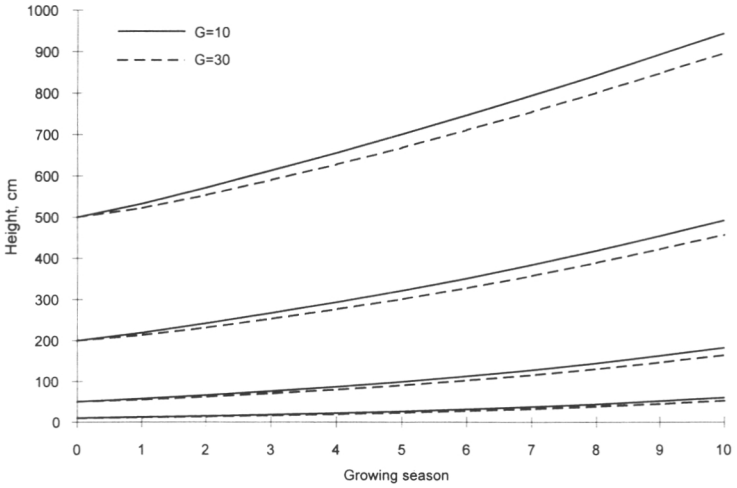


Fig. 10. Height development of Norway spruce advance growth model trees (model 4). Height at the end of each growing season. Basal area of removed overstory 10 and 30 m^2 ha^{-1}.

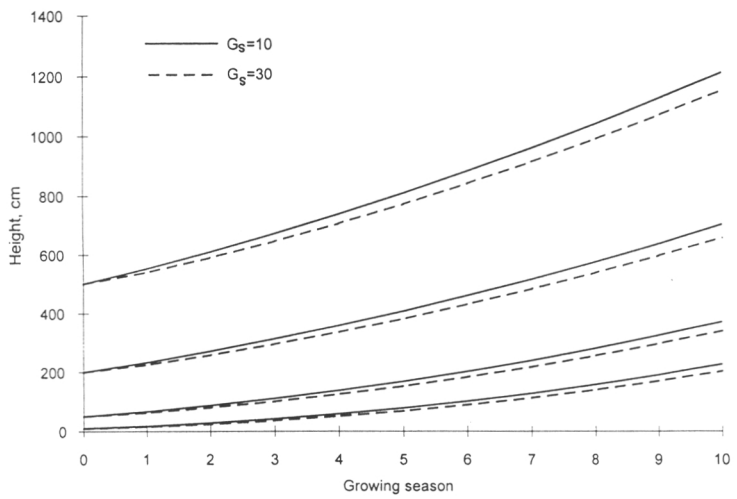


Fig. 11. Height development of Scots pine advance growth model trees (model 3). Height at the end of each growing season. Basal area of removed overstory 10 and 30 m^2 ha^{-1}.

bles representing different treatments, such as density of the advance growth stand, and dummy variables for fertilisation and supplementary planting did not deviate significantly from zero, and they were omitted from the models.

The residual variation that was not explained by the fixed part of the models 3 and 4 was divided into the variation between plots (0.5 %) and error (99.5 %) in the Scots pine data (Table 8). In the Norway spruce data, a between-stands component was also present, and it accounted for 2.5 % of the residual variation. The between-plot variation was 4.4 %, and error 93.1 % of the total variation.

Figs. 10 and 11 illustrate the height development of advance growth after release calculated with the models. The initial height (h) was varied between 10 and 500 cm, and the basal area (G, Gs) was 10 or 30 m^2 ha^{-1}. The increment increased consistently throughout the simulation

Table 8. Estimates of the parameters of the random part of the height growth models.

Dependent variable: $\ln(i_h + 0.01)$		
Variance component	Model 3	Model 4
σ_1^2	-	0.01306
σ_2^2	0.00253	0.02365
σ_e^2	0.48665	0.49672

σ_1^2 = Variance component connected with the random stand effect
σ_2^2 = Variance component connected with the random plot effect
σ_e^2 = Variance component connected with random error

period (first through tenth growing season after release), along with increasing height and decreasing effect of removed overstory.

3.3 Evaluation of the models and comparison with other studies

Cajander (1934) studied the height growth of released Norway spruce advance growth on grass-herb forest sites (*Oxalis-Myrtillus* type) in southern Finland. A comparison with his results was carried out by simulating a height development curve with similar initial values for overstory stand and advance growth tree variables with model 4 for the first through to the tenth growing season after release. A curve that represented a density of 300–400 overstory trees per hectare was selected from the height development curve family of Cajander, because the average N was 319 stems ha^{-1} in this data, which represented about 30 $m^2\ ha^{-1}$. Height development curves according to Cajander (1934) and this study were fairly similar in form (Fig. 12). In this study however, height increment was influenced by height to a greater extent.

The simulated height development of advance growth was also compared with the mean height of planted and sown seedlings growing on a similar site types (Scots pine: *Vaccinium type*, VT; Norway spruce: *Oxalis-Myrtillus type*, OMT (Cajander 1909)) in southern Finland (Räsänen et al. 1985), and the height development of planted Scots pine seedlings according to a model by Varmola (1987).

Height development of Scots pine advance growth model trees that were 5, 20 and 50 cm high at release was simulated by model 3 (Fig. 13). Height development of planted seedlings was simulated using Varmola's (1987) model 431.1. The dominant height of seedlings were calculated at 0, 5, 10 and 15 years of age, adding five-year increment estimates to the seedling height. Values for each age between 0 to 15 years were interpolated using cubic spline functions. Since the dependent variable of the model

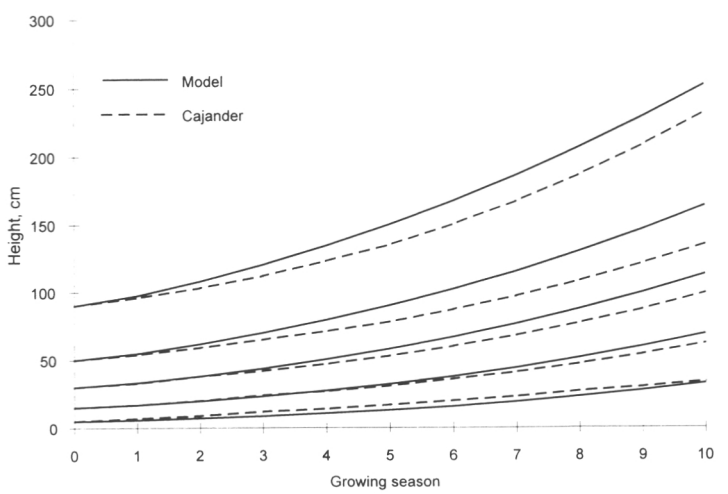


Fig. 12. Height development of released Norway spruce advance growth according to a curve by Cajander (1934) and simulated with model 4 with comparable tree and stand parameters. See text for details.

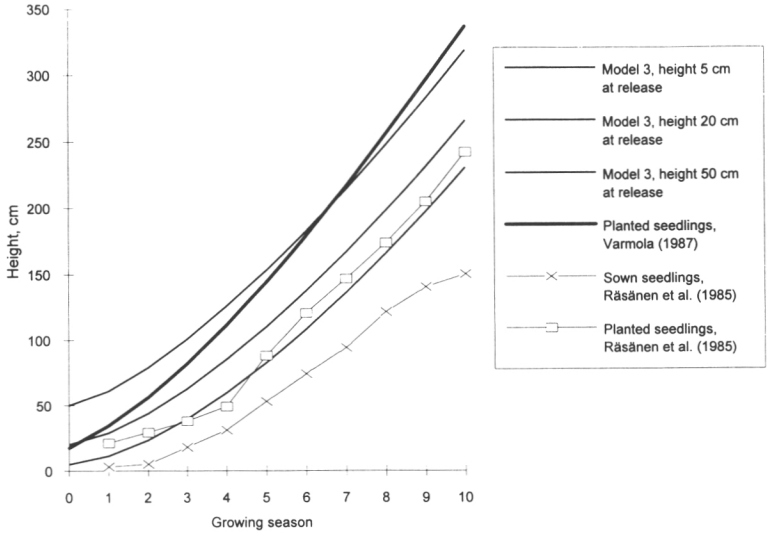


Fig. 13. Simulated height development of Scots pine advance growth (model 3), simulated height development of planted seedlings by Varmola (1987), and average height of planted and sown seedlings in the survey by Räsänen et al. (1985). See text for details.

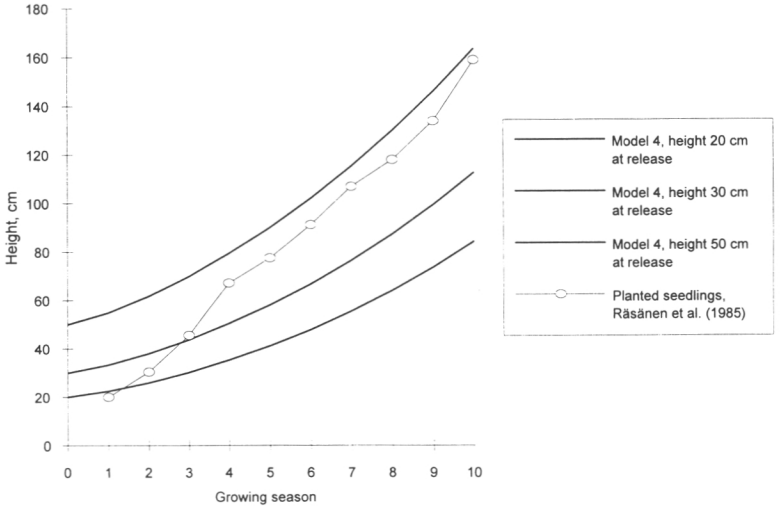


Fig. 14. Simulated height development of Norway spruce advance growth (model 4) and average height of planted seedlings in the survey by Räsänen et al. (1985).

was five-year increment of the dominant height ($I_{Hdom(5)}$), the height was converted into mean height (H_{gM}) with model 83.1 by Varmola (1987). The model 83.1 could not be used when the dominant height was less than 1.4 m. Beneath that height, the relationship between mean and dominant height was assumed to be constant and the same as at 1,4 m dominant height (0.93). The seedlings were supposed to be three years old at planting, which represented a mean height of 17.5 cm.

The mean height of planted and sown seed-

lings on *Vaccinium* site types in southern Finland (Räsänen et al. 1985) from one to ten growing seasons after planting are also shown in Fig. 13.

A similar comparison with Norway spruce (model 4) is shown in Fig. 14, with the exception that a widely applicable model for the development of the seedlings did not exist. The initial heights of advance growth trees were 20, 30 and 50 cm.

Scots pine advance growth model trees grew more slowly than planted seedlings according to models by Varmola (1987) during the whole 10-year period. The model by Varmola (1987), however, represented height development of seedlings under very favourable growing conditions as stated by the author. In practice, seedling growth tends to be slower, as the mean heights in the survey (Räsänen et al. 1985) indicate.

Norway spruce advance growth model trees grew much slower than the average heights of planted seedlings would suggest. An advance growth tree had to be at least 50 cm high at release to attain the mean height of planted seedlings in 10 years.

4 Discussion

The results of this study were based on one Scots pine and four Norway spruce experiments that were observed for nine to eleven growing seasons after release. They were not likely to represent the entire spectrum of stands with advance growth in southern Finland, because the experimental sites were selected subjectively from a limited population of stands with fairly old overstories. Consequently, the presented models and other results are only preliminary and need to be derived from a large, representative data set.

Fertilisation, thinning and supplementary planting had been applied on some of the plots, but variables representing the treatments were not found to have had a significant effect on height growth.

The growth of Norway spruce generally began to show a substantial increase on the fourth or fifth growing seasons after release. Cajander (1934), Skoklefald (1967) and Bergan (1971) observed a similar acceleration that began three to four growing seasons after release. A slight reduction in height increment of the tallest trees ($h > 2$ m) that lasted a couple of years after release that was observed on some of the experimental plots by Skoklefald (1967), was also observed.

There were large differences between individuals in height growth and its acceleration due to size and previous growth. During the last inventory, it seemed as if the position of a tree in a stand also caused such differences. Height differences that existed at release were constantly increased during the study period as in Skoklefald's (1967) study. The height and spatial distribution of the advance growth varied widely. It might be beneficial to include competition and distribution variables in models in further studies in order to describe the stand dynamics in more detail.

The effect of the removed overstory on growth seemed not to have expired at the end of the study period. A longer observation period is necessary in further studies. The decreasing growth trend of Norway spruce during the last years (1987–90) of the study period could have lead to an underestimation of the release effect in the later half of the study period, or an overestimation of it in the first half. More data of climatic growth variations of small trees should be acquired and used to adjust the observations in further modelling work.

Site index did not correlate with the increment of released Norway spruce advance growth. The site index range in the data was very narrow. It would be difficult to combine the models as such with most tree growth models, where site index is usually a very important coefficient.

Comparison of the simulated growth curves with those presented by Cajander (1934) did not reveal major differences in the results of the studies. However, Cajander did not publish detailed stand descriptions of the data. Consequently, it can not be appraised as to what extent the data sets in the two studies were similar in relation to growth factors. The comparison of results contributed little in terms of validation of the results. The possibility to use the data of Cajander as an independent data set in further studies should be examined.

A direct comparison of the results with a Norwegian study by Skoklefald (1967) was not pos-

sible. The stands in that study had been established with the shelterwood method and had enjoyed a period of reduced competition before the release cut. The same applies to the study of Bergan (1971), according to which the tall trees ($h > 1$ m) increased their height growth much more than in this study.

Released Scots pine advance growth trees had a slower height increment than planted seedlings according to Varmola's (1987) model, but kept better in pace with the mean height of planted seedlings surveyed by Räsänen et al.(1985) in southern Finland. Norway spruce advance growth trees grew substantially slower than the mean height development of planted seedlings of the survey would suggest.

Bergan (1971) found that planted Norway spruce seedlings grew slower than released natural seedlings in a shelterwood stand during their first 15 years in northern Norway. The results were thus somewhat contadictory to those obtained in this study. Fries (1990) also found that 17 years after planting, height increment was significantly greater for planted than for naturally regenerated spruce advance growth seedlings in two of three treatments in northern Sweden.

The applied model form is suitable for incorporation in a long-term planning system which is used to simulate the development of forests assessed in the Finnish National Forest Inventory (Siitonen 1983, Ojansuu et al. 1992). Obviously, the height growth model must include variables describing the density of removed and residual overstory, time elapsed from the release cut, and probably site index in addition to tree variables. In a study with Grand fir (*Abies grandis* [Dougl.] Lindl.), Ferguson and Adams (1980) found that young advance growth trees were able to adjust quicker to overstory removal than older trees. Tree vigour was also an important variable in their growth model, represented by the 5-year height increment before release. The uneven spatial and size distribution of advance growth should be taken into account in further studies. Models for the prediction of diameter increment and mortality of advance growth must be developed for the planning system.

A large data set should be acquired through the measurement of a representative sample of temporary plots in released advance growth stands. However, it is not certain that such a sample is yet to be acquired in Finland, since it is only for some years that the utilisation of advance growth has been gaining in popularity.

Acknowledgements: The experiment was designed, established and assessed by Esa Koistinen. Prof. Yrjö Vuokila and forest supervisors Risto Helkiö, Kalevi Louho and Toivo Ryhänen contributed in the selection of the experimental locations. M. Sc. (For.) Kullervo Etholén advised in the logging operations. Sauli Valkonen performed the calculations, and the authors wrote the manuscript together. Dr. Helena Henttonen, Dr. Taneli Kolström, Prof. Kari Mielikäinen and Lic. (For.) Martti Varmola read the manuscript and provided useful comments. B. Sc. (For.) Annette Constabel edited and corrected the English text. We thank everybody for their contribution in the completion of this study.

References

Bergan, J. 1971. Skjermforyngelse av gran samenlignet med plantning i Grane i Nordland. Summary: Natural Norway spruce regeneration under shelterwood compared with plantations at Grane in Nordland. Meddelser fra det Norske skogforsöksvesen 28(104): 194–211.

Bradshaw, R. & Gemmel, P. 1992. Diversity in systems of forest management – a southern Swedish perspective. In: Hagner, M. (ed.). Silvicultural alternatives. Proceedings from an Internordic Workshop, Umeå, Sweden, June 22–25, 1992. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Silviculture, Reports 35: 29–38.

Cajander, A. 1909. Über Waldtypen. Acta Forestalia Fennica 1. 175 p.

Cajander, E. 1934. Kuusen taimistojen vapauttamisen jälkeisestä pituuskasvusta. Referat: Über den Höhenzuwachs der Fichtenpflanzenbestände nach der Befreiung. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 19(5). 59 p.

Ferguson, D. & Adams, D. 1980. Response of advance Grand fir regeneration to overstory removal in northern Idaho. Forest Science 26(4): 537–545.

Fisher, A., Thornton, H. & Mackenzie, W. 1922. The accuracy of the plating method of estimating the density of bacterial populations, with particular reference to the use of Thornton's agar medium with soil samples. Annals of Applied Botany 9: 325–359.

Fries, C. 1990. Utveckling hos beståndsföryngrad gran och kompletteringsplanterade granar och tallar i ett kärvt klimatläge. Summary: Development of

advance growth of Norway spruce and supplementary planted spruce and Scots pine in a harsh climate. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Silviculture, Reports 30. 40 p.

Gustavsen, H. 1980. Talousmetsien kasvupaikkaluokittelu valtapituuden avulla. Summary: Site index curves for conifer stands in Finland. Folia Forestalia 454. 31 p.

Hagner, M. 1992. Basic ideas behind the new trends in Swedish forestry. In: Hagner, M. (ed.). Silvicultural alternatives. Proceedings from an Internordic Workshop, Umeå, Sweden, June 22–25, 1992. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Silviculture, Reports 35: 10–12.

Henttonen, H. 1990. Kuusen rinnankorkeusläpimitan kasvun vaihtelu Etelä-Suomessa. Summary: Variation in the diameter growth of Norway spruce in Southern Finland. University of Helsinki, Department of Forest Mensuration and Management, Research Notes 25. 88 p.

Ilvessalo, Y. 1956. Suomen metsät vuosista 1921–24 vuosiin 1951–53. Kolmeen valtakunnan metsien inventointiin perustuva tutkimus. Summary: The forests of Finland from 1921–24 to 1951–53. A survey based on three National Forest Inventories. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 47(1). 227 p.

Indermühle, M. 1978. Struktur-, Alters- und Zuwachsuntersuchungen in einem Fichten-Plenterwald der subalpinen Stufe (Sphagno-Piceetum calamagrostietosum villosae). Dissertation. ETH Zürich.

Jeansson, E., Bergman, F., Elfving, B., Falck, J. & Lundqvist, L. 1989. Natural regeneration of pine and spruce. Proposal for a research program. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Silviculture, Reports 25. 67 p.

Korhonen, K. & Maltamo, M. 1990. Männyn maanpäällisten osien kuivamassat Etelä-Suomessa. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 371. 29 p.

Kuusela, K. & Salminen, S. 1991. Suomen metsävarat 1977–84 ja niiden kehittyminen 1952–80. Summary: Forest resources in Finland in 1977–84 and their development in 1952–80. Acta Forestalia Fennica 220. 84 p.

Lähde, E. 1992. The background ideas to the new trends in silviculture. In: Hagner, M. (ed.). Silvicultural alternatives. Proceedings from an Internordic Workshop, Umeå, Sweden, June 22–25, 1992. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Silviculture, Reports 35: 17–19.

Lappi, J. 1986. Mixed linear models for analyzing and predicting stem form variation of Scots pine. Seloste: Männyn runkomuodon vaihtelun analysointi ja ennustaminen lineaaristen sekamallien avulla. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 134. 69 p.

Lund, H.G. 1993. Sampling designs of national forest inventories. In: Nyyssönen, A., Poso, S. & Rautala, J. Proc. Ilvessalo Symposium on National Forest Inventories, Helsinki, Finland 17–21 August 1992. The Finnish Forest Research Institute, Research Papers 444: 16–24.

Mäkelä, H. & Korhonen, K. 1992. Valtakunnallinen puututkimus. Finnish Forest Research Institute, Joensuu Research Station. Manuscript.

Mayer, H. 1984. Waldbau auf soziologisch-ökologischer Grundlage. 3., neu bearbeitete Auflage. Gustav Fischer, Stuttgart. 514 p.

Mikola, P. 1966. Alikasvosten merkitys metsien uudistamisessa. Metsätaloudellinen Aikakauslehti 1: 4–7, 16.

Ojansuu, R. & Henttonen, H. 1983. Kuukauden keskilämpötilan, lämpösumman ja sademäärän paikallisten arvojen johtaminen ilmatieteen laitoksen mittaustiedoista. Summary: Estimation of local values of monthly mean temperature, effective temperature sum and precipitation sum from the measurement made by the Finnish Meteorological Office. Silva Fennica 17(2): 143–160.

— , Hynynen, J., Koivunen, J. & Luoma, P. 1991. Luonnonprosessit metsälaskelmassa (MELA) – Metsä 2000-versio. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 385. 59 p.

Pohtila, E. 1993. Importance of national forest inventories in forestry research and practice. In: Nyyssönen, A., Poso, S. & Rautala, J. (eds.). Proc. Ilvessalo Symposium on National Forest Inventories, Helsinki, Finland 17–21 August 1992. The Finnish Forest Research Institute, Research Papers 444: 12–14.

Räsänen, P., Pohtila, E., Laitinen, E., Peltonen, A. & Rautiainen, O. 1985. Metsien uudistaminen kuuden eteläisimmän piirimetsälautakunnan alueella. Vuosien 1978–79 inventointitulokset. Summary: Forest regeneration in the six southernmost Forestry board districts of Finland. Results from the inventories 1978–79. Folia Forestalia 637. 30 p.

Rikala, R. & Smolander, H. 1984. Vielä humisee. Metsien uudistamisen ongelmat. Tiede 2000 3. p. 24–27.

Schütz, J. 1969. Étude des phénomènes de la croissance en hauteur et en diamètre du sapin (Abies alba Mill.) et de l'épicéa (Picea abies Karst.) dans deux peuplements jardinés et une forêt vierge. Dissertation. ETH Zürich.

Searle, S. 1971. Linear models. New York. 532 p.

Siitonen, M. 1983. A long-term forestry planning system based on data from the Finnish National Forest Inventory. Forest inventory for improved management. Proceedings of the IUFRO Subject Group 4.02 Meeting in Finland, September 5–9, 1983. Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteen laitoksen tiedonantoja 17: 195–207.

Skoklefald, S. 1967. Fristilling av naturlig gjenvekst av gran. Summary: Release of natural Norway spruce regeneration. Meddelser fra det Norske Skogforsöksvesen 23(85): 385–409.

Vaartaja, Y. 1952. Alikasvosasemasta vapautettujen männyn taimistojen toipumisesta ja merkityksestä metsänhoidossa. Summary: On the recovery of released pine advance growth and its silvicultural importance. Acta Forestalia Fennica 58(3). 133 p.

Varmola, M. 1987. Männyn viljelytaimikoiden kasvumalli. Licentiate thesis. University of Helsinki, Department of Forest Mensuration and Management. 75 p.

Total of 32 references

III

Mielikäinen, K. & Valkonen, S. 1995

Kaksijaksoisen kuusi-koivu -sekametsikön kasvu

Metsätieteen aikakauskirja – Folia Forestalia 1995(2): 81–97

Painettu Folia Forestalian toimituksen luvalla

Kari Mielikäinen ja Sauli Valkonen

Kaksijaksoisen kuusi–koivu-sekametsikön kasvu

Mielikäinen, K. & Valkonen, S. 1995. Kaksijaksoisen kuusi–koivu-sekametsikön kasvu. Folia Forestalia – Metsätieteen aikakauskirja 1995(2): 81–97.

Tutkimuksessa tarkasteltiin nuoren kuusikon kasvattamista koivuylispuuston alla. Tutkimusongelmana oli selvittää, kuinka paljon tiheydeltään ja kooltaan vaihteleva koivuylispuusto tuottaa puuta ja kuinka paljon se hidastaa kuusikon kehitystä. Tutkimuksessa laadittiin kertamittausaineistoon perustuvat kasvumallit. Niiden lisäksi sovellettiin aiemmassa sekametsätutkimuksessa laadittuja malleja.

Tutkimusaineisto käsitti 31 sekametsikköä lehtomaisilla ja tuoreilla kankailla Etelä-Suomessa. Kuusikoiden biologinen ikä oli 15–39 vuotta ja koivikoiden rinnankorkeusikä 17–77 vuotta. Koivuylispuusto oli poistettu 6 metsiköstä.

Malleilla ennustettua puuston kehitystä tarkasteltiin kahdessa esimerkkimetsikössä kolmena kasvattamisvaihtoehtona: koivuylispuuston poistaminen, ylispuuston harventaminen ja käsittelemätön metsikkö. Koivuylispuusto tuotti enemmän puuta (3,5–11,2 $m^3\ ha^{-1}\ v^{-1}$) kuin sen kasvattaminen vähensi kuusikon tuotosta (kasvutappio 0,6–4,4 $m^3\ ha^{-1}\ v^{-1}$). Harvennus lisäsi nuoren, tiheän koivikon tukkipuun tuotosta selvästi, mutta pienensi sitä vanhassa, järeäpuustoisessa koivikossa.

Asiasanat: sekametsä, kuusi, rauduskoivu, hieskoivu, kasvu, puuntuotos, kasvumallit
Kirjoittajien yhteystiedot: Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus, PL 18, 01301 Vantaa. Faksi (90) 8570 5361, sähköposti kari.mielikainen@metla.fi, sauli.valkonen@metla.fi
Hyväksytty 6.10.1995

Merkinnät

Puun tunnukset

- d läpimitta rinnankorkeudella, cm
- h pituus, m
- b kuoren paksuus rinnankorkeudella, mm
- cr latvuksen osuus puun pituudesta, %
- i_{g5} rinnankorkeudelta mitatun poikkileikkauspinta-alan kasvu tulevalla 5-vuotisjaksolla, $cm^2\ (5v)^{-1}$
- i_{h5} puun pituuden kasvu tulevalla 5-vuotisjaksolla, $cm\ (5v)^{-1}$
- i_{h5-} puun pituuden kasvu menneellä 5-vuotisjaksolla, $cm\ (5v)^{-1}$
- i_{d5} puun rinnankorkeusläpimitan kasvu tulevalla 5-vuotisjaksolla, $cm\ (5v)^{-1}$

Metsikön tunnukset

- D poikkileikkauspinta-aloilla painotettu keskiläpimitta rinnankorkeudella, cm
- G pohjapinta-ala, $m^2\ ha^{-1}$
- H rinnankorkeudelta mitatulla poikkileikkauspinta-alalla painotettu keskipituus, m
- H_{dom} valtapituus (100 paksuimman puun ha^{-1} keskipituus), m
- H_{100} kuusen valtapituus 100 vuoden iällä, m (valtapituusboniteetti)
- H_{50} koivun valtapituus 50 vuoden iällä, m (valtapituusboniteetti)
- N runkoluku, kpl ha^{-1}
- T puiden keski-ikä, vuotta
- $T_{1,3}$ puiden keski-ikä rinnankorkeudella, vuotta
- V runkotilavuus, $m^3\ ha^{-1}$
- V_{tukki} tukkipuun tilavuus, $m^3\ ha^{-1}$

Mallien luotettavuus

- $S_{e\%}$ arvion suhteellinen keskivirhe, % $(= \sqrt{e^{S_f^2} - 1})$
- S_m selitettävän muuttujan keskihajonta
- S_f mallin jäännöshajonta
- R^2 mallin selitysaste (R = yhteiskorrelaatiokerroin)

1 Johdanto

Kuusen ja koivun muodostamia sekametsiköitä syntyy luontaisesti sekä tasa- että eri-ikäisinä. Metsäpalon, myrskyn tai avohakkuun jälkeen syntyy Suomen oloissa yleensä havu-ja lehtipuiden muodostama sekametsä karuimpia kasvupaikkoja lukuunottamatta (Kuusela 1990).

Sekametsä voi olla yksijaksoinen, jolloin eri puulajit kehittyvät suunnilleen yhtä nopeasti samassa latvuskerroksessa. Kaksijaksoisessa sekametsässä joku tai jotkut puulajeista muodostavat alemman latvuskerroksen muiden puulajien muodostaman ylemmän latvuskerroksen alle. Kaksijaksoisuus voi säilyä pitkän aikaa, jos alemman jakson puulajit sietävät varjoa eivätkä tuhoudu kilpailun takia. Alemman jakson puulaji voi myöhemmin kasvaa ylempään jaksoon ja syrjäyttää entisen ylispuuston, jos se on pitkäikäisempi ja säilyttää kasvukykynsä vanhanakin (Oliver ja Larson 1990). Kuusen ja koivun sekoitus on tyypillinen esimerkki sekametsästä, joka kehittyy usein kaksijaksoiseksi: koivu muodostaa ylemmän ja kuusi alemman jakson.

Luontaisesti eri-ikäinen sekametsä syntyy tavallisesti kuusialikasvoksen ilmestyessä koivikoihin tai männiköihin (Laiho 1983). Luontaisen alikasvoksen tilajärjestys ja kokojakauma on usein epätasainen. Tasaisempi kaksijaksoinen sekametsä syntyy, kun kuusi istutetaan verhopuuston alle. Koivu- tai leppäverhopuusto suojaa kuusta hallavaurioilta ja aluskasvillisuuden kilpailulta (Leikola 1976, Leikola ja Rikala 1983, Folkesson ja Bärring 1982, Andersson 1984). Verhopuusto tuottaa samalla puuta, minkä seikan merkitystä ei ole toistaiseksi riittävästi korostettu tutkimuksissa.

Yksijaksoisten, luontaisesti syntyneiden sekametsiköiden kasvua ja tuotosta ovat tutkineet Suomessa Lappi-Seppälä (1930), Mielikäinen (1980, 1985) ja Pukkala ym. (1994), sekä Ruotsissa mm. Jonsson (1962), Fries (1964, 1974), Folkesson ja Bärring (1982) ja Agestam (1985), sekä Norjassa mm. Frivold (1982). Tulokset osoittavat, että sekametsikön kokonaistuotos on yhtä suuri tai vähän suurempi kuin puhtaan havumetsikön tuotos. Kuusi–rauduskoivu-sekametsikön rahallinen tuotto ylittää Suomessa useimmiten puhtaan kuusikon tuoton. Puulajien erilaista kehitysrytmiä voidaan hyödyn-

tää kasvattamalla nuoressa kuusikossa nopeasti järeytyvä koivusukupolvi arvokkaaksi vaneripuuksi (Valsta 1988, Vähäpesola 1989).

Lehtipuuston kanssa yhtä aikaa istutettujen havupuiden alkukehitystä on tutkinut Pukkala (1981). Tulokset osoittavat, ettei mänty menesty kilpailussa samaan aikaan istutetun rauduskoivun kanssa vaan häviää metsiköstä vähitellen. Kuusi jää kehityksessään jälkeen koivusta, mutta säilyy pitkään elinvoimaisena alikasvosasemassakin. Lopputuloksena on tavallisesti kaksijaksoinen sekametsä.

Koivuverhopuusto vähentää pintakasvillisuuden kilpailua ja pienentää hallatuhojen riskiä, mutta samalla se hidastaa kilpailullaan istutuskuusikon kasvua (Heikinheimo 1941, Hannelius 1978, Andersson 1984). Ruotsalaisen tutkimuksen mukaan koivun tuotos korvaa kuitenkin kuusen kasvutappion (Tham 1988). Hanneliuksen (1978) tutkimuksessa verhopuustoa kasvatettiin hallan torjumiseksi eikä vaneripuun tuottaminen kuulunut tutkittuihin vaihtoehtoihin.

Sekametsän kasvattamista suositaan käytännön metsätaloudessa metsän monimuotoisuuden, terveyden ja tuottokyvyn säilyttämiseksi sekä metsänuudistamisen taloudellisen tehokkuuden lisäämiseksi (Mikola 1985, Lundmark 1988, Tamminen 1991, Metsän uudistaminen 1993, Metsätalous ja ympäristö 1994, Metsänhoitosuositukset 1994). Verhopuuston uskotaan myös parantavan havupuista saatavan sahatavaran laatua (Hägg 1991, Kellomäki ym. 1992). Koivukuitupuun ja erityisesti vanerikoivun hyvä menekki ja korkea hinta suhteessa havupuihin on lisännyt kiinnostusta koivun kasvattamiseen sekä puhtaina koivikoina että sekametsiköinä. Lehtipuusekoituksen säilyttämistä havupuutaimikoissa puoltavat myös käsitykset sen merkityksestä yksittäisen metsikön ja metsäalueen maisemallisen arvon lisääjänä (Savolainen ja Kellomäki 1981).

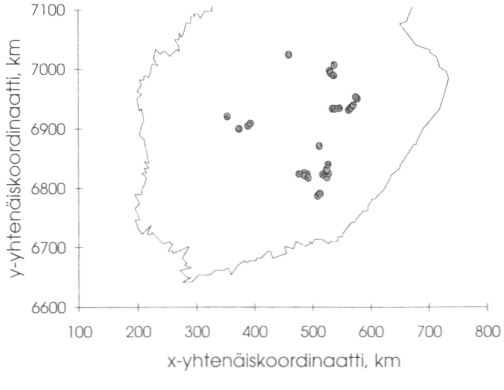
Kaksijaksoisen sekametsän hoito on puhtaan yksijaksoisen metsän kasvattamista monimutkaisempaa. Ylispuuston hakkuu voi aiheuttaa alemmalle jaksolle suuria vaurioita, jos työ tehdään väärillä menetelmillä tai huolimattomasti (Thesslund 1975). Kuusikon alkukehityksen hidastuminen johtaa myös kiertoajan pidentymiseen.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tutkia nuoren kuusikon kasvattamista koivuylispuuston alla. Tutkimusongelmana on selvittää, kuinka paljon tiheydeltään ja kooltaan vaihteleva koivuylispuusto tuottaa puuta ja kuinka paljon se hidastaa kuusikon kehitystä. Tutkimuksessa laaditaan kertamittausaineistoon perustuvat kasvumallit. Niiden lisäksi sovelletaan aiemmassa sekametsätutkimuksessa laadittuja malleja (Mielikäinen 1985).

Tässä tutkimuksessa laadittavia malleja on tarkoitus käyttää myöhemmin kuusikoiden kasvatusvaihtoehtojen vertailemiseen soveltamalla jo olemassa olevia ja laadittavina olevia malleja koko kiertoajan puuntuotoksen, kustannusten ja tuoton ennustamiseen. Mallien käyttö rajoitetaan tässä tutkimuksessa ainostaan niiden toiminnan havainnollistamiseen. Malleilla ennustetaan tutkimusaineistosta valittujen esimerkkimetsiköiden kehitystä muutamissa selväpiirteisissä kasvatusvaihtoehdoissa.

2 Aineisto ja tutkimusmenetelmä

Tutkimusaineisto käsitti 31 kivennäismaan metsikköä Etelä-Suomessa (taulukko 1, kuva 1). Tutkimukseen sopivia metsiköitä tiedusteltiin Etelä-Suomessa vuonna 1983 metsälautakunnille ja metsähallituksen hoitoalueille suunnatulla kyselyllä. Tutkimusmetsiköt valittiin subjektiivisesti paikallisten metsäammattimiesten opastuksella. Kasvupaikan



Kuva 1. Koemetsiköiden sijainti.

Taulukko 1. Tutkimusaineiston metsikkötiedot mittaushetkellä.

Metsikkö	Metsä-tyyppi [1]	Koivun valtalaji	H_{50} ko [2]	T ku [2]	$T_{1,3}$ ko	N ku	N ko	H_{dom} ku	H_{dom} ko	D ku	D ko	G ku	G ko
1	MT	raudus	28,0	20	19	1592	575	8,2	16,8	6,0	15,6	3,3	9,0
2	MT	raudus	15,5	18	61	1878	177	4,1	19,1	2,9	25,4	0,9	8,7
3	MT	hies	11,0	19	47	1371	553	6,0	11,7	5,6	12,1	2,2	5,7
4	OMT-	hies	12,0	20	76	1655	387	6,8	16,9	4,3	20,0	1,7	6,0
5	OMT	hies	18,0	22	56	637	863	5,9	20,4	5,1	18,5	0,9	15,9
6	MT	hies	25,0	25	19	796	2166	5,0	13,6	4,3	10,4	0,7	13,3
7	MT	hies	15,0	25	77	840	249	3,4	20,8	2,5	22,3	0,3	8,2
8	MT	hies	18,0	23	46	1039	325	6,4	18,1	4,5	20,5	1,2	10,3
9	MT		*	22	*	1273	*	7,9	*	8,0	*	2,1	*
10	MT	raudus	22,0	47	49	2228	636	11,3	22,2	9,4	22,7	4,4	16,8
11	OMT	hies	19,0	27	71	1464	357	5,7	23,8	4,5	28,2	10,6	15,9
12	OMT		*	27	*	1342	*	11,7	*	14,5	*	1,6	*
13	MT		*	27	*	1750	*	7,2	*	6,2	*	19,1	*
14	OMT	hies	24,0	21	24	2947	1702	6,3	15,6	4,8	11,6	4,2	13,0
15	MT	hies	20,0	24	40	1273	553	3,6	17,8	3,1	19,7	2,4	13,8
16	MT	hies	22,0	24	41	1304	575	5,9	20,3	5,4	21,4	0,5	15,4
17	OMT		*	27	*	1209	*	6,3	*	7,8	*	1,7	*
18	OMT	hies	19,0	29	61	1592	269	5,6	22,1	5,2	32,6	4,5	19,4
19	OMT	hies	19,0	25	42	2324	446	4,3	18,4	3,1	18,1	2,4	9,5
20	MT-		*	21	*	1442	*	8,2	*	8,8	*	1,2	*
21	OMT	raudus	24,0	39	44	1641	486	5,9	23,7	5,4	21,2	6,8	16,6
22	MT		*	24	*	2188	*	5,8	*	5,7	*	3,1	*
23	OMT	hies	13,5	25	71	987	828	5,9	18,3	4,7	19,0	3,4	17,5
24	OMT	hies	19,0	31	53	1592	553	5,2	20,6	4,4	19,6	1,2	14,4
25	OMT	hies	22,0	15	31	729	575	2,7	17,1	2,4	17,3	0,1	11,2
26	lehto	raudus	26,0	21	18	923	1019	7,5	13,6	6,3	15,4	2,1	16,5
27	lehto	raudus	24,0	15	17	442	1127	4,6	11,7	5,7	12,2	0,7	10,8
28	OMT	hies	26,0	22	30	1741	637	3,4	20,8	2,5	18,5	0,7	14,7
29	OMT	hies	28,0	20	23	1241	668	3,0	19,9	1,9	17,1	0,3	13,5
30	MT	raudus	22,0	26	48	1149	442	4,5	22,0	4,7	28,3	1,4	19,3
31	OMT	hies	16,0	15	74	2089	846	2,9	21,5	1,8	21,1	0,3	24,0

[1] OMT = Oxalis-Myrtillus-tyyppi, MT = Myrtillus-tyyppi (Cajander 1909), - metsätyypin nimen jälkeen: kivinen tai soistunut
[2] ku = kuusi, ko = koivu
* koivu poistettu ennen mittausta
Muut symbolit ks. luettelo

tuli olla tuore kangas tai sitä viljavampi kasvupaikka, joka ei saanut olla soistunut tai erityisen kivinen. Kuusijakson tuli olla keskipituudeltaan vähintään 1,3 m ja kasvattamiskelpoinen. Aineistoon pyrittiin löytämään tiheydeltään, järeydeltään ja tilajärjestykseltään erilaisia koivupuustoja. Koivujakson hies- ja rauduskoivun osuuksia ei rajoitettu. Metsiköissä 21, 24 ja 30 kuusi oli syntynyt luontaisesti, muissa metsiköissä se oli istutettu. Ylispuujaksoihin kuului vähäisiä määriä muita puulajeja kuin koivuja. Viimeisen 20 vuoden aikana voimakkaasti harvennettuja metsiköitä ei kelpuutettu. Hakkaamattomien metsiköiden (25 kpl) lisäksi mitattiin kuusi metsikköä, joista koivujakso oli poistettu kokonaan vähintään neljä kasvukautta ennen mittausta. Niiden kasvuhavaintoja ei käytetty mallien laadinta-aineistojen osana.

Kuhunkin metsikköön rajattiin kesällä 1984 ympyräkoeala, jolla kasvoi vähintään 30 ylemmän jakson koivua. Koealan säde vaihteli siten välillä 12–15 metriä. Koeala sijoitettiin sellaiseen kohtaan, että kuusia kasvoi koko sen alueella. Koealan yli 1,3 m:n pituisten puiden sijainti kartoitettiin ja niiden rinnankorkeusläpimitta, pituus ja elävän lat-

vuksen alaraja mitattiin. Myös mahdolliset kannot kartoitettiin ja niiden läpimitat mitattiin.

Luetuista kuusista valittiin tasavälein 20 kpl koepuuehdokkaiksi. Kukin alustava koepuu keskipisteenä rajattiin 4 m^2:n kokoinen neliö. Varsinaiseksi koepuuksi valittiin neliön sisältä yksi kasvatuskelpoinen kuusi. Kasvatuskelpoiseksi arvioitiin terve ja normaalikasvuinen kuusi, joka kokonsa ja sijaintinsa perusteella sopi parhaiten kasvamaan neliöllä mahdollisen taimikonkäsittelyn jälkeen. Kuusikoepuista mitattiin latvuksen suurin leveys sekä vuotuiset pituuskasvut mahdollisimman pitkälle taaksepäin. Luettujen koivujen runkolukusarja jaettiin läpimitan vaihteluvälin mukaan kolmeen yhtä suureen osaan. Jokaisesta osasta valittiin läpimitan mediaanipuu koepuuksi, josta kairattiin rinnankorkeudelta ytimeen ulottuva lastu.

Viljelykuusikoiden biologinen ikä selvitettiin viljelytiedoista. Luontaisissa kuusikoissa kaadettiin muutamia satunnaisesti valittuja kuusia iän määrittämistä varten. Koivun valtapituusboniteetti (H_{50}) laskettiin Gustavsenin ja Mielikäisen (1984) yhtälöillä. Jos ylempi koivujakso oli poistettu, pituusboniteetti määritettiin metsätyypin ja valtapituusboniteetin vastaavuuden perusteella (Gustavsen ja Mielikäinen 1984). Kuusen valtapituusboniteetti (H_{100}) laskettiin koivun ja kuusen boniteettien vastaavuuden perusteella (Mielikäinen 1985). Koivun vuotuiset läpimitan kasvuhavainnot korjattiin Valtakunnan metsien 7. inventoinnin aineistosta laskетuilla kasvuindekseillä (Tiihonen 1984, 1985).

Aineistosta laadittiin kaksijaksoisen sekametsikön puuston kasvua kuvaavat mallit kuusen pituuskasvun sekä raudus- ja hieskoivun läpimitan kasvun sekä kuusen läpimitan kuvaamiseksi. Koivun kuoren paksuuden sekä raudus- ja hieskoivun pituuden kasvun kuvaamiseksi käytettiin Mielikäisen (1985) laatimia yksijaksoisten kuusi–koivu-sekametsien malleja.

Mallien parametrit estimoitiin lineaarisella regressioanalyysillä pienimmän neliösumman menetelmää käyttäen. Mallien laadinnassa ja testauksessa laadinta-aineistoissa noudatettiin Clutterin ym. (1983) sekä Rannan ym. (1989) esittämiä ohjeita.

Malleilla tehdyillä laskelmilla tutkittiin kuusen ja koivun kasvua ja puuntuotosta muutamia käsittelyvaihtoehtoja ja puuston rakennetta edustaneissa esimerkkitapauksissa.

3 Pituus- ja läpimittamallit

3.1 Mallien laadinta

Kuuselle laadittiin puun tulevan 5-vuotisjakson pituuskasvun ennustemalli ja koivulle vastaava puun pohjapinta-alan kasvumalli. Laaditut kasvumallit (mallit 1–3 taulukoissa 3 ja 4) perustuivat taulukossa 2 esitettyyn aineistoon. Mikäli tässä raportissa esitettävän mallin selitettävä muuttuja on logaritminen, mallin vakiotermiin on lisätty korjaustekijä $S_f^2/2$ (ks. Kangas ym. 1990). Kasvumalleissa

Taulukko 2. Kasvumallien laadinta-aineistot puulajeittain.

Muuttuja	Keski-arvo	Keski-hajonta	Minimi	Maksimi
		Kuusi (N = 406)		
i_{h5}	151	71	30	460
h	2,8	1,6	1,3	11,0
H	2,9	1,7	1,1	7,2
G_{ko}	11,2	4,5	4,4	22,2
N_{ko}	685	467	177	2166
		Rauduskoivu (N = 16)		
i_{g5}	53,3	20,4	26,6	91,8
d	14,2	6,6	6,0	25,0
h	14,5	5,5	7,3	23,5
H_{50}	23,6	3,7	15,5	28,0
G_{ko}	10,4	5,2	5,8	20,8
		Hieskoivu (N = 50)		
i_{g5}	45,2	26,2	2,3	118,8
d	15,5	6,4	4,6	37,3
h	14,9	4,2	4,0	23,7
H_{50}	19,0	4,6	11,0	28,0
G_{ko}	11,5	4,5	4,4	22,2

N = havaintojen lukumäärä
i_{h5} = puun pituuden kasvu tulevalla 5-vuotisjaksolla, cm $(5v)^{-1}$
i_{g5} = puun rinnankorkeudelta mitatun poikkileikkauspinta-alan kasvu tulevalla 5-vuotisjaksolla, cm^2 $(5v)^{-1}$
h = puun pituus, m
d = puun läpimitta rinnankorkeudella, cm
H_{50} = koivujakson puiden valtapituus 50 vuoden iällä, m (valtapituusboniteetti)
G_{ko} = koivujakson pohjapinta-ala, m^2ha^{-1}
N_{ko} = koivujakson runkoluku, kpl ha^{-1}

Taulukko 3. Kuusen pituuskasvumalli.

Selitettävä muuttuja: $\ln(i_{h5})$

Muuttuja	Kerroin	Keskivirhe	t-arvo
	Malli 1		
vakio	4,504	0,0486	91,7
ln(h)	0,8847	0,0661	13,4
h^2	–0,009485	0,00188	–5,1
$G_{ko}^2 \cdot N_{ko}$	$-1{,}381 \cdot 10^{-6}$	$2{,}06 \cdot 10^{-7}$	–6,7
ln(h/H)	0,1190	0,0319	3,7
	N = 406		
	R^2 = 0,493		
	S_m = 0,450		
	S_f = 0,322		
	$S_{e\%}$ = 33,1		

Mallin muuttujien selitykset taulukossa 2.
Tilastolliset symbolit ks. luettelo

Taulukko 4. Koivun rinnankorkeusläpimitan kasvumallit.

Selitettävä muuttuja: $\ln(i_{g5})$

Muuttuja	Kerroin	Keskivirhe	t-arvo
	Rauduskoivu, malli 2		
vakio	–3,1851	2,686	–1,2
ln(d)	0,9810	0,313	3,1
$\ln(H_{50})$	1,7104	0,681	2,5
$\ln(G_{ko})$	–0,0708	0,023	–3,1
	N = 16		
	R^2 = 0,487		
	S_m = 0,391		
	S_f = 0,313		
	$S_{e\%}$ = 0,321		
	Hieskoivu, malli 3		
vakio	–0,3783	0,620	–0,8
ln(d)	1,6386	0,188	8,7
H_{50}	0,0762	0,017	4,4
$\ln(G_{ko})$	–0,7211	0,194	–3,7
	N = 50		
	R^2 = 0,625		
	S_m = 0,759		
	S_f = 0,480		
	$S_{e\%}$ = 0,509		

Mallien muuttujien selitykset taulukossa 2.
Tilastolliset symbolit ks. luettelo

käytettiin puun tunnusten lisäksi selittävinä muuttujina myös puustotunnuksia kasvujakson alussa. Ne laskettiin lukupuiden tunnuksista menneen 5-vuotisjakson kasvun puukohtaisilla malleilla, jotka laadittiin koepuuaineistosta.

Kuusen läpimitan kasvulle ei voitu laatia malleja käsillä olleesta aineistosta, koska läpimitan kasvua ei kairattu. Koemetsiköiden kuusijaksot olivat nimittäin niin nuoria, että suurimmalla osalla kuusista ei olisi ollut vielä viittä vuosilustoa rinnankorkeudella. Kuusen paksuuskasvua arvioitiin puun pituuteen perustuvalla läpimittamallilla, joka laskettiin koepuiden perusteella:

$$d = -0{,}012611 + 0{,}997037h \quad (4)$$

missä
d = puun läpimitta rinnankorkeudella, cm
h = puun pituus, m

Koivun menneen ja tulevan jakson pituuskasvu ja kuoren paksuus arvioitiin seuraavilla Mielikäisen (1985) yksijaksoisten kuusi–koivu-sekametsien malleilla:

Rauduskoivun kasvu

$$\ln(i_{h5-}) = -8{,}605 + 2{,}328\ln(h) - 0{,}5565(\ln(h))^2 + 2{,}119\ln(H_{100}) \quad (5)$$

$$\ln(i_{h5}) = -6{,}178 + 0{,}9128\ln(h) - 0{,}2975(\ln(h))^2 + 1{,}936\ln(H_{100}) \quad (6)$$

Hieskoivun kasvu

$$\ln(i_{h5-}) = -5{,}848 + 0{,}8255\ln(h) - 0{,}2533(\ln(h))^2 + 1{,}789\ln(H_{100}) \quad (7)$$

$$\ln(i_{h5}) = -5{,}057 + 0{,}3497\ln(h) - 0{,}1664(\ln(h))^2 + 1{,}718\ln(H_{100}) \quad (8)$$

Kuoren paksuus, kumpikin koivulaji

$$\ln(2b) = 2{,}674 + 0{,}001426d^2 - 0{,}01717 \ln(cr) \quad (9)$$

Kaavoissa 5–9

i_{h5-} = puun pituuden kasvu menneellä 5-vuotisjaksolla, cm $(5v)^{-1}$
i_{h5} = puun pituuden kasvu tulevalla 5-vuotisjaksolla, cm $(5v)^{-1}$
h = puun pituus, m
d = puun läpimitta rinnankorkeudella, cm
b = puun kuoren paksuus rinnankorkeudella, mm
cr = puun latvuksen osuus puun pituudesta, %
H_{100} = kuusikon valtapituus 100 vuoden iällä, m (valtapituusboniteetti)

3.2 Mallien testaus

Mallien testaamiseksi ei ollut saatavilla erillistä kasvuaineistoa kaksijaksoisista kuusi–koivu-sekametsistä. Mallien antamia tuloksia verrattiin kuusen viljelytaimikoita käsittäneen aineiston kasvuhavaintoihin sekä aiempien kuusen kasvua kuvanneiden kehityssarjojen ja mallien tuloksiin (Cajander 1934a, Mielikäinen 1985).

Kuusen kasvumallin testissä käytetyn, alusta lähtien vapaana kasvaneiden viljelykuusikoiden kasvuaineiston (taulukko 5) keruun ja mittauksen menetelmiä ovat kuvanneet Varmola (1993) sekä Gustavsen ym. (1988). Iisalmen pohjoispuoliset taimikot poistettiin aineistosta, samoin ne taimikot joiden valtapituus oli alle 2,7 m (laadinta-aineiston minimi).

Mallilla 1 (taulukko 3) ennustettiin testiaineiston jokaisen kuusen 5 vuoden jakson pituuskasvu ja sitä verrattiin mitattuun kasvuun. Mallin luotettavuutta tarkasteltiin seuraavien tunnusten avulla:

Ennusteen harha

$$b = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i) / n$$

Ennusteen suhteellinen harha

$$b_s = \sum_{i=1}^{n} ((y_i - \hat{y}_i) / \hat{y}_i) / n$$

Keskineliöpoikkeaman neliöjuuri

$$RMSE = \left(\sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2 / n \right)^{0,5}$$

Suhteellinen RMSE

$$RMSE_r = \left(\sum_{i=1}^{n} \left((y_i - \hat{y}_i) / \hat{y}_i \right)^2 / n \right)^{0,5}$$

y_i = havaittu arvo
$\hat{y}_i$ = ennustettu arvo
n = havaintojen lukumäärä

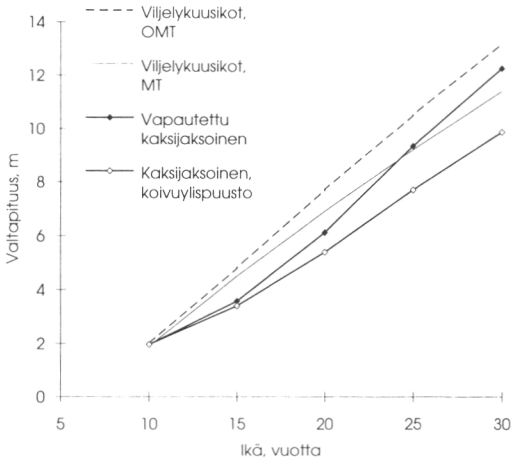
Taulukko 5. Puhtaiden kuusikoiden testiaineisto.

Muuttuja	Keski-arvo	Keski-hajonta	Minimi	Maksimi
	Pituuskasvu: N = 689 Läpimitan kasvu: N = 601			
i_{h5}	217	86	12	426
i_{d5}	2,97	1,19	0,40	6,73
h	3,02	1,72	0,15	8,53
d	3,28	1,63	1,30	8,50
H	4,06	1,40	2,70	6,29
H_{100}	28,8	2,4	25,0	35,0

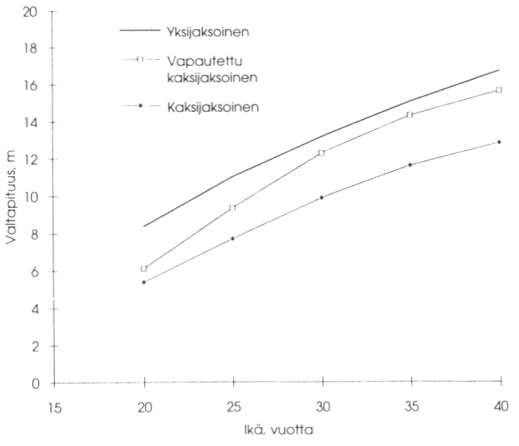
N = havaintojen lukumäärä
i_{h5} = puun pituuden kasvu tulevalla 5-vuotisjaksolla, cm $(5v)^{-1}$
i_{d5} = puun rinnankorkeusläpimitan kasvu tulevalla 5-vuotisjaksolla, cm^2 $(5v)^{-1}$
h = puun pituus, m
d = puun läpimitta rinnankorkeudella, cm
H = kuusijakson puiden poikkileikkauspinta-aloilla painotettu keskipituus, m
H_{100} = kuusijakson valtapituus 100 vuoden iällä, m (valtapituusboniteetti)

Malli 1 aliarvioi ilman ylispuustoa kasvaneiden kuusten pituuskasvua: i_{h5}:n ennusteen harha (b) oli 22,2 cm $(5v)^{-1}$, suhteellinen harha(b_s) 20,6 % (RMSE = 77,58 cm, $RMSE_r$ = 0,586). Kasvupaikkojen puuntuotoskyky oli kummassakin aineistossa suunnilleen sama: mallien laadinta-aineiston keskimääräinen pituusboniteetti (H_{100}) oli 29,7, testiaineiston 28,8.

Kuusten läpimitat jakson alussa ja lopussa en-



Kuva 2. Mallilla 1 laskettu kuusen valtapituuden kehitysennuste koivuylispuuston alla (lähtötilanteessa G_{ko} = 11,2 m² ha⁻¹, N_{ko} = 685 kpl ha⁻¹) ja vapautettuna (G_{ko} = 0, N_{ko} = 0). Vertailu viljelykuusikoiden valtapituuskehitykseen (Cajander 1934a). OMT = Oxalis-Myrtillus -tyyppi, MT = Myrtillus -tyyppi (Cajander 1909).



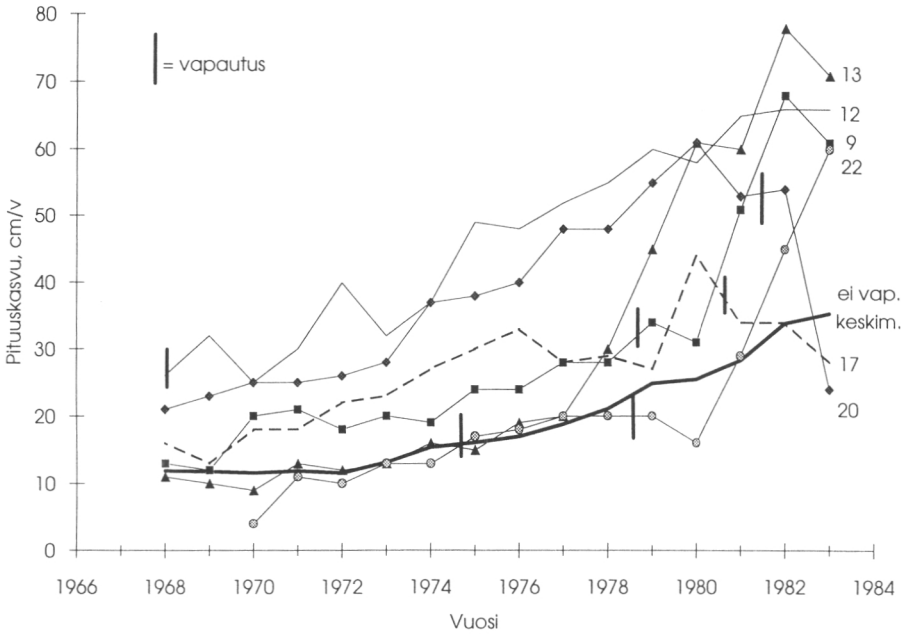
Kuva 3. Kuusivaltapuiden pituuskehitys yksi- (Mielikäinen 1985) ja kaksijaksoisessa sekametsikössä sekä koivun alta vapautetussa kuusikossa. Lähtötilanne ja laskentamenetelmä samat kuin kuvassa 2.

nustettiin pituuden perusteella mallilla 4. Niiden erotuksena laskettiin läpimitan kasvun ennuste. Sitä verrattiin mitattuun läpimitan kasvuun. Vain niitä taimia käytettiin, joiden pituus oli jakson alussa yli 1,3 m. Malli aliarvioi vapaana kasvaneiden kuusten läpimitan kasvua: i_{d5}:n aliarvio (b) oli keskimäärin 0,86 cm $(5v)^{-1}$, eli 52,2 % (b_s) (RMSE = 1,579 cm, $RMSE_r$ = 1,034).

Kuusen valtapituuskehitystä koivujakson alla ja 10 vuoden iässä vapautettuna verrattiin puhtaiden kuusikoiden kehityssarjojen mukaiseen kehitykseen (Cajander 1934a). Kuusen pituuskasvumallilla (malli 1 taulukossa 3) laskettiin kuusen keskimääräinen pituuskehitys, kun koivun pohjapinta-ala ja runkoluku olivat jakson alussa mallien laadinta-aineiston keskimääräiset 11,2 m² ha⁻¹ ja 685 kpl ha⁻¹ (taulukko 2). Koivujakson (100 % rauduskoivua) pohjapinta-alan kehitys ennustettiin metsikkökohtaisella kasvumallilla (Mielikäinen 1985, yhtälö 59). Koivun runkoluku pidettiin vakiona. Kuusen lähtöpituus 10 vuoden iässä asetettiin Cajanderin (1934a) taulukkoarvon mukaiseksi ottamalla tämän tutkimuksen metsiköiden kasvupaikkajakauma huomioon (MT 40 %, h = 1,96 m). Kuusen valtapituuden suhde keskipituuteen pidettiin vakiona (tutkimusaineiston metsiköiden keskiarvo = 1,23). Samoin laskettiin kuusen pituuskehitys, kun koivu oli poistettu (G_{ko} = 0, N_{ko} = 0).

Koivuylispuustosta vapautetun kuusikon valtapituus kehittyi laskelmien mukaan ensimmäisellä 5-vuotisjaksolla hitaammin kuin puhtaiden viljelykuusikoiden keskipituus (kuva 2). Vapautetun kuusikon mallilla laskettu valtapituuskehitys nopeutui seuraavilla jaksoilla, ja valtapituus vastasi tarkastelujakson lopussa puhtaiden viljelykuusikoiden valtapituutta vastaavalla kasvupaikkajakaumalla. Kuusen pituuskehitys oli koivun alla luonnollisesti hitaampi.

Edellä esitetyllä tavalla laskettua kuusen valtapituuskehitystä verrattiin myös Mielikäisen (1985) esittämään kuusen valtapituuskehitykseen yksijaksoisissa kuusi–koivu-sekametsissä 20 vuoden iästä lähtien (Mielikäisen malli 55 ja siihen liittyvä korjauskertoimen malli 56). Korjauskertoimen mallissa 56 on Mielikäisen (1985) julkaisussa painovirhe. Oikea malli, jota käytettiin sekä Mielikäisen (1985) tutkimustuloksia laskettaessa että tässä tutkimuksessa, on seuraava:



Kuva 4. Koivuylispuista vapautettujen kuusten vuotuinen pituuskasvu metsiköittäin. Vertailukäyränä koivuylispuuston alla kasvaneiden kuusten keskimääräinen pituuskasvu tutkimusaineistossa.

$$\ln(ihm / ihc) = -3{,}341 - 0{,}1931 \cdot \ln(h) + 1{,}072 \cdot \ln(H_{100})$$

ihm = kaatokoepuun todellinen pituuskasvu
ihc = yhtälöllä laskettu pituuskasvu

Yksijaksoisten kuusikoiden valtapituus 20 vuoden iällä laskettiin Mielikäisen yhtälöllä 7. Biologisen iän ja rinnankorkeusiän erona käytettiin laskelmissa 10 vuotta Mielikäisen (1985) taulukon 4 mukaisesti. Valtapituusboniteettina käytettiin kaksijaksoisten kuusikoiden keskiarvoa H_{100} = 29,7. Koivun alta vapautetut kuusivaltapuut olivat laskentajakson alussa lyhyempiä kuin yksijaksoisissa metsiköissä, mutta ne kasvoivat vertailujakson aikana suunnilleen yhtä nopeasti kuin yksijaksoisissa metsissä (kuva 3). Koivujakson alla kuuset kasvoivat luonnollisesti hitaammin.

Kuusen pituuskasvun malleissa ei ollut mukana selittävää muuttujaa, joka parantaisi kasvuennus-

Taulukko 6. Vapautettujen kuusikoiden testiaineistot.

Muuttuja	Keski-arvo	Keski-hajonta	Minimi	Maksimi
	Ensimmäinen 5-vuotiskausi vapauttamisen jälkeen (N = 60)			
i_{h5}	147	73	59	335
h	2,30	1,26	0,70	7,93
H	3,50	1,16	1,96	4,73
	Vapauttamista edeltänyt 5-vuotiskausi (N = 78)			
h	3,42	2,19	0,80	10,70
i_{h5}	228	90	67	450
H	4,69	1,83	2,78	7,75

N = havaintojen lukumäärä
i_{h5} = puun pituuden kasvu tulevalla 5-vuotisjaksolla, cm $(5v)^{-1}$
h = puun pituus, m
H = kuusijakson puiden poikkileikkauspinta-aloilla painotettu keskipituus, m

tetta puun kilpailuaseman muuttuessa voimakkaasti. Malleilla ennustettuja pituuskasvuja verrattiin koivuylispuustosta vapautettujen kuusten pituuskasvuihin (taulukko 6). Näitä havaintoja ei ollut käytetty mallin laatimisaineiston osana.

Kuusten pituuskasvu säilyi mittausten mukaan ensimmäiset 2–3 kasvukautta vapauttamisen jälkeen ennallaan tai jopa taantui lievästi. Kasvu alkoi yleensä nopeutua kolmantena kasvukautena vapauttamisen jälkeen ja lisääntyi seuraavina 3–4 kasvukautena (kuva 4). Metsiköissä 9, 13 ja 22 oli käytettävissä 5 vuoden pituisen jakson kasvutiedot vapauttamisen jälkeen. Niiden koepuiden vapautusta seuranneen 5-vuotisjakson pituuskasvua verratiin mallilla 1 (taulukko 3) ennustettuun kasvuun. Malli yliarvioi pituuskasvua lievästi:

($b = -17{,}1$ cm $(5v)^{-1}$, $bs = -8{,}03\%$, $RMSE = 55{,}82$ cm, $RMSE_r = 0{,}29$).

Taulukko 7. Puuston kehitys esimerkkimetsiköissä 15-vuotisen simulointijakson aikana.

			Metsikkö 26			Metsikkö 30		
Puusto-tunnus	Yks.	Koivun hakkuu	Alku-arvo	Loppu-arvo	Kasvu /vuosi	Alku-arvo	Loppu-arvo	Kasvu /vuosi
Kuusi								
H_{ku}	m	ei h.	6,1	10,6	0,30	3,5	9,6	0,41
		50 %	6,1	12,8	0,45	3,5	11,3	0,52
		100 %	6,1	13,3	0,48	3,5	11,4	0,53
D_{ku}	cm	ei h.	6,3	11,3	0,33	4,7	10,6	0,40
		50 %	6,3	14,2	0,53	4,7	13,0	0,55
		100 %	6,3	15,5	0,61	4,7	13,7	0,60
G_{ku}	$m^2\ ha^{-1}$	ei h.	2,1	7,7	0,37	1,4	8,2	0,46
		50 %	2,1	13,4	0,75	1,4	12,9	0,77
		100 %	2,1	16,2	0,94	1,4	14,5	0,87
V_{ku}	$m^3\ ha^{-1}$	ei h.	7,6	42,7	2,3	3,6	41,6	2,5
		50 %	7,6	87,4	5,3	3,6	74,5	4,7
		100 %	7,6	108,6	6,7	3,6	83,5	5,3
Koivu								
H_{ko}	m	ei h.	13,3	20,6	0,49	21,0	25,3	0,29
		50 %	13,9	20,8	0,45	22,0	26,2	0,28
D_{ko}	cm	ei h.	15,4	19,6	0,28	28,3	30,8	0,17
		50 %	15,9	23,6	0,52	37,1	43,7	0,44
G_{ko}	$m^2\ ha^{-1}$	ei h.	16,5	27,9	0,76	19,3	24,6	0,35
		50 %	8,3	19,0	0,71	7,6	13,3	0,38
V_{ko}	$m^3\ ha^{-1}$	ei h.	110	277	11,2	186	279	6,3
		50 %	56	187	8,7	92	145	3,5
V_{tukki}	$m^3\ ha^{-1}$	ei h.	0	30	2,0	98	189	6,1
		50 %	0	89	5,9	83	136	3,5

Koivun hakkuu:
ei h. = Koivujaksoa ei harvennettu eikä poistettu
50 % = Koivujakson pohjapinta-alasta poistettiin alaharvennuksessa 50 %
100 % = Koivujakso poistettiin kokonaan

4 Metsiköiden kehitys

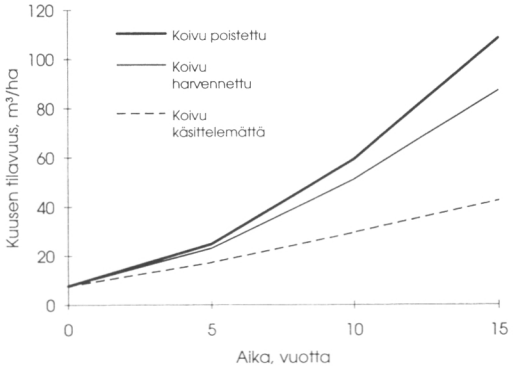
Metsikköaineisto jaettiin kahteen osaan kuusen ja koivun ikäeron perusteella (biologisten keski-ikien ero alle 5 vuotta tai vähintään 5 vuotta). Kummastakin osasta valittiin tarkasteltavaksi yksi metsikkö, joka vastasi kaikilta metsikkötunnuksiltaan lähinnä ositteen keskiarvoja. Näin menetellen tulivat valituiksi metsiköt 26 (pieni ikäero) ja 30 (suuri ikäero).

Metsiköiden kehitystä simuloitiin malleilla 1–4, 6, 8 ja 9 kolmena vaihtoehtoisena käsittelynä, joissa koivujen pohjapinta-alasta poistettiin 0, 50 tai 100 %. Harvennuksessa (50 %:n poisto) pyrittiin jäljittelemään tukkipuun tuottamiseen tähtäävää alaharvennusta. Ensin poistettiin kaikki aritmeettista keskiläpimittaa pienemmät koivut. Jäljelle jääneistä koivuista poistettiin satunnaisesti niin monta, että pohjapinta-alaksi jäi 50 % lähtötasosta.

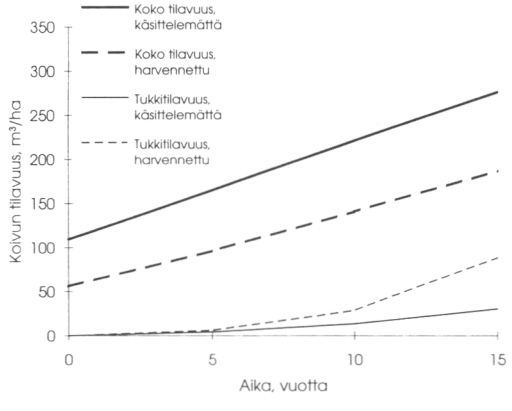
Puiden kokonaistilavuudet (rungon tilavuus maanpinnasta latvan huippuun) ja tukkiosuudet laskettiin Laasasenahon (1982) kahden tunnuksen polynomirunkokäyrillä. Pienten puiden tilavuudet laskettiin Ihalaisen laatimilla yhtälöillä (Snellman 1986). Koivun tukkiosuuden tilavuus laskettiin käyttäen tukkiosan vähimmäispituutena 3,1 m. Koska puita ei ollut apteerattu mittauksen yhteydessä, tukin minimiläpimittana käytettiin 20 cm:ä käytännössä tavallisen 18 cm:n sijasta. Tällä tavoin pyrittiin ottamaan huomioon tukkirunkojen vioista johtuvaa tukkiosuuden vähennystä (Heiskanen 1966, Kärkkäinen 1986).

Kolmen käsittelyvaihtoehdon mukaista puustojen kehitystä ennustettiin 15 vuotta eteenpäin 5 vuoden jaksoissa. Koivujakson poistaminen nopeutti laskelmien mukaan kuusen keskipituuden kehitystä 1,9–2,7 m $(15v)^{-1}$ ja tilavuuskasvua 42–66 m^3 ha^{-1} $(15v)^{-1}$ käsittelemättömään verrattuna (taulukko 7, kuvat 5–8). Koivujakson voimakas harventaminen lisäsi kuusikon kasvua lähes yhtä paljon kuin koivun poistaminen kokonaan. Lähes tasaikäisessä metsikössä 26 pieniläpimittaisen ja tiheän koivikon käsittely johti suurempaan kuusen kasvun lisäykseen kuin metsikössä 30, jonka koivujakso koostui harvalukuisista järeistä rungoista.

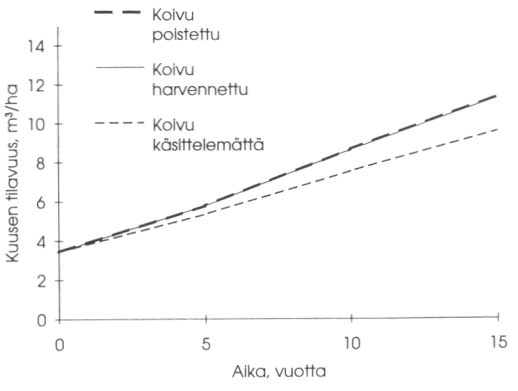
Koivujakson harventaminen pienensi koivun tilavuuskasvua, mutta nopeutti puuston järeytymistä käsittelemättömään vaihtoehtoon verrattuna (taulukko 7). Harvennus johti tukkipuun tuotoksen voimakkaaseen lisääntymiseen simulointijakson aikana metsikössä 26 (kuva 6). Metsikössä 30 harvennus sen sijaan pienensi tukkipuun tuotosta, koska tukkipuun osuus oli jo lähtötilanteessa suuri (kuva 8). Harvennetussa metsikössä 26 simulointijakson aikana (ilman harvennuspoistumaa) tuotetusta koivusta 68 % oli tukkipuuta, mutta harventamattomassa vain 18 %. Jos kummankin vaihtoehdon



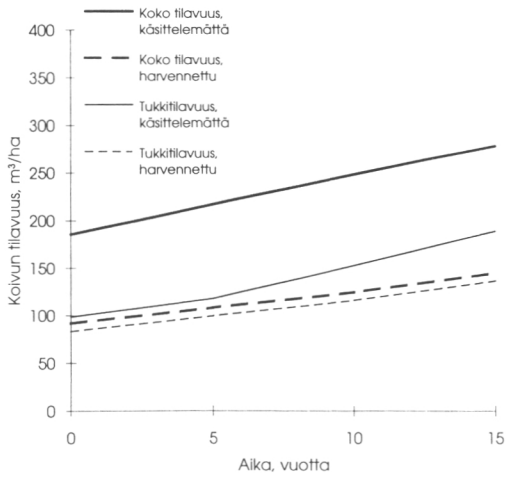
Kuva 5. Kuusen ennustettu tilavuuskehitys koivun alla sekä kokonaan tai osittain koivuylispuustosta vapautettuna 15 vuoden aikana. Koemetsikkö 26.



Kuva 6. Koivuylispuuston ennustettu tilavuuskehitys harvennettuna ja harventamattomana 15 vuoden aikana. Koemetsikkö 26.



Kuva 7. Kuusen ennustettu tilavuuskehitys koivun alla sekä kokonaan tai osittain koivuylispuustosta vapautettuna 15 vuoden aikana. Koemetsikkö 30.



Kuva 8. Koivuylispuuston ennustettu tilavuuskehitys harvennettuna ja harventamattomana 15 vuoden aikana. Koemetsikkö 30.

metsiköitä kasvatettaisiin edelleen, tukkipuun osuus kasvaisi ilmeisesti hyvin voimakkaasti. Metsikössä 30 lähes kaikki simulointijakson aikana tuotettu koivu oli tukkipuuta kummassakin vaihtoehdossa.

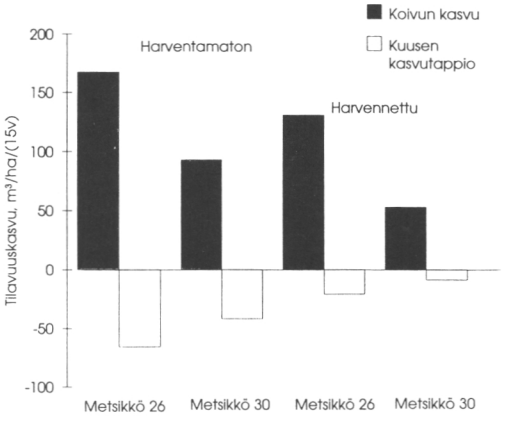
Täydellisen vapautuksen jälkeinen kuusen tilavuuskasvun lisääntyminen ei kummassakaan metsikössä korvannut koivun hakkuusta aiheutunutta kasvunmenetystä (kuva 9).

5 Tulosten tarkastelu

Tämä tutkimus perustuu tilapäiskoealoihin, jotka valittiin käytännön metsäammattilaisilta saatujen ilmoitusten perusteella. Tutkimusaineistoon sisältyi ikä- ja kokorakenteeltaan sekä tiheydeltään laajasti vaihtelevia koivikoita. Koivun alla kasvoi kaikissa metsiköissä kehityskelpoinen nuori kuusikko, joka oli useimmiten istutettu.

Koivun paksuuskasvu selvitettiin kairaamalla. Aluspuustona kasvavat kuuset olivat pääosin niin pieniä, ettei niiden kasvua ollut mahdollista kairata. Kuusen pituuskasvut mitattiin joko maasta käsin tai kiiveten mittanauhalla. Koivun pituuskasvua ei mitattu, koska sitä ei voida määrittää luotettavasti puuta kaatamatta.

Mittausten perusteella laadittiin kuuselle ja koivulle kasvumallit. Kuusen paksuuskasvun arvioimiseen laadittiin malli, joka ennustaa kuusen läpimittaa suhteessa puun pituuteen. Koivun pituuskasvumallina käytettiin Mielikäisen (1985) sekametsikkötutkimuksessa laadittua mallia.



Kuva 9. Koivun tilavuuskasvu ja koivuylispuuston kuuselle aiheuttama kasvutappio 15 vuoden simulointijakson aikana esimerkkimetsiköissä 26 ja 30. Koivujakso harvennettuna tai harventamatta.

Kasvupaikan puuntuotoskykyä kuvattiin koivun valtapituusboniteetilla. Osassa metsiköitä koivua oli saatettu aiemmin käsitellä harsinnan tapaisilla hakkuilla, minkä vuoksi pituusboniteetti saattaa aliarvioida kasvupaikan puuntuotoskykyä joissakin tapauksissa. Jos metsässä kasvoi sekä raudus- että hieskoivua, pituusboniteetti määritettiin sen koivulajin mukaan, jonka osuus valtapuustosta oli suurempi.

Kuusen pituusboniteetti, joka arvioitiin koivun boniteettiluokan perusteella, ei näyttänyt tässä tutkimusaineistossa vaikuttavan kuusten pituuskasvuun lainkaan. Kuusen mallit kuvaavat näin ollen kuusen pituuskasvua koemetsiköiden keskimääräisellä kasvupaikalla, joka vastasi käenkaali-mustikkatyyppiä (OMT, H_{100} = 30). Malleja ei ole syytä käyttää tästä selvästi poikkeavilla kasvupaikoilla tai maantieteellisillä alueilla.

Saadut tulokset osoittivat, että suurikokoiset ylispuukoivut hidastavat kuusen pituuskehitystä vähemmän kuin pienet, jos koivikoiden pohjapinta-alana mitattava tiheys on sama. Tiheässä kasvavien pienten koivujen alla kuusille jää vähemmän kasvutilaa (vrt. Oliver ja Larson 1990) ja valoa kuin runkoluvultaan harvemmassa, valoisassa koivikossa. Friesin (1974) mukaan koivuylispuusto piiskaa kuusten latvoja, jos puulajien ikäero on rinnankorkeudelta alle 10–15 vuotta.

Alikasvoskuusten pituuskasvumalli yliarvioi koivun alta vapautettujen kuusten pituuskasvua ensimmäisellä 5-vuotiskaudella vapauttamisen jälkeen. Toisaalta malli aliarvioi kasvua, kun vapauttamisesta on kulunut enemmän kuin viisi vuotta. Yli- ja aliarviot kumoavat osittain toisensa, mutta luotettavia arvioita niiden suuruudesta eri ajankohtina vapauttamisen jälkeen ei voida aineiston puuttuessa esittää. Mitä pidemmälle jaksolle kasvua ennustetaan, sitä suuremmaksi kasvaa epävarmuus. Esitetyillä pituuskasvumalleilla ei ole näin ollen syytä ennustaa koivikon alta vapautettujen kuusten kasvua 15 vuotta pidemmälle ajalle. Alusta lähtien vapaana kasvaneiden kuusten kasvun ennustamiseen mallit eivät sovellu.

Myös aiempien tutkimusten mukaan kuusen pituuskasvu ei lisäänny heti vapauttamisen jälkeen, vaan kasvun on todettu yleensä kiihtyvän vasta 3–5 vuoden kuluttua vapauttamisesta (Cajander 1934b, Skoklefald 1967, Bergan 1971, Koistinen ja Valkonen 1993). Erikssonin (1976), Berganin (1987) ja Thamin (1988) mukaan koivun alta vapautetut kuuset kasvavat elpymisjakson jälkeen nopeammin kuin vastaavan kokoiset, alusta lähtien vapaana kasvaneet kuuset. Koivuylispuusto ei näytä vaikuttavan ainoastaan kuusen senhetkiseen kasvunopeuteen, vaan muuttavan sen kehitysrytmiä pitkällä aikavälillä.

Kuusten paksuuskasvu laskettiin mallilla, joka ennustaa puun rinnankorkeusläpimittaa puun pituuden funktiona. Testien mukaan mallit soveltuvat käytettäväksi koivun alla kasvavien kuusten paksuuskehityksen ennustamiseen. Mallit aliarvioivat selvästi koivun alta vapautettujen kuusten rinnankorkeusläpimitan. Tämä on merkki siitä, että läpimitan kasvu reagoi harvennukseen tai ylispuiden poistoon nopeammin ja voimakkaammin kuin pituuskasvu (Assmann 1961, Fries 1964, Andersson 1984). Vapautettujen kuusten paksuuskasvun elpymistä ylispuiden poiston jälkeen voitaisiin kuvata luotettavammin paksuuskasvumallilla, joiden laatimiseksi ei kuitenkaan voitu hankkia riittävää aineistoa kairausta ajatellen liian pienikokoisista kuusista.

Tiheänä kasvava aluspuusto saattaa vaikuttaa myös ylemmän puujakson kasvuun. Isomäen (1979) tutkimilla kestokoealoilla kuusialikasvos hidasti selvästi ylemmän mäntyjakson kehitystä. Nyt tehdyn tutkimuksen aineistossa kuusikon tiheydellä ei ollut vaikutusta päällä kasvavan koivun kasvuun. Tiheys ei myöskään vaikuttanut kuusten pituuden ja läpimitan suhteeseen. Pienten kuusten keskinäinen kilpailu oli näin ollen merkityksetöntä koivun aiheuttamaan kilpailuun verrattuna.

Ylispuuston ja sen käsittelyn vaikutusta metsikön kehitykseen tarkasteltiin simuloimalla kahden esimerkkimetsikön kehitystä laadituilla kasvumalleilla 15 vuoden aikajakso. Metsiköiden käsittelyvaihtoehdot olivat koivujakson täydellinen poistaminen, voimakas alaharvennus sekä käsittelemättä jättäminen. Koivun tuotos oli laskelmien mukaan molemmissa ylispuuvaihtoehdoissa (lepo tai harvennus) korkeampi kuin kuuselle ylispuista aiheutunut kasvutappio. Nuoren ylispuukoivikon harventaminen lisäsi sekä koivutukkipuun tuotosta että kuusen kasvua. Vanhan, järeän koivikon harventaminen sen sijaan vähensi koivun tilavuuskasvua ja tukkipuun tuotosta, eikä kuusen kasvukaan lisääntynyt merkittävästi.

Koivusta kokonaan vapautetun kuusikon 15 vuoden tilavuuskasvuarviot olivat laskelmissa kasvumallien puutteellisuuden vuoksi arviolta 10–30 % todellista pienempiä. Tällä ei ole mallien sovellusalueella kuitenkaan käytännön merkitystä, koska kuusen tilavuuskasvu on vielä vähäinen. Taimikkovaiheen tilavuuskasvutappiota tärkeämpi näkökohta on metsikön kasvatuksen kiertoajan piteneminen, mikäli kuusen kasvatuksessa tähdätään yhtä suureen järeyteen ja kuusikon kokonaistuotokseen kuin kasvatettaessa kuusikkoa alusta lähtien vapaana. Arviota kiertoajan pitenemisestä ei ole tämän tutkimuksen perusteella kuitenkaan mahdollista antaa.

Friesin (1974) laskelmien mukaan kaksijaksoisen kuusi-koivusekametsikön tuotos kiertoaikana oli sama mutta arvokasvu pienempi kuin puhtaan kuusikon. Syynä tähän oli luontaisesti syntyneiden, hoitamattomien koivikoiden huono laatukehitys. Vanerikoivulla ei tuolloin ollut käyttöä Ruotsissa, joten vaneripuun kasvatuksen vaihtoehto ei sisältynyt mukaan laskelmiin.

Hanneliuksen (1978) mukaan verhopuuston kasvattaminen viljelykuusikon päällä ei kannata, koska koivun rahallinen tuotto ei hänen tutkimuksensa mukaan korvaa kuuselle aiheutunutta kasvutappiota. Verhopuuston päätarkoitus mainitun tutkimuksen kenttäkokeissa oli hallan torjunta eikä vaneripuun tuottaminen. Koivuylispuita kasvatettiin kokeessa kuusen päällä vain 16 vuoden ajan. Myös puutavaralajien hintasuhteet olivat tuolloin järeän koivun kasvattamisen kannalta epäedullisemmat kuin nykyisin. Koivutukin, koivukuidun, kuusitukin ja kuusikuidun hintasuhteet olivat Hanneliuksen tutkimuksessa 100:44:89:51 (Itä-Hämeen piirimetälautakunnan keskimääräiset kantohinnat 1974–75), kun vastaavat hintasuhteet vuonna 1992 olivat 100:33:76:43 (Metsätilastollinen vuosikirja 1992).

Thamin (1988) tutkimuksessa kaksijaksoisen kuusi-koivusekametsikön suurin tuotos saavutettiin silloin, kun kuusentaimikon päällä kasvatettiin 800 koivua hehtaarilla 20–30 ensimmäisen vuoden ajan. Koivun korkea tuotos ja kuusen kiihtyvä kasvu vapauttamisen jälkeen kompensoivat verhopuuston aiheuttaman kuusen kasvun hidastumisen.

Tässä tutkimusraportissa esitettyjä malleja voidaan käyttää Etelä-Suomen tuoreilla ja lehtomaisilla kankailla kasvavien kaksijaksoisten kuusi-koivusekametsiköiden kehityksen ennustamiseen. Laskelmissa koivujakson puuston ikä, koko ja tiheys voivat vaihdella melkoisesti. Kuusen osalta puiden kokovaihtelu tutkimusaineistossa jäi mallien ennakoitua käyttöaluetta ajatellen liian pieneksi. Kuusen valtapituus saa laskelmien alussa olla korkeintaan 9 m, keskiläpimitta enintään 7 cm ja puuston tiheys korkeintaan 3000 kpl hehtaarilla. Vapautetun kuusikon kehitystä ei ole syytä ennustaa 15 vuotta pidemmille ajanjaksoille. Viimeisen 5-vuotisjakson kasvuarviot ovat silloinkin jo epävarmoja. Mallit aliarvioivat kuusen läpimitan kasvua, jos koivua on harvennettu tai se on poistettu kokonaan.

Jotta kaksijaksoisten kuusi-koivusekametsiköiden kehityksen ennustamiseksi voitaisiin laatia yleisemmin sovellettavat kasvumallit, olisi lisäaineistoa hankittava varttuneemmista kuusikoista. Vapautusreaktion mallittamista varten aineistoon tulisi sisältyä riittävästi metsiköitä, jotka on vapautettu vähintään 5–10 vuotta ennen mittausta. Vapautetun kuusikon myöhemmän kehityksen ennustamiseen voitaneen myös soveltaa tekeillä olevia puhtaiden viljelymetsiköiden kasvumalleja.

Tutkimustulokset osoittivat, että nuoren kuusikon päällä on mahdollista kasvattaa harvahko koivusukupolvi vaneripuuksi saakka vaarantamatta kuusikon kehitystä. Ylispuukoivun tilavuuskasvu 15 vuodessa oli 2–3-kertainen kuuselle näin aiheutettuun kasvutappioon verrattuna. Kaksijaksoisen metsikön kasvatuksen taloudellisesta kannattavuudesta voidaan tehdä luotettavia päätelmiä vasta, kun pitkän ajan vertailu yksijaksoisten kuusikoiden, koivikoiden ja sekametsiköiden kehitykseen on tehty ja kaksijaksoisille metsiköille on laadittu optimaaliset kasvatusohjelmat.

Kiitokset

MMT Taneli Kolström, MMK Pentti Niemistö ja MML Martti Varmola tekivät käsikirjoitukseen hyödyllisiä parannusehdotuksia. Metsähallitus, tutkimusalueen metsälautakunnat, metsänhoitoyhdistykset sekä metsänomistajat avustivat tutkimusaineiston hankinnassa. Kirjoittajat esittävät parhaat kii-

toksensa kaikille tutkimuksen valmistumiseen myötävaikuttaneille.

Kirjallisuus

Agestam, E. 1985. En produktionsmodell för blandbestånd av tall, gran och björk i Sverige. Summary: A growth simulator for mixed stands of pine, spruce and birch in Sweden. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsproduktion, Rapport 15. 76 s + 74 liitesivua.

Andersson, S-O. 1984. Om lövröjning i plant- och ungskogar. Sveriges Skogsvårdsförbunds tidskrift 82(3–4): 69–95.

Assmann, E. 1961. Waldertragskunde. München. 490 s.

Bergan, J. 1971. Skjermforyngelse av gran samenlignet med plantning i Grane i Nordland. Summary: Natural Norway spruce regeneration under shelterwood compared with plantations at Grane in Nordland. Meddelser fra det Norske skogforsöksvesen 28(104): 194–211.

Bergan, J. 1987. Virkningen av björkeskjerm på etablering og vekst hos bartraer utplantet i Nord-Norge. Summary: The influence of birch shelter trees on establishment and growth of conifers planted in North Norway. Norsk Institutt for Skogsforskning, Rapport 10. 47 s.

Cajander, A. 1909. Über Waldtypen. Acta Forestalia Fennica 1. 175 s.

Cajander, E. 1934a. Tutkimuksia Etelä-Suomen viljelykuusikoiden kehityksestä. Referat: Untersuchungen über die Entwicklung der Kulturfichtenbestände in Süd-Finnland. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 19(3). 101 s.

— 1934b. Kuusen taimistojen vapauttamisen jälkeisestä pituuskasvusta. Referat: Über den Höhenzuwachs der Fichtenpflanzenbestände nach der Befreiung. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 19(5). 59 p.

Clutter, J., Fortson, J., Pienaar, L., Brister, G. & Bailey, R. 1983. Timber management. A quantitative approach. John Wiley & Sons, New York. 333 s.

Eriksson, H. 1976. Granens produktion i Sverige. Summary: Yield of Norway spruce in Sweden. Skogshögskolan, Institutionen för Skogsproduktion, Rapporter och uppsatser 41. 291 s.

Folkesson, B. & Bärring, U. 1982. Exempel på en riklig björkförekomsts inverkan på utvecklingen av unga tall- och granbestånd i norra Sverige. Summary: Some examples of the influence of an abundant occurrence of birch on the development of young Norway spruce and Scots pine stands in north Sweden. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skoglig herbologi, Rapport 1. 64 s.

Fries, J. 1964. Vårtbjörkens produktion i Svealand och södra Norrland. Summary: Yield of Betula verrucosa Ehrh. in Middle Sweden and southern North Sweden. Studia Forestalia Suecica 14. 303 s.

— 1974. Björk och gran. I: Framtidsskogen – skogsproduktionens mål och medel. Skogshögskolan, Institutionen för skogsproduktion, Rapporter och uppsatser 33: 30–37.

Frivold, L. 1982. Bestandsstruktur og produksjon i blandingsskog av björk (Betula *verrucosa* Ehrh.) og gran (*Picea abies* (L) Karst.) i sydost-Norge. Summary: Stand structure and yield of mixed stands of birch (*Betula verrucosa* Ehrh.) and spruce (*Picea abies* (L) Karst.) in southeast Norway. Meldinger fra Norges Lantbrukshögskole 90(3). 108 s.

Gustavsen, H., Roiko-Jokela, P. & Varmola, M. 1988. Kivennäismaiden talousmetsien pysyvät (INKA ja TINKA) kokeet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 292. 212 s.

— & Mielikäinen, K. 1984. Talouskoivikoiden kasvupaikkaluokittelu valtapituuden avulla. Summary: Site index curves for natural birch stands in Finland. Folia Forestalia 597. 20 s.

Hannelius, S. 1978. Istutuskuusikon tiheys – tuotoksen ja edullisuuden tarkastelua. Summary: Initial tree spacing in Norway spruce timber growing – an appraisal of yield and profitability. Folia Forestalia 359. 51 s.

Heikinheimo, O. 1941. Metsänistutusmenetelmistä. Referat: Versuche mit waldbaulichen Pflanzmethoden. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 29(4). 63 s.

Heiskanen, V. 1966. Tutkimuksia koivujen vikaisuuksista, niiden vaikutuksesta sorvaustulokseen sekä niiden huomioonottamisesta laatuluokituksessa. Summary: Studies on the defects of birch, their influence on the quality and quantity of rotary cut veneer, and their consideration in veneer birch grading. Acta Forestalia Fennica 80(3). 128 s.

Hägg, A. 1991. Björken ökar tallens värde. Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift 2: 52–57.

Isomäki, A. 1979. Kuusialikasvoksen vaikutus männikön kasvuun, tuotokseen ja tuottoon. Summary: The effect of spruce undergrowth on the increment, yield and returns of a pine stand. Folia Forestalia 392. 13 s.

Jonsson, B. 1962. Om barrblandskogens volymproduktion. Summary: Yield of mixed coniferous forests. Meddelanden från statens skogsforskningsinstitut 50(8). 143 s.

Kangas, A., Kangas, J., Korhonen, K., Maltamo, M. & Päivinen, R. 1990. Metsää kuvaavat mallit. Silva Carelica 17. 143 s.

Kellomäki, S., Lämsä, P., Oker-Blom, P. & Uusvaara, O. 1992. Männyn laatukasvatus. Summary: Management of Scots pine for high quality timber. Silva Carelica 23. 133 s.

Koistinen, E. & Valkonen, S. 1993. Models for height development of Norway spruce and Scots pine advance growth after release in southern Finland. Tiivistelmä: Mallit kuusen ja männyn vapautettujen alikasvostaimien pituuskehitykselle Etelä-Suomessa. Silva Fennica 27(3): 179–194.

Kuusela. K. 1990. The dynamics of boreal coniferous forests. SITRA 112. 172 s.

Kärkkäinen, M. 1986. Koivuvaneritukkien ja -runkojen arvosuhteet. Abstract: Value relations of birch veneer logs and stems. Silva Fennica 20(1): 45–57.

Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 108. 74 s.

Laiho, O. 1983. Kuusen luontaisesta uudistumisesta. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 94: 32–41.

Lappi-Seppälä, M. 1930. Untersuchungen über die Entwicklung gleichaltriger Mischbestände aus Kiefer und Birke. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 15. 243 s.

Leikola, M. 1976. Verhopuuston tiheyden vaikutus metsikön säteilyoloihin. Summary: Effect of the density of the nurse crop on solar radiation inside the stand. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 90(1). 33 s.

— & Rikala, R. 1983. Verhopuuston vaikutus metsikön lämpöoloihin ja kuusen taimien menestymiseen. Summary: The influence of the nurse crop on stand temperature conditions and the development of Norway spruce seedlings. Folia Forestalia 559. 33 s.

Lundmark, J.-E. 1988. Skogsmarkens ekologi. Standortsanpassat skogsbruk. Del 2 – Tillämpning. Skogsstyrelsen, Jönköping. 319 s.

Metsänhoitosuositukset. 1994. Metsäkeskus Tapio. 83 s.

Metsätilastollinen vuosikirja 1992. Skogsstatistisk årsbok 1992. Yearbook of forest statistics 1992. Suomen Virallinen Tilasto. Maa- ja metsätalous 1993: 5. 317 s.

Metsän uudistaminen. 1993. Tehdaspuu Oy. Kouvola. 59 s.

Metsätalous ja ympäristö. 1994. Metsätalouden ympäristöohjelmatyöryhmän mietintö. Maa- ja metsätalousministeriö, metsäpolitiikan osasto. Työryhmän mietintö 1994: 3. 100 s.

Mielikäinen, K. 1980. Mänty-koivusekametsiköiden rakenne ja kehitys. Summary: Structure and development of mixed pine and birch stands. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 99(3). 82 s.

— 1985. Koivusekoituksen vaikutus kuusikon rakenteeseen ja kehitykseen. Summary: Effect of an admixture of birch on the structure and development of Norway spruce stands. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 133. 79 s.

Mikola, P. 1985. The effect of tree species on the biological properties of forest soil. Naturvårdsverket, Rapport 3017. 27 s.

Oliver, C. & Larson, B. 1990. Forest stand dynamics. McGraw-Hill, New York. 467 s.

Pukkala, T. 1981. Nuoren viljelysekametsikön kehitys. Metsänarvioimistieteen laudaturtyö. Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteen laitos. 86 s.

—, 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.

Savolainen, R. & Kellomäki, S. 1981. Metsän maisemallinen arvostus. Summary: Scenic value of forest landscape. Acta Forestalia Fennica 170. 74 s.

Skoklefald, S. 1967. Fristilling av naturlig gjenvekst av gran. Summary: Release of natural Norway spruce regeneration. Meddelser fra det Norske skogforsöksvesen 23(85): 385–409.

Snellman, C. 1986. Muutoksia CRK-systeemiin 5.2.1986. Metsäntutkimuslaitos, matemaattinen osasto. Moniste. 6 s.

Tamminen, P. 1991. Kangasmaan ravinnetunnusten ilmaiseminen ja viljavuuden alueellinen vaihtelu Etelä-Suomessa. Summary: Expression of soil nutrient status and regional variation in soil fertility in southern Finland. Folia Forestalia 777. 28 s. + 11 liitesivua.

Tham, Å.1988. Yield prediction after heavy thinning of birch in mixed stands of Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.) and birch (Betula pendula Roth & Betula pubescens Ehrh.). Sammanfattning: Produktionsförutsägelser vid kraftiga gallringar av björk i blandbestånd av gran (Picea abies (L.) Karst.) och björk (Betula pendula Roth & Betula pubescens Ehrh.). Dissertation. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Yield Research. Report 23.

Thesslund, O. 1975. Kookkaan kuusitaimiston vaurioitumisesta ylispuiden poistossa. Tutkimusseloste 43/75. Tehdaspuu Oy. Moniste.

Tiihonen, P. 1984. Kasvun vaihtelu Pohjois-Karjalan ja Pohjois-Savon piirimetsälautakunnissa valtakunnan metsien 7. inventoinnin aineiston perusteella. Summ-

ary: 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.

Valsta, L. 1988. Optimizing species composition in mixed, even-aged stands. Julkaisussa: Ek, A., Shifley, S. & Burk, T (toim.). Forest growth modelling and prediction. Volume 2. Proceedings of the IUFRO Conference, August 23–27, 1987, Minneapolis, Minnesota. USDA Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report NC-120: 913–920.

Varmola, M. 1993. Viljelymänniköiden alkukehitystä kuvaava metsikkömalli. Summary: A stand model for early development of Scots pine cultures. Folia Forestalia 813. 43 s.

Vähäpesola, J. 1989. Kuusi-rauduskoivusekametsikön taloudellisesti edullisin hakkuuohjelma. Metsänarvioimistieteen pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, metsänarvioimistieteen laitos. 87 s. + 26 liitesivua.

55 viitettä

IV

Valkonen, S. & Valsta, L. 2000

Productivity and economics of mixed two-storied spruce and birch stands in Southern Finland simulated with empirical models

Forest Ecology and Management
(Accepted 21 January 2000)
© Elsevier Science Ltd. Reprinted with kind permission from Elsevier Science

Productivity and economics of mixed two-storied spruce and birch stands in Southern Finland simulated with empirical models

Sauli Valkonen[a*], Lauri Valsta[b]

[a] *Finnish Forest Research Institute, Vantaa, Finland*
[b] *University of Helsinki, Department of Forest Economics, Helsinki, Finland*

* Corresponding author. Finnish Forest Research Institute, Vantaa Research Center, P.O.Box 18, FIN-01301 Vantaa, Finland. Tel. +358-9-8570 5318, fax +358-9-8570 5361, email: sauli.valkonen@metla.fi. Accepted 21 January 2000.

Abstract

The profitability of growing a naturally emerged birch (*B. pendula* Roth or *B. pubescens* Ehrh.) overstory in a young Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) plantation was examined with empirical stand structure, growth and yield, logging cost, and logging damage models. In the projected alternatives, an overstory of either birch species was thinned to 200–1 000 stems ha^{-1} at the age of 15 years and retained for another 15 years. Development of the remaining spruce stand was simulated up to rotation age (70–85 years). Alternative treatments included removing the overstory completely at 15 years of age, and managing a pure spruce stand that was kept free of birch throughout.

Growing a birch overstory of 200–1 000 stems ha^{-1} up to age 30 years resulted in 61–93 $m^3 ha^{-1}$ or 9.1–16.8 % yield loss for the spruce stand due to growth retardation, and a mortality of 382–581 out of 1 900 stems ha^{-1} through logging damage. This was compensated for or exceeded by the additional yield of the birch (54–173 $m^3 ha^{-1}$) except for the lowest stocking (200–400 stems ha^{-1}) alternatives with *B. pubescens*. Treatment regimes with a birch overstory were clearly the most profitable alternatives, yielding up to 151 % (*B. pendula*) and 113 % (*B. pubescens*) of the net present value of the pure spruce alternative, at 4 % interest rate. Removing the birch overstory already at 15 years was the least profitable alternative with 79 and 83 % net present values, respectively. The most profitable treatment with current technology, price, and cost structure appears to be to grow 500–800 birch ha^{-1} up to about age 40 years for *B. pendula* and 45–50 years for *B. pubescens*.

Keywords: admixture, Betula pendula, Betula pubescens, economics, growth, modeling, Picea abies, two-storied stands yield.

1 Introduction

The establishment of mixed stands of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and birch (*Betula pendula* Roth and *B. pubescens* Ehrh.) have become an attractive management objective in Finland in the 1990s (Seppänen, 1997). The consumption of birch in the pulp industry in 1997 was 11.8 million m^3 $year^{-1}$, 0.2 million m^3 $year^{-1}$ in sawmilling, and 1.3 million m^3 $year^{-1}$ in the plywood and veneer industry (Louna and Valkonen, 1995; Finnish Statistical Yearbook of Forestry, 1998). Spruce consumption was even greater, 10.3 million m^3 $year^{-1}$in the pulp industry, 13.6 million m^3 $year^{-1}$ in sawmilling, and 1.7 million m^3 $year^{-1}$ in the plywood and veneer industry in 1997 (Finnish Statistical Yearbook of Forestry, 1998). Both species have sold for good stumpage prices on the domestic market with birch logs selling in 1997 for an average of 43.9 € m^{-3} (Euros per cubic meter), birch pulpwood 15.6 € m^{-3}, spruce logs 33.6 € m^{-3}, and spruce pulpwood 21.7 € m^{-3} (Finnish Statistical Yearbook of Forestry, 1998).

Silver birch (*B. pendula*) grows rapidly in its youth and produces high quality timber and pulpwood in 50–60-year rotations on fertile mineral sites in Finland. However, it does not achieve the mean annual volume growth of Norway spruce or Scots pine (*Pinus sylvestris L.*) on equivalent sites. Volume production of white birch (*B. pubescens*) is about 75–80 % of that of *B. pendula* on a similar mineral soil site (Koivisto, 1959; Ilvessalo and Ilvessalo, 1975; Siipilehto, 1997). *B. pubescens* produces less quality timber per volume unit than *B. pendula* due to its lower technical quality (Verkasalo, 1997).

Unstratified mixed spruce and birch stands are common in Scandinavia. They can be managed for increased productivity and attractive economic results compared to pure stands (Frivold, 1982; Agestam, 1985; Mielikäinen, 1985; Valsta, 1988). But because of its rapid juvenile growth, birch very often forms a distinct upper story in a young spruce stand (Mielikäinen, 1985; Mielikäinen and Valkonen, 1995). Traditionally, birch and other hardwoods have been used as nurse crops for protection against late frosts and for firewood production in Scandinavia, Central Europe, and North America (Heikinheimo, 1941; Leikola and Pylkkö, 1969; Hannelius, 1978; Leikola and Rikala, 1983; Andersson, 1984; Heikurainen, 1985; Perala and Alm, 1990).

The negative effects of a birch overstory on spruce (growth suppression, increased mortality, and release stress) are relatively small, and a substantial increase in total volume production can be expected in two-storied spruce and birch stands compared to pure spruce stands in Scandinavia (Cajander, 1934; Eriksson, 1976; Bergan, 1987; Tham, 1988; Carlsson, 1990; Gnojek, 1992; Mård, 1993; Tham, 1994; Mielikäinen and Valkonen, 1995; Niemistö, 1995b; Mård, 1996; Mård, 1997a, b). Knowledge of the economic feasibility of the mixed stands is still poor, however. In addition to volume production, also wood dimensions, quality and prices, feasibility, technology, costs of silvicultural treatments, and economical preferences must be considered.

As the future development of roundwood prices is uncertain, a two species

stand has a higher expected present value when management decisions are adapted on prices (Lohmander, 1992). For a mixture of spruce and pine Carlsson (1995) reported 20–40 % higher expected net present values for a mixed stand, compared to pure stands of either species. Mixed stands may show greater stability against biological risks, too. For instance, in case of a pest damage or a decrease in growth rate, retention of the resistant species alone can provide a higher present value than a premature regeneration of the stand (Lohmander, 1990). These advantages are increased when the decision maker is risk averse, which is a common situation (cf. Arrow, 1971).

The most common method to initiate and manage a two-storied mixed stand of spruce and birch is to grow planted spruce under naturally emerged birch. The purpose of this study is to examine if it is economically profitable to allow a natural birch (*B. pendula* or *B. pubescens*) overstory to emerge in a young spruce plantation and to retain part or whole of it until its economic maturity. Alternatives to compare are thus

1. A pure spruce plantation where admixture species are systematically removed before having a notable effect on spruce growth and develoment;
2. Thinning of a naturally emerged birch overstory at an early age to form a nurse crop for protection against late frosts in a spruce plantation, and to remove it completely when frost protection is no longer required;
3. Continue growing the nurse crop up to its economic maturity, thinned or unthinned.

Because *B. pubescens* generally has a lower yield potential than *B. pendula*, separate calculations are required for both species in alternatives 2 and 3. Stand level issues will be addressed only. Factors that are operational at other levels of the decision making process, e.g. at property or landscape level optimization procedures, are outside the scope of this study. Admixtures may provide beneficial effects to landscapes, recreational activities, wildlife and game habitat, and biodiversity, but they also remain outside the scope of this study.

2 Material and Methods

The study was conducted using a stand projection system consisting of empirical models. Most models were already available, but a few new ones were constructed for the study.

2.1 Existing models

A.
An individual tree level model set for young two-storied spruce and birch stands in Southern Finland (Mielikäinen and Valkonen, 1995). The data set included 25 stands on fertile mineral soils. Stand parameters at the measurement for spruce

were as follows: $15 \leq T$ (age from seed) ≤ 47 years, $640 \leq N$ (density) $\leq 2\,950$ ha^{-1}, $2.7 \leq H_{dom}$ (dominant height) ≤ 11.7 m. The birches were larger, ($11.7 \leq H_{dom} \leq 23.8$ m), and more or less older ($17 \leq T \leq 76$ years) than the spruces.

B.
A model set describing the juvenile development of pure spruce plantations in Finland with individual tree distance independent growth models and size distribution models (Valkonen, 1997). The data were acquired from permanent sample plots in stands that were selected in terms of the systematic sampling grid of the 7th National Forest Inventory. A data set from temporary sample plots subjectively selected with the assistance of forest extension organizations was added. Stand age (T) ranged between 12–36 years, number of crop trees (N) 930–3 560 ha^{-1}, and dominant height (H_{dom}) 1.5–10.8 m in the 36 stands.

C.
A stand level growth and yield model set for pure middle-aged spruce plantations in Finland applicable from $H_{dom} > 10$ m up to $T < 100$ years (Vuokila and Väliaho, 1980).

D.
A logging cost and productivity model set for manual (chainsaw) and mechanized (harvester) cutting, and forwarder transportation methods (Rummukainen et al., 1995).

E.
Models to predict the proportion of spruces lost to mortality because of logging damage when removing an overstory with manual cutting and forwarder transportation methods (Frilander, 1985; Maukonen, 1987)

F.
Taper curve functions (Laasasenaho, 1982) including additional models for small trees (Snellman, 1986).

2.2 New models and their construction

G.
For the initialization of the birch populations, a diameter distribution model was estimated using the data set of the model A (Mielikäinen and Valkonen, 1995). The normality of the standwise diameter distributions was tested with the Shapiro-Wilk's test (Shapiro and Wilk, 1965). In 20 stands out of 25 the diameter distribution represented a normal distribution. Consequently, birch diameter distributions were generated using the normal distribution. The coefficient of variation in diameter was not correlated ($p > 0.05$) with mean diameter (D) or stand stocking (N) and the average coefficient of variation of diameter inside stands 0.239 was used to calculate variances.

H.

A model for predicting birch tree heights was estimated from the same data as model G, applying the method of Hökkä (1997) with modifications. The formulation was based on the form

$$\ln(h_{ij} - 1.3) = a - b d_{ij}^{-c} + e_{ij} \quad (1)$$

h_{ij} = height of tree i in stand j
d_{ij} = diameter of tree i in stand j
a, b, c = fixed parameters
e_{ij} = residual error

In order to facilitate the use of a mixed model with random parameters, the function was linearised by setting a fixed value to parameter c. It was searched by fitting the model with alternative values (c = 0.2, 0.3, 0.4…1.5) in both aggregate and standwise data. The value giving the smallest residual mean square was chosen (c = 0.3).

In addition to fixed parameters, random parameters u_{0j} and u_{1j} that accounted for the stand level variation in the parameters a and were added. The covariance between u_0 and u_1 could be omitted in the final model, because the correlation between u_0 and u_1 did not differ from zero ($p > 0.05$), when trivial correlation was eliminated using a centered diameter in the random part of the model:

$$Y_{ij} = a_0 + a_1 \ln(D_j) + b_1 X_{ij} + u_{0j} + u_{1j} X_{mij} + e_{ij} \quad (2)$$

Y_{ij} = $\ln(h_{ij}-1.3)$
h_{ij} = height of tree i in stand j, m
D_j = arithmetic mean breast height diameter in stand j, cm
X_{ij} = d_{ij}^{-c}
d_{ij} = breast height diameter of tree i in stand j, cm
c = fixed parameter (c = 0,3)
X_{mij} = $X_{ij} - \overline{X}$ (centered diameter), cm
$\overline{X}$ = average value of d_{ij}^{-c}:in data, cm
a_0, a_1, b_1 = fixed parameters
u_{0j}, u_{1j} = random stand level parameters
e_{ij} = residual error

Variances of the random parameters u_{0j}, u_{1j} and e_{ij} are denoted with σ^2_{u0}, σ^2_{u1} and σ^2_e, respectively. Model parameters (Table 1) were estimated with the Maximum Likelihood method.

I.

To define thinnings from below, a thinning proportion model for birch was constructed to determine which trees to remove from the diameter distribution. The removal percentages were set heuristically for 10 % diameter classes (Figure 1).

Table 1. Parameters of the birch height model H (equation 2).

Parameter	Estimate	Standard deviation
Fixed part		
a_0	3.5414	0.3485
a_1	0.2716	0.0969
b_1	-3.7201	0.4174
Random part		
σ^2_{u0}	0.0178	0.0060
σ^2_{u1}	3.3711	1.1728
σ^2_e	0.0143	0.0007

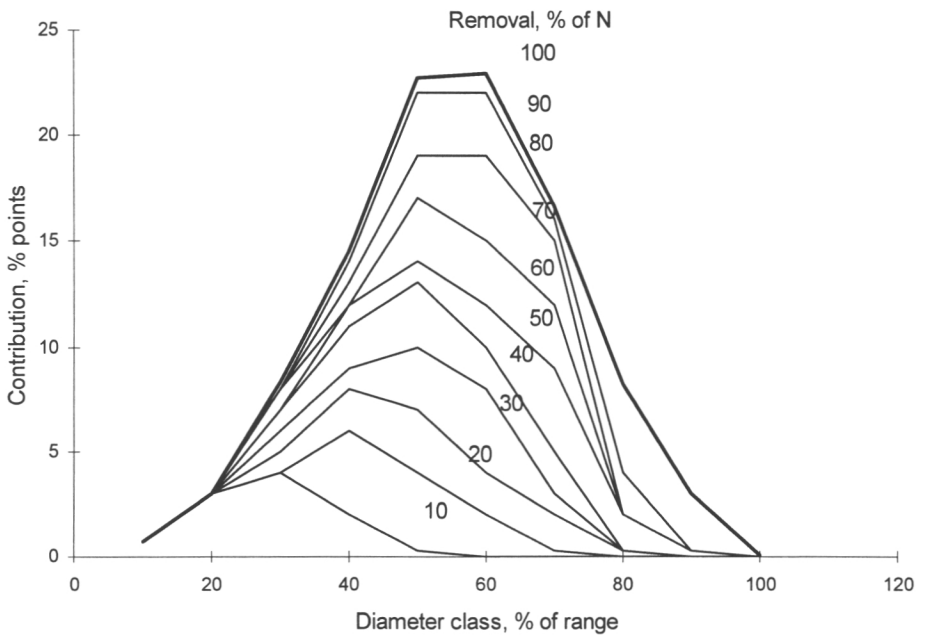


Figure 1. Contribution of each diameter class to total removal, percentage points of the number of stems before thinning (N). Initial N = 1 000 ha^{-1}. Relative diameter classes representing percent of range by 10 % steps.

2.3 Model and stand projection system validation

Extensive cross-testing procedures were performed in order to validate the concerted and sequential usage of the models shown in Figure 2. Only the test results considered most important will be reported here.

The exchange from one dominant height growth model to another can potentially result in an elementary error if the models have substantially different forms. The match between the dominant height curves produced by the spruce height growth

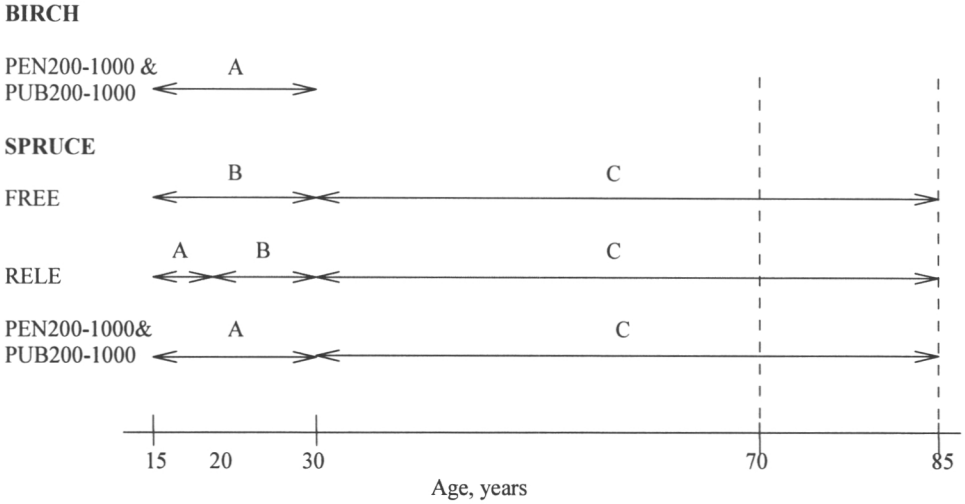


Figure 2. Model sequence in tree and stand growth projections.
Treatments: FREE = pure spruce, RELE = birch nurse crop until age 15, PEN200-1 000 = *B. pendula* overstory of 200–1 000 ha^{-1}, PUB200-1 000 = *B. pubescens* overstory of 200–1 000 ha^{-1}. Models: A = (Mielikäinen and Valkonen, 1995), B = (Valkonen, 1997), C = (Vuokila and Väliaho, 1980).

models (in A, B, C) was considered sufficient to facilitate parallel use for the purposes of this study (Figure 2). The effect of a slight form difference between the two-storied model A and the pure spruce model B was not notable, since the simulation period always covered the total range $3<H_{dom}<10–12$ m. All height development models seemed to match well to the model in set C in the exchange area (H_{dom} = 10–12 m). The difference between the H_{100} value estimated for pure spruce stands from the relationship between site type, H_{25}, and H_{100} in the two-storied model data (A) given in Valkonen (1997) was compared to the simulated H_{100} value at T = 30 years. The error was negligible (max. 0.37 % in H_{100}).

A further test was performed to address possible differences among models in the growth of individual spruce trees. The models consisted of a dominant height development model and a multiplier model to describe differences among trees of different sizes. The stand density component from the spruce height growth model in the two-storied stands (model set A) was inserted into the height growth model of pure spruce stands (B), and the resulting model with the following form was tested in the two-storied spruce data (A):

(3)

$$\ln(i_{h5}) = \ln\left(\left(H_{dom1}\left(\frac{1-e^{-f_2 T_2}}{1-e^{-f_2 T_1}}\right)^{(1-f_3)^{-1}} - H_{dom1}\right) * \left(h/H_{dom}\right)^{\left(a_1 H_{dom} + a_2 (h/H_{dom})^{a_3}\right)}\right) + b_1 G_{birch}^2 N_{birch} + e$$

where

i_{h5} = tree height increment in 5 years, m
H_{dom1} = stand dominant height at time T_1
T_1 = stand age at the beginning of the calculation period, years from seed
T_2 = T_1+5 years
h = tree height, m
G_{birch} = stand basal area of the birch overstory, $m^2 ha^{-1}$
N_{birch} = stand stem number of the birch overstory, ha^{-1}
f_2, f_3 = coefficients
a_1, a_2, b_1 = coefficients
e = residual error

In addition to examining average residuals and their standard deviations in systematic classes across the range of all independent variables, the following statistics were used in model evaluation:

$$b = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)/n \qquad \text{systematic error (4)}$$

$$b_s = \sum_{i=1}^{n} ((y_i - \hat{y}_i)/\hat{y}_i)/n \qquad \text{relative systematic error (5)}$$

$$RMSE = \left(\sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2 / n\right)^{0,5} \qquad \text{root mean square error (6)}$$

$$RMSE_r = \left(\sum_{i=1}^{n} ((y_i - \hat{y}_i)/\hat{y}_i)^2 / n\right)^{0,5} \qquad \text{relative RMSE (7)}$$

n = number of observations
yi = observed value
$\hat{y}_i$ = predicted value

The model (3) gave unbiased results in the test data for single tree growth (b = -0.036 m, b_s = 1.06 %, RMSE = 0.578, $RMSE_r$ = 0.37). A slight overestimation occurred for small dominant heights and an underestimation for large heights, as expected due to the differences in the dominant height curves (Figure 3). Model parameters are given in the original publications (Mielikäinen and Valkonen, 1995; Valkonen, 1997).

Spruce growth models in set A contained no expressions for the release effect, i.e. the influence of past suppression on current growth, due to limited data. The data set in A included observations from three stands of spruce height growth for the five-year period immediately after release. These data were used to check which one of the height growth models (A or B) would be appropriate for predicting spruce height growth after release.

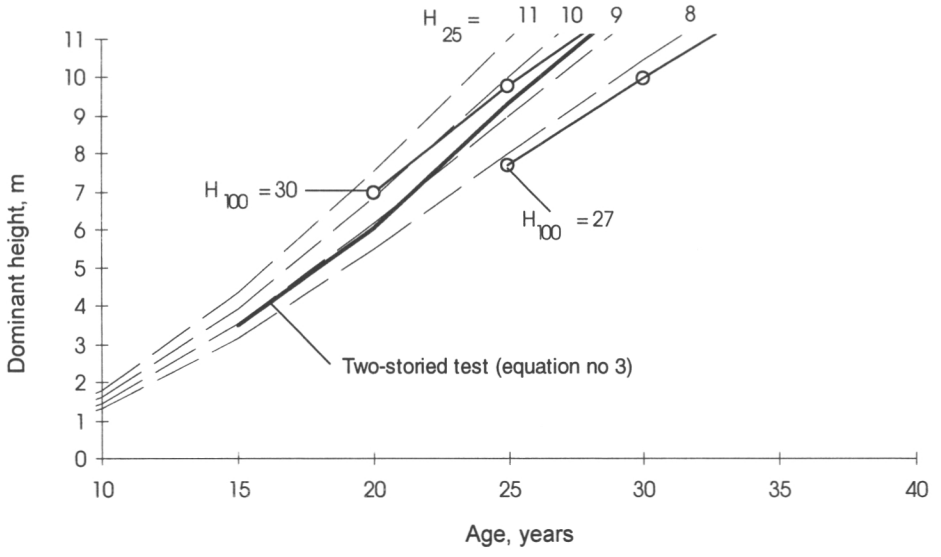


Figure 3. Match between the dominant height curves and the height growth models. H_{100} (values 27–30) = Set C, (Vuokila and Väliaho, 1980), dominant height development model. H_{25} (values 8–11) = set B, (Valkonen, 1997), dominant height development model. Two-storied model set A (Mielikäinen and Valkonen, 1995), single tree growth model G_{birch} = 0 m^2 ha^{-1}.

The pure spruce height growth model from set B gave satisfactory estimates in two of the three stands with observations covering a full five-year period (b = -0.062 m, b_s = 6.8%, RMSE = 0.58 m, $RMSE_r$ = 0.37) but strongly biased estimates in the third (b = 1.49 m, b_s = 103 %, RMSE = 1.57 m, $RMSE_r$ = 1.17) which was in the process of extremely rapid growth acceleration. The height growth model for two-storied stands in A had been tested using the same data and showed similar results but produced a better match for individual tree observations (b = -0.18 m, bs = -8.03 %, RMSE = 0.56 m, $RMSE_r$ = 0.29). Thus it was considered the better model for the first five-year period after release. There were no data for a test on the following five-year periods.

Additionally, there were observations of a 2–4 year period after release from 3 stands in the data acquired for model set A. Based on this data and the results of the test, it seemed appropriate to assume that the release effect had faded in 5 years and released spruces grew as fast as free grown spruces of the same height after that. There were no data available to perform a similar validation test for the diameter increment models.

2.4 Stand projection and treatments

The starting point of the simulations was chosen to represent the time when the decision to remove the shelterwood, or to continue growing a two-storied stand is usually made (H = about 2 m, T = 15 years). The simulated treatments were:

1. Free grown, pure spruce plantation (FREE). Admixture species were systematically removed before having a notable effect on spruce, at ages 5 and 15 years.
2. Released spruce (RELE). Birch of equal age thinned to form an overstory of 1 000 stems ha^{-1} at 5 years and removed at 15 years of age.
3. Spruce with a birch overstory. Birch of equal age thinned to form an overstory of 1 000 stems ha^{-1} at 5 years and thinned again to 100, 200, 300...1 000 stems ha^{-1} at 15 and grown to 30 years of age. Separate sets of simulations were done for *B. pendula* and *B. pubescens*. Treatment labels PEN100, PEN200...PEN1000 and PUB200...PUB1000 indicate species and stocking. The simulation results of treatments with odd stocking numbers are not presented here for brevity.

The sequential use of the growth model sets is shown in Figure 2. Other models were applied in the following way:

- Height distribution model of model set B to generate heights, and diameter models of model sets A and B to generate diameters for the spruce tree list at age 15 (all treatments).
- Volume and assortment functions of model set C for spruce between 30 and 85 years of age (all treatments)
- Model set D to calculate logging and precommercial treatment costs at age 15, 30, and between 30 and 85 years when thinned or harvested (all treatments).
- Models E to remove damaged trees from spruce tree list when birches were removed (RELE) or thinned (PEN, PUB) at age 15 and/or 30.
- Models F to calculate tree and assortment (log, pulpwood) volumes at 5-year intervals when tree models were applied (all treatments).
- Models G and H to generate the birch tree list at age 15 (RELE, PEN, PUB).
- Model I to select birch trees to be removed in thinnings at 15 years of age (PEN, PUB).

Site index was not used in the spruce increment models for two-storied stands (A) because it did not have significant coefficients. All calculations were performed for the average site in the two storied stands data. Ten sites represented the Myrtillus type and 15 the more fertile Oxalis-Myrtillus type in the Cajander (1909) site type system. The average site index value for young pure spruce stands calculated with the dominant height model of model set B was H_{25} = 9.2 m, equivalent to H_{100} = 29.5 m calculated with the spruce dominant height model of set C. The average values for birch site indices (H_{50} = 23.6 m for *B. pendula* and H_{50} = 19.2 m for *B. pubescens*) were estimated with curves from Mielikäinen (1985) as applied in construction of the models in set A (Mielikäinen and Valkonen, 1995).

Spruce height distributions were generated with a regression model predicting the Weibull distribution coefficients from the number of stems (N) and mean height (H) (B). Respective diameters were predicted with a regression model (set A) and a mixed linear model (B). Stocking at 15 years was set at the average value (N = 1 900 stems ha^{-1}) of the pure spruce stands in the model B data set for all treatments.

That is a good representation for the expected average stocking for spruce plantations in Finland, after the initial mortality is accounted for. According to Pukkala (1981), a birch overstory of equal age does not increase spruce mortality very much.

The mean height of a free grown spruce stand at age 15 is 2.35 m (set B). It was assumed that the overstory had not affected the growth of spruce by that time. An examination in the young spruce stands (T <20) in the two-storied stand data (A) indicated that the mean height difference between a free grown stand and a stand with an overstory was equal to about a half year's growth. To avoid an overestimation of the understory height, the average height (H = 2.09 m) of the spruce in the overstory treatments was set to the equivalent of one year height growth less than in the free grown treatment (H = 2.35 m).

Birch diameter distributions for N = 1 000 stems ha^{-1} were generated from a normal distribution with given average diameter (D) (model G). Tree heights were predicted with model H. It was assumed that a precommercial treatment had been carried out at age 5 years either to remove the naturally emerged birch completely (free grown treatment), or to create a nurse crop of N = 1 000 ha^{-1}, considered a minimum stocking for a nurse crop for effective frost protection (see Kärkkäinen, 1984). The average diameter (D) for birch was set to represent the average values for that stand age and spruce height in the model A data by species. Thus for *B. pendula* D_g = 11.0 cm, *B. pubescens* D_g = 8.8 cm. The overstory was either removed completely (RELE), thinned (PEN100-900, PUB100-900), or left untouched (PEN1000, PUB1000). In thinning, the proportion of birches to remove within diameter classes was calculated with the thinning model (model I, Figure 1) and the trees were chosen randomly. Removal of birch sprouts was considered necessary in the FREE treatment at T = 15 (Salminen et al., 1997).

Table 2. Initial stand parameters at the beginning of the stand projection with single tree models, prior to thinning or removal of birch.

Treatment and species	T years	N ha^{-1}	H_{dom} m	H_g m	D_g cm	G m^2ha^{-1}	V m^3ha^{-1}
Birch, PEN	15	1 000	13.3	11.8	11.0	8.3	48.1
Birch, PUB	15	1 000	11.3	10.0	8.8	5.3	26.8
Spruce, FREE	15	1 900	3.6	2.9	3.7	1.3	0.1
Spruce, PEN, PUB and RELE	15	1 900	3.1	2.5	3.2	0.9	0.1

T = Stand age, years from seed
N = Number of stems, ha^{-1}
H_{dom} = Dominant height (mean height of 100 thickest trees ha^{-1}), m
H_g = Mean height, weighted by tree cross section areas at breast height, m
D_g = Mean diameter at breast height, weighted by tree cross section areas, m
G = Basal area at breast height, $m^2 ha^{-1}$
V = Total trunk volume, $m^3 ha^{-1}$
PEN = Betula pendula treatments N = 200–1 000 ha^{-1} after thinning
PUB = Betula pubescens treatments N = 200–1 000 ha^{-1} after thinning
FREE = Free grown spruce with no birch overstory at any point in time

After initialization and thinnings, birch and spruce tree growth were projected for the next three 5-year periods up to T = 30 with single tree models A and B (see Figure 2). Increment estimates for the first 5-year period in the RELE treatment were reduced by 20 % to account for the release effect as indicated by the results in Mielikäinen and Valkonen (1995). The spruce understory had shown no effect on birch growth in the model A data and was not considered here either.

The valid application ranges of the single tree growth models in set A and B were reached at T = 30. There was no model available to continue simulating the two-storied treatments beyond that point. All birch overstories were removed and the simulations were continued as for pure spruce stands with the stand level model set C. A 20 % reduction in height and diameter growth was applied for the first period to account for the release effect as indicated by the results of Mielikäinen and Valkonen (1995).

To compare the treatments within equal site productivity, overstory influences on spruce growth were treated as delays in development during the application of the height growth models in B and C. Projected height curves were adjusted with artificial intercepts ≤0 years to compensate for the delay, and real age was replaced by a virtual age that a free grown spruce stand with equal H_{dom} would have had according to models B and C. Results shown are referred to as real age.

The development of the spruce stands was simulated for two alternative rotations T = 70 and T = 85 years, covering the range of economically attractive rotations in the region (Valsta, 1997). Mutually equal rotations were used for all treatments. The thinning regime maximizing the economic result for spruce stands on *Myrtillus* Type sites in southeastern Finland based on a 3 % interest rate (Harvennushakkuiden..., 1992). One to three thinnings were applied, depending on rotation and treatment. The overstory treatments were generally thinned one time less than the FREE and RELE treatments, due to their smaller densities that resulted from logging damages.

2.5 Logging and postrelease injuries

Spruce mortality due to logging injuries during overstory thinning or removal (RELE, PEN, PUB) was estimated with empirical models (E). The model by Frilander (1985) was applied for volumes <150 m^3 ha^{-1}, and the model by Maukonen (1987) was applied for larger volumes. Spruce mortality was estimated as a function of volume removed per area, understory stocking, terrain class (constant = 1), and the length of strip roads per area (constant = 350 m ha^{-1}). When no terrain transportation of wood was done, its share of damages was removed from the model estimates by coefficients (0.70 or by 0.72) as indicated in the research papers. Mård (1997b) concluded that the effect of postrelease stress and ensuing injuries on future yield of spruce released from a birch overstory are not likely to be large enough to affect future production, and were not considered in this study.

2.6 Yield, logging costs, and net returns

Taper curve functions (F) of Laasasenaho (1982) and Snellman (1986) were used to calculate total, log, and pulpwood volumes for individual trees. The minimum diameter for birch pulpwood was 8 cm and the minimum length was 3 m. A minimum log length of 3.1 m and a minimum top diameter of 20 cm was used for birch instead of the 18 cm used in practice to compensate for cull. Standwise spruce volume variables were calculated with models C assuming a minimum log top diameter of 16–20 cm and a minimum length of 3.7 m. No explicit dimension specifications were given for spruce pulpwood in the publication of Vuokila and Väliaho (1980) but a minimum top diameter of 7–8 cm and minimum length of 2 m was assumed since they have been the norm for decades. Volumes harvested are shown in Table 3.

Economic analysis included net returns from roundwood sales, and costs from precommercial treatments. All other costs (planting, weeding, administration, property tax etc.) were assumed to be equal for all treatments. Net returns were calculated as

$$NR = \sum_{i=1}^{n} (V_i * P_i) - C \qquad (8)$$

where

NR = Net returns from a single harvest
V_i = Extracted volume of product i, m^3
P_i = Price of product i at roadside, € m^{-3}
C = Total logging cost of operation, €

Average 1996 roadside prices for private forests in Finland were used (Finnish Statistical Yearbook of Forestry, 1998): birch logs 43.4 € m^{-3}, spruce logs 37.7 € m^{-3}, birch pulpwood 27.6 € m^{-3}, spruce pulpwood 30.1 € m^{-3}. These prices corresponded to the average price level during the 1985–1996 business cycle. Decreasing importance of domestic birch as pulpwood raw material has been predicted in Finland due to increased competition with imported birch and other species with better fiber properties (Hänninen, 1998; Ranua, 1999). This kind of development may affect the price ratio between spruce and birch. Alternative calculations with 25 % and 50 % reduction in birch prices were performed in order to estimate their effects on the profitability of the teatment alternatives.

Logging costs were calculated with the productivity and cost models (D) by Rummukainen et al. (1995). Costs for cutting, terrain transportation within the stand, and administrative overheads were included in the model estimates for logical logging systems according to the Nordic cut to length system.

A full logging operation was simulated if the merchantable volume removed was >40 m^3 ha^{-1} and D_g >10 cm. Otherwise, trees were just felled. Fully mechanized (one grip harvester) logging operations were used for spruce thinnings and clearcuts. In overstory treatments, labor intensive methods (chainsaw cutting, scaling, and bunching by professional loggers) were applied. They are currently preferred in such overstory removals for greater flexibility and less damage.

Table 3. Key variables controlling yield and returns of the treatments.

Treatment program	N_{spruce} after emoval of birch, ha^{-1} *	Volume production spruce, $m^3\ ha^{-1}$	Log proportion spruce, %	Volume production birch, $m^3\ ha^{-1}$	Log proportion birch, %
B. pendula, Rotation 70 years					
FREE	1 900	552	74	0	0
RELE	1 705	517	76	0	0
PEN200	1 428	491	73	71	50
PEN400	1 352	480	74	111	21
PEN600	1 319	471	74	140	7
PEN 800	1 375	464	73	161	3
PEN1000	1 402	459	72	173	1
B. pendula, Rotation 85 years					
FREE	1 900	666	78	0	0
RELE	1 705	636	81	0	0
PEN200	1 428	601	79	71	50
PEN400	1 352	595	80	111	21
PEN600	1 319	586	80	140	7
PEN800	1 375	580	79	161	3
PEN1000	1 402	577	79	173	1
B. Pubescens, Rotation 70 years					
FREE	1 900	552	74	0	0
RELE	1 765	517	76	0	0
PUB200	1 518	492	73	54	42
PUB400	1 489	488	73	68	5
PUB600	1 476	483	73	80	0
PUB800	1 491	480	73	88	0
PUB1000	1 474	483	72	91	0
B. pubescens, Rotation 85 years					
FREE	1 900	666	78	0	0
RELE	1 765	639	80	0	0
PUB200	1 518	603	79	54	42
PUB400	1 489	598	79	68	5
PUB600	1 476	594	79	80	0
PUB800	1 491	591	79	88	0
PUB1000	1 474	594	78	91	0

*Initial spruce stocking 1 900 ha^{-1}, reduced through damages in birch thinning and removal.

Time expenditure models for the first thinning were applied in all labor intensive cuttings to compensate for the additional time expenditure of avoiding injury to the understory. Parameters used: scaling at roadside, 3 m pulpwood bunched in 10 meter zone, no snow. The cost of one working hour was 9.8 € h^{-1} + 68 % subsidiary costs (SAK Puu- ja erityisalojen liitto, 1998).

Appropriate one-grip harvester (weight 10 t) time expenditure models were used for estimating costs of thinnings and clearcuts of the spruce stands. They also included estimates for time and cost expenditures for interruptions and transfers. The cost was 59.4 € h^{-1} (Rummukainen et al., 1995).

Time expenditure models for off-road haulage with a 10-tonne self-loading forwarder were used, with the following parameters: transportation distance 100 m, distance between strip roads 20 m in clearcuts (otherwise 30 m), terrain class 1, no snow, interruptions and transfers included. The cost of one hour was set at 49.3 € h^{-1} (Rummukainen et al., 1995).

Time expenditure for administrative measures (purchase, overhead, operational planning, supervision, and scaling) was assumed to be 6 hours in labor intensive and 3 hours in mechanized cuttings for one operation with a cost of 10.1 € h^{-1} (Rummukainen and Sirén, personal communication).

The cost of the first precommercial thinning with a clearing saw at age 5 was 50.5 € ha^{-1} in the overstory treatments (RELE, PEN and PUB), assuming a removal of N = 2 000 ha^{-1}, D_{stump} = 2 cm (Salminen et al., 1997). In the FREE treatment all birches were removed (N = 3 000 ha^{-1}, D_{stump} = 3 cm) and the cost was 58.9 € ha^{-1}. The next precommercial overstory treatment was performed with a clearing saw if the D_{stump} of the removed trees was less than 7 cm, in this case the curves of Salminen et al. (1997) were applied resulting in a cost of 84.2 € ha^{-1}. With a larger removed tree size the simulated treatment was applied with a chainsaw; there was no cost model available for this case. The time expenditure for felling was calculated using the last wage contracts in force in Finland (Metsä- ja uittoalan työehtosopimus, 1990), which had been the principal data source for cost estimates in the construction of model D (Rummukainen et al., 1995). The proportion of the time expenditure in felling of a complete cutting ranged from 41.1 % in the largest tree size class to 45.6 % in the smallest tree size class of the simulation data. An average percentage of 43.3 was applied. Next, the cost of a full operation was calculated with model D and multiplied by 43.3 %. A cost of 16.8 € ha^{-1} was added in precommercial treatments for administrative work, assuming 1 h expended per ha. All costs are shown in Table 4.

The simulated alternatives were compared in terms of net present value for the spruce rotation with free grown (FREE), release at 15 years (RELE), or variable stocking overstory retention up to 30 years of age, separately for both birch species (PEN, PUB). An additional analysis was performed to estimate optimal birch rotations, which were beyond the validity range of the juvenile spruce models. The interest rate was set at 4 % in all calculations, and nondiscounted values are also shown when analyzing factor contributions. The effect of subsequent rotations was not included because the treatments were compared in terms of mutually equal rotations.

Table 4a. Costs and returns by treatments, nondiscounted values. Spruce with *Betula pendula*.

Treatment progam	Birch precom thin/rem timing years	Birch precom thin/rem costs € ha^{-1}	Birch harvest returns € ha^{-1}	Birch harvest costs € ha^{-1}	Spruce comm thin timing years	Spruce comm thin returns € ha^{-1}	Spruce comm thin costs € ha^{-1}	Spruce harvest returns € ha^{-1}	Spruce harvest costs € ha^{-1}	Total* net returns € ha^{-1}
Rotation 70										
FREE	5,15	-151	0	0	40,55	5 193	-1 955	14 145	-2 090	15 142
RELE	5,15	-361	0	0	40,60	5 082	-1 836	13 089	-1 957	14 017
PEN200	5,15	-287	2 364	-952	55	2 880	-1 022	14 122	-2 153	14 952
PEN400	5,15	-228	3 427	-1 446	55	2 816	-990	13 994	-2 112	15 461
PEN600	5,15	-168	4 198	-1 830	55	2 762	-974	13 726	-2 077	15 637
PEN800	5,15	-114	4 775	-2 119	55	2 711	-987	13 482	-2 051	15 697
PEN1000	5	-67	5 109	- 2314	55	2 689	-993	13 337	-2 034	15 726
Rotation 85										
FREE	5,15	-151	0	0	40,55,75	8 546	-2 732	14 987	-2 123	18 527
RELE	5,15	-361	0	0	40,60	5 082	-1 836	17 528	-2 442	17 971
PEN200	5,15	-287	2 364	-952	55,70	6 004	-1 837	15 255	-2 206	18 341
PEN400	5,15	-228	3 427	-1 446	55,75	6 123	-1 814	14 959	-2 169	18 852
PEN600	5,15	-168	4 198	-1 830	55,75	6 053	-1 792	14 721	-2 139	19 119
PEN800	5,15	-114	4 775	-2 119	55,75	6 000	-1 811	14 527	-2 120	19 137
PEN1000	5	-67	5 109	-2 314	55,75	6 006	-1 824	14 413	-2 106	19 206

* Total excluding planting and weeding, 1 008 € ha^{-1} for all treatments.
Precom thin/rem = Precommercial thinning or removal; Comm thin = commercial thinning
Conversion: 1 € = 5.948 FIM

Table 4b. Costs and returns by treatments, nondiscounted values. Spruce with *Betula pubescens*.

Treatment progam	Birch precom thin/rem timing years	Birch precom thin/rem costs € ha^{-1}	Birch harvest returns € ha^{-1}	Birch harvest costs € ha^{-1}	Spruce comm thin timing years	Spruce comm thin returns € ha^{-1}	Spruce comm thin costs € ha^{-1}	Spruce harvest returns € ha^{-1}	Spruce harvest costs € ha^{-1}	Total* net returns € ha^{-1}
Rotation 70										
FREE	5,15	-151	0	0	40,55	5 193	-1 955	14 145	-2 090	15 142
RELE	5,15	-361	0	0	40,60	5 082	-1 836	13 089	-1 957	14 017
PUB200	5,15	-253	1 772	-783	50	2 507	-1 013	14 699	-2 153	14 776
PUB400	5,15	-202	2 038	-1 014	50	2 476	-999	14 575	-2 112	14 762
PUB600	5,15	-162	2 354	-1 206	50	2 446	-992	14 455	-2 077	14 818
PUB800	5,15	-120	2 591	-1 337	50	2 420	-994	14 367	-2 051	14 876
PUB1000	5	-67	2 670	-1 420	55	2 822	-1 031	14 008	-2 034	14 948
Rotation 85										
FREE	5,15	-151	0	0	40,55,75	8 546	-2 732	14 987	-2 123	18 527
RELE	5,15	-361	0	0	40,60	5 101	-1 866	17 576	-2 451	18 061
PUB200	5,15	-253	1 772	-783	50,70	5 728	-1 841	15 633	-2 246	17 983
PUB400	5,15	-202	2 038	-1 014	50,70	5 678	-1 822	15 494	-2 231	17 943
PUB600	5,15	-162	2 354	-1 206	50,70	5 635	-1 811	15 390	-2 218	17 982
PUB800	5,15	-120	2 591	-1 337	50,70	5 608	-1 815	15 320	-2 210	18 037
PUB1000	5	-67	2 670	-1 420	55,70	5 938	-1 850	15 032	-2 183	18 120

* Total excluding planting and weeding, 1 008 € ha^{-1} for all treatments.
Precom thin/rem = Precommercial thinning or removal; Comm thin = commercial thinning
Conversion: 1 € = 5.948 FIM

3 Results

In terms of net present value, all simulated treatments with overstories (PEN and PUB) were more profitable than the free grown pure spruce treatment (FREE) (Figure 4a, 4b). At the maximum, PEN1000 yielded 151 % and PUB1000 113 % of the discounted net returns of FREE. When using nondiscounted values (Figures 4c, 4d), the treatments with *B. pendula* overstories (PEN) showed greater net returns than FREE, but with *B. pubescens* (PUB) they were smaller than those of FREE. The released treatment (RELE) was the least profitable alternative with all calculation parameters, except for nondiscounted values with an 85-year rotation (Table 4b). Rotation length had virtually no effect on the differences among treatments, and results will be introduced in detail for the 70-year rotation only.

Several factors contributed to the results. Growing birch to 30 years of age resulted in a 61–93 m^3 ha^{-1} (9.1–16.8 %) yield loss to spruce (Table 3), and loss of trees (382–581 ha^{-1} out of 1900 stems ha^{-1}) due to felling and off-road transport damages. Additionally, there was one thinning less in the spruce stand, and the first thinning was delayed 10–15 years. The additional yield from the birch overstory (54–173 m^3 ha^{-1}) compensated or greatly exceeded the loss in spruce volume. The *B. pubescens* treatment with the lowest stocking PUB200 treatment was the only exception with a 6–9 m^3 ha^{-1} (1.1–1.4%) loss in total yield (Table 3). To grow 1 000 ha^{-1} birches up to 15 years of age and then release (RELE) in a precommercial operation resulted in a 27–30 m^3 ha^{-1} (4.1–6.3 %) spruce yield loss which was not compensated because the birch overstory yielded no merchantable wood.

The proportion of additional net returns from growing a birch overstory against the pure spruce stand varied between 7–16 % for PEN and 5–8 % for PUB treatments in nondiscounted values. Occurring early at T = 30 years, they contributed much more substantially to net present values with 4 % interest rate, adding in 28–51 % (PEN) and 20–32 % (PUB).

The average net unit price in sales was much higher for spruce (27.7–28.8 € m^{-3}) than for birch (13.8–19.8 € m^{-3}). Spruce had greater unit prices because of larger sawlog proportion, higher pulpwood prices, and lower extraction costs, which varied between 6.4–7.4 € m^{-3} for spruce and 13.1–15.6 € m^{-3} for birch. High extraction costs for birch resulted from labor intensive methods, smaller volume removal, and smaller tree size.

Costs for precommercial treatments at T = 15 years in birch increased with increasing removal percentage. The difference between the least (zero for PEN1000, PUB1000) and most expensive alternatives (361 € ha^{-1} for PEN200, PUB200) was significant, considering that the costs occurred early in the rotation and contributed to a lower present value.

The results in Tables 3 and 4, and Figure 4 were calculated with the current price structure in Finland. To appraise the potential effect of price changes, the calculations were repeated assuming a 25 % decrease in birch prices, keeping all other parameters constant. In that case, the PEN treatments with more than 400 birches ha^{-1} retained their advantage over both FREE and RELE treatments in net

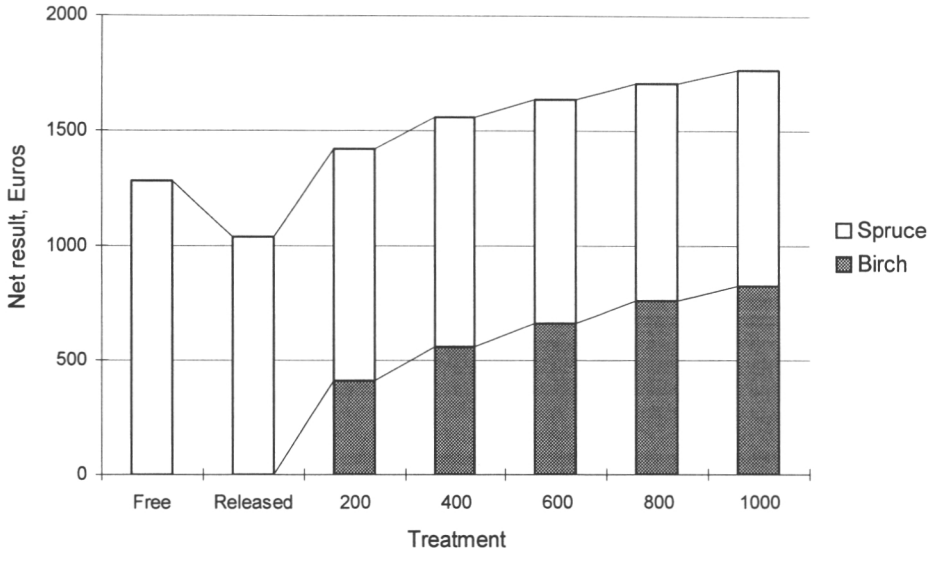


Figure 4a. Net present value of the PEN treatments. Interest rate 4 %, discounted to year 1. Share of birch of net returns shown separately. Rotation 70 years.

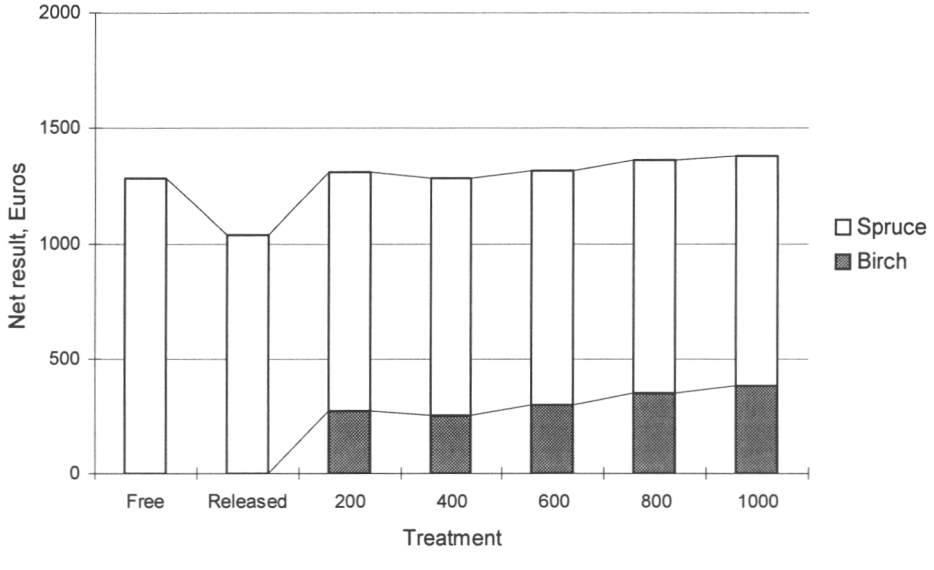


Figure 4b. Net present value of the PUB treatments. Interest rate 4 %, discounted to year 1. Share of birch of net returns shown separately. Rotation 70 years.

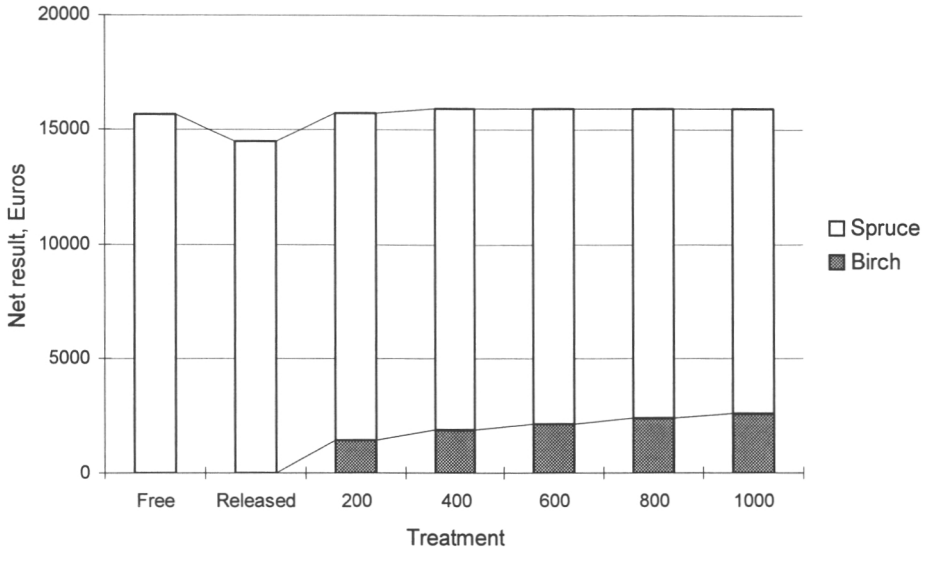


Figure 4c. Net present value of the PEN treatments. Interest rate 0 %. Share of birch of net returns shown separately. Rotation 70 years.

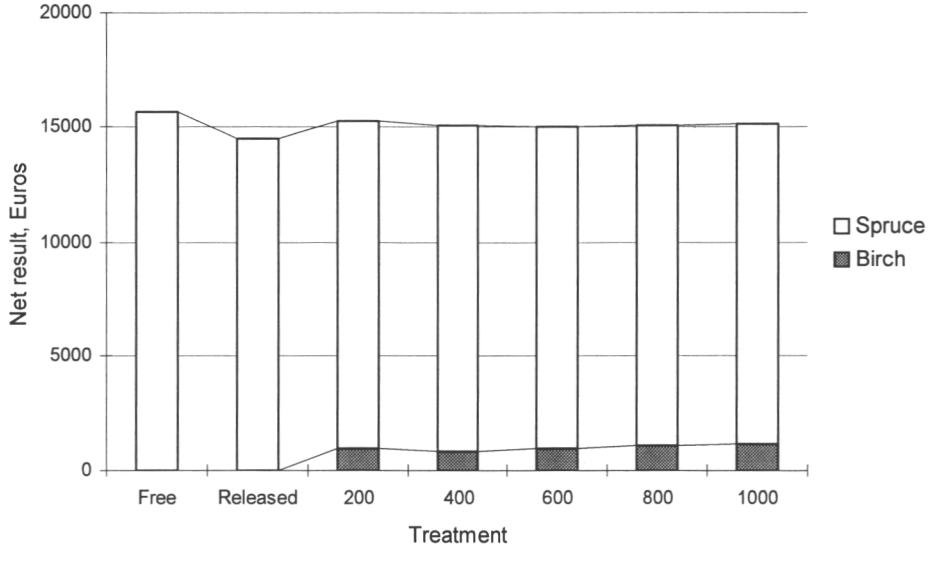


Figure 4d. Net present value of the PUB treatments Interest rate 0 %. Share of birch of net returns shown separately. Rotation 70 years.

present values. The PUB treatments turned out less profitable than FREE but remained more profitable than the RELE treatment. In nondiscounted values the PUB treatments were generally lower than those of FREE and RELE treatments, being close to the RELE with a 70 year rotation but lower with an 85 year rotation. A 50 % price reduction made the treatment regimes with birch overstories less profitable than the FREE and RELE in both discounted and nondiscounted values, except with *B. pendula* where the PEN treatments were about equal to RELE in discounted values.

The variation in tree quality was not studied because quality parameters had not been measured in the two-storied stand data. Sawlog volume estimates were based on tree dimensions only. However, initial densities well below the usual ones after planting (1 600–2 000) tend to result in greater crown length, and increased number and thickness of branches in birch (Niemistö, 1995a) and reduced sawlog volumes. The potential effect of reduced quality was estimated using the worst scenario option: the calculations were repeated setting the birch sawlog volume to zero and adding its share to pulpwood volumes.

When only pulpwood was produced by birch, the PEN and PUB treatments lost some of their profitability. The reduction was greatest in the lowest overstory stocking levels where the sawlog proportion had been greatest (Table 3). However, all PEN and PUB treatments remained well above the RELE treatment in net present value. All PEN and PUB treatments with N_{birch} >300–400 ha^{-1} retained their advantage over the FREE treatment, with smaller stockings ending up slightly below. In nondiscounted values, the PEN treatments remained level with or above the FREE treatment except for those with N_{birch} <300–400 ha^{-1}, and all PUB treatments remained level with or below the FREE treatment.

The simulation period of the two-storied stages had to be cut short at the maximum valid variable values of the spruce growth models A and B (H_{dom} <12 m). Limiting the birch growing period to 30 years certainly resulted in the underestimation of the birch production potential. A calculation extending the birch retention up to 60 years was performed ignoring the overstory effects on spruce. This was well within the validity range of the birch models (A).

Using a 4 % value increment percentage as a treshold value for harvesting the birch stand, the simulation results indicated that the birch overstory should be grown up to age 40–45 years for PEN and 50–55 years for PUB treatments. However, the probable increase in growth reduction and logging damages to spruce with increasing overstory density and tree size should also be taken into account in practice. Their potential effect on the value growth of the spruce stand was assessed from the differences up to 30 years, adding a safety margin of -25 to -50 % to the estimated effect. Their influence on the value increment might be about 0.5–1.0 percentage points per year. Consequently, birch retention should be shortened to 35–40 years for *Betula pendula* and 42–47 years for *Betula pubescens*.

4 Discussion

The results indicate that growing a naturally emerged birch overstory in a spruce plantation up to commercial volume, and sawlog percentage is profitable in Finland with current economic and technical conditions. However, there are a few major uncertainty elements that deserve further attention when evaluating the applicability of the results.

There were no empirical data available to validate the spruce diameter increment model for post-release increment projection. A heuristic correction factor was applied, based on literature and on observations about the release effect on height increment in the data. The potential effect of errors due to this in the final results is relatively small. Differences in the initial basal area vanished very soon as the basal areas between treatments converged in subsequent simulation steps with the middle-aged stands model (Vuokila and Väliaho, 1980).

High demand for birch veneer logs and high birch prices in general are currently a major advantage for the birch overstory method in Finland. No relevant scenarios on future demand were available. If the market for birch logs ceased to exist and the current pulpwood price was paid for sawtimber dimensions, most of the simulated overstory alternatives would still retain their advantage over the pure spruce alternatives.

The greatest source of uncertainty is probably related to logging technology, damages, and costs. Much more expensive labor-intensive methods were applied in the simulations instead of the currently predominant harvester-based logging systems. The applicability of mechanized systems for overstory thinnings and removals is not well known, but high damage rates are generally predicted. However, a reduction in costs could be expected, should a harvester-based logging system become applicable for two-storied stands.

Logging damage percentages were estimated with empirical models. The data of the damage percentage model (Maukonen, 1987) originated from stands with slightly smaller spruces than in the simulations. Thesslund (1976) reported comparable mortality figures (288 ha^{-1}, 27.4 %) in a study on birch overstory removal operation from a spruce stand with H_{dom} = 5.5–12 m with labor intensive methods that involved winching instead of modern loading devices. Extreme damages far exceeding those of the model estimates are possible under unfavorable situations. This could become a serious threat to wide application of stratified stand management (Kärkkäinen, 1984). A probable increase in damages to spruce understories from longer and wider birch crowns in the lowest density simulation alternatives could not be taken into account in this study. Fear of high extraction costs and liability for damages may unnecessarily restrict the willingness of companies to buy, extract, and pay for the overstory birch wood.

Increased branchiness, which was not accounted for in the simulations, would probably reduce the sawlog percentage at the lowest stocking levels significantly (Niemistö, 1998). Therefore, the simulated sawlog or veneer log volume percentages (65–85 %) for birch at these densities are probably too high.

Considering the favorable effect of a lengthened birch growing time, and wood quality criteria, compared to the original simulation results, it seems that the most profitable treatment with current technology, price, and cost structure would be to grow 500–800 birch stems ha^{-1} up to about 40 years of age for *B. pendula* and 45–50 years for *B. pubescens*. This is compatible with current guidelines that indicate 45–50 year rotations for pure *B. pendula* stands on similar sites in terms of net present value with a 4 % discount rate (Valsta, 1997). Somewhat longer rotations usually apply for *B. pubescens*. In practice, it may be necessary to remove the birch overstory somewhat prematurely if the spruce tops begin to reach into birch canopies where they are likely to sustain substantial mechanical damage (Fries, 1974).

Tham (1988) found that 800 birches ha^{-1} gave the greatest total volume production in a two-storied birch and spruce stand. Carlsson (1990) studied the optimal birch admixture in two-storied stands of Norway spruce and silver birch based on the growth functions by Tham (1988) for Sweden. The results indicated that birch admixture should be retained up to age 40–50 years and the optimal number of birches varied from 300 to 600 ha^{-1}, depending on spruce stocking and on the interest rate applied. The recommended stocking for pure birch stands after first commercial thinning in Finland is currently 700–800 ha^{-1} (Hynynen et al., 1997; Niemistö, 1997).

Based on a permanent experiment, Hannelius (1978) concluded that it is not advisable to grow a birch nurse crop in a spruce plantation only to be removed after about 15 years, unless effective frost protection is required and provided. That conclusion was supported by the results of this study. However, Hannelius (1978) did not attempt to project the future development of the experimental stand beyond 15 years as was done in this study with favorable economic effects.

It can be concluded that growing a naturally emerged birch overstory in a spruce plantation up to commercial volume and sawlog percentage is profitable in Finland with current economic and technical conditions. The most profitable treatment seemed to be to grow 500–800 birch stems ha^{-1} up to about 40 years of age for *B. pendula* and 45–50 years for *B. pubescens*. Using *B. pendula* results in significantly higher productivity and net returns than *B. pubescens*. The results were rather insensitive to potential changes in birch prices. A 25% decrease in birch prices relative to spruce prices would not make the simulated overstory alternatives unprofitable but a 50 % decrease would for many of the less profitable treatments. High spruce mortality due to logging damage (20.1–26.2 % of initial stocking) as well as the application of expensive labour intensive logging methods in the thinning and removal operations of the birch overstory were accounted for in the calculations.

5 Acknowledgments

This work was conducted in the Finnish Forest Research Institute, Vantaa and Helsinki Research Centers. Valkonen tested, adjusted and applied the existing models and constructed the new ones, constructed the simulator, and performed all calculations. The authors planned and conducted the economic analysis and wrote the manuscript together. We are grateful to Dr. Matti Sirén and Lic. (For.), Arto Rummukainen who consulted in the application of the logging cost models, and Rummukainen, Sirén, Dr. Hannu Hökkä, Prof. Jari Hynynen, Dr. Jari Miina, Prof. Kari Mielikäinen, M. Sc. (For.) Pentti Niemistö, and M. Sc. (For.) Olli Salminen who read the manuscript and provided valuable criticism.

References

Agestam, E. 1985. En produktionsmodell för blandbestånd av tall, gran och björk i Sverige. Summary: A growth simulator for mixed stands of pine, spruce and birch in Sweden. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsproduktion. Rapport 15. 76 p. + 74 appendix p.

Andersson, S.-O. 1984. Om lövröjning i plant- och ungskogar. [About cleaning hardwoods in young stands.] (In Swedish only). Sveriges Skogsvårdsförbunds tidskrift 82: 69–95.

Arrow, K.J. 1971. Essays in the theory of risk bearing. North-Holland, Amsterdam.

Bergan, J. 1987. Virkningen av björkeskjerm på etablering og vekst hos bartraer utplantet i Nord-Norge. Summary: The influence of birch shelter trees on establishment and growth of conifers planted in North Norway. Norsk Institutt for Skogsforskning. Rapport 10. 47 p.

Cajander, A.K. 1909. Über Waldtypen. Acta Forestalia Fennica 1. 175 p.

Cajander, E. 1934. Kuusen taimistojen vapauttamisen jälkeisestä pituuskasvusta. Referat: Über den Höhenzuwachs der Fichtenpflanzenbestände nach der Befreiung. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 19(5). 59 p.

Carlsson, D. 1990. Economic optimization of forest management in mixed stands of Norway spruce (Picea abies) and birch (Betula pendula). Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsekonomi. Arbetsrapport 113. 27 p. + 19 appendix p.

— 1995. Optimisation of even-age stand management, with an emphasis on mixed stand. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsekonomi. Rapport 114. 35 p.

Eriksson, H. 1976. Granens produktion i Sverige. Summary: Yield of Norway spruce in Sweden. Skogshögskolan, Institutionen för Skogsproduktion. Rapporter och uppsatser 41. 291 p.

Finnish Statistical Yearbook of Forestry. 1998. Finnish Forest Research Institute, Helsinki. 344 p.

Fries, J. 1974. Björk och gran. I: Framtidsskogen-Skogsproduktionens mål och medel. [Birch and spruce. I: Future forests: objectives and methods of forest production.] (In Swedish only.) Skogshögskolan, Institutionen för skogsproduktion. Rapporter och uppsatser 33: 30–37.

Frilander, O. 1985. Pienikokoisen lehtiverhopuuston korjuun kuusentaimikolle aiheuttamat vauriot. [Damages to spruce sapling stand in the removal of a small dimensioned birch nurse crop.] (In Finnish only.) University of Helsinki, Department of Forest

Technology. M. Sc. Thesis. 75 p.
Frivold, L. 1982. Bestandsstruktur og produksjon i blandingsskog av björk (Betula verrucosa Ehrh.) og gran (Picea abies (L) Karst.) i sydost-Norge. Summary: Stand structure and yield of mixed stands of birch (Betula verrucosa Ehrh.) and spruce (Picea abies (L.) Karst.) in southeast Norway. Meldinger fra Norges Lantbrukshögskole 90. 108 p.
Gnojek, A. 1992. Physiological response of suppressed Norway spruce to release from overstory birch. Department of Forest Yield Research, Series Physiological response of suppressed Norway spruce to release from overstory birch. Swedish University of Agricultural Sciences, Garpenberg. 15 p.
Hannelius, S. 1978. Istutuskuusikon tiheys – tuotoksen ja edullisuuden tarkastelua. Summary: Initial tree spacing in Norway spruce timber growing-an appraisal of yield and profitability. Folia Forestalia 359. 51 p.
Hänninen, H. 1998. Johtopäätökset. [Conclusions.] In: Hänninen, H. (Ed.) Puuvarojen käyttömahdollisuudet [Utilization potential of Finnish wood resources.] (In Finnish only.) Metsälehti kustannus ja Metsäntutkimuslaitos, Helsinki. pp. 168–186.
Harvennushakkuiden taloudellinen merkitys ja toteuttamisvaihtoehdot. 1992. Harvennushakkuuprojektin loppuraportti. [Economic significance of thinnings and alternatives for realization. Final report of the thinning research project.] (In Finnish only.) Maa- ja metsätalousministeriö, Helsinki. 121 p.
Heikinheimo, O. 1941. Metsänistutusmenetelmistä. Referat: Versuche mit waldbaulichen Pflanzmethoden. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 29(4). 63 p.
Heikurainen, L. 1985. Verhopuuston vaikutus kuusitaimikon kehitykseen. Summary: The influence of birch nurse crop (Betula pubescens) on the growth of spruce (Picea abies) seedling stands on drained peatlands. Silva Fennica 19: 81–88.
Hökkä, H. 1997. Height-diameter curves with random intercepts and slopes for trees growing on drained peatlands. Forest Ecology and Management 97: 63–72.
Hynynen, J., Hökkä, H., Niemistö, P. & Valkonen, S. 1997. Harvennushakkuut. [Thinnings.] (In Finnish only.) In: Mielikäinen, K. & Riikilä, M. (Eds.). Kannattava puuntuotanto. Metsälehti kustannus ja Metsäntutkimuslaitos, Helsinki. pp. 65–85.
Ilvessalo, Y. & Ilvessalo, M. 1975. Suomen metsätyypit metsiköiden luontaisen kehitys- ja puuntuottokyvyn valossa. Summary: The forest types of Finland in the light of natural development and yield capacity of forest stands. Acta Forestalia Fennica 144. 101 p.
Kärkkäinen, M. 1984. Miten koivuun tulisi suhtautua metsätaloudessa? Summary: The proper attitude towards birch in forestry. Silva Fennica 18: 71–100.
Koivisto, P. 1959. Kasvu- ja tuottotaulukoita. Summary: Growth and yield tables. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 51(8). 49 p.
Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 108. 74 p.
Leikola, M. & Pylkkö, P. 1969. Verhopuuston tiheyden vaikutus metsikön minimilämpötiloihin hallaöinä. Summary: On the influence of stand density on the minimum temperatures during frost nights. Silva Fennica 3(1): 20–32.
— & Rikala, R. 1983. Verhopuuston vaikutus metsikön lämpöoloihin ja kuusen taimien menestymiseen. Summary: The influence of the nurse crop on stand temperature conditions and the development of Norway spruce seedlings. Folia Forestalia 559. 33 p.
Lohmander, P. 1990. Economic two stage multi species management in a stochastic environment. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för Skogsekonomi. Arbetsrapport 112. 24 p.

— 1992. The multi species forest stand, stochastic price process and adaptive selective thinning. Systems Analysis - Modelling -Simulation 9: 229–250.

Louna, T. & Valkonen, S. 1995. Kotimaisen raaka-aineen asema lehtipuiden teollisessa käytössä. [Status of domestic resources in the industrial utilization of hardwoods.] (In Finnish only.) Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 553. 38 p.

Mård, H. 1993. Regeneration of Norway spruce [Picea abies] under shelter of birch [Betula] – background, experimental design and initial position for an experiment in southern Sweden. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsproduktionen. Rapport 36. 36 p.

— 1996. The influence of a birch shelter (Betula spp) on the growth of young stands of Picea abies. Scandinavian Journal of Forest Research 11: 343–350.

— 1997a. Damage and growth response in suppressed Picea abies after removal of overstorey birch (Betula spp.). Scandinavian Journal of Forest Research 12: 248–255.

— 1997b. Stratified mixture of young Norway spruce and birch as an alternative to pure stands of Norway spruce. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae Silvestria 35. 29 p. + papers 1–4.

Maukonen, A. 1987. Ylispuuhakkuun taimikolle aiheuttamat vauriot. [Logging damages to a sapling stand in the removal of an overstory.] (In Finnish only.) Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 244. 30 p.

Metsä- ja uittoalan työehtosopimus. 1990. Metsä- ja uittoalan, työehtosopimus 1.3.1990–29.2.1992 ja sen mukaiset metsätyöpalkkojen taulukot 1.3.1990–30.9.1990, palkkausalue 3. [Agreement on wages and conditions of employment in forest and floating work in 1.2.1990–29.2.1992, and wage tables for forest work in South Finland 1.3.1990–30.9.1990.] (In Finnish only.) Sanomapaino, Vantaa.

Mielikäinen, K. 1985. Koivusekoituksen vaikutus kuusikon rakenteeseen ja kehitykseen. Summary: Effect of an admixture of birch on the structure and development of Norway spruce stands. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 133. 79 p.

— & Valkonen, S. 1995. Kaksijaksoisen kuusi-koivu -sekametsikön kasvu. [Growth and yield in a two-storied spruce and birch stand.] (In Finnish only.) Metsätieteen aikakauskirja – Folia Forestalia 1995(2): 81–97.

Niemistö, P. 1995a. Influence of initial spacing and row-to-row distance on the crown and branch properties and taper of Silver birch (Betula pendula). Scandinavian Journal of Forest Research 10: 235–244.

— 1995b. Turvemaan hieskoivikon tiheyden vaikutus alikasvokuusikon kehitykseen. [Effect of the density of a birch overstory on the development of a spruce understory.] (In Finnish only.) In: Poikolainen, J. & Väärä, T. (Eds.). Metsäntutkimuspäivä Kuusamossa 1994. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 552: 87–103.

— 1997. Ensiharvennuksen ajankohdan ja voimakkuuden vaikutus istutetun rauduskoivikon kasvuun ja tuotokseen. [Effect of the timing and intensity of the first thinning on growth and yield of a Betula pendula stand.] (In Finnish only.) Metsätieteen aikakauskirja 4/1997: 439–454.

— 1998. Istutustiheyden ja rivivälin vaikutus rauduskoivun kasvuun ja ulkoiseen laatuun. [Effect of initial spacing on growth, yield and external quality of a Betula pendula stand.] (In Finnish only.) In: Niemistö, P. & Väärä, T. (Eds.). Rauduskoivu tänään – ja tulevaisuudessa. Tutkimuspäivä, Tampere 12.3.1997. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 668: 17–36.

Perala, D.A. & Alm, A.A. 1990. Regeneration silviculture of birch: a review. Forest Ecology and Management 32: 39–77.

Pukkala, T. 1981. Nuoren viljelysekametsikön kehitys. [Development of a young mixed plantation stand.] University of Helsinki, Department of Forest mensuration and management. M. Sc. Thesis. 86 p.

Ranua, J. 1999. Haavan käyttö paperin raaka-aineena. [Use of aspen as raw material for paper production.] (In Finnish and Swedish only.) In: Hynynen, J. & Viherä-Aarnio, A. (Eds.). Haapa – monimuotoisuutta metsään ja metsätalouteen. Asp – mångfald i skog och skogsbruk. Vantaan tutkimuskeskuksen tutkimuspäivä Tammisaaressa – Forskningsdag i Ekenäs, 12.11.1998. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 725: 101–106.

Rummukainen, A., Alanne, H. & Mikkonen, E. 1995. Wood procurement in the pressure of change – resource evaluation model till year 2000. Acta Forestalia Fennica 248. 98 p.

SAK Puu- ja erityisalojen liitto. 1998. Metsäpalkkatilasto maalis-kesäkuu 1998.

Salminen, O., Valkonen, S. & Varmola, M. 1997. Taimikonhoito [Precommercial thinnings.] (In Finnish only.) In: Mielikäinen, K. & Riikilä, M. (Eds.) Kannattava puuntuotanto. Metsälehti kustannus ja Metsäntutkimuslaitos. pp. 52–64.

Seppänen, P. 1997. Sekametsät Suomen metsätaloudessa ja metsäntutkimuksessa. [Mixed stands in forestry and forest research.] (In Finnish only.) Metsätieteen aikakauskirja 2/1997: 298–301.

Shapiro, S. & Wilk, M. 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika 52: 591–611.

Siipilehto, J. 1997. Koivun kasvumallit ja niiden mukaiset tuotosennusteet. [Growth models and yield predictions for birch.] (In Finnish only.) In: Niemistö, P. & Väärä, T. (Eds.). Rauduskoivu tänään – ja tulevaisuudessa. Tutkimuspäivä, Tampere 12.3.1997. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 668: 85–101.

Snellman, C. 1986. Muutoksia CRK-systeemiin 5.2.1986 [Changes in the CRK system 5.2.1986.] (In Finnish only.) Finnish Forest Research Institute, Mathematical department, Helsinki. Manuscript. 6 p.

Tham, Å. 1988. Yield prediction after heavy thinning of birch in mixed stands of Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.) and birch (Betula pendula Roth & Betula pubescens Ehrh.). Sammanfattning: Produktionsförutsägelser vid kraftiga gallringar av björk i blandbestånd av gran (Picea abies (L.) Karst.) och björk (Betula pendula Roth & Betula pubescens Ehrh.). Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Yield Research. Report 23. 36 p.

— 1994. Crop plans and yield predictions for Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.) and birch (Betula pendula Roth & Betula pubescens Ehrh.) mixtures. Studia Forestalia Suecica 195. 21 p.

Thesslund, O. 1976. Tutkimus kookkaan kuusitaimiston vaurioitumisesta ylispuiden poistossa. Summary: On damages in young spruce stands due to removal of superior trees. University of Helsinki, Department of logging and utilization of forest products. Research notes 32. 54 p.

Valkonen, S. 1997. Viljelykuusikoiden alkukehityksen malli. [Model for the juvenile development of Picea abies plantations.] (In Finnish only.) Metsätieteen aikakauskirja 3/1997: 321–347.

Valsta, L. 1988. Optimizing species composition in mixed, even-aged stands. In: Ek, A., Shifley, S. & Burk, T. (Eds.). Proceedings, IUFRO Conference on Forest growth modelling and prediction, Minneapolis, Minnesota, August 23–27, 1987. USDA Forest Service. General Technical Report NC-120(2): 913–920.

— 1997. Metsän uudistaminen. [Forest regeneration.] (In Finnish only.) In: Mielikäinen, K. & Riikilä, M. (Eds.) Kannattava puuntuotanto. Metsälehti kustannus ja

Metsäntutkimuslaitos, Helsinki. pp. 27–51.
Verkasalo, E. 1997. Hieskoivun laatu vaneripuuna. [Quality of Betula pubescens as raw material for veneer.] (In Finnish only.) Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 632. 542 p.
Vuokila, Y. & Väliaho, H. 1980. Viljeltyjen havumetsiköiden kasvatusmallit. Summary: Growth and yield models for conifer cultures in Finland. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 99. 271 p.

ISBN 951-40-1721-8
ISSN 0358-4283
Hakapaino 2000