



ITÄ-SUOMEN
YLIOPISTO

University of Eastern Finland

*Luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta
Faculty of Science and Forestry*

ESTEVARAPINNAN ALAPUOLISEN METSIKÖN
KÄSITTELYOHJELMAN OPTIMOINTI

Pekka Tiainen

METSÄTIETEEN PRO GRADU,
ERIKOISTUMISALA METSÄNARVIOINTI JA METSÄSUUNNITTELU

JOENSUU 2014

Tiainen, Pekka. 2014. Estevarapinnan alapuolisen metsikön käsittelyohjelman optimointi. Itä-Suomen yliopisto, Luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta, metsätieteiden osasto, metsätieteen pro gradu, erikoistumisala metsänarviointi ja metsäsuunnittelu. 52 s.

TIIVISTELMÄ

Lentokenttien ympäristössä kasvavalle puustolle asetetaan rajoituksia. Puusto ei saa ylittää lentokentän läheisyydessä tiettyjä estevarakorkeuksia. Pituusrajoitettuja puustoja on lentokenttien ympäristössä arviolta noin 654 411 hehtaaria. Metsiköt voidaan jakaa pituusrajoitteen mukaan tavanomaisiin metsiköihin, joita voidaan käsitellä ilman pituusrajoitetta ja sektori-metsiköihin, joita voidaan käsitellä vain pituusrajoitteen asettamin ehdoin.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia optimaalista metsänkäsittelyä estevarapintojen alapuolella pituusrajoitetuissa metsiköissä. Tutkimuksen tavoitteena oli laatia metsänkäsittelyohjeet sektorimetsiköille. Tutkimuksen pohja-aineistona käytettiin 30 tasaikäistä havupuumetsikköä kolmelta eri kasvuvyöhykkeeltä. Metsiköt edustivat mänty- ja kuusimetsiköitä tyyppillisiltä kasvupaikoiltaan. Metsiköiden optimaaliset käsittelyohjelmat haettiin Ostand-ohjelmalla. Optimointitekniikkana käytettiin epälineaarista ohjelmointia. Päätösmuuttujien optimiarvot haettiin Hooken ja Jeevesin optimointialgoritmeilla. Ostand-sovellus sisälsi puiden kasvumallit, metsikkösimulaattorin ja optimointialgoritmin. Metsikön käsittelyohjelman optimoinnissa määriteltiin kullekin metsikölle kiertoajat, harvennuksen ajankohdat ja voimakkuudet niin, että päätöksentekijän tavoitefunktio maksimoitui. Funktioksi valittiin tuottoarvo. Tavoitefunktion rajoite toteutettiin sakkofunktion avulla. Optimoinnit tehtiin erilaisin pituusrajoittein sekä ilman rajoitteita. Tutkimuksessa tutkittiin pituusrajoitteen vaikutusta tuottoarvoon, vuotuisen keskikasvuun ja vuotuisen nettotuloon. Lisäksi tutkittiin korkokannan muutoksen vaikutusta edellä mainittuihin mittareihin.

Tutkimuksen mukaan havumetsikön keinollinen uudistaminen ja hoitotoimenpiteet ovat kannattavia ankaran pituusrajoitteen alapuolisissa metsiköissä ainoastaan pienillä koroilla. Metsänhoidon kannattavuus pienenee koron suurenessa. Keinollisesti viljellyt ravinteikkaammat metsiköt muuttuvat taloudellisesti sitä kannattamattomiksi, mitä enemmän pituusrajoite ankaroituu ja laskelmissa käytetty korko suurenee. Kannattavuus paranee pituusrajoitteen lieventessä ja koron alentuessa. Metsiköiden tuottoarvot suurenevat eniten pituusrajoitteen lieventyessä 15 metriin ja sen yli. Vuotuiset nettotulot kasvavat havumetsiköissä eniten pituusrajoitteen lieventyessä 15 - ja 20 metriin. Hakkuiden kertymät kaksinkertaistuvat pituusrajoitteen lieventessä 15 metriin. Metsiköiden optimaaliset käsittelyt ovat sitä tavanomaisempia, mitä lievempi on pituusrajoite. Optimoitujen metsiköiden suurin harvennusten lukumäärä on kaksi. Pituusrajoitteen suuruus rajoittaa kiertoaikoja ja harvennusten lukumäärää. Metsiköiden suureneva lähtötiheys aikaistaa ensiharvennusta ja lyhentää kiertoaikaa. Korkea korko lyhentää kiertoaikaa ja aikaistaa harvennuksia. Tutkimus osoittaa, että metsiköiden kasvatus on taloudellisesti kannattavaa pituusrajoituksesta huolimatta. Metsikön käsittelyn tarkalla optimoinnilla voidaan saavuttaa positiivisia taloudellisia tuloksia myös sektorimetsissä. Tärkeää on huomioida taloudellisen tuloksen kannalta puuston arvokasvu ja tavaralajisiirtymät. Myös leimikkosuunnittelulla voidaan parantaa taloudellista tulosta. Tutkimuksen tuloksista on johdettavissa metsänkäsittelyohjeet pituusrajoitetuille metsiköille.

Avainsanat: sektorimetsikkö, tuottoarvo, metsikön optimointi, metsikön käsittelyohjeet

Tiainen, Pekka. 2014. Stand optimization in height restricted forest. University of Eastern Finland, Faculty of Science and Forestry, School of Forest Sciences, master`s thesis in forest Science specialization Forest Mensuration and Forest planning, 52 p.

ABSTRACT

There are set many restrictions for stand in airport environment. Growing stand may not exceed the obstacle clearances in airport surroundings. There are approximately 654 411 hectares height limited stands in Finland. Forests can be separated to normal forests which can be treated as it have been instructed in forest management recommendations and sector forests which growths and treatments are limited. The main objective of this study was to investigate optimal management schedules in height limited stands below sectors of obstacle clearance. The objective of this study was to create forest management guidelines for sector stands. The base material for this study was 30 even-aged conifer stands from the three sums of the thermal areas. The typical site fertilities of stands of Scots pines (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies* L.) were represented in this study. The optimal treatments of stands were sought for Ostand-programme. A nonlinear programming technique was used. Hooke and Jeeves` direct search method was used for determining optimum solutions. Ostand-application includes the growth models of trees, stand simulator and optimization algorithm. The rotation period, the timing of harvests and the volume of the harvests were determined for every stands in the optimization of the forest treatment schedules so as the main objective function was maximized. In this study the objective function was the soil expectation value (SEV). A penalty function was added to the objective function. The values of objective functions were calculated to all stands with or without height restrictions. The effects of the height restrictions of stands were examined to soil expectation values, annual growths and annual net incomes. The effects of the changes to rate of interests were also investigated.

According to this study it is economically profitable to regenerate and treat planted coniferous stands under the severest height limited stands when low rates are used. The profitability of the stand management decreases when the interest rate increases. The more fertile site or the bigger the rate of interest will increase the least profitable will be the planted stand. The soil expectations values will increase the most when height restrictions are mitigated to 15 meters or more. Mean annual incomes will rise in conifer stands when height restrictions are mitigated to 15- or 20 meters. The cutting quantities are doubled when the height constraint is mitigated 15 meters or more. The less restrictive are the height restrictions the more normal are the optimal schedules of stands. The number of thinning is in maximum two in optimal solutions. Height restriction will limit the length of the stands rotation and the number of thinning. The more density the forest stands the sooner shall precommercial thinning be executed. The density of the stand also will shorten the stand rotation period. Optimum rotation is strongly dependent on the interest rate. The higher the rate of interest the shorter will be the rotation and the more sooner stands shall be thinned. The general conclusion that can be drawn from the results of this study is that it is profitable to grow stands despite the height restrictions. It is essential to take care of the value growth of individual trees due to transitions of timber assortments to pulpwood and saw timber. It may also be important that stands marked for harvesting in height restricted areas can be integrate to neighboring stands for profitable economic of forestry. The results of this study shows that silvicultural recommendations can be found to height restricted stands below sectors of obstacle clearance.

Keywords: sector stand, soil expectation value, stands optimization, stand management

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	5
2 TUTKIMUKSEN AINEISTO JA MENETELMÄT	13
2.1 Metsikön taloudellisesti tehokas kiertoaika ja tuottoarvo	13
2.2 Metsikkötalouden suunnittelumenetelmät ja menetelmien luotettavuus.....	15
2.3 Tutkimuksen aineisto	17
2.4 Puutavaralajien yksikköhinnat ja latvaläpimitat	18
2.3 Käytetyt menetelmät.....	19
3 TULOKSET.....	20
3.1 Pituusrajoitteen vaikutus metsikön tuottoarvoon	20
3.2 Pituusrajoitteen vaikutus metsikön vuosittaiseen nettotuloon.....	24
3.3 Pituusrajoitteen vaikutus metsikön vuotuisen keskikasvuun	26
3.4 Optimikäsittelyt pituuskasvurajoitetuista metsiköissä	28
3.5 Korkokannan vaikutus kiertoaikaan, vuotuisen keskikasvuun ja -nettotuloon.....	34
3.6 Korkokannan vaikutus tuottoarvoon	37
4 TULOSTEN TARKASTELU	41
4.1 Pituusrajoitteen vaikutus metsikön tuottoarvoon, keskikasvuun ja nettotuloon.....	41
4.2 Pituuskasvurajoitettujen metsiköiden optimikäsittely.....	43
4.3 Korkokannan vaikutus kiertoaikaan, vuotuisen keskikasvuun ja -nettotuloon.....	44
4.4 Korkokannan vaikutus metsikön tuottoarvoon	45
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	46
KIRJALLISUUS.....	49

1 JOHDANTO

Suomessa on 83 eritasoista lentokenttää. Lentokentän taso luokitellaan niitä käyttävien ilmalusten kokojen ja vuosittaisten lento-operaatioiden lukumäärien mukaan. Suurimmat lentokentät ovat valtion liikelaitoksen (Finavia Oyj) omistuksessa ja hoidossa. Muita kentän pitäjiä ovat mm. kunnat, säätiöt ja yhdistykset. Lentokentän läheisyydellä on vaikutusta kentän ympäristön toimintaan, kuten maankäyttöön, rakentamistoimintaan ja luonnonvarojen hyväksikäyttöön (metsävarat). Metsätilojen koko ja maanomistajuus vaihtelevat kenttä-alueiden ympäristössä samassa suhteessa kuin valtakunnallisesti. Metsäomaisuuden määrä vaihtelee omistajakohtaisesti muutamasta hehtaarista satoihin hehtaareihin. Omistajina ovat mm. yksityismetsänomistajat, valtio, kunnat, yritykset ja yhteisöt (taulukko 1).

Metsän käyttömuodot ja tehtävät vaihtelevat omistajakohtaisesti. Metsät voidaan jaotella mm. ekologisten, suojavaikutusten, kulttuurillisten ja uskonnollisten, sosiaalisten ja taloudellisten käyttömuotojen ja tehtävien mukaan (Pukkala 2007). Metsänomistajat jakaantuvat erilaisiin ryhmiin metsänomistuksen tavoitteiden mukaan. Virkistyskäyttäjät arvostavat metsästä saattavia aineettomia näkökohtia. Metsästä elävät metsänomistajat arvostavat metsästä saatavia säännöllisiä työtuloja ja työtilaisuuksia. Taloudellinen turva ja kannattava sijoituskohte ovat tärkeitä näkökohtia taloudellista turvaa arvostavalle metsänomistajalle. Metsäomistus voi olla myös monitavoitteista, jolloin metsänomistaja yhdistää kaikkia edellä mainittuja tavoitteita (Ripatti 1997).

Metsäomistajan tulee omien metsän käyttötavoitteiden lisäksi olla tietoisesta lainsäädännöstä, jossa säännellään metsän käyttöä. Säännökset ovat pakottavia, kuten metsälaki, luonnonsuojelulaki, ympäristönsuojelulaki ja maankäyttö- ja rakennuslaki (kaavamääräykset). Metsän käytön sääntely voi tapahtua myös vähemmän pakottavasti, kuten ohjeilla ja suosituksilla (Hyvän metsähoidon suositukset). Metsän käytölle lentokenttämetsäympäristön läheisyydessä aiheuttavat rajoituksia edellä mainittujen säädösten lisäksi Ilmailulain - ja -asetuksen määräykset, jotka säätelevät mm. lentokenttäalueiden ympäristön hoitoa ja lentokenttien ympäristön maanpinnan yläpuolisen ilmatilan estevapautta. Lentokenttien lähiympäristössä on pituuskasvurajoitettua metsätalousmaata noin 654 411 hehtaaria (taulukko 2).

Lentokenttämetsäympäristön metsät voidaan jaotella kahdenlaisiin metsiin. Talousmetsät ovat metsiä, joita voidaan kasvattaa tavanomaisten metsänkäsittelyohjeiden mukaisesti kiertoajan lop-

puun. Sektorimetsät ovat metsiä, joita ei voida kasvattaa kiertoajan loppuun lopulliseen pituuteensa. Sektorimetsien kasvua rajoittavat lentoaseman kiitoteiden ympärille määritetyt esterajoituspinnat. Esterajoituspinnan tarkoitus on suojata ilma-aluksen lentoonlähtöä, näkölähestymistä, kiertolähestymistä ja mittarilähestymisen jälkeistä laskua ratkaisukorkeudesta tai minimilähestymiskorkeudesta alaspäin sekä keskeytettyä lähestymistä (kuva 1). Kiitoalueiden sivuilla olevia esterajoituspintoja nimitetään siirtymäpinnoiksi. Siirtymäpinta on kiitoalueen reunalla oleva pinta, joka nousee kaltevasti ulospäin ja ylöspäin kiitoalueen reunasta. Nousukaltevuus on 1:7. Suhteella tarkoitetaan sitä, että etäännyttäessä kiitoalueesta horisontaalisesti ulospäin, esterajoituspinnan alaraja on 7 metrin välein metrin korkeammalla. Vertailutasona käytetään kiitotien keskilinjan korkeutta. Kiitoalueiden päissä olevia esterajoituspintoja nimitetään lähestymispinnaksi ja nousupinnaksi. Näiden pintojen alapuolella suhde on 1:50. Muita esterajoituspintoja ovat kartiopinta, sisempi horisontaalipinta, sisempi lähestymispinta sekä keskeytetyn lähestymisen pinta (kuva 1, taulukko 2). Lentoaseman pitäjän on valvottava lentoasemaa ja sen ympäristöä siten, että tavoitteena on esterajoituspintojen ylitysten estäminen tai rajoittaminen (Ilmailumääräys AGA M3-6).

Esterajoituspintojen alapuolista puustoa tulee inventoida säännöllisesti. Puuston mittaus on yksittäisten puiden sijainti- ja pituusmittausta. Rajoituspintojen yli kasvanut puusto hakataan vähintään esterajapinnan korkeuteen. Nykyisen menetelmän ongelmana on, että esterajapintojen yli kasvaneen puuston pituus todetaan jälkikäteen. Näin ollen estepuuston hoitotoimenpiteet tapahtuvat myös jälkikäteen. Hoitotoimenpiteenä käytetään rajoituspinnan ylittävän puuston aukkohakkaamista tai yksittäisten puiden poistoa. Hakkuualaa ei välttämättä uudisteta, vaan aukon annetaan heinittyä ja taimikoitua luonnollisesti. Kyseiset käsittelymenetelmät eivät ole optimaalisia taloudelliselta näkökannalta. Metsänomistaja ei voi täysin kontrolloida haluamaansa puun myyntiajankohtaa. Hakkuut voidaan myös toteuttaa liian suurella alueella ja liian voimakkain menetelmin. Lisäksi hakkuualueiden uudistamatta jättäminen aiheuttaa tulevaisuudessa metsämaaresurssin vajaatuottoisuutta, pusikoitumista ja riistaongelmia. Hakatut alueet tulee pitää vapaana tietyn korkuisista esteistä myös tulevaisuudessa. Alueita raivataan myöhemmin pioneerikasvillisuudesta vapaaksi metsuri- ja konetyövoimin, joten raivaustyön tarve ei alueella vähene. Metsänhoidon kustannukset nousevat ja tulevaisuudessa saata- vat metsätulot vähenevät.

Omien maa-alueiden lisäksi lentokentän pitäjällä on oikeus rajoittaa ulkopuolisten maanomistajien metsän kasvatusta ja tarpeen tullen hakkuuttaa lentokenttien ympäristössä olevien ulkopuolisten metsätilojen puustoa. Näin lentokentän pitäjällä on myös osaltaan vaikutusta mui-

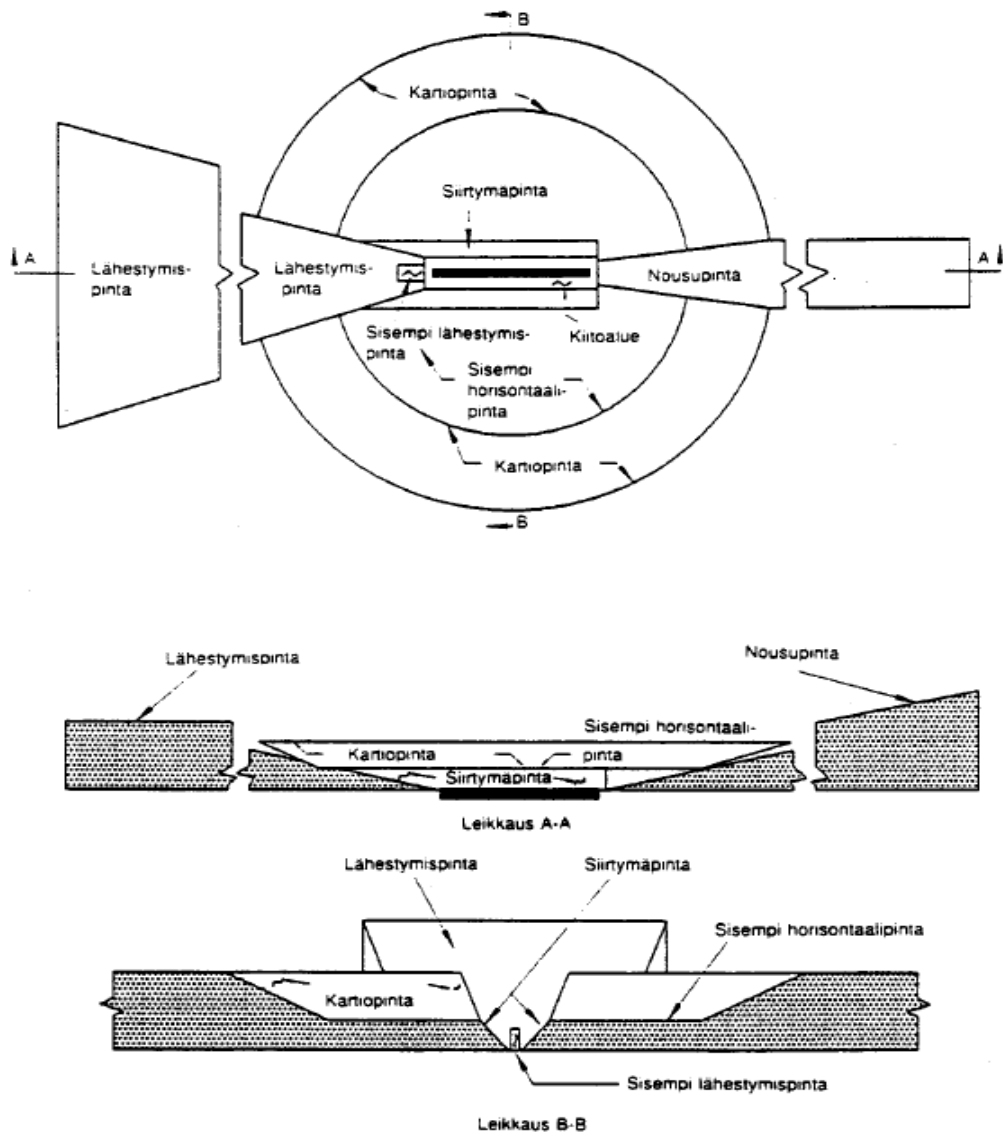
den kuin omien tilojen metsien hoitoon ja -käyttöön. Vaikutukset voivat olla taloudellisia, sosiaalisia tai ekologisia.

Taulukko 1. Arvio metsätalousmaan jakautumisesta omistajaryhmittäin esterajoituspintojen alapuolella. Arvio perustuu Valtakunnan metsien inventointitietoon (VMI 11).

Omistajaryhmä	Kokonaispinta-ala, ha
Yksityismetsänomistajat	340 294
Valtio	229 044
Yhtiöt	52 353
Kunnat, seurakunnat ja yhteisöt	32 720
Yhteensä	654 411

Taulukko 2. Arvio esterajoituspintojen vaikutusalueiden alapuolisesta metsätalousmaasta. Arvio perustuu Valtakunnan metsien inventointitietoon (VMI 11).

Esterajoituspinta	Kokonaispinta-ala, ha
Kartiopinta	143 302
Sisempi horisontaalipinta	241 667
Lähestymispinta	382 137
Yhteensä (kokonaispinta-alasta vähennetty lentokenttäalueiden kiitoalueet)	654 411



Kuva 1. Esterajoituspinnat suojaavat lähestyvää tai lentoon lähtevää ilma-alusta lentokentän ympäristössä. Lähde: Ilmailumääräys AGA M3-6.

Metsikkötason optimoinnin tutkimusta on tehty 1960-luvulta lähtien. Optimointitutkimukset ovat jakaantuneet kansainvälisesti metsikön tasaikäisrakenteen tai metsikön eri-ikäisrakenteen tutkimuksiin (Valsta 1993). Metsikkötason hakkuuohjelman optimointia on tehty Suomessa metsikkö- tai metsälötason optimointina (Valsta 1993). Optimoinnit perustuivat aluksi dynaamisen ohjelmoinnin sovelluksiin, joilla optimoitiin metsiköiden harvennuksia, puustopääomatasoa ja kiertoaikaa. Optimoitavan metsikön kuvaus tapahtui joukkona erillisiä puuston tiloja. Kasvun ja harvennusten vaikutus ilmaistiin todennäköisyyksinä siirtymämatriiseissa. Tilamuuttujina käytettiin myöhemmin puuston hehtaarikohtaista tilavuutta, puuston tilavuutta

ja keskiläpimittaa sekä metsikön ikää, puuston tilavuutta ja keskirungon kokoa. Dynaamista ohjelmointia sovellettiin 1970-luvun lopulta lähtien tasaikäisten metsiköiden käsittelyjen optimointeihin. Kasvumalleina olivat mm. metsikön kasvumalli ilman läpimittajakaumaa, metsikön kasvumalli läpimittajakauman kanssa ja puun kasvumalli ilman sijaintitietoa. Tutkimuksissa optimoitiin mm. kiertoaikaa, puustopääomaa, metsikön istutustiheyttä ja taimikon harvennusta (Valsta 1986, 1992). Dynaamisen ohjelmoinnin ohella optimointisovellukset ovat perustuneet myös mm. optimiohjausteoriaan ja epälineaariseen ohjelmointiin. Epälineaariseen ohjelmointiin perustuvia metsikkötutkimuksia on tehty 1970-luvulta lähtien. Tutkimuksissa on optimoitu mm. eri-ikäisrakenteisen metsikön harvennuksia käyttäen siirtymämatriisikasvumalleja. Tasaikäisrakenteista metsikköä on optimoitu mm. käyttäen puumalleja (Valsta 1992).

Aiempien vuosien harvennustutkimuksista voidaan mainita mm. Hynysen ja Kukkolan (1989) tutkimus, jossa tutkittiin harvennustavan vaikutusta männikön ja kuusikon kasvuun. Vertailtavina harvennustapoina olivat ala-, ylä- ja määrämittaharsintaharvennus. Tutkimuksen mukaan yläharvennus ja määrämittaharvennus johtivat alaharvennusta suurempaan kasvuun metsikön suurissa läpimittaluokissa. Suurimmat kasvamaan jätetyistä puista käyttivät parhaiten hyväkseen vapautuneen kasvutilan. Pohjapinta-alan ja tilavuuden absoluuttinen kasvu olivat suurempia eritoten männiköissä ylä- ja rajoitetusti määrämittaharvennetussa puustossa verrattuna alaharvennukseen. Kuusikossa paras harvennustapa oli alaharvennus. Harvennustapa ei vaikuttanut kuusikossa tilavuuskasvuun samalla tavalla kuin männikössä vaan harvennuksen voimakkuudella oli suurempi vaikutus kuusikon kasvuun kuin harvennustavalla.

Valstan (1992) optimointitutkimuksessa optimoitiin eteläsuomalaisen kuusikon harvennusten ajoitusta, harvennusvoimakkuutta ja -tapaa, kiertoaikaa ja metsikön perustamistiheyttä. Malleina käytettiin puittaisia läpimitan ja pituuden kasvu- ja kuolemismalleja. Optimiratkaisujen määrittämisessä käytettiin Hooken ja Jeevesin suorahakualgoritmia. Tutkimuksessa laadittiin metsikön käsittelyn optimointimalli eteläsuomalaiselle lehtomaisen kankaan kuusikolle. Ensiharvennus kannatti toteuttaa alaharvennuksena noin 10 vuotta myöhemmin kuin Tapion suosituksissa. Myöhemmät harvennukset kannatti toteuttaa yläharvennuksina. Optimiharvennusten lukumäärä vaihteli 2-4 harvennuksen välillä riippuen lähtömetsikön alkutiheydestä. Korkokannan nosto lyhensi kiertoaikaa ja aikaisti harvennusten ajankohtaa. Harvennukset toteutettiin voimakkaampina kuin pienellä korkokannalla.

Hynysen ja Arolan (1999) harvennustutkimuksessa tutkittiin ensiharvennusajankohdan vaikutusta männikön kehitykseen ja harvennuksen kannattavuuteen. Tutkimuksen mukaan ensiharvennuksen viivästäminen paransi harvennuksen kannattavuutta huomattavasti. Puunmyyntitulot kaksinkertaistuivat ja korjuukustannukset alenivat lähes 50 prosenttia puukuutiometriä kohti. Tutkimuksen mukaan ajallaan tehty taimikonhoito mahdollisti ensiharvennusajankohdan viivästäminen 10–15 vuodella puuston kasvuedellytyksiä heikentämättä. Viivästetty ensiharvennus pidensi kuitenkin väliaikaa seuraavaan harvennukseen, joka toteutettiin vasta 15–20 vuoden kuluttua.

Hyytiäisen ja Tahvosen (2001, 2002, 2003) optimointitutkimuksissa selvitettiin metsänkasvatuksen taloutta matemaattisilla optimointimalleilla. Tutkimuksissa esitettiin tuloksia mm. optimaalisista kiertoajoista, harvennuksista ja taimikkovaiheen kasvatusetiheyksistä. Tutkimusten mukaan pienet muutokset talouden parametrien muutoksissa vaikuttivat suuresti optimaaliseen harvennusohjelmaan ja kiertoaikaan. Männyn optimi-istutustiheys oli 2100–2500 puuta hehtaarilla. Ensiharvennus toteutettiin yleisesti kevyempänä alaharvennuksena. Havupuut tuli ensiharventaa myöhemmin kuin Tapion suosituksissa suositeltiin. Ensiharvennusta kannatti siirtää siihen metsikön kehitysvaiheeseen, missä puuston pohjapinta-alan vuotuinen kasvu alkoi vähetä itseharvennemisen takia. Myöhästetty ensiharvennus ja taimikon tiheä kasvatusetiheys olivat optimaalisia huolimatta pienemmästä läpimitan kasvusta ja itseharvennemisestä johtuvasta kuolleisuudesta. Korkea korko aikaisti ensiharvennusta. Tiheämpi kasvatusetiheys pidensi aikaa päätehakkuuseen ja pienensi puuston läpimittaa kiertoajan lopussa. Yläharvennuksiset olivat kannattavampia myöhemmissä harvennuksissa. Optimiharvennuksessa poistettiin puita valikoivalla harvennuksella. Poistettavat puut olivat pääosin heikkolaatuisia puita tai puita, joilla ei ollut enää mahdollisuutta arvokasvuun. Myöhemmissä hakkuissa tasattiin metsikön puustoa hakkaamalla sekä ylhäältä suurimpia puita että alhaalta pienimpiä puita. Puut kannatti poistaa heti kun ne olivat saavuttaneet tukin mitat. Mänty oli herkempi harvennusten lukumäärän, koron, kasvupaikan rehevyyden tai korjuuolosuhteiden muutokselle kuin kuusi. Männyllä harvennuskerrat lisääntyivät kasvupaikan rehevöityessä ja vähenivät koron noustessa. Kuusella harvennusten lukumäärä pieneni kasvupaikan karuuntuessa ja käytettäessä yli 4 prosentin korkokantaa. Kuusella kahden harvennuksen ohjelma osoittautui parhaaksi useimilla kasvupaikoilla ja korkokannoilla. Yhden harvennuksen käsittelyohjelma oli optimaalinen karuilla kasvupaikoilla ja korkealla korolla. Päätehakkuu kannatti tehdä heti, kun pääosa puista saavutti tukin mitat. Kiertoaika lyheni koron kasvaessa ja kasvupaikan rehevöityessä. Koron nosto kasvatti harvennuksen voimakkuutta ja vähensi harvennusten lukumäärää lyhentäen kiertoaikaa. Päätehakkuun ja viimeisen harvennuksen välinen aika piteni korkealla korol-

la. Harvennuskertojen lisäys ja korjuukustannusten suureneminen pidensivät kiertoaikaa. Voimakas harvennus oli korkeilla koroilla edullinen, koska se aikaisti ja lisäsi harvennustuloja sekä nopeutti läpimitan kasvua jäävissä puissa. Valtapituus oli suurempi rehevimmillä kasvupaikoilla kuin karummilla kasvupaikoilla kiertoajan päättyessä. Korkokannan nosto johti pienempään pohjapinta-alaan ja kasvutasoon kiertoajan lopulla.

Metsähallituksen harvennustutkimuksessa (2004) selvitettiin ensiharvennuksen ajankohdan ja voimakkuuden vaikutuksia kiertoajan kuluessa havupuuaineen tuotokseen ja taloudelliseen tuottoon männiköissä ja kuusikoissa. Tutkimuksen mukaan ainespuukertymä ja erityisesti kertymän tukkipuun osuus lisääntyivät etenkin männyllä, kun ensiharvennuksen ajankohtaa myöhennettiin 10–15 vuodella. Ensiharvennuksen ajankohdan viivästämisellä oli positiivinen vaikutus koko kiertoajan tuotokseen, vuotuisen keskituotokseen ja kiertoajan nettotulojen nykyarvoon. Voimakas ensiharvennus pienensi koko kiertoajan tuotosta. Tutkimuksen mukaan puuntuotosta painottavan metsänomistajan kannatti viivästää ensiharvennusta ja välttää erityisen voimakkaita harvennuksia. Jos tavoitteena oli tuoton maksimointi, niin voimakas ensiharvennus tuli suhteellisesti sitä kannattavammaksi, mitä korkeampaa korkokantaa käytettiin nykyarvolaskelmissa.

Pukkalan (2005) tutkimuksessa laadittiin metsikön tuottoarvon ennustemallit kivennäismaan männiköille, kuusikoille ja rauduskoivikoille. Pukkalan (2006) tutkimuksessa tutkittiin puun hinnan, metsikkötunnuksen ja korkokannan yhteyttä metsikön optimaaliseen käsittelyyn. Päätösmuuttujien optimiarvot haettiin kummassakin edellä mainitussa tutkimuksessa Hooken ja Jeevesin epälineaarisen optimoinnin algoritmilla. Korkokannan kasvu lyhensi kiertoaikaa ja pienensi metsikön optimaalista kasvatustiheyttä ensiharvennuksen jälkeen kiertoajan loppua kohden. Yläharvennuksia tuli käyttää kiertoajan loppupuolella. Pohjapinta-alan suureneminen aikaisti optimaalista päätehakkuun ajankohtaa. Metsikön tiheyden lisääntyminen pienensi voimakkaammin hakkuuseen vaadittavaa keskiläpimittaa kuin kiertoaikaa. Metsikkö kannatti harventaa 13–18 metrin valtapituudella. Havupuiden pohjapinta-alat olivat tällöin suurimmillaan. Metsikön varttuessa sitä kannatti harventaa yhä pienemmällä pohjapinta-alalla. Pienellä korolla harvennus tapahtui lähellä metsikön itseharvenemisrajaa. Suureneva korkokanta pienensi valtapituutta, jossa kasvatustiheys oli suurimmillaan. Ensiharvennusvaiheen metsiköiden optimaalinen harvennusta edeltävä pohjapinta-ala oli varsin korkea – alhaisella korkokannalla käytännössä itseharvenemisrajalla. Kun optimoinnin tavoitteena oli maksimoida metsikön tuottoarvo, niin optimaalinen kiertoaika lyheni männyllä 15–20 vuotta ja kuusella 25–30 vuotta verrattuna puuntuotannon maksimointitavoitteeseen.

Hyytiäisen ym. (2005) tutkimuksessa tutkittiin mänty- ja kuusimetsikön optimia taimikkovaiheen kasvatustiheyttä, harvennuksia ja tasaikäisen metsikön rakennetta. Tutkimuksen mukaan männikkö kannatti perustaa melko tiheänä, jotta saavutettiin tasaiset tulot useasta harvennuksesta. Paras männikön tiheys oli 2245 puuta hehtaarilla. Kuusella optimitiheys vaihteli 1400–2350 puun välillä hehtaarilla 3 prosentin laskentakorolla. Kuusen optimitiheys väheni jyrkästi korkokannan noustessa. Ensiharvennus piti toteuttaa pienillä koroilla mahdollisimman aikaisin. Suuremmilla koroilla ensiharvennus tuli toteuttaa ennen kuin puuston itseharveneminen alkaa. Ensiharvennus oli myös voimakkaampi verrattuna myöhempisiin harvennuksiin. Yläharvennus oli männyllä kannattavampi kuin alaharvennus myöhemmissä harvennuksissa. Myös harvennus läpimittajakauman molemmista päistä oli optimaalista. Harvat metsiköt kannatti harventaa yläharvennuksena ja tiheet metsiköt kannatti harventaa molemmista läpimittaluokkien ääripäistä. Myöhemmissä harvennuksissa kannatti poistaa arvokkaampia puita läpimittajakauman yläpäästä. Tarkalla puunvalinnalla voitiin nostaa harvennuksen välittömiä tuloja ja saavuttaa jäljelle jäävän puuston optimaalinen rakenne kiertoajan loppuun. Metsikön pohjapinta-ala pieneni asteittain kiertoajan loppua kohden. Metsikkö kannatti päätehakata, kun pääosa puustosta oli saavuttanut tukin mitat. Tutkimuksen mukaan oli rationaalista poistaa metsikön puut, joilla ei ollut odotettavissa suurempaa arvokasvua. Männyn optimikiertoaika vaihteli kasvupaikasta, puun hinnoittelumallista, taimikon tiheydestä ja lämpösumma-alueesta riippuen kolmen prosentin korolla 70 vuodesta 99 vuoteen. Kuusen optimikiertoajat vaihtelivat 61 vuodesta 100 vuoteen. Kiertoaika oli herkkä koron muutoksille ja metsikön istutustiheydelle. Koron nosto lyhensi metsikön kiertoaikaa ja pienensi päätehakuussa puuston tilavuutta ja läpimittaa. Optimikäsittelyohjelman ominaisuuksina mainittiin korkea päätehakuutilavuus, tasainen metsikkörakenne ja suuri tukin osuus päätehakuussa.

Tässä lopputyössä tutkitaan estevarapinnan alapuolisen sektorimetsän taloudellisesti kannattavaa metsikön käsittelyä. Aihetta ei ole aiemmin tutkittu. Puustoa voidaan kasvattaa ja käsitellä lentokenttien ympäristössä kiitoalueiden sivuilla estevarasuhteella 1:7 ja kiitoalueiden päissä suhteella 1:50. Tutkimuksen tavoitteena on laatia käsittelyohjeet erilaisille sektorimetsiköille. Metsänomistajan päätavoitteena pidetään sektorimetsikön käsittelyohjelman antaman nykyarvon maksimointia. Tutkimuksessa verrataan tämän tutkimuksen tuloksia edellä mainittuihin metsän käsittely- ja optimointitutkimustuloksiin. Puuntuotannon kannattavuuden vertailumittareina ovat metsikön tuottoarvo, vuotuinen nettotulo ja vuotuinen keskikasvu. Tutkimuksen aineistona käytetään 30 hoidettua havupuumetsikköä kolmelta eri kasvillisuusvyöhykkeeltä. Metsiköiden optimaaliset käsittelyohjelmat haetaan Ostand-nimisellä simulointi-optimointiohjelmalla. Tutkimuksessa käytetään optimointitekniikkana epälineaarista ohjel-

mointia. Päätösmuuttujien optimiarvot haetaan Hooken ja Jeevesin algoritmilla ja tavoitefunktion rajoite toteutetaan sakkofunktion avulla. Optimointituloksista voidaan johtaa metsänhoitosuosituksia estevarapinnan alapuolisille metsiköille.

2 TUTKIMUKSEN AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Metsikön taloudellisesti tehokas kiertoaika ja tuottoarvo

Metsät ovat uusiutuvia luonnonvaroja, joita voidaan käyttää kestävästi omistajiensa hyväksi. Metsä voidaan käsittää arvokkaana taloudellisenä voimavarana, joka tuottaa markkinoille tavaroita ja palveluita, joita halutaan kuluttaa yhteiskunnassa. Metsä on taloudellisesti rationaaliseksi omistajalle kuitenkin rajallinen voimavara, jota tulee allokoita tarkoin. Omistajan tulee suunnitella, mitä tuotteita ja palveluita tuotetaan, kuinka paljon niitä tuotetaan ja millä tavalla niitä tuotetaan. Metsätaloudessa tyypillisesti allokoitavia voimavaroja ovat metsämaa ja puusto. Taloudellinen tehokkuus saavutetaan myös metsätalouden tuotannossa, kun allokoitavat voimavarat tuottavat suurimman taloudellisen arvonsa (Zhang ja Pearse 2011). Voimavarojen allokoinnissa tarvitaan erilaisia päätöksentekomenetelmiä, joiden avulla päätöksentekijä voi vertailla eri vaihtoehtoja. Metsätaloudessa voidaan tehdä päätöksentekoa usealla eri tasolla. Päätöksentekotasoa vaihtelee yksittäisen metsikön käsittelyjen suunnittelusta valtakunnan – tai koko maailman tason metsien käytön suunnitteluun (Gong 1994). Metsikkötaso on pienin järkevä suunnittelutaso, kun ajatellaan metsän taloudellista hyväksikäyttöä yksittäisen metsänomistajan kannalta. Suurin osa metsäekonomista teorioista perustuu metsikkötason analyysiin. Metsikkötason analyysin etuna on sen matemaattinen yksinkertaisuus ja tuloksen yleistettävyyden (Valsta 1993). Tulosta voidaan hyödyntää mm. metsikön käsittelyohjeena ja taloudellisten herkkyyksianalyysin tekemisessä (Valsta 1993). Metsätalouden taloudellisen tehokkuuden kannalta tärkeimpiä määritettäviä asioita ovat metsikön kiertoaika ja harvennusten ajoittaminen. Kiertoaajan määrittämiselle on kehitetty useita erilaisia määritelmiä, kuten biologinen, fyysinen, tekninen, korkeimman tilavuuskasvun, korkeimman metsänkoron ja korkeimman maankoron kiertoaika eli Faustmannin kaava (Pukkala 2007).

Uudistuvan luonnonvaran arvottamista, taloudellista tehokasta maan käyttöä, tulevaisuuteen sijoittuvien tuloerien nykyarvoa, mahdollisten metsästä saatavien tulojen arvioimista ja metsikkötason optimaalista kiertoaikaa on tutkittu jo 1700-luvulta lähtien (Viitala 2006). Faust-

mann esitteli vuonna 1849 kiertoaikamallin metsien ja muiden uudistuvien luonnonvarojen pääomien arvottamiseksi (Viitala 2006). Faustmannin kiertoaikamallilla voidaan kuvata taloudellisesti tehokasta puuntuotantoa, sillä malli kuvaa puuntuotannosta syntyvän taloudellisen ylijäämän tai voiton maksimoinnin (Tahvonen 1999). Faustmannin kaavan mukainen tasaikäisen metsikön optimaalinen kiertoaika saavutetaan, kun tuotannon rajakustannus ja rajatuottavuus ovat yhtä suuret (Zhang ja Pearse 2011). Kun päätöksentekijä käyttää korkeimman maankoron kiertoaikaa taloudellisten laskelmien apuna ja päätöksenteon tukena, hän löytää taloudellisen tehokkuuden kannalta parhaan metsänhoidon kombinaation (Zhang ja Pearse 2011). Faustmannin kaavan periaatteena on metsittää paljas maa, käsitellä metsikköä kasvatushakuilla ja uudistaa se tietyinä ajankohtana (Nyyssönen 1999). Metsiköstä saatavat tulot ja sen kasvattamisesta aiheutuneet menot siirretään prolongaamalla kiertoajan loppuun käyttäen valittua korkoprosenttia. Harvennusnettotulot lasketaan päätehakuutulojen kanssa yhteen ja nettotuloista vähennetään uudistamiskustannukset. Seuraavista puusukupolvista saatavat tuotot ja kustannukset, jotka syntyvät yhtä kiertoaikaa kauempana tulevaisuudessa kerrotaan diskonttotekijällä. Lisäksi pääomitetut kiinteät vuotuiset hallinnon kustannukset vähennetään laskelmasta (Valsta 1999). Tällä laskentamenetelmällä saadaan tulokseksi päättymättömän jaksottaisen tulon kapitalisoitu alkuarvo, eli tuottoarvo. Se kiertoaika, jolla maa saa suurimman arvon, osoittaa metsikön parhaan tuottoarvon (Nyyssönen 1999). Tämä on ikä, jolla metsikön nettonykyarvoa ei voida kasvattaa enää lisäämällä kiertoaikaa vuodella eteenpäin. Puusto kannattaa hakata siinä vaiheessa, kun puuston arvokasvu on yhtä suuri kuin puustoon ja metsämaahan sitoutuneiden pääomien korkokustannukset (Tahvonen 1999). Toinen metsäekonomisessa kirjallisuudessa yleinen tapa esittää Faustmannin kaava on laskea tuottoarvo siten, että summataan kantohinnan ja puumäärän tuloja, diskontataan ne kiertoajan alkuun ja vähennetään perustamiskustannukset. Tulevaisuuden kiertoaikojen tuotot ja kustannukset otetaan kaavassa huomioon siten, että nettonykyarvot kerrotaan diskonttotekijällä (Tahvonen 1999, Valsta 1999). Faustmannin kaavalla voidaan laskea metsikön tuottoarvo ilman istutus-kustannuksia (taimikon luontainen syntyminen) tai niiden kanssa (keinollinen viljely). Tuottoarvo voidaan laskea kiertoajan alkuun, kiertoajan loppuun tai niiden välille. Tuottoarvon hyvänä puolena voidaan mainita sen helppotajuisuus. Positiivinen tuottoarvo indikoi sitä, että puuntuotannossa on syntynyt ylijäämää ja metsikön perustamiskustannukset ovat tulleet kate-tuiksi metsikön tuotolla. Lisäksi erilaiset herkkyysanalyysit ovat mahdollisia, kun vertaillaan metsikön kannattavuutta käyttäen eri korkokantoja nykyarvolaskelmissa (Hyytiäinen ym. 2010). Klassisella kiertoaikamallilla voidaan kuvata puun pitkän ja lyhyen aikavälin tarjontaa (Tahvonen 1999). Kiertoaikamallin huonoina puolina voidaan mainita sen vahva oletus ja

voimakas yksinkertaistus markkinoiden täydellisyydestä, päätöksenteon varmuudesta tulevaisuudessa ja hinta- ja korkotason vakaudesta koko kiertoaajan aikana (Tahvonen 1999).

2.2 Metsikkötalouden suunnittelumenetelmät ja menetelmien luotettavuus

Päätöksenteko metsätaloudessa on monimutkainen prosessi. Metsää voidaan käsitellä useasti ja monella eri tavalla kiertoaajan kuluessa. Tulevaisuutta ei voida ennustaa täydellä varmuudella. Jopa yhden metsikön hakkuiden ja kiertoaajan laskenta heuristisesti tuottaa vaikeuksia, jos päätöksentekijällä ei ole apuna tarvittavia tietojen- ja tietämyksienkäsittelyjen mahdollistamia apukeinoja. Operaatiotutkimuksen avulla voidaan soveltaa tieteellistä lähestymistapaa metsätaloustalouden toimintojen ohjaamiseen (Kaila ja Saarenmaa 1990). Operaatiotutkimuksen keskeisenä tavoitteena voidaan pitää optimaalisen tuloksen löytämistä käytettävissä olevien rajallisten resurssien lähes rajattomasta vaihtoehtoavaruudesta. Erilaiset optimointimenetelmät ovat operaatiotutkimuksen keskeisiä menetelmiä. Päätöksentekijän saama hyöty kuvataan tavoitefunktiolla, jota maksimoidaan tai minimoidaan rajallisten resurssien vallitessa. Tavoitefunktion ja rajoitteiden lineaarisuudesta tai epälineaarisuudesta johtuen optimointimenetelmät jakaantuvat lineaariseen - tai epälineaariseen ohjelmointitekniikkaan. Erona lineaariseen ohjelmointiin epälineaarilla ohjelmoinnilla voidaan ratkaista optimointitehtäviä, joiden hakuvaruus on ääretön (Kaila ja Saarenmaa 1990). Muita optimointimenetelmiä ovat mm. verkkoanalyysi, peliteoria, simulointi ja dynaaminen ohjelmointi. Dynaamista ohjelmointia voidaan käyttää monivaiheisten metsätalouden päätösten tekoon. Päätöksenteon optimointikohteena on tällöin ajassa etenevä ilmiö, jonka hakuvaruus on laaja (Kaila ja Saarenmaa 1990). Toinen metsätalouden suunnittelussa yleisesti käytetty optimointimenetelmä on epälineaarinen optimointi, joka mahdollistaa monimutkaisten optimointitehtävien ratkaisut.

Metsätalouden päätöksenteossa, kuten muussakin talouden suunnittelussa, tuotantomahdollisuudet ovat rajalliset. Voimavarat, kuten puusto, metsäpinta-ala, työvoima ja/tai pääoma rajoittavat metsätalouden tuotantofunktiota. Tavoitefunktiota maksimoidaan tai minimoidaan yleensä rajoitteisella optimoinnilla. Rajoitteisen optimoinnin menetelmät jaetaan epäsuoriin ja suoriin menetelmiin. Epäsuoria menetelmiä ovat mm. sakko- ja reunafunktiomenetelmät. Rajoitettu optimointitehtävä muutetaan aluksi rajoituksettomaksi tehtäväksi. Tavoitefunktioon lisätään sopiva sakkotermi, jota painotetaan rajoitteen rikkomisesta tulevalla kustannuksella (Haataja 2004). Operaatiotutkimusta on käytetty metsäntutkimuksessa ja -taloudessa laajasti. Metsätalouden pitkän aikavälin suunnitteluun on käytetty mm. Metsäntutkimuslaitoksen MELA-mallia (Kaila ja Saarenmaa 1990).

Metsikkö on yhtenäinen metsän osa, joka eroaa muista metsiköistä kasvupaikaltaan ja puustoltaan. Metsikkö voidaan myös käytännön suunnittelussa rajata alueen koolla ja toimenpite-tarpeilla omaksi kuvioksi (Häggman 1997). Lentokenttäympäristöjen estevarapintojen alapuo-linen sektorimetsä voidaan jakaa kaikilla edellä mainituilla tavoilla osiin. Merkittävä tekijä sektorimetsikön rajauksessa on kuitenkin metsiköiden osittaminen pituusrajoitteen mukaan. Metsikkötaloudessa jokaisen metsikön käsittely suunnitellaan riippumatta muista metsiköistä (Pukkala 2007). Lentokenttäympäristöjen pituusrajoitettujen metsiköiden suunnittelumene-telmänä voidaan käyttää metsikön käsittelyn optimointia epälinearisella ohjelmoinnilla. Met-sikön käsittelyohjelman optimoinnissa määritetään kullekin metsikölle oma kiertoaika sekä harvennushakkuiden ajankohdat ja voimakkuudet niin, että päätöksentekijän tavoitefunktio maksimoituu. Tavoitefunktiona voidaan pitää esimerkiksi maan tuottoarvoa (Pukkala 2007). Käytännössä metsiköt optimoidaan optimointiohjelmalla, joka sisältää puiden kasvumallit, metsikkösimulaattorin ja optimointialgoritmin. Ohjelmalla simuloidaan, optimoidaan ja ana-lysoidaan metsikön kehitystä eri muuttujia, kuten esimerkiksi harvennustapaa, korkokantaa ja puun hintaa vaihdellen (Pukkala ja Miina 1997).

Metsäsimulaattorien ja metsäsuunnittelujärjestelmien tulosten luotettavuudesta ovat tehneet tutkimusta mm. Välimäki ja Kangas (2009) ja Mäkinen (2010). Välimäen ja Kankaan (2009) tutkimuksessa selvitettiin, miten MOTTI-metsäsimulaattorin simulointiosan puu- sekä met-sikkötason kasvumallit (Hynynen ym. 2002) ennustivat metsien kehitystä ylitieheissä metsi-köissä. Tulosten mukaan pohjapinta-alalla painotetun keskiläpimitan ennusteet olivat tarkim-pia verrattuna tutkimuksen referenssiaineistoon. Runkoluvun ja pohjapinta-alan ennustevir-heet olivat suurimmalta osalta aliarvioita etenkin alkutilaltaan tiheämmissä metsiköissä. En-nusteet olivat tarkimmillaan, kun puuston alkutiheys oli 1000 runkoa hehtaarilla ja metsikön pohjapinta-ala oli 15–25 m²/ha. Metsikön pohjapinta-alalla painotetun keskipituuden ennus-teet olivat tarkimmillaan metsiköiden keskipituuden ollessa 15–20 metriä. Keskipituuden ali-arvioita syntyi ennustettaessa keskimääräistä lyhyempiä metsiköitä. Tuoreiden kankaiden en-nusteet olivat tarkimpia ja kuivahkojen kankaiden ennusteet olivat epätarkimpia. Tutkimuksen päätelmänä oli, että simulaattorin kasvuennustemallit ennustivat ylitieheissä metsiköissä liian suurta luonnonpoistumaa simulointijakson alussa. Itseharvenemisen virhe aiheutti virheen runkoluvun ennustamisessa ja täten myös ennustevirhettä syntyi pohjapinta-alan kasvua en-nustettaessa. Metsät kasvoivat luonnossa tiheämpänä kuin käytetyt ennustemallit metsän kehi-tyksen kuvasivat. Metsiköiden pohjapinta-alojen kehitykset olivat käytetyn kasvumallin takia epätarkkoja. Tällöin myös simuloinneista ja optimoinneista johdetut metsänhoitosuositukset ja -ohjeet saattoivat olla epätarkkoja (Välimäki ja Kangas 2009).

Mäkisen väitöskirjatutkimuksessa (Mäkinen 2010) tarkasteltiin kolmea epävarmuuden lähdettä metsäsimulaattoreissa ja metsäsuunnittelujärjestelmissä. Lähteet olivat metsien kasvunusteiden virheet, metsien nykytilaa kuvaavat virheet ja puutavaralajien hintojen satunnaisvaihtelujen virheet. Tutkimuksessa vertailtiin sekä yksittäisten puiden että metsikkötason kasvumallien ennustetarkkuutta verrattuna koelaloilta inventoituun tietoon. Lisäksi tarkasteltiin inventointivirheiden vaikutusta metsikkötason muuttujiin sekä kolmen epävarmuustekijän yhteisvaikutusta metsikön netto nykyarvon ennustamiseen. Simulaattoreina käytettiin SIMO-simulaattoria ja MOTTI-simulaattoria. Simulaattorien yksittäisen puun kasvumalleina olivat MOTTI ja MELA-ohjelmissä käytetyt kasvumallit (Hynynen ym. 2002). Metsikkötason kasvumalleina olivat havupuulle Vuokilan ja Väliahon kasvumallit (1980). Koivujen malleina olivat Saramäen (1977) ja Oikarisen (1983) kasvumallit. Merkittävimmäksi virhelähteeksi osoittautuivat virheet kasvuennusteissa. Metsikkösimulaattorit aliarvioivat keskiläpimitan, keskipituuden, pohjapinta-alan ja runkoluvun kehityksiä. Metsikön muuttujien kehitysten suhteelliset virheet pienenevät simuloinnin loppua kohti vaikka absoluuttiset virheet kasvoivat metsikön ikääntyessä. Simuloidun kasvun todettiin olevan epätarkempaa mitä kauemmas tulevaisuuteen metsikön kasvua ennustettiin. Tutkimuksen yhtenä päätelmänä kuitenkin oli, että menetelmien epätarkkuuksista huolimatta, sekä metsikkö- että puutason simulaattorit antoivat suhteellisen hyvän kuvauksen ja ennusteen metsän kehityksestä. Simuloinneista ja optimoinneista saatavat tulokset on kuitenkin aina ymmärrettävä suhteuttaa kyseisten menetelmien rajoitteisiin (Mäkinen 2010).

2.3 Tutkimuksen aineisto

Tutkimuksen aineistona käytettiin simuloituja lähtömetsiköitä (taulukko 3). Lähtömetsiköt olivat puhtaita yhden havupuulajin 12–35 -vuotiaita metsiköitä. Metsiköissä ei ollut tehty vielä hakkuita, mutta taimikonhoitotoimet oli tehty. Taimikot oli harvennettu metsänhoitosuosituksen (Hyvän metsänhoidon suositukset 2006) mukaisesti runkolukuihin. Metsiköiden kasvupaikkoina olivat männyllä lehtomainen, tuore, kuivahko ja kuiva kangas. Kuusen kasvupaikat olivat lehtomainen ja tuore kangas. Metsiköiden kasvualueet valittiin kolmelta kasvillisuusvyöhykkeeltä. Eteläborealiselta kasvillisuusvyöhykkeeltä valittiin Helsinki-Vantaan lentoaseman (dd 1300) alue. Keski-borealiselta vyöhykkeeltä valittiin Kajaanin lentoaseman alue (dd 1000) ja pohjoisborealiselta vyöhykkeeltä valittiin Ivalon lentoaseman alue (dd 750). Männiköiden ja kuusikoiden lähtömetsien simulointiin tarvittavat puusto- ja kasvupaikatunnukset valittiin Helsinki-Vantaan, Kajaanin ja Ivalon lentoasemien metsänhoitosuunnitelmista. Lähtömetsiköitä täydennettiin Pukkalan ja Kolströmin vuosina 1988–1994 kerää-

mästä spatiaalisten kasvumallien laadintaan käytetystä koeala-aineistosta (Anttila ym. 2001). Simuloinnissa tarvittavat alkumetsiköt määriteltiin seuraavien tunnusten avulla: lämpösumma, kasvupaikkatyyppi, puulaji, ikä, keskiläpimitta, keskiläpimittaa vastaava pituus, pohjapinta-ala ja runkoluku. Lisäksi kolme kasvun simulointiin vaikuttavaa tunnusta vakioitiin: Järvisyydelle käytettiin arvoa 0,2, merisyydelle arvoa 0 ja korkeudelle merenpinnasta 50 metriä. Eri-laisia lähtömetsiköitä simuloitiin 30 kappaletta (taulukko 3).

Taulukko 3. Lähtömetsä-aineiston kuviotiedot. Kasvupaikka 2 = lehtomainen kangas, 3 = tuore kangas, 4 = kuivahko kangas, 5 = kuiva kangas. Puulajit 1 =mänty, 2 = kuusi.

Alue ja lämpösumma	Kasvu- paikka	Puulaji	Kokonaisikä, v	Läpimitta, cm	Pituus, m	Runkoluku, kpl/ha
Ivalo, 750 d.d	2	1	35,0	6,0	6,0	2000/2500
	3	1	35,0	6,0	6,0	2000/2500
	4	1	35,0	6,0	6,0	2000/2500
	5	1	20,0	4,0	3,0	2000/2500
Kajaani, 1000 d.d	2	1	36,0	10,0	10,0	1800/2000/ 2500
	3	1	36,0	10,0	10,0	1800/2000/ 2500
	4	1	22,0	8,0	6,0	2000/2500
	5	1	21,0	3,0	3,0	2000
	2	2	17,0	4,0	3,0	1800
	3	2	17,0	4,0	3,0	1800
Vantaa, 1300 d.d	2	1	20,5	7,5	4,6	1800/2133
	3	1	20,5	7,5	4,6	1800/2133
	4	1	23,5	7,5	4,6	1800/2133
	5	1	28,5	7,5	4,6	1800/2133
	2	2	30,0	12,0	10,0	1600/1800
	3	2	30,0	12,0	10,0	1600

2.4 Puutavaralajien yksikköhinnat ja latvaläpimitat

Tutkimuksen laskelmissa käytettiin taulukon 4 mukaisia läpimittakriteerejä eri puutavaralajeille. Metsänkasvatuksen kustannuksiin sisältyivät metsikön perustamiskustannukset 850 euroa hehtaarille ja taimikonhoitokustannukset 250 euroa hehtaarille. Puun hintoina käytettiin kantohintoja, jotka saatiin METLA:n tietopalvelusta (METINFO/tilastopalvelu). Kantohinnat kuudelle puutavaralajille koko maan alueelta laskettiin vuosien 1995–2006 keskiarvona.

Taulukko 4. Puutavaralajittaiset minimilatvaläpimittavaatimukset ja kantohinnat. Hinnat on laskettu 10 vuoden keskiarvoina.

Puutavaralaji	Pölkyn minimilatvaläpimitta, cm	Kantohinta, €/m ³
Mäntytukki	15,0	46,0
Kuusitukki	16,0	43,0
Koivutukki	20,0	44,0
Mäntykuitu	6,0	14,0
Kuusikuitu	6,0	22,0
Koivukuitu	6,0	14,0

2.3 Käytetyt menetelmät

Sektorimetsien optimaaliset käsittelyohjelmat haettiin Ostand-sovelluksella (Pukkala 2001), joka sisälsi puiden kasvumallit (MELA-mallit, Hynynen ym. 2002), metsikkösimulaattorin ja optimointi-algoritmin. Lähtömetsiköt simuloitiin metsikkösimulaattorilla, joka simuloi myös metsiköiden kasvun ja käsittelyt. Simulaattori laski tavoitefunktion (tuottoarvon) arvon kasvuista ja käsittelyistä. Tavoitefunktio palautettiin optimointi-algoritmiin, joka teki muutoksia päätösmuuttujien arvoihin simuloinnin tulosten perusteella. Simuloinnin ja optimoinnin vuorottelua jatkettiin, kunnes asetettu lopettamiskriteeri saavutettiin. Metsiköiden kasvua simuloitiin pituusrajoitteilla tai ilman rajoitetta. Metsikön kasvatuksen pituusrajoitteina käytettiin 10 m, 15 m ja 20 m. Pituusrajoitteet toteutettiin sakkofunktion avulla. Lähtömetsikön tavoitefunktion lisättiin tekijä, joka huononsi funktion arvoa sitä enemmän, mitä enemmän puuston pituus ylitti pituusrajoitteen (Pukkala 2007).

Simulointien tavoitemuuttujaksi valittiin tuottoarvo. Metsikön tuottoarvo laskettiin tässä tutkimuksessa paljaan maan arvona siten, että yhden kiertoajan aikana syntyvät tulot ja menot diskontattiin vuoteen nolla. Yhden kiertoajan aikana syntynyt nettotulojen nykyarvo kerrottiin pääomistustekijällä, joka muutti nykyarvon päättymättömän sarjan nykyarvoksi, eli tuottoarvoksi. Metsiköiden tuottoarvojen laskennoissa käytettiin diskonttaus korkoina 1,2,3 ja 4 prosenttia. Tavoitefunktiona käytettiin seuraavaa tuottoarvon kaavaa (Pukkala 2007)

$$TA = NA \left[1 - \frac{1}{(1+i)^u} \right]^{-1} .$$

Kaavassa NA on metsikön yhden kiertoajan nykyarvo diskontattuna vuoteen nolla. Yhden kiertoajan nettotulojen nykyarvo laskettiin seuraavalla kaavalla (Pukkala 2007)

$$NA = \sum_{t=0}^u \frac{N_t}{(1+i)^t} = \sum_{t=0}^u \frac{R_t - C_t}{(1+i)^t},$$

missä N_t on metsikön kiertoajan nettotulot, R_t tulot ja C_t on kustannukset vuonna t .

Optimoinnilla haettiin metsänkäsittelyille sellaiset ajankohdat ja voimakkuudet, jotka maksimoivat metsikön tuottoarvon. Optimoinneissa päätösmuuttujina olivat harvennusten ajankohdat, harvennettava pohjapinta-ala sekä päätehakkuun ajankohta. Päätösmuuttujien optimiarvot haettiin Hooken ja Jeevesin epälineaarisen optimoinnin menetelmällä. Hooken ja Jeevesin algoritmi perustuu siihen, että alussa määriteltyjä päätösmuuttujia muutetaan tietyn askeleen verran muuttuja kerrallaan (exploratory search). Askel toteutetaan muuttujan koordinaattiakselin suunnassa aluksi päätösmuuttujana arvoa suurentaen, jonka jälkeen sitä pienentäen. Muutokset, jotka parantavat tavoitefunktion arvoa, jäävät voimaan. Tämän jälkeen seuraa toinen vaihe (pattern search), jossa useampaa muuttujaa muutetaan yhtä aikaa. Seuraavat haut (exploratory search/pattern search) puolittavat aina edellisen kierroksen päätösmuuttujien askelpituudet. Kierroksia jatketaan, kunnes kaikkien päätösmuuttujien muutosaskel on pienempi kuin alussa määritelty lopetuskriteeri (Mäkelä 2010).

Tutkimuksessa verrattiin optimoinnilla kahta eri metsikön käsittelytapaa. Metsikköjen kasvua ja hakkuita optimoitiin pituusrajoitteen mukaisesti sekä ilman pituusrajoitetta. Optimoinnilla saatuja tuloksia vertailtiin sekä keskenään että aiempaan alan tutkimukseen.

3 TULOKSET

3.1 Pituusrajoitteen vaikutus metsikön tuottoarvoon

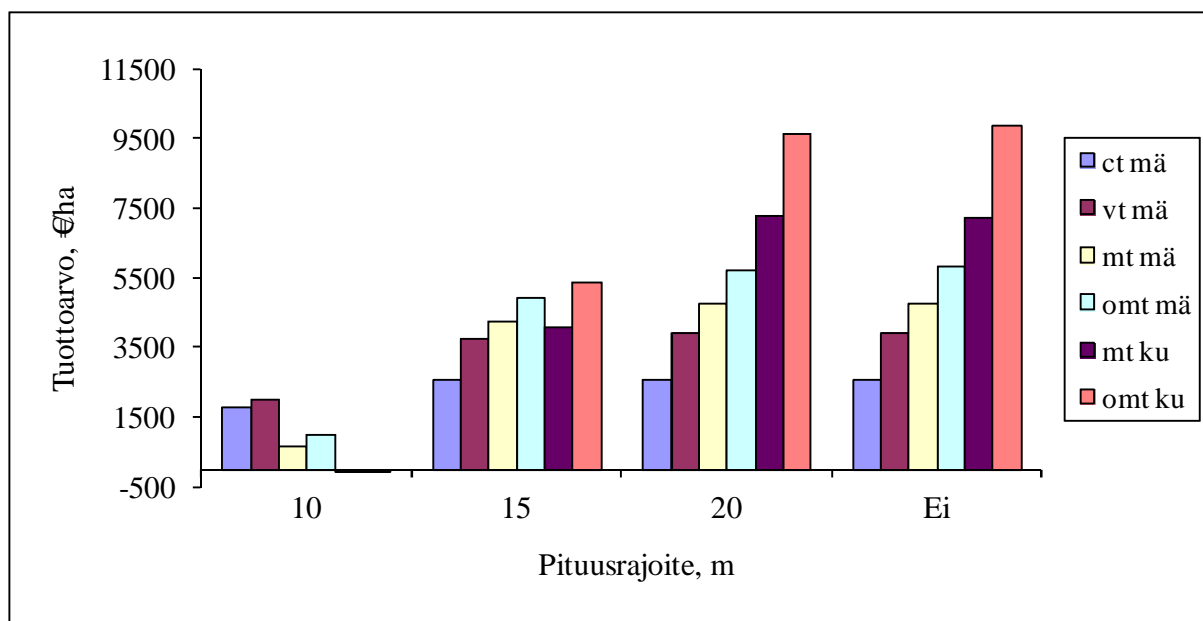
Etelä-Suomen optimointimetsiköt ovat ct-, vt-, mt- ja omt-männikköjä sekä mt- ja omt- kuusikkoja. Tuottoarvot ovat pääosin positiivisia männiköissä ja kuusikoissa, kun korkona käytetään 2 prosenttia. Negatiivisia tuottoarvoja on 10 metrin pituusrajoitteen kuusikoilla, joiden lähtötiheys on pienempi. Tuottoarvot ovat suurempia 10 metrin pituusrajoitteen karumpien kasvupaikkojen männiköissä kuin rehevien kasvupaikkojen männiköissä. Kun pituusrajoite

lievenee yli 15 metrin, niin männiköiden tuottoarvot suurenevat siirryttäessä karummasta metsätyyppistä rehevämpään metsätyyppiin (kuva 2). Suurempi lähtötiheys suurentaa hieman männikön ja kuusikon tuottoarvoa. Kasvupaikan rehevyydellä ei ole vaikutusta Etelä-Suomen kuusikkojen tuottoarvoihin ankarimmalla pituusrajoitteella. Kun pituusrajoite lievenee kuusikossa, niin rehevämpi kasvupaikka ja suurempi lähtötiheys suurentavat tuottoarvoa.

Männiköiden tuottoarvot vaihtelevat 10 metrin pituusrajoitteella männiköissä 653 euron ja 2 021 euron välillä ja kuusikoissa negatiivisten arvojen ja 283 euron välillä. Tuottoarvot vaihtelevat männiköissä pituusrajoitteen ollessa 15 metriä välillä 2 569–4 933 euroa ja kuusikoissa välillä 5 360–6 046 euroa. Männikköjen ja kuusikkojen tuottoarvot suurenevat eniten siirryttäessä 15 metrin pituusrajoitteelle. Pituusrajoitteen lievetessä yli 20 metrin tuottoarvot suurenevat enää rehevämmillä kasvupaikoilla. Pituusrajoitteettomilla alueilla ei tapahdu enää tuottoarvon merkittävää suurenemista kummallakaan puulajilla. (taulukko 5 ja kuva 2).

Taulukko 5. Pituusrajoitteen vaikutus metsikön tuottoarvoon, vuotuisen keskikasvuun ja vuotuisen nettotuloon eri kasvatustiheyksillä ja kasvupaikan rehevyyksillä käytettäessä 2 prosentin korkoa.

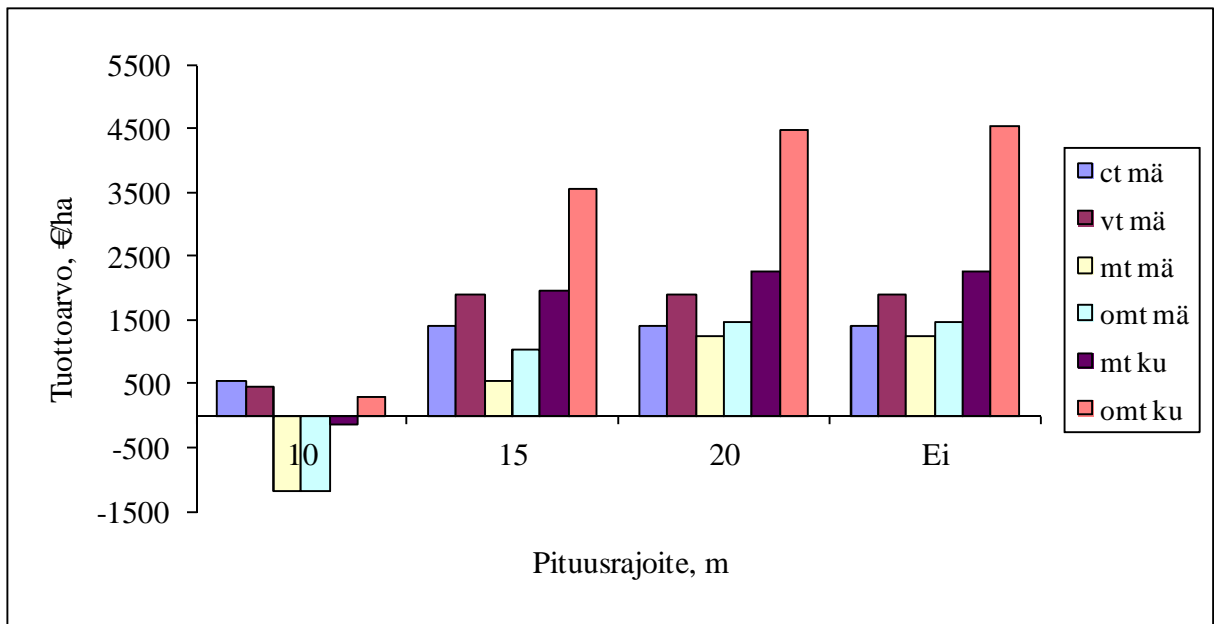
Kasvupaikka	Pituusrajoite m	Tuottoarvo €	Keskikasvu m ³ /ha/v	Nettotulo €/ha/v
Etelä-Suomi				
Männiköt	10	653 – 2 021	3,6 – 5,6	51,9 – 65,6
	15	2 569 – 4 933	4,5 – 8,0	99,6–197,8
	20	2 569 – 5 673	4,5 – 8,4	99,6–252,7
	Ei	2 569 – 5 809	4,5 – 8,4	99,6–252,7
Kuusikot	10	- 21 – 283	3,3 – 3,7	31,3 – 39,7
	15	5 360 – 6 046	6,7 – 8,2	163,2–220,0
	20	7 251 – 9 947	9,0–11,0	300,9–370,8
	Ei	7 217–10 068	9,0–11,2	301,3–382,2
Väli-Suomi				
Männiköt	10	-1 285 – 678	2,5 – 4,0	0 – 23,9
	15	544 – 2 040	3,1 – 5,0	65,8 – 88,1
	20	1 164 – 2 056	3,1 – 5,2	71,0–126,9
	Ei	1 164 – 2 056	2,9 – 5,2	71,0–126,9
Kuusikot	10	-146 – 295	2,7 – 3,4	30,9 – 42,2
	15	1 964 – 3 545	4,7 – 6,2	129,6–170,1
	20	2 263 – 4 477	5,1 – 7,2	162,4–232,8
	Ei	2 263 – 4 539	5,1 – 7,2	162,4–241,8
Pohjois-Suomi				
Männiköt	10	-817 – 556	1,9 – 2,5	9,0 – 22,6
	15,20,Ei	9 – 738	2,2 – 3,1	43,2 – 68,1



Kuva 2. Pituusrajoitteen vaikutus tuottoarvoon Etelä-Suomen männiköissä ja kuusikoissa kaikilla pituusrajoitteilla käytettäessä 2 prosentin korkoa.

Väli-Suomen optimointimetsiköt ovat ct-, vt-, mt- ja omt-männikköjä sekä mt- ja omt- kuusikkoja. Ct- ja vt-kasvupaikkojen männiköiden tuottoarvot ovat positiivisia pituusrajoitteilla ja ilman. Omt- ja mt-männiköiden tuottoarvot ovat negatiivisia 10 metrin pituusrajoitteella. Pituusrajoitteen lievetessä tuottoarvot ovat positiivisia myös omt- ja mt-männiköissä. Pituusrajoitteen lievetessä 15 metrin yli rehevämpien kasvupaikkojen tuottoarvot suurenevat lähelle karujen kasvupaikkojen tuottoarvoja. Rehevämpien kasvupaikkojen männiköiden tuottoarvot eivät kuitenkaan ylitä karumpien kasvupaikkojen männiköiden tuottoarvoja, vaikka pituusrajoite lievenee (kuva 3). Tiheämmillä lähtömetsiköillä on hieman suuremmat tuottoarvot. Kuusikoiden tuottoarvot ovat positiivisia pituusrajoitteilla tai ilman lukuun ottamatta 10 metrin pituusrajoitteen mt-kuusikkoa, jonka tuottoarvo on negatiivinen.

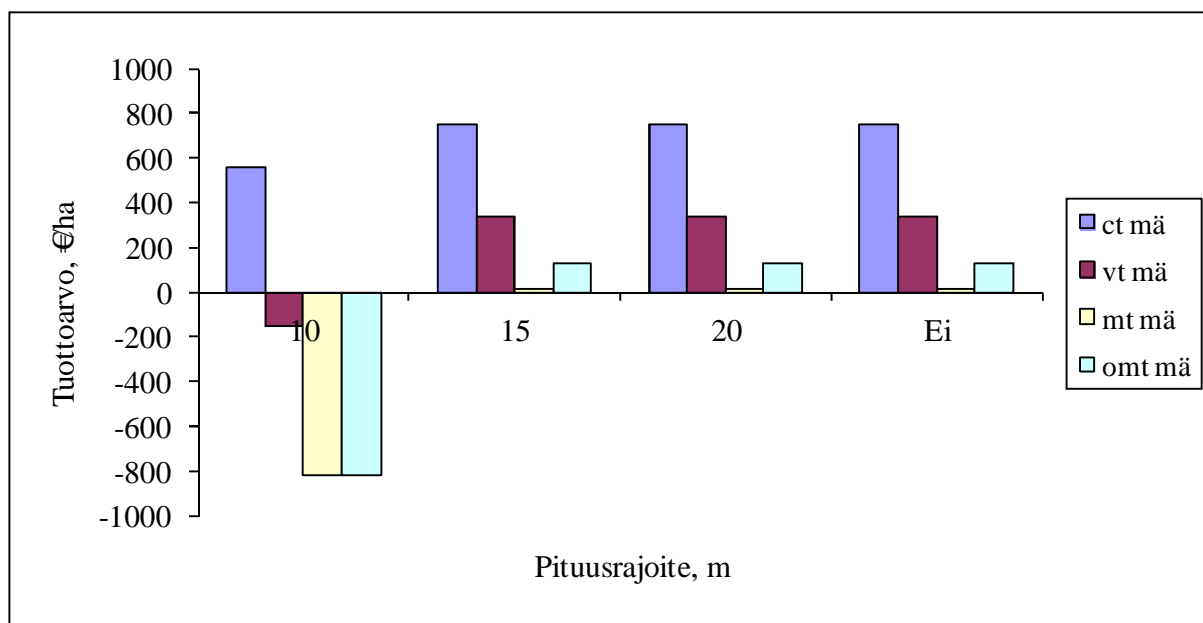
Metsiköiden tuottoarvot vaihtelevat 10 metrin pituusrajoitteella männiköissä rehevien kasvupaikkojen negatiivisten arvojen ja 678 euron välillä ja kuusikoissa negatiivisten arvojen ja 295 euron välillä (taulukko 5). Tuottoarvot vaihtelevat pituusrajoitteen lieventyessä 15 metriin männiköissä välillä 544–2 040 euroa ja kuusikoissa välillä 1 964–3 545 euroa (taulukko 5). Tuottoarvot suurenevat kummallakin puulajilla 20 metrin pituusrajoitteeseen saakka. Tuottoarvot eivät enää suurene pituusrajoitteiden poistuessa yli 20 metrin jälkeen kummallakaan puulajilla millään kasvupaikalla (taulukko 5 ja kuva 3).



Kuva 3. Pituusrajoitteen vaikutus tuottoarvoon Väli-Suomen männiköissä ja kuusikoissa kaikilla pituusrajoitteilla käytettäessä 2 prosentin korkoa.

Pohjois-Suomen alueen metsiköt ovat ct-, vt-, mt- ja omt-metsätyypin männikköjä. Tuottoarvot ovat positiivisia 10 metrin pituusrajoitteella ct-männiköissä. Kun pituusrajoite lievenee 15 metriin, niin tuottoarvot ovat positiivisia kaikilla kasvupaikoilla (kuva 4). Tiheämpi lähtötiheys suurentaa männikön tuottoarvoa.

Tuottoarvot vaihtelevat rehevien kasvupaikkojen negatiivisten arvojen ja 556 euron välillä 10 metrin pituusrajoitteella ja 15 metrin pituusrajoitteella ne suurenevät suurimmillaan omt-männikön 738 euroon hehtaarilla (taulukko 5). Pohjoisen mänty ei juuri kasva 15 metrin pituusrajoitteen jälkeen, joten optimointi antaa saman optimituloksen pituusrajoitteen ollessa yli 15 metriä (taulukko 5 ja kuva 4).



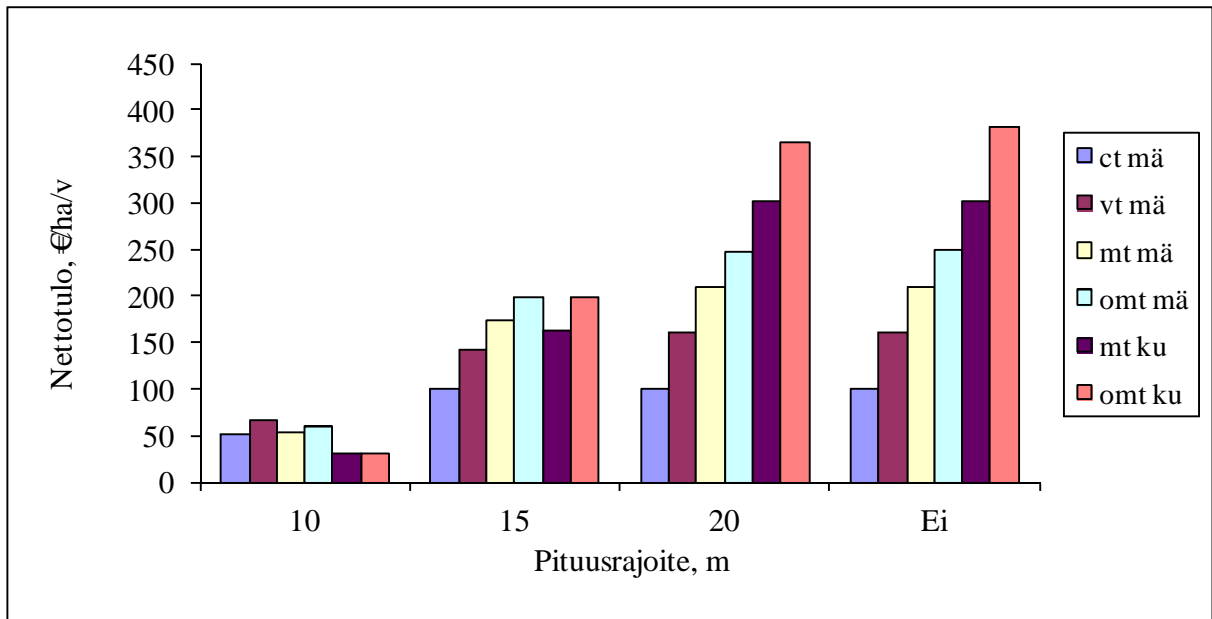
Kuva 4. Pituusrajoitteen vaikutus Pohjois-Suomen männiköiden tuottoarvoon kaikilla pituusrajoitteilla käytettäessä 2 prosentin korkoa.

3.2 Pituusrajoitteen vaikutus metsikön vuosittaiseen nettotuloon

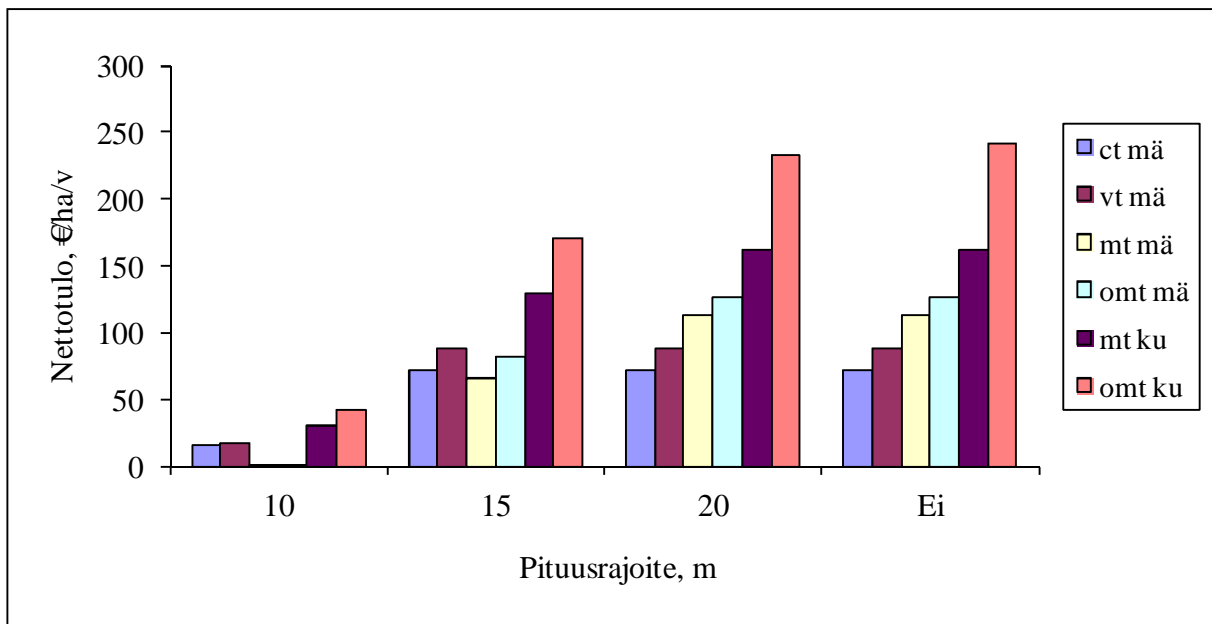
Eteläsuomalaisten männiköiden hehtaarikohtaiset nettotulot vaihtelevat 10 metrin pituusrajoitteella 52 ja 66 €/ha välillä. Kuusikoiden nettotulot vaihtelevat 31 ja 40 €/ha välillä. Pituusrajoitteen lieveneminen 15 metriin suurentaa männiköistä saatavia vuotuisia nettotuloja riippuen metsätyypistä 100–198 euroon hehtaarilla. Nettotulot suurenevät kuusikoissa 163–220 euroon hehtaarilla. Nettotulot vaihtelevat männiköissä 20 metrin pituusrajoitteella 100 ja 253 €/ha välillä. Nettotulot eivät enää suurene pituusrajoitteettomissa männiköissä. Vuosittainen hehtaarikohtainen nettotulo suurenee kuusikoissa, siirryttäessä 15 metrin pituusrajoitteesta 20 metrin pituusrajoitteeseen, välillä 301–371 €/ha. Pituusrajoitteettomissa kuusikoissa nettotulot eivät suurene merkittävästi (taulukko 5 ja kuva 5).

Väli-Suomen männiköiden ja kuusikoiden nettotulot vaihtelevat 10 metrin pituusrajoitteella 0 ja 42 €/ha välillä. Pituusrajoitteen lieveneminen männiköissä 10 metristä 15 metriin suurentaa vuotuisia nettotuloja männiköissä kaikilla metsätyypeillä välillä 66–88 €/ha ja kuusikoissa välillä 130–170 €/ha (taulukko 5). Männiköiden nettotulos vaihtelee 20 metrin pituusrajoitteella 71 ja 127 €/ha välillä ja kuusikoissa nettotulon vaihtelu on välillä 162 ja 233 €/ha. Nettotulot eivät suurene pituusrajoitteettomissa männiköissä ja kuusikoissa (taulukko 5 ja kuva 6).

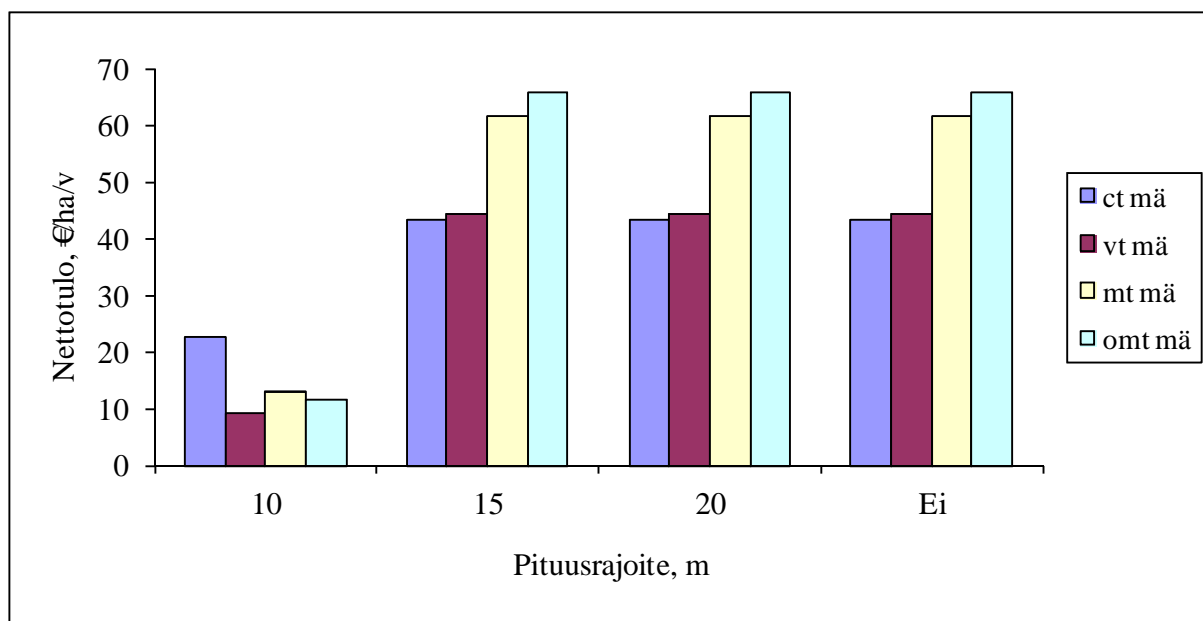
Pohjois-Suomen männiköiden hehtaarikohtaiset nettotulot vaihtelevat 10 metrin pituusrajoitteella 9 ja 23 €/ha välillä. Pituusrajoituksen lieventyminen 15 metriin suurentaa saatavia nettotuloja 43–68 €/ha:iin (taulukko 5 ja kuva 7).



Kuva 5. Pituusrajoitteen vaikutus nettotuloon Etelä-Suomen männiköissä ja kuusikoissa käytettäessä 2 prosentin korkoa.



Kuva 6. Pituusrajoitteen vaikutus nettotuloon Väli-Suomen männiköissä ja kuusikoissa käytettäessä 2 prosentin korkoa.



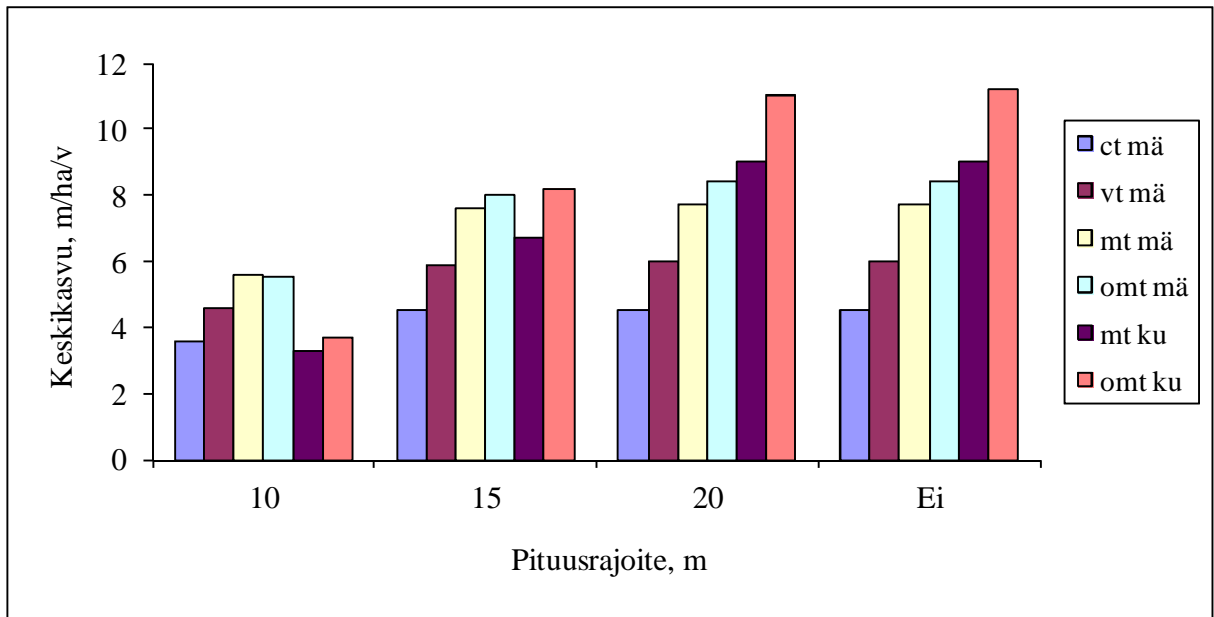
Kuva 7. Pituusrajoitteen vaikutus nettotuloon Pohjois-Suomen männiköissä käytettäessä 2 prosentin korkoa.

3.3 Pituusrajoitteen vaikutus metsikön vuotuisen keskikasvuun

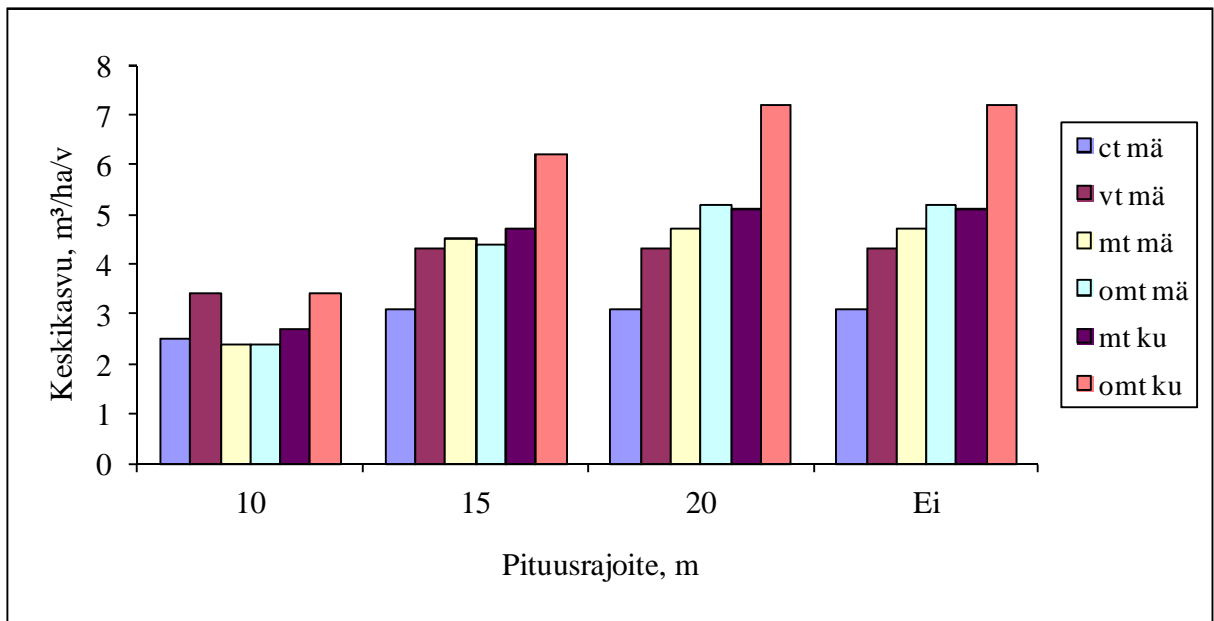
Vuotuinen keskikasvu vaihtelee Etelä-Suomen männiköissä kasvupaikan rehevyyden ja pituusrajoitteen mukaan. Kasvu on pienintä 10 metrin pituusrajoitteen ct-männiköllä (3,6 m³/ha) ja suurinta rajoittamattomalla omt-männiköllä (8,4 m³/ha). Männiköiden keskikasvut vaihtelevat 15 metrin pituusrajoitteella välillä 4,5 ja 8,0 m³/ha. 15 metriä lievemmillä pituusrajoitteilla keskikasvu ei suurene lukuun ottamatta omt-männikköjä suuremmalla lähtötiheydellä. Kuusikoiden keskikasvut vaihtelevat välillä 3,3 ja 11,2 m³/ha. Keskikasvut suurenevät 20 metrin pituusrajoitteeseen asti. Vuotuinen keskikasvu on 20 metrin pituusrajoitteella mt-metsätyypillä 9,0 m³/ha ja omt-metsätyypillä 11,0 m³/ha (taulukko 5 ja kuva 8).

Väli-Suomen männiköiden hehtaarikohtainen vuotuinen keskikasvu vaihtelee 10 metrin pituusrajoitteen ct-männikön 2,5 kuutiometristä omt-männikön rajoittamattoman kasvatuksen 5,2 kuutiometriin. Hehtaarikohtainen keskikasvun maksimi saavutetaan viimeistään 20 metrin pituusrajoitteella, jossa vuotuisen kasvun vaihtelu on 3,1 ja 5,2m³/ha välillä. Keskimääräinen vuotuinen keskikasvu vaihtelee Väli-Suomen kuusikoissa 10 metrin pituusrajoitteen 2,7 kuutiometriä hehtaarilla 20 metrin pituusrajoitteen 7,2 kuutiometriä hehtaarilla (taulukko 5 ja kuva 9). Keskikasvun suureneminen loppuu 20 metrin pituusrajoitteella.

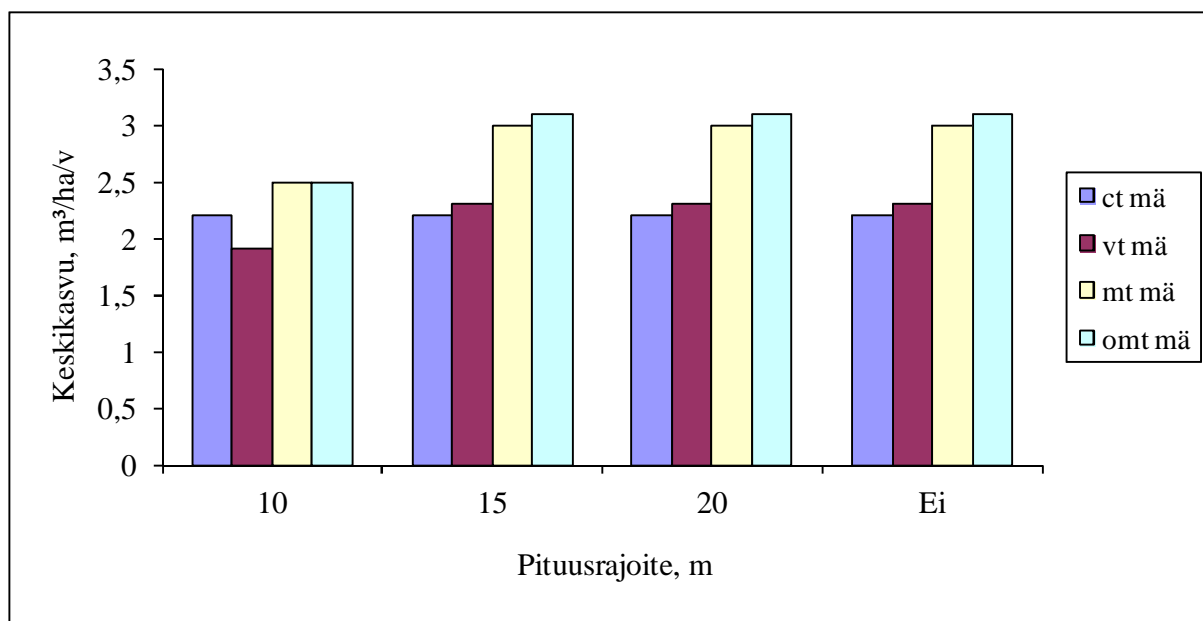
Vuosittainen keskikasvu Pohjois-Suomen männiköissä on 10 metrissä 1,9–2,5 m³/ha. Keski-
kasvu vaihtelee kasvupaikan rehevyyden mukaisesti pituusrajoitteen lieventyessä 15 metriin
2,2 ja 3,1 m³/ha välillä (taulukko 5 ja kuva 10).



Kuva 8. Pituusrajoitteen vaikutus puuntuotukseen Etelä-Suomen männiköissä ja kuusikoissa käytettäessä 2 prosentin korkoa.



Kuva 9. Pituusrajoitteen vaikutus puuntuotukseen Väli-Suomen männiköissä ja kuusikoissa käytettäessä 2 prosentin korkoa.



Kuva 10. Pituusrajoitteen vaikutus puuntuotokseen Pohjois-Suomen männiköissä käytettäessä 2 prosentin korkoa.

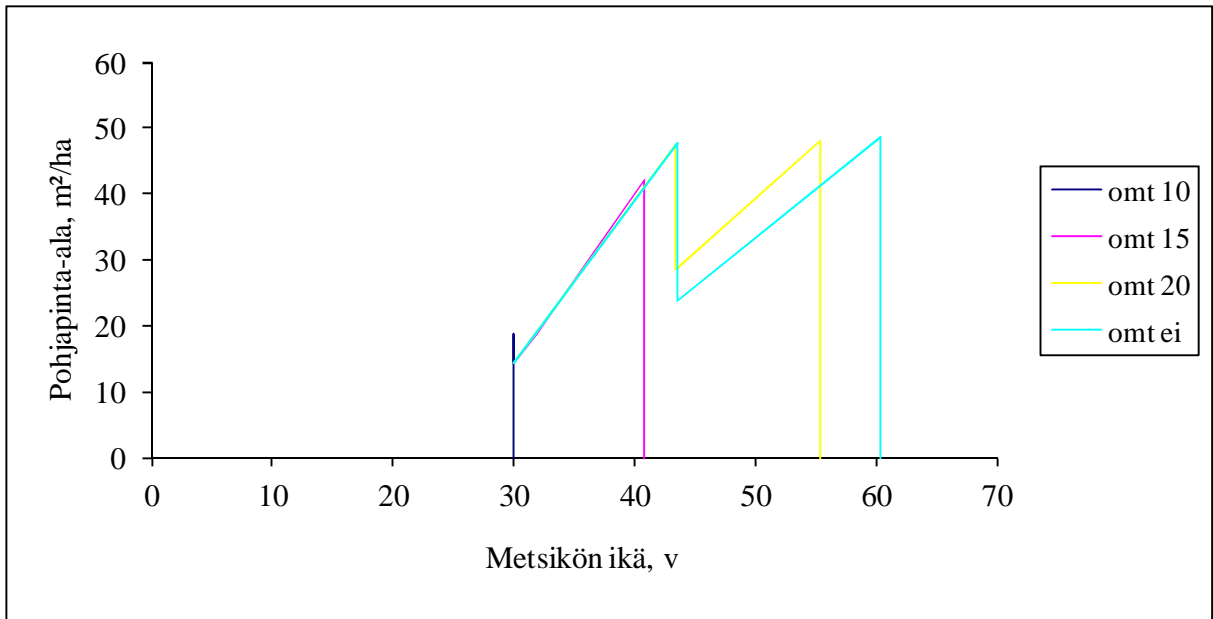
3.4 Optimikäsittelyt pituuskasvurajoitetuista metsiköissä

10 metrin pituusrajoitetun männikön ja kuusikon käsittelyohjelmana on metsän kasvatus lähelle 10 metrin valtapituutta, jonka jälkeen metsikkö päätehakataan. Päätehakuun ajankohta riippuu puulajista, kasvupaikan ilmasto-olosuhteista, metsikön lähtötiheydestä ja kasvupaikan rehevyydestä. Etelä- ja Väli-Suomen männiköt kasvatetaan harventamatta pituusrajoitteeseen asti lukuun ottamatta Väli-suomen ct-männikköä ja Etelä-Suomen omt-männikköä, jotka harvennetaan kerran ennen päätehakkuuta. Pohjois-Suomen männiköt harvennetaan kerran ennen päätehakkuuta (kuvat 15 ja 16). Männiköiden harvennukset tapahtuvat kasvupaikasta ja lämpösoma-alueesta riippuen 16–26 m²/ha pohjapinta-aloilla. Päätehakuut tapahtuvat 15–37 m²/ha pohjapinta-aloilla (kuvat 14–16). Metsikön lähtötiheydellä ei ole suurta vaikutusta kiertoaikaan. Etelä- ja Väli-Suomen kuusikot kasvatetaan harventamatta pituusrajoitteeseen saakka. Päätehakkuiden pohjapinta-alat vaihtelevat 19 ja 26 m²/ha välillä (kuvat 11–13). Metsiköiden hakkuukohtaiset ainespuu- ja energiapuukertymät vaihtelevat välillä 20 ja 55 m³/ha harvennuksissa ja välillä 52 ja 192 m³/ha päätehakkuissa (taulukko 7). Koko kiertoajan kokonaiskertymät vaihtelevat 76 ja 274 m³/ha välillä (taulukko 6).

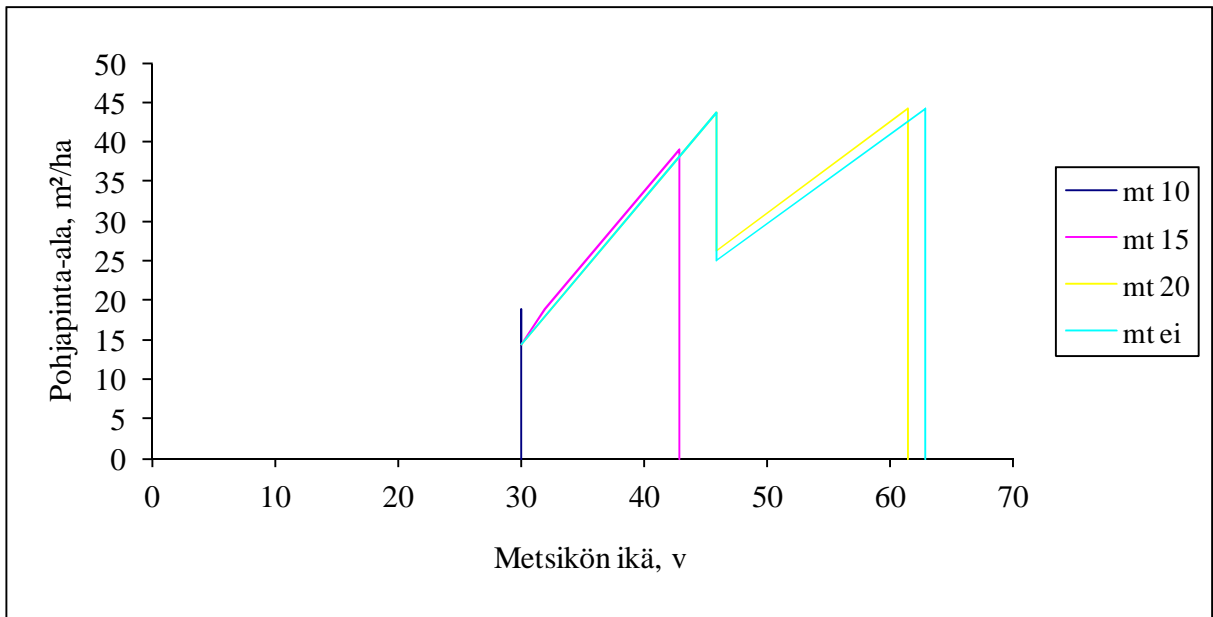
15 metrin pituusrajoitetun männikön käsittelyohjelmana on metsän kasvatus pituusrajoitteeseen asti. Metsikön pohjapinta-alaa säädellään 1–2 harvennuksella ennen päätehakkuuta. Kahden harvennuksen käsittelyohjelma on Väli-Suomen ct-männiköillä ja Pohjois-Suomen omt, mt ja ct-männiköillä. Muut männiköt harvennetaan kerran ennen päätehakkuuta (kuvat

14–16). Ensimmäiset harvennukset tapahtuvat metsiköiden saavutettua 16–45 m²/ha pohjapinta-alat. Toiset harvennukset tapahtuvat 23–43 m²/ha pohjapinta-aloilla. Päätehakkuut tapahtuvat 26–44 m²/ha pohjapinta-aloilla (kuvat 14–16). Tiheämpi lähtötiheys aikaistaa harvennuksia ja päätehakkuita 2–4 vuodella. Väli-suomen kuusikot harvennetaan kerran ennen päätehakkuita 39–43 m²/ha pohjapinta-aloilla. Etelä-Suomen kuusikot kasvatetaan ilman harvennuksia pituusrajoitteeseen asti, kunnes kuusikot hakataan (kuvat 11–13). Päätehakkuiden pohjapinta-alat vaihtelevat 39–47 m²/ha välillä. Aines- ja energiapuukertymät vaihtelevat 201 ja 411 m³/ha/kiertoaika välillä (taulukko 6). Puutavaralajisiirtymä on huomattavaa pituusrajoitteen lieventyessä 15 metriin. Männiköiden ainespuukertymät kaksinkertaistuvat ja kuusikoiden kertymät lähes kolminkertaistuvat siirryttäessä 15 metrin pituusrajoitteelle (taulukko 6). Hakkuukohtaiset puutavaralajikertymät kaksinkertaistuvat pituusrajoitteen lievetessä päätehakkuissa (taulukko 7). Pohjois-Suomen männiköissä saavutetaan metsänkasvatuksessa puutavaralajikertymien maksimimäärät (taulukot 6 ja 7).

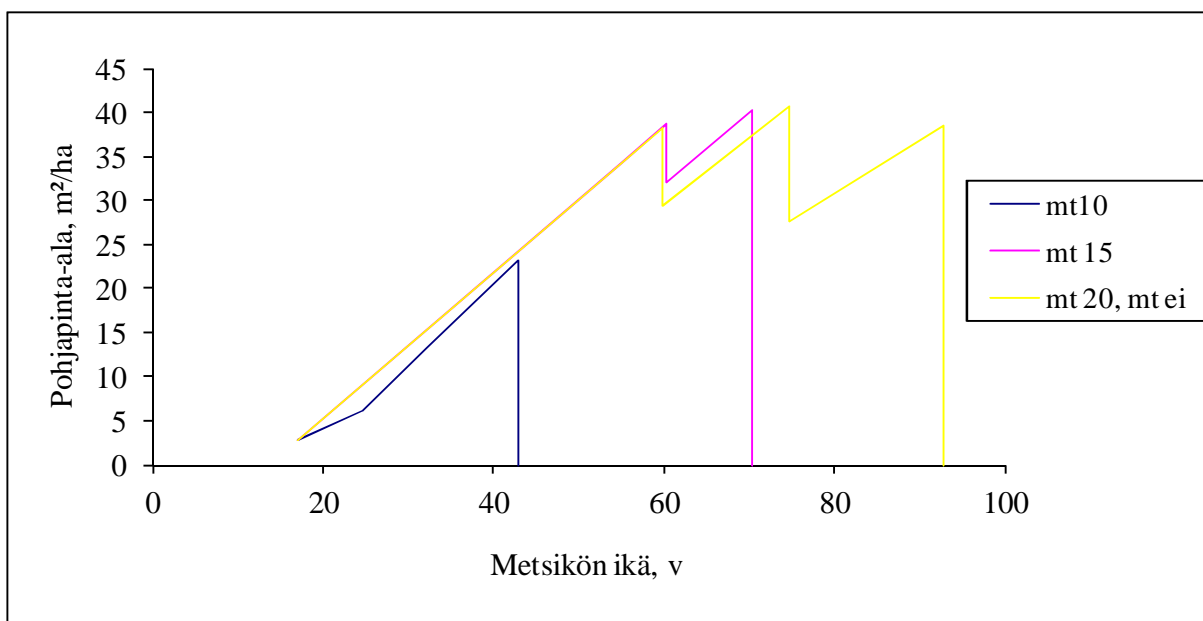
20 metriin pituusrajoitetun männikön ja rajoittamattoman männikön käsittelyohjelmissä metsää harvennetaan 1–2 kertaa ennen päätehakkuita. Kahden harvennuksen ohjelmalla käsitellään Etelä-Suomen omt-männiköt, Väli-Suomen ct-männiköt ja Pohjois-Suomen omt, mt ja vt-männiköt. Muut männiköt harvennetaan kerran ennen päätehakkuita (kuvat 14–16). Ensimmäiset harvennukset tehdään, kun metsikön pohjapinta-ala on 17–43 m²/ha. Toinen harvennus tehdään, kun pohjapinta-ala on 15–45 m²/ha. Päätehakkuut tehdään pohjapinta-alan ollessa 26–46 m²/ha. Tiheämpi lähtötiheys aikaistaa harvennuksia ja päätehakkuita 2–10 vuotta riippuen kasvupaikan ilmasto-olosuhteista ja metsätyypistä. Väli-suomen kuusikon käsittelyohjelmassa metsikkö harvennetaan 2 kertaa ennen päätehakkuita. Ensimmäinen harvennus tapahtuu 43 m²/ha ja toinen harvennus tapahtuu 40–45 m²/ha pohjapinta-aloilla. Etelä-Suomen kuusikot harvennetaan kerran ennen päätehakkuita 43–48 m²/ha pohjapinta-alalla. (kuvat 11–13). Päätehakkuut tapahtuvat 30–49 m²/ha pohjapinta-aloilla. Etelä-Suomen mt-kuusikon tiheämpi lähtötiheys aikaistaa harvennusta ja kiertoaikaa 3 vuodella. Aines- ja energiapuukertymät vaihtelevat 254 ja 683 m³/ha/kiertoaika välillä (taulukko 6). Männiköiden ainespuukertymä saavuttaa maksimin 20 metrin pituusrajoitteella. Kuusikoissa tapahtuu vielä tukkikertymän lisäystä rajoittamattomissa metsiköissä (taulukot 6 ja 7). Puuston keskiläpimitat päätehakkuissa vaihtelevat männiköissä 18 ja 27 cm:n välillä ja kuusikoissa 22 ja 29 cm:n välillä (taulukko 7).



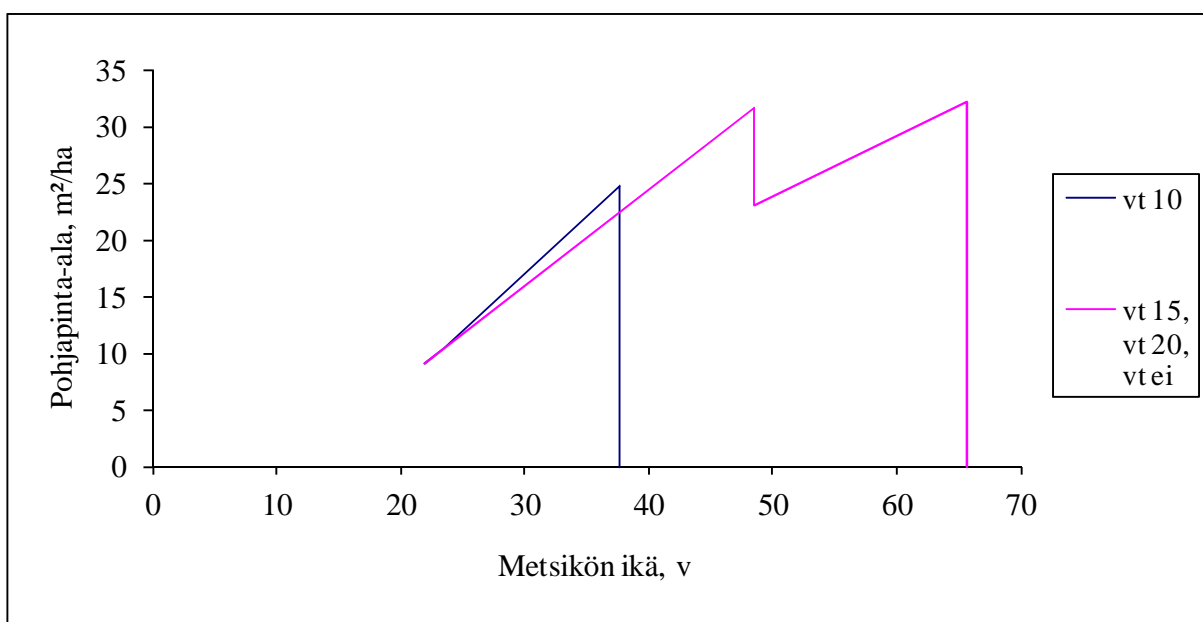
Kuva 11. Tyypillinen pituusrajoitetun metsikön käsittely Etelä-Suomen omt-kuusikossa 2 prosentin korkokannalla.



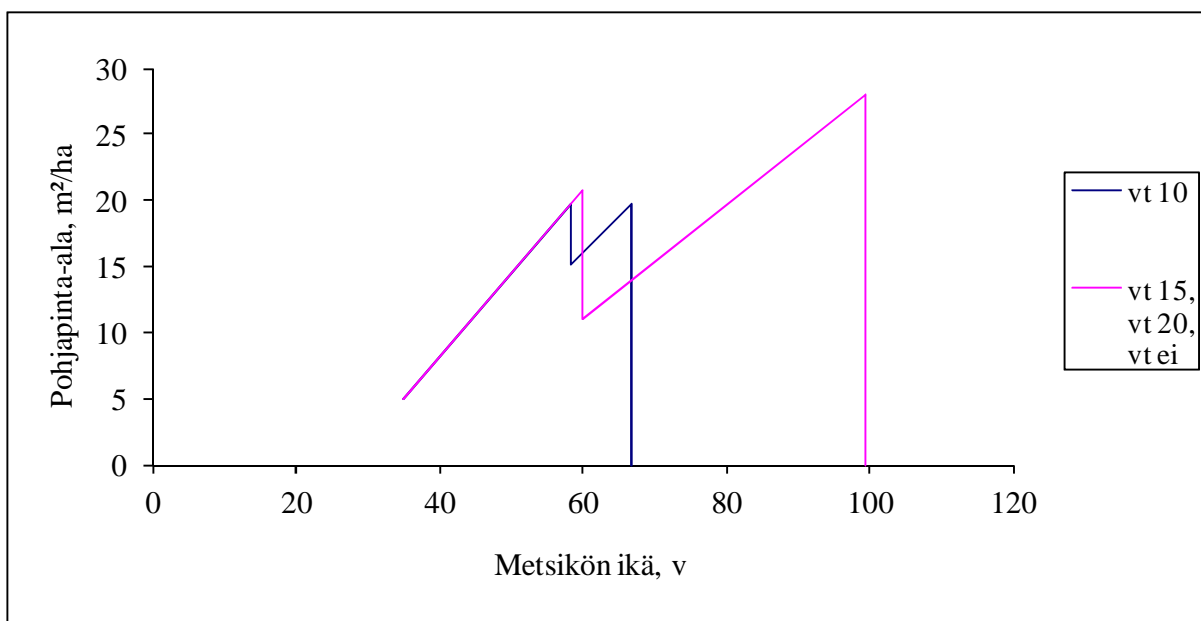
Kuva 12. Tyypillinen pituusrajoitetun metsikön käsittely Etelä-Suomen mt-kuusikossa 2 prosentin korkokannalla.



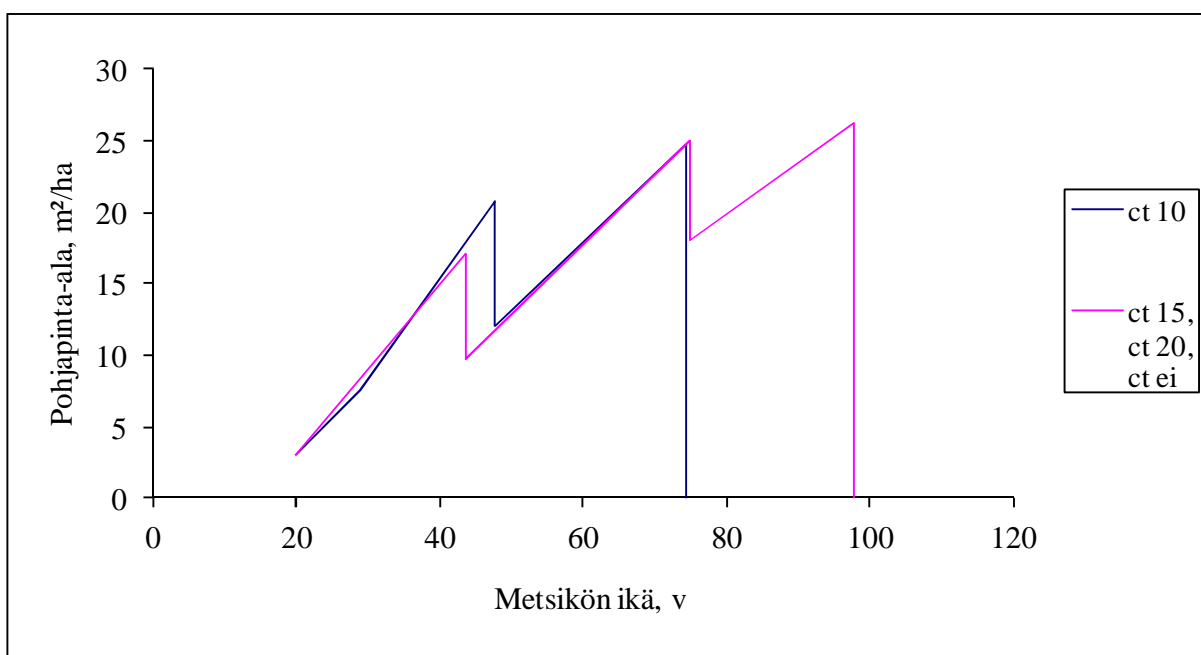
Kuva 13. Tyypillinen pituusrajoitetun metsikön käsittely Väli-Suomen mt-kuusikossa 2 prosentin korkokannalla.



Kuva 14. Tyypillinen pituusrajoitetun metsikön käsittely Väli-Suomen vt-männikössä 2 prosentin korkokannalla.



Kuva 15. Tyypillinen pituusrajoitetun metsikön käsittely Pohjois-Suomen vt-männikössä 2 prosentin korkokannalla.



Kuva 16. Tyypillinen pituusrajoitetun metsikön käsittely Pohjois-Suomen ct-männikössä 2 prosentin korkokannalla.

Taulukko 6. Metsiköiden hehtaariohittaiset aines- ja energiapuukertymät kiertoajan kuluessa eri pituusrajoitteilla. Kasvupaikat ovat kolmelta eri lämpösumma-alueilta.

Kasvupaikka	Pituusrajoite, m	Tukki, m ³	Kuitu, m ³	Energia, m ³
Etelä-Suomi				
Männiköt	10	9,0 – 39,1	134,0 – 176,6	3,8 – 6,4
	15	110,5 – 168,7	178,0 – 237,4	1,6 – 5,0
	20	110,5 – 330,3	182,5 – 241,0	3,4 – 5,0
	Ei	110,5 – 330,3	182,5 – 241,0	3,4 – 5,0
Kuusikot	10		92,7 – 104,2	5,7 – 6,4
	15	90,4 – 134,2	176,7 – 194,8	4,8 – 5,4
	20	357,4 – 396,7	191,8 – 209,1	4,2 – 4,9
	Ei	365,5 – 463,8	192,8 – 213,7	4,7 – 5,0
Väli-Suomi				
Männiköt	10		71,6 – 142,5	4,6–11,3
	15	39,7 – 111,3	159,5 – 265,3	1,6 – 8,3
	20	90,4 – 208,2	159,5 – 280,4	4,3 – 7,0
	Ei	90,4 – 208,2	159,5 – 280,4	4,3 – 7,0
Kuusikot	10	144,8 – 148,1	110,2 – 120,5	5,7 – 5,8
	15	144,8 – 148,1	181,7 – 204,5	4,8 – 5,8
	20	276,7 – 335,9	193,7 – 213,8	4,4 – 4,8
	Ei	276,7 – 385,9	193,7 – 214,3	4,4 – 4,6
Pohjois-Suomi				
Männiköt	10	16,5 – 16,6	121,3 – 152,9	4,4 – 7,0
	15, 20, Ei	65,3 – 115,0	141,2 – 197,0	4,2 – 6,5

Taulukko 7. Metsiköiden hakkuukohtaiset aines- ja energiapuukertymät hehtaarilla eri pituusrajoitteilla ja puuston keskiläpimitat päätehakkuussa. Kasvupaikat ovat kolmelta eri lämpösumma-alueilta.

Kasvupaikka	Pituusrajoite, m	Harvennus, m ³	Päätehakkuu, m ³	Läpimitta, cm
Etelä-Suomi				
Männiköt	10	20 – 25	154 – 192	15,6 – 17,3
	15	25 – 87	207 – 329	20,9 – 22,7
	20	34 – 139	207 – 429	19,7 – 27,0
	Ei	34 – 139	207 – 432	19,7 – 26,8
Kuusikot	10		52 – 109	12,8
	15		287 – 334	18,7 – 19,2
	20	123 – 159	400 – 451	25,2 – 26,9
	Ei	123 – 195	400 – 495	25,2 – 29,2
Väli-Suomi				
Männiköt	10	25 – 55	56 – 149	10,6 – 16,0
	15	20 – 81	122 – 273	16,6 – 22,0
	20	30 – 123	122 – 336	18,3 – 24,0
	Ei	30 – 124	122 – 351	18,3 – 23,9
Kuusikot	10		116 – 126	13,4 – 14,0
	15	36 – 46	289 – 324	19,8 – 20,3
	20	30 – 147	128 – 422	21,6 – 27,0
	Ei	30 – 147	128 – 433	21,6 – 27,9

		Pohjois-Suomi		
Männiköt	10	20 – 47	70 – 143	13,5 – 17,8
	15, 20, Ei	20 – 89	108 – 235	18,5 – 27,2

3.5 Korkokannan vaikutus kiertoaikaan, vuotuisen keskikasvuun ja -nettotuloon

Korkokannan muutoksella ei ole vaikutusta 10 metrin pituusrajoitteella havumetsiköiden kiertoaikaan, vuotuisen keskikasvuun eikä vuotuisen nettotuloon (taulukko 9 ja kuvat 17, 19). Kun pituusrajoite lievenee, niin koron suureneminen aikaistaa harvennuksia ja lyhentää metsiköiden kiertoaikoja. Suuren koron käyttö aikaistaa harvennuksia 1–22 vuotta 15 metrin pituusrajoitteella. Metsiköiden kiertoajat lyhenevät Pohjois-Suomen männiköissä 9–32 vuotta ja Väli- ja Etelä-Suomen kuivien kankaiden männiköissä 9–15 vuotta (taulukot 8 ja 9). Muiden männiköiden kiertoaikoihin ei 15 metrin pituusrajoitteella ole vaikutusta. Männiköissä, joissa kiertoaika lyhenee, keskikasvut pienenevät 0,2 kuutiometriä hehtaarilla ja hehtaarikohtainen nettotulo vähenee 9–16 euroa hehtaarilla. Korkeamman koron käyttämisellä ei ole vaikutusta Etelä- ja Väli-Suomen kuusikkojen kiertoaikoihin, keskikasvuun ja nettotuloihin.

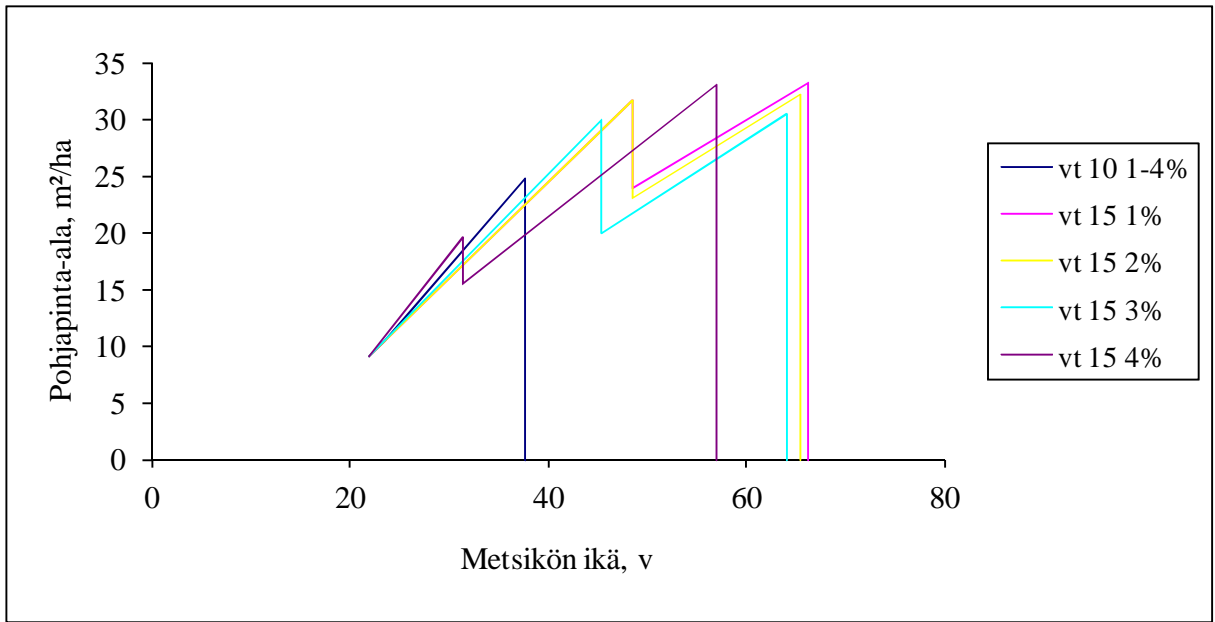
Männiköiden harvennukset aikaistuvat 1–24 vuodella lievillä pituusrajoitteilla ja ilman rajoitetta suuremmalla korko-odotuksella. Kiertoajat lyhenevät männiköissä Pohjois-Suomessa 9–41 vuotta, Väli-Suomessa 16–36 vuotta ja Etelä-suomessa 12–25 vuotta (taulukko 8 ja kuva 18). Männiköiden keskikasvut pienenevät 0,2 m³/ha ja hehtaarikohtaiset nettotulot pienenevät 26–43 €/ha/v. Väli-Suomen kuusikoissa kiertoaika lyhenee käytettäessä suurta korkoa 19–27 vuodella, keskikasvu pienenee 1 m³/ha ja nettotulo pienenee 60 €/ha/v (taulukko 9 ja kuva 20). Etelä-Suomen kuusikoissa kiertoaika lyhenee 2–5 vuodella suurta korkoa käytettäessä, keskikasvu pienenee 0,1 kuutiometriä ja nettotulot pienenevät 5–12 euroa hehtaarilla vuodessa.

Taulukko 8. Korkokannan suurenemisen vaikutus ensiharvennusten, kasvatushakkuiden ja päätehakkuiden ajankohtiin eri pituusrajoitusalueilla. Korkokanta suurenee 1 prosentista 4 prosenttiin. Männiköt ovat kolmelta lämpösumma-alueelta ja kuusikot ovat kahdelta lämpösumma-alueelta.

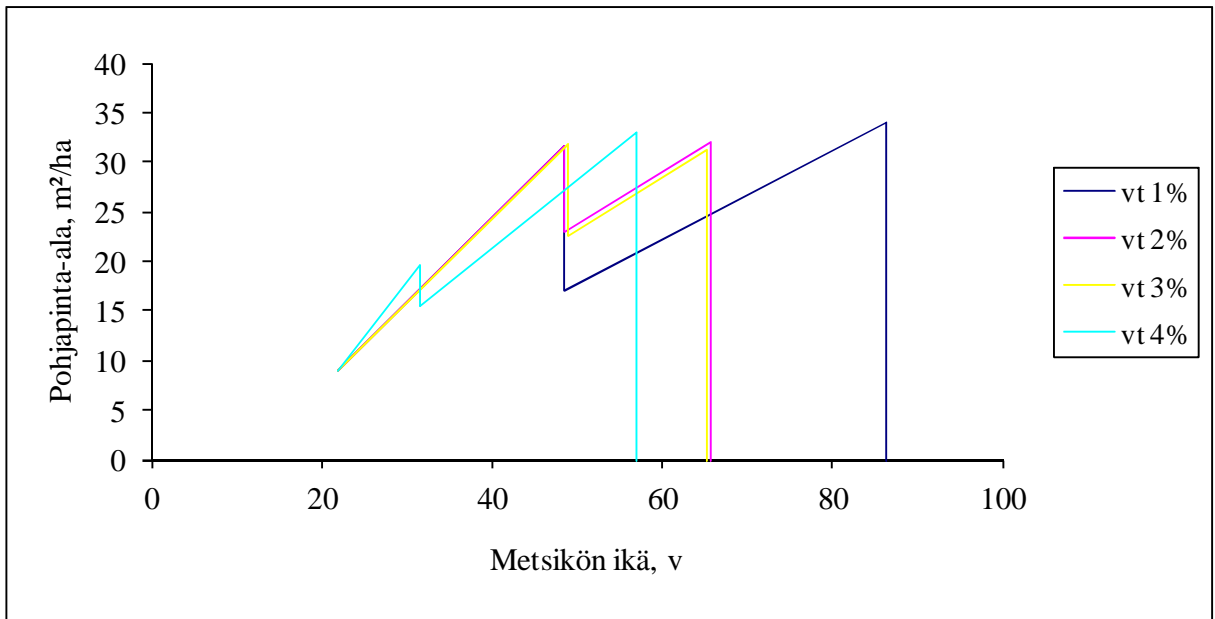
Rajoitus	Männiköt			Kuusikot		
	1.harvennus	2.harvennus	Päätehakkuu	1.harvennus	2.harvennus	Päätehakkuu
15	1–17	1–14	2–32	3–22	1–2	1–2
20	1–20	2–16	9–36	1–2	9–10	2–27
Ei	2–24	2–16	11–30	1–2	1–11	4–27

Taulukko 9. Korkokannan vaikutus kiertoaikaan, vuotuisen puuntuotokseen ja vuotuisen nettotuloon Väli-Suomen vt-metsätyypin pituusrajoitetussa männikössä ja mt-metsätyypin kuusikossa.

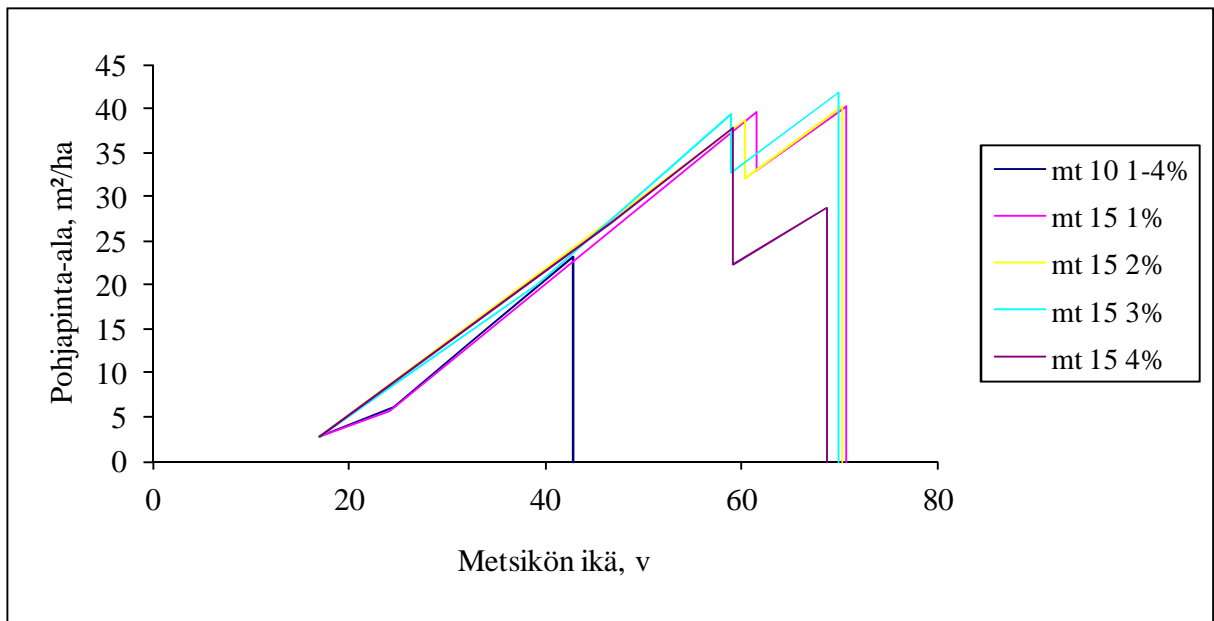
Korkokanta r	Pituusrajoite m	Kiertoaika v	Keskikasvu m ³ /ha/v	Nettotulo €/ha/v
Vt-männikkö				
1,2,3,4	10	37,6	3,4	16,9
1	15	66,3	4,3	89,3
2	15	65,6	4,3	87,8
3	15	64,2	4,3	82,6
4	15	57,1	4,3	73,7
1	20	86,4	4,2	107,9
2	20	65,6	4,3	87,8
3	20	65,3	4,3	87,0
4	20	57,1	4,2	73,7
1	Ei	86,4	4,2	107,6
2	Ei	65,6	4,3	87,8
3	Ei	65,3	4,3	87,0
4	Ei	57,1	4,2	73,7
Mt-kuusikko				
1,2,3,4	10	42,8	2,7	30,9
1	15	70,7	4,7	130,0
2	15	70,4	4,7	129,6
3	15	69,9	4,8	134,1
4	15	68,7	4,4	112,6
1	20	102,1	5,2	173,6
2	20	92,7	5,1	162,4
3	20	77,0	4,7	134,9
4	20	74,9	4,3	114,3
1	Ei	102,1	5,2	173,6
2	Ei	92,7	5,1	162,4
3	Ei	77,0	4,7	134,9
4	Ei	74,7	4,3	114,5



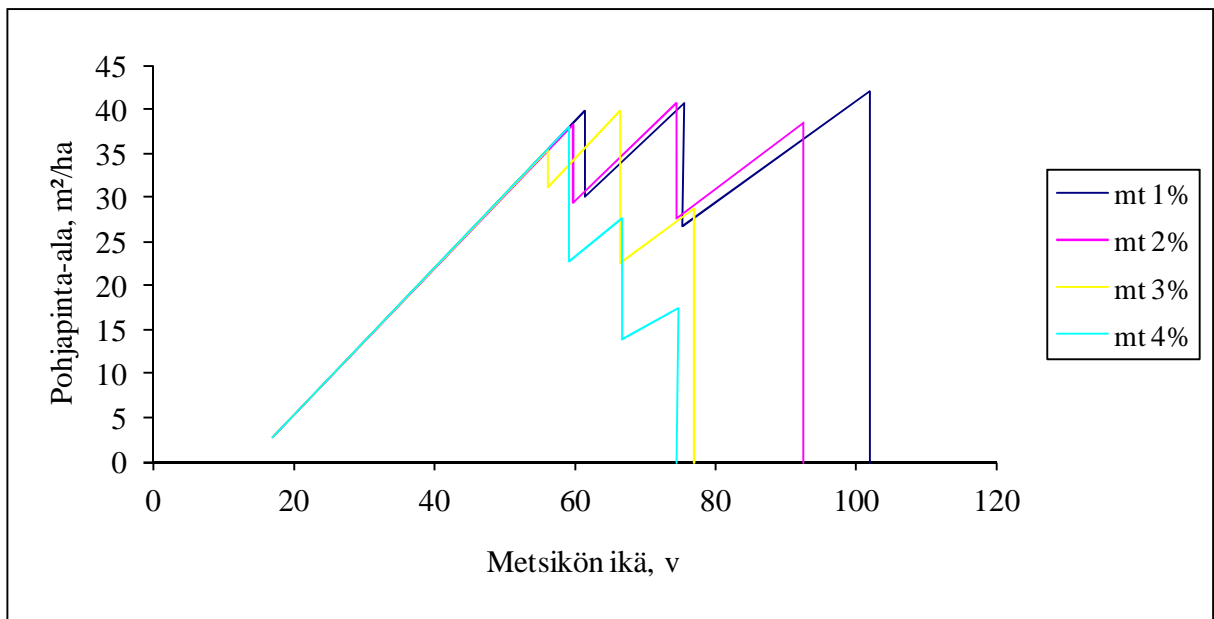
Kuva 17. Korkokannan vaikutus Väli-Suomen vt-männikön pohjapinta-alan kehitykseen ja kiertoajan pituuteen 10 ja 15 metrin pituusrajoitteilla.



Kuva 18. Korkokannan vaikutus Väli-Suomen vt-männikön pohjapinta-alan kehitykseen ja kiertoajan pituuteen 20 metrin pituusrajoitealueella ja ilman pituusrajoitetta.



Kuva 19. Korkokannan vaikutus Väli-Suomen mt-kuusikon pohjapinta-alan kehitykseen ja kiertoajan pituuteen 10 ja 15 metrin pituusrajoitteilla.



Kuva 20. Korkokannan vaikutus Väli-Suomen mt-kuusikon pohjapinta-alan kehitykseen ja kiertoajan pituuteen 20 metrin pituusrajoitteella ja ilman pituusrajoitetta.

3.6 Korkokannan vaikutus tuottoarvoon

Tuottoarvot pienenevät koron suuretessa. Etelä-Suomen havumetsiköiden tuottoarvot ovat pääosin positiivisia koron suurentumisesta huolimatta. Keinollisesti viljeltyjen männiköiden tuottoarvot ovat negatiivisia rehevien kasvupaikkojen männiköissä ja kuusikoissa, kun laskentakorkona käytetään 3 tai 4 prosenttia ja pituusrajoite rajoittaa metsänkasvatusta ankarimmin

(taulukko 10). Etelä-Suomen metsiköistä on saatavissa 1–4 prosentin investointituotto (taulukko 13).

Väli-Suomen rehevien kasvupaikkojen männiköiden tuottoarvot ovat negatiivisia kaikilla koroilla, kun pituusrajoite on 10 metrissä. Kun pituusrajoite lievenee, niin tuottoarvot ovat pääosin negatiivisia rehevillä kasvupaikoilla 3 ja 4 prosentin koroilla. Tuottoarvot ovat negatiivisia 10 metrin pituusrajoitteen kuusikoissa 3 ja 4 prosentin koroilla ja tuoreen kankaan metsiköissä lievemmillä rajoitteilla. Muiden kasvupaikkojen havumetsiköiden tuottoarvot ovat positiivisia korosta huolimatta (taulukko 11). Väli-Suomen metsiköistä on saatavissa 1–3 prosentin investointituotto (taulukko 13).

Pohjois-Suomen männiköiden tuottoarvot ovat negatiivisia rehevillä kasvupaikoilla kaikilla koroilla 10 metrin pituusrajoitteella. Koron suureneminen muuttaa karumpia kasvupaikkoja tuottoarvoltaan negatiiviseksi pituusrajoitteen lievenemisestä huolimatta. Lähes kaikki kasvupaikat ovat tuottoarvoltaan negatiivisia 3 ja 4 prosentin koroilla (taulukko 12). Pohjois-Suomen männiköistä on saatavissa 1–3 prosentin investointituotto (taulukko 13).

Taulukko 10. Tuottoarvot eriteltynä pituusrajoitteittain ja metsätyypeittäin eri koroilla Etelä-Suomen männiköissä ja kuusikoissa. Pr = pituusrajoite.

Dd 1 300	Männiköt	Korko			
		1 %	2 %	3 %	4 %
Pr	Kp				
10 m	Omt	3 876	992	92	-333
	Mt	3 417	793	-115	-474
	Vt	5 780	2 021	586	146
	Ct	5 027	1 753	755	315
15 m	Omt	14 327	4 933	2 234	613
	Mt	12 818	4 211	1 633	472
	Vt	11 270	3 707	1 537	586
	Ct	8 237	2 616	1 039	406
20 m	Omt	18 220	5 673	2 219	765
	Mt	15 794	4 988	1 751	485
	Vt	12 638	3 902	1 537	586
	Ct	8 359	2 613	1 039	406
Ei	Omt	18 291	5 809	2 219	765
	Mt	15 794	4 988	1 751	485
	Vt	12 638	3 902	1 537	586
	Ct	8 359	2 613	1 039	406

Dd 1 300	Kuusikot	Korko			
		1 %	2 %	3 %	4 %
Pr	Kp				
10 m	Omt	2 050	283	-283	-549
	Mt	1 333	-21	-453	-655
15 m	Omt	16 595	6 046	2 720	1 187
	Mt	11 848	4 067	1 631	519
20 m	Omt	27 586	9 947	4 469	2 022
	Mt	21 223	7 251	2 927	1 096
Ei	Omt	28 584	10 068	4 449	2 032
	Mt	21 725	7 217	2 927	1 096

Taulukko 11. Tuottoarvot eriteltynä pituusrajoitteittain ja metsätyypeittäin eri koroilla Väli-Suomen männiköissä ja kuusikoissa. Pr = pituusrajoite.

Dd 1 000	Männiköt	Korko			
		1 %	2 %	3 %	4 %
Pr	Kp				
10 m	Omt	-681	-913	-980	-1 005
	Mt	-676	-908	-974	-999
	Vt	2 420	678	130	-106
	Ct	1 835	528	133	-35
15 m	Omt	5 252	1 219	-95	-545
	Mt	4 727	805	-44	-526
	Vt	6 622	2 040	705	136
	Ct	5 137	1 389	431	68
20 m	Omt	7 195	1 529	39	-477
	Mt	6 467	1 240	-59	-545
	Vt	7 129	2 056	705	136
	Ct	5 137	1 389	431	68
Ei	Omt	7 195	1 529	39	-477
	Mt	6 467	1 240	-59	-545
	Vt	7 129	2 156	705	136
	Ct	5 137	1 389	431	68

Dd 1 000	Kuusikot	Korko			
		1 %	2 %	3 %	4 %
Pr	Kp				
10 m	Omt	2 222	295	-303	-578
	Mt	1 214	-146	-564	-750
15 m	Omt	11 904	3 545	1 151	128
	Mt	7 889	1 964	336	-418
20 m	Omt	15 643	4 477	1 381	183
	Mt	9 923	2 263	310	-404
Ei	Omt	15 839	4 477	1381	183
	Mt	9 923	2 263	310	-404

Taulukko 12. Tuottoarvot eriteltynä pituusrajoitteittain ja metsätyypeittäin eri koroilla Pohjois-Suomen männiköissä. Pr = pituusrajoite.

Dd 750	Männiköt	Korko			
		1 %	2 %	3 %	4 %
Pr	Kp				
10 m	Omt	-49	-719	-900	-950
	Mt	-53	-719	-903	-965
	Vt	804	-71	-315	-405
	Ct	1 990	556	118	-33
15 m, 20 m	Omt	3 236	192	-568	-832
	Mt	2 906	96	-622	-857
	Vt	2 575	378	-180	-360
	Ct	3 158	783	198	-16

Taulukko 13. Sisäinen korko. Taulukkoon on koottu taulukoista 10–12 keinollisesti viljeltyjen metsiköiden positiivisten tuottoarvojen tuottoprosentit. Koron suuruus ilmaisee kyseiseen metsikköön sijoitetun investoinnin kannattavuuden. Neg = negatiivinen tuottoprosentti kaikilla koroilla.

Dd 1 300 Rajoite	Mänty	Mt	Vt	Ct	Kuusi	Mt
	Omt				Omt	
10	1–3	1–2	1–4	1–4	1–2	1
15, 20, Ei	1–4	1–4	1–4	1–4	1–4	1–4

Dd 1 000 Rajoite	Mänty	Mt	Vt	Ct	Kuusi	Mt
	Omt				Omt	
10	neg	neg	1–3	1–3	1–2	1
15	1–2	1–2	1–4	1–4	1–4	1–3
20, Ei	1–3	1–2	1–4	1–4	1–4	1–3

Dd 750 Rajoite	Mänty	Mt	Vt	Ct	Kuusi	Mt
	Omt				Omt	
10	neg	neg	1	1–3		
15,20	1–2	1–2	1–2	1–3		

4 TULOSTEN TARKASTELU

4.1 Pituusrajoitteen vaikutus metsikön tuottoarvoon, keskikasvuun ja nettotuloon

Metsiköiden tuottoarvot ovat negatiivisia 10 metrin pituusrajoitteella Pohjois- ja Väli-Suomen omt ja mt-männiköissä. Myös lähtötiheydeltään harvemmissa Etelä- ja Väli-Suomen kuusi-koissa on negatiivisia tuottoarvoja. Keinollisesti viljeltyjen metsiköiden kasvatusta ei ole näillä kasvupaikoilla taloudellisesti kannattavaa. Karumpien kasvupaikkojen tuottoarvot ovat positiivisia myös tällä pituusrajoitteella. Uudistamis- ja taimikonhoitokustannukset ovat rehevillä kasvupaikoilla suuremmat kuin karuilla kasvupaikoilla. Rehevän kasvupaikan suurempi kasvupotentiaali ei riitä kompensoimaan kuluja riittävästi, koska pituusrajoite estää metsikön normaalin kasvatuksen ja tavanomaisemman kiertoajan. Etelä-Suomen 10 metrin pituusrajoitteen metsiköiden tuottoarvot ovat pääosin positiivisia kasvupaikasta riippumatta. Metsikköjä on kannattavampaa kasvattaa 10 metrin pituusrajoitteella karummalla kasvupaikalla kuin rehevällä kasvupaikalla. Pituusrajoitteen lievetessä tuottoarvot suurenevat. Metsikön kasvatuksesta tulee kannattavampaa, koska metsänkasvatuksessa voidaan noudattaa tavanomaisempia käsittelytapoja. Rehevempien kasvupaikkojen metsänkasvatusta muuttuu Etelä-Suomessa karumpia kasvupaikkoja kannattavammaksi. Tuottoarvot suurenevat kasvupaikoittain rehevyyden lisääntyessä noin 35 prosenttia. Väli-Suomen vt- ja ct-männiköt ja Pohjois-Suomen kiuvan kankaan männiköt ovat omilla lämpösumma-alueillaan tuottoarvoltaan kannattavimpia metsiköitä. Metsikön lähtötiheys vaikuttaa tuottoarvoon siten, että tiheimmässä kasvavat lähötömetriköt ovat tuottoarvoltaan suurempia kuin harvemmat metsiköt. Pituusrajoite rajoittaa metsikön kiertoaikaa. Metsiköiden kiertoajat ovat sitä lyhyempiä, mitä suurempi pituusrajoite on. Metsiköistä saatavat nettotuotot ovat 10 metrin pituusrajoitealueilla saatavissa metsiköistä suhteellisen lyhyen kasvatuksen jälkeen. Tuottoarvolaskennan ominaisuutena voidaan mainita, että metsiköstä diskontatut ja prolongoidut tuotot ja kustannukset ovat sitä painoarvoisempia mitä lähempänä ne ovat laskenta-ajankohtaa. Suuri korkokanta lyhentää metsikön kiertoaikaa pienentäen samalla kiertoajan kokonaispuuntuotosta. Vaikutus tuottoarvoon on päinvastainen pientä korkokantaa käytettäessä. Metsikön kiertoaika pitenee ja kokonaispuuntuotanto kasvaa. Metsiköitä voidaan käsitellä sitä tavanomaisemmilla käsittelytavoilla ja kiertoajoilla mitä lievemmäksi pituusrajoite muuttuu. Tuottojen ja kustannusten etääntyminen laskenta-ajankohdasta on nähtävissä lievemmin pituusrajoitettujen metsiköiden tuottoarvolaskelmissa. Tuottoarvot suurenevat. Metsikköjen huomattava tuottoarvojen suureneminen 15–20 metrin valtapituuksilla johtuu siitä, että kyseisenä ajankohtana tapahtuu merkittävää puuston arvo-

kasvua (kuitu- ja tukkisiirtymä). Metsikössä kasvaa enemmän ainespuuta. Kuusikossa arvokasvua tapahtuu pidempään kuin männikössä. Metsikön ikääntyessä puuston arvokasvu vähenee kiertoajan loppua kohden. Suurella korkovaatimuksella vanha arvokasvuun menettävä metsikkö kannattaa hakata aiemmin, koska lisääntyvä kiertoaika pienentää tuottoarvoa, vuotuista keskikasvua hehtaarille ja vuotuista hehtaarikohtaista nettotulosta.

Kun tuottoarvoa pidetään taloudellisesti kannattavan sijoituksen tunnuslukuna, niin havupuumetsikköä ei tämän tutkimuksen perusteella kannata kasvattaa Etelä-Suomen rehevien kasvupaikkojen männiköissä pitkälti yli 27 cm rinnankorkeusläpimitan ja kuusikoissa yli 29 cm rinnankorkeusläpimitan. Muilla lämpösumma-alueilla ja kasvupaikoilla päätehakkuut tulee tehdä pienemmillä rinnankorkeusläpimitoilla. Mitä rehevämpi männikön kasvupaikka on, sen kannattavampaa tuottoarvon suhteen on kasvattaa mäntyä 20 metrin valtapituuteen asti pituusrajoitealueilla. Karummissa männikön kasvupaikoissa tuottoarvon määrä vähenee jo 15 metrin pituusrajoitteen jälkeen. Kuusikkoa on kannattavampaa kasvattaa rehevässä metsätyypissä kuin mäntyä. Mitä lievempi pituusrajoite, sitä kannattavampaa on kasvattaa kuusta mt- ja omt-metsiköissä. Metsikön taloudellista tulosta saadaan parannettua, kun kasvatetaan Väli- ja Etelä-Suomen männiköitä tiheimmällä kasvuasennolla. Mäntyä on suhteellisesti kannattavampaa kasvattaa Pohjois-Suomessa rehevämmällä kasvupaikalla kuin eteläisessä Suomessa pituusrajoitteen lievetessä.

Vuotuiset hehtaarikohtaiset nettotulot suurenevät männiköissä ja kuusikoissa 20 metrin pituusrajoitteeseen saakka. Nettotulot suurenevät 200–400 prosenttia pituusrajoitteen lievetessä 15 metriin. Kun pituusrajoite lievenee 20 metriin, niin nettotulot ovat 29–90 prosenttia suuremmat edelliseen rajoitteeseen verrattuna. Kuusikoissa nettotulojen suureneminen jatkuu männiköitä pidempään. Vuotuisten hehtaarikohtaisten nettotulojen suureneminen johtuu pituusrajoitteen lievenemisestä, puuston arvokasvusta ja kiertoajan pitenemisestä. Lievemmin pituusrajoitettu metsikkö tuottaa enemmän ainespuuta 15- ja 20 metrin rajoitusalueilla. Metsikköä voidaan kasvattaa tavanomaisin metsän käsittelytavoin ja kiertoajoin. Kiertoajan piteneminen kasvattaa kokonaispuuntuotantoa ja täten keskimääristä vuotuista puuntuotosta.

Tämän tutkimuksen vuotuinen keskikasvu vaihtelee männiköissä Pohjois-Suomen 0,8 kuutiometrin hehtaarikohtaisesta kasvusta Etelä-Suomen rehevän metsätyypin 8,4 kuutiometriin hehtaarilla. Suurinta keskikasvua tapahtuu 10 ja 15 metrin pituusrajoitteiden välillä, jolloin puuston keskikasvu on suurimmillaan ikäänsä nähden. Kasvu jatkuu vielä 20 metrin pituusrajoitteeseen saakka, kunnes keskikasvu tasaantuu männiköissä aikaisemmin kuin kuusikoissa.

Keskikasvun suureneminen on selitettävissä puuntuotoksen lisääntymisellä kiertoajan pitene-
misen takia. Metsiköiden käsittelyt toteutetaan sitä tavanomaisemmin mitä lievempi on sekto-
rimetsikön pituusrajoite. Optimointi maksimoi metsiköstä saatavan taloudellisen hyödyn, si-
ten että kaikki pituusrajoitteen puitteissa saatavat kasvu- ja tuotospotentiaalit hyödynnetään.

4.2 Pituuskasvurajoitettujen metsiköiden optimikäsittelyt

Pituuskasvurajoitetun metsikön kasvatus on sitä rajallisempaa mitä lähempänä kiitoaluetta
metsikkö kasvaa. Metsiköt kasvatetaan 10 metrin pituusrajoitteella lähelle 10 metrin valtipi-
tuutta. Karummilla kasvupaikoilla tehdään harvennus ennen päätehakkuuta. Hitaampi pituus-
kasvu mahdollistaa puuston kasvattamisen pituusrajoitteen alla riittävän järeäksi varsinkin
Pohjois-Suomessa. Suurin osa optimoitujen havumetsiköiden hakkuukohtaisista kuitu- ja
energiapuukertymistä ylittää 30 m³/ha, mutta leimikkokohtaisten harvennusten ja päätehak-
kuiden kokonaiskertymät eivät ylitä 200 kuutiometriä (taulukot 6 ja 7). Korjuun kannatta-
vuutta voidaan parantaa keskittämällä hakkuuta useammalle vierekkäiselle leimikkokuvialle,
jolloin korjattavaa puutavaraa kertyy enemmän. Tällöin myös metsänomistajan taloudellinen
tulos paranee. Männiköissä voidaan tuottaa oikea-aikaisilla hoitotoimenpiteillä pieniä määriä
tukkia. Pääosa puutavaralajikertymistä on kuitua ja energiapuuta. Tuottoarvoltaan negatiiviset
metsiköt kannattaa uudistaa luontaisesti ja kasvattaa vähin hoitotoimin. Metsikön kasvatus 10
metrin valtipituuteen on taloudellisen tuloksen kannalta kannattavampaa tehdä Etelä-
Suomessa mahdollisimman rehevällä kasvupaikalla tiheämpänä lähtömetsikkönä kuin har-
vempana metsikkönä.

Männiköiden kasvua säädellään 1–2 harvennuksella pituusrajoitteen lievetessä 15 metriin.
Karumpi kasvupaikka ja lämpösumma-alue mahdollistavat metsikölle pidemmän kiertoajan ja
useampia harvennuksia. Rehevämmät kasvupaikat kannattaa harventaa ensimmäisen kerran
karumpia kasvupaikkoja myöhemmin pidemmällä valtipituudella ja suuremmalla puuston
pohjapinta-alalla. Pituusrajoiteoptimoinnilla otetaan huomioon ravinteikkaamman kasvupai-
kan suurempi puuston tuotantokyky. Kuusikot kasvatetaan männikköjä tiheämpinä ja kuusik-
kojen harvennukset tehdään voimakkaampina kuin männikköjen harvennukset.

Pituusrajoitteen lievetessä yli 20 metrin männikköjä käsitellään 1–2 harvennuksella ennen
päätehakkuita. Pituusrajoitteella ei ole suurta vaikutusta harvennusten määrään 15 metrin pi-
tuusrajoitteen jälkeen. Ainoastaan Etelä-suomen rehevien kasvupaikkojen männiköt, Väli-
Suomen kuivan kankaan männiköt ja Pohjois-Suomen männiköt harvennetaan kaksi kertaa

ennen päätehakkuuta. Mahdollisimman rehevän ja karun kasvupaikan männiköt kannattaa harventaa kaksi kertaa. Muut männiköt harvennetaan ainoastaan yhden kerran. Kuusikoista ainoastaan Väli-Suomen kuusikot harvennetaan kaksi kertaa ennen päätehakkuuta. Kuusikoiden päätehakkuiden pohjapinta-alat, valtapituudet ja rinnanläpimitat ovat suurempia kuin männiköissä. Kuusikkojen tuotantokyky käytetään hyväksi kasvattamalla aluksi ne mahdollisimman tiheänä, koska ne kestävät mäntyjä paremmin tiheyttä ilman kasvutappioita. Harvennukset tehdään optimoiduissa kuusikoissa voimakkaampina kuin männiköissä. Kuusikot kannattaa kasvattaa rehevillä kasvupaikoilla pidemmiksi kuin männiköt.

Tämän tutkimuksen ensimmäisten harvennusten optimiajankohdat tapahtuvat männiköissä 8–16 metrin valtapituudella ja kuusikoissa 14–18 metrin valtapituudella. Ensiharvennusten ajankohdat ovat samassa valtapituusvaihteluvälissä kuin aiemmissä tutkimuksissa on havaittu (Valsta 1992, Hynynen ja Arola 1999, Hyytiäinen ja Tahvonen 2001, 2002, Metsähallitus 2004, Pukkala 2006). Mitä lievempiä pituusrajoituksia käytetään sitä tavanomaisempia metsänkäsittelyohjelmia voidaan käyttää. Harvennusten määrät lisääntyvät pituusrajoitteiden lievetessä yli 15 metrin ja kiertoaikojen pidentyessä. Lievemmillä pituusrajoitteilla optimoitujen metsiköiden käsittelyohjelmina ovat korkeintaan kaksi harvennusta ennen päätehakkuuta. Harvennukset toteutetaan myöhemmin pituusrajoitteiden lievetessä. Harvennuksen voimakkuus on tiheämmässä kasvaneissa metsiköissä suurempi. Tässä tutkimuksessa toteutetaan harvennuksia vähemmän kuin Valstan tutkimuksessa (1992), jossa harvennusten lukumäärä vaihteli 2–4 harvennuksen välillä. Harvennusten lajia (ala-, ylä- tai määrämittaharvennus) ei voitu tutkia tässä tutkimuksessa (Hynynen ja Kukkola 1989). Optimoitujen metsiköiden harvennusten voimakkuudet ovat samoissa suhteissa harvennusten lukumäärien kanssa. Harvennusten voimakkuudet vaihtelevat 10 ja 50 prosentin välillä metsiköiden kasvuvyöhykkeistä, -paikoista, -tiheyksistä, puulajeista tai käytetyistä korkokannoista johtuen. Optimoitujen metsiköiden tiheämmät lähtötiheydet aikaistavat harvennuksia ja lyhentävät kiertoaikoja. Harvennuksien aikaistuminen tapahtuu korosta riippumatta. Kun korkovaikutus otetaan harvennusohjelmiin mukaan, niin tämän tutkimuksen tulokset ovat samansuuntaiset aiempien tutkimusten tulosten kanssa (mm. Valsta 1992).

4.3 Korkokannan vaikutus kiertoaikaan, vuotuisen keskikasvuun ja -nettotuloon

Korkokannan muutos ei vaikuta metsiköiden kiertoaikoihin, keskikasvuun tai nettotuloihin 10 metrin pituusrajoitteella. Pituusrajoitteen lievetessä ja metsänkäsittelyn muuttuessa tavanomaisemmaksi koron vaikutus alkaa näkyä havumetsiköiden lyhentyvinä kiertoaikoina, lievä-

nä keskikasvun pienenemisenä kuusikoissa sekä vuosittaisten hehtaarikohtaisten nettotulojen vähenemisenä kummallakin havupuulajilla. Koron suureneminen lyhentää 15 metrin pituusrajotteella Pohjois-Suomen männiköiden ja Väli- ja Etelä-Suomen karuimpien männiköiden kiertoaikoja. Muilla metsiköillä koron suureneminen vaikuttaa vasta 20 metrin pituusrajotteen jälkeen. Kuusikoissa vaikutus on suurin Väli-Suomen kuusikoissa. Mitä tavanomaisemmin metsikköä voidaan käsitellä, sitä suurempi vaikutus on koron suurenemisella. Suuren laskentakoron vaikutus on nähtävissä myös muiden metsikön käsittelyjen, kuten ensiharvennusten ja kasvatushakkuiden aikaistumisessa. Tämän tutkimuksen tulokset ovat samansuuntaiset aiempien tutkimusten (Valsta 1992, Hyytiäinen ja Tahvonen 2001, 2002, Pukkala 2006) kanssa suuren koron vaikutuksesta kiertoaikaan.

Laskentakoron suurentumisella ei ole suurta vaikutusta männiköiden vuotuisen keskikasvuun. Kasvatettava puustopääoma on hieman suurempi matalalla korolla ja lievemmin rajoitetulla metsiköllä pidemmän kiertoajan takia. Tämä kuvastuu lievänä keskikasvun suurenemisena etenkin kuusikoissa.

Koron suureneminen 1 prosentista 4 prosenttiin vähentää vuotuisia nettotuloja 15 metrin pituusrajotusmänniköissä 10–47 prosenttia ja kuusikoissa 5–15 prosenttia. Nettotulot vähenevät lievemmillä rajoitteilla männiköissä 14–47 prosenttia ja kuusikoissa 26–36 prosenttia. Nettotulon alenema koron noustessa johtuu kiertoaikojen lyhentymisestä. Kiertoajan lyheneminen aiheuttaa kokonaispuuntuotoksen pienentymisen, hakkuukertymien pienentymisen ja tulojen vähenemisen.

4.4 Korkokannan vaikutus metsikön tuottoarvoon

Metsiköiden tuottoarvot ovat suurimmat, kun tuottoarvolaskelmissa käytetään 1 prosentin korkoa. Tuottoarvot pienenevät koron suurentuessa. Pieneen korkotuottoon tyytyvän metsänomistajan kannattaa kasvattaa metsiköitä optimoinnin mukaisesti pidemmällä kiertoajoilla. Tuottoarvot ovat pääosin positiivisia pienillä 1 ja 2 prosentin koroilla. Ainoastaan Väli- ja Pohjois-Suomen rehevien kasvupaikkojen 10 metrin pituusrajotteiden männiköt ovat kannattamattomia investointeja kaikilla koroilla. Suuremmalla korolla karuimmat kasvupaikat ovat kannattavampia kuin rehevät kasvupaikat 10 metrin pituusrajotteella. Metsänomistajan korkovaatimuksen suurentuessa yhä karummat kasvupaikat muuttuvat investointeina kannattamattomimmiksi, kun pituusrajoite rajoittaa metsikön kasvatusta eniten. Koron suurentuessa 3 prosenttiin pääosa 10 metrin pituusrajotteiden metsiköistä on kannattamattomia. Rehevimmistä

kasvupaikoista tulee karumpia kannattavampia pituusrajoitteen lievetessä 15 metriin. Myös Väli-Suomen rehevien kasvupaikkojen männiköt, jotka vaativat enemmän uudistus- ja hoitotoimenpiteitä, ovat kannattamattomia suuremmilla koroilla. Etelä-Suomen lievemmin rajoitetuille metsiköille on saatavissa 4 prosentin investointituotto. Väli-Suomen metsiköistä karujen kasvupaikkojen männiköistä ja rehevien kasvupaikkojen kuusikoista on saatavissa 4 prosentin investointituotto. Tuottoprosentit pienenevät siirryttäessä pohjoisemmille lämpösumma-alueille. Pohjois-Suomen 15 metrin pituusrajoitettujen ja rajoittamattomien männiköiden tuottoprosentti vaihtelee 1 ja 3 prosentin välillä kasvupaikan ravinteisuuden mukaan. Karummat kasvupaikat ovat Pohjois-Suomessa investointeina kannattavampia kuin rehevät kasvupaikat.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkimuksessa haetaan pituusrajoitetuille metsiköille taloudellisesti kannattavia käsittelyohjelmia. Useita tutkimusongelmaa selventäviä asioita on löydetty. Tämä tutkimus antaa pohjatiedot pituusrajoitusalueiden metsiköiden hoidolle. Metsikkötason simulointi ja optimointi mahdollistavat optimikäsittelyjen löytämisen sektorimetsiköihin. Tulokset osoittavat, että metsän kasvatus ja hoito ovat kannattavia useilla ankarimmin pituusrajoitetuilla alueilla käytettäessä pientä laskentakorkoa. Luontainen uudistaminen ja vähäiset hoitotoimenpiteet ovat tulevaisuudessa tutkittavissa oleva vaihtoehto keinollisesti viljeltyjen metsiköiden korvaajiksi ankaran pituusrajoitteen alla. Suurelle määrälle pituusrajoitettuja metsikköjä soveltuu myös keinollinen uudistaminen. Pituusrajoitteen lievetessä myös puuntuotannon kannattavuus paranee. Metsiköstä investointina saatavissa oleva korkotuotto suurenee. Metsää kannattaa kasvattaa mahdollisimman pitkäksi pituusrajoitteen puitteissa, mutta metsikön kasvatus, käsittelyt ja kiertoaika kannattaa optimoida, jotta taloudellinen tulos maksimoidaan. Metsiköiden kasvatuksessa on oleellisen tärkeää huomioida pituusrajoitetuissa metsiköissä puuston arvokasvusiirtymät. Nykyiset sektorimetsikön käsittelyvaihtoehdot, kuten puuston avohakkaus jälkikäteiseen inventointitietoon perustuen ja kasvillisuuden raivaus avohakkuualoilta eivät ole optimaalista talouden hoitoa. Menetelmät eivät ole taloudellisesti optimaalisia, koska nykyiset menetelmät aiheuttavat ainoastaan raivauskaluston - ja työvoiman kuluja.

Päätöksentekijän valitsema nykyarvolaskelman korkokanta vaikuttaa paljon metsikön käsittelyyn ja kiertoaikaan. Tämän tutkimuksen keinollisesti viljeltyjen ja hoitotoimin optimaalisesti hoidettujen metsikköjen kannattavuutta kuvaavat tuottoarvot ovat pääosin positiivisia. Tuottoarvo kuvaa taloudellisesti rationaaliselle metsänomistajalle sijoituksen kannattavuutta. Kun

metsikön taloudellista kannattavuutta arvioidaan tuottoarvolaskelmilla, niin metsänomistaja voi vertailla metsiköiden hakkuujärjestystä taloudellisen kannattavuuden perusteella. Positiivinen tuottoarvo ilmaisee sijoituksen ylijäämän. Tuottoarvon avulla voidaan tehdä erilaisia talouden herkkyytlaskelmia, jotka auttavat päätöksentekijää valitsemaan optimaaliset käsitte-lyt metsiköiden hoitoihin. Sektorimetsikön omistaja preferoi metsiköstä saatavia taloudellisia arvoja korkealle, kun pituusrajoite rajoittaa metsän muuta käyttötarkoitusta.

Tulevaisuuteen liittyy aina epävarmuutta. Epävarmuutta aiheuttavat mm. tiedon puute puuston tulevasta kehityksestä tai epätietoisuus puutavaralajin tulevasta hinnan kehityksestä. Suunnittelulla voidaan ennakoida tulevaisuutta. Tulevaisuuden voidaan olettaa olevan pituusrajoite-alueilla vähemmän epävarmaksi kuin normaalisti käsiteltävissä metsiköissä, koska pituusrajoite on ehdoton raja, jota ei voida ylittää. Suunnittelulla voidaan etukäteen valita metsikölle sopiva käsittelyohjelma, jota toteuttaen vähennetään epävarmuutta ja lisätään tietoa päätök- sentekoa varten. Hakkuut voidaan toteuttaa suunnitelman mukaisesti puun hintakehitystä seu- raten ja valita ajallaan itselle sopiva myyntiajankohta. Leimikkokeskittämisellä voidaan pa- rantaa taloudellista tulosta. Nykyisiin menetelmiin verrattuna etukäteissuunnittelulla voidaan ehkäistä tulevia yhteiskunnallisia ongelmia. Pituusrajoitealueiden metsiköiden käsittelyjen etukäteisellä suunnittelulla voidaan välttää tai lieventää ulkopuolisille metsänomistajille syn- tyviä negatiivisia ulkoisvaikutuksia. Vaihtoehtona ovat pitkäkestoiset, resursseja kuluttavat oikeusprosessit eri oikeusasteissa.

Tämän tutkimuksen mukaan ainespuun kasvatusta on paikoin taloudellisesti kannattavaa jo 10 metrin pituusrajoitusalueella. Tutkimuksen pohjalta voidaan esittää lisäkysymyksiä jatkotut- kimusta varten. Lisätutkimuksena voidaan vertailla esimerkiksi luontaisen - ja keinollisen uudistamisen, - kasvatuksen ja - käsittelyjen eroja pituusrajoitusalueilla. Harvennuksen laatu- tutkimuksella voidaan tutkia erilaisten harvennustapojen, kuten ala-, ylä-, tai määrämittahar- vennuksen vaikutuksia metsiköiden taloudellisesti kannattaviin käsittelyihin. Simuloinnilla ja optimoinnilla voidaan tutkia mm. koivu-, seka- ja eri-ikäismetsikön kasvatusta sektori- vyöhykkeellä. Eri-ikäisrakenne saattaisi soveltua tiettyihin metsiköihin – varsinkin jos tällä tavalla voidaan lieventää mahdollista olevaa tai tulevaa näkemysristiriitaa metsänomistajan ja rajoitteen asettajan välillä.

Pituusrajoitetun metsikön kasvatusta ja hoito tapahtuvat sektoreittain ja vyöhykkeittäin. Vyöhy- kejako kasvatusalueiksi tapahtuu etäisyyden perusteella kiitoalueen reunasta ulospäin. Lähim- pänä kiitoaluetta, pituusrajoitteen ollessa ankarin, metsiköissä voidaan harjoittaa esimerkiksi

energiapuun kasvatusta. Kasvupaikalle luontaisesti syntyvää puustoa hyväksi käyttäen (mm. hieskoivu) metsikössä voidaan harjoittaa vähäisin kustannuksin metsätaloutta. Puusto kasvatetaan harventamatta pituusrajoitteeseen saakka. Päätehakkuussa on saatavissa aines- ja energiapuuta. Ankarasti rajoitetulla alueella voidaan myös harjoittaa lyhytkiertoviljelyä energiapajulla. Erikoispuiden, kuten joulukuusten tai visakoivujen kasvatusta on mahdollista. Siemenpuukasvatusta voidaan myös harjoittaa suurimman esterajoitusalueen alapuolella. Pituusrajoitteen lievetessä yhdistetty aines- ja energiapuun kasvatusta tulevat mahdolliseksi kasvatusvaihtoehdoksi. Yli 15 metrin pituusrajoitteella metsiköiden kasvatusta ja hoito ovat lähellä normaalin metsikön käsittelysuosituksia. Tällöin puustoa voidaan kasvattaa ainespuunmittoihin (kuitu/tukki). Taimikonhoito, harvennukset ja päätehakkuu tapahtuvat normaalin kiertoajan mukaan. Edellä luetellut metsän kasvatusta - ja hoitoesimerkit eri pituusrajoitealueille ovat realistisia, mutta tutkimattomia tapoja käsitellä pituusrajoitetun alueen metsikköä.

Tutkimuksen tuloksista voidaan johtaa käytännön metsänhoitosuosituksia estevarapintojen alapuoliselle sektorimetsälle. Pituusrajoitusalueiden metsiköiden hallinta edellyttää tarkkaa ja ajantasaista inventointitietoa puustosta. Esimerkkinä voidaan mainita, että pelkästään lentokentän ympäristössä sijaitsevan sisemmän lähestymispinnan alapuolisen alueen pinta-ala on noin 5027 hehtaaria. Omistus jakautuu taulukon 1 mukaan. Esteiden hallintaa varten tarvitaan tarkkaa inventointitietoa, menetelmiä tiedon käsittelyyn ja realistista ymmärrystä tiedon jalostamiseksi päätöksentekoa varten. Valmiin laserkeilausaineiston hyväksikäyttö on mahdollinen keino ratkaista laajan alueen puuston tiedontarve. Kaukokartoitusmenetelmän avulla voidaan löytää pituusrajoituksen kannalta potentiaaliset esteet kenttien ympäristöstä ja maastomittauksilla voidaan käydä tarkistamassa tiedon oikeellisuus. Rajoitusalueilta muodostettava metsätietokanta helpottaa puuston hallintaa. Metsäomaisuus ja puuston aiheuttama esteongelma tulee omaan hallintaan ja metsiköiden käsittelytarve voidaan suurelta osin ennakoita ja suunnitella kentän pitäjän lähtökohdista. Metsiköiden käsittelyjen etukäteissuunnittelulla lievennetään mahdollisesti syntyviä ristiriitoja kentän pitäjän ja ulkopuolisen metsänomistajan välillä. Tutkimusta voidaan myös hyödyntää laajemmin metsien käsittelyssä. Metsänomistaja, joka arvostaa kauko- tai lähimaisemaa taloudellisen hyödyn ohella, voi hyödyntää optimoinnilla saatuja tuloksia pituusrajoitetujen metsiköiden käsittelyssä. Pituusrajoitetun metsikön käsittelyohjelman valinta voi olla paikallisesti pieni ongelma, mutta laajemmin ajatellen se voi muodostua suureksi ongelmaksi, jota voidaan kuitenkin lievittää asiantuntevalla etukäteissuunnittelulla.

KIRJALLISUUS

Anttila, P., Haara, A., Maltamo, M., Miina, J. ja Päivinen, R. 2001. Metsän mittauksen tutkimusaineistoja. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. Tiedonantoja 128. 9 s.

Ensiharvennuksen toteutuksen vaikutus metsikön tuotokseen ja tuottoon. Metsähallituksen metsätalouden julkaisuja 53/2004. Metsähallitus. 56 s.

Gong, P. Forest management decision analysis. 1994. Dissertation 16. Department of Forest Economics. Swedish University of Agricultural Sciences. Umeå. 131 s.

Haataja, J. Optimointitehtävien ratkaiseminen. 2004 [Verkkodokumentti]. Tieteen tietotekniikan keskus CSC. Saatavissa: http://www.csc.fi/csc/julkaisut/oppaat/index_html#category-1. [Viitattu 10.10.2013].

Hynynen, J. ja Kukkola, M. 1989. Harvennustavan ja lannoituksen vaikutus männikön ja kuusikon kasvuun. Folia Forestalia 731. Metsäntutkimuslaitos. 20 s.

Hynynen, J. ja Arola, M. 1999. Ensiharvennusajankohdan vaikutus hoidetun männikön kehitykseen ja harvennuksen kannattavuuteen. Metsätieteen aikakauskirja 1/1999: 5-23.

Hyvän metsänhoidon suositukset 2006. Hyvän metsänhoidon suositukset. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio, Helsinki. 100 s.

Hyytiäinen, K. ja Tahvonen, O. 2001. The effects of legal limits and recommendations on timber production: The case of Finland. Teoksessa: Hyytiäinen, K. Integrating economics and ecology in stand-level timber production. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 908(1): 443–454.

Hyytiäinen, K. ja Tahvonen, O. 2002. Economics of forest thinnings and rotation periods for Finnish conifer cultures. Teoksessa: Hyytiäinen, K. Integrating economics and ecology in stand-level timber production. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 908(2): 274–288.

Hyytiäinen, K. ja Tahvonen, O. 2003. Maximum sustained yield, forest rent or Faustmann: Does it really matter? Teoksessa: Hyytiäinen, K. Integrating economics and ecology in stand-level timber production. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 908(3): 457–469.

Hyytiäinen, K. Tahvonen, O. ja Valsta, L. 2005. Optimum juvenile density, harvesting and stand structure in even-aged Scots pine stands. Forest science, vol 51(2). Society of American Foresters. 122–133. [Verkkolehti]. Saatavissa http://www.ingentaconnect.com_ezproxy.uef.fi:2048/content/saf/fs/2005/00000051/00000002/art00004. [Viitattu 23.4.2013].

Hyytiäinen, K., Tahvonen, O. ja Valsta, L. 2010. Taloudellisesti optimaalisista harvennuksista ja kiertoajoista männylle ja kuuselle. [Verkkodokumentti]. Metsäntutkimuslaitoksen työraportteja143. 51s. Metsäntutkimuslaitos. Saatavissa: http://www.metla.fi_julkaisut_working_papers/2010/mwp143.htm. [Viitattu 10.10.2013].

Häggman, B. 1997. Metsän mittaus ja arviointi. Teoksessa: Tapion taskukirja, 23.painos: 370–403.

Kaila, Erkki. ja Saarenmaa, Hannu. 1990. Tietokoneavusteinen päätöksenteko metsätaloudessa. Folia Forestalia 757. 34 s.

Lentoesterajoitukset ja lentoesteiden merkitseminen. 2000. Ilmailumääräys AGA 3-6. Ilmailulaitos. 2–7.

Metsätilastollinen vuosikirja 2012. 2012. [Verkkodokumentti]. Metsäntutkimuslaitos. Saatavissa: http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/julkaisut/vsk/2012/vsk12_01.pdf [viitattu23.4.2013].

Mäkelä, M. Optimointialgoritmit. Luentomoniste. 2010. Matematiikan laitos. Turun yliopisto. 176 s.

Mäkinen, A. 2010. Uncertainty in forest simulators and forest planning systems. Dissertationes Forestales 97. Faculty of Forestry and Agriculture, University of Helsinki. 38 s.

Nyyssönen, A. 1999. Kiertoaikamalli Suomen metsätaloudessa. Metsätieteen aikakauskirja 3: 540–543.

Pukkala, T ja Miina, J. 1997. A method for stochastic multiobjective optimization of stand management. *Forest Ecology and Management* 98. 189-203. [Verkkolehti]. Saatavissa: http://ac.els-cdn.com/S0378112797000819/1-s2.0-S0378112797000819-main.pdf?tid=55aba9d6-3ca8-11e3-81fd-00000aab0f27&acdnat=1382618124_e00d1f420eeb01_be51539_e2f6a73be8f. [Viitattu 23.4.2013].

Pukkala, T. 2005. Metsikön tuottoarvon ennustemallit kivennäismaan männiköille, kuusikoille ja rauduskoivikoille. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2005: 311–322.

Pukkala, T. 2006. Puun hinta ja taloudellisesti optimaalinen hakkuun ajankohta. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2006: 33–48.

Pukkala, T. 2007. Metsäsuunnittelun menetelmät. Gummerus kirjapaino Oy, Vaajakoski. s. 208.

Ripatti, P. 1997. Metsäomistus. Teoksessa: *Tapion taskukirja*, 23. painos. 75–76.

Tahvonen, O. 1999. Faustmannin kiertoaikamallista ja sen yleistyksistä. *Metsätieteen aikakauskirja* 3: 544–548.

Valsta, L. Optimizing thinnings and rotation for mixed, even-aged pine-birch stands. 1986. *Folia Forestalia* 666. 23 s.

Valsta, L. 1992. An optimization model for Norway spruce management based on individual-tree growth models. *Acta Forestalia Fennica* 232: 4–5.

Valsta, L. 1993. Stand management optimization based on growth simulators. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 453. 43 s.

Valsta, L. 1999. Kiertoaikamalli metsänkasvatuksessa ja -uudistamisessa. *Metsätieteen aikakauskirja* 3: 565–567.

Viitala, E. 2006. An early contribution of Martin Faustmann to natural resource economics. *Journal of Forest Economics*. Elsevier. 12: 131-144. [Verkkolehti]. Saatavissa: <http://ac.els-cdn.com/S1104689906000158/1-s2.0-S1104689906000158-main.pdf?tid=fbfbf7a6-3c9d->

[11e3-b9a0-00000aab0f6c&acdnat=1382613678_7d5a29e78a262b97726b04ee3dc1e35d](https://doi.org/10.1017/9781107301111.002). [Viitattu 10.10.2013].

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

Zhang, D. and Pearse, P. 2011. *Forest economics*. UBC Press. The University of British Columbia. Vancouver. 390 s.