

# Taloudellisesti optimaalisista harvennuksista ja kiertoajoista männylle ja kuuselle

Kari Hyytiäinen, Olli Tahvonen ja Lauri Valsta

1 Johdanto .....	2
2 Metsänomistuksen tavoitteista .....	3
3 Laskelmien korkokanta .....	4
4 Optimointimalli .....	5
Tavoitefunktio .....	5
Optimointimalli männiköille .....	5
Optimointimalli kuuselle .....	7
5 Lähtötilat ja laskelmat .....	7
6 Männikköjä koskevat tulokset .....	8
Harvennukset .....	8
Kiertoajat .....	10
7 Kuusikoita koskevat tulokset .....	10
Harvennukset .....	10
Kiertoajat .....	11
8 Paljaan maan arvoja .....	11
9 Metsätalouden tulojen riippuvuus harvennuksista ja kiertoajasta .....	12
10 Tulosten tulkintaa ja vertailua aikaisempaan tutkimukseen .....	12
11 Vertailua ministeriöasetukseen ja aikaisempiin suosituksiin .....	14
Viittaukset .....	15
Kuvat ja taulukot	

# 1 Johdanto

Yksi osio Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion ja Metsätutkimuslaitoksen metsänhoidon suositusten kehittämiseksi perustetuista konsortiosta käsitteli harvennuskalleja ja kiertoaikoja. Tähän työhön pyydettiin mukaan myös metsäekonomisen tutkimuksen edustajia. Yhteistyö konkretisoitui taloudellisiksi laskelmiksi, joiden avulla pyrittiin hahmottamaan optimaalisia harvennuksia ja kiertoaikoja männylle ja kuuselle.

Vaikka taloudellisesti optimaalisista harvennuksista ja kiertoajoista on olemassa valmista tutkimustietoa, oli useita syitä miksi niiden laskenta juuri edellä mainittua tarkoitusta varten katsottiin tarpeelliseksi. Tutkimustiedon ja käytännön yhteensovittaminen on oma prosessinsa, jossa optimointimallien mahdolliset rajoitukset ja yksinkertaistukset ovat tarkasti paikallistettava ja otettava huomioon tulosten tulkinnassa. Tapion taholta laskentaan haluttiin sisällyttää joitakin harvennusintensiteettiä koskevia rajoitteita, joita ei ole systemaattisesti sisällytetty olemassa olevaan tutkimukseen. Lisäksi laskenta haluttiin perustaa tuoreeseen tietoon puun hinnoista, korjuukustannuksista, koroista ja puun laadun ja puusta maksettavien markkinahintojen välisistä riippuvuuksista. Tulokset haluttiin eriyttää myös tietyille lämpösummavyöhykkeille tavalla, jota ei ole tehty olemassa olevassa tutkimuksessa.

Tutkimuksen näkökulmasta tällaiselle laskentatyölle ja sen tulosten soveltamiselle metsänhoito-ohjeiden laadinnassa näyttäisi niin ikään olevan koko joukko perusteluja. Viimeisen viidentoista vuoden aikana metsätalouden harjoittamisen taloudellisissa puitteissa on tapahtunut useita muutoksia, joista tärkeimmät ovat pääoma-, metsäkiinteistö- ja raakapuumarkkinoiden vapautuminen. Nämä muutokset selkiyttävät markkinoilta tulevia kannustimia taloudellisesti rationaalille puuntuotannolle. Lisäksi näiden muutosten seurauksena metsätalouden harjoittamisen edellytykset ovat oleellisesti lähempänä niitä oletuksia, joihin empiirisesti yksityiskohtaiset metsäekonomiset mallitkin perustuvat. Myös metsäekonomiset mallit ovat kehittyneet varhaisista versioista, joissa todistettiin, että puuntuotannon optimointi numeerisin menetelmin yhdistämällä ekologiset mallit metsän kasvusta ja taloudellinen kuvaus metsätalouden tulonmuodostuksesta on periaatteessa mahdollista. Nykyisten mallien kuvaus metsikön tilasta saattaa perustua 18 000:en muuttuunaan. Malleihin voidaan esimerkiksi sisällyttää varsin yksityiskohtainen kuvaus tukkipuun markkinahinnan ja oksien koon, määrän ja laadun riippuvuudesta.

Lisäksi nykyisten ja varhaisempien metsänhoitosuosituksen ja metsälainsäädännönkin taustalla oleva metsäekonominen näkemys on epäselvä. Metsätalouden kannattavuutta on Suomessa perinteisesti mitattu tavalla, jossa ei huomioida metsätalouteen sitoutuneen pääoman korkokustannuksia. On jopa kyseenalaistettu voidaanko metsää lainkaan ajatella pääomana. Metsätalouden oikeana päämääränä on usein pidetty pyrkimystä mahdollisimman suureen tukkipuutuotokseen. Nämä periaatteet eivät vastaa alan kansainvälistä tutkimustietoa ja niiden soveltamisen voidaan osoittaa johtavan huomattavan suuriin kansan- ja yksityistaloudellisiin tappioihin. Sekä metsänomistajien, yhteiskunnan kokonaisedun että metsään liitettyjen eri merkitysten yhteensovittamisen näkökulmista on eduksi, jos metsänhoidon suositusten kehittämisen taustalla on mahdollisimman ristiriidattomaan tutkimustietoon perustuva näkökulma rationaalisesta puuntuotannosta.

## 2 Metsänomistuksen tavoitteista

Tässä esitettävissä laskelmissa oletetaan puuntuotannon tavoitteeksi mahdollisimman suuri nettotulojen nykyarvo. Metsäekonomisessa tutkimuksessa ei tälle lähtökohdalle ole tässä yhteydessä juurikaan vaihtoehtoja. Mahdollisimman suuren kuutioetuotoksen tavoittelu unohtaa metsänhoidon kustannukset, hinnat ja korkotekijän ja johtaa merkittäviin taloudellisiin tappioihin (Hyytiäinen ja Tahvonen 2003). Keskimääräisen vuotuisen nettotulon maksimointi on erikoistapaus tässä sovellettavasta taloudellisesta kriteeristä, mutta soveltuu puuntuotannon tavoitteeksi vain, jos metsänomistajan reaalikorko on nolla. Jos reaalikorko on positiivinen, aiheutuu tämän kriteerin avulla suunnitelluista metsänhoitotoimenpiteistä niin ikään taloudellisia tappioita.

Metsänomistajien päätöksentekoa tukevien laskelmien täytyy perustua *yksityistaloudellisen* kannattavuuden tavoitteluun, jotta niillä voisi olla merkitystä laadittaessa metsänhoito-ohjeita, joita metsänomistajien kannattaa seurata. Tämä voisi olla ongelmallista, jos puuntuotannon kansantaloudellinen kannattavuus edellyttäisi jyrkästi yksityistaloudellisesta kannattavuudesta poikkeavaa puuntuotannon sisältöä. Pääoma-, metsäkiinteistö- ja raakapuunmarkkinoiden vapautumisen jälkeen jyrkälle erolle yksityistaloudellisen ja kansantaloudellisen kannattavuuden välillä on kuitenkin vaikeaa löytää perusteluja. Teoreettisesti tämä on perusteltu tutkimuksissa Tahvonen ym. 2001 ja Salo ja Tahvonen 2003. Ero voisi syntyä lähinnä metsätaloudelle maksetuista julkisista tuista. Yksityistaloudellinen kannattavuus edellyttäisi tukien sisällyttämistä laskelmiin. Näin ei kuitenkaan tässä esitetyissä laskelmissa tehdä, koska tukien vaikutus optimoitavia muuttujia koskeviin tuloksiin on oletettavasti varsin pieni. Toinen ero yksityis- ja kansantaloudellisen kannattavuuden välille aiheutuu pääomaverotuksesta. Metsätaloudellisen nettotuloksen verotus (myyntiverotus) ei vaikuta välittömästi taloudellisesti edullisimpaan kiertoaikaan tai harvennuksiin. Pääomaverotus vaikuttaa kuitenkin metsätalouden investointien kanssa vaihtoehtoisten sijoituskohteiden tuottoon ja asuntoluottojen tapauksessa metsätalouden tuloilla maksettavien lainojen verojenjälkeiseen korkoon. Jos  $r$  on veronalaisten pääomatulojen (reaalinen) korkotuotto tai verotuksessa vähennyskelpoisten korkojen (reaalinen) korko, on metsätaloudellisissa laskelmissa käytettävä korko  $r'$  eli  $r' = (1 - t/100)r$ , missä  $t$  on pääomatulojen veroprosentti. Tältä osin yksityistaloudellisesti edullisin metsänhoito perustuu kansantaloudellisesta näkökulmasta pikemminkin liian alhaiseen kuin korkeaan korkokantaan.

Pyrkimys mahdollisimman suureen puuntuotannosta saatavaan taloudelliseen tulokseen merkitsee tarkastelun rajaamista sellaisiin metsiin, joihin ei liitetä mitään puuntuotannon kanssa kilpailevia virkistyksellisiä tai luonnonsuojelullisia tavoitteita. Osalle metsänomistajista tämä on sellaisenaan käypä lähtökohta ja osa metsänomistajista saattaa pitää puuntuotantoa pääasiallisena tavoitteena osalla metsämaastaan muun osan ollessa varattuna luonnonsuojelun tai virkistyksen tarpeisiin. Taloudellisten laskelmien tekeminen metsiköille, joissa muuten kuin maankäytön allokoinnin mielessä sovitettaisiin yhteen puuntuotannolliset ja luonnonsuojelulliset tavoitteet olisi mahdollista, mutta kiistanalaisempaa kuin tässä esitetyt laskelmat.

Tässä esitetyt laskelmat perustuvat Tapiosta annettuihin arvioihin raakapuun tulevaisuudessa vallitsevista hintatasoista. Hintoihin liittyvää epävarmuutta ei oteta laskelmissa huomioon, vaikka tosiasiaa metsänomistaja joutuu tekemään hakkuupäätökset tilanteessa, jossa puun hinnat (sekä myös korkokanta) kehittyvät ajassa stokastisesti. Puun hintoihin ja korkokantaan liittyvän stokastisuuden rationaalinen huomiointi voi vaikuttaa optimaalisiin kiertoaikoihin ja harvennuksiin varsin voimakkaasti. Tutkimustiedon perusteella sekä puun hintojen että korkokannan voi olettaa kehittyvän keskiarvohakuisina stokastisina prosesseina. Tällöin hakkuut aikaistuvat vakioarvoilla lasketuista kun puun hinnan tai koron ennustetaan olevan pitkän aikavälin keskiarvojen yläpuolella. Vastaavasti hakkuuta on kannattavaa viivästyttää hintojen tai koron ollessa pitkän aikavälin

keskiarvojen alapuolella. Ongelmana on, että taloudellisesti oikeansuuruinen reaktio stokastisesti kehittyviin hintoihin ja korkoihin riippuu metsänomistajan riskinottohalusta. Riskinottohalu voi taas riippua esimerkiksi metsänomistajan varallisuudesta (Tahvonen ja Kallio 2005). Tämän seurauksena rationaalisen reaktion taso epävarmuuteen on metsänomistajakohtaista ja näin ollen epävarmuuden sisällyttäminen metsänhoitosuositukseen on vaikeaa muuten kuin siten, että suositusten tulisi olla riittävän väljiä suhteessa vakiohinnoilla ja korolla laskettuihin tuloksiin.

Laskelmissa pidettiin kantohinnat puun tarjotusta määrästä riippumattomina vakioina. Tätä voisi kritisoida sillä perusteella, että metsänhoitosuositusten muutos voi aiheuttaa muutoksen puun markkinoille tarjotussa määrässä ja tämä voisi puolestaan vaikuttaa tukki- ja kuitupuun hintoihin. Näiden muutosten seurauksena vakiohinnoilla lasketut kiertoaajat ja harvennusohjelmat eivät enää olisi uusien hintojen vallitessa optimaalisia. Kiinteiden hintojen käyttöä voi perustella sillä, että vallitsevalla korkotasolla optimaalinen metsänkäsittely muuttaa puun tarjontaa varsin rajoitetusti. Tämän seurauksena muutokset raakapuun hinnoissa ovat tuskin kovin suuria. Laskennan kuluessa tehtiin varsin kattava herkkyysanalyysi siitä miten realistinen tukkipuun hinnan nousu suhteessa kuitupuun hintaan muuttaisi tuloksia tässä esitetyistä. Muutokset kiertoaajoissa ja harvennusohjelmissa olivat varsin pieniä. Lisäksi joudutaan toteamaan, ettei Suomessa ole tehty sellaista raakapuumarkkinoita koskevaa tutkimusta, jota tarvittaisiin hintavaikutusten sisällyttämiseksi laskelmiin.

### 3 Laskelmien korkokanta

Metsänomistajien päätöksentekoon soveltuviissa laskelmissa korkokanta kuvaa metsätaloudelle vaihtoehtoisen parhaan sijoituskohteen tuottoa. Metsänomistajalle paras vaihtoehtoinen sijoituskohde voi olla lainojen lyhentäminen tai säästöjen sijoittaminen valtion obligaatioihin, erilaisiin rahastoihin, osakkeisiin jne. Tässä ei pyritä esittämään yksityiskohtaista kuvaa näistä sijoituskohteista vaan sen sijaan luomaan yleisnäkemyks metsänomistajille tarjolla olevien sijoitusmahdollisuuksien korkotasosta.

Kuvassa 2.1 on esitetty asuntoluotto-, kulutusluotto- ja valtion 10 vuoden obligaatiokorkojen viimeaikainen kehitys. Asuntoluottojen reaalikorko on vuoden 2000 jälkeen ollut matala ja vaihdellut 2 ja 4 % välillä. Näiden luottojen kohdalla on lisäksi huomioitava, että korot ovat toistaiseksi pääomaverotuksessa (osittain) vähennyskelpoisia. Vastaavalla ajanjaksolla kulutusluottojen reaalikorko on vaihdellut välillä 3-6 % ja valtion 10 vuoden obligaatioiden reaalikorko välillä 1.2-4.5 %.

Lisäksi voidaan tarkastella Helsingin pörssissä noteerattuihin osakkeisiin sijoitetun pääoman reaalityttöä (Taulukko 2.1). Näiden tuottojen kohdalla on otettava huomioon pääomaverotus sekä esimerkiksi valtion obligaatioihin verrattuna suurempi riskitaso. Pitkällä aikavälillä (1921-1996) suomalaisten yritysten osakkeisiin sijoitettu pääoma on tuottanut 2.1 -3.6 prosentin reaalityttöä, laskentatavasta riippuen (Jorion ja Goetzmann 1999). Oheisessa taulukossa on kerättyä Helsingin pörssissä noteerattujen osakkeiden nimellis- ja reaalityttöä eri ajanjaksoille. Voidaan havaita, että viimeisen 30 vuoden aikana keskimääräinen tuotto on vaihdellut 4.8 ja 10 %:n välillä.

Metsänomistajille käypää korkokantaa voidaan etsiä myös metsäkiinteistöjen markkinahintojen avulla arvioimalla minkä suuruisia korkokantaa markkinahinnat heijastavat. Tällaisen tarkastelun nojalla päädytään siihen, että metsänomistajat näyttäisivät diskonttaavan metsätalouden nettotuloja noin 4 %:n (reaalisella) korkokannalla Hyttiäinen ja Tahvonen (2003).

Viime aikaiset korkokantaa koskevat arviot ennustavat noin 1%:n nousua vuoteen 2007 mennessä (Suomen Pankki, 2005, European Central Bank 2005). Edellä esitetyn tarkastelun perusteella päädyttiin taloudelliset laskelmat tekemään 1-5 %:n korkokannoilla.

## 4 Optimointimalli

### **Tavoitefunktio**

Optimointilaskelmien tavoitteena on hakea männiköiden ja kuusikoiden käsittelyketjuja, jotka tuottavat laskennallisesti suurimman mahdollisen nettotulojen nykyarvon. Nettotulojen nykyarvo lasketaan diskonttaamalla taimikonperustamisen ja -hoidon kustannukset sekä hakkuista saatavat nettokantorahatulot kiertoajan alkuun. Tarkastelun lähtötilanne on paljas metsämaa ennen taimikonperustamista. Nettokantorahatulot lasketaan vähentämällä tienvarsihintojen ja puutavaralajittaisten poistumien tulosta korjuun kustannukset. Metsänomistamiseen ja -hallintaan liittyvät kiinteät vuotuis-kustannukset (11 €/ha/vuosi) otetaan myös laskelmassa huomioon. Kustannukset ja tulot ilmaistaan ilman arvonlisäveroa ja niistä vähennetään pääomaverot (28%).

Optimoitavia muuttujia ovat harvennusten lukumäärä (1-4 harvennusta kiertoajan kuluessa), harvennusten voimakkuus, harvennustapa ja päätehakkuun ajankohta. Sekä männiköiden että kuusikoiden kasvun ennustamiseen käytetään ns. yksittäisen puun malleja (*individual tree models*), joissa metsikön rakenne esitetään kuvauspuiden avulla. Harvennustapa kuvataan määrittämällä harvennuksessa poistuva osuus eri kuvauspuiden edustamille kokoluokille. Tässä selvityksessä poistettavien puiden osuus optimoidaan suurinta, keskikokoista ja pienintä kuvauspuuta edustaville kokoluokille. Muiden kokoluokkien harvennusvoimakkuus saadaan järjestämällä kokoluokat pienimmästä suurimpaan ja interpoloimalla poistumaosuudet lineaarisesti läpimitan (kuusen malli) tai kokoluokan (männyn malli) suhteen.

### **Optimointimalli männiköille**

Optimointimalli koostuu puuston kasvumallista, korjuukustannusmalleista aines- ja energiapuulle, sekä taloudellisista hinta-, kustannus-, ja korkoparametreista. Lisäksi optimointimalliin liitetään optimointialgoritmi, joka hakee parhaan taloudellisen tuloksen antavan hakkuuohjelman ja puuston kehitysuran kiertoajan kuluessa. Männikön kasvu ja rakenteen kehitys kuvataan Pipequal-kasvumallilla (Mäkelä 1997, Mäkelä 2002, Mäkelä ja Mäkinen 2003). Pipequal-malli on prosessipohjainen kasvumalli, jossa kuvauspuiden kasvu kuvataan niiden elintoimintojen, rakenteellisten lainalaisuuksien ja kasvuresurssien perusteella. Malli on liitetty taloudelliseen optimointiin (Hyytiäinen ym. 2004).

Mäkelän prosessipohjainen kasvumalli on alunperin kalibroitu eteläsuomalaisille puolukkatyyppin kankailla. Tätä selvitystä varten kasvun taso kalibroitiin eri kasvupaikoille (tuore, kuivahko ja kuiva kangas), lämpösumma-alueille (1300 ja 1100 dd) ja vakiintuneen taimikon lähtötiheyksille (1500, 2000 ja 3000 runkoa/ha) säätämällä hienojuurten massan ja neulasmassan välistä suhdetta. Kalibrointi tehtiin vertaamalla puusto- ja puumuuttujien kehitystä Motti-ohjelmalla (Hynynen ym., 2002) saatuun metsän kehitykseen kiertoajan kuluessa. Puuston valtapituus kiertoajan lopussa ja kiertoajan kuluessa saatu puun tuotos pyrittiin saamaan samalle tasolle. Vertailussa käytettiin

tavanomaista metsänkäsittelyketjua, jossa ei synny itseharvenemisestä aiheutuvaa luonnonpoistumaa.

Kasvumallin lähtötilana käytettiin vakiintuneita taimikoita. Lähtötiloiksi valittiin taimikonhoidon jälkeistä tiheyttä ja kasvupaikkaa edustavia runkolukusarjoja. Tuoreen ja kuivahkon kankaan männiköt on perustettu keinollisesti ja kuivan kankaan männikkö luontaisesti. Tuoreella ja kuivahkolla kankaalla vakiintuneen taimikon perustamisen oletetaan edellyttävän maanmuokkausta (142 €/ha), kylvöä (176 €/ha) ja yhtä taimikonhoitoa (276 €/ha). Kuivalla kankaalla kustannuksia aiheutuu maanmuokkauksesta ja taimikonhoidosta. Taimikon oletetaan syntyvän reunametsäsiemennyksen avulla.

Pipequal-mallin kuolleisuuden kuvaus muutettiin Motti-ohjelmassa käytetyn kuvauksen mukaiseksi, jotta vertailtavuus mallien ennusteiden välillä helpottuisi. Ylitiheydestä johtuva kuolleisuus kuvataan Hynysen itseharvenemismallien ja muu taustakuolleisuus Haapalan yhtälöiden mukaan (Hynynen ym. 2002). Motti-mallissa käytetystä kuvauksesta poiketen ylitiheydestä aiheutuva kuolleisuus alkaa joustavasti jo hiukan ennen itseharvenemisrajan saavuttamista.

Männyn hinnoittelussa sovellettiin kahta hinnoittelutapaa: laatuhinnoittelua ja perinteisempää tukin ja kuidun jakoon perustuvaa hinnoittelua. Laatuhinnoittelussa puutavaralajeja on neljä: laatutyvi, tavallinen tyvitukki, heikompi tukki ja kuitu. Pölkytys ja jako puutavaralajeihin perustuu prosessimallin antamiin tietoihin hakkuussa poistettavien runkojen runkokäyristä ja oksaisuudesta (oksien keskimääräinen läpimitta kiehkuroittain, latvusraja ja kuivaoksaraja). Kuitua saadaan puiden latvaosista (läpimitta 6-15 cm, minimipituus 3 m.) ja oksaisista tukkimitat saavuttaneista pölkyistä. Tyvitukin pituus voi vaihdella 4.3 ja 6.1 metrin välillä (minimilatulaläpimitta 15 cm). Tyvitukin jakaantuminen eri laatuluokkiin kussakin kokoluokassa perustuu kuivaoksarajan korkeuteen puun tyveltä (Kuva 5.1). Kuivaoksa-ajan alapuolella kaikki oksat ovat karsiutuneet ja kylestyneet niin pitkälle, ettei kuivan oksan läpimitta ole enää mitattavissa. Laatutyveä saadaan vain rungoista, joiden rinnankorkeusläpimitta ylittää 25 cm. Lisäksi edellytetään, ettei 7-8 m korkeudella ole yli 3 cm läpimittaa suurempia oksia. Heikomman tukin hintaa sovelletaan väli- ja latvatukeille. Toisen tukin minimipituus on 3.7 m

Perinteisessä hinnoittelussa rungot jaetaan tukkiin ja kuituun pelkästään runkojen dimensioitten perusteella. Runkokuidun osuus tukkidimensiot saavuttaneille rungoille lasketaan Mehtälön (2002) yhtälöiden avulla. Läpimittakriteerit (15 cm latvaläpimitta tukille ja 6 cm kuidulle) ovat samat kuin laatuhinnoittelussa, mutta tukkien minimipituudet ovat pienempiä (tyvitukki 3.7 m ja väli- tai latvatukki 3.1 m).

Tienvarsihinnat saatiin lisäämällä keskiarvoisiin kantohintoihin (hintataso v. 2005) keskiarvoiset tukin ja kuidun (6.12 ja 11.37 €/m<sup>3</sup>) korjuukustannukset (Örn 2002). Männyn tienvarsihinnat esitetään taulukossa 4.1.

Ainespuun korjuun kustannukset laskettiin Metsätehossa kehitetyn mallilla (Kuitto ym. 1994), joka perustuu koneellisen hakkuun ja lähikuljetuksen ajanmenekkiyhtälöihin (Kuitto ym. 1996). Käyttötuntikustannuksina hakkuulle ja lähikuljetukselle käytettiin 75.67 ja 53.35 €/h (v. 2005 kustannustasoa vastaavat luvut saatu Kari Väätäiseltä, Metsäntutkimuslaitoksesta). Hakkuun järjestelystä ja koneiden kuljetuksesta aiheutuvaksi kiinteäksi kustannukseksi arvioitiin 100 €/ha.

Männikön ensiharvennus voitiin tehdä joko ainespuuhakkuuna tai energiapuuhakkuuna tuoreella ja kuivahkolla kankaalla sen mukaan kumpi tuotti paremman taloudellisen tuloksen. Energiapuukorjuun kustannukset laskettiin Metsäntutkimuslaitoksessa kokopuunkorjuulle

kehitettyllä mallilla (Laitila ym. 2004). Korjuuketju koostuu koneellisesta kaatokasauksesta, lähikuljetuksesta ja peittämisestä (Laitila ym. 2004). Kaatokasauksen ja lähikuljetuksen yksikköhintoina käytettiin 50.00 ja 53.35 €/h. Peittämiskustannus oli 0.90 €/m<sup>3</sup>.

Harvennuksille asetettiin Tapion edustajien taholta rajoitteita, joiden avulla oletettiin vältettävän myrsky- ja lumituhoriskejä sisältävät voimakkaat harvennukset. Ensiharvennuksessa sai poistaa enimmillään 50 % puuston pohjapinta-alasta. Myöhemmissä harvennuksissa maksimipoistuma oli 40 % pohjapinta-alasta. Harvennuksessa minimipoistuma oli 30 m<sup>3</sup>/ha. Ensiharvennuksessa lisäksi poistettiin kaikista kokoluokista vähintään 23 % rungoista ajouraverkoston raivaamisen ja laatuharvennusvelvoitteen takia. Ensiharvennuksessa oletettiin poistettavan laatuvikaisia runkoja kaikista kokoluokista. Myöhemmissä harvennuksissa kunkin kokoluokan rungoista poistettiin vähintään 5 % ja enintään 95%. Kuivan kankaan männiköissä harvennukset pakotettiin tehtäväksi ennen kuin puusto saavutti 28 m<sup>2</sup>/ha pohjapinta-alan.

## **Optimointimalli kuuselle**

Kuusikoitten osalta laskelmat tehtiin Valstan ja Linkosalon (1996) Stand Management Assistant-ohjelmalla (SMA). Kasvumallit perustuvat MELA-ohjelmassa käytettyihin kasvuyhtälöihin (Hynynen ja Ojansuu 1996). Korjuukustannukset määritetään Metsätehon korjuukustannusmallilla (Kuitto ym. 1994) kuten mäntylaskelmienkin osalta. Puutavaralajittaiset poistumat lasketaan Laasasenahon yhtälöillä.

Kuusikko oletetaan perustettavan istuttaen. Ketju koostuu maanmuokkauksesta, istutuksesta ja yhdestä taimikonhoidosta. Taimikonperustamishetkeen diskontattujen taimikonperustamis- ja taimikonhoitokustannusten yhteenlasketuksi nykyarvoksi oletetaan 1000 €/ha. Tukin ja kuidun tienvarsihintoina käytetään 52.63 ja 32.46 €/m<sup>3</sup> 1300 ja 1100 dd. lämpösummavyöhykkeillä. Pohjoisimmalla 900 dd. lämpösummavyöhykkeellä tukin ja kuidun tienvarsihinnat ovat 37.65 ja 27.05 €/m<sup>3</sup>.

Läpimitan kasvun taso kalibroitiin eri kasvupaikoille ja lämpösumma-alueille siten, että yli kiertoajan laskettu puun tuotos saatiin vastaamaan Vuokilan ja Väliahon (1980) kehityssarjoja. Kalibrointi tehtiin kertomalla läpimitan kasvu vakiolla (0.75-0.9 kasvupaikasta riippuen). Edelleen kasvun tasoa kalibroitiin korkeilla pohjapinta-alatasoilla siten, että mallin ennustaisi oikeansuuntaisesti myös harvoin tai hyvin kevyesti harvennettujen kuusikoiden kasvun. Kalibrointi tehtiin vertaamalla rehevän kasvupaikan eteläsuomalaisten kuusikoiden kehityssarjoja (Vuokila 1985) vastaavan kasvupaikan malliennusteisiin. Kilpailun (negatiivista) vaikutusta kuvauspuiden läpimitan kasvuun lisättiin korkeilla pohjapinta-alatasoilla.

Harvennuksessa sallittiin maksimissaan poistettavaksi 40% pohjapinta-alasta. Käsittelyketjut, joihin sisältyi hyvin kevyitä harvennuksia (<30 m<sup>3</sup>/ha) suljettiin pois.

## **5 Lähtötilat ja laskelmat**

Optimoinnin lähtötiloiksi valittiin vakiintuneita, hoidettuja taimikoita (valtapituus n. 7-8). Kutakin kasvupaikkaa ja lähtötiheyttä edustava lähtöpuusto generoitiin kestokoeala-aineistosta johdetuista keskiarvoisista puustotunnuksista. Metsikön rakenne kuvataan 10 kuvauspuun avulla, joista kukin edustaa samaa hehtaarikohtaista runkolukumäärää lähtötilanteessa. Jouni Siipilehto

Metsäntutkimuslaitoksesta toimitti lähtötilat. Samoja lähtötiloja käytettiin myös Risto Ojansuun metsähoitosuosituksen tarkistushankkeelle tekemissä Motti-laskelmissa.

Lähtöpuustot määritettiin kolmelle eri lähtötiheydelle kullakin kasvupaikalla (1300, 1800 ja 2300 runkoa/ha kuusella ja 1500, 2000 ja 3000 runkoa/ha männyllä). Männyn osalta laskelmat tehtiin tuoreelle, kuivahkolle ja kuivalle kankaalle 1300 lämpösumma-alueella ja tuoreelle ja kuivahkolle kankaalle 1100 lämpösumma-alueella. Kuusen osalta laskelmat tehtiin lehtomaiselle ja tuoreelle kankaalle 1300, 1100 ja 900 lämpösumma-alueilla. Kylvetyissä ja luontaisesti uudistetuissa männiköissä oletettiin 2 vuoden uudistamisviive (ts. edellisestä päätehakuusta kuluneen ajan ja metsikön keski-ian välinen ero).

Optimoitaessa haetaan metsänkäsittelyketju, joka tuottaa omistajalleen suurimman mahdollisen nettotulojen nykyarvon. Sekä männyn että kuusen osalta optimoinnissa käytetään Hooke ja Jeeves'in epälineaarista optimointialgoritmia. Algoritmi etsii systemaattisesti alkuarvausta suuremman tavoitefunktion arvon antavia metsänkäsittelyketjuja. Optimointi toistettiin lukuisille eri alkuarvauksille, jotta paras käsittelyketju saataisiin luotettavasti määritettyä. Tämä merkitsee sitä, että optimointialgoritmi testasi satojatuhansia metsänkäsittelyketjuja parhaimman ratkaisun löytämiseksi.

## 6 Männikköjä koskevat tulokset

### *Harvennukset*

Männiköiden optimaalisia harvennuksia koskevia tuloksia esitellään kuvissa 6.1-6.13. Kuvissa 6.1-6.5 esitellään metsikön kehitysurat eri koroille, kasvupaikoille, lämpösummavyöhykkeille ja taimikonharvennuksen jälkeisille lähtötiheyksille, kun optimoinnissa sovelletaan laatuhinnoittelua. Kuvissa 6.6.-6.10 esitetään vastaavat pohjapinta-alan kehitysurat valtapituuden funktiona perinteisellä hinnoittelulla laskettuna. Männiköiden kehitysurat harvennusten välillä on yksinkertaisuuden vuoksi lineaarisia. Taaksepäin kääntyvä käyrän osa viittaa yläharvennukseen, jossa valtapituus pienenee suurimpien puiden poiston takia.

Matalalla laskentakorolla harvennukset ovat kevyitä ja puuston pohjapinta-ala pidetään korkealla tasolla yli kiertoajan. Näin saadaan kasvupaikan puuntuotospotentiaali ja etenkin parempilaatuisen tukkipuun tuotospotentiaali hyödynnettyä mahdollisimman tarkoin. Harvennukset pyritään ajoittamaan siten, että ne voidaan tehdä juuri ennen kuin jäävien runkojen kasvu merkittävästi hidastuisi ylitiheyden takia tai ennen kuin ylitiheydestä aiheutuva kuolleisuus vähentäisi runkolukumäärää. Harvennusten ajoitukseen vaikuttavat myös puutavaralajisiirtymistä aiheutuvat arvokasvukynnykset. Harvennus on rationaalista ajoittaa siten, että siinä voidaan poistaa runkoja, jotka ovat hiljattain ylittäneet tietyn arvokynnyksen (esim. kuiturungosta tukkipuuksi tai yhden tukin rungosta kahden tukin rungoksi).

Parhailta männyn kasvupaikoilla (tuore ja kuivahko kangas 1300 dd. lämpösummavyöhykkeellä ja tuore kangas 1100 dd lämpösummavyöhykkeellä) koron nosto vähentää harvennusten lukumäärää ja lyhentää voimakkaasti optimaalista kiertoaikaa. Korkeillakin koroilla tähdätään metsikön kehitysvaiheeseen suhteutettuna suureen päätehakuupuuston tilavuuteen. Heikoimmilla kasvupaikoilla (esim. kuivahko kangas 1100 dd lämpösummavyöhykkeellä kuva 6.5) ja 2-3% koroilla sitä vastoin useammin toistuvat harvennukset johtavat kiertoajan loppua kohden laskevaan pohjapinta-alan tasoon. Puustoon sitoutuneen pääoman voimakkaampi poistaminen jo harvennuksissa on rationaalista heikoimmilla kasvupaikoilla, joissa kiertoaikaa ei kannattaisi lykätä

niin pitkään, että tukkiosan yksikköarvo paranisi arvokkaampien tukkilaatujen saavuttamisen myötä (vrt. kuva 6.14). Samasta syystä optimikäsittelyt, joissa pohjapinta-alan taso laskee kiertoajan loppua kohden ovat yleisempiä perinteisellä hinnoittelulla kuin laatuhinnoittelulla (vrt. kuvia 6.1-6.5 ja 6.6-6.10). Optimiratkaisujen lisäksi saatiin vain hieman pienemmän nettotulojen nykyarvon antavia ratkaisuja, joissa harvennusten määrä on pienempi, kiertoaika on lyhyempi ja joissa tähdättiin korkeampaan päätehakuu puuston pohjapinta-alaan.

Kiertoajan loppua kohden laskeva pohjapinta-alan taso osoittautui rationaaliseksi myös paremmilla kasvupaikoilla, mikäli harvennuksessa sallitaan joustavampi puuvalinta ja suuremmat kertapoistumat. Tällöin optimiharvennukset olivat kuitenkin selkeämmin suurimpien puiden poistoon perustuvia poimintaharvennuksia eikä oletus poistettavien runkojen tasaisesta tilajärjestyksestä välttämättä enää pidä paikkansa.

Lähtötiheys vaikutti ensisijaisesti ensiharvennuksen ajankohtaan. Mitä suurempi runkoluku taimikonhoidon jälkeen jätetään, sitä aikaisemmin kannattaa ensiharvennus pääsääntöisesti tehdä. Suuremmilla lähtötiheyksillä harvennuksissa poistettavat runkolukumäärät ovat suurempia, ja myös harvennuskertoja kiertoajan kuluessa voi olla useampia.

Ensiharvennuksen lykkääminen pienentää korjuun kustannuksia, ja sen takia ensiharvennusta optimointitulosten mukaan yleensä lykätään lähelle hetkeä, jonka jälkeen alkaa syntyä ylitiheydestä aiheutuvaa luonnonpoistumaa. Matalalla 1 % korolla tosin ensiharvennus voidaan tehdä jo varhaisemmassa vaiheessa. Matalalla korolla varhaisen ensiharvennuksen positiiviset vaikutukset puuston kasvuun ovat ensiharvennuksen kantorahatuloja merkityksellisempiä.

Eteläisimmän Suomen (1300 dd) kasvupaikoilla ensiharvennus tehdään optimointilaskelmien mukaan ainespuuhakkuuna. Väli-Suomen (1100 dd) kuivahkon kankaan männikössä 3000 rungon lähtötiheydellä ensiharvennus tehdään energiapuukorjuuna, kun sovelletaan 1 % korkoa ja ainespuuhakkuuna sitä korkeammilla koroilla (kts. Kuva 6.5). Laskelmissamme käytetyillä hintasuhteilla ja korjuun kustannuksilla energiapuukorjuu on ilman tukiakin varteenotettava vaihtoehto ainespuukorjuulle, jos ensiharvennus on puuston kehityksen parantamiseksi järkevä tehdä jo 10-12 m valtapituusvaiheessa.

Metsikön arvokasvukynnykset sattuvat laatuhinnoittelulla ja perinteisellä hinnoittelulla hieman eri ajankohtiin, ja siten myös harvennusten ajoitukset poikkeavat jonkin verran toisistaan eri hinnoittelumenetelmillä. Perinteisellä hinnoittelulla myös laskevaan pohjapinta-alan tasoon tähtäävä harvennusohjelmat ovat jonkun verran yleisempiä kuin laatuhinnoittelulla. Hinnoittelumenetelmä vaikuttaa kuitenkin päätehakkuun ajankohtaan enemmän kuin harvennuksiin.

Kuvat 6.11 - 6.13 havainnollistavat männikön kokoluokkajakauman kehitystä ja eri kokoluokista harvennuksissa poistettavia runkoja VT-männikössä 1300 dd. lämpösummavyöhykkeellä 1, 3 ja 5 % koroilla. Kukin kuva kuvaa metsän rakennetta 10 kuvauspuun avulla esitettynä harvennushetkellä. Pylväiden korkeus kuvaa kunkin kuvauspuun edustamaa runkolukumäärää hehtaarilla. Valkoinen osa pylväästä esittää hakkuusta poistuvia runkoja, ja musta osa hakkuussa jätettäviä runkoja.

Ensiharvennuksessa poistetaan runkoja kaikista kokoluokista ajourien raivaamisen ja huonolaatuisten runkojen poiston yhteydessä. Tämän takia kevyet ensiharvennukset ovat luonteeltaan tasaharvennuksia. Voimakkaammissa ensiharvennuksissa voidaan poistaa hieman suurempi osuus joko pieniä tai suuria puita metsikön lähtötiheyden, kehitysvaiheen ja sovellettavan korkokannan mukaan. Alaharvennukset ovat yleisempiä matalilla koroilla ja suurilla

lähtötiheyksillä. Toinen harvennus ja myöhemmät harvennukset ovat valtaosin yläharvennuksia, joissa painotetaan tukkimitat saavuttaneiden suurimpien runkojen poistamista. Suurilla lähtötiheyksillä (3000 runkoa/ha) yleisiä ovat myös harvennukset, joissa poistetaan metsikön suurimpia ja pienimpiä runkoja keskikokoisia runkoja enemmän. Harvennukset, joissa poistetaan puita läpimittaluokkajakauman molemmista päistä kiertoajan kuluessa johtavat kokoluokkajakaumaltaan yhtenäiseen päätehakkuupuustoon.

Kuvassa 6.14 esitetään pitkän aikavälin puutarjonnan taso ja jakaantuminen eri puutavaralajeihin optimiratkaisuissa 1, 3 ja 5% koroilla. Koron nosto yhdestä viiteen prosenttiin pienentää pitkän aikavälin puutarjontaa 10-18%. Korkokannalla on kuitenkin tasovaikutuksia suurempi vaikutus pitkän aikavälin puutarjonnan rakenteeseen. Matalilla korkokannoilla tuotetaan arvokkaampia puutavaralajeja. Korkealla 5% korolla on rationaalista tyytyä huonompilaatuisen tukin ja kuidun tuottamiseen. Myös kasvupaikan puuntuotuskapasiteetti vaikuttaa voimakkaasti puutarjonnan rakenteeseen. Parhaimpien tukkilaatujen tuottaminen on rationaalista eteläisimmän Suomen tuoreilla ja kuivahkoilla kankailla, joissa lyhyimmässä ajassa saadaan kasvatettuja järeitä ja laadukkaita tukkipuita. Tulosta tulkittaessa on kuitenkin otettava huomioon, että kuivaoksarajan kehittyminen saattaa poiketa optimointimalliin liitetystä mallista rehevimmillä männyn kasvupaikoilta ja yliarvioida saatavissa olevan laatutyven määrän.

## **Kiertoajat**

Männyn optimikiertoaikoja koskevat tulokset on esitetty kuvissa 6.15-6.19. Kuvissa vaaka-akselilla on päätehakattavan puuston ikä vuosina ja pystyakselilla päätehakattavan puuston pohjapinta-aloilla painotettu keskiläpimitta senttimetreinä. Korkokanta vaihtelee välillä 1-5 % ja puuston lähtötiheydet välillä 1500-3000 runkoa/ha. Optimikiertoajat on esitetty erikseen molemmille hinnoitteluvaihtoehdoille. Optimikiertoaika riippuu herkästi korosta ja lyhenee poikkeuksetta koron kasvaessa. Useimmissa tapauksissa koron kasvu myös alentaa päätehakkuupuuston keskiläpimittaa. Poikkeuksena ovat CT kasvupaikka lämpösumma-alueella 1300, jossa päätehakkuupuuston läpimitta kasvaa koron noustessa 2.sta 3:een prosenttiin laatuhinnoittelun tapauksessa ja yhdestä kahteen prosenttiin perinteisen hinnoittelun tapauksessa. Syynä näihin poikkeuksiin (ks. myös VT, lämpösumma-alue 1100) on harvennusmäärän kasvu koron kasvaessa. Yleisenä havaintona nähdään edelleen, että pienempi taimikonhoidon jälkeinen puuston tiheys johtaa suurempaan keskiläpimittaan päätehakkuuhetkellä. Lukuun ottamatta kasvupaikkoja CT 1300 ja VT 1100 laatuhinnoittelu näyttäisi johtavan jonkin verran suurempaan riippuvuuteen korosta verrattuna perinteiseen hinnoitteluun.

## **7 Kuusikoita koskevat tulokset**

### **Harvennukset**

Kuvat 7.1. - 7.6. esittävät optimaalisia kehitysuria lehtomaisen ja tuoreen kankaan kuusikoille 1300, 1100 ja 900 dd. lämpösumma-alueilla. Harvennusten ajoittamista ja harvennusvoimakkuutta koskevat tulokset ovat pääpiirteittäin samansuuntaisia männylle saatujen tulosten kanssa. Korjuuteknologian kuvaus ja optimoinnissa valittu puuvalinnan joustavuus vaikuttavat optimiharvennuksiin puulajien välisten kasvun ja hintasuhteiden eroavaisuuksia enemmän. Merkittävin ero männiköihin verrattuna liittyy viimeisten harvennusten jälkeisiin pohjapinta-alan tasoihin. Kuusikoissa harvennuksissa jätetään korkeillakin koroilla reilusti lakirajat ylittävä pohjapinta-alan taso.

Kuvat 7.7.-7.9 esittävät tuoreen kankaan kuusikon (1300 dd. lämpösummavyöhyke) optimiharvennuksia 1, 3 ja 5% koroilla. Ensiharvennus on 1% korolla alaharvennus ja 3 ja 5% koroilla yläharvennus. Myöhemmät harvennukset ovat yläharvennuksia. Tulokset ovat samansuuntaisia myös muille kasvupaikoille, lämpösummavyöhykkeille ja lähtötiheyksille.

Taulukko 7.1 esittää pitkän aikavälin puuntarjonnan optimiratkaisuista eri koroille, kasvupaikoille, lämpösoma-alueille ja lähtötiheyksille. Pitkän aikavälin puutarjonta putosi keskimäärin 9% siirryttäessä 1% optimiratkaisusta 3% ratkaisuun ja 18% siirryttäessä 1% ratkaisusta 5% ratkaisuun.

## **Kiertoajat**

Optimikiertoaikoja kuuselle on esitetty kuvissa 7.10 ja 7.11. Näissä tuloksissa suurempi taimien alkutiheys ei välttämättä johda pienempään puuston keskiläpimittaan päätehakkuuhetkellä (vrt. männyn vastaavat tulokset). Tämä johtuu siitä, että kuusella suurempi alkutiheys johtaa aikaisempaan harvennuksen ja suurempaan harvennusintensiteettiin verrattuna pienempään alkutiheyteen. Tämän seurauksena ensimmäisen harvennuksen jälkeinen puumäärä saattaa olla alhaisempi kuin ensimmäisen harvennuksen jälkeinen puumäärä alunperin harvemmassa metsikössä.

## **8 Paljaan maan arvoja**

Paljaan maan arvo ilmaisee puuntuotannosta saatavien nettotulojen nykyarvon, kun metsä on päätehakkuun jälkeisessä tilassa. Positiivinen paljaan maan arvo merkitsee sitä, että uudistamisessa (maanmuokkaus, istutus/kylvö, taimikonhoito) aiheutuvat investointikustannukset saadaan korkoineen katettua ja investointi uuteen puusukupolveen on taloudellisesti kannattavaa. Jos paljaan maan arvo on negatiivinen, investointi on taloudellisesti kannattamaton. Paljaan maan arvo on näin ollen keskeinen metsätalouden kannattavuuden mittari. Lisäksi paljaan maan arvosta voi tehdä päätelmiä metsätalouteen sitoutuneen pääoman tuottavuudesta. Jos paljaan maan arvo laskee negatiiviseksi koron kasvaessa kolmesta neljään prosenttiin, voidaan päätellä, että uudistamisessa sitoutuneelle pääomalle voidaan saada enintään kolmen prosentin tuotto.

Taulukossa 8.1 on paljaan maan arvot männylle eri kasvupaikoille, lämpösoma-alueille, taimitiheyksille, kahdelle hinnoitteluvaihtoehdolle ja korkokannoille 1-5 %. Voidaan esimerkiksi havaita, että perinteinen hinnoittelu johtaa muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta laatuhinnoittelua parempaan kannattavuuteen. Tämä tulos nojaa luonnollisesti tässä sovellettuihin tukki- ja kuitupuun hintoihin. Lisäksi laatuhinnoittelu näyttää johtavan useissa tapauksissa suurempaan taimitiheyteen kuin perinteinen hinnoittelu. Edelleen voidaan päätellä, että lukuun ottamatta 1300 lämpösoma-alueella olevia MT kasvupaikkoja, uudistamisvaiheessa sitoutuvalla pääomalle voidaan saada enintään 2-4 %:n tuotto. Jos pääomaa katsotaan sitoutuvan myös metsämaahan, on tuotto tätä alhaisempi (ks. Hyytiäinen ja Tahvonen 2005).

Kuusta koskevat paljaan maan arvot ovat taulukossa 8.2. Vastaavasti kuin männyllä taulukosta voidaan tehdä päätelmiä taloudellisesti kannattavimmista taimitiheyksistä ja uudistamisessa sitoutuneelle pääomalle saatavista tuottoprosentteista. Esimerkiksi MT kuusikon tapauksessa uudistamisessa sitoutuneelle pääomalle voidaan saada lämpösoma-alueella 1100 enintään 3 %:n tuotto.

## 9 Metsätalouden tulojen riippuvuus harvennuksista ja kiertoajasta

Tämän tutkimuksen tulokset on laskettu viidellä eri korkokannalla, erilaisilla tukki- ja kuitupuun hinnoittelumenetelmillä, useille kasvupaikoille ja lämpösumma-alueille. Tulokset kuvaavat taloudellisesti kannattavimpien toimenpiteiden herkkyyttä ja riippuvuutta näistä tekijöistä. Harvennuksia ja metsikön päätehakkuuikää koskevien taloudellisten tulosten yhteydessä ollaan lisäksi usein kiinnostuneita siitä kuinka paljon metsätalouden nettotulojen nykyarvo alenee, jos optimiratkaisusta poiketaan ("optimin laakeus"). Taulukossa 9.1 on esitetty maksimoitu paljaan maan arvo, kun korkokanta vaihtelee välillä 1 ja 5 %. Lisäksi on laskettu paljaan maan arvo, jos kullakin korolla optimiratkaisun sijaan sovelletaan 1 %:n korolla saatua optimiratkaisua. Koska 1 %:n korolla saatu ratkaisu on optimaalinen vain tämän koron tapauksessa, on paljaan maan arvo maksimoitua arvoa alhaisempi kun korko on yli 1%. Paljaan maan arvojen erotus kuvaa kannattavimman ratkaisun antaman taloudellisen tuloksen herkkyyttä harvennuksista ja kiertoajasta. Jos esimerkiksi korko on 3 % ja sovelletaan virheellisesti 1 %:n korolla saatua optimiratkaisua, niin hehtaarikohtaisten nettotulojen nykyarvo alenee 730 eurosta 521:n euroon.

Toinen esimerkki nettotulojen herkkyydestä on esitetty kuvassa 9.1. Esimerkissä olevan mäntymetsikön optimaalinen päätehakkuuikä on 83 vuotta, jolloin maksimoitu paljaan maan arvo on 730 euroa. Jos kiertoaika muutetaan optimaalisesta arvostaan, nettotulojen nykyarvo alenee. 15 vuoden pidennys päätehakkuuikään alentaa nettotulojen nykyarvon 585:n euroon ja vastaavasti 15 vuoden lyhennys 636:een euroon. Alemmasta kuvista selviää vastaava muutos keskimääräisessä vuotuisessa puuntarjonnassa. Optimiratkaisussa vuotuinen hehtaarikohtainen puuntuotos on 6.45 kuutiota. 15 vuoden pidennys kiertoaikaan alentaa kuutiotuotoksen 6.25 euroon ja vastaavasti lyhennys 5.9 euroon. Molemmissa esimerkeissä nettotulojen nykyarvo on varsin herkkä poikkeamille optimiratkaisusta. Jälkimmäisessä esimerkissä nettotulojen nykyarvon suhteellinen aleneminen on voimakkaampaa kuin vastaavat muutokset kuutiotuotoksessa.

Kolmas esimerkki nettotulojen herkkyydestä on esitetty kuvassa 9.2. Kysymyksessä on mänty, lämpösumma-alue 1300, taimimäärä 1500 ja perinteinen tukki-kuituhinnoittelu. Paljaan maan arvon riippuvuus kiertoajasta on laskettu 3 %:n ja 4 %:n tapauksille. Havaitaan, että 20-30 vuoden pidennys kiertoaikaan alentaa paljaan maan arvoa merkittävästi.

Erot paljaan maan arvossa ilmaisevat rationaalisesta hakkuupäätöksestä poikkeamisen kustannuksia kun tappiot on diskontattu kiertoajan alkuun. Jos metsä on lähtötilanteessa jo päätehakkuukypsää, voivat kiertoajan pidentämisestä aiheutuvat tappiot hehtaaria kohden nousta tuhansiin euroihin (Hyytiäinen & Tahvonen 2003).

## 10 Tulosten tulkintaa ja vertailua aikaisempaan tutkimukseen

Optimaalisia harvennuksia koskevat tulokset ovat samansuuntaisia aikaisempien suomalaisten metsikkötason optimointitutkimusten kanssa. Tulosten mukaan harvennukset tehdään tyypillisesti suositeltua korkeammalla pohjapinta-alan tasolla sekä puhtaissa kuusikoissa ja männiköissä (esim. Pesonen ja Hirvelä 1992, Valsta 1992, Salminen 1993, Möykkynen ja Miina 2002), että mänty-kuusi sekametsissä (esim. Pukkala ym. 1998, Vettenranta ja Miina 1999). Jos harvennusvoimakkuudelle ei aseteta rajoitteita, harvennukset voimistuvat kiertoajan loppua kohden korkeilla koroilla (esim. Hyytiäinen ja Tahvonen 2002, Hyytiäinen ym. 2005) mikä johtaa kiertoajan loppua kohden laskevaan pohjapinta-alan tasoon. Voimakkaisiin harvennuksiin voi

kuitenkin liittyä tuuli- ja lumituhoriskejä, joiden takia ne on tässä tarkastelussa suljettu pois asettamalla harvennuksille maksimivoimakkuus (ks. luku 4).

Cao ym. (2005) tutkimus havainnollistaa miten puuvalinnan joustavuuden lisääminen voi tehdä voimakkaat harvennuksset ja kiertoajan loppua kohden laskevan leimausrajan optimaaliseksi suomalaisissa kuusikoissa. Voimakkaat harvennuksset ovat silloin luonteeltaan poimintahakkuuta, joissa pyritään poistamaan mahdollisimman tarkkaan metsikön suurimmat puut. Tiettyyn kokoluokkaan kohdistuvat poimintahakkuut kuitenkin ovat kuitenkin jossain määrin ristiriidassa ei-spatiaalisia kasvumalleja koskevan oletuksen kanssa puiden tasaisesta tilajakaumasta.

Pukkala ja Miina (2005) tutkivat tilajakaumaltaan epätasaisen metsän optimihakkuuta suhteessa tasarakenteisiin metsiköihin. He osoittivat epätasaisen tilajakauman aikaistavan ensiharvennusta ja alentavan harvennuksessa jätettävän puuston pohjapinta-alaa suhteessa tilajakaumaltaan tasaisiin metsiköihin etenkin kuusen osalta. Metsikön sisäisen vaihtelun havaittiin kuitenkin voimakkaasti pienenevän tasaavan ensiharvennuksen jälkeen.

Optimointitulosten mukaan varsinkin ensiharvennus kannattaa lykätä lähelle hetkeä, jonka jälkeen puustoa alkaisi kuolla itseharvenemisen takia tai puiden läpimitan kasvu merkittävästi pieneneisi kilpailun takia. Optimaalisissa käsittelyketjuissa harvennuksissa jätettävät rungot lisäävät nopeasti läpimitan kasvua harvennuksen jälkeen. Käytännön harvennuspäätöksiä tehdessä ei kuitenkaan välttämättä ole tarkkaa mittaustietoa metsän tilasta eikä ajanjaksosta, jonka jälkeen itseharvenemiseen ja kasvun hidastumisen riskit realisoituisivat. Ensiharvennusta samoin kuin myöhäisempiä harvennuksia kannattaa siten lykätä vain, jos samalla voidaan varmistua harvennuksessa jätettävien puiden elpymis- ja kasvukyvyistä. Optimointituloksia tulkittaessa täytyy myös ottaa huomioon, että sekä männyn että kuusen kasvuennusteet ovat epävarmoja korkeilla, itseharvenemisrajaa lähentelevillä pohjapinta-alatasoilla.

Havupuumetsiköiden harvennustapaa koskevat suomalaiset ja muualla tehdyt tutkimukset viittaavat yläharvennuksen edullisuuteen. Valstan (1992) suomalaisille kuusikoille tehdyissä optimointilaskelmissa harvennuksset olivat yläharvennuksia. Caon ym. (2005) mukaan ensiharvennus on tyypillisesti alaharvennus ja muut harvennuksset yläharvennuksia. Yläharvennuksset antoivat parhaan taloudellisen tuloksen myös ruotsalaisille (Eriksson 1994) ja norjalaisille (Solberg ja Haight 1991) kuusikoille laadituissa laskelmissa. Männyn osalta yläharvennuksset osoittautuivat optimaaliseksi sekä empiiris-tilastollisella kasvumallilla (Hyytiäinen ym. 2005) että prosessipohjaisella kasvumallilla (Hyytiäinen ym. 2004) laskettuna. Suurimpien puiden poistamiseen tai kokoluokkajakauman molemmista päistä runkoja poistavat harvennuksset osoittautuivat taloudellisesti parhaiksi myös mänty-kuusi sekametsille laadituilla spatiaalisilla kasvumalleilla (Pukkala ja Miina 1998, Vettenranta ja Miina 1999). Toisaalta huonolaatuiset, tukiksi kelpaamattomat rungot kannattaa poistaa kaikista kokoluokista pian kuitupuumittojen saavuttamisen jälkeen (Hyytiäinen ym. 2005).

Taloudellisin perustein laskettuja kiertoaikatuloksia on julkaistu vuodesta 1958. Lukuun ottamatta Nyssösen vuoden 1958 tutkimusta kaikkien tutkimusten yleiset taloudelliset lähtökohdat ovat samat, eli tavoitteena on löytää sellainen metsänkäsittelyketju, joka maksimoi nettokantorahatulojen nykyarvon. Tulokset ovat yleensä julkaistu kolmen prosentin korkokannalle. Useimmissa tutkimuksissa on esitetty vain päätehakkuuikä. Tässä tutkimuksessa saadaan optimaaliselle päätehakkuuikälle ja vastaaville keskiläpimitoille suhteellisen suuri vaihteluväli, koska laskenta on tehty soveltaen erilaisia puuston hinnoittelumalleja, eri taimikkotiheyksiä ja eri lämpösumma-alueita. Kokonaisuutena voidaan havaita, että tämän tutkimuksen kiertoajat ovat keskimäärin jonkin verran pitempiä kuin aikaisemmassa tutkimuksessa saadut (Taulukko 10.1). Männyn kohdalla syynä

on ilmeisesti aikaisempaa tarkempi hinnan ja puun laadun välisen riippuvuuden huomiointi. Lisäksi kiertoaikaan vaikuttavat tässä huomioon otetut harvennuksia koskevat rajoitteet (ks. luku 4).

## 11 Vertailua ministeriöasetukseen ja aikaisempiin suosituksiin

Maa- ja metsätalousministeriön päätöksen (14.3.1997/224) 3§:ssä esitetään edellytykset kasvatushakuissa kasvamaan jätettävän puuston määrälle ja laadulle. Päätöksen mukaan harvennuksessa "on ensisijaisesti jätettävä kasvamaan hyväkasvuisia ja -laatuisia ylimpien latvuskerrosten puita". Tätä selvitystä varten tehdyt laskelmat ja aikaisemman tutkimukset kuitenkin viittaavat juuri metsikön suurimpien, ylimpään latvuskerrokseen kohdistuvien yläharvennusten edullisuuteen. On epäselvää ovatko yläharvennukset, joissa poistetaan metsikön pienimpien ja heikkolaatuisimpien puiden lisäksi myös metsien suurimpia runkoja, ristiriidassa ministeriöasetuksen kanssa.

Tätä selvitystä varten tehtyjen laskelmien tulokset eivät ole ristiriidassa harvennuksessa jätettävää puuston pohjapinta-alaa koskevan säädöksen kanssa muutamaa yksittäistapausta lukuun ottamatta. Kuusikoissa harvennuksessa jätettävät pohjapinta-alat ovat "lakirajaa" korkeammat myös korkeilla koroilla. Heikoimmilla männyn kasvupaikoilla usein toistuvat, pohjapinta-alan tasoa laskevat harvennukset tulevat optimaalisiksi tilanteissa, joissa tukkiosan kuutiohintaan ei ole saatavissa parannusta järkevään päätehakkuuhetkeen mennessä. Tällöin viimeisessä harvennuksessa jäävän puuston pohjapinta-ala on lähellä lakirajaa. Lakirajaa alemmat jäävän puuston pohjapinta-alat saattavat kuitenkin tulla rationaalisiksi männiköissä, joiden voimakkaisiin harvennuksiin ei liity luonnontuhoriskejä ja mikäli puiden tilajärjestyksen ja kasvukunnon perusteella voidaan puuvalinnassa voimakkaammin painottaa metsikön suurimpien puiden poistoa.

Maa- ja metsätalousministeriön päätös metsälain soveltamisesta (14.3.1997/224) sisältää säädöksen uudistushakkuiden edellytyksistä. Edellytykset ovat esitetty 4§:ssä ja niiden mukaan puusto voidaan päätehakata, jos puuston järeys tai ikä ylittävät säädöksessä esitetyt kriteerit. Tätä säädöstä verrataan optimikiertoaikoihin kuvissa 11.1-11.7. Männyn osalta voidaan todeta, että optimiratkaisut rikkovat uudistusrajoitetta poikkeuksetta, kun korko on 4 tai 5 %. Myös 3 % korkokannalla lasketut tulokset ovat usein ristiriidassa säädöksen kanssa tai ovat hyvin lähellä säädöksen rajoituksia.

Lisäksi on huomattava, että optimiratkaisut on laskettu olettaen, että puun reaali hinnat ovat ajan suhteen muuttumattomia ja että niihin ei liity epävarmuutta. Epävarman hintakehityksen oloissa taloudellisesti rationaalinen päätöksenteko edellyttää poikkeamista vakiohintoihin perustuvista optimiratkaisuksista. Jos hinnan ennustetaan laskevan tulevaisuudessa, merkitsee pyrkimys mahdollisimman suureen nettokantorahatulojen nykyarvoon hakkuiden aikaistamista. Karkeasti ottaen ennuste X %:n hintojen laskusta merkitsee kiertoaikoihin samaa muutosta kuin koron nosto X %:a. Eli jos reaalikoron ennustetaan pysyttelevän esimerkiksi 2 %:n tasolla ja puun reaali hintojen laskevan 2 %:a vuodessa, vastaa optimikiertoaika 4%:n optimiratkaisua laskettuna vakiohinnoilla. Tämän perusteella metsälain soveltamissäädöksen lakirajat voivat rajoittaa kannattavuutta tavoittelevan puuntuotannon päätöksentekoa, vaikka korkokanta olisi varsin alhainen.

Laskentatuloksia lakirajoihin verrattaessa on huomioitava, että optimointituloksissa pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta lasketaan metsikön kaikkien runkojen suhteen. Laintulkinnassa keskiläpimittaa laskettaessa voidaan jättää huomioimatta rungot, jotka olisi metsiköstä (ala)harvennuksin poistettavissa. Lisäämällä optimointitulosten keskiläpimittoihin 1.0-2.5 cm

päästään laintulokinnassa sovellettavaan järeyden kuvaukseen. Lisäyksen suuruuteen vaikuttavat harvennuksessa poistettavissa olevan puuston määrä ja läpimittaluokkajakauma.

Kuvissa 11.1-11.7 on esitetty myös vuonna 2001 julkistettujen Tapion metsänhoitosuosituksen päätehakkuita koskevat ohjeet. Verrattuna tutkimustuloksiin niiden voi todeta vastaavan varsin kapeita osuuksia 1-5 %:n koroilla lasketuista optimikiertoajoista tai päätehakkuupuustojen keskiläpimitoista.

Kuusen osalta metsälain soveltamissäädösten ja laskentatulosten ristiriita on männyn tuloksiin verrattuna pienempi, mutta tässäkin suositukset kattavat vain hyvin rajatun alueen niistä päätehakkuun ajoitusta koskevista ratkaisuisista, jotka näyttäisivät olevan taloudellisesti perusteltuja.

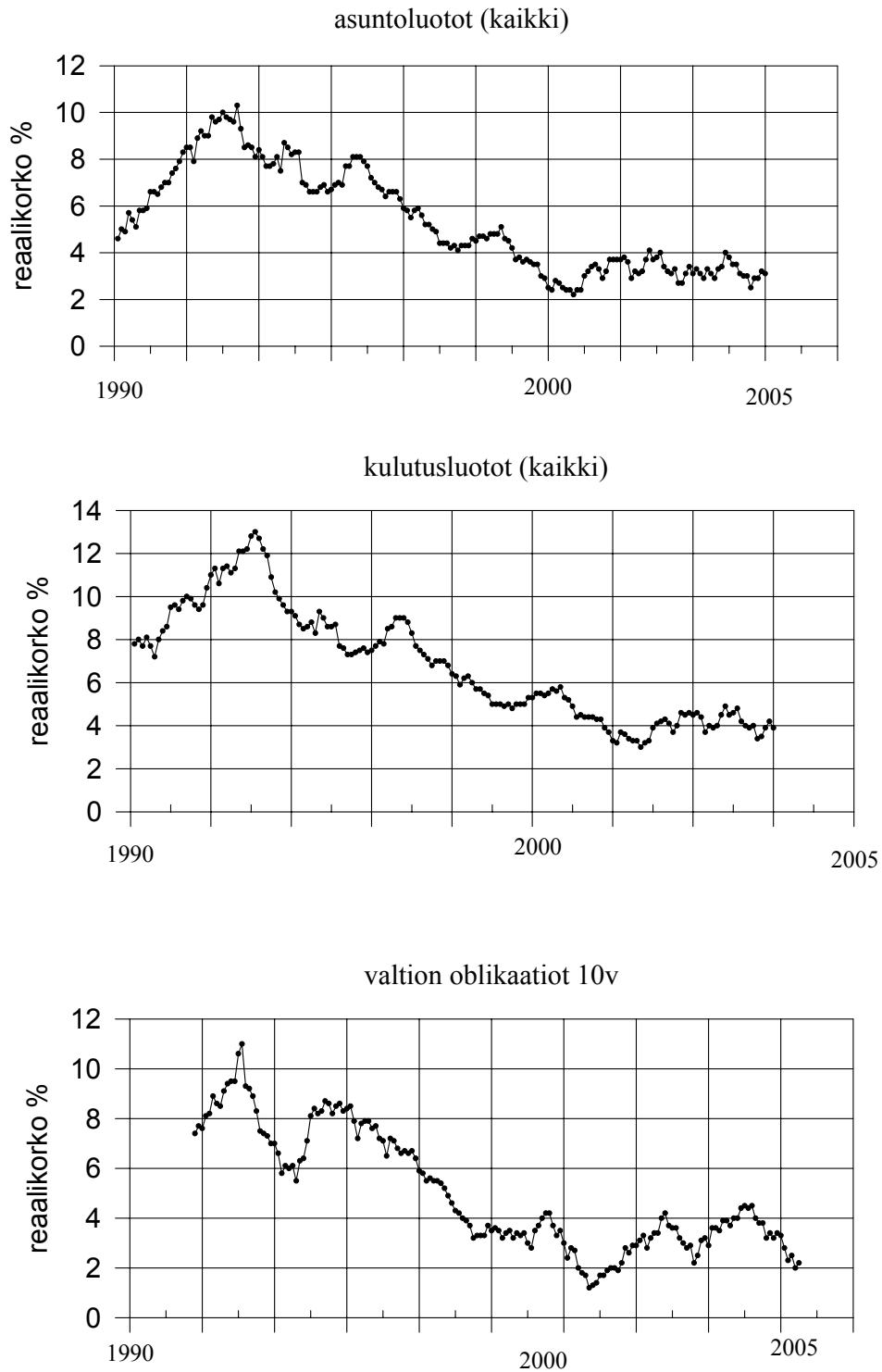
Maa- ja metsätalousministeriön päätöksen (14.3.1997/224) taloudellis-juridisia ongelmia on tarkasteltu yksityiskohtaisesti tutkimuksessa Tahvonen ym. (2004).

## Viittaukset

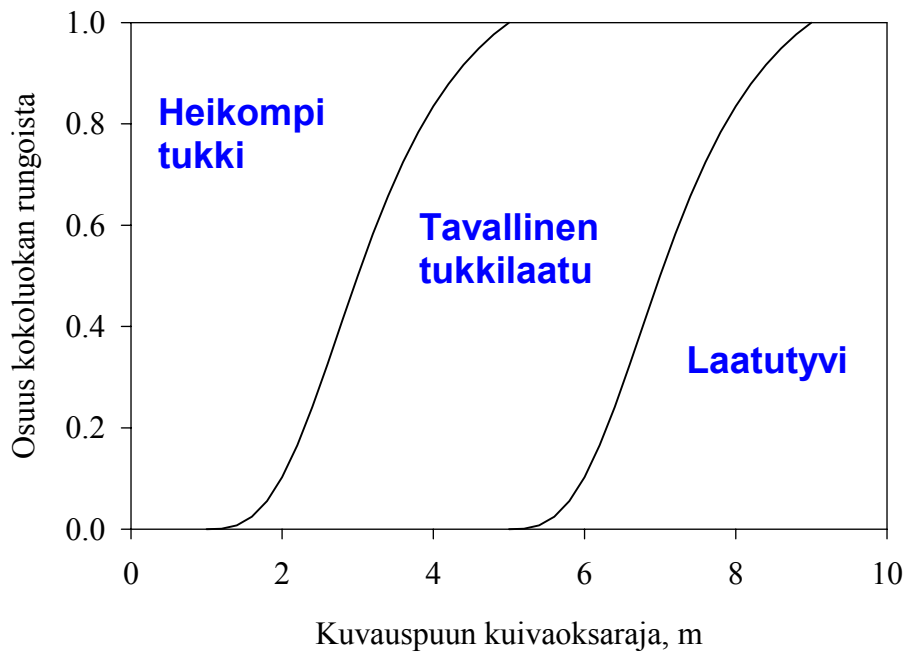
- Cao, T, Hyytiäinen, K., Tahvonen, O. & Valsta, L. 2005. Effects of initial states on optimal thinning and rotation of *Picea abies* stand. Käsikirjoitus.
- Eriksson, L.O. 1994. Two methods for solving stand management problems based on a single tree model. *For. Sci.* 40: 732-758.
- European Central Bank, Monthly Bulletin, September 2005.
- Hynynen, J. & Ojansuu R. (toim.). 1996. Puuston kehityksen ennustaminen - Mela ja vaihtoehtoja. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 612. 116 s.
- Hynynen, J., Ojansuu, R., Hökkä, H., Siipilehto, J., Salminen, H., & Haapala, P. 2002. Models for predicting stand development in MELA system. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 835.
- Hyytiäinen, K. & Tahvonen, O. 2002. Economics of forest thinnings and rotation periods for Finnish conifer cultures. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17: 274-288.
- Hyytiäinen, K. & Tahvonen, O. 2003. Maximum Sustained Yield, Forest Rent or Faustmann: Does it really matter? *Scandinavian Journal of Forest Research* 18: 457-469.
- Hyytiäinen, K., Hari, P., Kokkila, T., Mäkelä, A., Tahvonen, O., ja Taipale, J. 2004. Connecting process-based forest growth model to stand-level economic optimization. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 2060-2073.
- Hyytiäinen, K., Tahvonen, O., & Valsta, L. 2005. Optimum juvenile density, harvesting and stand structure in even-aged Scots pine stands. *For. Sci.* 51: 120-133.
- Hyytiäinen, Kari & Olli Tahvonen, *Metsänkasvatusketjujen edullisuusvertailu ja puuntuotannon kannattavuus*, teoksessa *Tuottava Metsänkasvatus*, Jari Hynynen, Sauli Valkonen ja Satu Rantala (toim.) *Metsäkustannus*, Hämeenlinna, 2005.
- Jorion P.J. & W.N. Goetzmann, Global stock markets in the twentieth century, *The Journal of Finance*, No. 3, 1999, 953-980.
- Kuitto, J.-P., Keskinen, S., Lindroos, J., Ojala, T., Rajamäki, J., Räsänen, T. & Terävä J. 1994. Mekaaninen korjuu ja metsäkuljetus. *Metsätehon tiedotus* 410.
- Laitila, Juha, Asikainen, Antti, Sikanen, Lauri, Korhonen, Kari T. & Nuutinen, Yrjö. 2004. *Pienpuuhakkeen kustannustekijät ja toimituslogistiikka*. Metlan työraportti 3. <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2004/mwp003.htm>
- Makkonen, K. 2005. Puun laatuhinnoittelun vaikutus metsänomistajan nettotuloihin ja metsikön kiertoaikaan, Pro Gradu tutkielma, Metsäekonomian laitos, Helsingin yliopisto, 2005.
- Mehtälö, L. 2002. Valtakunnalliset puukohtaiset tukkivähennysmallit männylle, kuuselle, koivulle ja haavalle. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2002: 575-591.

- Mäkelä, A. 1997. A carbon balance model of growth and self-pruning in trees based on structural relationships. *For. Sci.* 43: 7-24.
- Mäkelä, A. 2002. Derivation of stem taper from the pipe theory in a carbon balance framework. *Tree Physiology* 22: 891-905
- Mäkelä, A. & Mäkinen, H. 2003. Generating 3D sawlogs with a process-based growth model. *For. Ecol. Manage.* 184: 337-354.
- Möykkynen, T. & Miina, J. 2002. Optimizing the management of a butt-rotted *Picea abies* stand infected by *Heterobasidion annosum* from the previous rotation. *Scand. J. For. Res.* 17:47-52.
- Nyysönen, A. 1958. Kiertoaika ja sen määrittäminen. *Commun. Inst. For. Fenn.* 49(6).
- Pesonen, M. & Hirvelä, H. 1992. Liiketaloudelliset harvennusmallit Etelä-Suomessa. *Folia Forestalia* 800.
- Pukkala, T., Puun hinta ja taloudellisesti optimaalinen hakkuun ajankohta, käsikirjoitus, Joensuun yliopisto, 2005.
- Pukkala, T. & Miina, J. 1998. Tree-selection algorithms for optimizing thinning using a distance-dependent growth model. *Can. J. For. Res.* 28: 693-702.
- Pukkala, T. & Miina, J. 2005. Optimizing the management of a heterogeneous stand. Käsikirjoitus. Joensuun yliopisto.
- Pukkala, T., Miina, J., Kurttila, M., Kolström, T. 1998. A spatial model for optimizing the thinning regime of mixed stands of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. *Scand. J. For. Res.* 13: 31-42.
- Salminen, O. 1993. Simultaneous optimization of thinnings and rotation of cultivated stands using dynamic programming. *Metsäntutkimuslaitokset tiedonantoja* 480.
- S. Salo, and O. Tahvonen, 2003, Economics of forest vintages, *Journal of Economic Dynamics and Control* 27, 1411-1435.
- Solberg, B. & Haight, R.G. 1991. Analysis of optimal economic management regimes for *Picea abies* stands using a stage-structured optimal-control model. *Scand. J. For. Res.* 6: 559-572.
- Suomen Pankki, Eurotalous, 3, 2005.
- Tahvonen, O., Salo, S. and Kuuluvainen, J. 2001, Optimal forest rotation and land values under a borrowing constraint, *Journal of Economic Dynamics and Control* 25, 1595-1627.
- Tahvonen, O., Leppänen, T., Hyytiäinen, K., Laakso, T., ja Viitala, E.-J., 2004, Taloudelliset ja puuntuotannolliset lähtökohdat Suomen metsälainsäädännössä, Joensuun yliopiston oikeustieteiden laitoksen julkaisuja 12.
- Tahvonen, O. and Kallio, M. 2005, Optimal harvesting of forest age classes under price uncertainty and risk aversion, *Natural Resource Modelling*, in print.
- Valsta, L. 1992. An optimization model for Norway spruce management based on individual-tree growth models. *Acta For. Fenn.* 232.
- Vettenranta, J. & Miina, J. 1999. Optimizing thinnings and rotation of Scots pine and Norway spruce mixtures. *Silv. Fenn.* 33: 73-84.
- Vuokila, Y. 1985. Puuston määrän vaikutus istutuskuusikon kehitykseen. *Folia Forestalia* 636: 1-18.
- Vuokila, Y., ja Väliäho, H. 1980. Viljeltyjen havumetsiköiden kasvatusmallit. *Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja* 99.2
- Örn, J. 2002. Puunkorjuun ja puutavaran kaukokuljetuksen suoritteet ja kustannukset 2002. *Metsäteho. Tilastoliite.* <http://www.metsateho.fi/uploads/4dtpg6a4z4nxx.pdf>

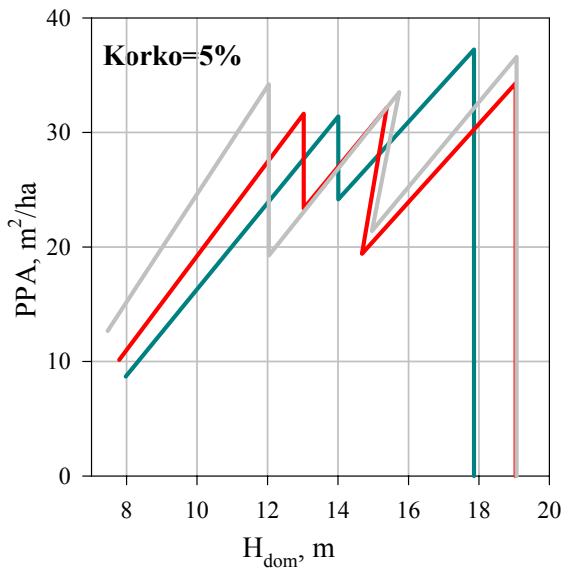
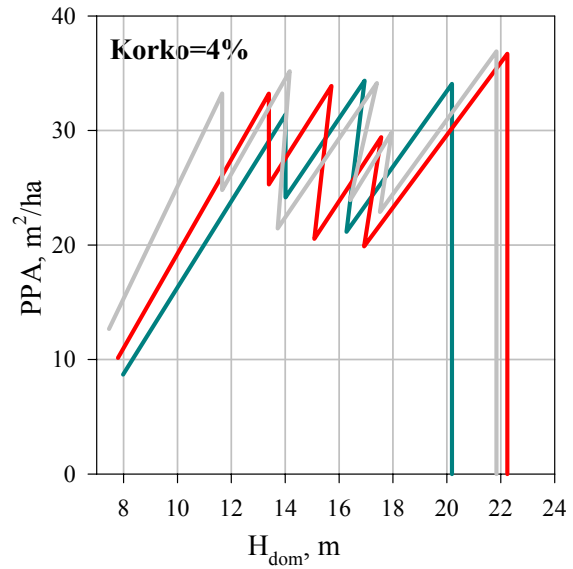
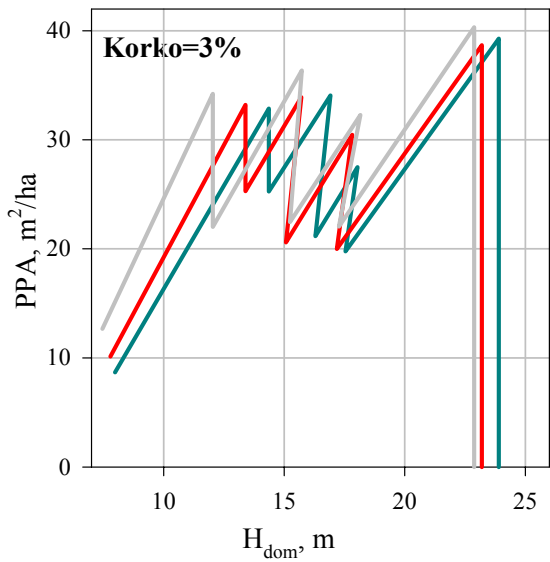
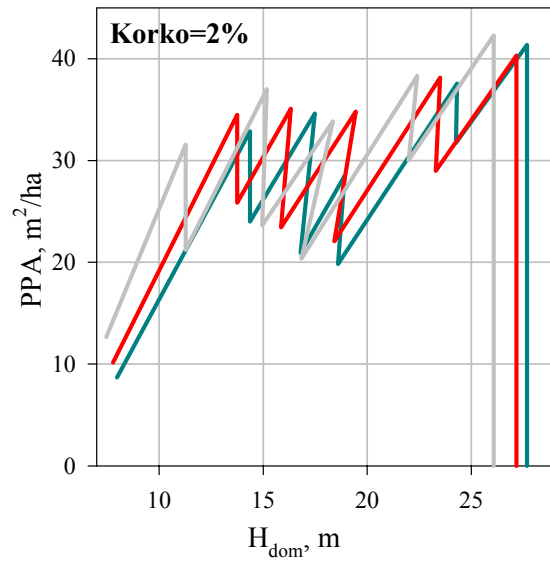
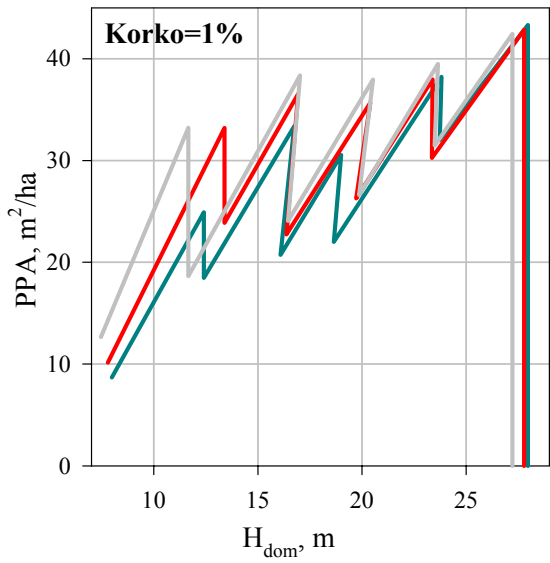
Kuvio 2.1 Vaihtoehtoisten sijoituskohteiden korkoja



Lähde: Tilastokeskus ja Suomen pankki



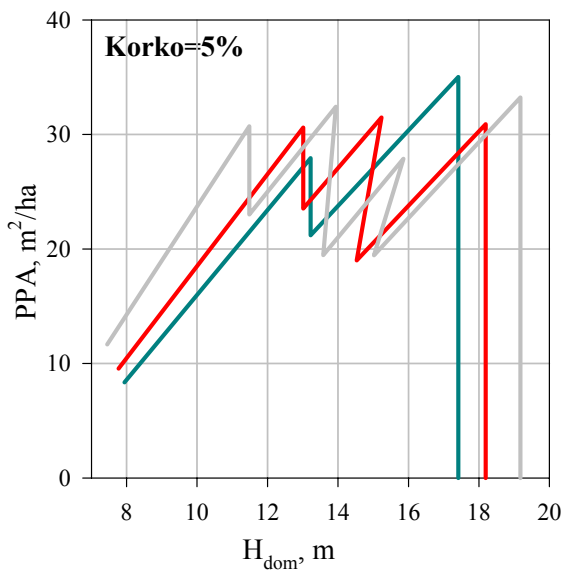
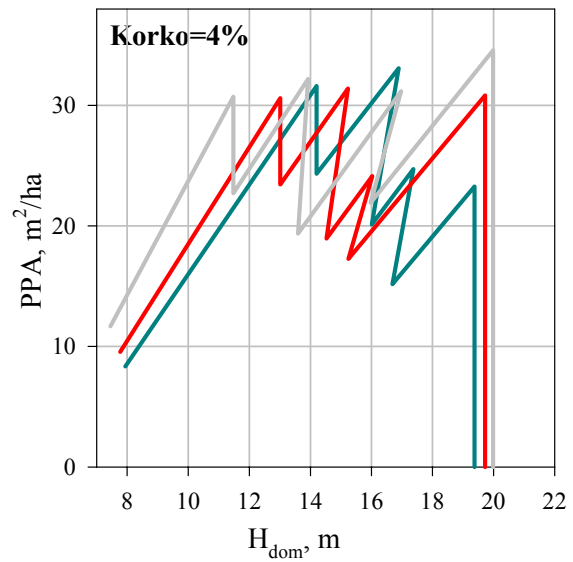
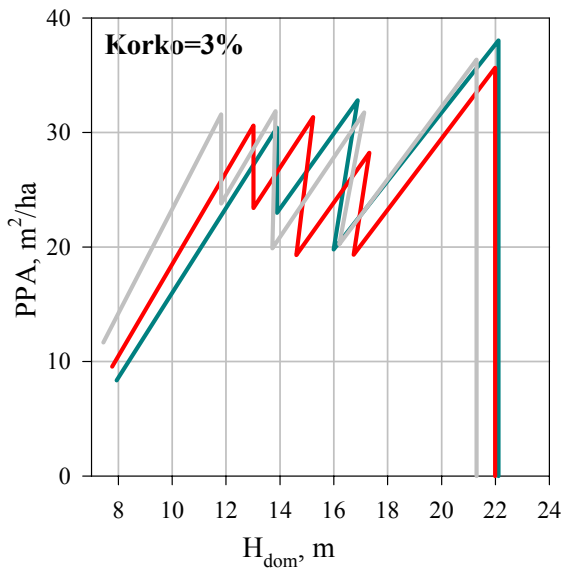
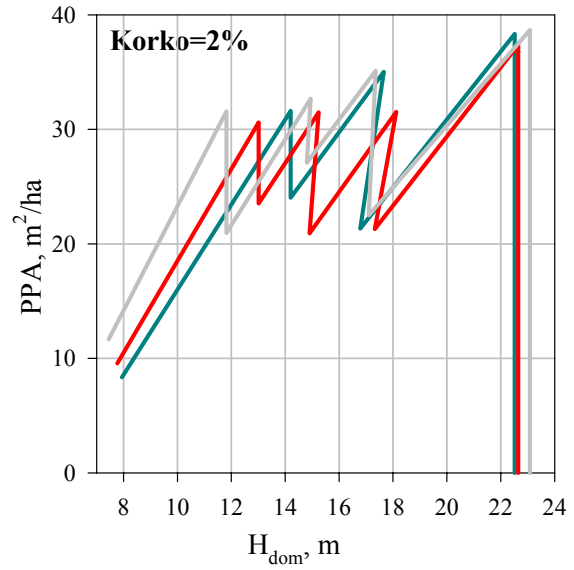
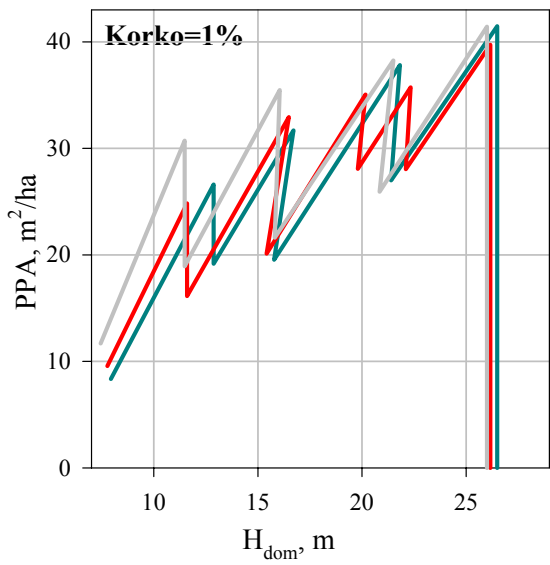
Kuva 5.1 Tyvitukin jakaantuminen laatuluokkiin kuvauspuun kuivaoksarajan funktiona



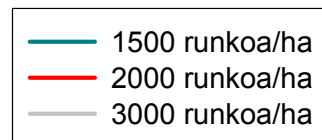
**Lähtötiheys:**

- 1500 runkoa/ha
- 2000 runkoa/ha
- 3000 runkoa/ha

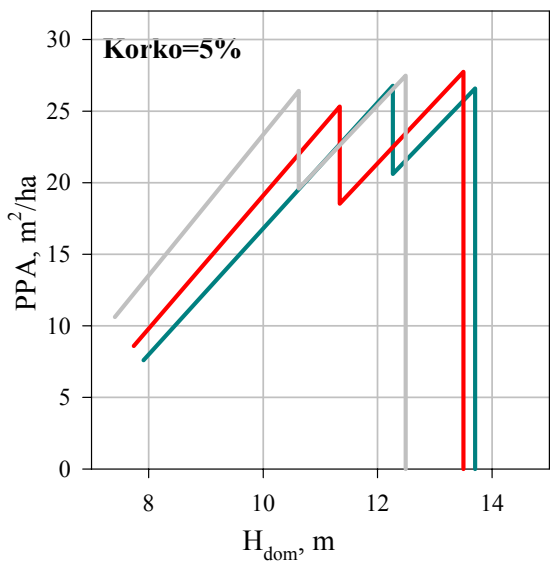
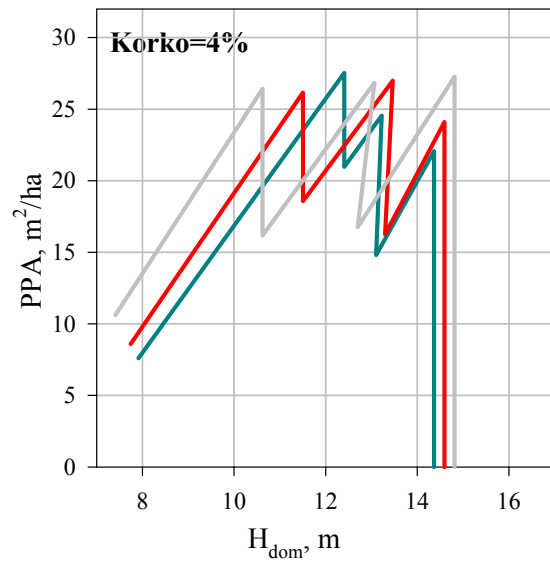
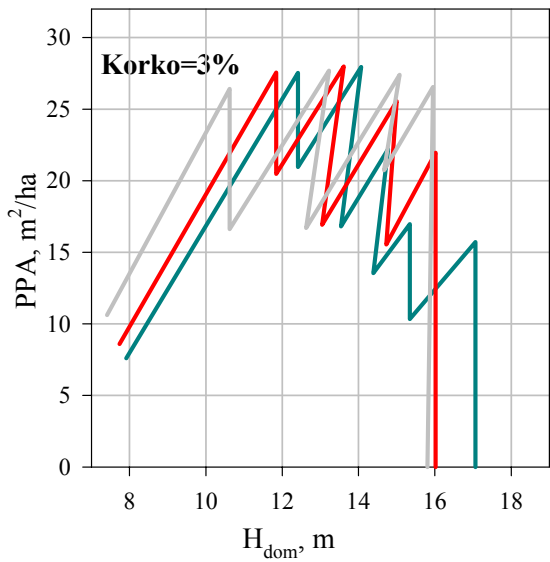
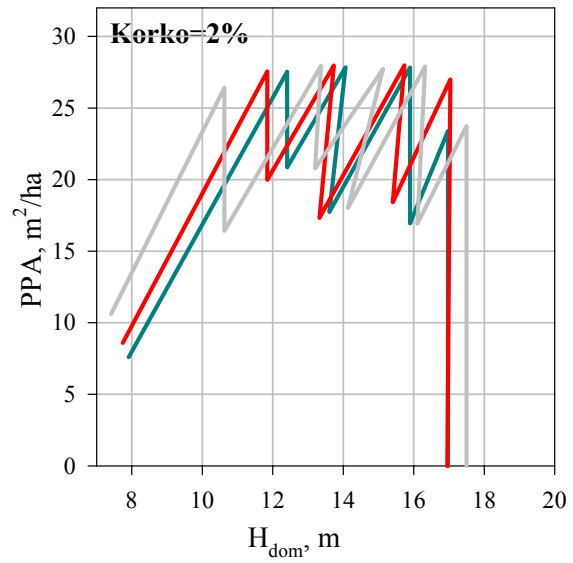
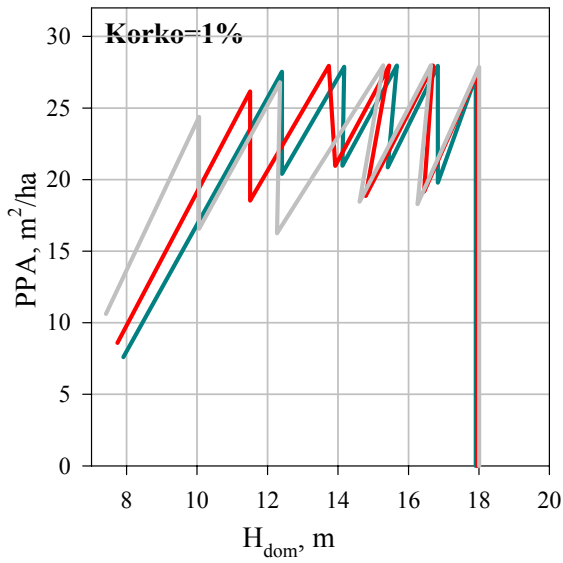
**Kuva 6.1** Optimaaliset hakkuut tuoreen kankaan männikössä 1300 dd. lämpösumma-alueella laatuhinnoittelulla



**Lähtötiheys:**



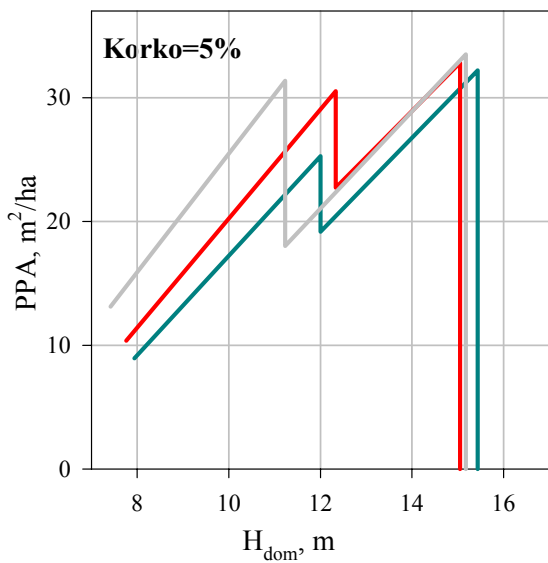
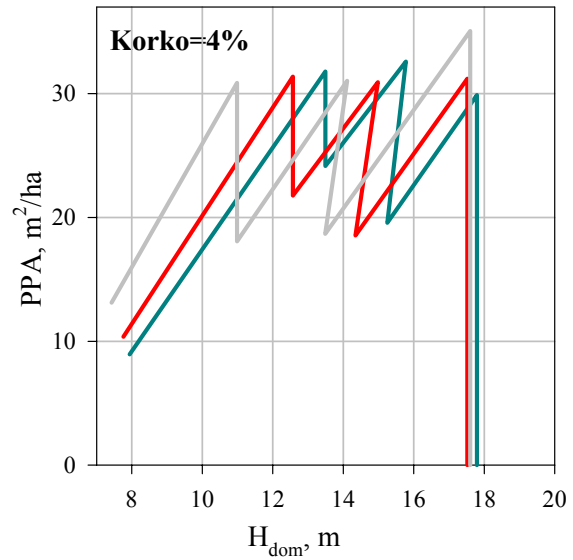
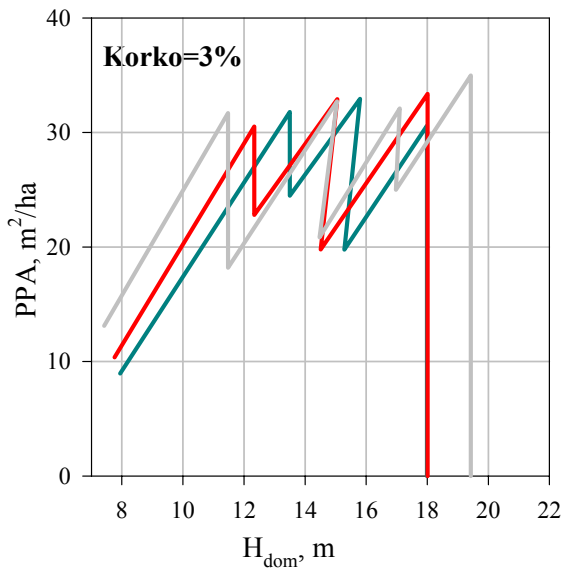
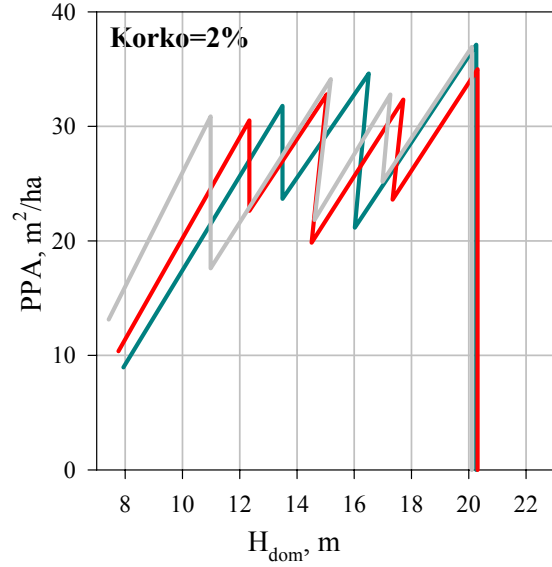
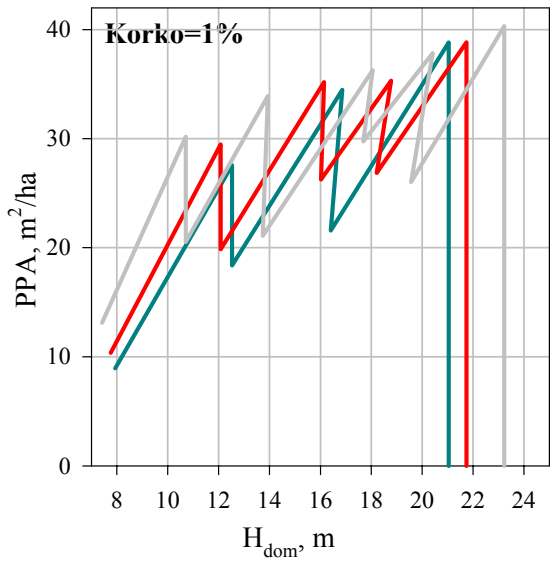
**Kuva 6.2** Optimaaliset hakkuut kuivahkon kankaan männikössä 1300 dd. lämpösomma-alueella laatuhinnoittelulla



**Lähtötiheys:**



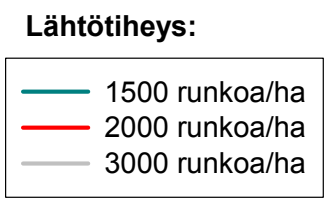
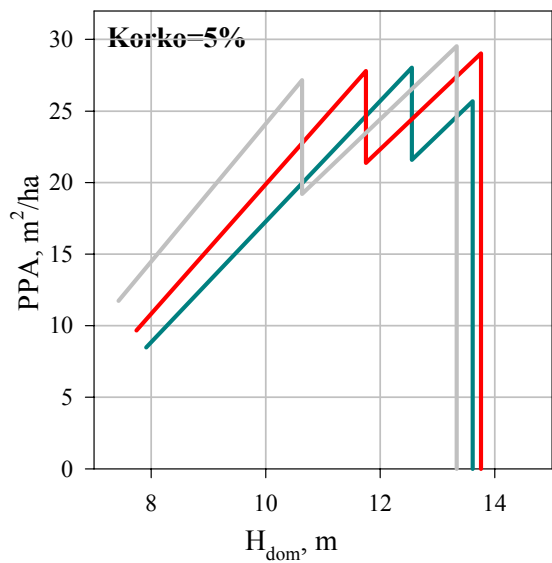
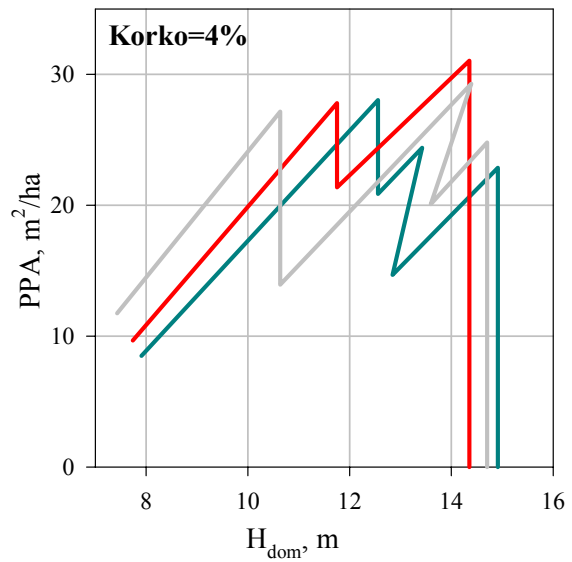
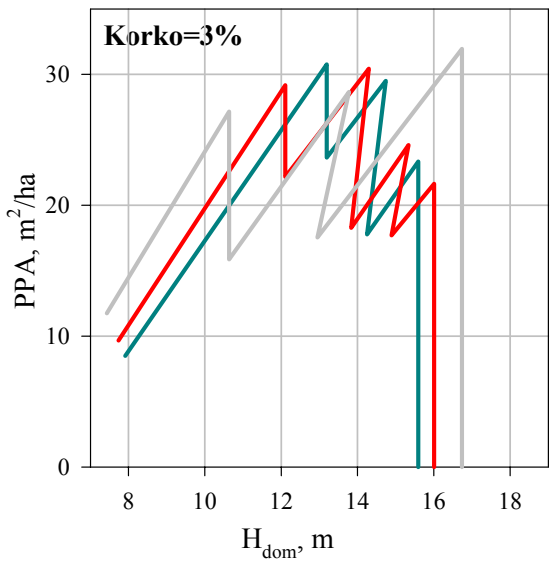
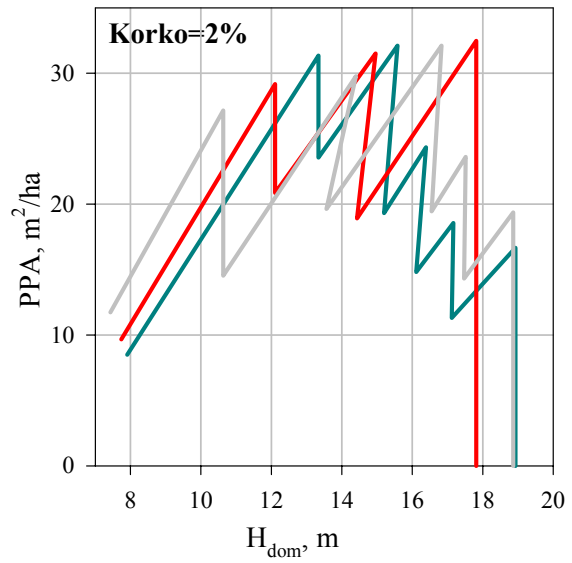
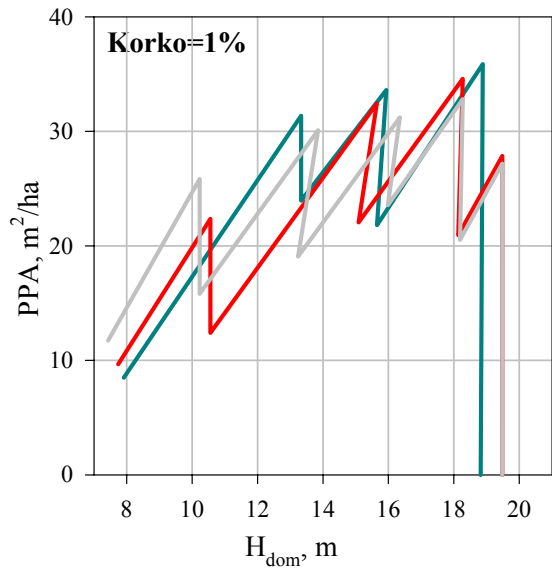
**Kuva 6.3** Optimaaliset hakkuut kuivan kankaan männikössä 1300 dd. lämpösukka-alueella laatuhinnoittelulla



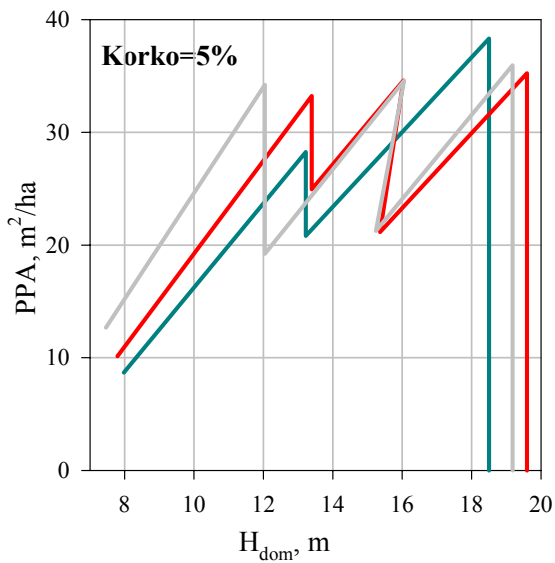
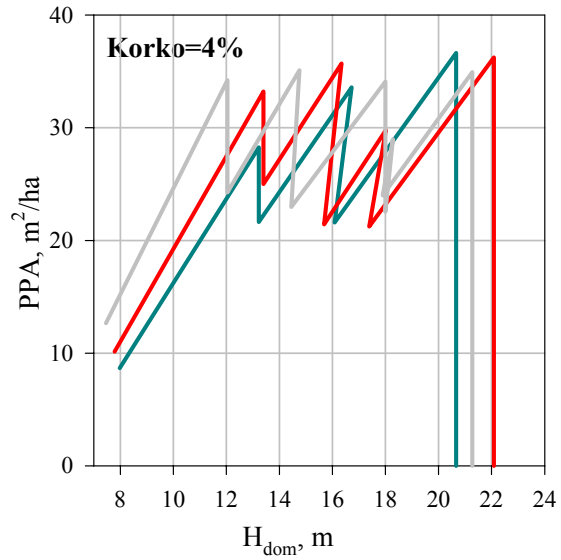
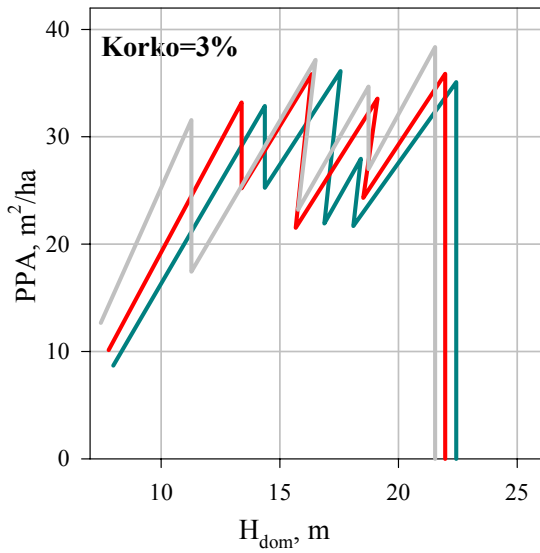
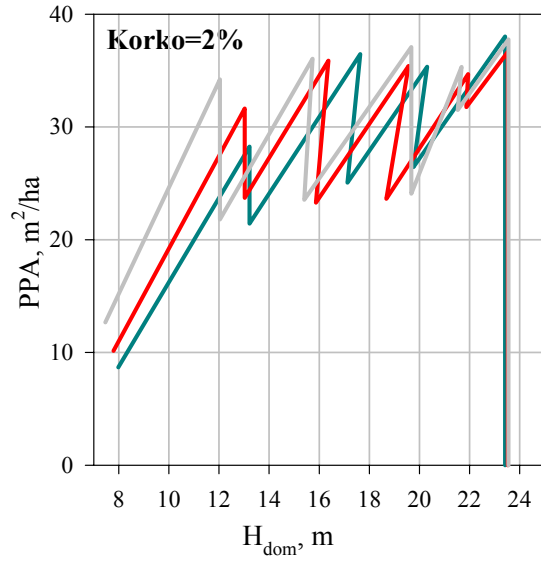
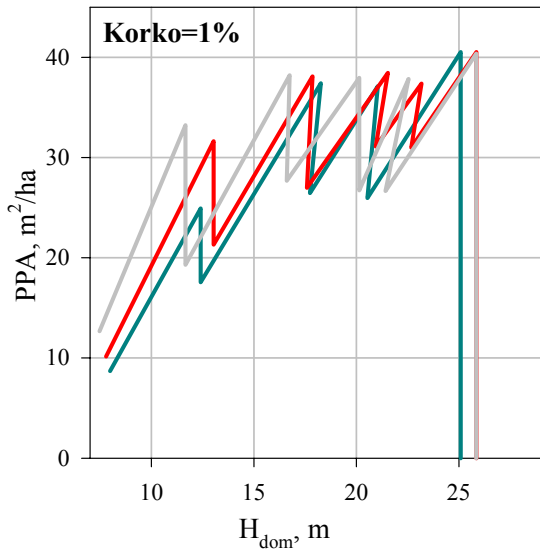
**Lähtötiheys:**

- 1500 runkoa/ha
- 2000 runkoa/ha
- 3000 runkoa/ha

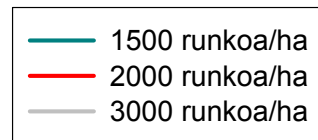
**Kuva 6.4** Optimaaliset hakkuut tuoreen kankaan männikössä 1100 dd. lämpösumma-alueella laatuhinnoittelulla



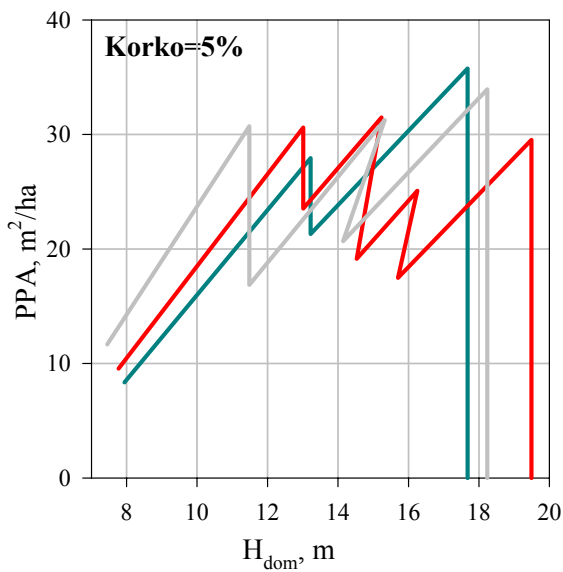
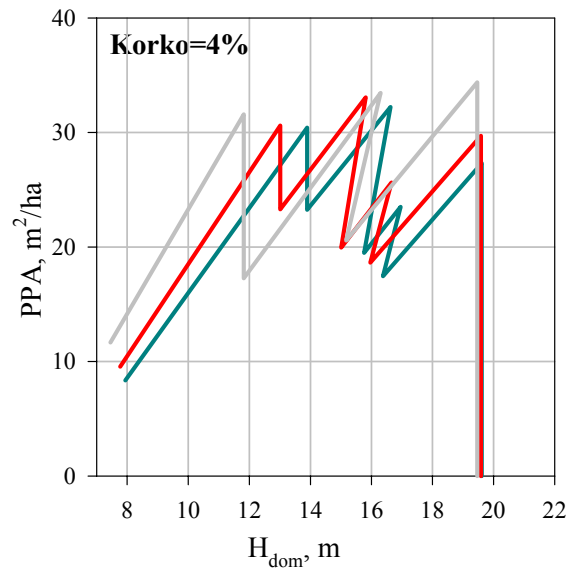
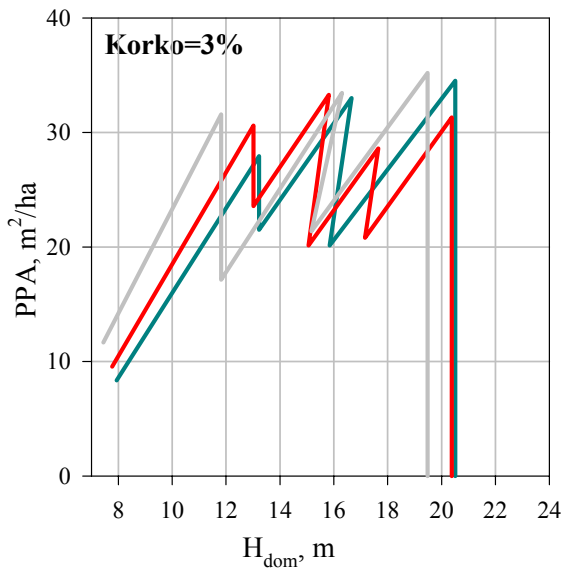
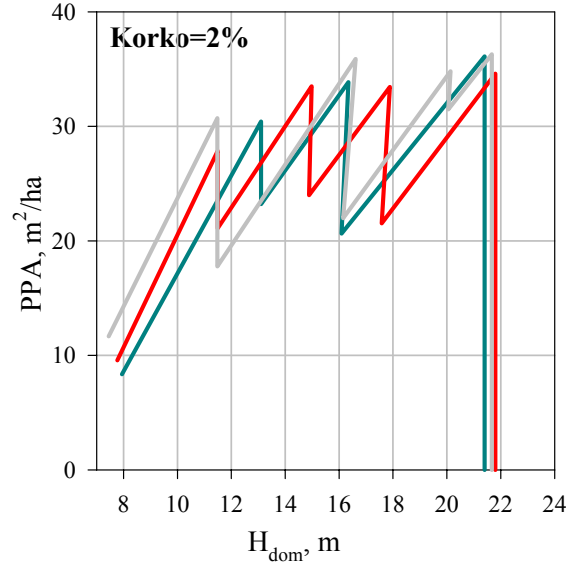
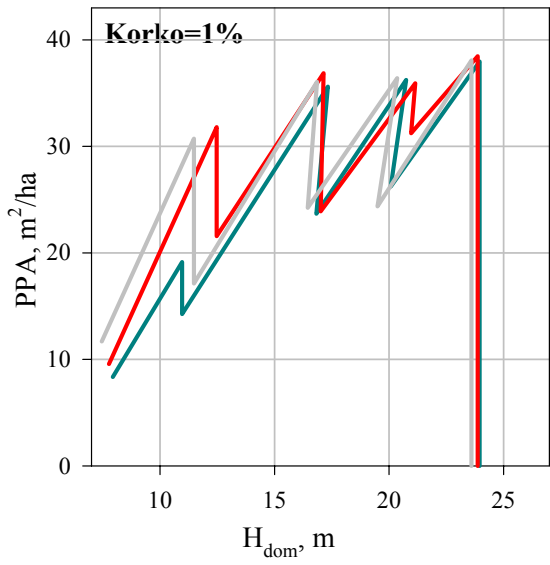
**Kuva 6.5** Optimaaliset hakkuut kuivahkon kankaan männikössä 1100 dd. lämpösomma-alueella laatuhinnoittelulla



**Lähtötiheys:**



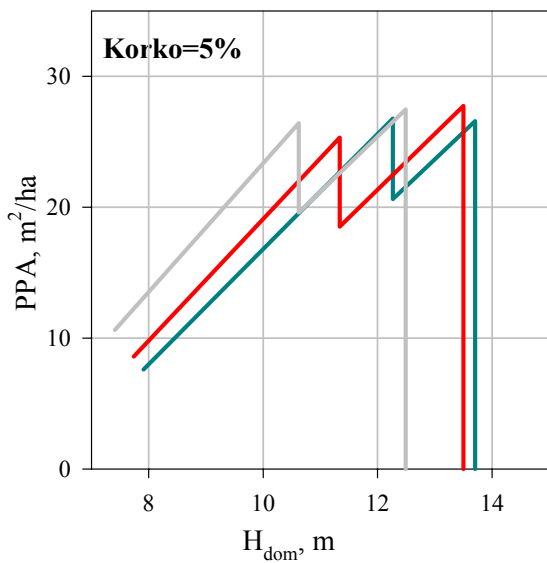
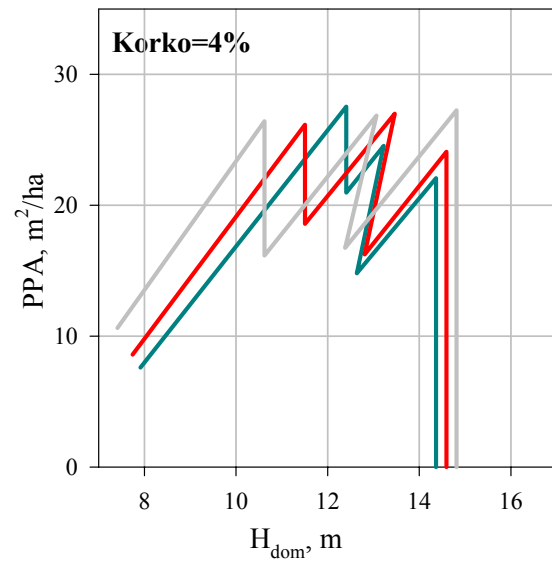
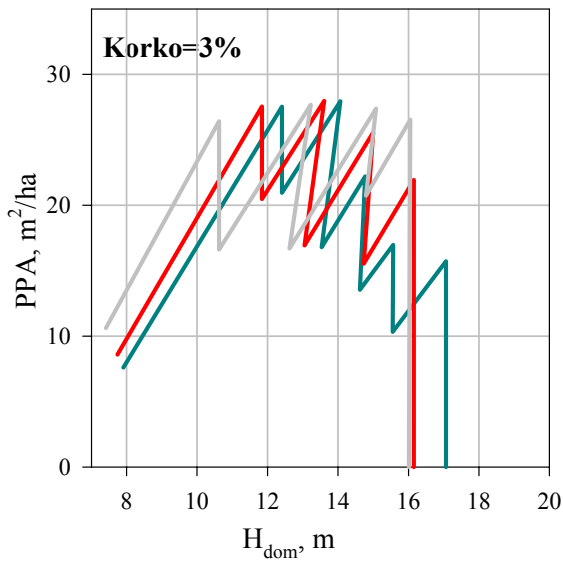
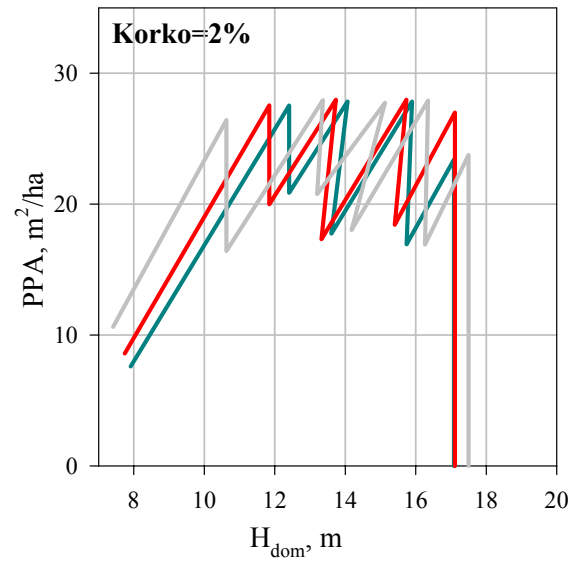
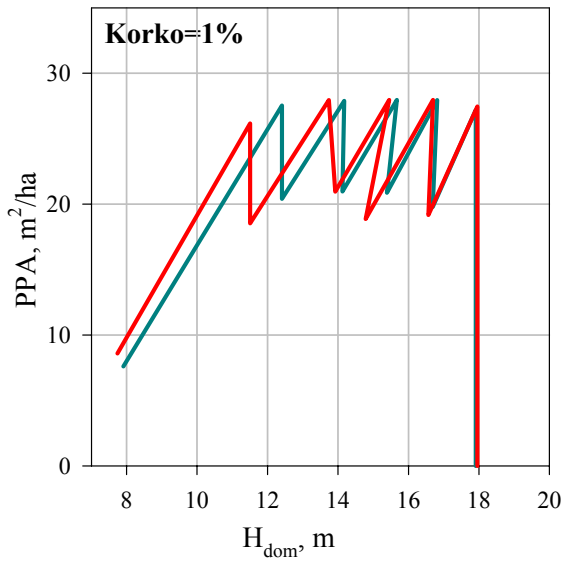
**Kuva 6.6** Optimaaliset hakkuut tuoreen kankaan männikössä 1300 dd. lämpösumma-alueella perinteisellä hinnoittelulla



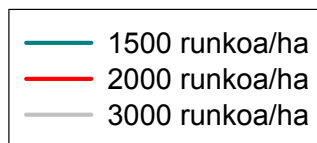
**Lähtötiheys:**



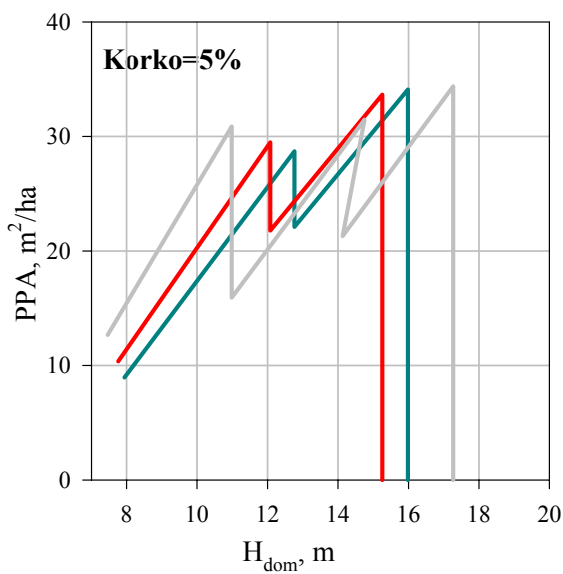
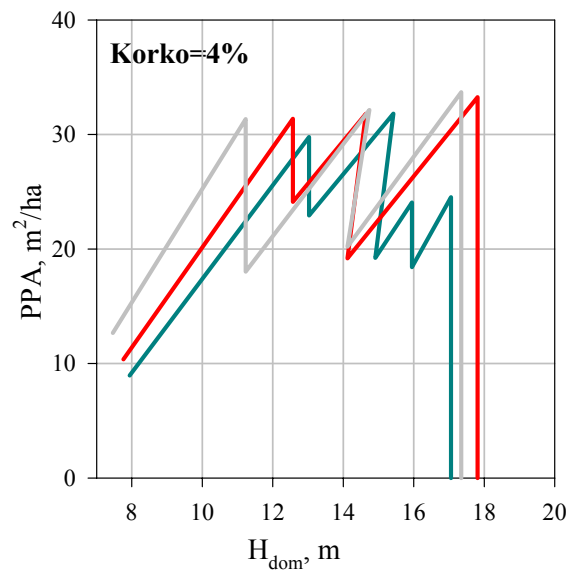
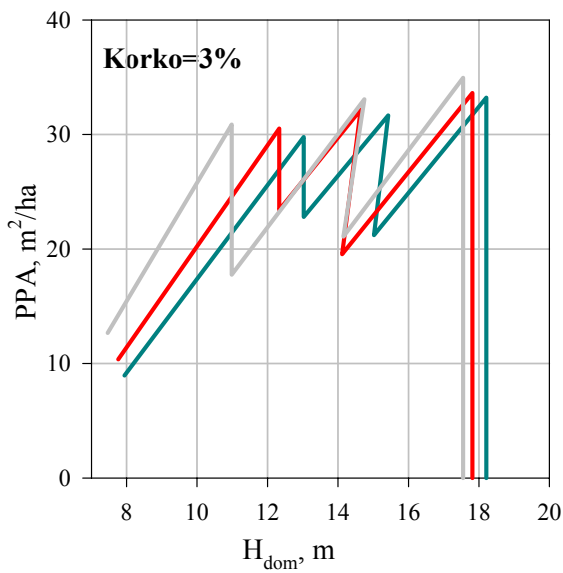
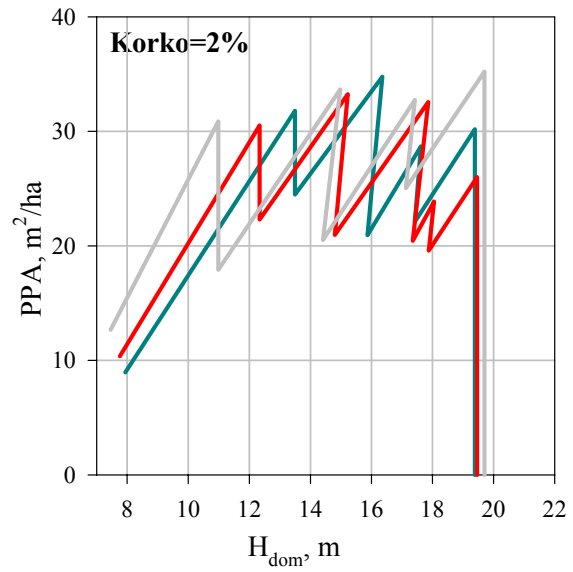
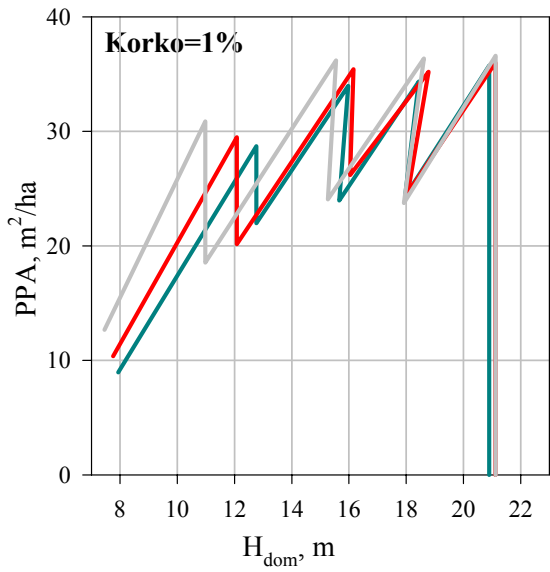
**Kuva 6.7** Optimaaliset hakkuut kuivahkon kankaan männikössä 1300 dd. lämpösumma-alueella perinteisellä hinnoittelulla



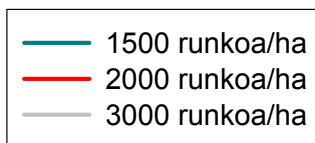
**Lähtötiheys:**



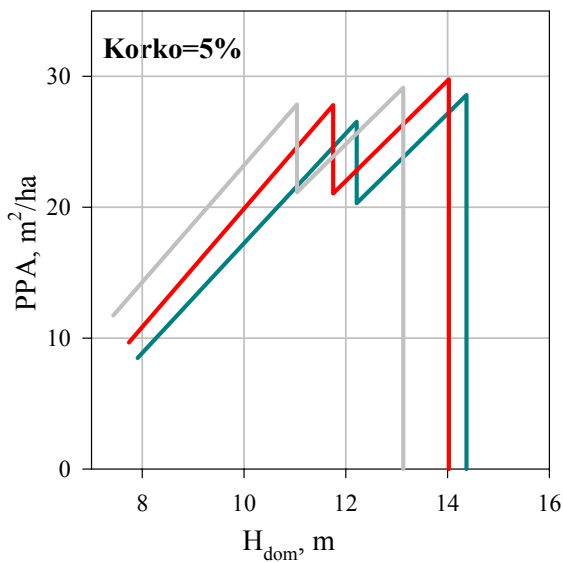
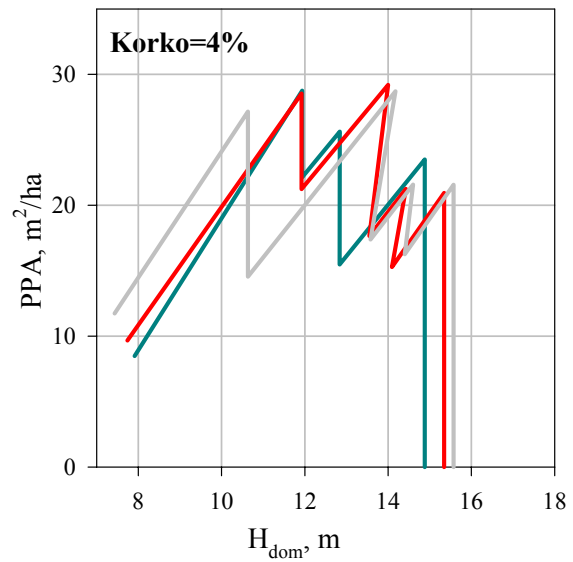
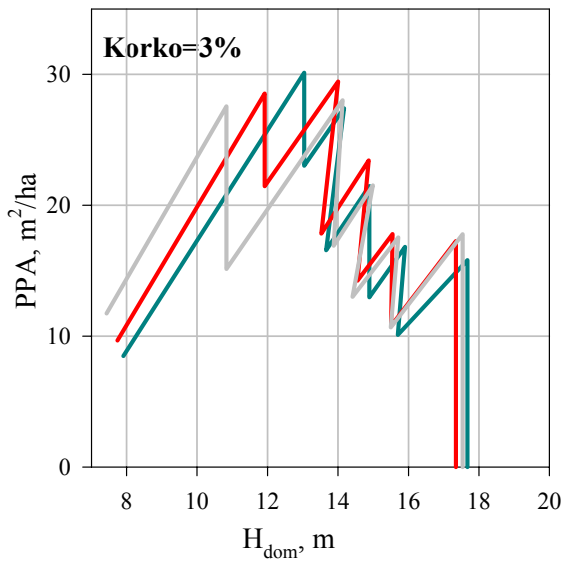
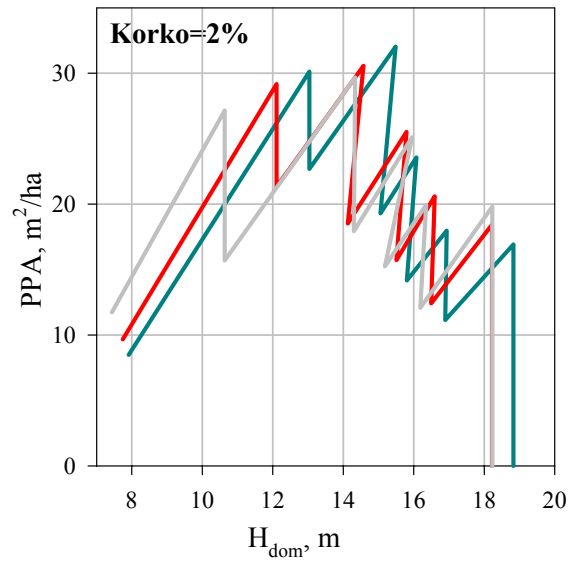
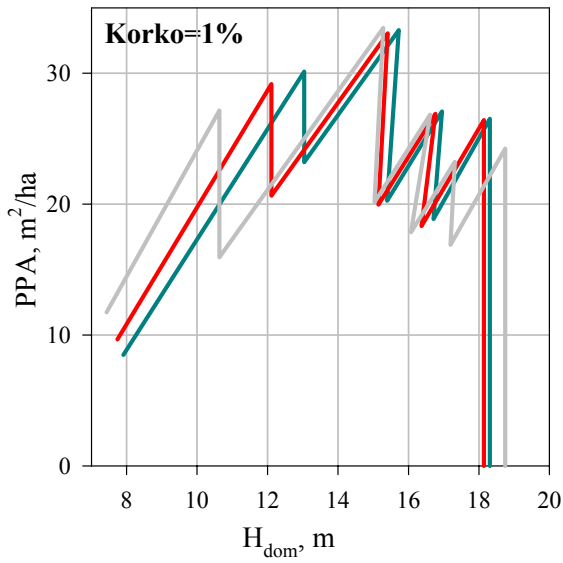
**Kuva 6.8** Optimaaliset hakkuut kuivan kankaan männikössä 1300 dd. lämpösusma-alueella perinteisellä hinnoittelulla



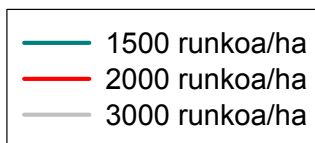
**Lähtötiheys:**



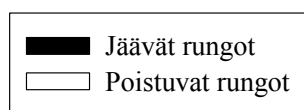
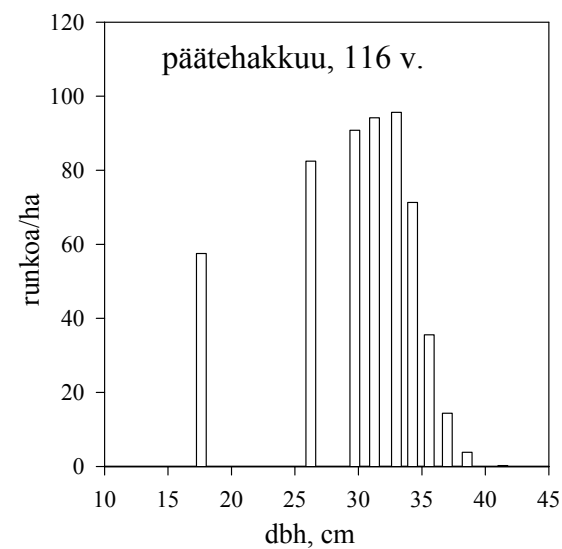
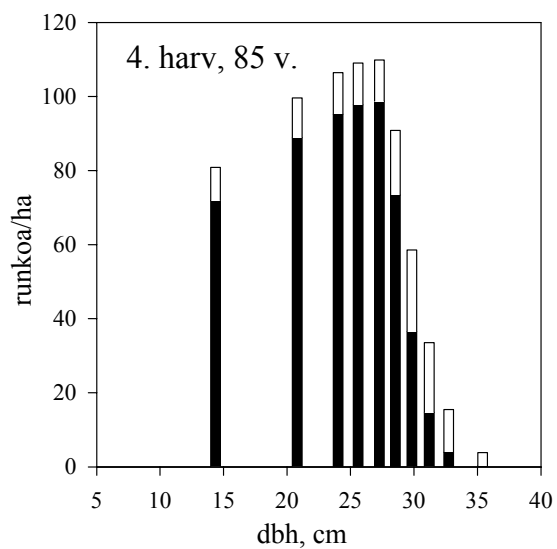
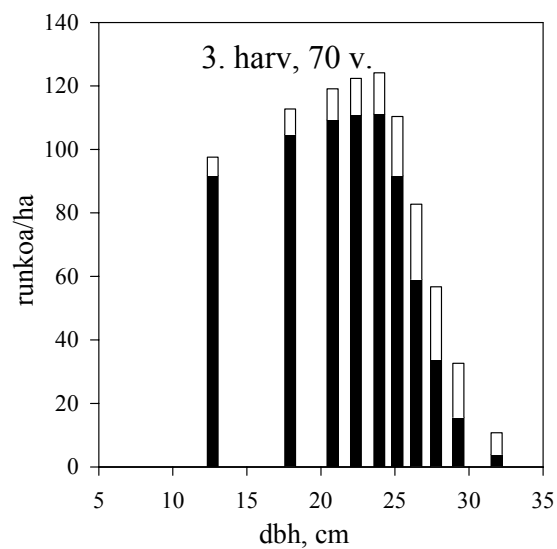
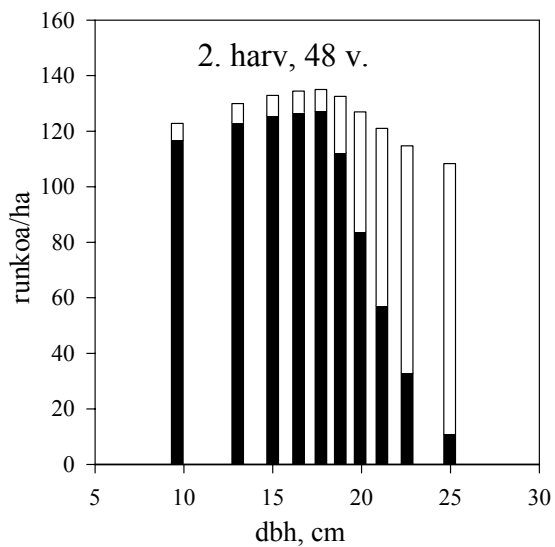
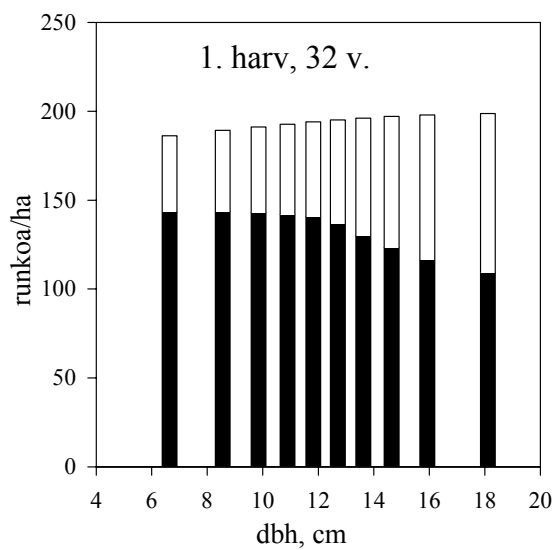
**Kuva 6.9** Optimaaliset hakkuut tuoreen kankaan männikössä 1100 dd. lämpösomma-alueella perinteisellä hinnoittelulla



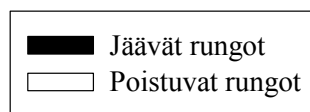
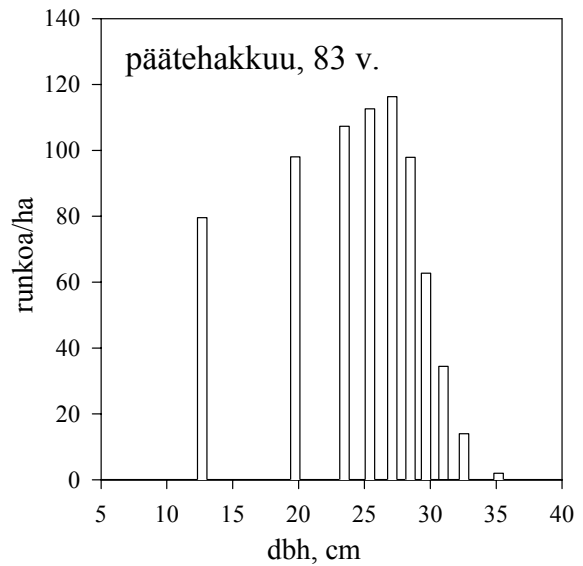
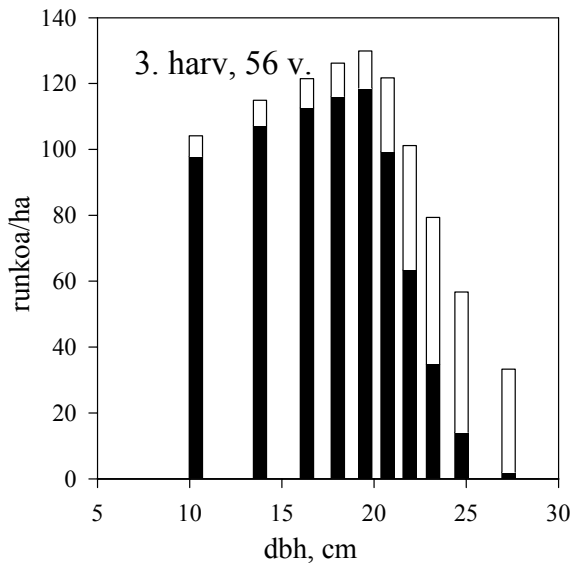
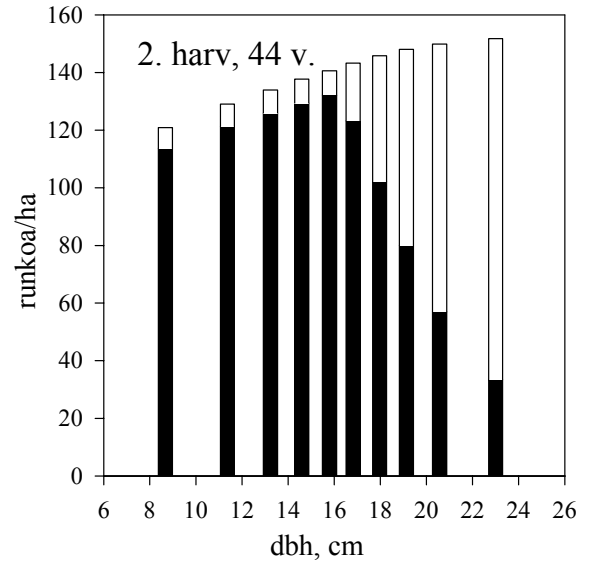
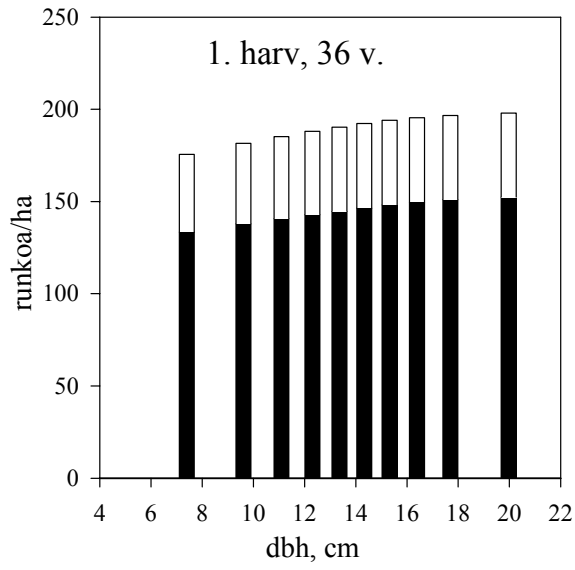
**Lähtötiheys:**



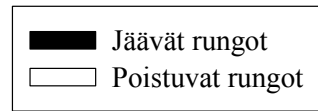
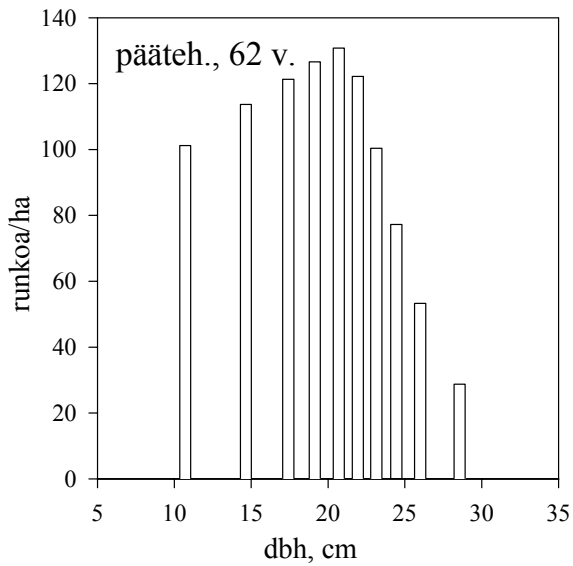
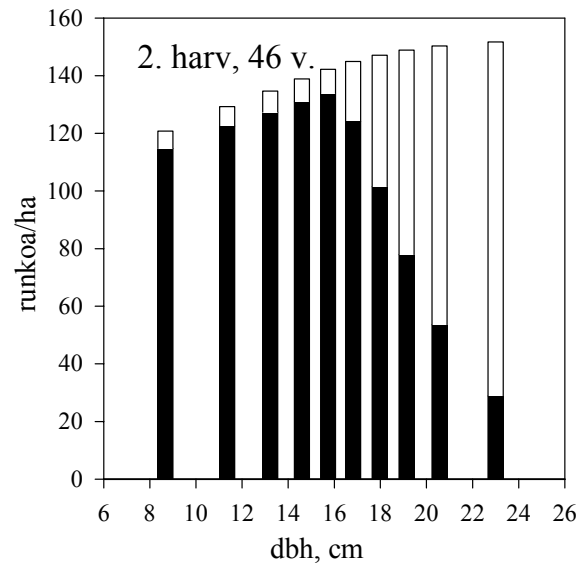
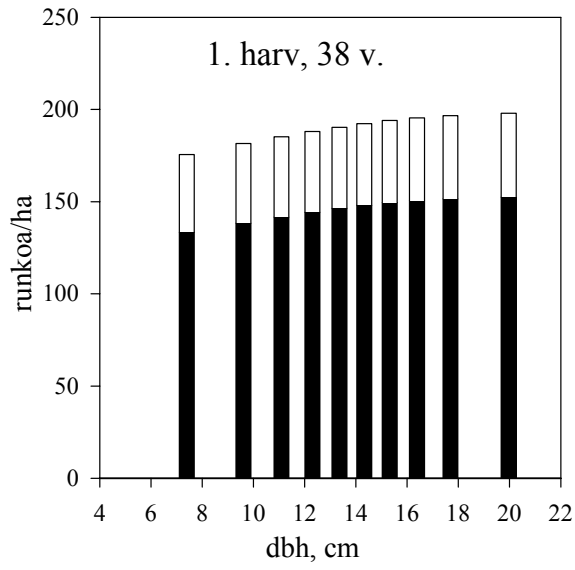
**Kuva 6.10** Optimaaliset hakkuut kuivahkon kankaan männikössä 1100 dd. lämpösusma-alueella perinteisellä hinnoittelulla



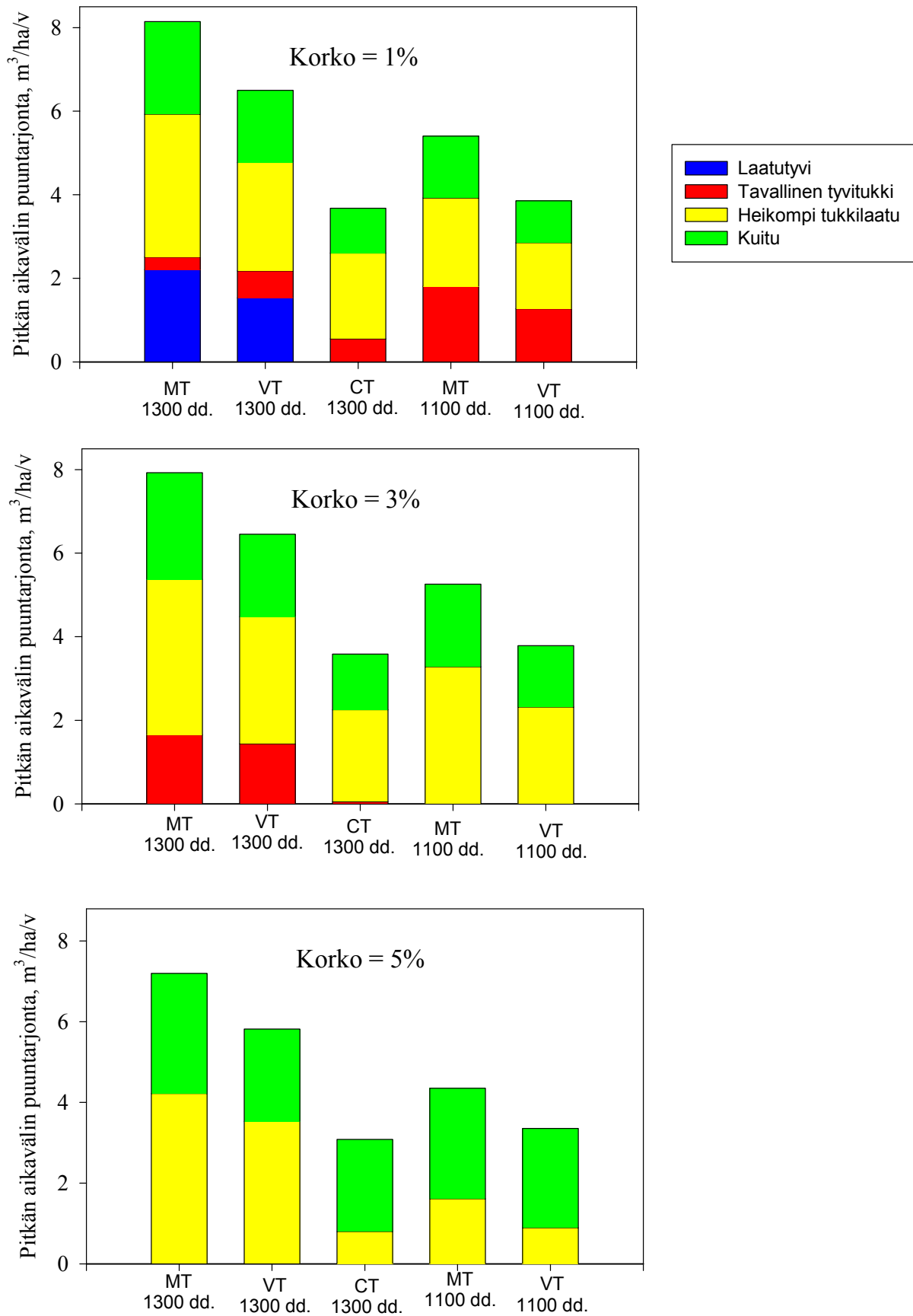
**Kuva 6.11** Puuvalinta harvennuksessa kuivahkon kankaan männikössä 1300 dd. lämpösomma-alueella, laatuhinnoittelulla, 2000 rungon lähtötiheydellä ja 1% korolla



**Kuva 6.12** Puuvalinta harvennuksessa kuivahkon kankaan männikössä 1300 dd. lämpösumma-alueella, laatuhinnoittelulla, 2000 rungon lähtötiheydellä ja 3% korolla



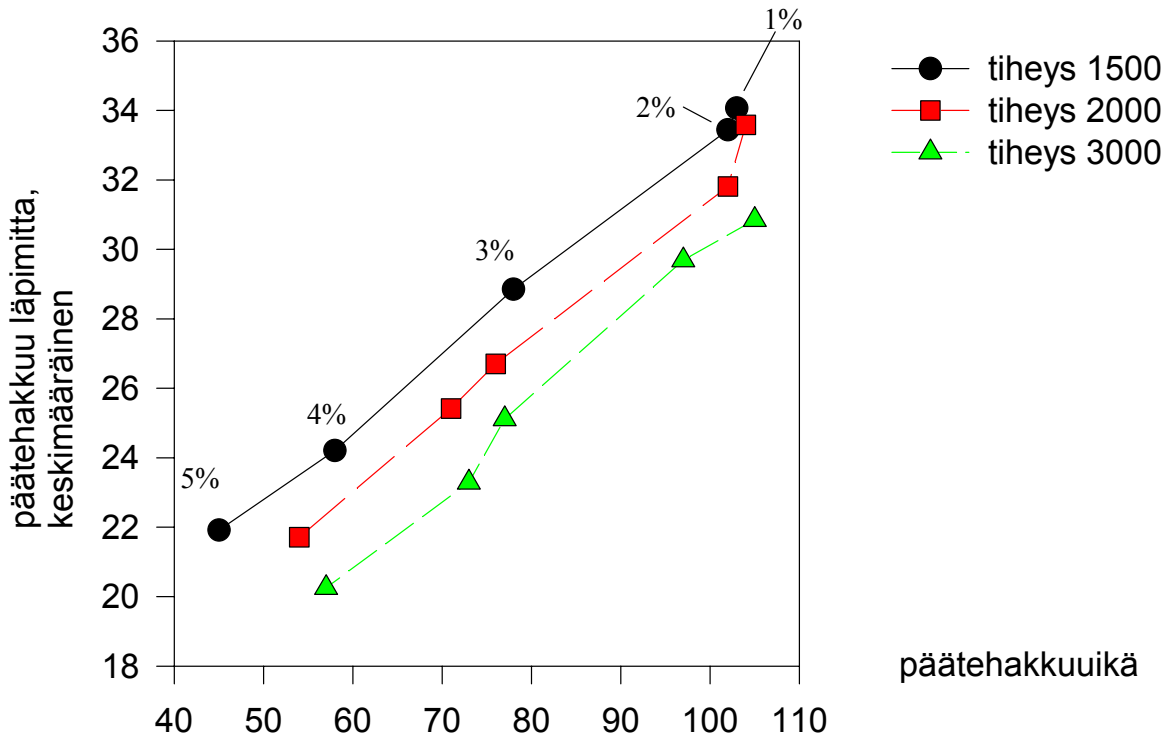
**Kuva 6.13** Puuvalinta harvennuksessa kuivahkon kankaan männikössä 1300 dd. lämpösomma-alueella, laatuhinnoittelulla, 2000 rungon lähtötiheydellä ja 5% korolla



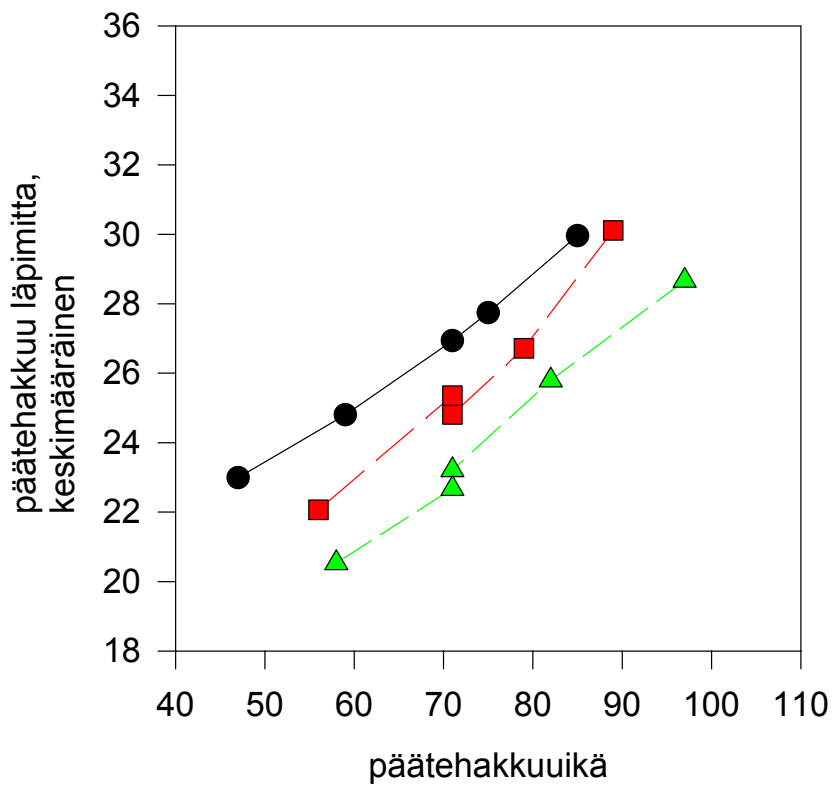
**Kuva 6.14** Pitkän aikavälin puuntarjonnan rakenne eri männyn kasvupaikoilla ja koroilla optimiratkaisuiden mukaan, Lähtötiheys: 2000 runkoa/ha, laatuhinnoittelu

**Kuva 6.15.** Männyn kiertoaikoja  
 MT,lämpösumma 1300  
 taimikkotiheydet 1500, 2000, 3000  
 korkokanta, 1,2,3,4 ja 5%

### laatuhinnoittelu

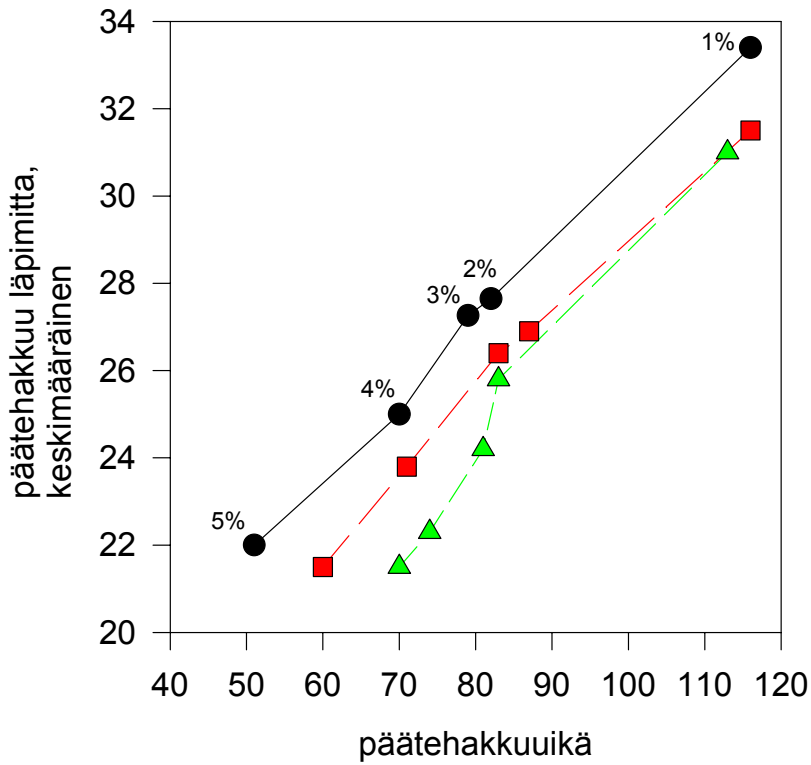


### perinteinen hinnoittelu

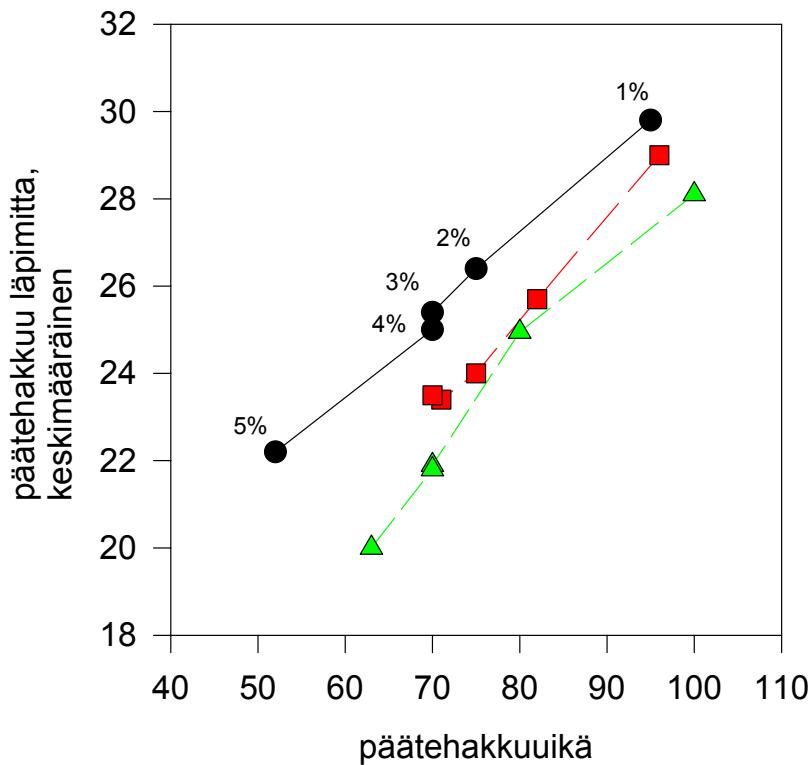


**Kuva 6.16** Männyn kiertoaikoja  
 VT, lämpösomma 1300  
 taimikkotiheydet 1500,2000,3000  
 korko 1,2,3,4 ja 5%

### laatuhinnoittelu

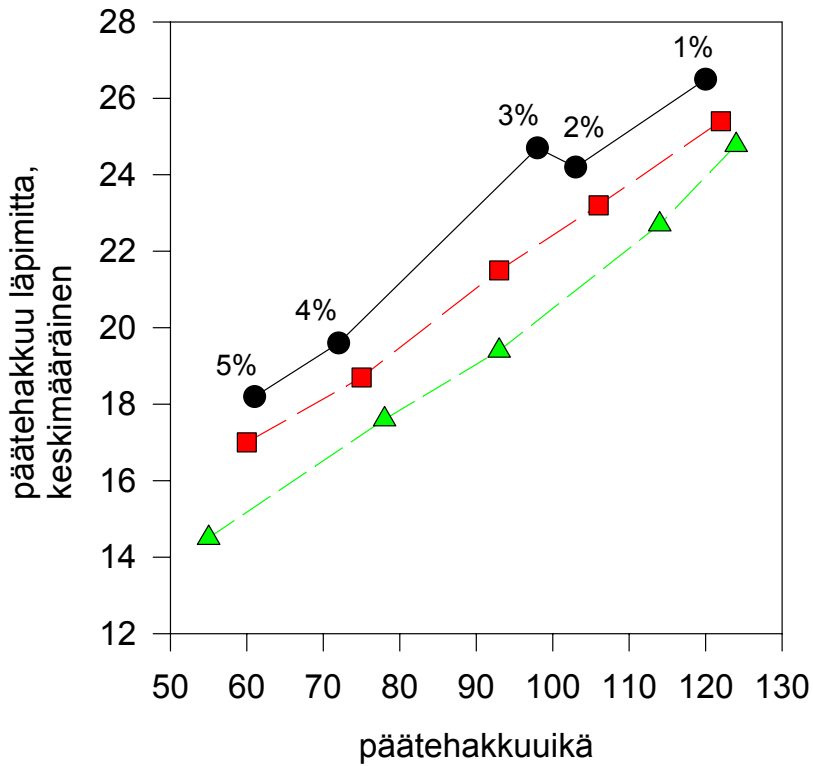


### perinteinen hinnoittelu

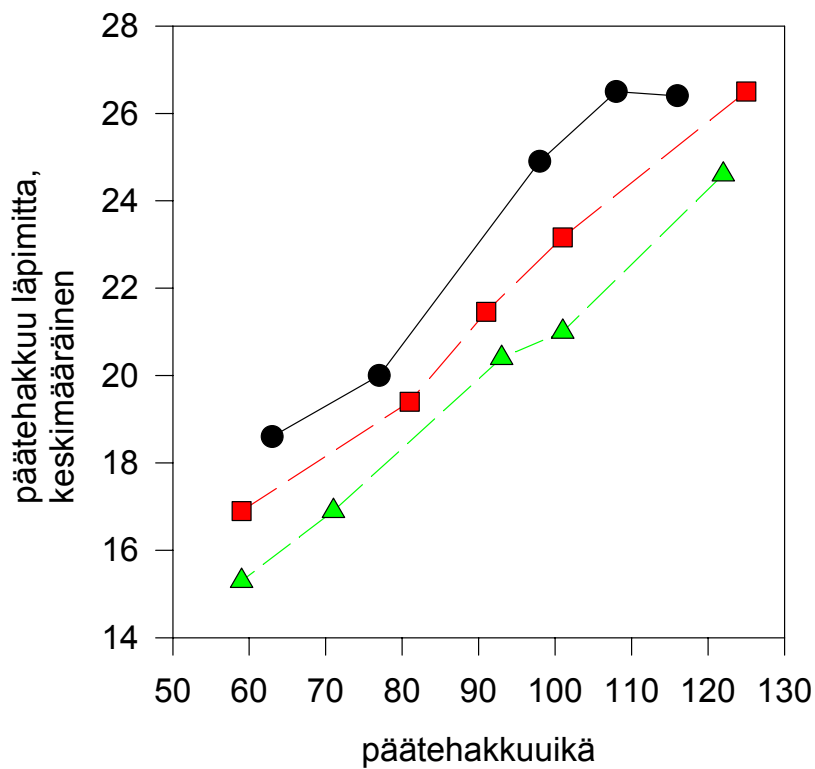


**Kuva 6.17.** Männyn kiertoaikoja  
 CT, lämpösomma 1300  
 taimikkotiheydet 1500, 2000, 3000  
 korko 1, 2, 3, 4, ja 5%

### laatuhinnoittelu

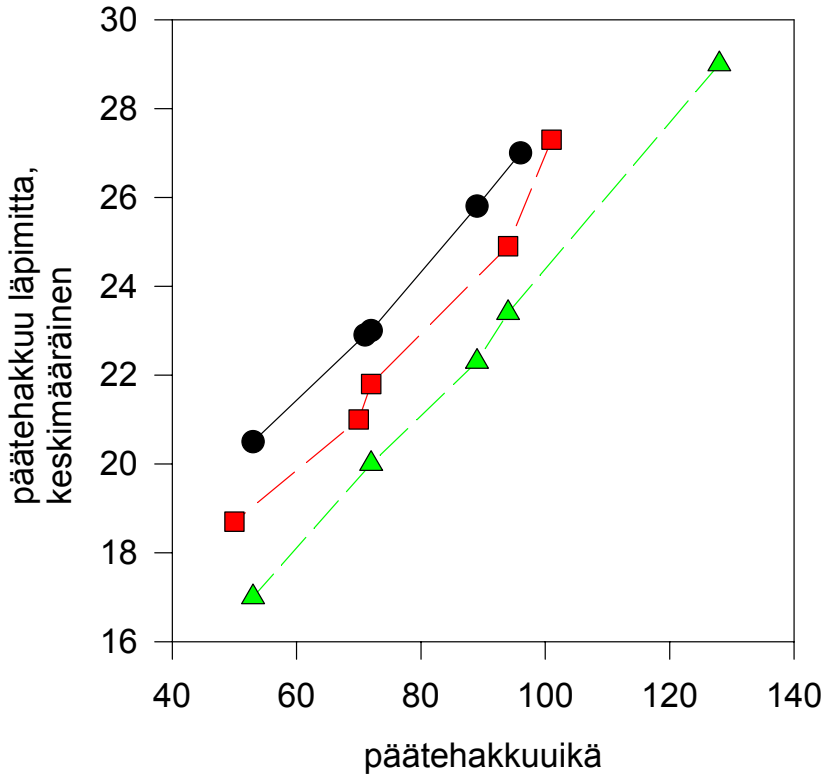


### perinteinen hinnoittelu

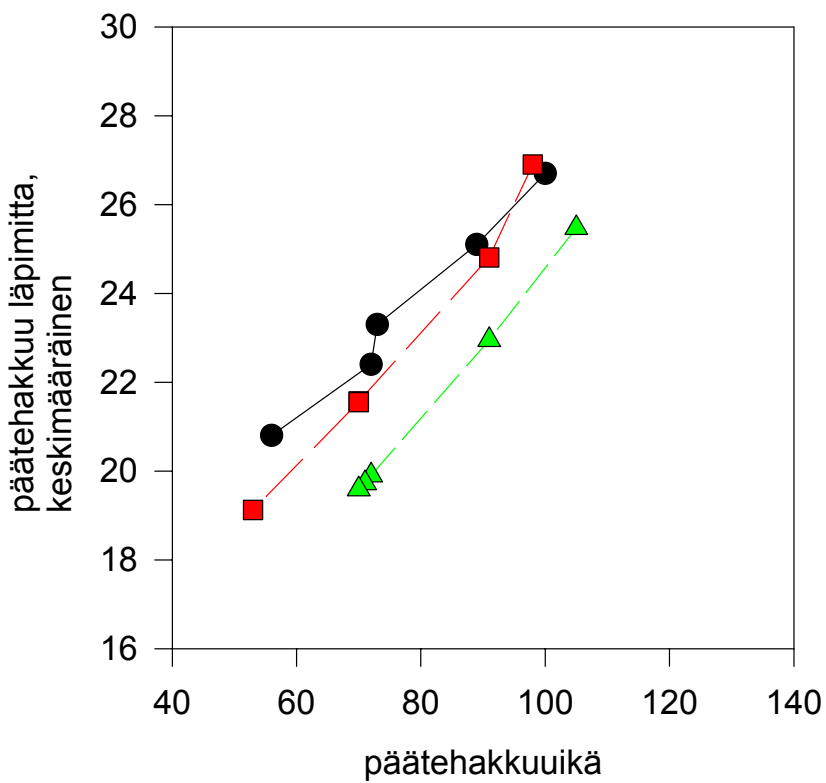


**Kuva 6.18.** Männyn kiertoaikoja  
 Kasvupaikka MT, lämpösumma 1100  
 taimikkotiheys 1500, 2000, 3000  
 korko 1, 2, 3, 4 ja 5%

**laatuhinnoittelu**

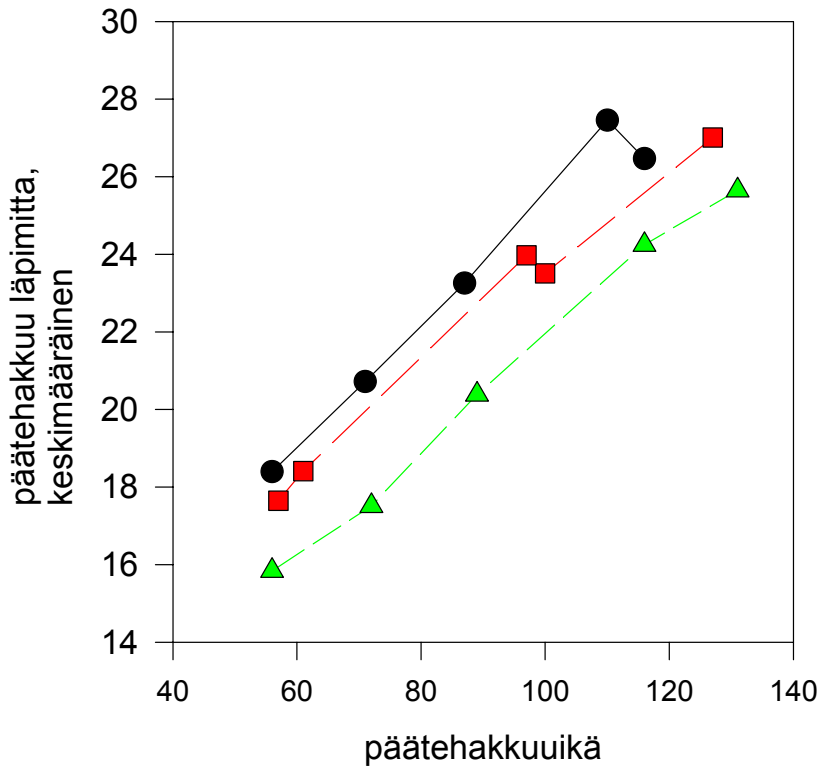


**perinteinen hinnoittelu**

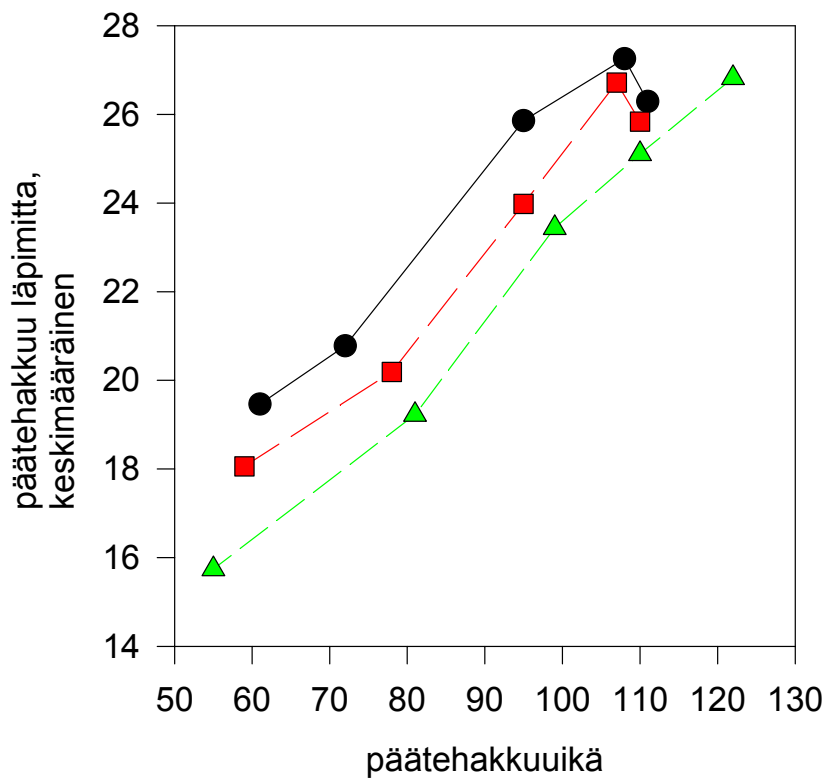


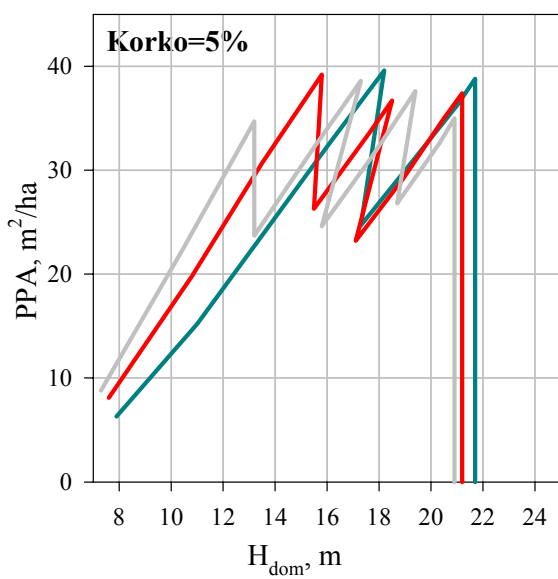
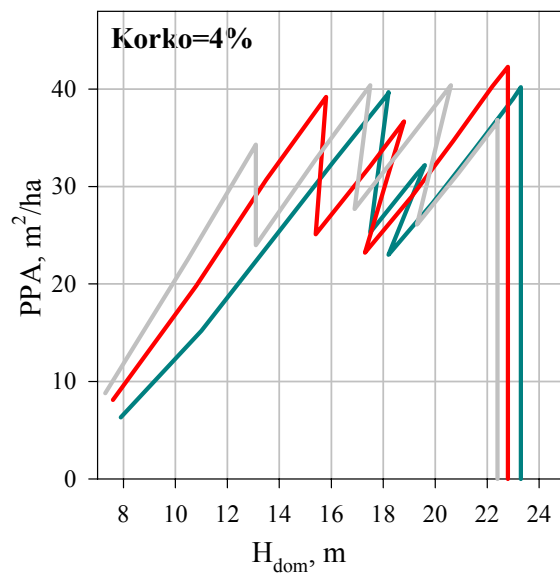
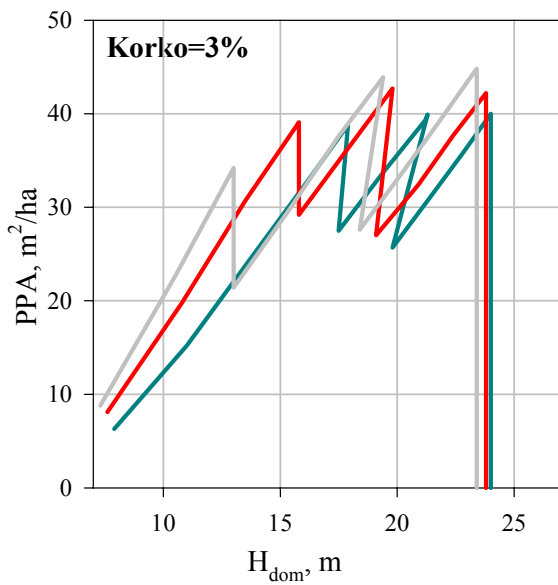
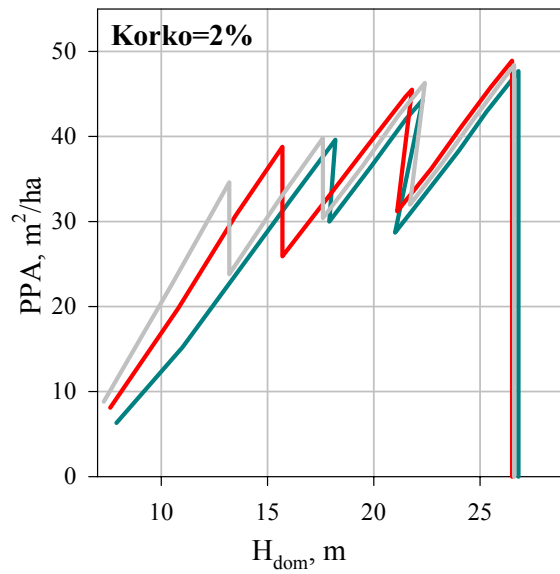
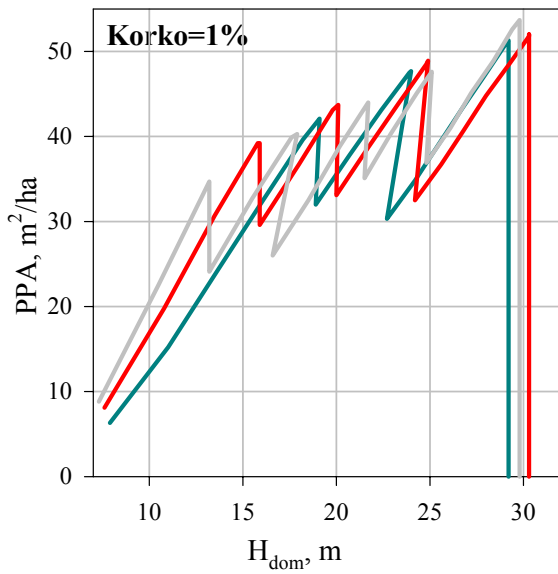
**Kuva 6.19.** Männyn kiertoaikoja  
 Kasvupaikka VT, lämpösumma 1100  
 taimikkotiheys 1500, 2000, 3000  
 korko 1, 2, 3, 4 ja 5%

**laatuhinnoittelu**



**perinteinen hinnoittelu**

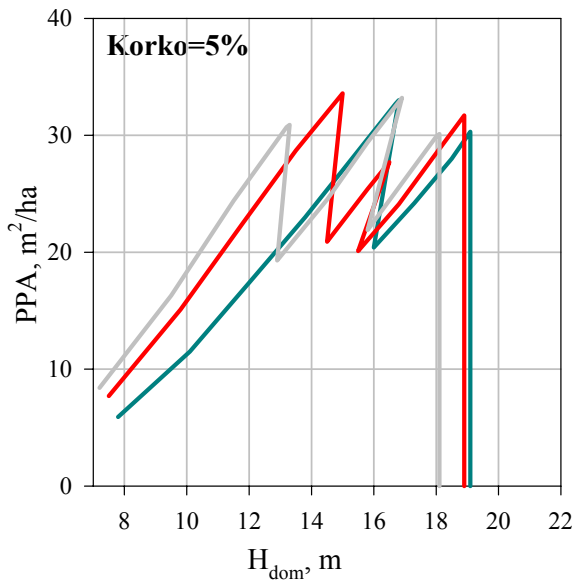
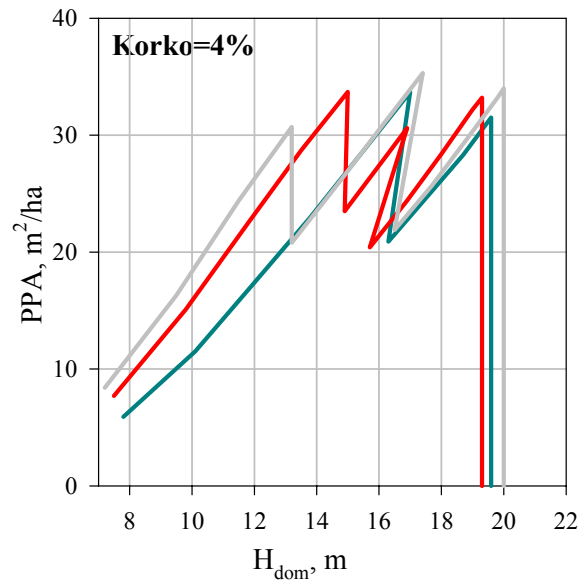
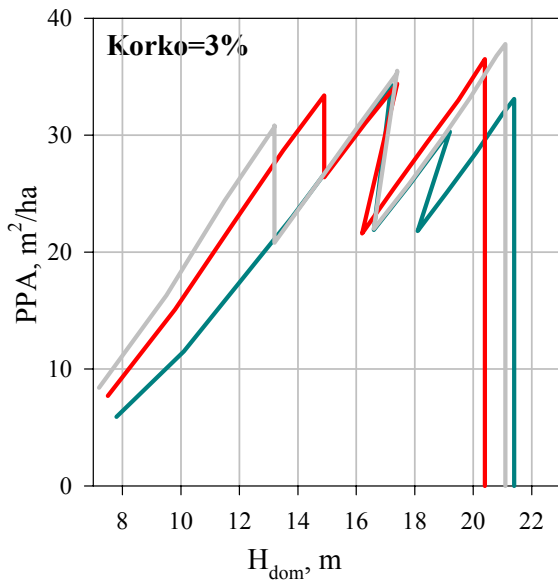
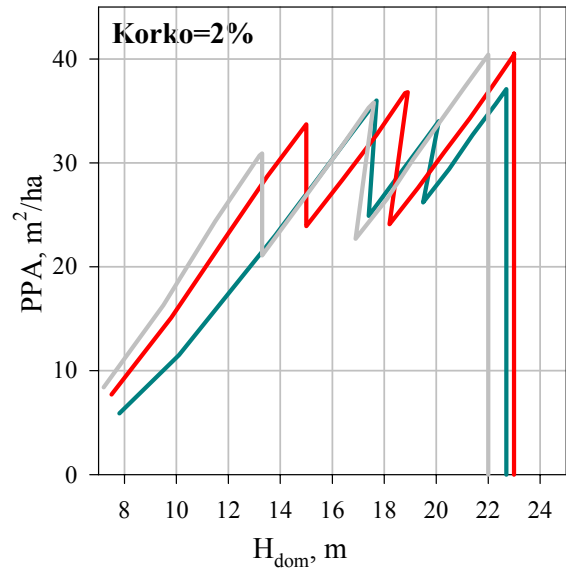
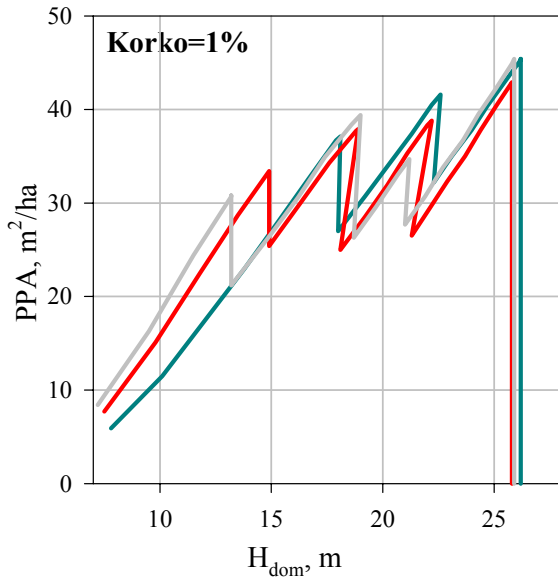




**Lähtötiheys:**

- 1300 runkoa/ha
- 1800 runkoa/ha
- 2300 runkoa/ha

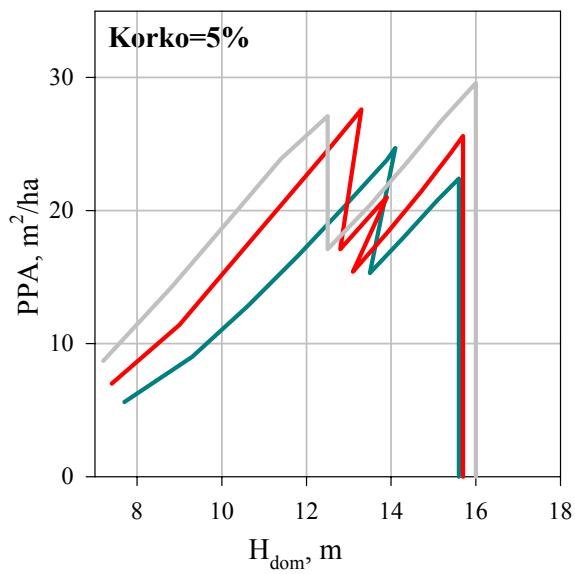
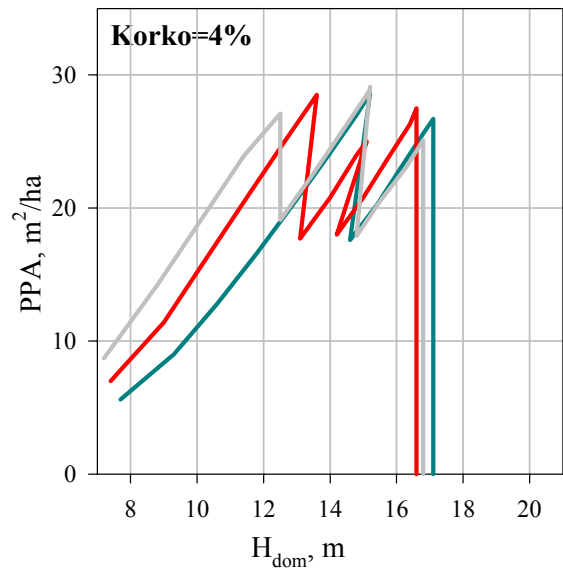
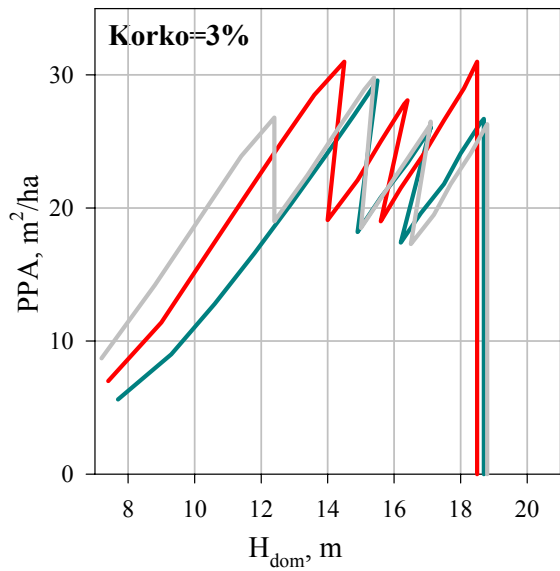
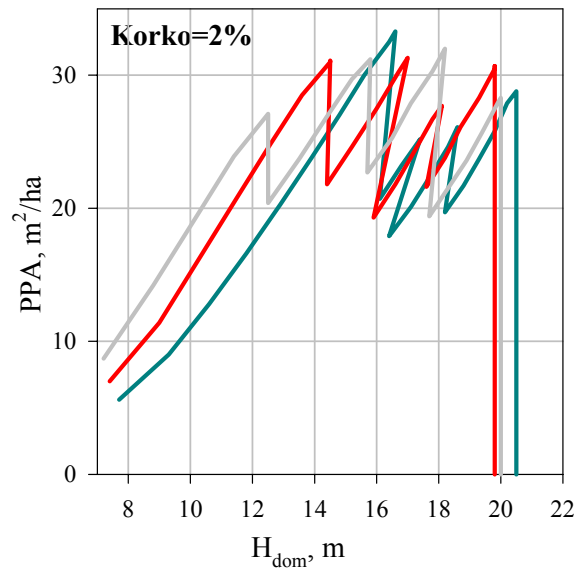
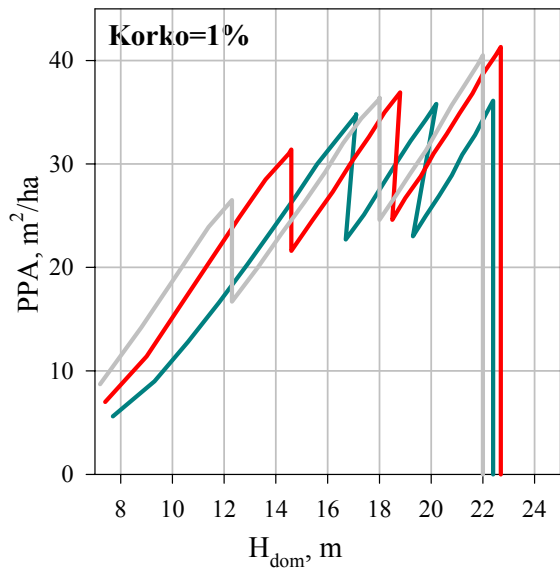
**Kuva 7.1** Optimaaliset hakkuut lehtomaisen kankaan kuusikoille 1300 dd. lämpösukka-alueella



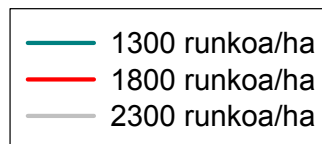
**Lähtötiheys:**



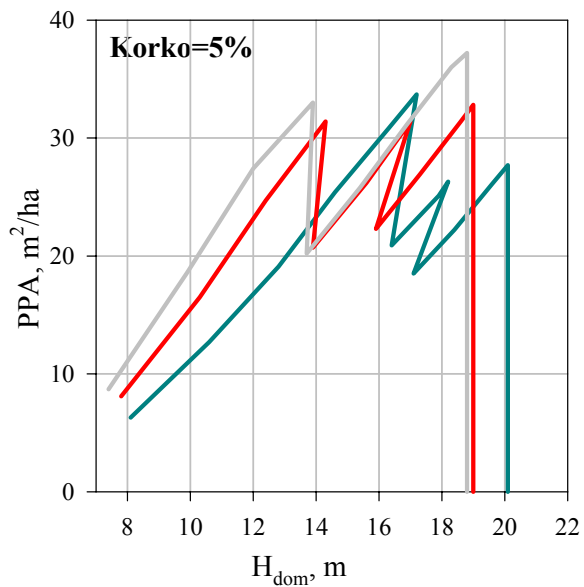
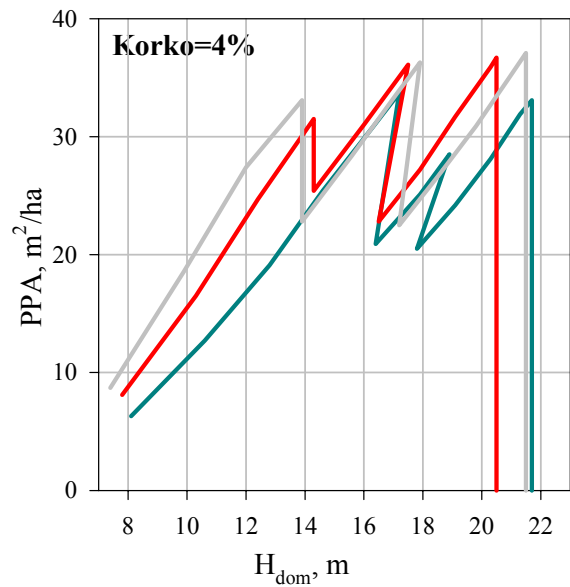
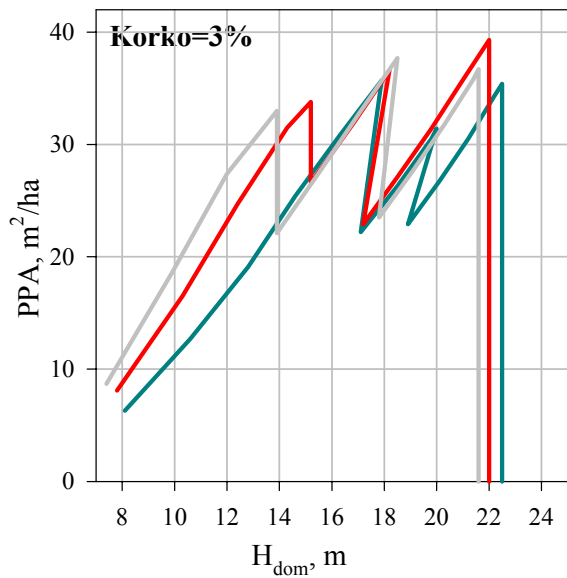
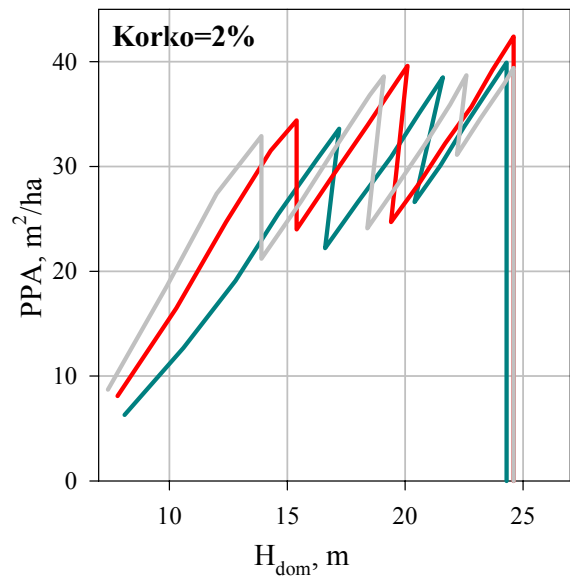
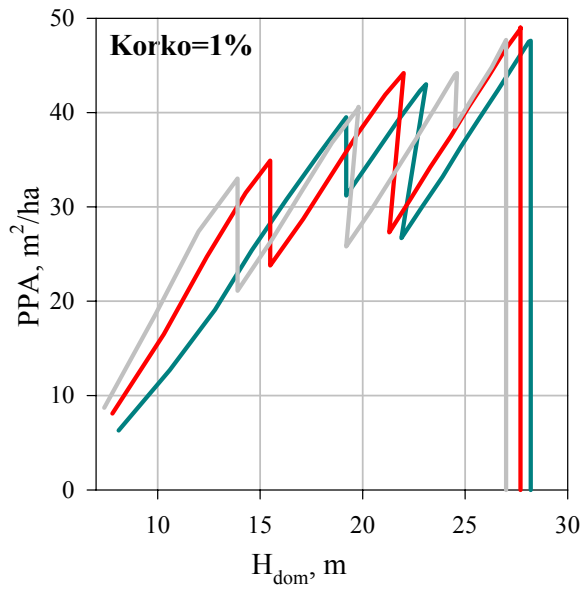
**Kuva 7.2** Optimaaliset hakkuut lehtomaisen kankaan kuusikoissa 1100 dd. lämpösukka-alueella



**Lähtötiheys:**



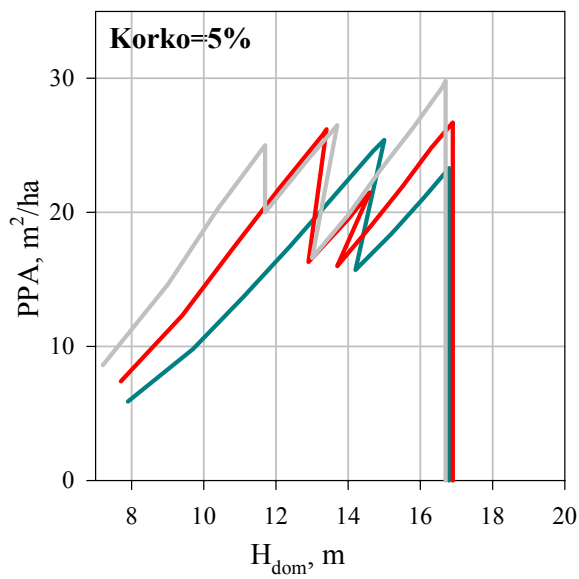
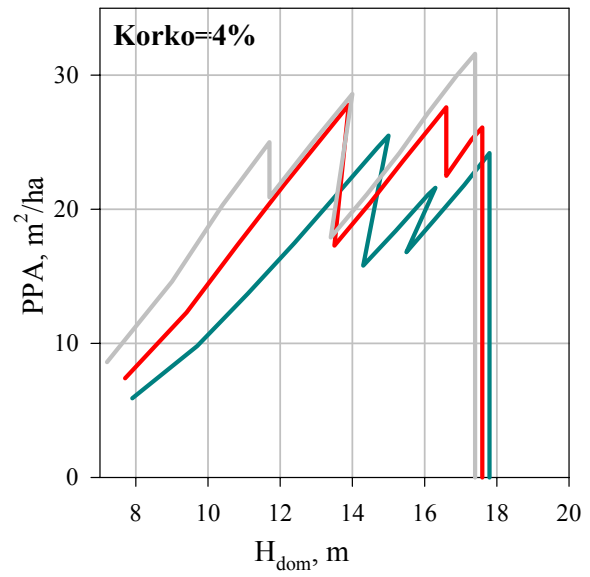
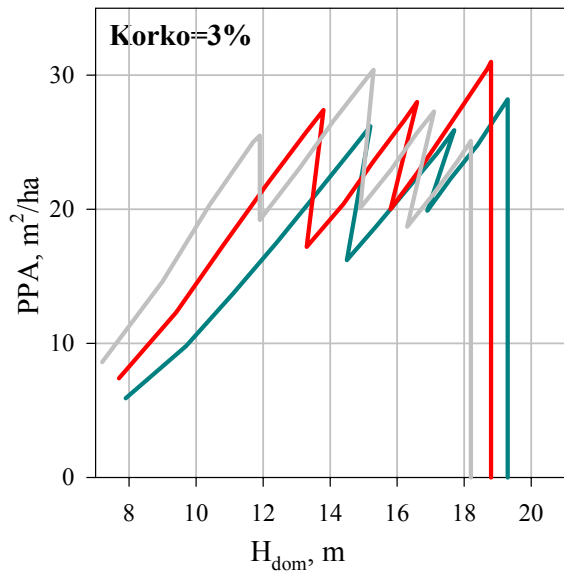
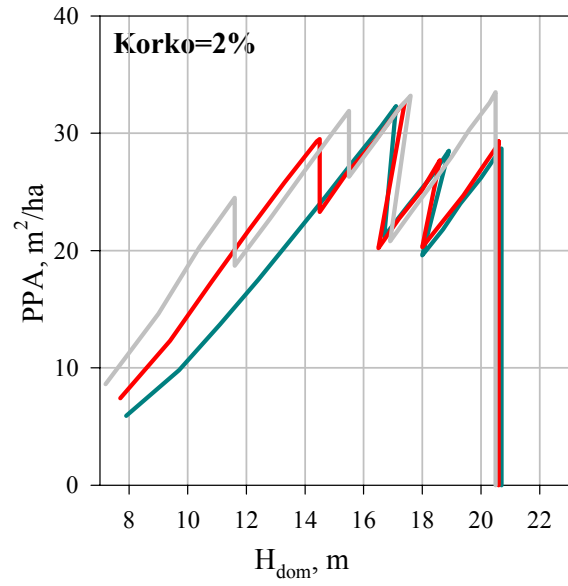
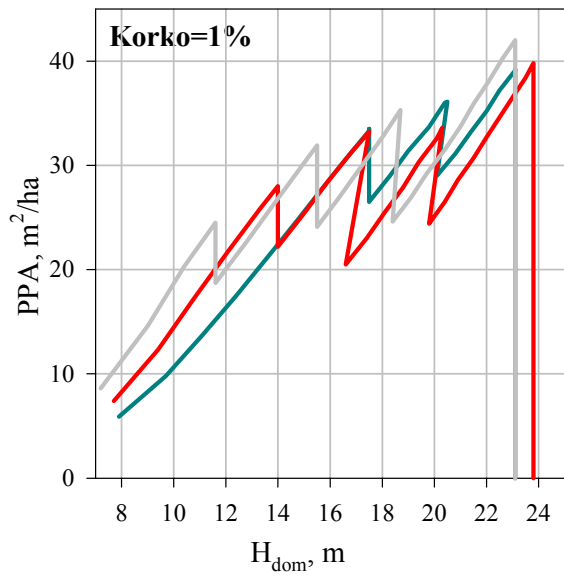
**Kuva 7.3** Optimaaliset hakkuut lehtomaisen kankaan kuusikoissa 900 dd. lämpösukka-alueella



**Lähtötiheys:**

- 1300 runkoa/ha
- 1800 runkoa/ha
- 2300 runkoa/ha

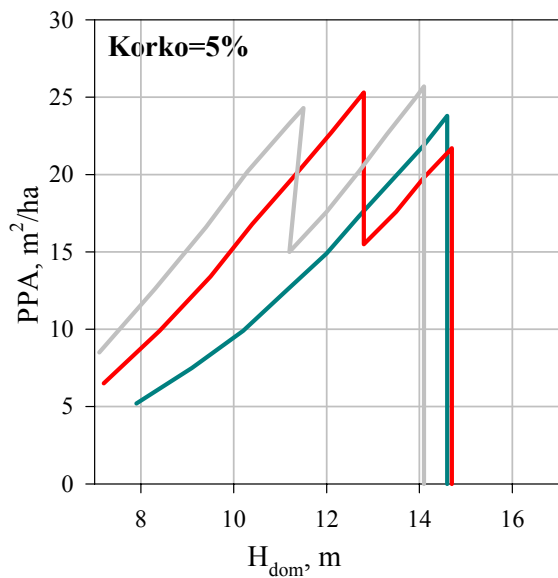
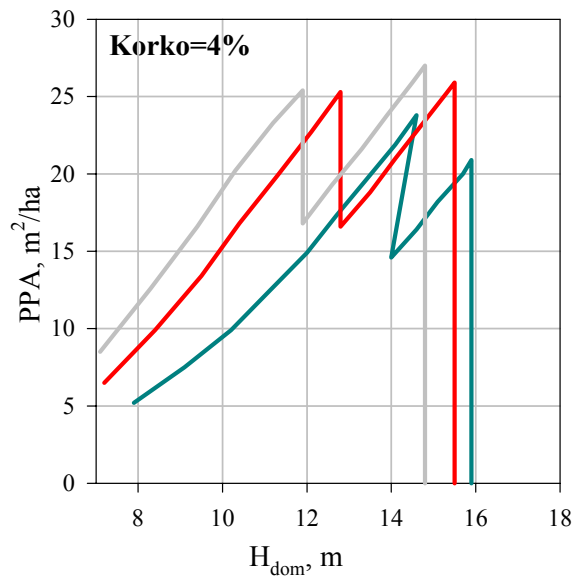
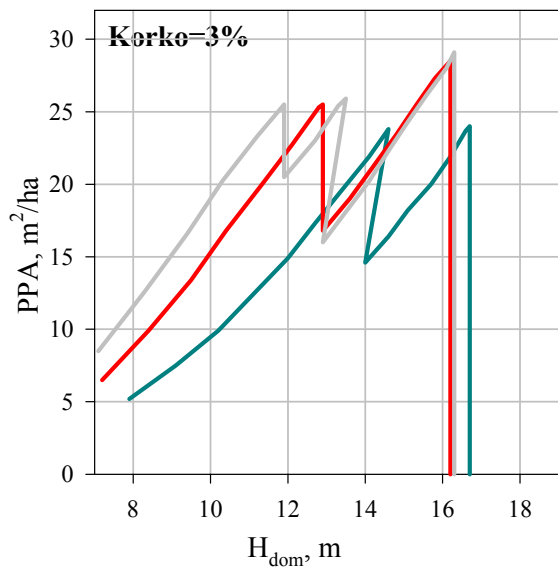
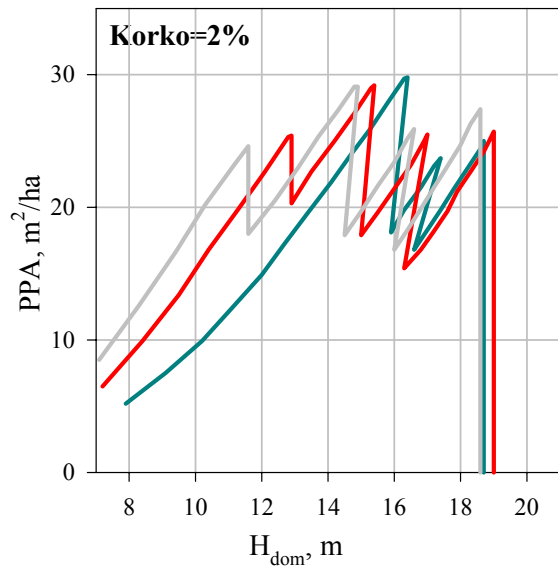
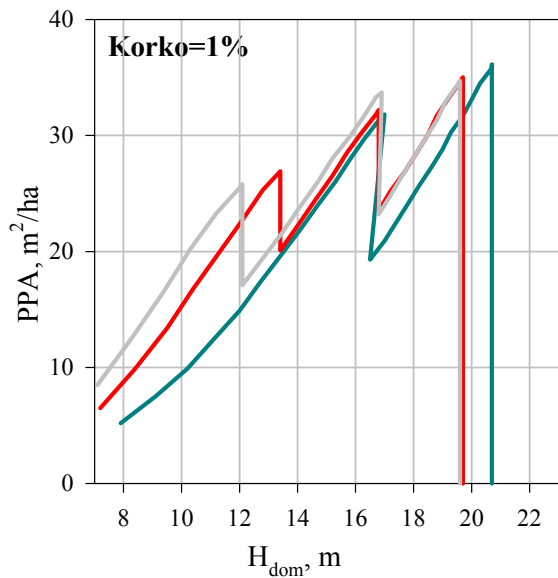
**Kuva 7.4** Optimaaliset hakkuut tuoreen kankaan kuusikoissa 1300 dd. lämpösukka-alueella



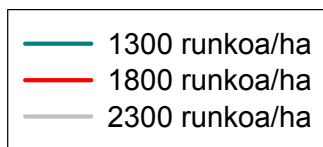
**Lähtötiheys:**

- 1300 runkoa/ha
- 1800 runkoa/ha
- 2300 runkoa/ha

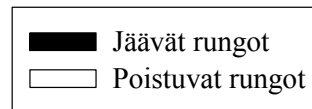
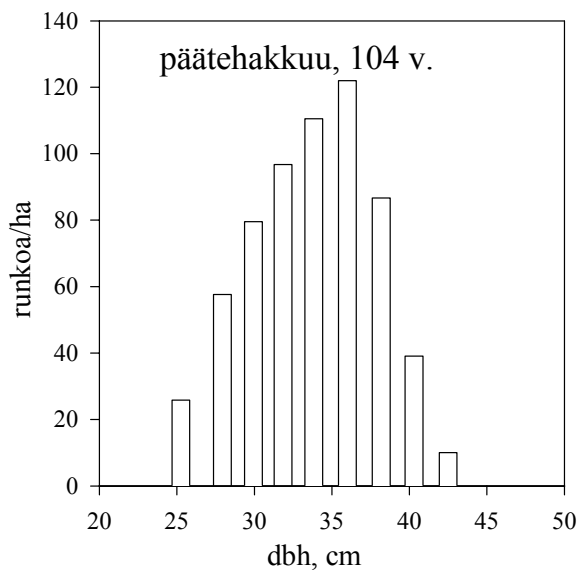
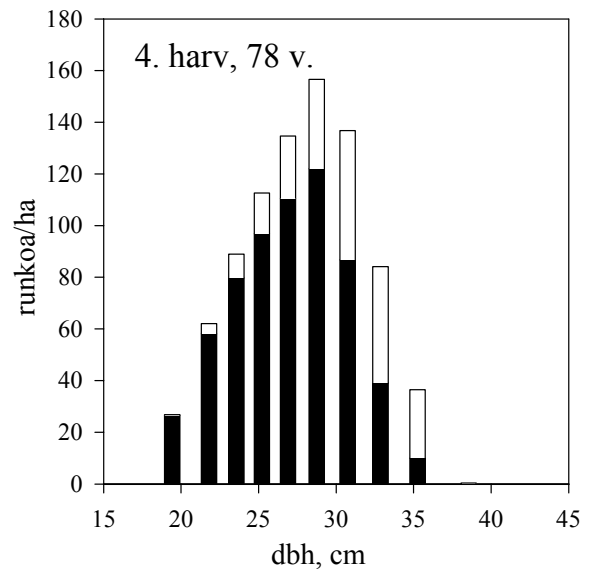
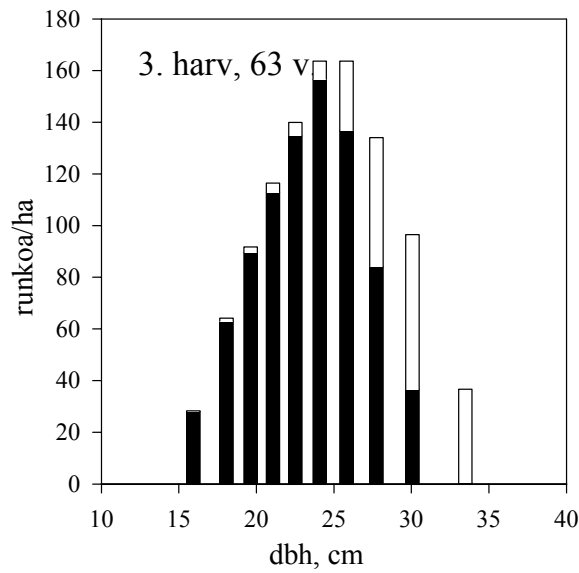
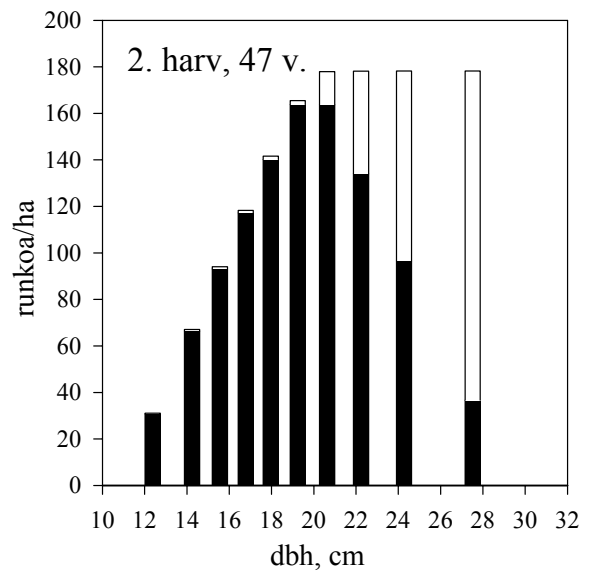
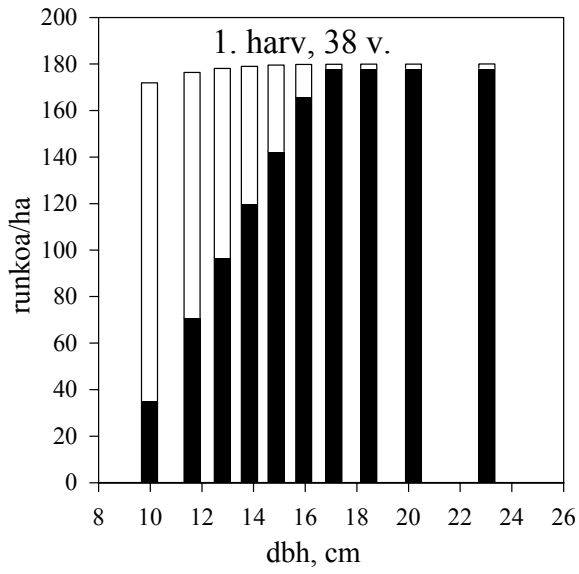
**Kuva 7.5** Optimaaliset hakkuut tuoreen kankaan kuusikoissa 1100 dd. lämpösomma-alueella



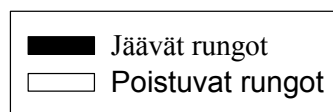
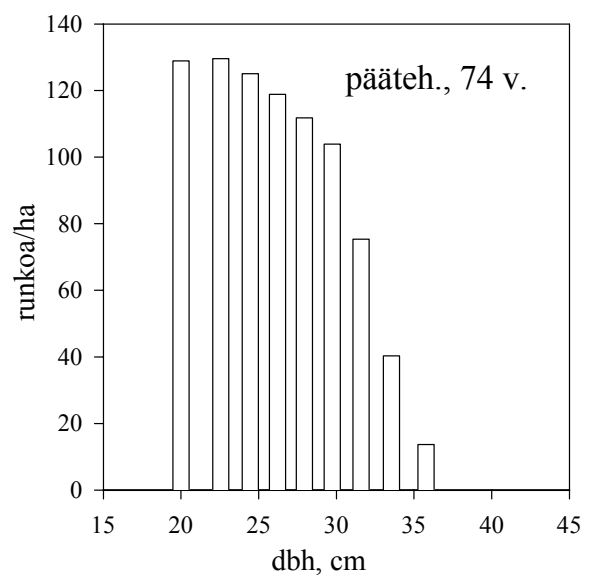
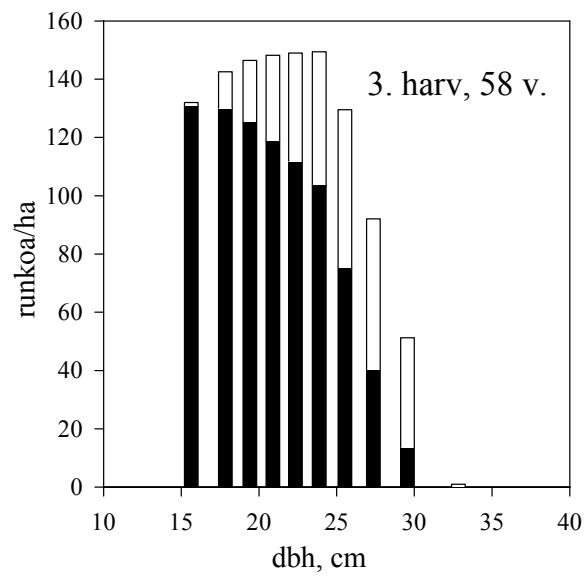
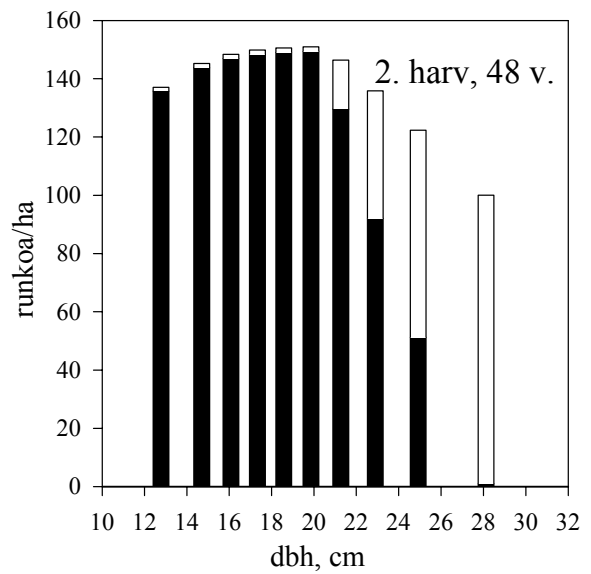
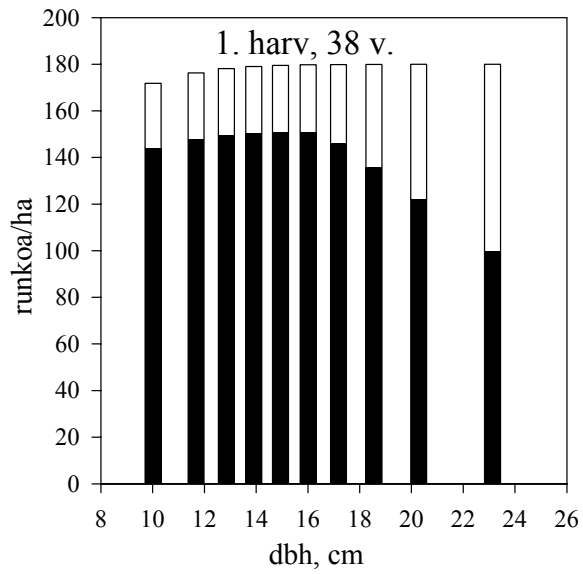
**Lähtötiheys:**



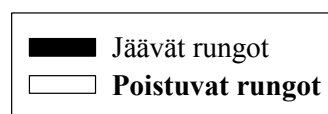
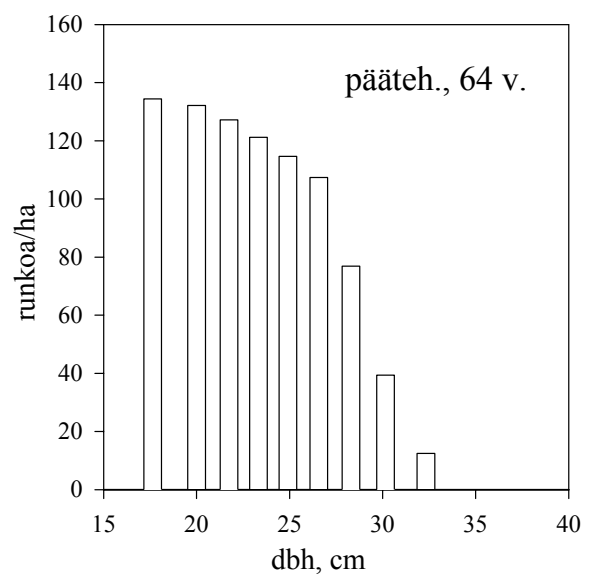
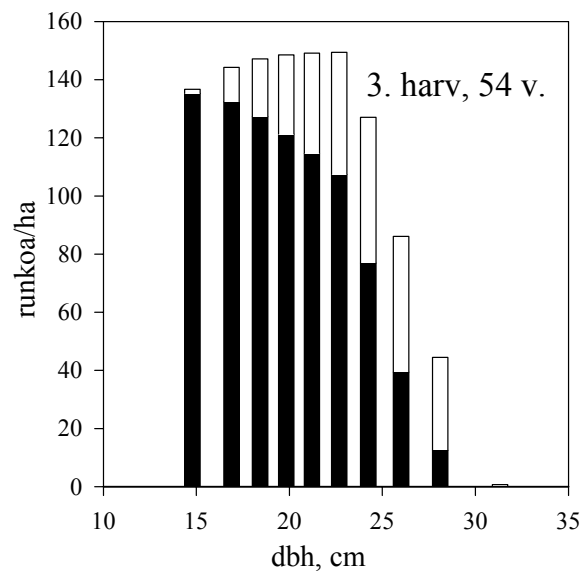
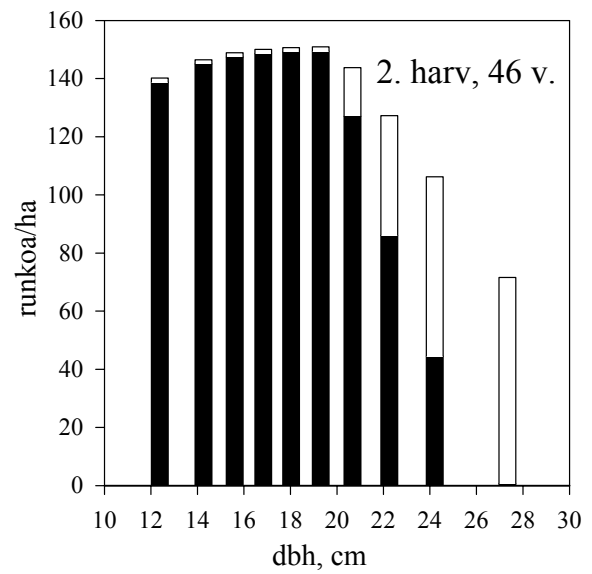
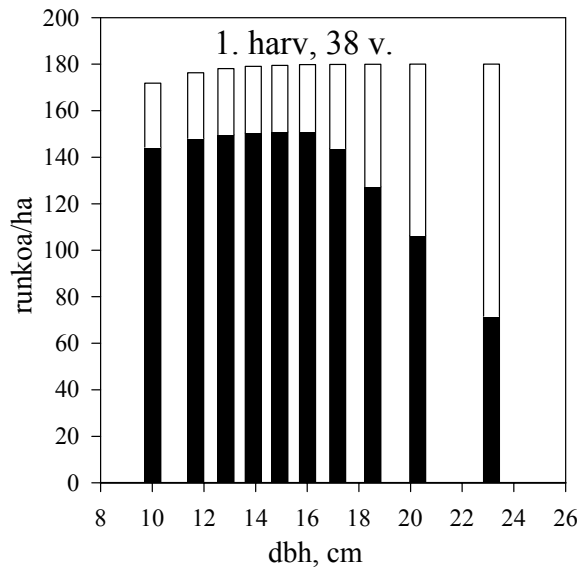
**Kuva 7.6** Optimaaliset hakkuut tuoreen kankaan kuusikoissa 900 dd. lämpösukka-alueella



**Kuva 7.7** Puuvalinta harvennuksessa tuoreen kankaan kuusikossa 1300 dd. lämpösomma-alueella, 1800 rungon lähtötiheydellä ja 1% korolla

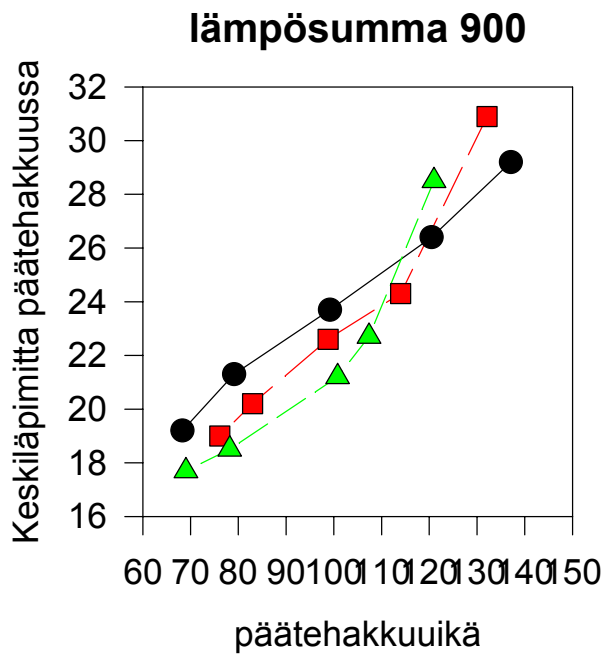
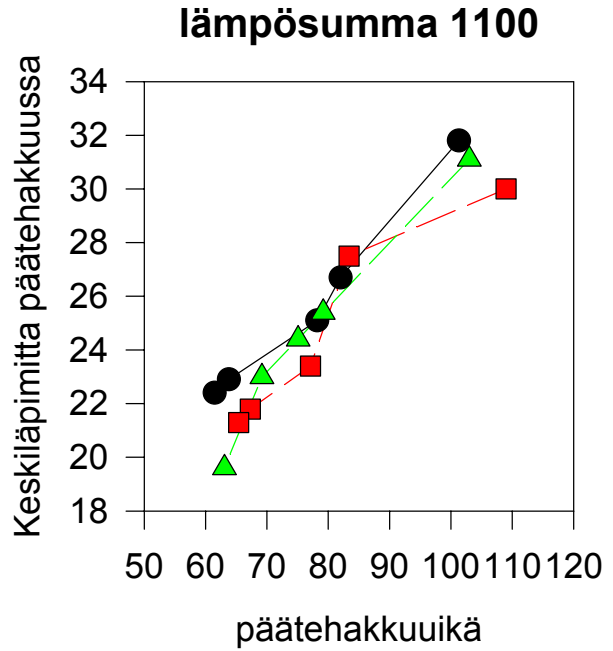
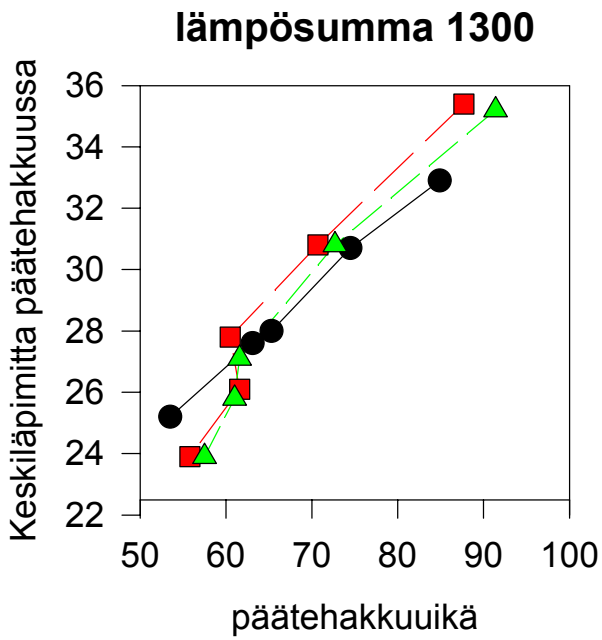


**Kuva 7.8** Puuvalinta harvennuksessa tuoreen kankaan kuusikossa 1300 dd. lämpösumma-alueella, 1800 rungon lähtötiheydellä ja 3% korolla



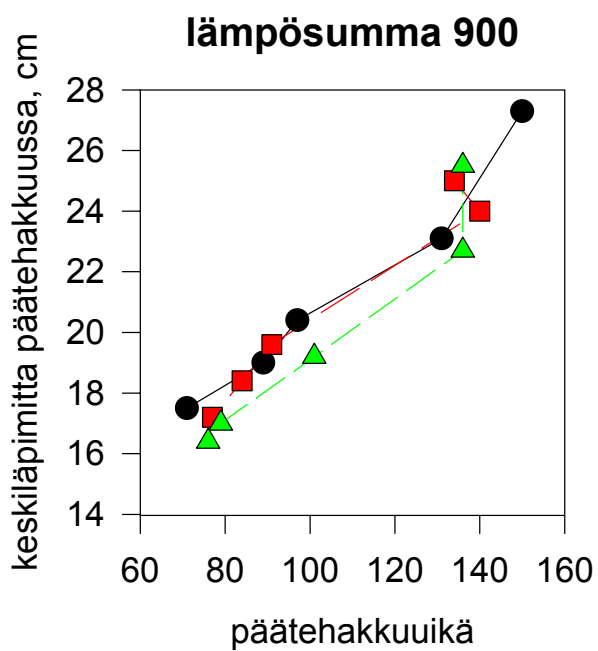
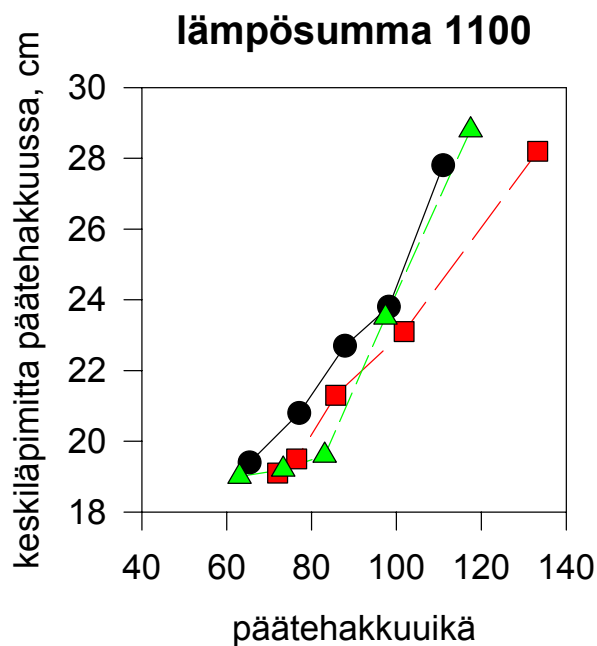
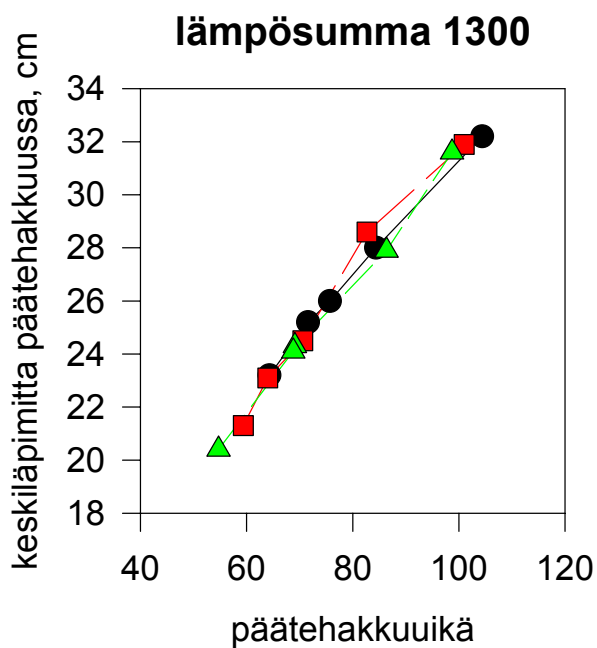
**Kuva 7.9** Puuvalinta harvennuksessa tuoreen kankaan kuusikossa 1300 dd. lämpösumma-alueella, 1800 rungon lähtötiheydellä ja 5% korolla

**Kuva 7.10.** Kuusen kiertoaikoja kasvupaikka OMT taimikkotiheydet 1300, 1800, 2500 korko 1, 2, 3, 4 ja 5%



- tiheys 1300
- tiheys 1800
- ▲ tiheys 2300

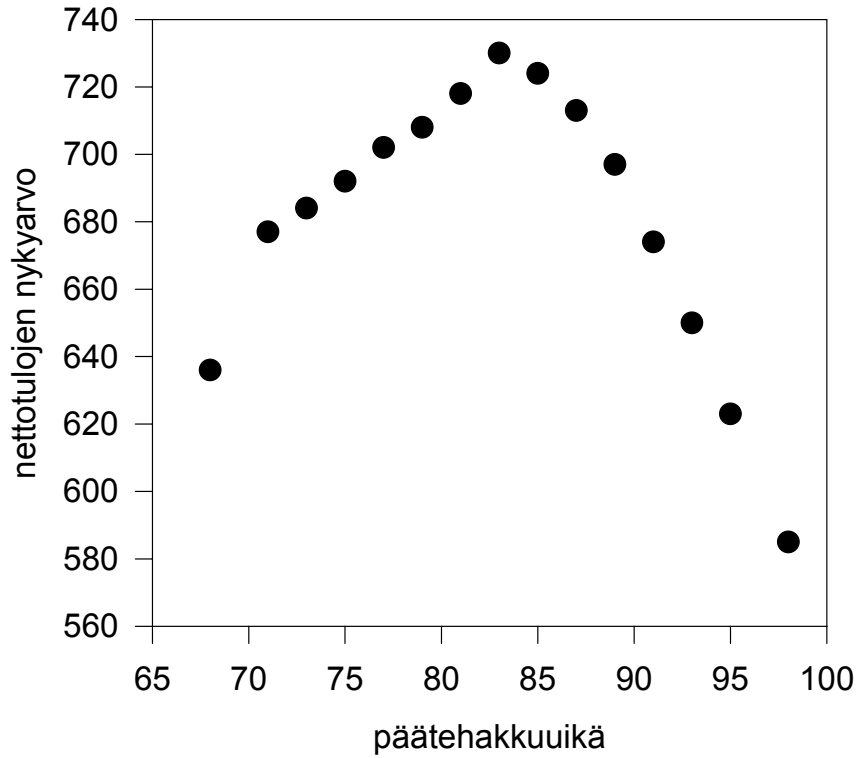
**Kuva 7.11.** Kuusen kiertoaikoja kasvupaikka MT  
 taimikkotiheydet 1300, 1800, 2300  
 korko 1, 2, 3, 4, ja 5%



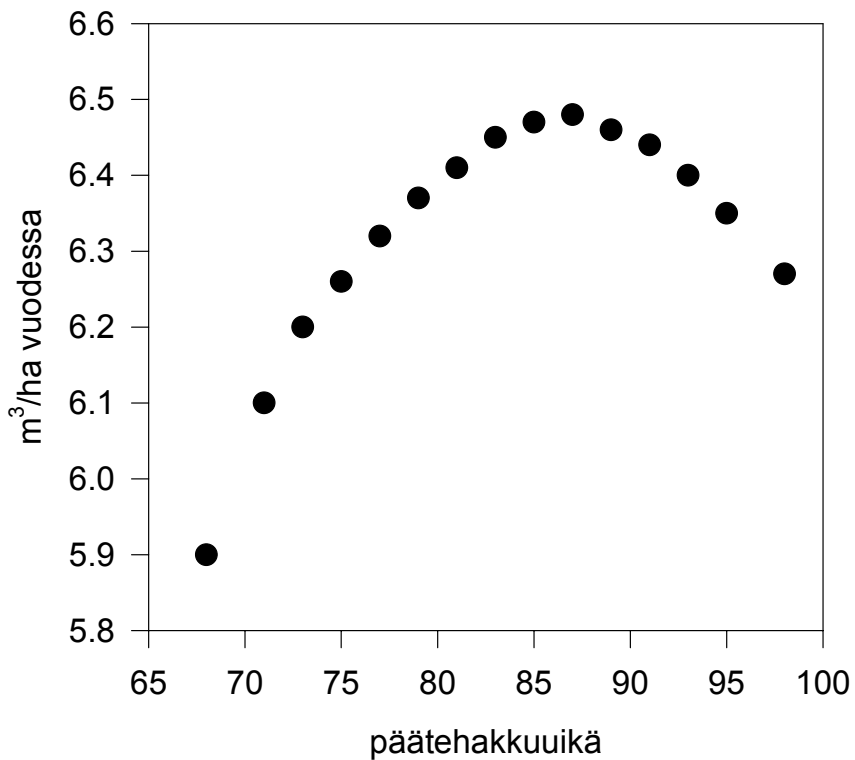
- taimimäärä 1300
- taimimäärä 1800
- ▲ taimimäärä 2300

**Kuva 9.1** Kannattavuuden ja puuntuotannon riippuvuus päätehakkuiästä  
Mänty, kasvupaikka VT, lämpösumma-alue 1300,  
taimikkotiheys 2000, korko 3%

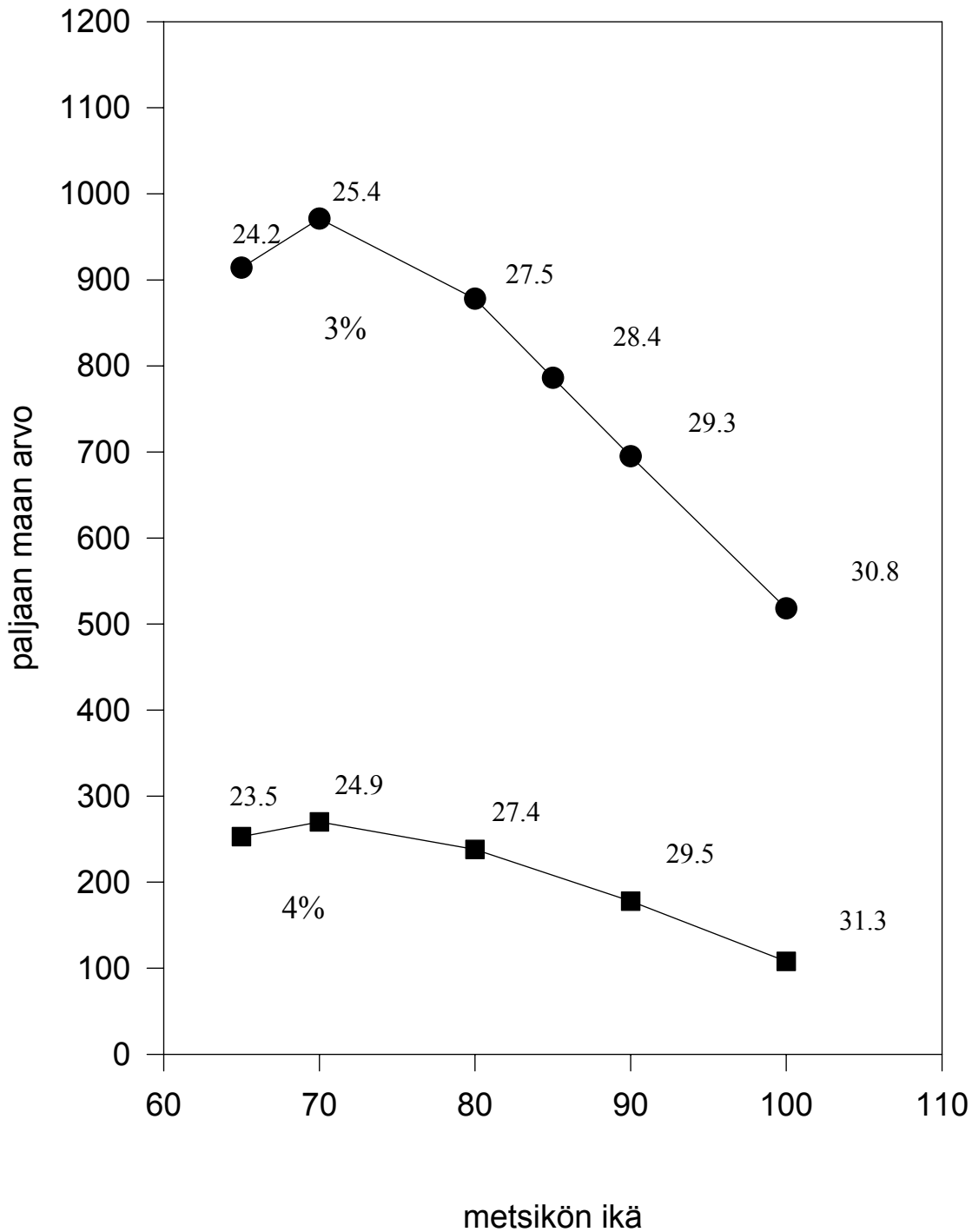
**tulojen riippuvuus päätehakkuiästä**



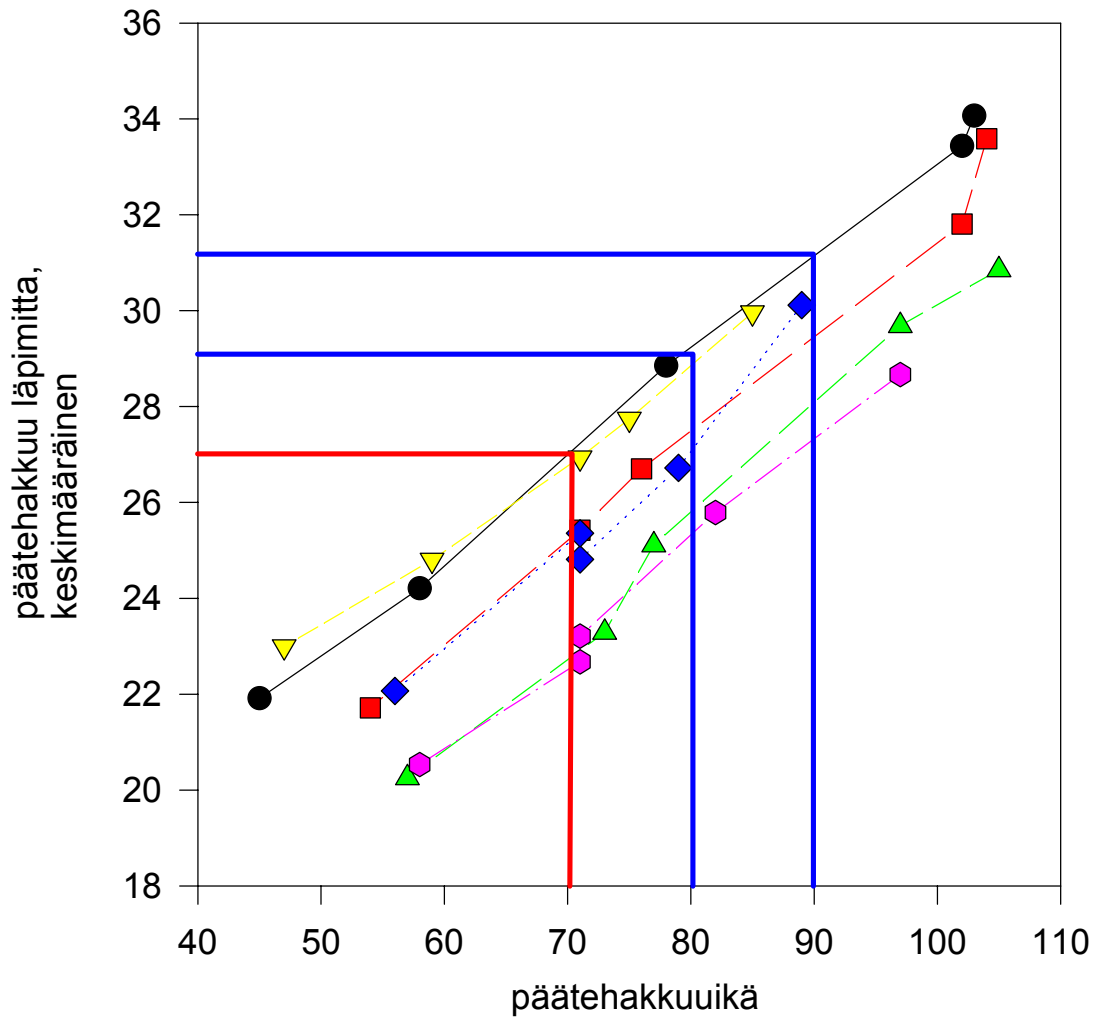
**kuutiotuotannon riippuvuus päätehakkuiästä**



Kuvio 9.2. Kiertoajan pidentämisen vaikutus paljaan maan arvoon  
Mänty, VT, lämpösumma-alue 1300, tukki-kuitu hinnoittelu,  
korko 3% tai 4%  
Numeroarvot: puuston keskiläpimitta päätehakkuussa



**Kuva 11.1** Vertailua ministeriöasetukseen ja aikaisempiin suosituksiin  
Mänty, MT  
Lämpösomma-alue 1300



Ministeriön asetus 70v/27cm

Aikaisemmat suositukset: 80-90v/29-31cm

Tutkimustulokset:

1-2% 80-110v/26-34cm

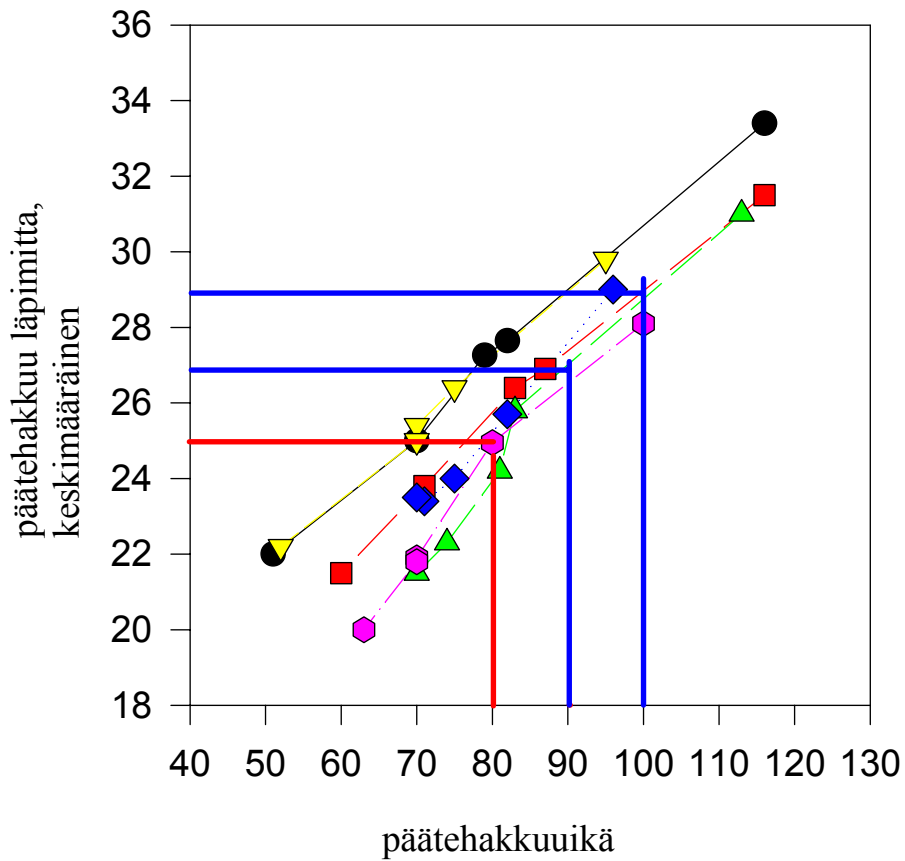
3% 70-80v /23-29cm

4-5% 45-70v/20-27cm

## Kuva 11.2 Vertailua suositukseen ja ministeriöasetuksiin

Mänty, VT

Lämpösumma-alue 1300



Ministeriöasetus 80v/25cm

Aikaisemmat suositukset: 90-100v, 27-29cm

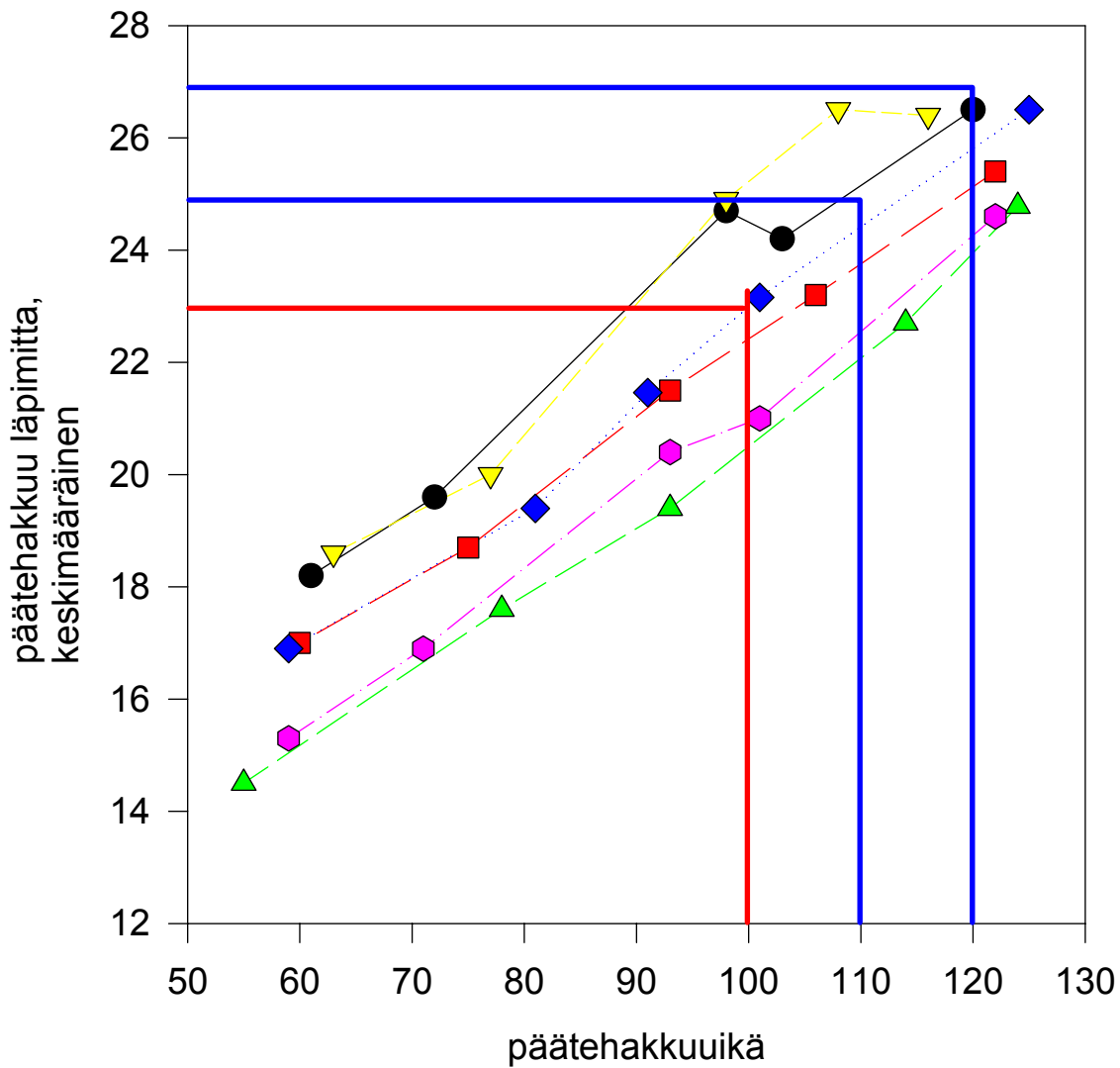
Tutkimustulokset:

korko 1%: 90-120v, 28-34cm

korko 2-3%: 70-90v, 25-28cm

korko 4-5%: 50-70v, 20-25cm

**Kuva 11.3** Vertailua ministeriöasetuksiin ja aikaisempaan suositukseen  
Mänty  
Kasvupaikka CT,  
lämpösumma-alue 1300



Ministeriöasetus: 100v/23cm

Aikaisemmat suositukset: 110-120v/25-27cm

Tutkimustulokset:

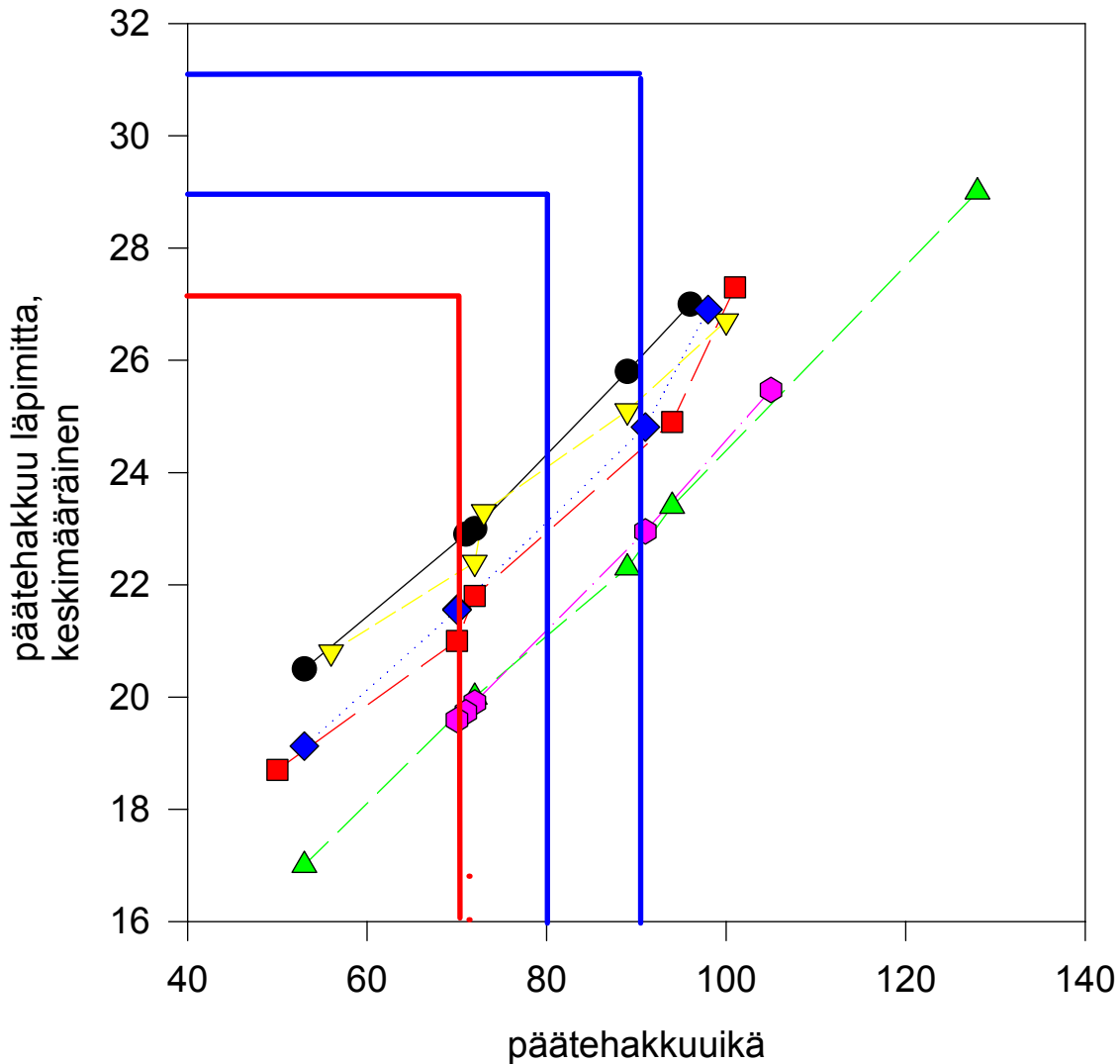
Korko 1%: 120-130v/25-27cm

2-3%: 90-110 /19-25cm

4-5%: 55-80 /14-20cm

**Kuva 11.4** Vertailua ministeriöasetukseen ja aikaisempiin suosituksiin

**Mänty,  
MT,  
lämpösomma 1100**



**Ministeriöasetus: 70/27**

**Aikaisemmat suositukset: 80-90v/29-31 cm**

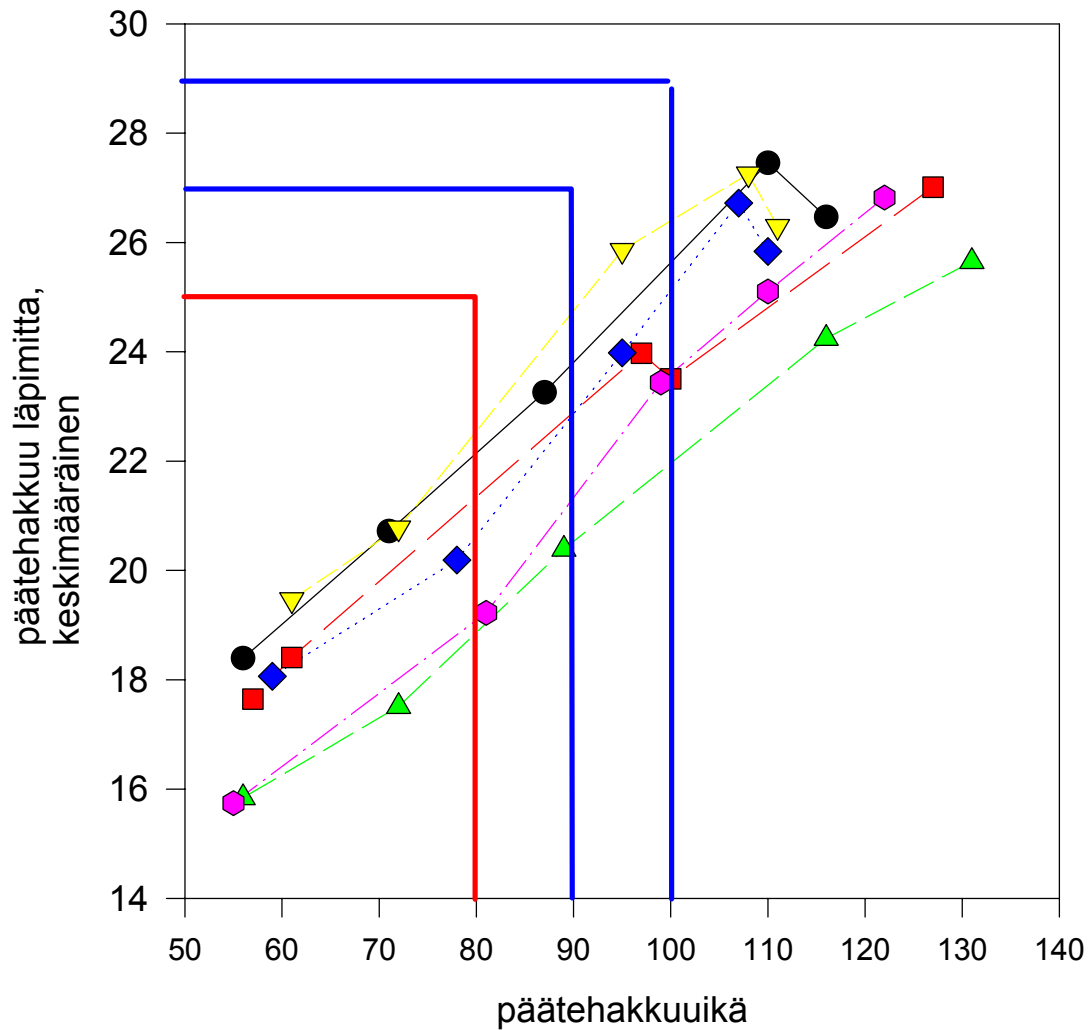
Tutkimustulokset:

korko 1-2%: läpimitta 23-29, ikä 90-130v

korko 3%: läpimitta 20-23 ikä 70-90v

korko 4-5%: läpimitta 17-23, ikä 55-70v

**Kuva 11.5** Vertailua ministeriön asetukseen ja aikaisempiin suosituksiin  
Mänty  
Kasvupaikka: VT  
Lämpösomma-alue 1100



Ministeriön asetus: 80v/25cm

Suosituksset: 90-100v/27-29cm

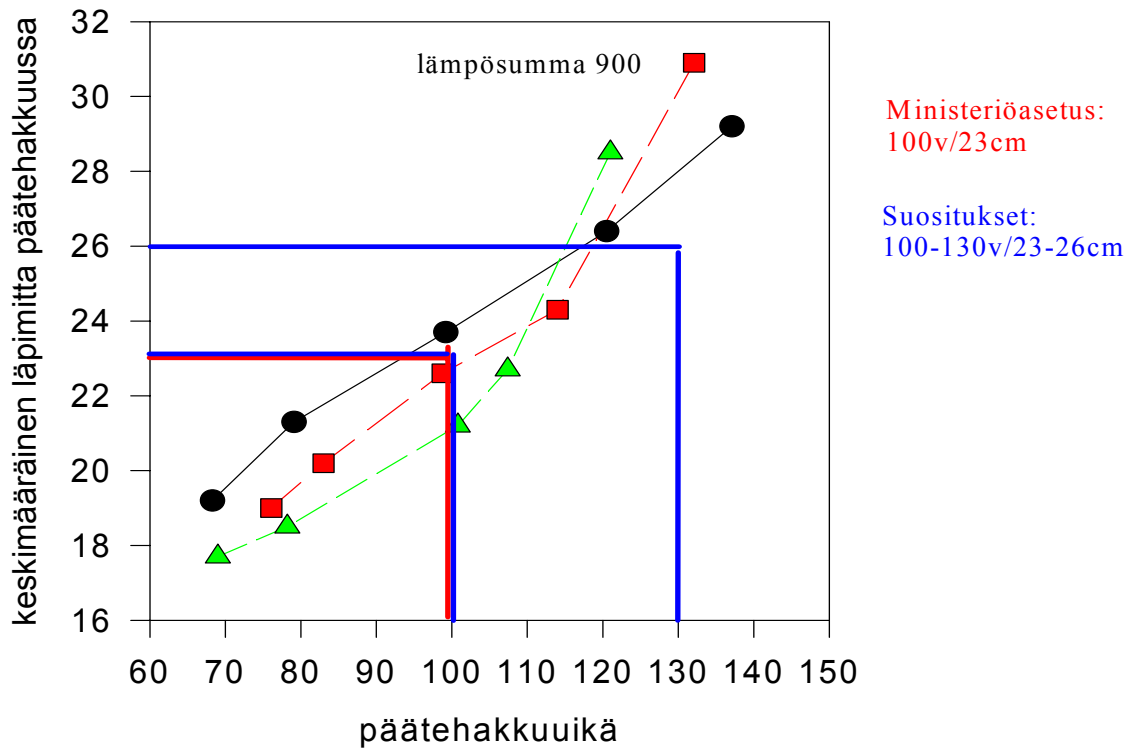
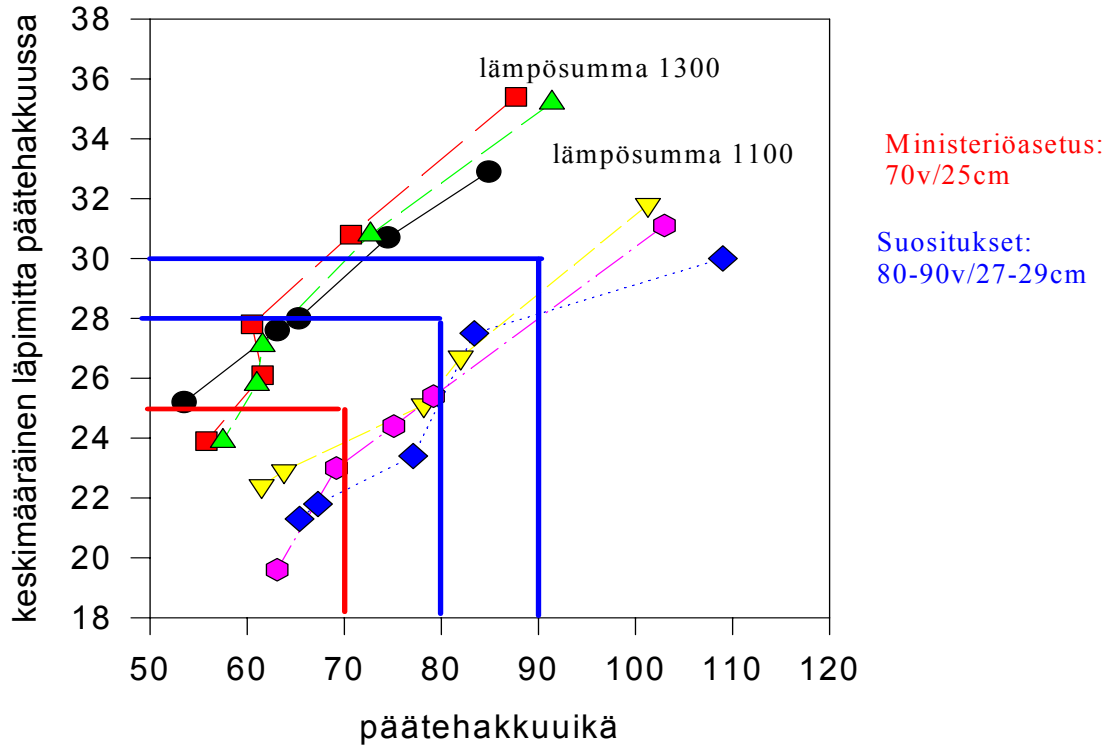
Tutkimustulokset:

korko 1-2%: 100-130v/24-28cm

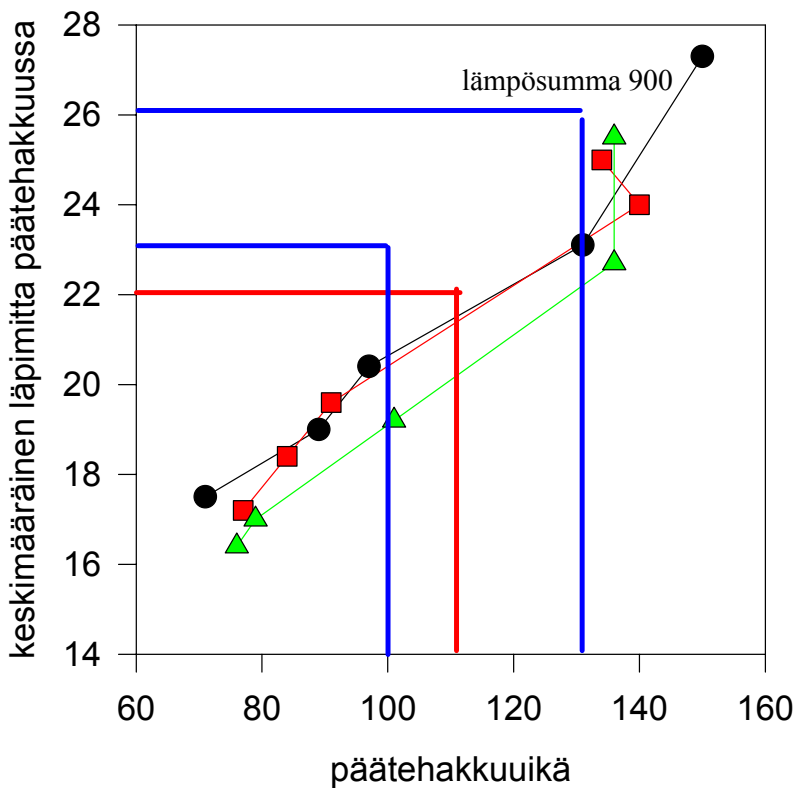
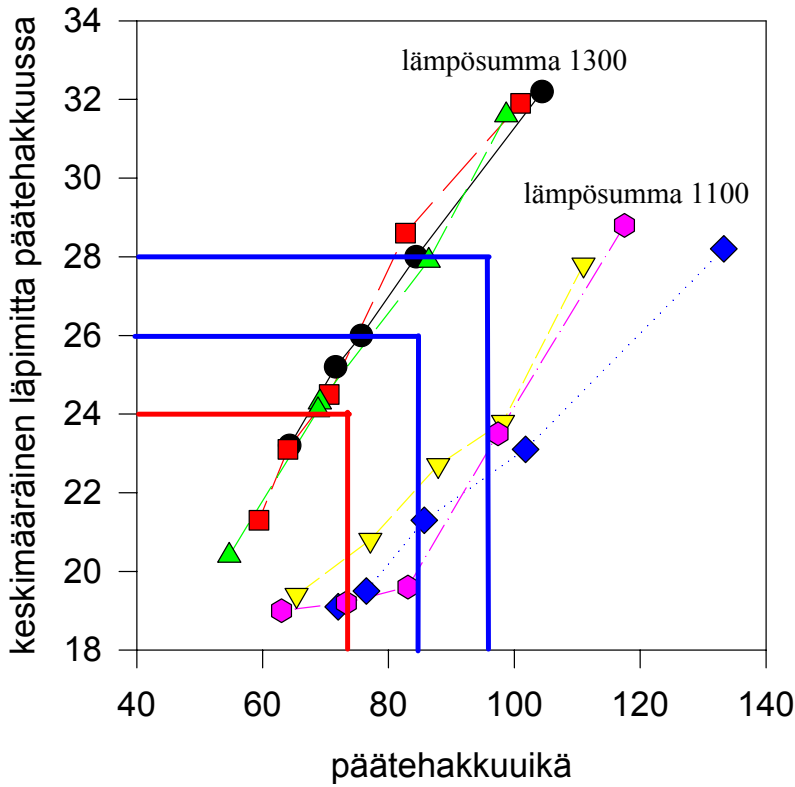
3%: 85-100v/20-26cm

4-5%: 55-80v/16-21cm

Kuva 11.6 Vertailua ministeriön asetukseen ja aikaisempaan suositukseen  
 Kuusi OMT  
 Lämpösomma-alueet 1300 ja 1100  
 Taimimäärät: 1300, 1800, 2300



**Kuva 11.7** Vertailua ministeriöasetuksiin ja aikaisempaan suositukseen  
 Kuusi, MT  
 Lämpösomma-alueet 1300, 1100 ja 900  
 Taimimäärät: 1300, 1800 ja 2300



## Taulukot

Taulukko 2.1

### Osakkeiden tuottoja 1936-2004

#### Keskimääräiset vuosituotot (%)

<u>Indeksi</u>	<u>Tyyppi</u>	<u>Ajanjakso</u>	<u>Nimellinen tuotto</u>		<u>Reaalinen tuotto</u>	
			<i>Keskiarvo</i>	<i>Keskihaj.</i>	<i>Keskiarvo</i>	<i>Keskihaj.</i>
<b>UNITAS-HEX</b>	<i>Yleisindeksi</i>	<i>1936-2004</i>	8.2	23.5	-0.1	26.7
	<i>Yleisindeksi</i>	<i>1976-2004</i>	11.0	30.5	6.0	31.4
	<i>Metsäteoll.</i>	<i>1977-2004</i>	9.5	22.8	4.8	23.8
	<i>Metsäteoll.</i>	<i>1985-2004</i>	10.6	24.0	7.8	24.3
<b>UNITAS-HEX +</b>	<i>Yleisindeksi</i>	<i>1976-2004</i>	14.6	29.9	9.6	30.7
<b>Osingot</b>	<i>Metsäteoll.</i>	<i>1985-2004</i>	12.9	23.6	10.2	23.9
<b>Inflaatio</b>	<i>EKI26 + EKI51</i>	<i>1936-2004</i>	8.3			
		<i>1976-2004</i>	5.0			
		<i>1977-2004</i>	4.7			
		<i>1985-2004</i>	2.7			

*Huom.* 1) Kaikki tuotot ovat ns. log-tuottoja eli muotoa  $100\% * [\ln(P_t) - \ln(P_{t-1})]$ .

2) Osingot on huomioitu efektiivisten osinkotuottojen (%) vuosikeskiarvon kautta.

3) Osa indeksien vuosiarvoista on laskettu keskiarvoina kuukausihavainnoista.

4) Kunkin vuoden reaalinen tuotto on saatu vähentämällä nimellisestä tuotosta inflaatio- prosentti.

5) Käytetty osakeindeksi on vuosien 1935-1989 osalta UNITAS-indeksi ja vuosien osalta 1990-2004 HEX-indeksi.

6) Metsäteollisuusosakkeiden kokonaistuottolaskelmissa on käytetty teollisuusosakkeiden osinkotuottosarjaa.

Taulukko 4.1 Tienvarsihinnat männylle

<b>LAATUHINNOITTELU</b>	
Laatutyvi	69.03 €/m <sup>3</sup>
Tavallinen tyvitukki	51.13 €/m <sup>3</sup>
Heikompi tukkilaatu	38.35 €/m <sup>3</sup>
Kuitu	24.09 €/m <sup>3</sup>
Energiapuu	15.00 €/m <sup>3</sup>

<b>PERINTEINEN HINNOITTELU</b>	
Tukki	51.13 €/m <sup>3</sup>
Kuitu	24.09 €/m <sup>3</sup>

Taulukko 7.1 Pitkän aikavälin puuntarjonta (m<sup>3</sup>/ha/vuosi) kuusikoissa optimiratkaisujen mukaan

<b>kasvupaikka</b>	<b>lämpösumma</b>	<b>lähtörunkoluku</b>	<b>r=1%</b>	<b>r=2%</b>	<b>r=3%</b>	<b>r=4%</b>	<b>r=5%</b>
Lehtomainen kangas	1300	1300	10.5	10.1	9.4	9.2	8.5
Lehtomainen kangas	1300	1800	11.1	10.7	10.1	9.8	9.4
Lehtomainen kangas	1300	2300	11.3	11.0	10.4	10.2	9.8
Lehtomainen kangas	1100	1300	6.5	6.2	6.0	5.5	5.4
Lehtomainen kangas	1100	1800	7.0	6.8	6.5	6.2	6.0
Lehtomainen kangas	1100	2300	7.2	7.1	6.7	6.5	6.1
Lehtomainen kangas	900	1300	4.1	3.8	3.6	3.4	3.0
Lehtomainen kangas	900	1800	4.3	4.1	4.0	3.7	3.5
Lehtomainen kangas	900	2300	4.5	4.3	4.2	4.0	3.8
Tuore kangas	1300	1300	7.7	7.3	6.9	6.6	6.2
Tuore kangas	1300	1800	8.2	7.9	7.5	7.2	6.7
Tuore kangas	1300	2300	8.3	8.0	7.6	7.5	6.8
Tuore kangas	1100	1300	4.6	4.3	4.0	3.7	3.5
Tuore kangas	1100	1800	4.8	4.6	4.4	4.3	4.0
Tuore kangas	1100	2300	5.1	4.9	4.5	4.5	4.4
Tuore kangas	900	1300	2.8	2.7	2.4	2.3	2.0
Tuore kangas	900	1800	3.1	3.0	2.8	2.7	2.5
Tuore kangas	900	2300	3.1	3.0	2.9	2.7	2.7

**Taulukko 8.1.** Paljaan maan arvoja männylle

**Tuore kangas, lämpösomma 1300**

korko	Laatuhinnoittelu			Perinteinen hinnoittelu		
	1500	2000	3000	1500	2000	3000
0.01	11730	12186	12387	12607	12639	12032
0.02	3275	3363	3491	3929	3907	3592
0.03	1207	1257	1240	1536	1547	1350
0.04	412	436	428	589	585	487
0.05	69	79	60	157	154	89

**Kuivahko kangas, lämpösomma 1300**

korko	Laatuhinnoittelu			Perinteinen hinnoittelu		
	1500	2000	3000	1500	2000	3000
0.01	8626	8819	9079	9563	9426	8920
0.02	2250	2297	2237	2765	2737	2469
0.03	705	730	720	971	950	812
0.04	130	146	135	270	268	191
0.05	-90	-91	-105	-30	-37	-77

**Kuiva kangas, lämpösomma 1300**

korko	Laatuhinnoittelu			Perinteinen hinnoittelu		
	1500	2000	3000	1500	2000	3000
0.01	2918	3022	2907	3323	3266	2851
0.02	555	564	539	696	669	512
0.03	5	2	-25	63	49	-28
0.04	-159	-162	-179	-139	-145	-180
0.05	-211	-212	-222	-202	-204	-222

**Tuore kangas, lämpösomma 1100**

korko	Laatuhinnoittelu			Perinteinen hinnoittelu		
	1500	2000	3000	1500	2000	3000
0.01	5982	6048	6308	6684	6643	6538
0.02	1457	1512	1536	1759	1738	1641
0.03	343	347	349	498	482	414
0.04	-49	-41	-59	24	19	-15
0.05	-192	-195	-216	-160	-168	-194

**Kuivahko kangas, lämpösomma 1100**

korko	Laatuhinnoittelu			Perinteinen hinnoittelu		
	1500	2000	3000	1500	2000	3000
0.01	3450	3464	3511	3995	3925	3733
0.02	582	576	581	820	798	701
0.03	-54	-49	-76	47	43	-10
0.04	-241	-242	-264	-202	-207	-236
0.05	-308	-306	-321	-292	-292	-312

**Taulukko 8.2 Paljaan maan arvoja kuuselle**

kasvup.	lämpös.	lähtörl.	r=1%	r=2%	r=3%	r=4%	r=5%
OMT	1300	1300	20769	6642	2728	1109	279
OMT	1300	1800	21765	6938	2927	1291	436
OMT	1300	2300	21617	6992	2976	1321	458
OMT	1100	1300	10821	2907	834	0	-361
OMT	1100	1800	11576	3152	991	118	-290
OMT	1100	2300	11227	3044	909	59	-302
OMT	900	1300	2861	125	-485	-682	-758
OMT	900	1800	2807	197	-444	-657	-745
OMT	900	2300	2801	122	-468	-678	-758
MT	1300	1300	13442	3825	1268	248	-223
MT	1300	1800	14053	4038	1400	346	-159
MT	1300	2300	13907	4033	1349	300	-205
MT	1100	1300	6015	1197	-48	-451	-627
MT	1100	1800	6394	1308	45	-406	-599
MT	1100	2300	6368	1243	-7	-445	-610
MT	900	1300	1017	-470	-740	-813	-826
MT	900	1800	1059	-428	-722	-803	-825
MT	900	2300	1028	-428	-720	-803	-823

**Taulukko 9.1.** Käsittelyohjelman vaikutus paljaan maan arvo

korkokanta	maksimoitu paljaan maan arvo, €/ha	paljaan maan arvo (€/ha), jos sovelletaan 1% korolla saatua ratkaisua
1 %	8819	8819
2 %	2297	2153
3 %	730	521
4 %	146	-17
5 %	-92	-213

## Taulukko 10.1 Tutkimustuloksia kiertoaajoista, korko 3%

tutkimus		mänty, MT ikä/läpimitta	mänty, VT ikä/läpimitta	mänty, CT ikä/läpimitta	kuusi, OMT ikä/läpimitta	kuusi, MT ikä/läpimitta
Nyysönen 1958		70/	80/	120/	70/	85/
Pesonen ja Hirvelä 1992		65-75/	70-80/	90-100/	75-80/	80-90/
Salminen 1993		55-65/	65-70/		70/	80/
Valsta 1992					77/23	
Vettenranta		65-85				65-85/
Pukkala ym. 1998		74/				74/
Vettenranta ja Miina		70-78				70-78/
Hyytiäinen ja Tahvonen 2001		70/24	70/22	90/19	75/30	80/29
Hyytiäinen ym. 2004a			62-106/22-27			
Hyytiäinen ym. 2004b			77/26			
Pukkala 2005			62/18			
Makkonen 2005		<=65/24-26				70/23
<b>tämä tutkimus</b>						
lämpösumma-	1300	<b>71-78/23-28</b>	<b>70-83/22-27</b>	<b>91-98/19-25</b>	<b>61-65/27-28</b>	<b>69-76/24-26</b>
alue	1100	<b>70-89/20-23</b>	<b>87-99/20-26</b>		<b>75-78/23-25</b>	<b>83-88/20-23</b>
	900				<b>98-100/21-24</b>	<b>90-100/19-20</b>