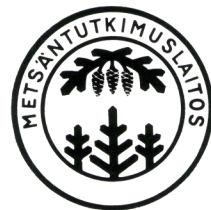


14.04.93



FOLIA FORESTALIA

METSÄNTUTKIMUSLAITOS
THE FINNISH FOREST RESEARCH INSTITUTE
HELSINKI 1992

800

Mauno Pesonen & Hannu Hirvelä

LIIKETALOUDELLISET HARVENNUSMALLIT ETELÄ-SUOMESSA

Thinning models based on profitability calculations for southern Finland

FOLIA FORESTALIA

Julkaisija — *Publisher*

Metsäntutkimuslaitos
The Finnish Forest Research Institute

Toimitus — *Editors*

Päätoimittaja — <i>Editor in chief:</i>	Erkki Annila
Toimittaja — <i>Editor:</i>	Seppo Oja
Toimittaja — <i>Editor:</i>	Tommi Salonen

Unioninkatu 40 A, SF-00170 Helsinki, Finland
tel. +358-0-857 051, fax +358-0-625 308

Toimituskunta — *Editorial Board*

Erkki Annila (pj. — *chairman*), Pentti Hakkila, Seppo Kaunisto, Jari Kuuluvainen, Juha Lappi, Eino Mälkönen

Tavoitteet ja tarkoitus — *Aim and Scope*

Sarjassa julkaistaan tutkimuksia, tilastoja ja kirjallisuuskatsauksia, joilla on ensisijaisesti kotimaista merkitystä. Julkaisukielenä on kotimainen kieli, mutta julkaisut sisältävät englanninkielisen selosteen tärkeimmistä tutkimustuloksista.

Folia Forestalia publishes research reports, statistics and literature reviews relevant to Finnish forestry.

Tilaukset — *Subscriptions*

Tilaukset ja tiedustelut pyydetään osoittamaan Metsäntutkimuslaitoksen kirjastolle. *Subscriptions and orders for back issues should be addressed to the Library of the Institute.*

FOLIA FORESTALIA 800

Metsäntutkimuslaitos. Institutum Forestale Fenniae. Helsinki 1992

Mauno Pesonen & Hannu Hirvelä

LIIKETALOUDELLISET HARVENNUSMALLIT ETELÄ-SUOMESSA

Thinning models based on profitability calculations for southern Finland

Approved on 10.12.1992

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	3
2	AINEISTO	5
3	LASKENTAMENETELMÄ	7
	3.1 Metsälaskelma MELA	7
	3.2 MELAan tehdyt muutokset	7
	3.2.1 Harvennushakkuiden ohjaaminen	7
	3.2.2 Harvennusreaktion testaaminen	8
	3.2.3 Luonnonpoistumamalli	9
	3.3 Hinta- ja kustannustiedot	9
	3.4 Harvennusmallien laatiminen	10
	3.4.1 Harvennusvaihtoehtojen tuottaminen	10
	3.4.2 Harvennusmallien laatiminen lineaarisella sekamallilla	11
4	TULOKSET	12
	4.1 Harvennusmallit	12
	4.2 Taimikon harvennuksen ajankohta	16
5	HARVENNUSOHJELMIEN VERTAILU	18
6	TULOSTEN TARKASTELU	23
	6.1 Aineiston ja laskentamenetelmän arviointi	23
	6.2 Harvennusmallit ja edullisuusvertailut	23
	KIRJALLISUUS	26
	SUMMARY	28
	LIITTEET – APPENDICES	30

Pesonen, M. & Hirvelä, H. 1992. Liiketaloudelliset harvennusmallit Etelä-Suomessa. Summary: Thinning models based on profitability calculations for southern Finland. *Folia Forestalia* 800. 35 p.

Tässä tutkimuksessa laadittiin liiketaloudellisesti optimaaliset harvennusmallit männikoille ja kuusikoille. Harvennuksia tarkasteltiin osana koko kiertoajan käsittelyohjelmaa ja metsien käytön tavoitteena pidettiin metsikön antamaa tuottoa kolmen ja viiden prosentin korkokannoilla. Laskelmissa sovellettiin yksinomaan alaharvennustyyppisiä harvennuksia. Alueellisten erojen selvittämiseksi harvennusmallit laadittiin erikseen neljälle osaluokalle Etelä-Suomessa.

Perusaineistona olivat valtakunnan metsien seitsemännen ja kahdeksannen inventoinnin relaskoopikoealat Etelä-Suomesta. Laskelmat tehtiin Metsäntutkimuslaitoksessa kehitetyllä MELA-järjestelmällä ja varsinaiset harvennusmallit laadittiin lineaarisella sekamallitekniikalla.

Laskelmien perusteella harvennushakkuut olivat välttämättömiä metsikön taloudellisen tuloksen kannalta. Harvennusten edullisuus tuli esille mm. puuston nopeutuneen järeytymisen ja tulojen ajallisen jakautumisen kautta. Männikoissä harvennusten edullisuus korostui luonnonpoistuman vuoksi.

Tuottoarvon perusteella laaditut harvennusmallit edellyttivät huomattavasti voimakkaampia harvennuksia kuin vertailukohtana olleet Metsäkeskus Tapion harvennusmallit. Voimakkaampien harvennusten seurauksena harvennuskerrat vähenivät. Kolmen prosentin korkokantaa sovellettaessa tehtiin keskimäärin kaksi tai kolme harvennusta kiertoajan kuluessa. Viiden prosentin korolla harvennuksia tehtiin sekä männikoissä että kuusikoissa vain yksi.

Metsikön taloudellista tulosta voitiin edelleen parantaa tekemällä ensiharvennus nykyisiä suosituksia myöhemmänä ja voimakkaampana. Ensiharvennuksen siirtämisen seurauksena harvennuskertymät suurenivat, poistettavat puut järeytyivät ja siten korjuun yksikkökustannukset pienenevät. Ensiharvennuksen siirto kannatti aina riippumatta siitä, tehtiinkö myöhemmät harvennukset tässä esitettyjen vai yleisesti käytössä olevien Tapion mallien mukaan. Ensiharvennuksen siirtämisen edullisuus korostui kuusikoissa.

Taloudellisesti paras toimintatapa VT-männikössä ja MT-kuusikossa oli harventaa taimikko 4–6 m:n pituudella tiheyteen 2000 kpl/ha, suorittaa ensimmäinen varsinaisen harvennus keskipituudella ollessa vähintään 13 m ja tehdä kiertoajan aikana yhteensä 1–3 voimakasta harvennusta.

Keywords: forest economics, simulation, optimal thinning, thinning models.
FDC 242 + 64

Authors' address: The Finnish Forest Research Institute, Department of Forest Resources, Unioninkatu 40 A, SF-00170 Helsinki, Finland.

ISBN 951-40-1268-2
ISSN 0015-5543

Tampere 1992. Tammer-Paino Oy

1 Johdanto

Harvennushakkuita on totuttu pitämään välttämättöminä metsikön puuntuotannon kannalta. Harvennushakkuiden avulla voidaan lisätä parhaiden puiden kasvutilaa ja siten nopeuttaa harvennuksissa jäävän puuston kasvua. Samalla parannetaan puuston teknistä laatua ja terveydentilaa poistamalla teknisesti heikkoja, huonokuntoisia ja sairaita puita (Kellomäki 1991). Jäljelle jäävien puiden kasvun nopeuttamiseksi ja hakkuun taloudellisen tuloksen parantamiseksi harvennuksissa poistetaan tavallisesti myös kehityskelpoisia puita. Harvennushakkuiden osuus koko kiertoajan hakkuukertymästä on yleensä ainakin kolmannes, joskus jopa puolet (Vuokila 1987).

Aikaisempien tutkimusten perusteella harvennushakkuilla on mahdollista lisätä talteen saatavan käyttöpuun (tukki- ja kuitupuun) määrää, sillä harventamattomassa metsikössä luonnonpoistuman osuus on 17–34 % kokonaistuotoksesta kiertoajan kuluessa (Ilvessalo 1920). Mielikäisen (1979) mukaan luonnonpoistuman osuus oli suurimmillaan lähes 40 % kokonaistuotoksesta. Yleisen käsityksen mukaan harvennukset eivät kuitenkaan lisää metsikön kokonaistuotosta luonnontilaiseen metsikköön verrattuna, vaikka lyhyellä aikajaksolla harvennusten on jossain tapauksissa todettu lisänneen puuston tilavuuskasvua (Assman 1970). Petterssonin (1951) mukaan metsiköstä saatava kokonaistuotos on suurin silloin, kun harvennuksissa poistetaan vain pystyyn kuolevia puita.

Harvennukset nopeuttavat kasvatettavien puiden järeytymistä ja järeytyminen on yleensä sitä nopeampaa, mitä voimakkaammasta harvennuksesta on kysymys (Vuokila 1975). Nopeammas- ta järeytymisestä johtuen harvennuksin käsitellyissä metsissä on mahdollista soveltaa lyhyempiä kiertoaikoja kuin harventamattomissa metsissä, mikäli metsikön uudistuskykyisyys perustuu puuston järeyteen. Mielikäisen (1979) mukaan harvennushakkuut lyhensivät järeyteen perustuvia kiertoaikoja MT-männikössä 10–15 vuotta. Saman tutkimuksen mukaan suurimpaan keskimääräiseen kasvuun tai arvokasvuun perustuvat kiertoajat olivat harvennetussa metsikössä kuitenkin pitemmät kuin luonnontilaisessa metsikössä, jossa iän lisääntyessä luonnonpoistuman määrä suureni nopeasti ja siten keskimääräinen kasvu pieneni.

Puuntuotannollisten seikkojen lisäksi myös metsikön kasvatuksen liiketaloudellisia perusteita on tutkittu runsaasti (esim. Einola 1964, Hämäläinen 1973). Harvennushakkuihin liittyvissä liiketaloudellisissa tutkimuksissa on tarkasteltu harvennusten intensiteettiä ja suoritustapaa sekä puuston määrän ja rakenteen säätelyä (esim. Chappelle & Nelson 1964, Kilkki & Väisänen 1969, Brodie ym. 1978, Solberg & Haight 1991). Keskeisenä tavoitteena on ollut selvittää puuston optimaaliset harvennusohjelmat ja niihin liittyvät kiertoajat erilaisilla optimointimenetelmillä. Yleensä tehtyjen toimenpiteiden optimaalisuutta on tarkasteltu tulevaisuudessa saatavien nettotulojen nykyarvon avulla. Suomessa harvennusten vaikutuksia metsikön tuottoon ja kiertoaikaan ovat tutkineet mm. Mielikäinen (1979) ja Mielikäinen & Valkonen (1991), ensiharvennuksen ajoituksen vaikutusta metsikön kasvatuksen taloudelliseen tulokseen Siira (1988) sekä sekametsiköiden optimaalisia puulajisuhteita ja harvennusohjelmia Valsta (1986, 1988).

Yhteinen ongelma näissä liiketaloudellisissa tutkimuksissa on ollut se, kuinka paljon puustoa sidotaan metsikön kasvun ylläpitämiseen ja kuinka paljon sitä realisoidaan kulutusta tai sijoituskohteita varten. Toimenpiteistä päätettäessä metsikön taloudellisesti optimaalinen käsittely riippuu metsikössä tehtävien toimenpiteiden lisäksi myös muista suunnitteluyksikön metsiköistä. Yhtä metsikköä koskevat tulokset ovat kuitenkin hyödyllisiä tutkittaessa yksittäisten toimenpiteiden, esim. harvennushakkuiden, vaikutuksia metsikön taloudelliseen tulokseen (Valsta 1992). Suuri osa aikaisemmista taloudellisista tutkimuksista onkin ollut vain yhtä metsikköä koskevia tarkasteluja.

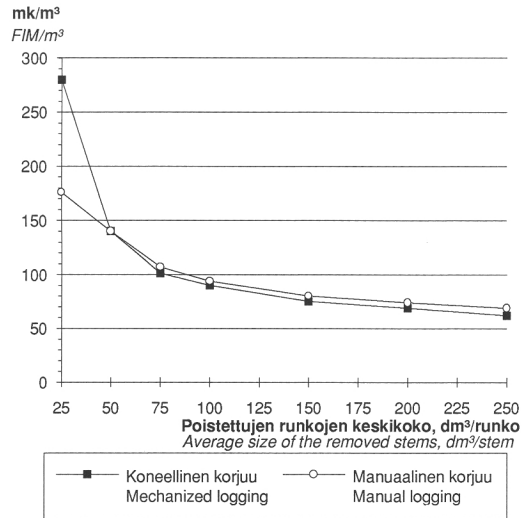
Harvennusten liiketaloudellista edullisuutta määritettäessä tulee ottaa huomioon harvennusten vaikutukset metsikön kehitykseen, hakkuutuloihin ja korjuukustannuksiin aina kiertoajan loppuun saakka. Puutavalarajien hintasuhteilla, tulojen ja kustannusten ajoittumisella sekä käytetyllä korkokannalla on suuri vaikutus harvennusten edullisuuteen. Harvennushakkuiden kautta osa puustoon sitoutuneesta pääomasta saadaan metsänomistajan käyttöön jo ennen kiertoajan päättymistä, millä on hakkuutulojen ajallista jakaantumista tasaava ja harvennusten edullisuutta korostava vaikutus.

Mahdollisimman suuren kokonaistuotoksen ja tilavuuskasvun tavoittelemisen sekä tuhoriskien välttäminen korostavat lieviä ja usein toistuvia harvennuksia. Käytännössä kuitenkin taloudelliset tekijät, mm. korjuukustannukset, ohjaavat suurehkoihin kerralla poistettaviin puumääriin. Korjuukustannukset ovatkin suurin yksittäinen kustannustekijä metsikön kiertoaikana. Harvennushakkuiden korjuukustannuksiin vaikuttavat erityisesti rungon ja leimikon koko (kuva 1), jotka ovat ongelmallisia varsinkin ensiharvennuksissa (Vuokila 1976). Metsikön taloudellisen tuloksen parantamiseksi harvennuskertymiä on suurennettava ja harvennusväliä pidennettävä, jolloin harvennuksen jälkeisen puuston määrä saattaa alentua pienemmäksi kuin mitä metsikön suurin mahdollinen puuntuotos edellyttäisi.

Mielikäisen (1979) esittämien tulosten mukaan harvennuksista aiheutui männiköissä 7–8 %:n suuruinen tilavuuskasvutappio kiertoaajan (70 vuoden) kuluessa. Tästä huolimatta harvennushakkuut lisäsivät hakkuutulojen nykyarvoa käytetystä korkokannasta riippumatta. Laskentakorolla nolla prosenttia vahvat alaharvennuksiset antoivat noin 20 % paremman tuoton kuin luonnontilainen metsikkö. Korkokannan suurentaminen kasvatti hakkuuohjelmien välisiä eroja, sillä neljän prosentin laskentakorolla alaharvennetun metsikön tuotto oli noin kaksinkertainen harventamattoman metsikön tuottoon verrattuna. Lisäksi erittäin voimakkaita alaharvennuksia sovellettaessa hakkuutulosten nykyarvot olivat keskimäärin 30 % suuremmat kuin lieville harvennuksilla saadut. Puutavaralajien hintasuhteiden muuttuminen kuitupuulle suotuisemmaksi lisäsi harvennushakkuiden edullisuutta sitä enemmän mitä korkeampaa laskentakorkoa käytettiin.

Käytännön hakkuutoimintaa varten harvennusvoimakkuutta ja harvennusten ajoittumista kuvataan harvennusmalleilla. Harvennusmalleja ovat Metsäkeskus Tapion lisäksi laatineet mm. Metsähallitus ja metsää omistavat yritykset. Tähän asti laadituissa malleissa harvennushakkuille ei ole yleensä asetettu tiukkoja taloudellisia vaatimuksia, vaan harvennusmallien avulla on pyritty korkeimpaan käytännössä mahdolliseen puuntuotantoon (Vuokila 1971, Vuokila 1983).

Tämän tutkimuksen tavoitteena on valtakunnan metsien inventoinnissa (VMI) kerättyyn aineistoon perustuen selvittää harvennusmetsien liiketaloudellisesti optimaaliset harvennusohjelmat ja niiden perusteella laatia harvennusmallit kolmen ja viiden prosentin korkokannoilla. Harvennuksia ei tarkastella yksittäisinä toimenpiteinä, vaan osana metsikön koko kiertoaajan käsitte-



Kuva 1. Korjuukustannusten riippuvuus harvennuksessa poistettujen puiden keskikokoosta kuusikossa (Harvennushakkuiden ... 1992).

Fig. 1. Dependence of logging costs on average size of the stems removed in thinnings in Norway spruce stand (Harvennushakkuiden ... 1992).

lyohjelmaa. Laskelmissa sovelletaan yksinomaan alaharvennustyyppisiä harvennuksia. Metsien käytön tavoitteena pidetään metsikön antamaa tuottoa koko kiertoaajan kuluessa.

Metsikön tuottoarvon maksimointiin perustuvat tulokset esitetään harvennusmalleina männiköille ja kuusikoille tärkeimmillä kasvupaikkatyyypeillä. Alueellisten erojen selvittämiseksi harvennusmallit on laadittu erikseen neljälle osaluokalle Etelä-Suomessa. Tutkimuksessa tarkastellaan myös korkokannan vaikutusta harvennusmalleihin ja hakkuiden ajoittumiseen sekä taimitonhoidon ja harvennushakkuiden yhteensovittamista. Laskelmat on tehty Metsäntutkimuslaitoksessa kehitetyllä MELA-järjestelmällä.

Laadittuja harvennusmalleja verrataan yleisesti käytössä oleviin Tapion harvennusmalleihin. Samalla selvitetään harventamattomuuden vaikutusta yhden kiertoaajan puitteissa. Vertailu tehdään mm. hakkuukertymien ja tuottoarvojen avulla.

Tutkimus on osa "Harvennushakkuiden taloudellinen merkitys ja toteuttamisvaihtoehdot" -hanketta (1989–91), jossa olivat mukana Metsäntutkimuslaitos, Metsäteho ja Jaakko Pöyry Oy. Hankkeen tavoitteena oli selvittää harvennushakkuiden merkitys yksityismetsätaloudelle, metsäteollisuudelle ja Suomen kansantaloudelle sekä antaa

pohjaa metsävarojen tarkoituksenmukaiselle kehittämiselle tulevaisuudessa (Harvennushakkuiden ... 1992). Tämä tutkimus on Metsäntutkimuslaitoksen osahankkeen ”Harvennushakkuiden yksityistaloudellinen edullisuus” yksi kolmesta osajulkaisusta. Kaksi muuta osajulkaisua käsittelevät harvennushakkuiden edullisuutta metsälön ja valtakunnan tasolla.

Käsikirjoituksen ovat tarkastaneet prof. Matti Keltikangas ja prof. Simo Poso. Heidän lisäksi erityisesti prof. Kari Mielikäinen ja MMK Olli Salminen ovat esit-

täneet arvokkaita kommentteja ja parannusehdotuksia työn kuluessa. MMK Jari Hynynen laati puuston itseharvennemiseen perustuvan luonnonpoistumamallin ja teki puuston harvennusreaktioon liittyvän luotettavuustarkastelun. Englanninkielisen tekstin kääntämisessä avusti B.Sc. Paula Horne. Prof. Jouko Hämäläinen loi erinomaiset puitteet tutkimuksen toteuttamiselle. Edellä mainittujen lisäksi tahdomme kiittää kaikkia työn valmistumiseen vaikuttaneita henkilöitä.

2 Aineisto

Laskelmien perusaineistona olivat valtakunnan metsien seitsemännen ja kahdeksannen inventoinnin (VMI-7 ja VMI-8) kertakoealat metsälautakuntien 1–15 alueelta Etelä-Suomesta. VMI-aineiston valinnan perusteena oli kuvata mahdollisimman edustavasti olemassa olevaa puustoa ja ottaa laskelmissa huomioon puuston alueelliset erot. Kahdeksas inventointi oli laskelmia aloitettaessa vielä kesken, joten VMI-8 -aineisto oli käytettävissä vain lautakuntien 1–10 alueelta. Metsälautakuntien 11–15 osalta käytettiin VMI-7 -aineistoa. Koko aineisto oli päivitetty hakkuiden ja kasvun osalta vastaamaan alkuvuoden 1990 tilannetta (Siitonen 1990).

Varsinaisen laskenta-aineiston koealat valittiin perusaineistosta päivityksen jälkeen seuraavin kasvupaikkaan ja puustoon liittyvin kriteerein:

- a) Koeala metsämaalla ja metsikön käyttötapa yksinomaan puuntuotanto.
- b) Koeala kivennäismaalla.
- c) Kehitysluokka varttunut taimikko tai nuori kasvatusmetsä.
- d) Puusto yksijaksoinen ja kehityskelpoinen.
- e) Pääpuulajina mänty tai kuusi.
- f) Vallitsevan puulajin osuus varttuneissa taimikoissa vähintään 75 % ja nuorissa kasvatusmetsissä 85 % tilavuudesta.
- g) Kasvupaikkatyyppi männiköissä OMT, MT, VT tai CT ja kuusikoissa OMT tai MT.

Puusto katsottiin kehityskelpoiseksi, jos metsikön laatu oli luokiteltu hyväksi, tyydyttäväksi tai välttäväksi. Varttuneeksi taimikoksi määriteltiin puusto, jonka vallitsevan puulajin valtipituus oli yli 1,3 m ja suurimpien puiden maksimiläpimitta oli alle 10 cm. Vallitsevan jakson ikä oli enin-

tään 50 vuotta. Nuoreksi kasvatusmetsiköksi luokiteltiin harvennushakkuuvaiheessa oleva metsikkö, jonka hakkuukertymä oli pääosaksi kuitupuuta (Valtakunnan ... 1986). Varttuneita kasvatusmetsiä ei valittu aineistoon, koska niiden aikaisemmista harvennuksista ei ollut tarpeeksi luotettavaa tietoa. Koska laskenta-aineistoon otettujen koealojen puustot olivat suurimmaksi osaksi joko luontaisesti syntyneitä tai niiden perustamistapa oli tuntematon, puuston perustamista ei käytetty aineiston luokitteluperusteena. VMI-aineistosta johtuen kasvupaikka kuvattiin metsätyyppiluokituksella eikä, kuten harvennushakkuu-aineistossa tavallisesti, valtipituusboniteetilla.

Valitut VMI-relaskooppikoealat ryhmiteltiin puustotietojen perusteella laskentayksiköihin, jotka olivat nykytilaltaan ja tulevalta kehitykseltään homogeenisten koealojen ryhmiä. Näiden tarkoituksena oli kuvata mahdollisimman hyvin todellisia metsiköitä. Yksi relaskooppikoeala ei yleensä edusta metsikköä riittävän tarkasti, koska koealat ovat pieniä ja puut eivät ole jakautuneet tasaisesti koko metsikön alueelle. Yhden relaskooppikoealan riittämättömyys tulee esille sekä puuston määrän että metsikön käsittelytarpeen arvioinnissa erityisesti nuorissa puustoissa.

Koealat ryhmiteltiin laskentayksiköihin kehitysluokittain, kasvupaikkatyypeittäin ja pääpuulajeittain seuraavien muuttujien avulla:

- a) Hakkuun kiireellisyys.
- b) Puuston tiheys (varttuneissa taimikoissa runkoluku ja nuorissa kasvatusmetsissä pohjapinta-ala).
- c) Puuston keskiläpimitta.

Muodostamalla laskentayksiköt usean koealan ryhmistä saatiin laskentayksiköiden puustotunnuksiin hajontaa, joka kuvaa todellisten metsi-

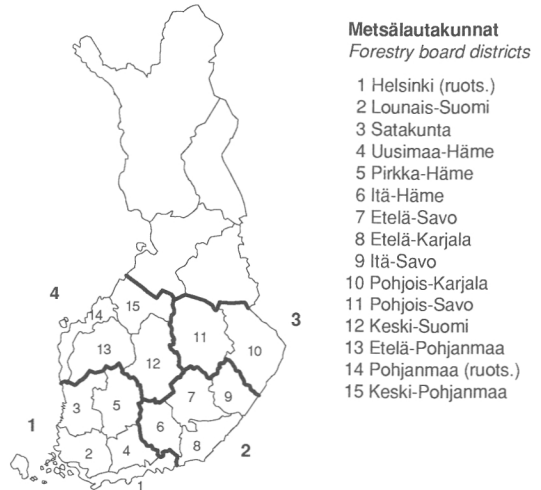
Taulukko 1. Laskenta-aineisto ja sen maantieteellinen jakautuminen.
 Table 1. The number and geographical location of the research material.

Metsälautakunta Forestry board district	Koaloja, kpl Number of sample plots	Laskenta-yksiköitä, kpl Number of calculation units	Keskitilavuus, m ³ /ha Mean volume, m ³ /ha	Keski-ikä, v Mean stand age, yr
1) Helsinki (ruots.)	185	61	87	36
2) Lounais-Suomi	296	62	79	38
3) Satakunta	418	71	74	36
4) Uusimaa-Häme	249	64	84	35
5) Pirkka-Häme	478	73	80	36
6) Itä-Häme	310	67	86	36
7) Etelä-Savo	488	72	74	32
8) Etelä-Karjala	556	74	81	36
9) Itä-Savo	302	71	71	31
10) Pohjois-Karjala	958	82	58	37
11) Pohjois-Savo	565	77	59	27
12) Keski-Suomi	714	73	54	28
13) Etelä-Pohjanmaa	396	59	59	30
14) Pohjanmaa (ruots.)	181	39	38	24
15) Keski-Pohjanmaa	346	54	52	33
Yhteensä – Total	6442	999	69	34

köiden sisäistä vaihtelua. Tämä hajonta otettiin käsittelyvaihtoehtojen simuloinnissa huomioon siten, että toimenpiteet tehtiin koaloittain ja että laskentayksikkötiedot koostettiin koalakohtaisista tiedoista. Sisäisen vaihtelun vuoksi ryhmitelymuuttujien luokittelussa vältettiin pieniä (yhden koalan) ja suuria (yli kymmenen koalan) laskentayksiköitä.

Ryhmittely tehtiin erikseen jokaisen metsälautakunnan alueelle. Aineiston valinnan ja ryhmittelyn jälkeen varsinaiseen laskenta-aineistoon kuului yhteensä 6442 koalaa ja 999 laskentayksikköä (taulukko 1), joten yhteen laskentayksikköön kuului keskimäärin 6,4 koalaa. Aineisto edusti 12 %:a metsälautakuntien VMI-kerta-koalojen kokonaismäärästä metsämaalla.

Alueellisesti tarkempien tulosten saamiseksi laskenta-aineisto jaettiin neljään osa-alueeseen siten, että metsälautakunnat 1–5 (Helsinki–Pirkka-Häme), 6–9 (Itä-Häme–Itä-Savo), 10–11 (Pohjois-Karjala ja Pohjois-Savo) ja 12–15 (Keski-Suomi–Keski-Pohjanmaa) muodostivat omat osa-alueensa (kuva 2).



Kuva 2. Aineiston jakautuminen neljään osa-alueeseen.
 Fig. 2. The four sub-regions of the research material.

3 Laskentamenetelmä

3.1 Metsälaskelma MELA

Metsälaskelma MELA on metsikkösimulaattorin ja lineaarisen optimointiosan käsittävä ohjelmisto (Siitonen 1983). Alunperin MELA kehitettiin pitkän aikavälin suunnittelujärjestelmäksi pääasiassa valtakunnan metsien inventoinnin tietoihin perustuvaan suuraluesuunnitteluun. Nykyiseen muotoonsa MELA-järjestelmän simulointiosa muokattiin Metsä 2000 -ohjelman valmistelun yhteydessä (Metsä 2000 -ohjelman ... 1985).

MELA-järjestelmän toiminta jakautuu kolmeen osaan: 1) metsävaratietojen käsittely laskentaa varten, 2) metsän tulevien käsittely- ja kehitysvaihtoehtojen tuottaminen (simulointi) ja 3) tuotanto-ohjelman valinta (optimointi) (Siitonen 1983). MELAn keskeisiä vaatimuksia ovat riittävän yksityiskohtaiset ja luotettavat metsävaratiedot, metsän kehitystä kuvaavat mallit sekä tiedot metsätalouden harjoittamiselle asetetuista tavoitteista ja rajoitteista. Metsävaratietojen ja metsää kuvaavien mallien avulla MELAlla tuotetaan suunnitteluyksikön metsiköille erilaisia käsittely- ja kehitysvaihtoehtoja halutun pituiselle suunnittelukaudelle. Lineaarisella optimoinnilla vaihtoehtoista valitaan koko alueen tuotanto-ohjelma eli kullekin metsiköille valitaan toimenpiteet, jotka toteuttavat koko alueen ratkaisulle asetetut ehdot.

MELAssa suunnittelun kohteena oleva metsätalouksyksikkö koostuu laskentayksiköihin jaetuista koealoista tai metsikkökuvioista, joiden kasvupaikka kuvataan maantieteellisellä sijainnilla sekä maaperä- ja ilmastomuuttujilla (Ojansuu ym. 1991). Maaperää kuvaavia muuttujia ovat metsä- tai suotyypit, veroluokka ja ojitustilanne. Ilmastotekijänä käytetään keskimääräistä lämpösummaa.

Puusto esitetään MELA-järjestelmässä kuvauspuuna. Kuvauspuut voivat olla yksittäisiä puita tai puutiedot voidaan tiivistää läpimittaluokittaiseksi runkolukusarjaksi, josta valitut kuvauspuut edustavat tiettyä puujoukkoa. Kuvauspuihin liittyvät tilamuuttujat ovat puulaji, puun biologinen ikä ja rinnankorkeusikä, runkoluku, puun kuoreton pohjapinta-ala rinnankorkeudelta sekä puun pituus.

MELAn simulointiosa koostuu tapahtumista, jotka ennustetaan muutosmalleilla (Ojansuu ym.

1991). Ennustettujen muutosten avulla saadaan metsän uusi tila aikajakson lopussa. Käytössä olevien muutosmallien aika-askel on viisi vuotta, mutta simuloinnissa aika-askel voidaan valita vapaasti.

Simulointiajan pituus riippuu sekä päätösentekijää kiinnostavista muuttujista että laskentakapasiteetista. Simulointiaika jaetaan simuloitikausiin, joiden pituus (aika-askel) on yleensä 10 vuotta. Toimenpiteet toteutetaan simuloitikauden keskellä. Koska saman aika-asteen ajalle voidaan simuloida erilaisia toimenpiteitä (esim. harvennushakkuu ja lepo), seurauksena on useita vaihtoehtoisia käsittelyketjuja.

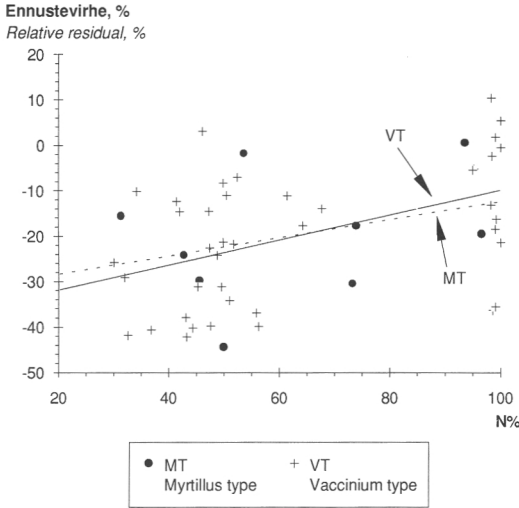
3.2 MELAan tehdyt muutokset

3.2.1 Harvennushakkuiden ohjaaminen

Tässä tutkimuksessa MELA-järjestelmään tehdyillä muutoksilla monipuolistettiin harvennushakkuiden ohjaamista puulajivalinnan osalta. Aikaisemmin MELAssa suosittiin koealan puulajisuhteista riippumatta vain vallitsevaa puulajia ja käytetyt poisto-ohjeet johtivat yhden puulajin metsiköihin. Tällaisen tilanteen ehkäisemiseksi hakkuiden ohjausta muutettiin siten, että harvennushakkuissa oli mahdollista jättää pääpuulajin lisäksi myös muita puulajeja käyttäjän antamien puulajiohjeiden perusteella. Laskelmassa laadittua ohjausjärjestelmää sovellettiin siten, että jätettäviä puulajeja oli koealan puulajisuhteista riippuen 1–2 ja että näiden puulajien tilavuudesta poistettiin maksimissaan 90 %.

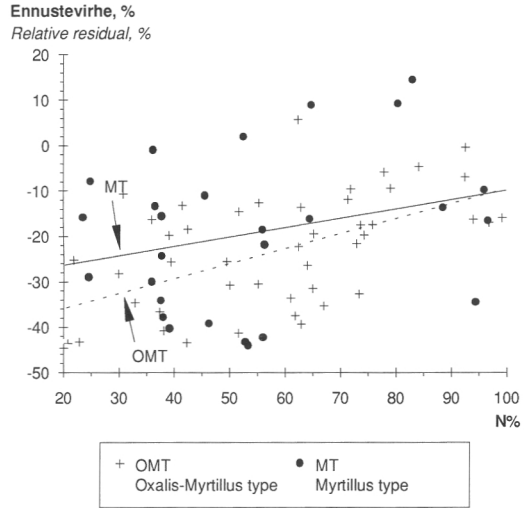
Harvennusten ohjaamiseen liittyen tarkennettiin myös harvennusten kohdistumista runkolukusarjassa. Aineistona käytettiin Metsäntutkimuslaitoksen metsänkasvatuksen tutkimusosaston toistuvasti harvennettuja kestokokeita (Harkaskokeet). Hakkuiden kohdistuminen testattiin erikseen sekä runkolukuun että pohjapinta-alaan perustuvissa alaharvennuksissa.

Maastossa mitattujen runkolukusarjojen avulla MELAlla simuloitiin Harkas-koealoille toteutuneita hakkuuta vastaavat harvennukset. Simuloinneille asetettiin vaatimukseksi, että runkolukuharvennuksissa harvennusten jälkeisten simuloitujen runkolukujen piti vastata maastossa mitattuja kokonaisrunkolukuja ja vastaavasti pohja-



Kuva 3. Puuston tilavuuskasvun suhteellisen ennustevirheen riippuvuus harvennusvoimakkuudesta MT- ja VT-männikoissä (ennustevirhe = MELAlla ennustettu kasvu – todellinen kasvu). N% ilmaisee tarkastelujakson lopun runkoluvun suhteessa koalan runkolukuun tarkastelujakson alussa.

Fig. 3. Dependence of relative residual of volume growth on thinning grade in Scots pine stands (residual = volume growth simulated by MELA – actual volume growth). N% refers to initial number of stems at the beginning of the study period related to number of stems at the end of the period.



Kuva 4. Puuston tilavuuskasvun suhteellisen ennustevirheen riippuvuus harvennusvoimakkuudesta OMT- ja MT-kuusikoissa (ennustevirhe = MELAlla ennustettu kasvu – todellinen kasvu). N% ilmaisee tarkastelujakson lopun runkoluvun suhteessa koalan runkolukuun tarkastelujakson alussa.

Fig. 4. Dependence of relative residual of volume growth on thinning grade in Norway spruce stands (residual = volume growth simulated by MELA – actual volume growth). N% refers to initial number of stems at the beginning of the study period related to number of stems at the end of the period.

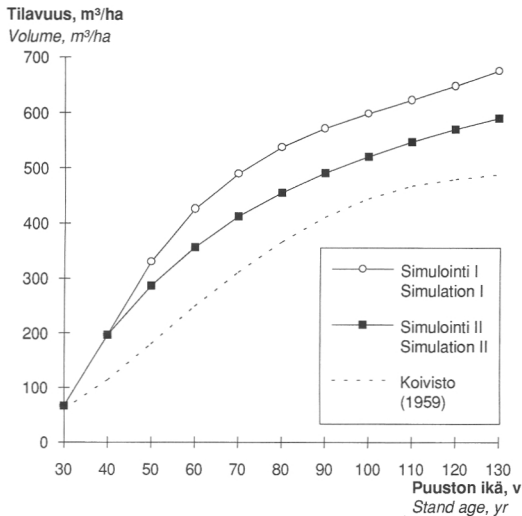
pinta-alarhennuksissa simuloitujen pohjapinta-alojen maastossa mitattuja pohjapinta-aloja.

Mitattuja ja simuloituja runkolukusarjoja vertaamalla todettiin, että harvennusten poisto-ohjeita oli muutettava. Poisto-ohjeissa yksittäisten kuvauspuiden poistotodennäköisyyttä ja samalla harvennustapaa kuvataan poistosuoralla (Jääskeläinen 1987). Poistosuoran kulmakertoimen määrää miten harvennus kohdistuu runkolukusarjaan. Testiaineiston perusteella MELAssa oletuksena käytetyllä harvennushakkuiden poistosuoran kulmakertoimella $b = -0,5$ suurten puiden poisto yliarvioitiin ja pienten puiden poisto aliarvioitiin. Vertailusimulointien jälkeen päädyttiin kummallakin harvennuskriteerillä sekä männyllä että kuusella kulmakertoimeen $b = -2,5$, jonka soveltamisen seurauksena pieniä puita poistettiin suhteellisesti enemmän kuin aikaisemmin ja sovellettu alaharvennustyyppinen harvennustapa koostui.

3.2.2 Harvennusreaktion testaaminen

Harvennushakkuisiin liittyy yleensä jäävän puuston kasvun muutos. Harvennuksen jälkeen metsikön kasvu yleensä alenee puuston määrän pienenemisen vuoksi, mutta yksittäiset puut reagoivat suurempaan kasvutilaan lisäämällä kasvuaan (Assman 1970). MELAssa ei ole varsinaista harvennusreaktiomallia, vaan harvennuksiin liittyvät puuston kasvun muutokset oletetaan sisältyvän käytettyihin kasvumalleihin. Ojansuun ym. (1991) mukaan toistuvasti alaharvennettujen kestokokeiden kehitystä simuloitaessa MELA aliarvioi puuston tilavuuskasvua kasvupaikkatyyppistä ja puulajista riippuen 4–35 %. Tilavuuskasvun aliarvio suureni metsikön vanhetessa.

Siitosen (1990) VMI-8 -aineiston avulla tekemän kasvumallien kalibroinnin jälkeen Ojansuun ym. (1991) esittämä kestokokeisiin perustuva luottavuustarkastelu tehtiin uudelleen suuremmalla aineistolla. Käytettyyn Harkas-aineistoon sisältyi MT- ja VT-männiköiden sekä OMT- ja MT-kuusikoiden harventamattomia ja toistuvasti har-



Kuva 5. Tilavuuden kehitys luontaisesti syntyneessä ja harventamattomassa MT-kuusikossa alkuperäisen (simulointi I) ja korjatun (simulointi II) luonnonpoistumamallin mukaan, vertailukohtana Koivisto (1959).
 Fig. 5. The development of stand volume in Norway spruce stand simulated by MELA with old (simulation I) and new mortality model (simulation II) compared with Koivisto (1959).

vennettuja koealoja. Tarkastelujakson pituus vaihteli välillä 15–23 vuotta.

Tehtyjen simulointien perusteella MELAn tilavuuskasvuennusteet olivat harvennetuissa metsissä edelleen aliarvioita ja aliarvio oli sitä suurempi mitä voimakkaampia harvennuksia tehtiin (kuvat 3 ja 4). Tilavuuskasvun aliarvio oli OMT-kuusikoissa keskimäärin 23 % ja MT-kuusikoissa 20 %. MT- ja VT-männiköissä kasvun aliarvio oli keskimäärin 20 %. Harhan riippuvuus harvennusvoimakkuudesta oli tilastollisesti merkitsevä kuitenkin vain OMT-kuusikoissa ja VT-männiköissä.

3.2.3 Luonnonpoistumamalli

MELAssa luonnonpoistuma ennustetaan mallilla, joka antaa puukohtaisen kuolemistodennäköisyyden tulevalla viisivuotiskaudella (Haapala 1983). Mallilla voidaan ennustaa metsikön normaaliin kehitykseen kuuluvat pienialaiset sattunaisluontoiset tuhot. Mallissa ei ole mukana laajojen tuhojen aiheuttamaa kuolleisuutta eikä metsikön tiheydestä johtuvaa itseharvenemistä.

MELalla tehdyissä pitkän aikavälin simuloin-

neissa on havaittu, että harventamattomien metsiköiden kehitystä ennustettaessa puuston määrästä saadaan liian suuria arvioita. Siksi MELAn luonnonpoistumamalliin lisättiin metsikön itseharvenemisrajaa kuvaava malli. Itseharvenemisellä tarkoitettiin puiden koon kasvusta johtuvaa puiden lukumäärän vähenemistä. Hynynen (1991) laatimassa mallissa metsikön itseharvenemisraja määritettiin pohjapinta-alalla painotetun keskilämpimän ja runkoluvun avulla. Puuston keskilämpimän perusteella laskettiin itseharvenemismallin mukainen korkein mahdollinen metsikön runkoluku. Jos puuston runkoluku oli alkuperäisen luonnonpoistumamallin jälkeen vielä itseharvenemismallista saatua runkolukua korkeampi, runkolukua vähennettiin itseharvenemismallin mukaiselle tasolle. Luonnonpoistuman jako yksittäisille puille tapahtui edelleen Haapalan (1983) mallin perusteella.

Itseharvenemismallin lisääminen MELAan vaikutti huomattavasti harventamattomien metsiköiden puuston määrän ennusteisiin (Hynynen 1991). Puuston tilavuuden ja runkoluvun kehitysennusteet pienenevät huomattavasti lähestyen Koiviston (1959) esittämien luonnonnormaalien metsiköiden kehityssarjojen tasoa (kuva 5).

3.3 Hint- ja kustannustiedot

Hintoina käytettiin lyhyen aikavälin suhdannevaihteluista puhdistettuja hankintahintoja. Koska varsinaiset edullisuustarkastelut tehtiin nettotulojen avulla, oikea hintakäsite laskelmissa olisi ollut tienvarsihintaa. Tällöin nettotulot määräytyisivät tienvarsihinnan ja korjuukustannusten erotuksena. Tienvarsihinnan estimaattina käytettiin tässä hankintahintaa. Hankintahinnoista johtuen saadut tulokset soveltuvat suoraan vain sellaisille metsänomistajille, jotka myyvät puunsa hankintakaupalla.

Suhdannevaihtelut tasoitettiin laatimalla puutavaralajeittaiset trendiyhtälöt, joiden avulla laskettiin puutavaralajien hintaestimaatit vuodelle 1990. Aineistona käytettiin hakkuuvuosien 1982/83–1988/89 toteutuneiden hintojen metsälautakunnittaisia vuotuisia keskiarvoja. Kantohintoja on Metsäntutkimuslaitoksessa tilastoitu pitemmältäkin aikajaksolta, mutta hankintahintojen osalta oli aineistoa käytettävissä vasta hakkuuvuodesta 1982/83 lähtien.

Ensimmäisessä vaiheessa laadittiin mäntytykille ja -kuitupuulle trendiyhtälöt, joiden avulla estimoitiin laskelmissa käytetyt vuoden 1990 männyn trendihinnat (Pesonen ym. 1992). Seu-

Taulukko 2. Hankintahintojen trendihinnat vuonna 1990 sekä keskimääräiset toteutuneet hinnat hakkuuvuonna 1989/90 Satakunnan metsälautakunnassa.

Table 2. Delivery prices in 1990 based on linear trend equations and average actual prices in the cutting season 1989/90 in Satakunta forestry board district.

Hankintahinnat – Delivery prices			
Puutavaralaji	Trendiarvo	Trendihinta, mk/m ³	Toteut. hinta, mk/m ³
Timber assortment	Trend value	Trend price, FIM/m ³	Actual price, FIM/m ³
Mäntytukki	1,000	284	292
<i>Pine log</i>			
Kuusitukki	0,754	214	239
<i>Spruce log</i>			
Koivutukki	0,899	255	268
<i>Birch log</i>			
Mäntykuitu	1,000	176	189
<i>Pine pulpwood</i>			
Kuusikuitu	1,169	206	214
<i>Spruce pulpwood</i>			
Koivukuitu	0,818	144	169
<i>Birch pulpwood</i>			

raavaksi laadittiin toteutuneiden hintojen avulla hintasuhdeyhtälöt kuuselle ja koivulle männyn suhteen. Kuusen ja koivun trendihinnat laskettiin hintasuhdeyhtälöiden ja männyn estimoitujen trendihintojen avulla (taulukko 2). Näin estimoituja hankintahintoja korjattiin vielä simuloinnin yhteydessä tukin järeyden perusteella.

Korjuukustannukset laskettiin Metsätehon MELA-järjestelmään liittämällä puunkorjuun vaihtoehtolaskentajärjestelmällä (SUSY) vuoden 1990 kustannustasolla. MELAn SUSY-versiossa korjuuketjuihin kuului sekä manuaalisia että koneellisia vaihtoehtoja, joista valittiin halvin kussakin korjuulosuhteessa (Eskelinen & Peltonen 1982). Laskelman kustannuksiin sisältyivät hakkuun ja metsäkuljetuksen lisäksi työnjohdon-, suunnittelu- ja mittauskustannukset. Näiden kustannusten osuus oli manuaalisessa korjuussa 10–15 % ja koneellisessa korjuussa 3–8 % (Harvennushakkuiden... 1992).

Metsänhoito- ja metsänuudistamiskustannuksina käytettiin Tapion tilastoimia metsälautakunnittaisia keskikustannuksia, joihin sisältyivät sekä materiaali- että työnjohtokustannukset (taulukko 3). Tulosten laskentavaiheessa uusimmat käytettävissä olleet kustannustiedot olivat vuodelta 1989.

Taulukko 3. Keskimääräiset metsänhoito- ja metsänuudistamiskustannukset vuonna 1989 Satakunnan metsälautakunnassa.

Table 3. Average costs of silvicultural and forest regeneration work in 1989 in Satakunta forestry board district.

Työlaji – Type of work	mk – FIM
Maanpinnan muokkaus (ha)	895
<i>Scarification (ha)</i>	
Uudistusalojen raivaus (ha)	341
<i>Clearing of regeneration areas (ha)</i>	
Kylvö (ha)	1026
<i>Seeding (ha)</i>	
Männyn istutus (100 tainta)	134
<i>Pine planting (100 seedlings)</i>	
Kuusen istutus (100 tainta)	157
<i>Spruce planting (100 seedlings)</i>	
Koivun istutus (100 tainta)	206
<i>Birch planting (100 seedlings)</i>	
Taimikon hoito (ha)	839
<i>Tending of seedling stands (ha)</i>	
Männyn täydennysviljely (100 tainta)	237
<i>Supplementary planting, pine (100 seedlings)</i>	
Kuusen täydennysviljely (100 tainta)	318
<i>Supplementary planting, spruce (100 seedlings)</i>	
Koivun täydennysviljely (100 tainta)	319
<i>Supplementary planting, birch (100 seedlings)</i>	

3.4 Harvennusmallien laatiminen

3.4.1 Harvennusvaihtoehtojen tuottaminen

Harvennusmallien laadintaa varten MELAlla simuloitiin muodostetuille laskentayksiköille erilaisia harvennusvaihtoehtoja päätehakkuseen saakka. Simulointiaikana käytettiin 80 vuotta, joka oli jaettu kymmenen vuoden pituisiin simulointikausiin. Harvennus- tai päätehakkuu voitiin siis tehdä kymmenen vuoden välein. Kiertoaika sai vaihdella vapaasti kuitenkin siten, että minimikiertoaikana pidettiin 60 %:a Metsäkeskus Tapion vastaavasta kiertoaikasuosituksesta. Maksimikiertoajan pituus määräytyi puuston lähtöiän ja käytetyn simulointiajan pituuden perusteella. Vaihtoehtoisten toimenpideketjujen määrän vähentämiseksi päätehakkuu tehtiin aina avohakkuuna.

MELA-järjestelmässä on käytössä sekä runkolukuun että pohjapinta-alaan perustuvat harvennushakkuut. Runkolukuun pohjautuvia harvennusmalleja käytetään yleensä ensiharvennuksissa ja pohjapinta-alaan pohjautuvia malleja myöhemmissä harvennuksissa. Tutkimuksessa käytettiin eri harvennusmalleja siten, että alle 13 m:n keskipituudella sovellettiin runkolukuharvennuk-

sia ja yli 13 m:n keskipituudella pohjapinta-ala-harvennuksia. Runkolukuharvennuksen edellytyksenä oli lisäksi, että puuston keskiläpimitan oli oltava vähintään 8 cm ennen harvennusta.

Erilaisten harvennusten simuloimiseksi käytettiin sekä runkoluku- että pohjapinta-ala-harvennuksissa aina kolmea vaihtoehtoista harvennusvoimakkuutta. Ensiharvennuksissa jäävä puusto määriteltiin 0,8, 1,0 ja 1,2 -kertaisiksi Tapion nykyisiin runkolukusuosituksiin verrattuna, jolloin ensiharvennuksessa jäävän puuston runkoluku vaihteli puulajista ja kasvupaikasta riippuen välillä 640–1680 kpl/ha. Runkolukuun perustuvissa harvennuksissa jäävän puuston määrä sidottiin Tapion suosituksiin, koska lähtötilanteessa laskenta-aineiston runkoluvut vaihtelivat voimakkaasti.

Pohjapinta-alaan perustuvissa harvennuksissa harvennusvoimakkuus määritettiin poistettavan puuston määrän perusteella. Vaihtoehtoisina harvennusvoimakkuuksina käytettiin 15, 35 ja 50 % hakkuuta edeltävästä pohjapinta-alasta. Harvennusvoimakkuus vaihteli siten lievästä hyvin voimakkaaseen harvennukseen. Samoin kuin runkolukuun perustuvat harvennukset myös nämä kolme harvennusvoimakkuutta olivat keskenään vaihtoehtoisia, jolloin jokaisella harvennuskerralla simuloitiin aina kolme erilaista harvennusta.

Vaihtoehtoisista harvennuksista johtuen harvennusvoimakkuudet saattoivat vaihdella saman toimenpideketjun harvennuksissa. Siten oli mahdollista soveltaa esim. kiertoajan alussa voimakkaita harvennuksia ja kiertoajan lopussa lievempiä harvennuksia. Useasta harvennusvoimakkuudesta ja kiertoajan vaihtelusta johtuen yhdelle laskentayksikölle simuloitiin suurimmillaan yli 20 000 erilaista kehitysvaihtoehtoa.

Harvennusmallien laadintaa varten jokaiselle laskentayksikölle valittiin simuloituista vaihtoehtoista tuottoarvon maksimoiva toimenpideketju. Ns. optimiketjun valinta tehtiin ilman rajoitteita erikseen kolmen ja viiden prosentin reaalkoroilla. Tuottoarvolla tarkoitettiin tulevaisuudessa saatavien nettotulojen nykyarvoa eli nykyhetken diskontattujen tuottojen ja kustannusten erotusta. Tuottoarvon avulla saatiin eripituisten kiertoaikojen ja eri ajankohtina tehtyjen hakkuiden nettotulot vertailukelpoisiksi. Tuottoarvo voidaan määrittää seuraavasti (esim. Kilkki 1968, 1987):

$$P = \frac{\sum_{t=q+1}^u R_t r^{u-t} - \sum_{t=q+1}^u C_t r^{u-t} + L}{r^{u-q}} \quad (3.1)$$

jossa P = metsikön tuottoarvo
 R_t = hakkuutulot vuonna t
 C_t = kustannukset vuonna t
 L = paljaan maan arvo
 u = kiertoaika
 q = metsikön tämänhetkinen ikä
 r = 1+i
 i = korkokanta

Tuottoarvon laskennassa tarvittava paljaan maan arvo L määritetään Faustmannin kaavalla (esim. Kilkki 1968):

$$L = \frac{\sum_{t=1}^u R_t r^{u-t} - \sum_{t=1}^u C_t r^{u-t}}{r^u - 1} \quad (3.2)$$

Teknisesti tuottoarvo laskettiin MELAssa diskonttaamalla simuloinnin alkuhetken toimenpideketjun tulot ja kustannukset sekä lisäämällä simuloinnin lopetushetkellä olevan puuston hakkuuarvon ja maanarvon nykyarvo (Jämsä 1991). Tuottoarvon laskennassa käytettiin 150 vuoden simulointi-aikaa. Puuston hakkuuarvo lopetushetkellä estimoitiin puuston tienvarsiarvon ja avohakkuun korjuukustannusten sekä uudistusalan raivauskustannusten erotuksena. MELAssa käytetyt maanarvot olivat metsälautakunta-, kasvupaikkatyyppi- ja korkokantaakohtaisia vakioita, jotka laskettiin etukäteen käyttäen hyväksi edellä mainittuja vaihtoehtoisia harvennusvoimakkuuksia.

3.4.2 Harvennusmallien laatiminen lineaarisella sekamallilla

Harvennusmallit laadittiin lineaarisesta sekamallitekniikkaa käyttäen ja aineistona olivat laskentayksiköiden optimaalisten toimenpideketjujen harvennukset. Sekamallitekniikan soveltamisen syynä oli aineiston korreloituneisuus, sillä kaikilla saman laskentayksikön havainnoilla oli yhteiset lähtöhetken puusto- ja kasvupaikkatiedot. Tämä aineiston hierarkinen rakenne olisi aiheuttanut ongelmia tavallisen regressiomallin laadinnassa (Liski & Puntanen 1976). Havaintojen autokorrelaatiota ei otettu laskelmissa huomioon.

Linearisessa sekamallissa on tavallisten kiinteiden selittävien muuttujien lisäksi mukana yksi tai useampi satunnaismuuttuja kuvaamassa aineiston hierarkista rakennetta (Goldstein 1986). Sekamalliin liittyvät satunnaismuuttajat ovat luokittelumuuttujia, joiden avulla havaintojen korreloituneisuus otetaan mallin laadintavaiheessa

huomioon. Satunnaisten luokittelumuuttujien lisäksi sekamallissa voidaan käyttää myös kiinteitä luokittelumuuttujia (Searle 1987).

Optimiketjuihin kuuluvien harvennusten avulla mallitettiin erikseen harvennuksia edeltänyttä (leimausrajaa) ja harvennusten jälkeistä pohjapinta-alaa (leimaustavoitetta) valtapituuden avulla. Valtapituudella tarkoitettiin sadan paksuimman puun keskipituutta hehtaarilla. Lineaarisen sekamallin muoto ennen harvennusta oli

$$G_{ij} = a_0 + a_1 Hdom_{ij} + a_2 Hdom_{ij}^2 + B_i + e_{ij} \quad (3.3)$$

jossa G_{ij} = laskentayksikön i pohjapinta-ala ennen harvennusta j
 $Hdom_{ij}$ = laskentayksikön i valtapituus ennen harvennusta j
 B_i = laskentayksikön i satunnaisvaikutus
 e_{ij} = satunnainen virhetermi

Mallin perusmuoto oli sama myös harvennuksen jälkeistä pohjapinta-alaa mallitettaessa. Satunnaismuuttujana mukana olleella laskentayksiköllä

mallin satunnaisvaihtelu jaettiin kahteen komponenttiin: laskentayksiköiden väliseen ja laskentayksiköiden sisäiseen vaihteluun. Laskentayksiköiden sisäinen vaihtelu edusti sekamallin selittämätöntä satunnaisvaihtelua, jota saatiin satunnaismuuttujan avulla pienennettyä.

Harvennussmalleihin liittyviä optimaalisia kiertoaikoja ei määritelty suoraan mallitusaineistosta, vaan kiertoaajat estimoitiin laadittujen harvennussmallien avulla. Kiertoaikojen laskennan lähtökohtana oli paljas maa, jolle perustettiin taimikko istuttamalla mäntyä 2500 kpl/ha tai kuusta 2000 kpl/ha. Tämän jälkeen puustolle simuloitiin eripituisia kiertoaikoja viiden vuoden välein. Harvennushakkuut tehtiin laadittujen harvennussmallien mukaan ja kiertoaika päättyi aina avohakkuuseen. Simuloiduista eripituisista kiertoaikavaihtoehdoista valittiin paras tuottoarvon perusteella. Valitun vaihtoehdon puuston ikä päättehakkuehketellä tulkittiin optimaaliseksi kiertoaikaksi viiden vuoden tarkkuudella.

4 Tulokset

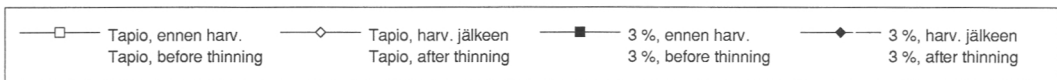
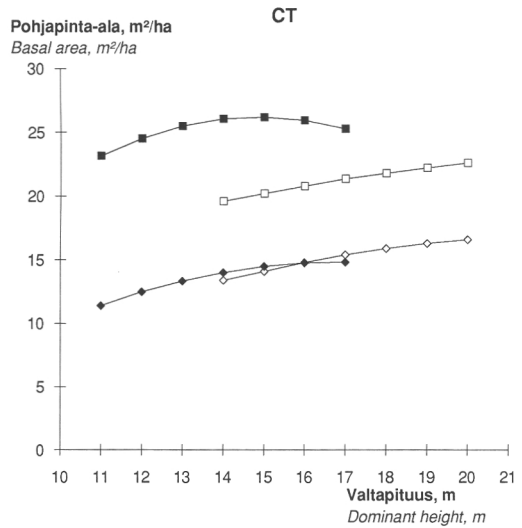
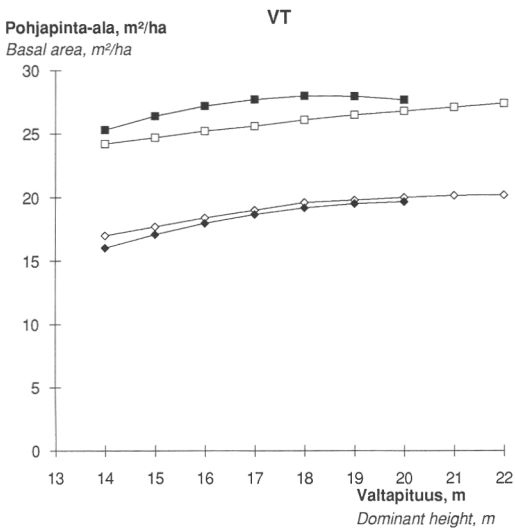
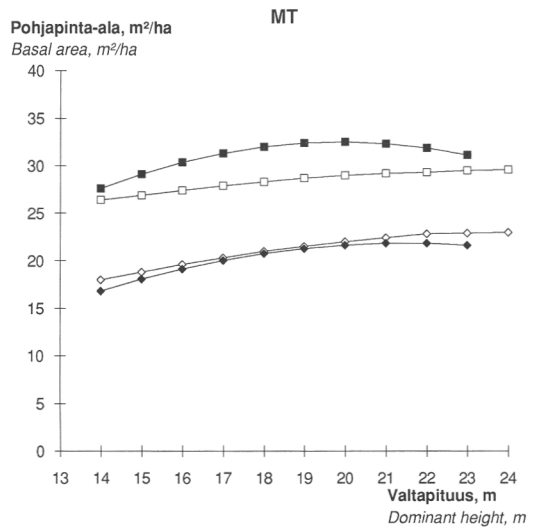
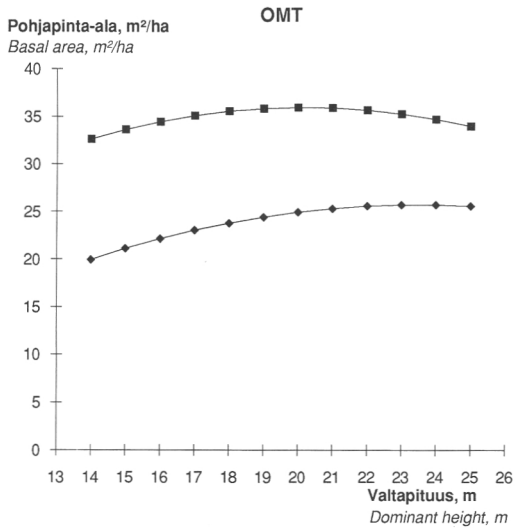
4.1 Harvennussmallit

Harvennussmallit laadittiin männiköille ja kuusikoille aineiston valinnan yhteydessä esitetyille kasvupaikoille, korkokannoille (3 ja 5 %) ja osaluueille (1–4). Erilaisten lähtöpuustojen ja vaihtoehdoisten harvennusvoimakkuuksien vuoksi simuloinneista saadut laskentayksiköiden optimaaliset toimenpideketjut sisälsivät suurta vaihtelua puustotunnuksissa, mm. pohjapinta-aloissa. Laadituissa malleissa laskentayksiköiden välinen hajonta selitti aineiston satunnaisvaihtelusta osaluueella yksi keskimäärin 41 % (liite 1) ja koko aineistossa 35 %. Harvennussmalleja käytettäessä satunnaisia metsikkövaikutuksia ei kuitenkaan estimoitu eikä malleja kalibroitu metsiköittäin, vaan malleja sovellettiin käyttämällä pelkästään mallin kiinteää osaa.

Laadittujen harvennussmallien hakkuukertymät olivat männiköissä huomattavasti suuremmat kuin Tapion harvennussmalleja sovellettaessa (kuva 6). Kolmen prosentin laskentakorolla harvennusten jälkeiset puuston määrät olivat samalla tasolla kuin Tapion harvennussmalleissa, mutta harvennuksen suorittamisen edellytyksenä oli selvästi korkeampi leimausraja. Myös mallien muoto oli erilainen, sillä MT- ja VT-männikössä harven-

nussmallien väliset pohjapinta-alaerot olivat suurimmillaan mallien sovellusalueen puolivälissä. Mallien soveltamisalueen alku- ja loppuosassa harvennukseen vaadittava leimausraja aleni lähes Tapion mallien tasolle. Alueella yksi tehtiin OMT-männikössä keskimäärin kolme harvennusta ja MT- sekä VT-männikössä kaksi harvennusta. CT-männikön harvennussmallit poikkesivat muista malleista, sillä ne edellyttivät alkuvaiheessa huomattavan suuria puuston määriä ennen harvennusta. Kiertoaajan loppua kohti mallin leimausraja laski hieman. Laadittujen mallien mukaan CT-männikköä harvennettiin kaksi kertaa kiertoaajan kuluessa.

Laadituissa harvennussmalleissa ensiharvennus tehtiin CT-männikköä lukuunottamatta vasta 13 m:n keskipituuden jälkeen, joten varsinaista runkolukuun perustuvaa harvennusohjetta ei laadittu. Ensiharvennuksen optimaalista ajankohtaa ei erikseen estimoitu, vaan pituusraja perustui simuloinnissa käytettyyn runkoluku- ja pohjapinta-alaharvennusten väliseen keskipituusrajaan. Simuloiduissa optimivaihtoehdoissa suurin osa ensiharvennuksista oli siirretty nykymalleja myöhäisemmäksi ja tehty pohjapinta-alaan perustuvina harvennuksina. CT-männikön mallitusaineistossa esiintyi runsaasti myös runkoluku-



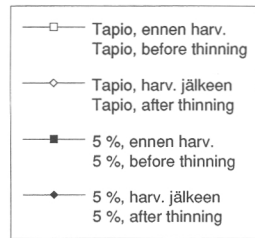
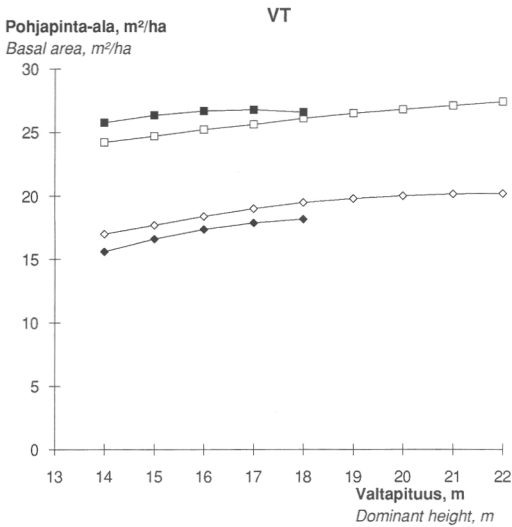
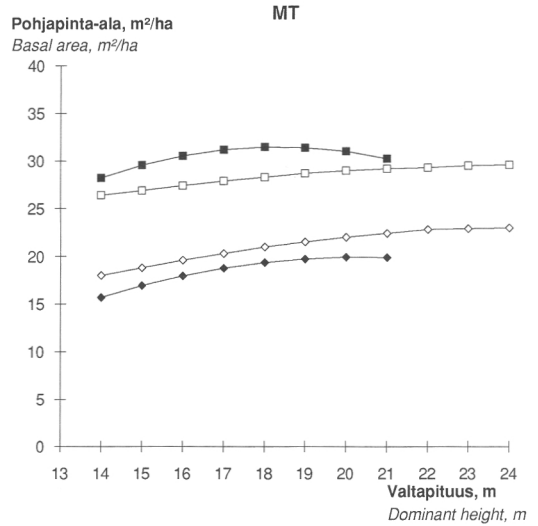
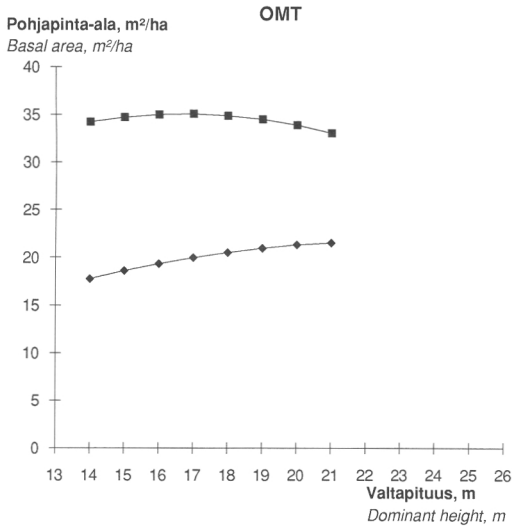
Kuva 6. Kolmen prosentin tuottoarvoon perustuvat männiköiden harvennusmallit metsälautakuntien 1–5 alueella (osa-alue 1). Vertailukohtana Metsäkeskus Tapion mallit.

Fig. 6. Thinning models based on net present value of future revenues by three per cent in Scots pine stands compared with thinning models made by Forestry Center Tapio. Forestry board districts 1–5 (sub-region one). (OMT = *Oxalis-Myrtillus* type site, MT = *Myrtillus* type site, VT = *Vaccinium* type site, CT = *Calluna* type site)

pohjaisia harvennuksia, joten nämä mallit laadittiin alkaviksi jo 10 m:n keskipituudelta. Kuitenkin myös CT-männikössä mallit tehtiin pelkästään puuston pohjapinta-alan mukaan.

Viiden prosentin harvennusmalleissa suuriin

hakuukertymiin vaikuttivat myös harvennusten jälkeiset alhaiset pohjapinta-alatasot (kuva 7). Harvennuksiin vaadittavat leimausrajat olivat koko ajan korkeammalla tasolla kuin nykyisissä harvennussuosituksissa, mutta erot pienenevät



Kuva 7. Viiden prosentin tuottoarvoon perustuvat männiköiden harvennusmallit metsälautakuntien 1–5 alueella (osa-alue 1). Vertailukohtana Metsäkeskus Tapiion mallit.

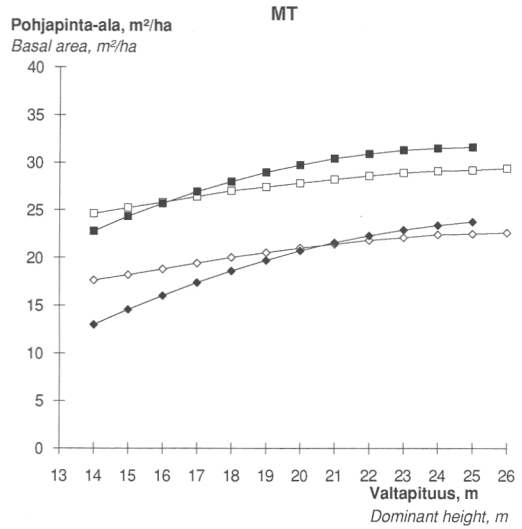
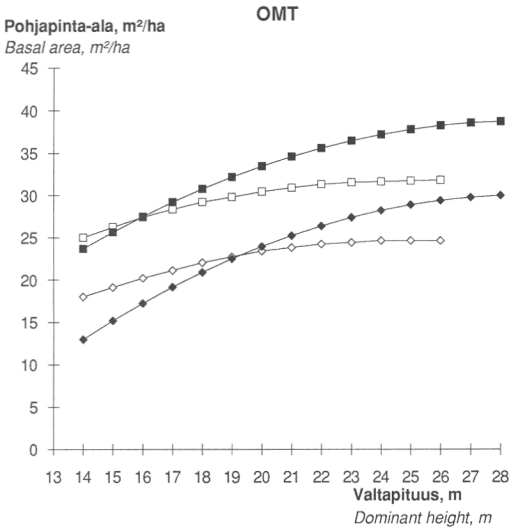
Fig. 7. Thinning models based on net present value of future revenues by five per cent in Scots pine stands compared with thinning models made by Forestry Center Tapio. Forestry board districts 1–5 (sub-region one).

kiertoajan loppua kohti. Osa-alueella yksi harvennuskerrat vaihtelivat männiköissä kasvupaikasta riippuen yhdestä (OMT) kahteen (MT ja VT). Mallitusaineiston vähäisten harvennushakuiden vuoksi CT-männiköille ei laadittu harvennusmallia viiden prosentin korkokannalla.

Kuusikoiden harvennusmallit poikkesivat selvästi nykyisistä suosituksista ensimmäisen harvennuksen alhaisen leimaustavoitteen vuoksi (kuva 8). Kiertoaikojen loppupuolella laadittujen mallien edellyttämät pohjapinta-alat nousivat lähemmäksi Tapiion harvennusmallien tasoa ja lehtomaisella kasvupaikalla puuston pohjapinta-ala harvennuksen jälkeen oli jo huomattavasti korkeammalla kuin Tapiion malleja sovel-

lettaessa. Mallien edellyttämät harvennusvoimakkuudet olivat kuusikoissa koko ajan nykyistä käytäntöä suuremmat. Myös kuusikoissa ensiharvennusta siirrettiin nykyisiä ohjeita myöhemmäksi eli aikaisintaan 13 m:n keskipituudelle. Osa-alueella yksi tehtiin sekä OMT- että MT-kuusikossa kolme harvennusta kolmen prosentin korkokannalla.

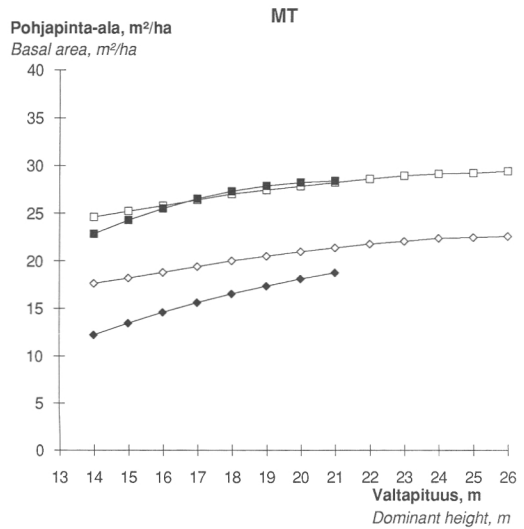
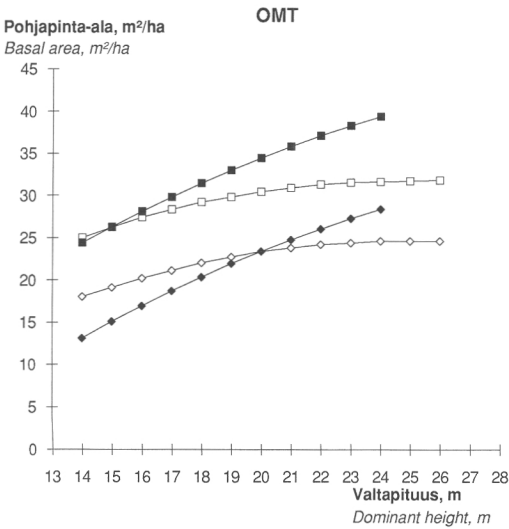
OMT-kuusikossa koron nostaminen kolmesta viiteen prosenttiin vaikutti vain vähän harvennusmallien tasoon. Korkokannan vaikutus oli suurempi MT-kuusikossa, jossa sekä leimausraja että leimaustavoite oli kiertoaajan loppupuolella huomattavasti alempana kuin kolmen prosentin malleilla (kuva 9). Korkokannan nostamisen



□ Tapio, ennen harv. ◇ Tapio, harv. jälkeen ■ 3 %, ennen harv. ◆ 3 %, harv. jälkeen
 Tapio, before thinning Tapio, after thinning 3 %, before thinning 3 %, after thinning

Kuva 8. Kolmen prosentin tuottoarvoon perustuvat kuusikoiden harvennusmallit metsälautakuntien 1–5 alueella (osa-alue 1). Vertailukohtana Metsäkeskus Tapijon mallit.

Fig. 8. Thinning models based on net present value of future revenues by three per cent in Norway spruce stands compared with thinning models made by Forestry Center Tapio. Forestry board districts 1–5 (sub-region one).



□ Tapio, ennen harv. ◇ Tapio, harv. jälkeen ■ 5 %, ennen harv. ◆ 5 %, harv. jälkeen
 Tapio, before thinning Tapio, after thinning 5 %, before thinning 5 %, after thinning

Kuva 9. Viiden prosentin tuottoarvoon perustuvat kuusikoiden harvennusmallit metsälautakuntien 1–5 alueella (osa-alue 1). Vertailukohtana Metsäkeskus Tapijon mallit.

Fig. 9. Thinning models based on net present value of future revenues by five per cent in Norway spruce stands compared with thinning models made by Forestry Center Tapio. Forestry board districts 1–5 (sub-region one).

Taulukko 4. Harvennusmallien optimaaliset kiertoajat osa-alueella yksi.

Table 4. Optimum rotations of the thinning models in sub-region one.

	Kiertoajat, v – Rotations, yr				
	Puuston ikään perustuva Based on stand age			Keskiläpimitaan perustuva Based on stand diameter	
	3 %	5 %	Tapio ¹⁾	Tapio ²⁾	D, cm ¹⁾
Mänty – Scots pine					
OMT	65	50			
MT	65	55	80–90	70–75	29–31
VT	70	60	90–100	70–75	27–29
CT	90	55 ³⁾	110–120	90–95	25–27
Kuusi – Norway spruce					
OMT	75	60	80–90	60–65	28–30
MT	80	60	90–100	70–75	26–28

¹⁾ Yksityismetsien hoitosuosituks (Metsänhoitosuosituks 1989).
Based on criterions applied in private forests (Metsänhoitosuosituks 1989).

²⁾ Tapion keskiläpimitäntekriteerin mukaisesti simuloitu kiertoaika.
Rotations simulated by stand diameter criterion applied in private forests.

³⁾ Kiertoaika harventamattomissa metsiköissä.
Rotation in unthinned stands.

seurauksena harvennuskerrat vähenivät OMT-kuusikossa kahteen ja MT-kuusikossa yhteen harvennukseen.

Ensiharvennuksen ajankohdan, suurempien hakkuukertymien ja harvennusten lukumäärän lisäksi laaditut harvennusmallit erosivat yksityismetsien käsittelysuosituksista metsikön ikään perustuvien kiertoaikojen osalta. Nykyisissä suosituksissa ensisijainen uudistamiskriteeri on kuitenkin keskiläpimitä, jonka käyttö selvästi pienensi harvennusmallien kiertoajoissa esiintyneitä eroja. Männiköissä kolmen prosentin harvennusmallien kiertoajat vastasivat Tapion läpimitäsuositusten mukaan simuloituja kiertoaikoja (taulukko 4). Ero Tapion ikäsuositukseen oli keskimäärin 20 vuotta osa-alueella yksi. Kuusikoissa Tapion läpimitäohjeen mukaisesti simuloitujen kiertoajat olivat 5–10 vuotta lyhyemmät ja ikään perustuvat kiertoajat saman verran pitemmät kuin kolmen prosentin korkokannalla laadittujen mallien kiertoajat.

Korkokannan nostaminen kolmesta viiteen prosenttiin lyhensi laadittujen mallien kiertoaikoja männiköissä 10–15 vuotta. Esim. osa-alueella yksi VT-männikön kiertoaika lyheni kymmenen vuotta ja oli viiden prosentin korkokannalla ainoastaan 60 vuotta. Korkokannan nostaminen

lyhensi kiertoaikoja kuusikoissa keskimäärin enemmän kuin männiköissä (15–20 vuotta).

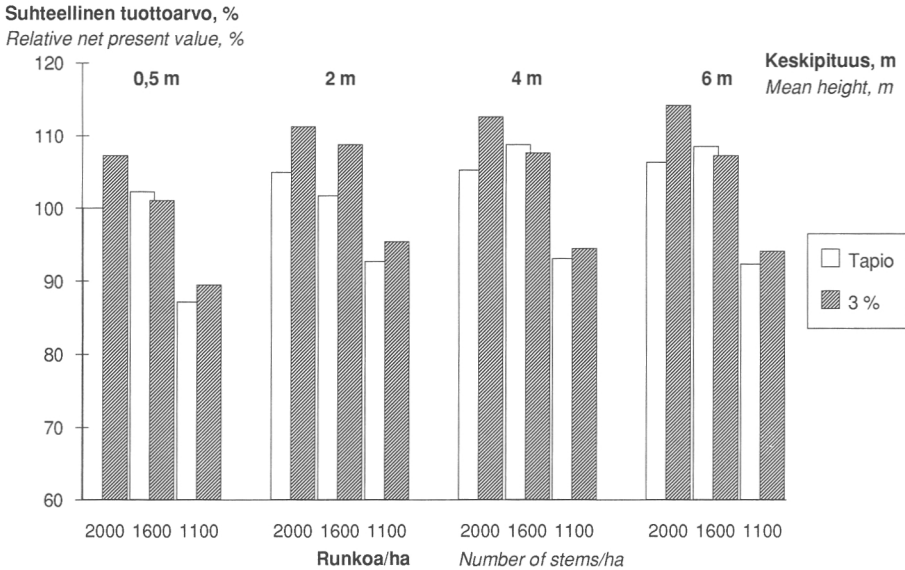
MT- ja VT-männiköissä harvennusmallien erot osa-alueiden välillä olivat yleensä pienet (kuva 6, liitteet 2–3). Osa-alueella neljä mallit edellyttivät ensimmäisissä harvennuksissa huomattavan korkeaa leimausrajaa, jolloin harvennusten minimikertymät olivat suuremmat kuin muilla osa-alueilla. OMT- ja CT-männiköissä osa-alueiden väliset erot olivat suuremmat. Kiertoajan loppupuolella pohjapinta-alatasot alenivat yleisesti sekä ennen harvennusta että harvennuksen jälkeen, mikä korostui korkokannan kasvaessa ja kasvupaikan huonontuessa. Korkokannan nostaminen viiteen prosenttiin suurensi hieman alueiden välisiä eroja. Malleihin liittyvien kiertoaikojen erot eri alueiden välillä olivat suurimmillaan 10 vuotta (liite 4).

OMT-kuusikoissa osa-alueiden yksi ja kaksi harvennusmallien erot olivat hyvin pienet. Sen sijaan alueiden kolme ja neljä harvennusmallit edellyttivät kiertoajan alkupuolella suurempaa puuston määrää kuin alueiden yksi ja kaksi mallit (kuva 8, liitteet 5–6). Erot tasoittuivat kiertoajan loppupuolella. MT-kuusikossa tulokset olivat samansuuntaiset kuin OMT-kuusikossa, mutta erot alueiden välillä olivat hieman pienemmät. Kuusikoissa harvennusten jälkeisten puustojen pohjapinta-alojen alentuminen kiertoajan lopussa oli huomattavasti lievempää kuin männiköissä. Alueella neljä MT-kuusikolle ei laadittu harvennusmallia viiden prosentin korkokannalla (liite 6).

4.2 Taimikon harvennuksen ajankohta

Taimikonhoidon ja harvennushakkuiden yhteensovittamista sekä optimaalista taimikon harvennusta tutkittiin neljän vaihtoehtoisen ajankohdan (taimikon harvennus keskipituudella puoli, kaksi, neljä ja kuusi metriä) ja kolmen ohjetihedden (taimikon tiheys harvennuksen jälkeen 2000, 1600, 1100 kpl/ha) avulla. Taimikon harvennuksen jälkeen puustoa käsiteltiin sekä Tapion että kolmen prosentin harvennusmallien mukaan.

Taimikoiden oletettiin perustetun istuttamalla mäntyä 2500 kpl/ha tai kuusta 2000 kpl/ha. Viljelyn oletettiin onnistuneen niin hyvin, että täydennysviljelyä ei tarvittu. Esitettävät tulokset koskevat ainoastaan taimikon harvennusta, jolla tarkoitettiin kasvatuskelpoisen puuston harventamista haluttuun tiheyteen. Kasvatuskeltottoman lehtipuuston poistamista ja taimikon heinäystä ei



Kuva 10. Kolmen prosentin suhteellisten tuottoarvojen riippuvuus taimikon harvennuksen ajankohdasta ja voimakkuudesta VT-männikössä osa-alueella yksi. Varsinaiset harvennushakkuut tehty Tapion ja kolmen prosentin harvennussmallien mukaan.

Fig. 10. Dependence of relative net present value of future revenues (3 % discount rate) on optimum timing and grade of tending Scots pine seedling stands (VT) in subregion one. Applied thinning models based on Tapio's recommendations and net present values by three per cent.

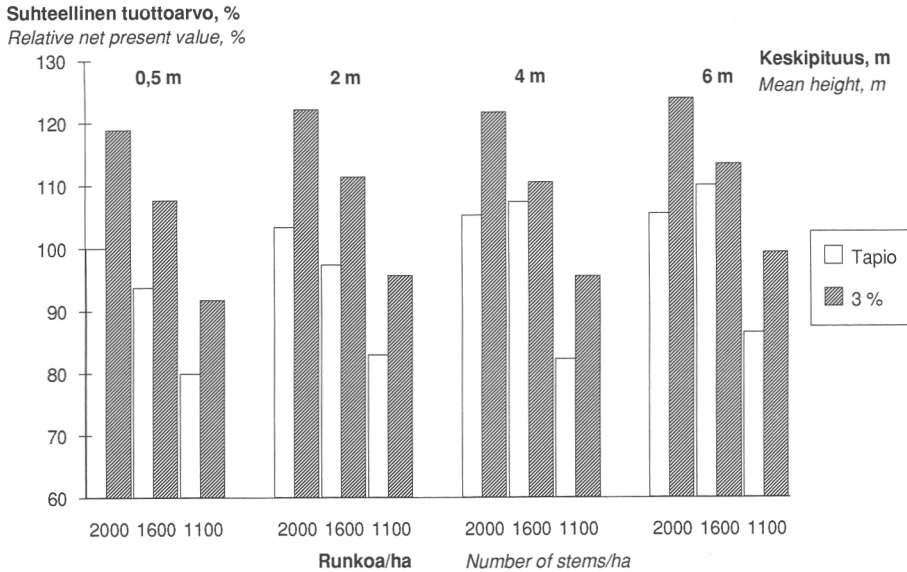
tässä otettu huomioon, koska niiden oletettiin olevan samat kaikilla vaihtoehdoilla.

Laskelmien perusteella metsikön taloudellinen tulos oli sitä parempi mitä myöhemmin taimikon harvennus tehtiin. Puolukkatyyppin mäntytaimikon harvennuksen optimaalinen ajankohta oli kuuden metrin pituudella, mutta erot neljän ja kuuden metrin välillä olivat pienet (kuva 10). Taimikon harvennuksen ajankohtaa tärkeämpi seikka oli harvennuksen jälkeinen taimikon tiheys, sillä puuston määrää ei saanut päästää liian alhaiseksi tuotos- ja tuottotappioiden vuoksi. Kolmen prosentin harvennussmalleja käytettäessä taimikon optimaalinen runkoluku oli VT-männikössä 2000 kpl/ha, josta runkoluvun pudottaminen 1600 kpl/ha:seen kuuden metrin pituudella johti osa-alueesta riippuen 6–8 %:n tuottoarvotappioihin. Voimakkain taimikon harvennus (runkoluku 1100 kpl/ha) oli tuottoarvolla mitaten selvästi heikoin vaihtoehto, tappiot 18–25 %. Kun varsinaiset harvennushakkuut tehtiin Tapion harvennussmallien mukaisesti, taimikon harvennuksessa kannatti jättää keskimäärin 1600 runkoa/ha. Tuottoarvoerot tiheyksien 1600 ja 2000 runkoa/ha olivat kuitenkin pienet (2–12 %).

Taimikon harvennuksen ajankohdasta ja voi-

makkuudesta riippumatta metsikön tuottoarvo oli kolmen prosentin harvennussmalleja sovellettaessa suurempi kuin Tapion mallien mukaan toimittaessa. Siten parhaaseen taloudelliseen tulokseen päästiin yhdistämällä kuuden metrin pituudella ja tiheyteen 2000 runkoa/ha tehtyyn taimikon harvennuksen myöhäinen ensiharvennus ja tekemällä harvennushakkuut nykyisiä suosituksia voimakkaampina. Tällöin pelkästään myöhään tehdystä ensiharvennuksesta ja harvennussmalleista johtuva tuottoarvolisä oli osa-alueesta riippuen 7–26 %.

Myös MT-kuusikossa taloudellisesti paras vaihtoehto oli siirtää taimikon harvennus kuuden metrin keskipituudelle (kuva 11). Kasvatettavan puuston määrää ei saanut päästää liian pieneksi, jos myöhemmät varsinaiset harvennukset tehtiin kolmen prosentin malleilla. Siirtyminen tiheyteen 1600 kpl/ha alensi metsikön tuottoa suhteellisesti enemmän kuusikoissa (9–15 %) kuin männiköissä, jossa luonnonpoistuman merkitys oli suurempi. Kasvatettava runkoluku 1100 kpl/ha merkitsi kuusikossa 20–33 %:n tuottotappioita kiertoajan kuluessa. Pienen luonnonpoistuman vuoksi taimikon harvennus kannatti tehdä kuusikossa lievänä ja pienentää puuston runkolukua suhteellisen voimakkaasti vasta ensimmäisessä



Kuva 11. Kolmen prosentin suhteellisten tuottoarvojen riippuvuus taimikon harvennuksen ajankohdasta ja voimakkuudesta MT-kuusikossa osa-alueella yksi. Varsinaiset harvennushakkuut tehty Tapion ja kolmen prosentin harvennusmallien mukaan.

Fig. 11. Dependence of relative net present value of future revenues (3 % discount rate) on optimum timing and grade of tending Norway spruce seedling stands (MT) in subregion one. Applied thinning models based on Tapio's recommendations and net present values by three per cent.

harvennuksessa. Näin menetellen varmistettiin ensiharvennuksessa riittävä hakkuukertymä.

Jos varsinaiset harvennushakkuut tehtiin Tapion harvennusmallien mukaan, taimikko kannatti harventaa myös MT-kuusikossa tiheyteen 1600 runkoa/ha. Tämä seikka korostui sitä enemmän

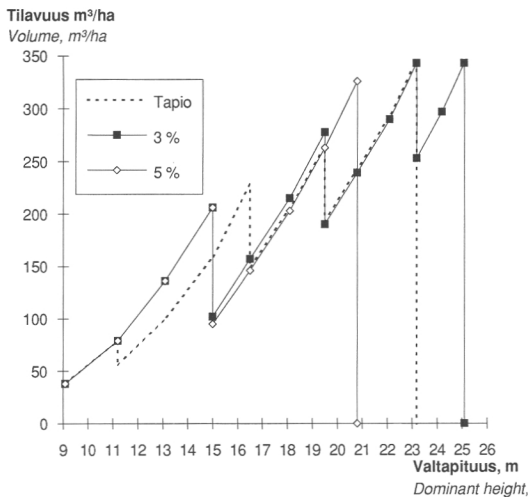
mitä pitemmälle taimikon harvennusta siirrettiin. Kuuden metrin pituudella tehdyn taimikon harvennuksen aiheuttama tuottoarvotappio oli 0–6 %, jos taimikko jäi liian tiheäksi (2000 runkoa/ha) ja 21–33 %, jos taimikko harvennettiin liian harvaksi (1100 runkoa/ha).

5 Harvennusohjelmien vertailu

Laadittuja harvennusmalleja verrattiin nykyisiin käytössä oleviin Tapion harvennusmalleihin. MT-kuusikoille ja VT-männiköille tehtyjen laskelmien lähtökohtana oli paljas maa ja metsänviljely (mäntyä 2500 kpl/ha tai kuusta 2000 kpl/ha). Tarkastelujakson pituutena käytettiin yhtä kiertoaikaa ja harvennus- tai päätehakkuu oli mahdollista tehdä viiden vuoden välein. Tapion suositusten osalta sovellettiin samanaikaisesti sekä puuston ikään että keskiläpimittaan perustuvia uudistamiskriteerejä. Vertailut tehtiin hakkuukertymien ja tuottoarvojen avulla seuraavien harvennusohjelmien suhteen:

- Ohjelma I Tapion harvennusmallit.
- Ohjelma II Ei harvennuksia (Tapion kiertoaikakriteerit).
- Ohjelma III Ensiharvennuksen siirtäminen vähintään 13 metrin keskipituudelle (myöhemmät hakkuut Tapion harvennusmallien mukaan).
- Ohjelma IV Laaditut harvennusmallit kolmen prosentin korolla.
- Ohjelma V Laaditut harvennusmallit viiden prosentin korolla.

Tilavuuden kehityksessä ja hakkuuiden ajoituksessa oli ohjelmien välillä suuria eroja. Ensiharvennuksen siirtämisen vuoksi ensimmäinen harvennus tehtiin ohjelmissa III–V vasta 44 vuoden iässä ja 15 m:n valtapituudella osa-alueen yksi

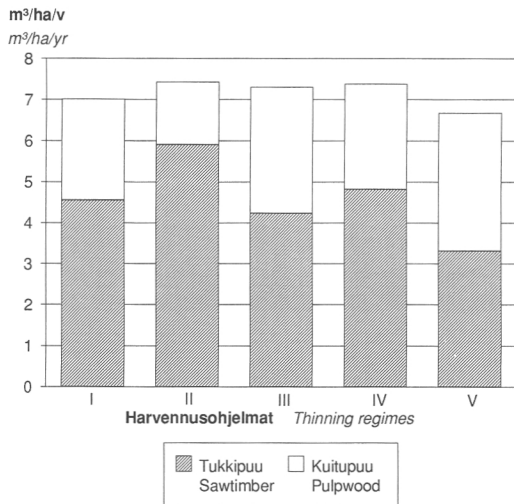


Kuva 12. Harvennuskäsittelyt ja tilavuuden kehitys erilaisilla harvennuskäsittelyillä MT-kuusikossa osa-alueella yksi. a) Tapion harvennuskäsittely (harvennuskäsittely I), b) kolmen (IV) ja c) viiden prosentin (V) tuottoarvoon perustuvat harvennuskäsittelyt.

Fig. 12. Thinning regimes and development of stand volume based on different thinning models in Norway spruce stand (MT) in sub-region one. a) thinning models applied in private forests (thinning regime I), b) thinning model based on net present value of future revenues by three per cent (IV) and c) by five per cent (V).

MT-kuusikossa (kuva 12). Varsinkin kolmen ja viiden prosentin harvennuskäsittelyillä ensimmäinen harvennus oli huomattavasti voimakkaampi kuin Tapion mallilla, jonka mukainen ensiharvennus tehtiin jo 11 m:n valtapiisuudella runkolukuun 1400 kpl/ha. Erilaisista ensiharvennuksen ajankohdista huolimatta sekä Tapion että kolmen prosentin mallien mukaan harvennettiin kolme kertaa kiertoajan kuluessa.

Läpimitaan perustuvasta uudistamiskriteeristä johtuen päätehakkuu tehtiin Tapion malleilla ensiharvennuksen ajankohdasta riippumatta jo 73 vuoden iällä. Kolmen prosentin malleilla kiertoaika oli kymmenen vuotta pitempi. Tapion harvennuskäsittelyiden alhaisista kertymävaatimuksista johtuen ohjelmassa III harvennuskertoja oli yhteensä kolme, vaikka ensiharvennus tehtiin suhteellisen myöhään ja kiertoaika oli ohjelmaan IV verrattuna lyhyt. Viiden prosentin harvennuskäsittelyä sovellettaessa tehtiin vain yksi erittäin voimakas harvennus pohjapinta-alaan 14 m²/ha ja päätehakkuu ajoittui puuston iälle 64 vuotta. Harventamattoman MT-kuusikon puuston järetyminen hidastui niin paljon, että päätehakkuu teh-



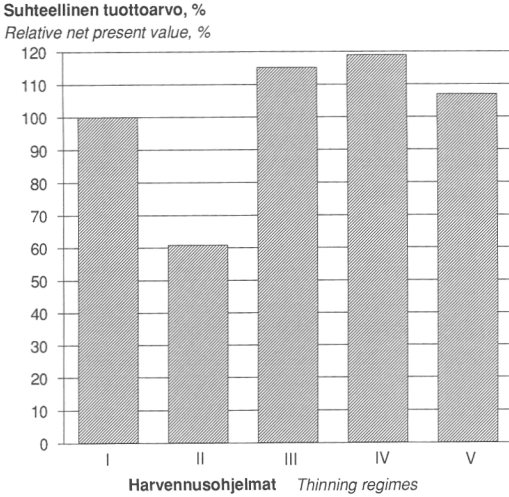
Kuva 13. Kiertoajan hakkuukertymät MT-kuusikossa eri harvennuskäsittelyjen mukaan osa-alueella yksi. Harvennuskäsittelyt, ks. teksti.

Fig. 13. Removals during rotation in Norway spruce stand (MT) based on alternative thinning regimes in sub-region one. Thinning regimes: I) thinning models applied in private forests (Tapio), II) unthinned stand, III) thinning models applied in private forests with first thinning postponed to mean height 13 m, IV) thinning models based on net present value of future revenues by three per cent and V) by five per cent.

tiin metsikön iän perusteella (93 vuotta).

Jos MT-kuusikon kasvatuksen tavoitteena olisi pidetty vain mahdollisimman suurien hakkuukertymien, parhaaseen tulokseen olisi päästy laiminlyömällä harvennuksella kokonaan (kuva 13). Erot ohjelmissa III ja IV saavutettiin hakkuukertymiin olivat kuitenkin pienet. Harventamattoman vaihtoehdon suuret keskimääräiset hakkuukertymät olivat mahdollista kuusikoiden vähäisen luonnonpoistuman ja pitkän kiertoajan ansiosta. Pitkästä kiertoajasta johtuen myös tukkipuun oli suurin pelkästään päätehakkuita soveltavassa ohjelmassa (79 % koko kiertoajan hakkuukertymästä). Muissa ohjelmissa tukkipuun osuus koko hakkuukertymästä oli keskimäärin 63 %. Viiden prosentin harvennuskäsittelyillä hakkuukertymät olivat pienimmät ja lyhyestä kiertoajasta johtuen tukkipuun suhteellinen osuus hakkuukertymästä (50 %) oli huomattavasti pienempi kuin muissa vaihtoehdoissa.

Ohjelmissa I, III, IV ja V harvennushakkuista saatavan puun osuus koko hakkuukertymästä oli keskimäärin 36 %. Voimakkaista harvennuksista johtuen kolmen prosentin malleja käytettäessä



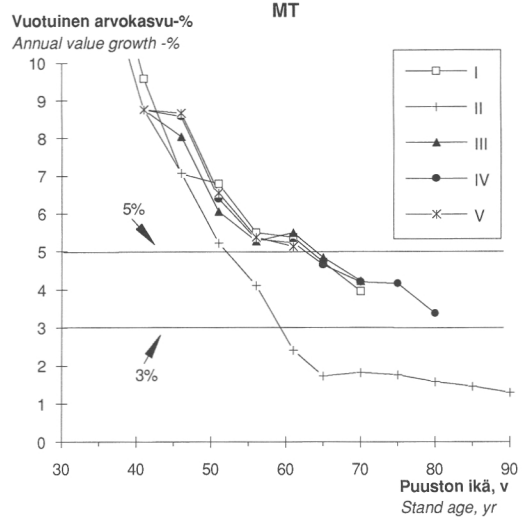
Kuva 14. Suhteelliset tuottoarvot kolmen prosentin las-
kentakorolla MT-kuusikossa eri harvennusohjelmien
mukaan osa-alueella yksi. Harvennusohjelmat, ks.
teksti.

Fig. 14. Relative net present values of future revenues
(discount rate 3 %) in Norway spruce stand (MT)
based on alternative thinning regimes in sub-region
one. Thinning regimes, see Fig. 13.

harvennusten osuus koko kertymästä oli 45 %. Vastaava luku oli Tapion malleilla vain 33 %, mutta ensiharvennuksen siirtäminen ohjelmassa III nosti harvennuskertymän osuuden 41 %:iin. Yhdestä harvennuskerrasta johtuen viiden prosentin malleilla harvennuspuun osuus oli vain 25 %.

Kolmen prosentin korkokannalla diskontattujen tuottoarvojen perusteella ohjelmat III ja IV olivat parhaat vaihtoehdot MT-kuusikossa (kuva 14). Myös Tapion harvennusmalleja käytettäessä ensiharvennuksen siirtäminen myöhemmäksi oli edullisempi vaihtoehto kuin aikainen ensiharvennus valtapituudella 11 m, sillä pelkästään ensiharvennuksen siirtämisellä saavutettu tuottoarvoisä oli eri osa-alueilla 8–41 %. Kolmen prosentin harvennusmalleilla metsikön tuottoarvot olivat 16–58 % suuremmat kuin vertailukohtana käytettyjä Tapion malleja sovellettaessa.

Metsikön taloudellisen tuloksen kannalta harvennusten laiminlyönti oli selvästi heikoin vaihtoehto. Vaikka hakkuukertymien perusteella harventamaton vaihtoehto oli paras, tuottoarvolla mitaten harventamattomuudesta aiheutui MT-kuusikossa osa-alueesta riippuen 39–61 %:n tuottoarvotappiot. Harventamattoman vaihtoehdon edullisuutta heikensi muita vaihtoehtoja pitempi kiertoaika, sillä laskelmissa käytetty kolmen pro-



Kuva 15. Vuotuinen arvokasvuprosentti MT-kuusikossa
eri harvennusohjelmien mukaan osa-alueella yksi.
Harvennusohjelmat, ks. teksti.

Fig. 15. Annual value growth per cent in Norway spruce
stand (MT) based on alternative thinning regimes in
sub-region one. Thinning regimes, see Fig. 13.

sentin korkokanta korosti aikaisia nettotuloja ja siten harvennusten edullisuutta. Mitä suurempaa laskentakorkoa siis sovellettiin, sitä suurempi oli myös harventamattomuudesta johtuva tuottoarvotappio. Suuresta tukkikertymästä johtuen harventamaton vaihtoehto olisi hyvin pientä korkokantaa käytettäessä saattanut olla kuusikoissa kilpailukykyinen muiden hakkuuohjelmien kanssa.

Harventamattomaa vaihtoehtoa lukuunottamatta puuston arvokasvuprosentissa kiertoajan kuluessa esiintyneet erot olivat pienet (kuva 15). Pelkästään päätehakkuita soveltavassa vaihtoehdossa puuston arvokasvuprosentti laski nopeasti puuston suuren määrän vuoksi 1–2 %:n tasolle, johon se vakiintui päätehakkuuseen asti. Tässä ohjelmassa parhaan taloudellisen tuloksen saavuttamiseksi päätehakkuu olisi pitänyt tehdä selvästi aikaisemmin. Muissa ohjelmissa arvokasvuprosentti pysyi vähintään kolmen prosentin tasolla koko kiertoajan ja oli alimmillaan parhaaksi vaihtoehdoksi havaitulla kolmen prosentin harvennusmallilla juuri ennen päätehakkua. Ohjelmissa I, III ja V arvokasvuprosentti oli päätehakkuuhetkellä vielä selvästi korkeampi kuin kolmen prosentin laskentakorkokanta.

Tapion sekä kolmen ja viiden prosentin harvennusmallien välisiin tuottoarvoeroihin vaikuttivat lisäksi ohjelmien IV ja V mukaisten har-

Taulukko 5. Harvennusohjelmien mukaisten harvennushakkuuiden korjuukustannukset osa-alueen yksi MT-kuusikossa. Harvennusohjelmat, ks. teksti.

Table 5. Logging costs depending on thinning regimes in Norway spruce stand (MT) in sub-region one. Thinning regimes, see Fig. 13.

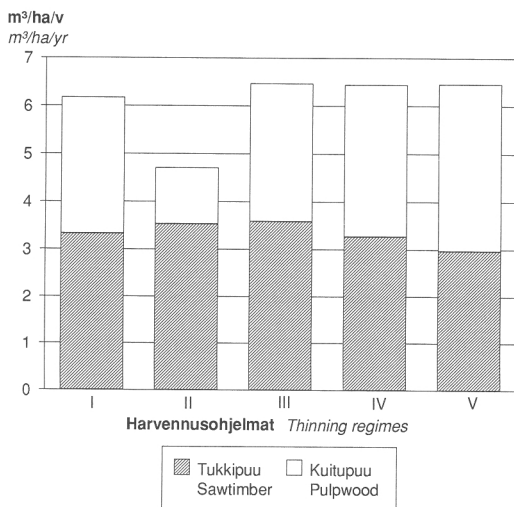
Harvennusohjelma Thinning regime	Ensiharvennus, mk/m ³ First thinning, FIM/m ³	Kaikki harvennukset, mk/m ³ All thinnings, FIM/m ³
I	164	94
III	101	86
IV	93	77
V	92	92 ¹⁾

¹⁾ Sisältää pelkästään ensiharvennuksen.
Only first thinning included.

vennusten suuremmat hakkuukertymät ja pienemmät korjuun yksikkökustannukset. Erityisesti ensiharvennuksen siirtäminen myöhemmäksi alensi harvennusten korjuukustannuksia, sillä ohjelman I pienestä ensiharvennuskertymästä johtuen korjuun yksikkökustannukset olivat n. 70 mk/m³ korkeammat kuin ohjelmien III–V ensiharvennuksissa (taulukko 5). Kaikki harvennukset mukaanlukien pienimmät korjuun yksikkökustannukset olivat kolmen prosentin malleja sovellettaessa, jolloin myös ensiharvennuksen jälkeiset harvennukset tehtiin Tapion harvennushakkuualueille voimakkaampina.

Myös VT-männiköissä kolmen ja viiden prosentin harvennushakkuuohjelmien edellyttämät ensiharvennukset olivat selvästi voimakkaammat kuin Tapion malleilla. Nykyisiä suosituksia voimakkaampien harvennusten vaikutukset näkyivät harvennusten lukumäärässä, sillä kolmen prosentin malleilla tehtiin kaksi ja Tapion malleilla kolme harvennusta kiertoajan kuluessa. Kiertoaika oli kummassakin tapauksessa sama (74 vuotta). Viiden prosentin malleilla harvennettiin vain yhden kerran ja päätehakkuu tehtiin 64 vuoden iällä.

VT-männikössä hakkuukertymäerot ohjelmien I, III, IV ja V välillä olivat suhteellisen pienet (kuva 16). Harvennusten laiminlyönnin negatiiviset vaikutukset näkyivät männiköissä selvemmin kuin kuusikoissa, sillä harventamattomuuden seurauksena keskimääräiset vuotuiset hakkuukertymät olivat selvästi pienimmät. Harventamattoman vaihtoehdon hakkuukertymän suuri tukkiosuus (75 %) johtui siitä, että muissa harvennusohjelmissä suurin osa kuitupuusta saatiin harvennushakkuista ja että luonnonpoistuma kohdistui voimakkaimmin pienikokoiseen puustoon.



Kuva 16. Kiertoajan hakkuukertymät VT-männikössä eri harvennusohjelmien mukaan osa-alueella yksi. Harvennusohjelmat, ks. teksti.

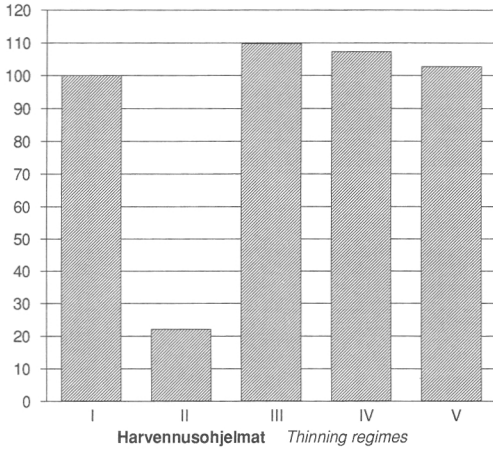
Fig. 16. Removals during rotation in Scots pine stand (VT) based on alternative thinning regimes in sub-region one. Thinning regimes, see Fig. 13.

Lyhyestä kiertoajasta johtuen viiden prosentin harvennushakkuuohjelmien tukkipuun osuus koko hakkuukertymästä oli pienin (46 %).

VT-männikössä harvennusohjelmien edullisuusjärjestys noudatti kuusikoista saatuja tuloksia, sillä tuottoarvon perusteella parhaat harvennusohjelmat olivat myöhäisen ensiharvennuksen sisältäneet ohjelmat III–V (kuva 17). Osa-alueesta riippuen ohjelma IV antoi kolmen prosentin laskentakorolla 7–19 % ja ohjelma V 3–15 % suuremmat tuottoarvot kuin ohjelma I. Myös VT-männikössä ensiharvennuksen siirtäminen oli edullista myöhemmistä harvennuksista riippumatta, sillä Tapion harvennushakkuualueille noudatettaessa pelkästään ensiharvennuksen siirrolla saavutettu tuottoarvon lisäys oli 7–16 % eri osa-alueilla.

VT-männikössä harvennusten laiminlyönnistä aiheutuneet tuottoarvotappiot olivat 60–94 %. Harventamattoman vaihtoehdon edullisuutta heikensivät metsikön hidastunut järeyskehitys ja lisääntynyt luonnonpoistuma, jonka vaikutus näkyi myös keskimääräisissä hakkuukertymissä. Hidastuva järeyskehitys vaikutti sekä päätehakkuukertymän rakenteeseen että kiertoajan pituuteen. Järeyskehitys hidastui niin paljon, että päätehakkuu tehtiin metsikön iän (90 vuotta) eikä läpimitan perusteella kuten ohjelmissä I ja III. Siten kiertoajan ainoat hakkuutulot saatiin las-

Suhteellinen tuottoarvo, %
Relative net present value, %



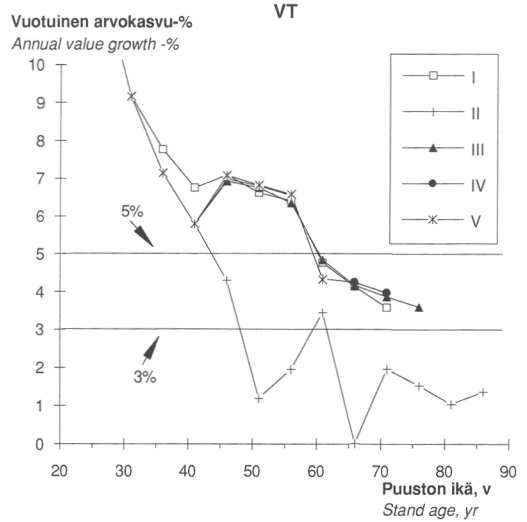
Kuva 17. Suhteelliset tuottoarvot kolmen prosentin laskentakorolla VT-männikössä eri harvennusohjelmien mukaan osa-alueella yksi. Harvennusohjelmat, ks. teksti.

Fig. 17. Relative net present values of future revenues (discount rate 3 %) in Scots pine stand (VT) based on alternative thinning regimes in sub-region one. Thinning regimes, see Fig. 13.

kennan alkuhetkestä muita ohjelmia selvästi kauempana olevasta päätehakuusta.

Männikössä puuston arvokasvuprosentin perusteella ohjelmien I, III, IV ja V olivat hyvin pienet (kuva 18). Samoin kuin MT-kuusikossa harventamattoman metsikön arvokasvuprosentti laski nopeasti alle kahden prosentin, mutta luonnonpoistuman vuoksi arvokasvuprosentti vaihteli männikössä kiertoajan loppupuoliskolla. Muissa ohjelmissa arvokasvuprosentti oli päätehakuuhetkellä 3–4 %.

Ensiharvennuksen siirtämisen seurauksena harvennusten korjuukustannukset alenivat myös VT-männikössä, sillä alhaisimmat yksikkökustannukset saavutettiin kolmen prosentin mallien mukaisilla harvennuksilla. Erot olivat kuitenkin pienemmät kuin kuusikoissa, sillä aikaisen ensiharvennuksen kustannukset olivat n. 40 mk/m³ suuremmat kuin voimakkaan ja myöhäiseen ajankohtaan siirretyn ensiharvennuksen (taulukko 6). Kaikki harvennuksot mukaan lukien ohjelmien I ja IV välinen keskimääräinen korjuukustannusero oli n. 10 mk/m³, minkä vaikutus näkyi myös tuottoarvoissa.



Kuva 18. Vuotuinen arvokasvuprosentti VT-männikössä eri harvennusohjelmien mukaan osa-alueella yksi. Harvennusohjelmat, ks. teksti.

Fig. 18. Annual value growth per cent in Scots pine stand (VT) based on alternative thinning regimes in sub-region one. Thinning regimes, see Fig. 13.

Taulukko 6. Harvennusohjelmien mukaisten harvennuksien korjuukustannukset osa-alueen yksi VT-männikössä. Harvennusohjelmat, ks. teksti.

Table 6. Logging costs depending on thinning regimes in Scots pine stand (VT) in sub-region one. Thinning regimes, see Fig. 13.

Harvennusohjelma Thinning regime	Ensiharvennus, mk/m ³ First thinning, FIM/m ³	Kaikki harvennuksot, mk/m ³ All thinnings, FIM/m ³
I	109	77
III	72	71
IV	72	67
V	72	72 ¹⁾

¹⁾ Sisältää pelkästään ensiharvennuksen.
Only first thinning included.

6 Tulosten tarkastelu

6.1 Aineiston ja laskentamenetelmän arviointi

Aineistona käytetty valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) maastoaineisto oli alueellisesti kattava ja nykymetsien rakennetta kuvaava. Laskenta-aineisto ei kuitenkaan koostunut todellisista metsiköistä, vaan mahdollisimman homogeenisten koalojen muodostamista laskentayksiköistä, joiden avulla jäljiteltiin todellisten metsiköiden sisäistä vaihtelua.

Koska aineisto oli luonteeltaan kertamittauksiin perustuvaa ja aineiston päivitys mukaan lukien kaikki esitetyt laskelmat pohjautuivat simulointeihin, MELAssa käytetyillä kasvu- ym. malleilla oli ratkaiseva vaikutus tulosten luotettavuuteen. Luotettavuuden parantamiseksi kasvumalleissa käytettiin hyväksi Siitosen (1990) tekemää kasvumallien kalibrointia, liitettiin MELAan Hynysen (1991) laatima itseharvenemismalli, käytettiin Metsätehon laatimaa puunkorjuun vaihtoehtolaskentajärjestelmää (SUSY) ja tarkistettiin harvennusten tekniseen suorittamiseen liittyviä yksityiskohtia.

Käytetyn laskentamenetelmän heikkouksia olivat mm. puuston kasvun ennustaminen voimakkaiden harvennusten jälkeen sekä tukki- ja kuitupuuosuuksien määrittäminen. Käytännön laskelmissa on havaittu, että MELAlla yliarvioidaan hakkuista saatavan tukkipuun määrää. Siten MELAlla tehdyt laskelmat korostavat liikaa voimakkaiden taimikon harvennusten ja ensiharvennusten edullisuutta, koska tehtyjen toimenpiteiden epäedullisia vaikutuksia mm. puun tekniseen laatuun ei oteta riittävästi huomioon. Tästä johtuva virhe on käytännössä pieni, koska tässä tutkimuksessa optimaalisiksi havaitut taimikon harvennukset tehtiin myöhäisessä vaiheessa ja suhteellisen lievänä. Lisäksi ensiharvennuksissa voidaan puuston tekniseen laatuun vaikuttaa vain lähinnä poistettavien puiden valinnalla, koska erityisesti tyvitukin teknisen laadun on havaittu määräytyvän pääosin jo taimikko- ja riukuvaiheessa (Heiskanen 1965). Tuloksia arvioitaessa on myös muistettava, että käytetyt kasvumallit aliarvioivat harvennusten jälkeistä puuston kasvua sitä enemmän mitä voimakkaampia harvennuksia sovelletaan.

Vaikka laadittu itseharvenemismalli paransi MELAn antamien ennusteiden luotettavuutta,

saatujen tulosten perusteella on edelleen tarpeellista sovittaa kasvu- ja luonnonpoistumamallit paremmin toimivaksi kokonaisuudeksi. Itseharvenemismalli oli luonteeltaan määrävälein puuston määrää vähentävä malli, joka pienensi puuston runkolukua vain jos se oli liian suuri suhteessa puuston järeyyteen. Todellisuudessa puuston tiheydestä johtuva yksittäisten puiden kasvun pieneneminen ja puiden kuoleminen alkaa asteittain jo tätä ajankohtaa aikaisemmin. Itseharvenemismallin puuston määrää jaksottain vähentävä vaikutus näkyi mm. harventamattomien männiköiden arvokasvuprosentin heilahteluna (kuva 18).

Hintojen ja kustannusten oletettiin MELAssa olevan kiinteät ja ajasta riippumattomat, minkä muuttaminen olisi vaatinut pitkälle menevien hinta- ja kustannusennusteiden tekoa. Lisäksi trendihintoja määritettäessä käytettiin suhteellisen lyhyttä aikajaksoa (7 vuotta). Hämäläisen (1973) mukaan suhdannejaksot ovat yleensä olleet n. 10 vuoden pituisia. Siten ei voida puhua varsinaisesta suhdannevaihteluiden tasoittamisesta, vaan kyseessä on suhteellisen lyhyen aikajakson vuotuisen hintavaihtelun poistaminen.

Hakkuiden korjuukustannuksia lukuunottamatta kustannustieto oli MELAssa liian keskimääräistä. Tulosten luotettavuuden kannalta yhtenä virhelähteenä on pidettävä sitä, että MELAssa taimikonhoidon kustannukset eivät riippuneet poistettavan puuston järeyydestä eivätkä poistettavasta runkoluvusta. Poistettavan runkoluvun vaikutus kustannuksiin on kuitenkin pieni, sillä taimikon harvennuksen kustannukset eivät kasva samassa suhteessa kuin poistettavien runkojen lukumäärä (Helander 1978).

6.2 Harvennusmallit ja edullisuusvertailut

Sekä kolmen että viiden prosentin korkokannalla laaditut alaharvennustyyppiset harvennusmallit edellyttivät huomattavasti suurempia harvennuskertymiä kuin Metsäkeskus Tapion mallit. Osataan tämä johtui korkeammista pohjapinta-alarajoista ennen harvennuksia, mutta kuusikoissa myös kiertoajan alkupuolen erittäin alhaisista harvennusten jälkeisistä pohjapinta-aloista. Vaikka pohjoismaisten pysyvien harvennuskokeiden mukaan hyvän kasvupaikan kuusikon pohjapinta-ala voidaan laskea puoleen maksimistaan il-

man kasvutappioita (Möller 1954), on kuitenkin todennäköistä, että tutkimuksessa sovelletut voimakkaimmat harvennusvaihtoehdot aiheuttivat tuotostappioita. Vuokilan (1975) mukaan nuoren kuusikon pohjapinta-alaa voidaan harvennuksissa pudottaa 40 % puuston pohjapinta-alan kasvua vähentämättä. Jäävän puuston määrä näillä kuusikkokokeilla oli kuitenkin selvästi suurempi kuin nyt laadittujen harvennusmallien mukaisessa metsien käsittelyssä.

Assmannin (1970) mukaan puuston pohjapinta-alan kasvu saattoi lisääntyä harvennuksen jälkeen, mutta hehtaarikohtainen tilavuuskasvu pieneni erityisesti voimakkaiden harvennusten jälkeen. Erikssonin (1986, 1989) mukaan kuusikon pohjapinta-alan pudottaminen 50 % ensiharvennuksissa ei vähentänyt puuston tilavuuskasvua. Vielä voimakkaampien ensiharvennusten (70 % pohjapinta-alasta) soveltaminen merkitsi runsaan 20 %:n tilavuuskasvutappioita. Männiköissä harvennukset vaikuttivat aina kasvua alentavasti, sillä voimakkaat ensiharvennukset (25 % pohjapinta-alasta) aiheuttivat runsaan 10 %:n ja erittäin voimakkaat harvennukset (60 % pohjapinta-alasta) 30–40 %:n tilavuuskasvutappiot (Eriksson 1986). Harvennusten jälkeen puiden järeytymisen joka tapauksessa nopeutuu, jolloin tukkipuun tuotos lisääntyy ja arvokasvu kohoaa. Vuokilan (1975) mukaan erittäin voimakas ensiharvennus lisäsi kuusikossa tukkipuun tuotosta 36 % harventamattomaan metsikköön verrattuna 12 vuoden tarkastelujakson aikana. Koko käyttöpuun tuotos sen sijaan aleni 7 % samana aikana.

Voimakkaiden harvennusten merkitys on sitä suurempi mitä enemmän tavoitellaan tuotetun puun järeyttä. Kuusikossa erittäin voimakkaat ensiharvennukset (40 % pohjapinta-alasta) merkitsivät 41–42 %:n lisäystä harvennuksen jälkeisessä puuston arvossa, johon sisältyi harvennuksen jälkeisen puuston arvokasvun ohella myös ensiharvennustulo ja sen korko kolmen prosentin korolla seuraavan 12 vuoden aikana (Vuokila 1975). Siten ainakaan lyhyellä tarkastelujaksolla lievät ensiharvennukset eivät olleet taloudellisesti kannattavia.

Tässä tutkimuksessa voimakkaista harvennuksista johtuvat tuotostappiot olivat niin pieniä, että niiden vaikutusta ei yleensä havaittu keskimääräisissä vuotuisissa hakkuukertymisissä. Vain kuusikoissa viiden prosentin malleilla keskimääräiset hakkuukertymät olivat muita ohjelmia pienemmät, mutta ensisijaisena syynä tähän oli muita vaihtoehtoja lyhyemmät kiertoajat. Vähäiset tuotostappiot tulivat hyväksyttäväksi puuston nopeamman järeytymisen vuoksi, sillä tuotostappi-

oiden aiheuttama nettotulojen nykyarvon menetyks oli pienempi kuin voimakkaista harvennuksista saatu nettotulojen nykyarvon lisäys. Tuototarvoissa mitattuna kolmen prosentin harvennusmallit olivat alueesta riippuen VT-männiköissä 7–19 % ja MT-kuusikossa 16–58 % edullisemmat kuin lievempiä harvennuksia suosivat Tapion harvennusmallit. Voimakkaiden harvennusten aiheuttamia tuotos- ja tuottoeroja tarkasteltaessa on muistettava, että MELAn kasvumallit aliarvioivat puiden kasvua harvennusten jälkeen ja siten aliarvioivat myös voimakkaiden harvennusten edullisuutta metsien käsittelyvaihtoehtona.

Tuottoarvojen perusteella harvennushakkuut olivat välttämättömiä. Lisääntyneen luonnonpoistuman ja puuston hidastuneen järeyskehityksen lisäksi harventamattoman vaihtoehdon edullisuutta heikensi laskelmissa käytetty korkokanta. Korkokannan vaikutuksesta lähempänä olevilla nettotuloilla oli suurempi painoarvo kuin kauempana olevilla tuloilla, joten harvennuksista saatavien hakkuukertymien merkitys korostui tuottoarvon laskennassa. Samansuuntaisia tuloksia harvennushakkuiden edullisuudesta on raportoinut mm. Valsta (1982), jonka mukaan harventamatta jättäminen aiheutti MT-kuusikossa kolmen prosentin korkokannalla 46–68 %:n tappion vuotuisissa keskimääräisissä nettotuloissa. Vastaava tappio ilman korkovaatimusta oli 11–17 %.

Korkokannalla oli selvä kiertoaikoja lyhentävä vaikutus, sillä kolmen ja viiden prosentin harvennusmallien kiertoaikaerot olivat keskimäärin 10–20 vuotta. Lisäksi viiden prosentin malleilla tehtiin keskimäärin vain yksi harvennus, joka oli hyvin voimakas. Myös Kilkki & Väisänen (1969) ja Valsta (1992) julkaisivat samansuuntaisia tuloksia: mitä korkeampaa korkokantaa käytettiin, sitä harvempana metsikköä kasvatettiin ja sitä lyhyempi oli kiertoaika. Kallion (1957) mukaan OMT-kuusikon korkeimman maankoron kiertoajat vaihtelivat välillä 45–65 vuotta viiden prosentin korkokannalla. Tässä saatujen tulosten perusteella vielä viiden prosentin laskentakorolla taloudellisesti optimaaliset harvennusmallit tähtäsivät pääasiassa tukkipuun tuottamiseen. Hyvin lyhyiden kiertoaikojen soveltaminen ja kokonaan harventamatta kasvattaminen oli kilpailukykyinen vaihtoehto vain viiden prosentin laskentakorolla CT-männiköissä (osa-alueet 1–4) ja MT-kuusikoissa (osa-alue 4).

Laskelmien perusteella aikaiset ensiharvennukset eivät olleet taloudellisesti kannattavia, sillä ensiharvennuksissa korjuun yksikkökustannukset olivat suuret ja lisäksi tämä kustannuserä

kohdistui kiertoajan alkupuolelle. Laadituissa malleissa ensiharvennusta siirrettiin vähintään 13 m:n keskipituudelle, jolloin poistettavien puiden järeytymisen seurauksena ensimmäisessä harvennuksessa saatavat hakkuukertymät suurenevät ja korjuun yksikkökustannukset alenivat. Korjuun kannalta harvennuksissa poistettavien runkojen keskikoko tuli olla vähintään 50 dm³/runko, koska sitä pienemmillä poistettavilla puilla korjuukustannukset alkoivat selvästi nousta (Harvennushakkuiden ... 1992).

Esitetyissä harvennusmalleissa ensiharvennuksen tarkkaa optimaalista ajankohtaa ei määritetty. Männiköissä valittu pituusraja oli lähellä optimia, sillä VT-männikölle tehdyn erillislaskelman perusteella ensiharvennus oli edullisinta tehdä 12–14 m:n keskipituudella osa-alueesta riippuen. On todennäköistä, että kuusikoissa voisi ensiharvennusta siirtää vieläkin myöhäisemmäksi. Käytännössä ensiharvennuksen siirtäminen näin myöhäiseen ajankohtaan on mahdollista vain, jos toimenpide ei olennaisesti heikennä puuston tuotoskykyä. Siten esim. hyvin tiheinä kasvaneissa metsiköissä ensiharvennus on tehtävä riittävän aikaisessa vaiheessa latvusten supistumisen ja lisääntyvän luonnonpoistuman vuoksi.

Samansuuntaisia tuloksia ensiharvennuksen ajankohdasta on julkaistu myös muualla Pohjoismaissa, sillä Vuokilan (1975) mukaan kuusikoissa ensiharvennus voitiin siirtää 14–15 m:n valtapituuteen ilman kielteisiä puuntuotannollisia seurauksia, jos taimikon harvennuksesta on huolehdittu. Valstan (1992) tutkimustulosten perusteella OMT-kuusikossa yläharvennustyyppinen ensiharvennus oli optimaalista tehdä vasta 17 m:n valtapituudella myöhemmistä harvennuksista riippumatta.

Esitettyjen harvennusmallien mukaan tehtynä ensiharvennus varmisti seuraavien harvennusten siirtymisen nykykäytäntöä myöhemmäksi ja samalla harvennusten määrä erityisesti männiköissä pieni kiertoajan kuluessa. Ensiharvennuksen siirtämisen edullisuus korostui sitä enemmän mitä suurempaa korkokantaa käytettiin. Harvennuskertojen väheneminen vaikuttaa myös korjuuvaurioiden määrään, jota ei MELA-järjestelmässä kuitenkaan oteta huomioon. Korjuuvaurioita vähentää myös se, että voimakkaissa ensiharvennuksissa jätettäviä ja siksi korjuussa varottavia puita on vähemmän kuin nykyisin käytettävillä harvennusmalleilla.

Ensiharvennusten siirtämisen myönteiset vaikutukset näkyivät erityisesti tuottoarvoissa. Kaikki vertailtavat harvennusohjelmat, joissa ensi-

harvennusta siirrettiin vähintään 13 m:n keskipituudelle (III, IV ja V), olivat selvästi parempia kuin aikaisessa vaiheessa tehtyyn ensiharvennuksen perustuva ohjelma I. Ensiharvennuksen siirto nykyistä myöhemmäksi oli aina edullinen vaihtoehto käytetystä harvennusmallista riippumatta. Itse asiassa ohjelmien I ja III tärkein ero olikin ensiharvennuksen ajankohta, jota muuttamalla saavutettiin keskimäärin yli kymmenen prosenttia suuremmat tuottoarvot. Ensiharvennuksen siirtämisen edullisuus korostui kuusikoissa.

Laskelmissa ei ollut mahdollista ottaa huomioon harvennusten jälkeistä myrskytuhoriskiä, joka erityisesti kuusikoissa olisi saattanut vaikuttaa tuloksiin. Vuokilan (1975) mukaan Nynäsin tutkimusalueen harvennuskuusikoissa ei ole esiintynyt myrskytuhoja, vaikka voimakkain harvennus oli 40 % harvennusta edeltävästä puuston pohjapinta-alasta. Aineiston rajallisuuden vuoksi tutkimuksen tuloksista ei voida kuitenkaan tehdä pitkälle meneviä johtopäätöksiä harvennettujen metsiköiden myrskytuhostkestävyydestä.

Voimakkaiden harvennusten aiheuttamaa myrskytuhoriskiä voitaneen pienentää järkevästi suoritettulla taimikonhoidolla. Taimikonhoidolla voidaan varmistaa myös se, että puusto on voimakkaiden ja myöhäisessä vaiheessa tehtyjen ensiharvennusten jälkeen vielä elpymiskykyinen ja että ensiharvennus on taloudellisesti kannattava. Vuokilan (1976) mukaan juuri riittävän voimakkaalla taimikon alkutiheyden säätelyllä voidaan vaikuttaa ensiharvennuksen korjuukustannuksiin. Puuston nopea järeytyminen puoltaa aikaista ja voimakasta taimikon harvennusta. Puuaineen laadun kannalta taimikon harvennus kannattaa tehdä männiköissä mahdollisimman myöhäisessä ajankohdassa (Vuokila 1987).

Tässä tutkimuksessa saatujen tulosten mukaan taimikon harvennus oli edullisinta tehdä kuuden metrin pituudessa. Näin myöhään suoritettu taimikon harvennus edellytti, että mahdollisesti syntyvä lehtipuuvesakko ei haitannut taimikon kehitystä. Taimikon harvennuksen ajankohtaa tärkeämpi seikka oli taimikon jäävä runkoluku, sillä parhaan tuloksen saavuttamiseksi taimikkoa ei saanut harventaa liian harvaksi. Tulosten mukaan VT-männikössä riittää harvennuksen jälkeen 1600–2000 runkoa/ha. Jäävä runkoluku 1600 kpl/ha oli edullisin vaihtoehto erityisesti silloin, kun myöhemmät harvennushakkuut tehtiin Tapion mallien mukaisina. Tällöin alhainen puuston tiheys varmisti sen, että ensiharvennus siirtyi tehtäväksi vasta pohjapinta-alan perustavilla harvennusmalleilla. Tätä pienemmät runko-

luvut johtivat selviin tuotos- ja tuottotappioihin.

Myös MT-kuusikossa taimikon harvennuksen jälkeinen runkoluku 1600–2000 kpl/ha oli edullisempi kuin alemmat tiheydet. Tuottoarvotappiot olivat suhteellisesti suuremmat kuin männylä, mikäli runkoluku jäi optimaalista tiheyttä alhaisemmaksi. Tekemällä taimikon harvennus kuuden metrin pituudella varmistuttiin siitä, että ensiharvennus voitiin siirtää nykyisiä suosituksia myöhäisemmäksi. Tuottoarvolla mitaten optimaalinen käsittelyohjelma oli harventaa taimikko mahdollisimman myöhäisessä vaiheessa, siirtää ensiharvennusta aikaisintaan 13 m:n keskipituudelle ja sen jälkeen harventaa puustoa kolmen prosentin harvennusmallien mukaan. Vuokilan (1987) mukaan suositeltavat taimikon harvennuksen jälkeiset runkoluvut olivat kuusikossa 2000 kpl/ha ja männikössä 1500–1800 kpl/ha, joita käytettäessä ensiharvennus voitiin siirtää 12–15 m:n valtapituudelle.

Esittämällä harvennusmallit neljälle eri osaluokalle selvitettiin alueellisia eroja ja parannettiin mallien yleistettävyyttä. Mallien erot eri osaluokkien välillä olivat pienet lukuunottamatta aluetta neljä, jossa harvennuksen vaadittavat pohjapinta-alatasot olivat alkuvaiheessa yleensä korkeammat kuin muilla alueilla. Alemmasta kasvuntasosta johtuen samalla valtapituudella tehty harvennus ajoittui alueella neljä ajallisesti myöhemmäksi kuin muilla alueilla, jolloin korkokannan vaikutuksesta hakkuusta saatujen net-

totulojen nykyarvot eivät enää kattaneet kiertoajan alkuvaiheen perustamis- ja metsänhoitokustannuksia. Lisäksi ensiharvennusta ei voitu aikaistaa korjuun yksikkökustannusten nousun takia ja harvennusten leimaustavoitetta ei voitu enempää alentaa lisääntyvien tuotos- ja tuottotappioiden takia. Tämän seurauksena harvennusten leimausraja pyrki nousemaan, jotta hehtaarikohtaisen hakkuukertymän suurenemisen ja poistettavien runkojen järeytymisen kautta korjuukustannuksia olisi saatu suhteellisesti pienemmiksi ja harvennukset taloudellisesti kannattaviksi.

Yhtenä syynä korkeaan leimausrajaan olivat kolmen ja viiden prosentin korkokannat, jotka alueella neljä osoittautuivat puuston kasvun tasoon nähden korkeiksi. Samasta syystä puuston määrää ennen harvennusta ja harvennuksen jälkeen kuvaavat mallit alkoivat mm. VT-männikössä laskea alaspäin kiertoajan loppupuolella. Alhaisten pohjapinta-alatasojen ja voimakkaiden harvennusten avulla ei tavoiteltukaan hyvää kasvureaktiota, vaan puustolle asetetun korkovaatimuksen vuoksi puuston määrä kannatti pitää mahdollisimman alhaisena kiertoajan loppupuolella. Eräissä tapauksissa puuston määrä oli niin alhainen, että pelkästään puuntuotantoa ajatellen metsikkö saattoi olla vajaatuottoinen. CT-männiköissä ja osa-alueen neljä MT-kuusikossa harvennukset eivät olleet enää taloudellisesti kannattavia viiden prosentin korkokannalla.

Kirjallisuus – References

- Assman, E. 1970. The principles of forest yield study. Pergamon Press. 506 s.
- Brodie, J.D., Adams, D.M. & Kao, C. 1978. Analysis of economic impacts on thinning and rotation for Douglas-fir, using dynamic programming. *Forest Science* 24(4): 513–522.
- Chappelle, D.E. & Nelson, T.C. 1964. Estimation of optimal stocking levels and rotation ages of loblolly pine. *Forest Science* 10: 421–502.
- Einola, J. 1964. Yksityismetsätaloudelliset vaihtoehtolaskelmat. Referat: Vergleichende Rentabilitätsrechnungen in Privatforsten. *Acta Forestalia Fennica* 77(4). 80 s.
- Eriksson, H. 1986. Hur skall vi gallra? Sveriges Skogsårdsförbunds Tidskrift nr. 2/1986. 19 s.
- 1989. Hur har det gått med höggallringen? – Nya resultat från serien ”Gallrings- och gödslingsförsök”. Skogsårdsförbundets exkursion i Dalarna 22–23 augusti 1989. 38 s.
- Eskelinen, A. & Peltonen, J. 1982. Puunkorjuun vaihtoehtolaskentasysteemi puunhankinnan suunnittelussa. *Metsätehon katsaus* 20. 4 s.
- Goldstein, H. 1986. Multilevel mixed linear model analysis using iterative generalized least squares. *Biometrika* 73(1): 43–56.
- Haapala, P. 1983. Luonnonpoistuman ennustaminen puun kuolemistodennäköisyydellä. Käsikirjoitus. Metsäntutkimuslaitos, metsänarvioimisen tutkimusosasto. 33 s.
- Harvennushakkuiden taloudellinen merkitys ja toteuttamsvaihtoehdot. 1992. Maa- ja metsätalousministeriö. 121 s.
- Heiskanen, V. 1965. Puiden paksuuden ja nuoruuden kehityksen sekä oksaisuuden ja sahapuulaadun välisestä suhteesta männiköissä. Summary: On the relation between the development of the early stage and the thickness of trees and their branchiness in pine stands. *Acta Forestalia Fennica* 80(2). 62 s.
- Helander, M. 1978. Taimiston harvennukset puunkasvatuksen kustannustekijänä. Julkaisussa: Puuntuotant-

- non nykyhetken ongelmia. Metsäntutkimuslaitoksen 60-vuotisjuhlaretkely 12.–13.6.1978. s. 49–53.
- Hynynen, J. 1991. Luonnonpoistuman ennustaminen metsikkötason mallilla. Metsänarvioimistieteen pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, maatalous-metsätieteellinen tiedekunta. 47 s.
- Hämäläinen, J. 1973. Profitability comparisons in timber growing: Underlying models and empirical applications. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 77(4). 178 p.
- Ilvessalo, Y. 1920. Kasvu- ja tuottotaulukot Suomen eteläpuoliskon mänty-, kuusi- ja koivumetsille. *Acta Forestalia Fennica* 15(4). 96 s.
- Jämsä, J. 1991. Harvennushakkuiden liiketaloudellinen edullisuus metsälötasolla. Metsätalouden suunnittelun syventävien opintojen tutkielma. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. 76 s.
- Jääskeläinen, J. 1987. Kasvu- ja harvennussmallien vaikutus Metsälaskelman tuloksiin. Metsänarvioimistieteen pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, maatalous-metsätieteellinen tiedekunta. 89 s.
- Kallio, K. 1957. Käenkaali-mustikkatyyppin kuusikoiden kehityksestä Suomen luonaisosissa. Taksatorisi-liiketaloudellinen tutkimus. Summary: On the development of spruce forests of the Oxalis-Myrtillus site type in the South-west of Finland. Forest mensuration and management research. *Acta Forestalia Fennica* 66(3). 155 s.
- Kellomäki, S. 1991. Metsänhoito. *Silva Carelica* 8. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. 501 s.
- Kilikki, P. 1968. Some economic aspects of growing forest stands. Tiivistelmä: Eräitä taloudellisia näkökohtia metsiköiden kasvatuksessa. *Silva Fennica* 2(4): 225–234.
- 1987. Timber management planning. *Silva Carelica* 5. 2. edition. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. 159 s.
- & Väisänen, U. 1969. Determination of the optimum cutting policy for the forest stand by means of dynamic programming. Seloste: Metsikön optimihakkuuohjelman määrittäminen dynaamisen ohjelmoinnin avulla. *Acta Forestalia Fennica* 102. 23 p.
- Koivisto, P. 1959. Kasvu- ja tuottotaulukoita. Summary: Growth and yield tables. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 51(8). 49 s.
- Liski, E. & Puntanen, S. 1976. Regressioanalyysin perusteita. Tampere.
- Metsä 2000 -ohjelman pääraportti. 1985. Talousneuvosto. Metsä 2000 -ohjelmajasto. 189 s.
- Metsänhoitosuosituksset. 1989. Keskusmetsälautakunta Tapio. 55 s.
- Mielikäinen, K. 1979. Alaharvennusten vaikutus männikön tuotokseen ja arvoon. Summary: The influence of low thinnings on the wood production and value of a pine stand. *Folia Forestalia* 401. 23 s.
- & Valkonen, S. 1991. Harvennustavan vaikutus vartuneen metsikön tuotokseen ja tuottoihin Etelä-Suomessa. Summary: Effect of thinning method on the yield of middle-aged stands in southern Finland. *Folia Forestalia* 776. 22 s.
- Möller, C.M. 1954. The influence of thinning on volume increment. State Univ. New York, World For. Series. Bull. 1.
- Ojansuu, R., Hynynen, J., Koivunen, J. & Luoma, P. 1991. Luonnonprosessit metsälaskelmassa (MELA) – Metsä 2000 -versio. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 385. 42 s.
- Pesonen, M., Jämsä, J. & Hirvelä, H. 1992. Harvennushakkuiden edullisuusvertailu metsälötasolla. Käsikirjoitus. Helsinki. 29 s.
- Petterson, H. 1951. Beståndsvårdens ekonomi. Medd. Stat. Skogsforskn. Inst., Serien uppsatser Nr 20.
- Searle, S.R. 1987. Linear models for unbalanced data. John Wiley & Sons. 536 p.
- Siira, J. 1988. Ensiharvennuksen ajoittamisen vaikutukset metsiköstä saatavaan tuottoon. Metsätalouden liike-tieteen pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, maatalous-metsätieteellinen tiedekunta. 64 s.
- Sii-tonen, M. 1983. A long term forestry planning system based on data from the Finnish national forest inventory. Teoksessa: Forest inventory for improved management. Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteen laitoksen tiedonantoja 17: 195–207.
- 1990. Suomen metsävarat 1990 ja metsien kehitysmahdollisuudet 1990–2030. Selvitys Metsä 2000 -ohjelman tarkistustoimikunnalle. Metsäntutkimuslaitos, metsänarvioimisen tutkimusosasto. 56 s.
- Solberg, B. & Haight, R. G. 1991. Analysis of optimal economic management regimes for *Picea abies* stands using a stage-structured optimal-control model. *Scandinavian Journal of Forest Research* 6(4): 559–572.
- Valsta, L. 1982. Istutuskuusikon kasvustitheyksien liiketaloudellinen vertailu. Summary: Profitability comparison of growing densities in spruce plantations. *Folia Forestalia* 504. 33 s.
- 1986. Mänty-rauduskuivusekametsikön hakkuuohjelman optimointi. Summary: Optimizing thinnings and rotation for mixed, even-aged pine-birch stands. *Folia Forestalia* 666. 23 s.
- 1988. A comparison of numerical methods to optimize stand treatment. Julkaisussa: Lohmander, P. (toim.). Economic planning of dynamic resource harvesting. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för Skogsekonomi, Arbetsrapport 84. 13 s.
- 1992. An optimization model for Norway spruce management based on single-tree growth models. Tiivistelmä: Kuusikon käsittelyn optimointi puittaisiin kasvumalleihin pohjautuen. Käsikirjoitus. 31 p.
- Valtakunnan metsien 8. inventointi. 1986. Kenttätöön ohjeet. Metsäntutkimuslaitos, metsänarvioimisen tutkimusosasto. 86 s.
- Vuokila, Y. 1971. Harvennussmallit luontaisesti syntyneille männiköille ja kuusikoille. Summary: Thinning models for natural pine and spruce stands in Finland. *Folia Forestalia* 99. 18 s.
- 1975. Nuoren istutuskuusikon harvennus puuntuotannollisena ongelmana. Summary: Thinning of young Spruce plantations as a problem of timber production. *Folia Forestalia* 247. 24 s.
- 1976. Ensiharvennuskertymä. Summary: Yield from the first thinning. *Folia Forestalia* 264. 12 s.
- 1983. Viljelymetsiköiden harvennussmallit. Summary: Thinning models for forest cultures in Finland. *Folia Forestalia* 556. 15 s.
- 1987. Metsänkasvatuksen perusteet ja menetelmät. 2. painos. WSOY, Porvoo. 258 s.

Total of 47 references

Summary

Thinning models based on profitability calculations for southern Finland

Introduction

In Finland, thinnings are considered to be necessary from both silvicultural and economic point of view. However, until now thinning models have been made only to maximize the yield of the stands without any strict financial constraints.

The aim of this study is to make financially optimal thinning models for Scots pine and Norway spruce stands. Thinnings are viewed as a part of the stand treatment program during the entire rotation. In this study, the main objective of the forest management is the net present value of the future revenues from a forest stand. Calculations concern solely thinnings from below. In order to distinguish regional differences, thinning models are made separately for four sub-regions in southern Finland. The models are compared to those published by Forestry Center Tapio and widely used in private forests.

Material and methods

The basic data consisted of relascope sample plots from the 7th and 8th National Forest Inventory in southern Finland. Only data from young Scots pine and Norway spruce stands on mineral soils was used in this study.

Calculations were carried out with MELA -software. Different thinning regimes were simulated for a rotation period for the stands. The length of the rotation was left open, but the minimum age for clear cut was 60 % of the corresponding recommendation of Tapio. For each intermediate cutting, three alternative thinning grades were used to obtain different thinning patterns. For the mean height under 13 m, thinnings were based on the number of the stems. The remaining stand densities were 0.8, 1.0 and 1.2 fold compared to Tapio's current recommendations. Thus, the number of the remaining stems varied from 640 to 1680 per hectare depending on tree species and stand site. For the mean height over 13 m, thinnings were based on the basal area with alternative thinning grades 15, 35 and 50 % of that before thinning.

The best management regime for each stand was selected using the net present value of the future revenues as a criterion with three and five per cent interest rates. The selected regimes were used for modelling basal area before and after thinning with dominant height as an

explanatory variable. Linear mixed model analysis was used in making the thinning models.

Thinning models

Compared to the thinning models recommended by Tapio, the formulated models resulted in remarkably heavier thinnings. Using a three per cent interest rate in a Scots pine stand, the growing stock after thinning equaled that in Tapio's models, but a clearly higher basal area before thinning was suggested. With a five per cent interest rate, the volume removed in the thinnings increased and correspondingly the remaining stock decreased.

The models supposed heavier thinnings also for Norway spruce stands. The remaining stock was low especially after the first thinning. Towards the end of the rotation, the basal area after thinning reached or even exceeded that in Tapio's thinning models. Raising the interest rate from three to five per cent had a minor effect on thinning models of Norway spruce on Oxalis-Myrtillus sites (OMT). On poorer Myrtillus sites (MT), the higher interest rate resulted in a lower growing stock. The new thinning models suggested the first thinning to be made after the mean height reaches 13 m both for Scots pine and Norway spruce stands.

When three per cent interest rate was used, the optimum rotation in Scots pine stands approximated to that in Tapio's recommendations based on the mean diameter of the stand. For example, on Vaccinium sites (VT) it was 70 years in sub-region one. Raising the interest rate to five per cent shortened the rotations in Scots pine and Norway spruce stands by about 10–15 and 15–20 years, respectively.

Depending on the sub-region the new thinning models gave at three per cent discount rate 7–19 per cent and 16–58 per cent higher net present values in Scots pine and Norway spruce stands, respectively, when compared to Tapio's models. When Tapio's thinning models were used and the first thinning was postponed to the mean height of 13 m, the net present value increased by 7–16 per cent in Scots pine and 8–41 per cent in Norway spruce stands. Unthinned alternative resulted to the lowest net present value: the losses were in Scots pine stands 60–94 per cent and in Norway spruce stands 39–61 per cent compared to Tapio's models. The profitability of the

unthinned alternative was reduced by the declining growth, the high mortality and the postponement of the revenues until clear cutting. The declining growth affected the structure of the timber assortments and the length of the rotations.

The optimal timing of tending Scots pine seedling stands was at the mean height of 4–6 m. By tending a young stand at that height, it was possible to postpone the first commercial thinning. The best alternative was to thin a young stand to the density of 2000 stems/ha. Also in Norway spruce stands, financially the best alternative for tending a young stand was at the mean height of 6 m to a density of 2000 stems/ha. Lowering the density to 1600 stems/ha reduced the net present value of the future revenues relatively more in Norway spruce than in Scots pine stands. Because of the low mortality, lighter tending and consequently a relatively heavier first commercial thinning were recommended in Norway spruce stands.

Conclusions

In this study thinning models based on the net present value of the future revenues from Scots pine and Norway spruce stands were formulated. The models used in MELA -software have a decisive impact on the reliability of the simulation results. The most significant results of the thinning models and comparative calculations were:

- Thinnings are essential for the financial return of a forest stand. The profitability of the thinnings is due to the accelerated growth of the stems and the temporal distribution of the revenues. Due to the mortality, the profitability of the thinnings is accentuated for Scots pine.
- Raising thinning intensities from the prevailing levels pays when the objective of the forest management is the maximization of the net present value. Consequently, fewer thinnings are needed. Assuming a five per cent interest rate, a single thinning usually sufficed for both Scots pine and Norway spruce stands.
- The financial return from a stand can be improved by intensifying and postponing the first thinning. The postponement of the first thinning resulted in a higher volume removed in the thinnings, bigger harvestable stems, and hence lower unit costs per thinning.
- The postponement of the first thinning was always profitable notwithstanding whether the successive thinnings were made in accordance with the models presented here, or those of Tapio. The profitability of the postponement is accentuated in Norway spruce stands.
- Financially the best management regime for Scots pine and Norway spruce stands was to tend a young stand at the height of 4–6 m to a density of 2000 stems/ha, to postpone the first thinning to the mean height of 13 m and to thin strongly one to three times during the rotation.

Liite 1. Kolmen prosentin korkokannalla laadittujen harvennusmallien (3.3) parametrien estimaatit alueella yksi.
Appendix 1. The parameter estimates of the thinning models (3.3) based on net present value of future revenues at three per cent in sub-region one.

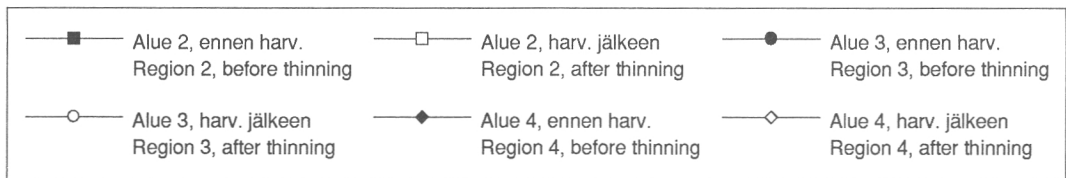
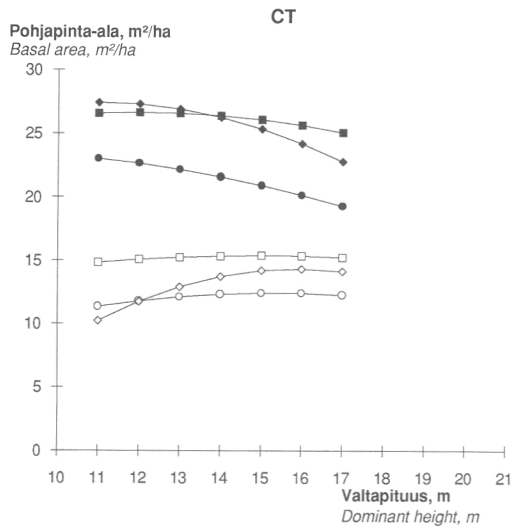
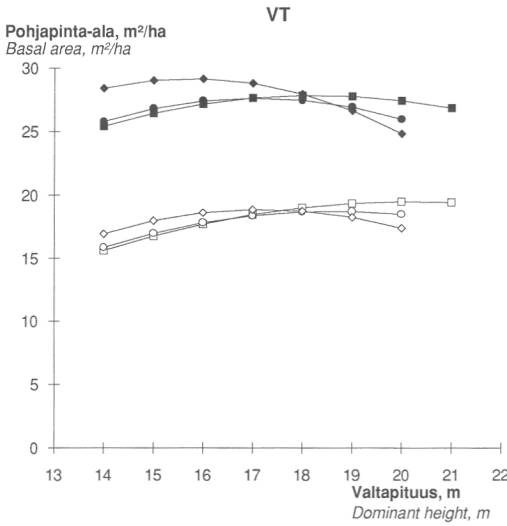
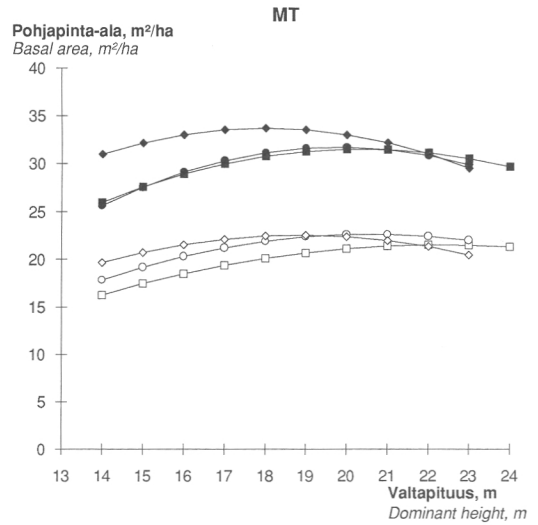
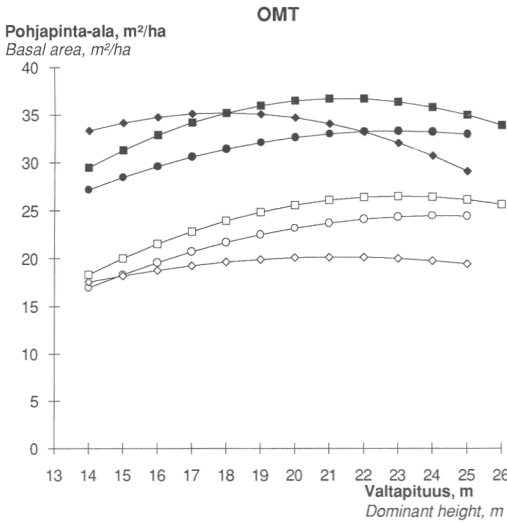
	Ennen harvennusta Before thinning			Harvennuksen jälkeen After thinning		
	Estimaatti Parameter estimate	Keskivirhe Standard error	t-testi t-value	Estimaatti Parameter estimate	Keskivirhe Standard error	t-testi t-value
Mänty – Scots pine						
OMT – Oxalis-Myrtillus type						
Vakio – Constant	0,426	9,845	0,043	-9,262	7,561	-1,225
$Hdom_{ij}$	3,517	0,909	3,871	2,969	0,697	4,258
$Hdom_{ij}^2$	-0,087	0,021	-4,241	-0,063	0,016	-3,990
$\hat{\sigma}_b^2$	18,465	6,755		13,509	4,770	
$\hat{\sigma}_e^2$	16,260	2,619		9,541	1,537	
\hat{y}_m	33,659			24,482		
MT – Myrtillus type						
Vakio – Constant	-23,335	2,764	-8,443	-19,731	2,120	-9,306
$Hdom_{ij}$	5,612	0,286	19,633	3,869	0,219	17,705
$Hdom_{ij}^2$	-0,141	0,007	-19,602	-0,090	0,006	-16,242
$\hat{\sigma}_b^2$	7,976	1,710		7,106	1,379	
$\hat{\sigma}_e^2$	12,668	1,042		7,340	0,604	
\hat{y}_m	28,757			20,056		
VT – Vaccinium type						
Vakio – Constant	-18,270	3,355	-5,445	-17,973	2,422	-7,420
$Hdom_{ij}$	5,017	0,401	12,501	3,702	0,289	12,815
$Hdom_{ij}^2$	-0,136	0,012	-11,651	-0,091	0,008	-10,771
$\hat{\sigma}_b^2$	6,366	1,551		6,737	1,340	
$\hat{\sigma}_e^2$	14,189	1,211		7,204	0,615	
\hat{y}_m	25,849			18,155		
CT – Calluna type						
Vakio – Constant	-13,150	9,715	-1,354	-10,328	5,918	-1,745
$Hdom_{ij}$	5,681	1,459	3,894	3,173	0,888	3,573
$Hdom_{ij}^2$	-0,205	0,054	-3,804	-0,100	0,033	-3,044
$\hat{\sigma}_b^2$	9,335	4,576		5,838	2,233	
$\hat{\sigma}_e^2$	21,001	3,893		6,943	1,293	
\hat{y}_m	24,532			13,979		
KUUSI – NORWAY SPRUCE						
OMT – Oxalis-Myrtillus type						
Vakio – Constant	-18,416	5,659	-3,254	-34,218	4,616	-7,412
$Hdom_{ij}$	3,972	0,499	7,957	4,448	0,407	10,929
$Hdom_{ij}^2$	-0,069	0,011	-6,376	-0,077	0,009	-8,738
$\hat{\sigma}_b^2$	21,162	5,181		14,916	3,603	
$\hat{\sigma}_e^2$	23,207	2,478		15,394	1,644	
\hat{y}_m	35,609			26,400		
MT – Myrtillus type						
Vakio – Constant	-13,265	5,979	-2,219	-22,530	3,451	-6,528
$Hdom_{ij}$	3,570	0,544	6,565	3,401	0,311	10,937
$Hdom_{ij}^2$	-0,071	0,012	-5,816	-0,062	0,007	-8,904
$\hat{\sigma}_b^2$	11,048	2,931		13,963	2,892	
$\hat{\sigma}_e^2$	16,326	1,762		5,190	0,561	
\hat{y}_m	30,181			22,093		

$Hdom_{ij}$ = valtapituus, m
 dominant height, m
 $\hat{\sigma}_b^2$ = laskentayksiköiden välinen varianssikomponentti
 between-stand variance component
 $\hat{\sigma}_e^2$ = laskentayksiköiden sisäinen varianssikomponentti
 within-stand variance component

\hat{y}_m = ennusteen keskiarvo $\hat{y}_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{y}_i$, n = havaintojen lukumäärä
 mean of the predicted values, n = number of observations

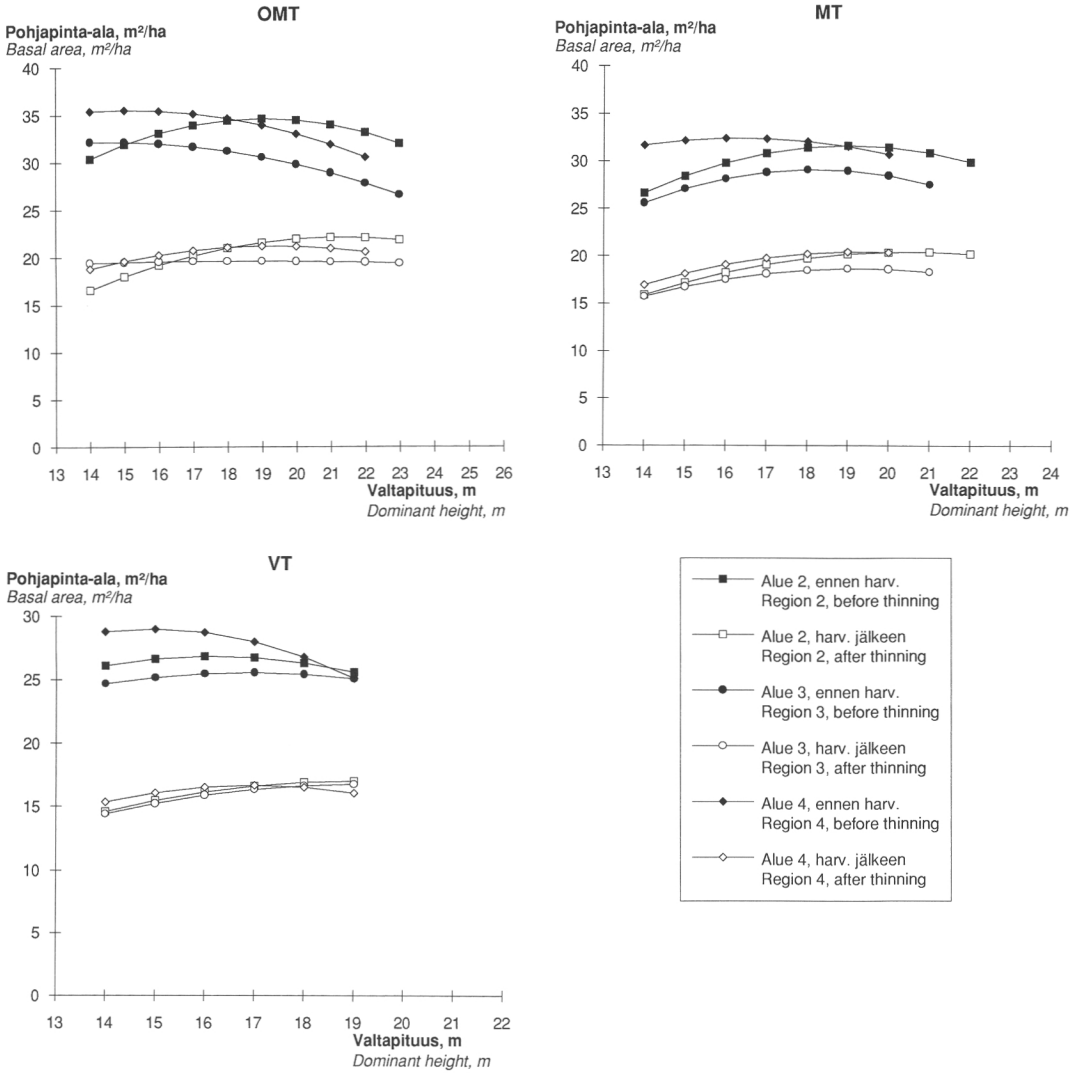
Liite 2. Kolmen prosentin tuottoarvoon perustuvat männiköiden harvennusmallit metsälautakuntien 6–9, 10–11 ja 12–15 alueella (osa-alueet kaksi, kolme ja neljä).

Appendix 2. Thinning models based on net present value of future revenues by three per cent in Scots pine stands. Forestry board districts 6–9, 10–11 and 12–15 (sub-regions two, three and four).



Liite 3. Viiden prosentin tuottoarvoon perustuvat männiköiden harvennusmallit metsälautakuntien 6–9, 10–11 ja 12–15 alueella (osa-alueet kaksi, kolme ja neljä).

Appendix 3. Thinning models based on net present value of future revenues by five per cent in Scots pine stands. Forestry board districts 6–9, 10–11 and 12–15 (sub-regions two, three and four).



Liite 4. Harvennusmallien optimaaliset kiertoajat osa-alueilla kaksi, kolme ja neljä.

Appendix 4. *Optimum rotations of the thinning models in sub-regions two, three and four.*

Kiertoajat, v – Rotations, yr	3 %	5 %	Tapio ¹⁾
Metsälautakunnat 6–9 – Forestry board districts 6–9			
Mänty – Scots pine			
OMT	70	60	
MT	70	60	80–90
VT	75	65	90–100
CT	90	60 ²⁾	110–120
Kuusi – Norway spruce			
OMT	75	60	80–90
MT	85	60	90–100
Metsälautakunnat 10–11 – Forestry board districts 10–11			
Mänty – Scots pine			
OMT	70	60	
MT	70	60	80–90
VT	75	65	90–100
CT	90	60 ²⁾	110–120
Kuusi – Norway spruce			
OMT	75	65	80–90
MT	85	65	90–100
Metsälautakunnat 12–15 – Forestry board districts 12–15			
Mänty – Scots pine			
OMT	75	60	
MT	75	60	80–90
VT	80	70	90–100
CT	100	60 ²⁾	110–120
Kuusi – Norway spruce			
OMT	80	65	80–90
MT	90	55 ²⁾	90–100

¹⁾ Yksityismetsien hoitosuosituksset (Metsänhoitosuosituksset 1989).

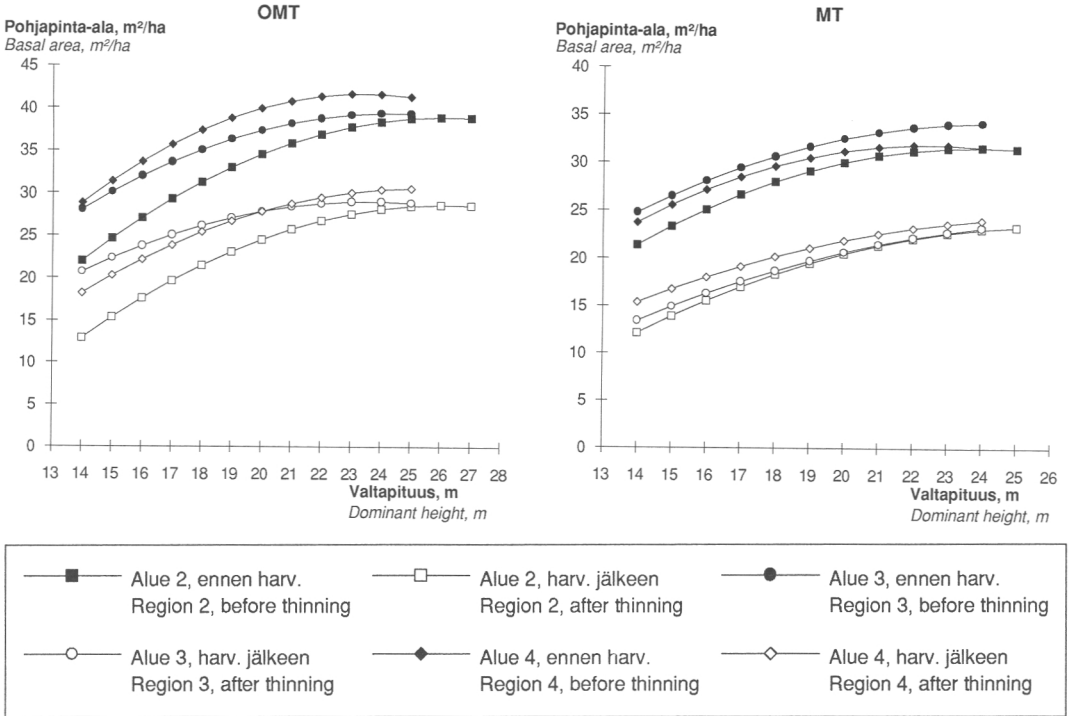
Based on criteria applied in private forests (Metsänhoitosuosituksset 1989).

²⁾ Kiertoaika harventamattomissa metsiköissä.

Rotation in unthinned stands.

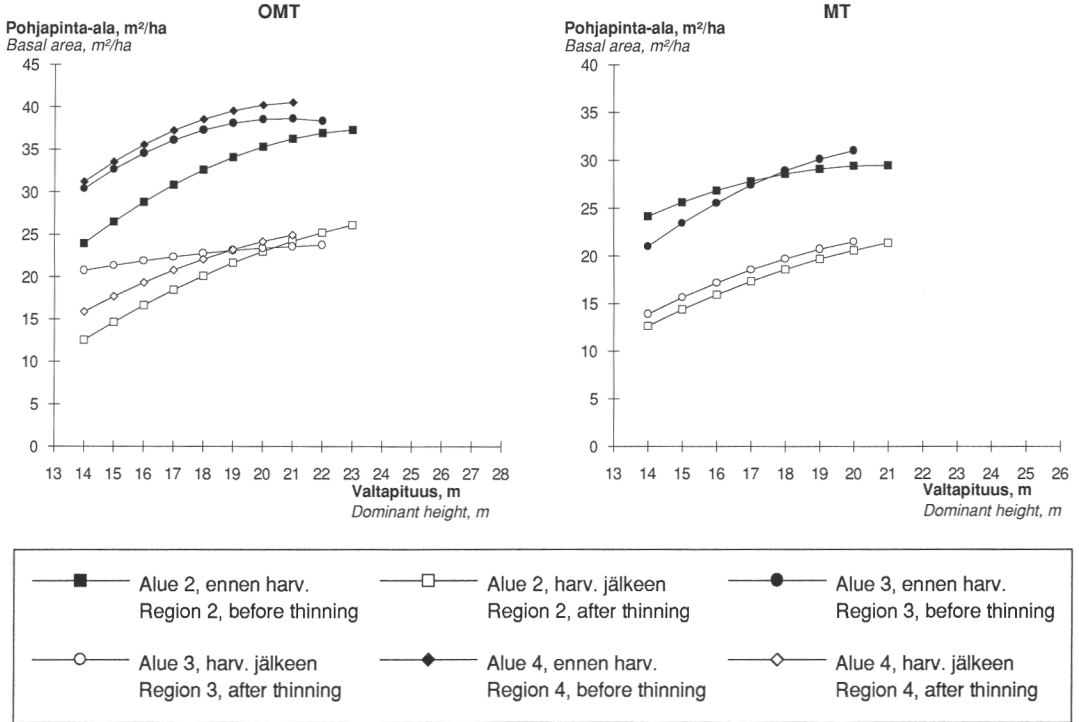
Liite 5. Kolmen prosentin tuottoarvoon perustuvat kuusikoiden harvennusmallit metsälautakuntien 6–9, 10–11 ja 12–15 alueella (osa-alueet kaksi, kolme ja neljä).

Appendix 5. Thinning models based on net present value of future revenues by three per cent in Norway spruce stands. Forestry board districts 6–9, 10–11 and 12–15 (sub-regions two, three and four).

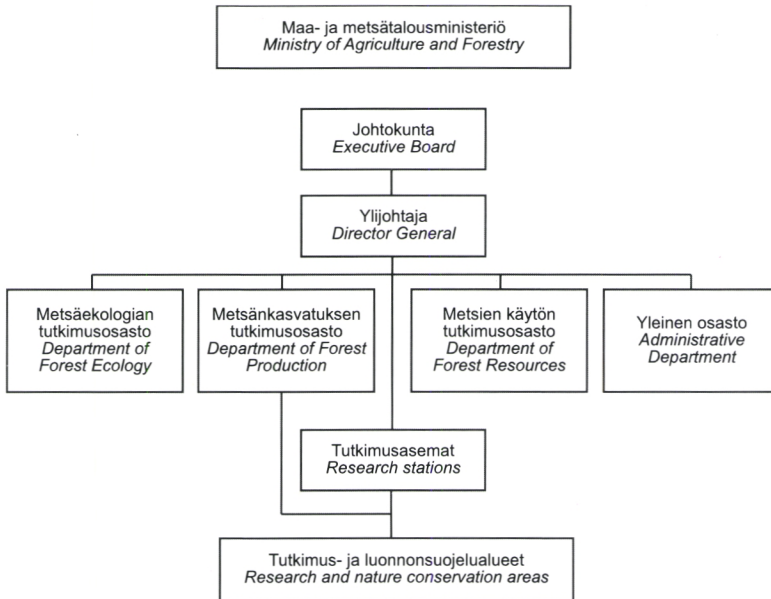


Liite 6. Viiden prosentin tuottoarvoon perustuvat kuusikoiden harvennusmallit metsälautakuntien 6–9, 10–11 ja 12–15 alueella (osa-alueet kaksi, kolme ja neljä).

Appendix 6. Thinning models based on net present value of future revenues by five per cent in Norway spruce stands. Forestry board districts 6–9, 10–11 and 12–15 (sub-regions two, three and four).



METSÄNTUTKIMUSLAITOS — *THE FINNISH FOREST RESEARCH INSTITUTE*



Metsäntutkimuslaitos — *The Finnish Forest Research Institute*

Unioninkatu 40 A, SF-00170 Helsinki, Finland

tel. +358-0-857 051, fax +358-0-625 308, telex 121298 metla sf

Ylijohtaja — *Director General*

Eljas Pohtila

Hallintojohtaja — *Administrative Director*

Tero Oksa

Tiedotuspäällikkö — *Head of Information*

Marja Ruutu

Metsäekologian tutkimusosasto — *Department of Forest Ecology*

Tutkimusjohtaja — *Research Director* Ero Paavilainen

Metsänkasvatuksen tutkimusosasto — *Department of Forest Production*

Tutkimusjohtaja — *Research Director* Jari Parviainen

Metsien käytön tutkimusosasto — *Department of Forest Resources*

Tutkimusjohtaja — *Research Director* Risto Seppälä (Aarne Reunala)

Tutkimusasemat — *Research Stations*

Joensuu

Parkano

Kannus

Punkaharju

Kolari

Rovaniemi

Muhos

Suonenjoki



- No 787 Päivinen, Risto, Nousiainen, Merja & Korhonen, Kari T.: Puutunnusten mittaamisen luotettavuus.
Accuracy of certain tree measurements.
- No 788 Saarilahti, Martti: Turpeen kokoonpuristuvuus ja tiealueen kuivatuspaineen arviointi.
Compressibility of peat and estimation of drainage settlement of a road right-of-way.
- No 789 Voipio, Raili & Laakso, Tapio: Pienikokoisten puiden maanpäällisen biomassan kemiallinen koostumus.
Chemical composition of the above ground biomass of small-sized trees.
- No 790 Aarne, Martti (toim.-ed.): Metsätilastollinen vuosikirja 1990–91.
Yearbook of forest statistics, 1990–91.
- No 791 Valkonen, Sauli: Metsien uudistaminen korkeilla alueilla Pohjois-Suomessa.
Forest regeneration at high altitudes in Northern Finland.
- No 792 Toppinen, Anne & Tervo, Mikko: Sahatavaran viennin ennakoivat suhdannekuvaajat.
Composite leading indicators of Finnish sawnwood exports.
- No 793 Lähde, Erkki: Luontaisen kuusivaltaisen taimikon kehitys lehtomaisella kankaalla.
Development of *Picea abies*-dominated naturally established sapling stand.
- No 794 Rikala, Risto: Taimitarhalannoituksen vaikutus männyntaimien jälkikasvuun ja istutuksen jälkeiseen menestymiseen.
Effect of nursery fertilization on incidence of summer shoots and field performance of Scots pine seedlings.
- No 795 Petäjistö, Leena & Selby, J. Ashley: Piensahojen kehittämisedellytykset.
Small sawmill development possibilities.
- No 796 Gustavsen, Hans Gustav: Vähäpuustoisten männiköiden ja kuusikoiden kehitys.
Development of understocked pine and spruce stands.
- No 797 Saarsalmi, Anna, Palmgren, Kristina & Levula Teuvo: Harmaalepän ja rauduskoivun biomassan tuotos ja ravinteiden käyttö energiapuuviljelmällä.
Biomass production and nutrient consumption of *Alnus incana* and *Betula pendula* in energy forestry.
- No 798 Ollonqvist, Pekka & Kajanus, Miika: Metsänomistajan taloudellisten tavoitteiden merkitys metsänuudistamistavan valinnassa.
Significance of private forest owners' economic goals in the forest stand regeneration decision.
- No 799 Penttinen, Markku: Tulos- ja kustannuslaskentamallien soveltuvuus yhteismetsätalouteen.
Applicability of profit and cost accounting models to jointly-owned forests.
- No 800 Pesonen, Mauno & Hirvelä, Hannu: Liiketaloudelliset harvennusmallit Etelä-Suomessa.
Thinning models based on profitability calculations for southern Finland.