

**ENERGIAPUUHAKKUUT NUOREN METSÄN HOITOKOHTEISSA –  
Vaikutukset puuntuotokseen ja metsänkasvatuksen kannattavuuteen**

Metsävaratieteen ja -teknologian pro gradu -  
tutkielma maatalous- ja metsätieteiden  
maisterin tutkintoa varten

Helsingin yliopisto, metsätieteiden laitos  
joulukuu 2011

Hermann Lallukka

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos — Institution — Department Metsätieteiden laitos	
Tekijä — Författare — Author Hermann Lallukka			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Energiapuuhakkuut nuoren metsän hoitokohteissa — Vaikutukset puuntuotukseen ja metsänkasvatuksen kannattavuuteen			
Oppiaine — Läroämne — Subject Metsävaratiede ja -teknologia			
Työn laji — Arbetets art — Level Maisterin tutkielma		Aika — Datum — Month and year Joulukuu 2011	
		Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 51 s. + liitteet 6 s.	
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>Energiapuun korjuuta pyritään voimakkaasti lisäämään osana uusiutuvien energiamuotojen käytön edistämistä. Energiapuuharvennuksen käyttö tulee lisääntymään ja sen käyttökohteet mahdollisesti monipuolistumaan, jolloin toimenpiteen vaikutukset metsikön puuntuotukseen ja metsänkasvatuksen kannattavuuteen olisi tärkeää tuntea. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää nuoren metsän hoitokohteissa tehdyn koneellisen energiapuuharvennuksen vaikutuksia puuntuotukseen ja metsänkasvatuksen kannattavuuteen, kun päätöksentekohetkeksi valitaan energiapuuharvennuksen ajankohta.</p> <p>Tutkimukseen valittiin 30 energiapuuharvennettua nuoren metsän hoitokohdetta, joista mitattiin puustotiedot metsiköiden kehityksen ennustamista varten. Tutkimusaineisto rajattiin kivennäismaan kuusikoihin ja männiköihin. Metsiköt sijaitsivat Häme-Uudenmaan, Kaakkois-Suomen, Etelä-Savon ja Keski-Suomen metsäkeskusten alueilla. Metsiköiden jatkokehityksen ennustamiseen käytettiin Metsäntutkimuslaitoksen kehittämää MOTTI-ohjelmistoa. Metsiköille ennustettiin Motilla hakkuukohtaiset kertymät koko kiertoajalla kolmella erilaisella kasvatusvaihtoehdolla tarkastellen tiheän nuoren metsän energiapuuharvennusta, tiheän nuoren metsän ainespuuntuotantoketjua ja hyvän metsänhoidon suositusten mukaista kasvatusta. Ennustettujen hakkuukertymien perusteella metsiköille laskettiin kasvatuskohtaiset vuosituotokset ja nettotulojen nykyarvot. Korjuujäljen seurannaisvaikutuksia kasvatusten väliselle paremmuudelle tarkasteltiin kirjallisuuskatsauksen avulla.</p> <p>Hyvän metsänhoidon suositusten mukainen kasvatusta johtaa odotetusti pääsääntöisesti parhaaseen tulokseen. Vaaditaan merkittävää energiapuuhinnan nousua, että yliiheänä kasvatettu energiapuuharvennettu metsikkö olisi männiköissä kilpailukykyinen kasvatustapa. Kuusikoissa energiapuuharvennettu yliiheä metsikkö näyttää kuitenkin olevan taloudelliselta tulokseltaan kilpailukykyinen jo varsin alhaisella energiapuuhinnalla. Tämä johtuu pääosin metsikön nuoruusvaiheen lehtipuuntuotoksesta, mikä saadaan parhaiten hyödynnettyä kokopuukorjuuna suoritettavalla energiapuuharvennuksella.</p> <p>Nuorissa metsissä, joissa taimikonhoito on jäänyt tekemättä tai viivästynyt, energiapuuharvennus on hyvä vaihtoehto. Energiapuuharvennus johtaa pääosin parempaan tuotokseen kuin pelkästään ainespuuhakkuu. Ainespuuensiharvennettu metsikkö on kuitenkin pääosin taloudellisesti kannattavampi vaihtoehto, mutta erot kasvatusten välillä ovat niin pienet, että mahdollinen energiapuuhinnan nousu kääntäisi nopeasti tilanteen energiapuuharvennetun vaihtoehdon eduksi. Kasvupaikkojen välillä ei ole merkittäviä eroja tarkasteltaessa kasvatusten välistä paremmuutta.</p> <p>Korjuujälki on Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion korjuujäljen tarkastusten perusteella energiapuuharvennuksilla heikompa kuin ainespuuensiharvennuksilla. Tästä aiheutuvat kasvu- ja laatuapit ovat kirjallisuuskatsauksen perusteella siinä määrin vähäiset, että heikommalla korjuujäljellä ei ole merkittävää vaikutusta tämän tutkimuksen tuloksiin ja kannattavuusvertailuun.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords energiapuuharvennus, energiapuuharvennus, nuoren metsän hoito, MOTTI, metsänkasvatuksen kannattavuus			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Viikin tiedekirjasto ja metsätieteiden laitos			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information			

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos — Institution — Department Department of Forest Sciences	
Tekijä — Författare — Author Hermann Lallukka			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Energywood harvests in young stands — Effects on merchantable yield and profitability of silviculture			
Oppiaine — Läroämne — Subject Forest Resource Science and Technology			
Työn laji — Arbetets art — Level Master's thesis		Aika — Datum — Month and year December 2011	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 51 s. + appendices 6 s.
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>Energywood harvesting is increasing strongly due to promotion of renewable energy sources. As a part of the development the use of energywood thinning will increase and become more diverse. Therefore it is important to know the effects of the operation on merchantable yield and on profitability of silviculture. The objective of the study is to detect those effects of mechanised energywood thinning in young stands. For economical calculations the moment for decision making is set to the moment of the thinning.</p> <p>30 young stands were chosen for the study. For forecasting stand development stand parameters were measured from each stand. The study was limited to mineral soil and to stands where dominant species was pine (<i>Pinus sylvestris</i>) or spruce (<i>Picea abies</i>). The stands were situated in Finland in the regions of Häme-Uusimaa, Kaakkois-Suomi, Etelä-Savo and Keski-Suomi. Stand development was forecasted using MOTTI software developed by Finnish Forest Resource Institute. Future harvesting yields were forecasted separately for each stand and for three different management alternatives. The three alternatives were energywood harvesting in a dense young stand, industrialwood thinning in a dense young stand, and a management chain according to the Finnish silvicultural recommendations. With the predicted harvesting yields, annual yields and net present values were calculated. The effects of harvesting damages were examined by a literature overview.</p> <p>Managing stands according to silvicultural recommendations gave expectedly the best result. A considerable increase in energywood price would be needed for the alternative of energywood harvesting to be competitive in pine stands. In spruce stands it is an economically viable alternative with relatively low energywood price. This is mainly due to high yields of deciduous trees in dense spruce stands.</p> <p>Energywood harvesting is a good alternative for managing dense young stands that have been left without or with insufficient precommercial thinning. In these cases energywood harvesting generally leads to better yields than an industrialwood thinning. However, with the energywood prices used in this study, industrialwood thinning leads to higher earnings. Differences between the alternatives are low and an increase in energywood price would quickly turn the situation in favor of energywood thinning. Forest type does not have a significant effect on the differences between the management alternatives.</p> <p>According to the inspections of Forestry Development Centre Tapio, there are more harvesting damages in stands managed by energywood thinning than by industrialwood thinning. Losses in growth and wood quality due to harvesting damages are however minor according to literature overview, and therefore have no significant effect on the results of this study.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords energywood, energywood thinning, management of young stands, MOTTI, profitability of silviculture			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Viikki Science Library and Department of Forest Sciences			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information			

## **ALKUSANAT**

Tämä tutkielma on tehty Metsäntutkimuslaitoksen ja Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion rahoituksella. Näiden tahojen lisäksi haluan kiittää Saija Huuskosta ohjauksesta sekä rakentavasta ja kannustavasta palautteesta työn eri vaiheissa. Kumarran myös Jari Hynyselle avustaan simulointien suunnittelussa sekä Anssi Ahtikoskelle ajastaan talouslaskelmien kehittämiseksi.

Helsingissä joulukuussa 2011

Hermann Lallukka

## SISÄLTÖ

1. JOHDANTO .....	1
1.1 Energiapuuharvennus ilmastonmuutoksen hillitsijänä.....	1
1.2 Tutkimuksen tavoite.....	4
2. ENERGIAPUUHARVENNUS .....	5
2.1 Käyttökohteet .....	5
2.2 Korjuu.....	6
2.3 Puuntuotos ja kannattavuus .....	8
2.4 Korjuujälki.....	10
2.5 Puun tekninen laatu .....	15
3. AINEISTO .....	17
3.1 Otanta .....	17
3.2 Mittaukset.....	17
4. MENETELMÄT .....	18
4.1 Puuston mallinnus .....	18
4.2 Metsiköiden jatkokehityksen ennustaminen .....	19
4.3 Vuosituotoksen laskenta.....	22
4.4 Taloustulosten laskenta .....	22
4.5 Tilastolliset testit .....	23
5. TULOKSET.....	24
5.1 Metsikkötunnukset .....	24
5.2 Vuosituotos.....	26
5.3 Nettotulojen nykyarvo .....	29
6. TULOSTEN TARKASTELU.....	34
6.1 Vertailu energiapuuharvennetun ja Hyvän metsänhoidon suositusten mukaisesti hoidetun metsikön välillä.....	34
6.2 Vertailu energiapuuharvennetun ja ainespuuharvennetun ylitieheän metsikön välillä .....	37
6.3 Korjuujälki.....	38
6.4 Tulosten luotettavuus ja yleistettävyys.....	40
7. JOHTOPÄÄTÖKSET .....	43
LÄHTEET.....	45
LIITTEET .....	51

## 1. JOHDANTO

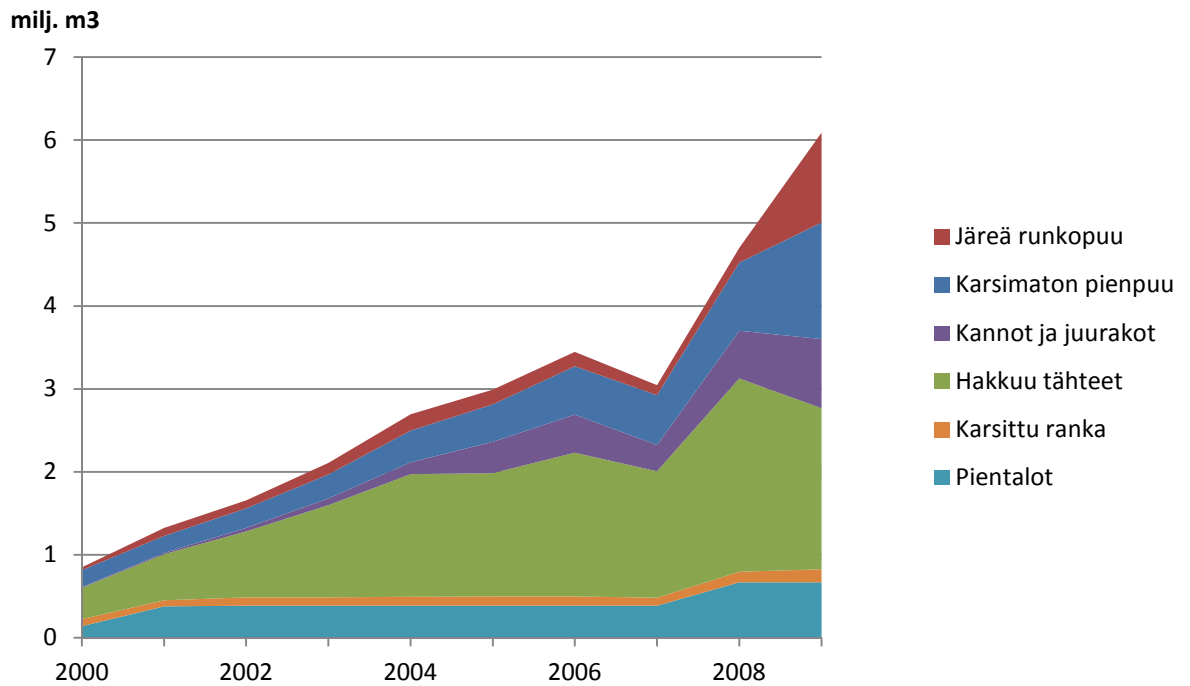
### 1.1 Energiapuuharvennus ilmastonmuutoksen hillitsijänä

Ilmaston lämpeneminen on kansainvälisesti tutkijoiden tunnustama ilmiö, jonka hillitsemiseksi on päätetty ryhtyä toimenpiteisiin. Uusiutuvilla energiamuodoilla on keskeinen asema ilmastonmuutosta kiihdyttävien hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä. Puu on uusiutuvana energialähteenä erityisesti Suomessa tärkeä keino vähentää hiilidioksidipäästöjä. Energiapuun myönteiset ilmastovaikutukset perustuvat kahteen seikkaan: Energiapuulla korvataan fossiilisia polttoaineita ja lisäksi energiapuun kasvatusta lisää metsään sitoutuneen hiilen määrää (Valsta ym. 2006).

EU:n komissio sopi vuonna 2008 energia- ja ilmastonmuutospaketista. Siihen liittyen Suomi on sitoutunut nostamaan uusiutuvan energian osuuden energian kokonaiskulutuksesta vuoteen 2020 mennessä nykyisestä 26 %:sta 38 %:iin (Tilastokeskus 2010). Lähes puolet uusiutuvan energian lisäyksestä on tarkoitus kattaa metsähakkeella. Työ- ja elinkeinoministeriön vuoden 2010 kansallisten ilmasto- ja energiavoitteiden mukaan metsähakkeen käyttö yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa sekä erillisessä lämmöntuotannossa nostetaan vuoteen 2020 mennessä nykyisestä noin 6 miljoonasta kuutiometrillä 13,5 miljoonaan kuutiometriin (Työ- ja elinkeinoministeriö 2010). Tämän lisäksi metsähaketta voidaan käyttää Suomeen tavoiteltavien toisen sukupolven biodiesel-laitosten raaka-aineena, mikä voi osaltaan lisätä metsähakkeen käyttöä (Sipilä ym. 2006, Kurkela ym. 2008, Pekkarinen 2010).

Metsänhoidossa ja puun korjuussa syntyy paljon saha- ja paperiteollisuudelle kelpaamatonta harvennus- ja muuta puuainesta, kuten oksa- ja latvusmassaa, pienpuuta sekä kantoja ja juurakoita. Näistä valmistettua haketta kutsutaan metsähakkeeksi (Laitila ym. 2008). Pienpuulla tarkoitetaan tässä pääosin nuorista metsistä korjattavaa pieniläpimittaista karsittua rankaa tai karsimatonta kokopuuta (Metsäntutkimuslaitos 2010b) sekä ainespuun ja energiapuun integroidussa korjuussa syntyvää latvusmassaa. Tyypillisesti pienpuun korjuukohde on hoitamaton ja monesti lehtipuuvaltainen nuori kasvatusmetsä, jossa suuresta tiheydestä johtuvan puuston hitaan järeytymisen vuoksi valtaosa poistettavasta puusta ei ole saavuttanut ainespuumittoja (Laitila ym. 2008).

Puuperäisten polttoaineiden käyttö on lisääntynyt energiantuotannossa 2000-luvulla (Metsäntutkimuslaitos 2010c). Toisaalta puunjalostusteollisuuden tuotantokapasiteetti on pienentynyt, mistä johtuen erilaisten jäte- ja sivutuotteiden saatavuus on heikentynyt. Näin puuperäisten polttoaineiden käytön kasvu on ollut lähes täysin metsähakkeen varassa (Laitila ym. 2010). Metsähakkeen käyttö onkin kasvanut 2000-luvulla noin kuusinkertaiseksi (kuva 1). Metsähakkeen korjuupotentiaalia on arvioitu samansuuntaisesti eri tutkimuksissa. Helynen ym. (2007) arvioi, että metsähakkeen vuotuinen tekninen korjuupotentiaali on 15,9 milj. m<sup>3</sup>. Tästä 6,5 milj. m<sup>3</sup> on päätehakkuiden latvusmassaa, 2,5 milj. m<sup>3</sup> on kuusen kantobiomassaa ja 6,9 milj. m<sup>3</sup> on harvennuksilta kokopuuna korjattavaa energiapuuta. Kärhä ym. (2010) laskivat selvityksessään niin kutsutun perusskenaarion teknis-taloudelliseksi metsähakkeen korjuupotentiaaliksi 13,5 milj. m<sup>3</sup> (27 TWh). Tästä päätehakkuiden latvusmassaa on 5,2 milj. m<sup>3</sup> (10,3 TWh), kantoja 4,6 milj. m<sup>3</sup> (9,2 TWh) ja pienpuuta 3,7 milj. m<sup>3</sup> (7,4 TWh). Päätehakkuilta korjattavien hakkuutähteiden ja kantojen korjuupotentiaalit ovat suoraan sidoksissa ainespuuhakkuiden, erityisesti kuusikoiden päätehakkuiden hakkuumääriin (Laitila ym. 2010). Siksi on huomattava, että kyseisissä tutkimuksissa ainespuuhakkuiden määräksi on arvioitu noin nykytasoa vastaava: Helynen ym. (2007) 55 milj. m<sup>3</sup> vuodessa ja Kärhä ym. (2010) perusskenaariossa 56,6 milj. m<sup>3</sup> vuodessa. Hetemäen ja Hännisen (Hetemäki ja Hänninen 2009) mukaan ainespuuhakkuut tulevat metsäteollisuuden rakennemuutoksen myötä laskemaan. Tämä johtaisi myös päätehakkuiden latvusmassan ja kantobiomassan saatavuuden heikentymiseen. Tällöin nuorista kasvatusmetsistä korjattavan pienpuun tarve kasvaisi. Lisäksi päätehakkuiden latvusmassan korjuu on edullisimmin integroitavissa ainespuun korjuuseen, mistä syystä noin kolmannes sen teknisestä korjuupotentiaalista hyödynnetään jo energiantuotannossa (Laitila ym. 2008). Sen sijaan nuorten metsien energiapuupotentiaalista hyödynnetään vasta kymmenesosa. Suurin kasvupotentiaali on siis nuorten metsien energiapuulla. Tutkimusten vertailun helpottamiseksi Pöyryn ja Metsätehon laskelmien korjuupotentiaalit (Kärhä ym. 2010) on muunnettu kiintokuutiometreiksi kertoimella 2 MWh = 1 m<sup>3</sup> (Metsäntutkimuslaitos 2010b).



Kuva 1. Metsähakkeen käyttö 2000—2009 (Metsäntutkimuslaitos 2010c).

Pienpuu korjataan nuorista metsistä energiapuuharvennuksella. Energiapuuharvennus ei ole nykyisellään pääsääntöisesti osa suositeltua toimenpideketjua. Männyn laatuksivatuksessa sitä voidaan käyttää suunnitellusti ennen ensimmäistä ainespuuharvennusta. Muutoin energiapuuharvennus tulee nykyisten Hyvän metsänhoidon suositusten (Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio 2006) mukaan kyseeseen metsiköissä, joissa ensiharvennuksen ainespuukertymä jäisi puutteellisen taimikonhoidon vuoksi vähäiseksi. Toimenpide ajoitetaan useimmiten siten, että puusto ei ole vielä saavuttanut ainespuuharvennuksen edellyttämiä mittoja. Uudet energiapuun korjuun ja kasvatuksen suositukset (Äijälä ym. 2010) laajentavat kuitenkin mahdollisuuksia ottaa energiapuuharvennus osaksi suunniteltua toimenpideketjua.

Verrattuna tavanomaiseen ensiharvennuksen puusto on puutteellisesti hoidetun metsikön tapauksessa läpimitaltaan pienempää ja korjuuolosuhteet suuresta tiheydestä johtuen haastavammat. Tiheä alkukehitys vaikuttaa erityisesti metsikön tukkipuun tuotokseen ja puutavaralajijakaumaan. Haastavat korjuuolosuhteet lisäävät korjuuvaurioita ja voivat johtaa jäävän puuston epätasaiseen tilajärjestykseen. Lisäksi metsikköön avataan ajourat tavanomaista aiemmin. Näillä tekijöillä voi olla vaikutusta metsänkasvatuksen kannattavuuteen.



Energiapuuharvennuksen käyttö tulee lisääntymään ja sen käyttökohteet mahdollisesti monipuolistumaan. Sen vaikutuksia metsänkasvatuksen kannattavuuteen on kuitenkin tutkittu hyvin vähän (Heikkilä ym. 2007, Heikkilä ym. 2009). Metsänhoidon suositusten tueksi olisikin tärkeää saada tutkittua tietoa nykyisiä suosituksia tiheämmin kasvaneen metsikön energiapuuharvennuksen vaikutuksista muun muassa puutavaralajikohtaiseen puuntuotokseen ja metsän tuottoon.

## 1.2 Tutkimuksen tavoite

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää nuoren metsän hoitokohteissa tehdyn koneellisen energiapuuharvennuksen vaikutuksia puuntuotokseen ja metsänkasvatuksen kannattavuuteen, kun päätöksentekohetkeksi valitaan energiapuuharvennuksen ajankohta. Täten metsikön perustamis- tai varhaishoidon kustannuksia ei ole otettu huomioon. Tutkimuksessa verrataan ylitiheänä kasvanutta energiapuuharvennettua metsikköä Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion Hyvän metsänhoidon suositusten (2006) mukaisesti hoidettuun metsikköön. Tämän lisäksi verrataan energiapuuharvennettua metsikköä ainespuuensiharvennettuun ylitiheänä kasvaneeseen metsikköön. Eri vaihtoehtojen harvennuskohtaiset hakkuukertymät ennustetaan mitattujen energiapuuharvennettujen metsiköiden perusteella jokaiselle metsikölle erikseen MOTTI-ohjelmistolla. Korjuujäljen vaikutuksia metsänkasvatuksen kannattavuuteen tarkastellaan kirjallisuuskatsauksen sekä Tapion harvennushakkuiden ja energiapuuharvennusten korjuujäljen tarkastusmittausten tulosten avulla (Äijälä 2009, Äijälä 2010, Vanhatalo 2011). Tutkimusaineisto rajataan kivennäismaan kohteisiin, joissa on tehty nuoren metsän hoito koneellisena energiapuuharvennuksena ja jotka on alun perin pyritty uudistamaan männylle tai kuuselle. Tuloksia voidaan hyödyntää laadittaessa metsänhoidon suosituksia käytäntöön.

Energiapuu määritellään tässä tutkimuksessa metsästä energiakäyttöön korjatuksi puutavaraksi mukaan luettuna runkopuu, oksat ja latvat. Energiapuuharvennuksella tarkoitetaan harvennusta, josta korjattava puutavara käytetään kokonaisuudessaan tai osittain energiaksi.

## 2. ENERGIAPUUHARVENNUS

### 2.1 Käyttökohteet

Tällä hetkellä energiapuuharvennuksilla paikataan useimmiten taimikonhoidon laiminlyöntejä (Heikkilä ja Sirén 2005). Puutteellisen taimikonhoidon vuoksi metsikkö jää ylitiheäksi ja puuston järeytyminen hidastuu (Huuri ym. 1987, Varmola 1996). Tällöin välittömästä harvennustarpeesta huolimatta ainespuuharvennus voi olla kannattamatonta pienen kertymän vuoksi (Heikkilä ja Sirén 2005). Kuitenkin ilman hoitotoimenpiteitä metsikön jatkokehitys vaarantuu. Puuston korjaaminen kokopuuna kasvattaa kertymää ja energiapuun korjuuseen kestävän metsätalouden rahoituslain (jatkossa Kemera) perusteella maksettavat tuet mahdollistavat kannattavan korjuun (Tanttu ym. 2004, Hakkila 2005, Heikkilä ym. 2009). Valinta energiapuuharvennuksen ja ainespuuensiharvennuksen välillä on tähän mennessä perustunut toimenpiteen kannattavuuteen metsänomistajan ja korjuun suorittajan kannalta. Toimenpiteen vaikutuksia metsikön jatkokehitykselle ei ole käytetty valintaperusteena (Heikkilä ym. 2007).

Uusien Tapion energiapuun korjuun ja kasvatuksen suositusten (2010) mukaan energiapuun kasvatusta voidaan männiköissä ottaa osaksi suunniteltua kasvatusketjua tuoreilla ja kuivahkoilla kankailla. Tällöin energiapuuharvennus tehdään ennen ensimmäistä ainespuuharvennusta. Tuoreella ja kuivahkolla kankaalla voidaan kasvupaikan ravinteikkuudesta johtuen käyttää kokopuukorjuuta. Kokopuukorjuulla saadaan suurempi energiapuukertymä verrattuna pelkän rankapuun korjuuseen. Tämä parantaa korjuun kannattavuutta. (Heikkilä ym. 2007, Ahtikoski ym. 2008). Hoitamattomissa nuorissa metsissä voidaan tehdä energiapuuharvennus kuivahkoa kangasta karummillakin kasvupaikoilla, mikäli ei käytetä kokopuukorjuuta vaan latvusmassa jätetään metsään (Äijälä ym. 2010). Vihreän latvusmassan korjuusta aiheutuva ravinnehävikki voi johtaa puuntuotoksen alenemiseen, mikäli korjuuta ei toteuteta suositusten mukaisesti (Helmisaari ym. 2008). Ravinnehävikistä mahdollisesti aiheutuvaa kasvun taantumaa ei ole tässä työssä otettu huomioon. Tämän merkitystä tulosten kannalta voidaan kuitenkin pitää vähäisenä. Aiemman tutkimuksen mukaan ravinnehävikillä on erityisen suuri merkitys, kun hakkuukertymä on pääosin kuusta (Helmisaari ym. 2008). Mäntyvaltaisissa metsiköissä ravinnehävikin merkitys on

pienempi. Tämän tutkimuksen kuusikoissa energiapuukertymä oli valtaosin lehtipuuta, jolloin ravinnehävikkiä voidaan pitää huomattavasti pienempänä koivun latvusmassan ollessa huomattavasti kuusen ja männyn latvusmassoja pienempi (Hakkila 1991). Kuuselle uudistetuissa metsiköissä energiapuuharvennusta käytetään lähinnä silloin, kun puutteellisesta varhais- tai taimikonhoidosta johtuen lehtipuusto on päässyt vallitsevaksi. Kuusi-rauduskoivu sekametsän energiapuuharvennuksessa pääperiaatteena on harventaa ja edelleen kasvattaa vallitsevaa koivujaksoa. Samalla tehdään tilaa usein alempaan latvuskerrokseen jääneelle kuuselle. Kuusi-hieskoivu sekametsässä koivujakso voidaan harventaa tai poistaa kokonaan riippuen kuusialikasvoksen määrästä ja laadusta (Äijälä ym. 2010).

Puutavaralajien hintasuhteet ja tukipolitiikka määrittävät osaksi sen, minkälaisista kohteista energiapuuta korjataan (Tanttu ym. 2004, Ahtikoski ym. 2008, Heikkilä ym. 2009). Tästä syystä Tapion suosituksissa ei oteta kantaa siihen, miten järeälle puustolle energiapuuharvennus voidaan tehdä. Hoitamattomassa nuoressa metsässä energiapuuharvennus suositellaan tehtäväksi 8—14 metrin valtapituudessa (Äijälä ym. 2010). Harvennuksen ajoitus riippuu pääosin metsikön lähtötiheydestä; mitä suurempi runkoluku hehtaarilla sitä pienemmässä valtapituudessa harvennus on syytä tehdä. Vertailuksi ainespuuensiharvennuksen ajoitukseksi suositellaan männiköissä 13—15 metrin ja kuusikoissa 12—16 metrin valtapituutta (Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio 2006). Kemera määrittelee, että nuoren kasvatusmetsän harvennuksen tuen saamiseksi jäävän puuston keskiläpimitan on oltava rinnan korkeudelta alle 16 cm ja kantoläpimitaltaan vähintään 4 cm:n puita on poistettava yli 1000 runkoa hehtaarilta (Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio ja metsäkeskus Pirkanmaa 2009). Tämän tutkimuksen metsiköt on energiapuuharvennettu näiden ehtojen mukaisesti.

## **2.2 Korjuu**

Puutavara korjataan energiapuuharvennuksilta kokopuuna tai karsittuna rankana. Valtaosin käytetään kokopuukorjuuta (Heikkilä ym. 2005), jolloin metsästä poistetaan runkopuun lisäksi oksat sekä neulaset ja lehdet. Tällöin koko kertymä käytetään energiaksi. Voidaan käyttää myös integroitua aines- ja energiapuukorjuuta, jolloin

korjataan samalla sekä ainespuu että ainespuuksi kelpaamaton osa energiapuuksi (Kärhä ym. 2009).

Tällä hetkellä energiapuuharvennukset tehdään lähes täysin koneellisesti (Laitila ym. 2010). Korjuuteknologiana käytetään pääsääntöisesti harvesterin ja kuormatraktorin ketjua. Jonkin verran käytetään myös korjuria, jolla tehdään sekä hakkuu että lähikuljetus (Kärhä ym. 2006, Kärhä 2007). Hakkuulaitteena käytetään pieniläpimittaisen puun korjuuseen kehitettyä keräävää kaato-kasaus -kouraa tai yksiotehakkuupäätä joko sellaisenaan tai joukkokäsittelyn mahdollistavalla lisälaitteella varustettuna (Heikkilä ym. 2005, Kärhä 2007).

Korjuu toteutetaan kuten tavanomaisessa ensiharvennuksessa. Metsään avataan ajourat, joilta sekä hakkuu että lähikuljetus tehdään (Pesonen 2005). Energiapuuharvennuksille sopii myös niin kutsuttu hakkuu-uramenetelmä, jossa varsinaisten ajourien väliin tehdään kapea hakkuu-ura (Tuikkanen 2010). Hakkuu-uramenetelmällä voisi olla mahdollista parantaa korjuun laatua, kun ajouraväliä voidaan kasvattaa ja toisaalta päästään lähemmäs kaadettavia puita, jolloin puustovaurioiden riski pienenee. Useimmiten ennen harvennusta on suositeltavaa tehdä ennakkoraivaus. Niin kutsuttu näkemäraivaus tehdään hakkuukoneen kuljettajan näkymän parantamiseksi poistaen yksittäiset kantoläpimitaltaan alle 4 cm paksuiset puut ja puhdistaan poistettavien puiden tyvet alikasvoksesta (Äijälä ym. 2010). Raivauksella vähennetään korjuuvaurioiden riskiä, helpotetaan poistettavien puiden valintaa ja ajourasuunnittelua sekä parannetaan hakkuun tuottavuutta (Immonen 2001, Pesonen 2005). Ennakkoraivauksen lisäksi energiapuuharvennuksessa kuten tavanomaisessakin ensiharvennuksessa on tärkeää ajoittaa puunkorjuu kohteen korjuukelpoisuuden mukaan, toteuttaa korjuu toimenpiteeseen ja kohteeseen soveltuvalla kalustolla, käyttää tarvittaessa riittävästi hakkuutähdettä maan kantavuuden parantamiseen, tehdä riittävän leveät ajourat runko- ja juuristovaurioiden välttämiseksi sekä käyttää kasvupaikan ja metsikön tilan mukaan oikeaa harvennusmallia (Iittiläinen 2003, Pesonen 2005). Harvennustavan suunnittelussa on syytä ottaa huomioon, että hoitamaton ylitiheä metsä on syytä käsitellä eri tavalla kuin hoidettua nuorta kasvatusmetsää (Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio 2006). Jos korjataan runkopuun lisäksi vihreää latvusmassaa, sen kokonaismäärästä suositellaan jätettäväksi korjaamatta noin 30 % (Äijälä ym. 2010). Tämä voidaan suositusten mukaan toteuttaa usealla eri tavalla:

käyttämällä runkojen karsintaa joukkokäsittelyssä, katkaisemalla latvuksen viimeinen 1—2 m metsään, karsimalla joka viides runko ja jättämällä oksat metsään tai kuivattamalla kokopuu palstalla kourakasoissa, jolloin neulaset ja lehdet variseva.

### 2.3 Puuntuotos ja kannattavuus

Pohjan metsikön puuntuotokselle luo kasvupaikan puuntuotoskyky. Sillä tarkoitetaan kasvupaikan korkeinta vuotuista runkopuun tuotosta suurimman keskimääräisen kasvun antavalla kiertoajalla tietyllä puulajilla (Ojansuu 2005). Puuntuotoskyky kertoo siis kasvupaikan kaikkien ympäristötekijöiden yhteisvaikutuksen kyseessä olevan puulajin tuotosedellytysten kanssa. Se ilmaistaan kuutiometreinä kuorellista runkopuuta hehtaaria ja vuotta kohti. Toteutetulla metsänhoidolla määritetään lopulta kuinka suuri osa puuntuotoskyvystä realisoituu eli mikä on metsikön toteutunut puuntuotos. Eri puulajeilla on samalla kasvupaikalla erilainen puuntuotoskyky (Ojansuu 2005). Metsänhoitotoimenpiteillä pyritään vaikuttamaan siihen, että kasvatettava puusto pystyy mahdollisimman tehokkaasti käyttämään kasvupaikan puuntuotoskyvyn hyväksi. Harvennuksilla ei yleensä pystytä lisäämään kokonaiskasvua ja runkopuun tuotosta, mutta taloudellista tulosta voidaan parantaa muun muassa aikaistamalla hakkuutuloja ja lisäämällä puiden järeyttä ja sitä kautta tukkipuun tuotosta (Niemistö 2005). Hoitamattomuus johtaa puuston merkittävään kuolleisuuteen ja arvokasvun hidastumiseen, jolloin käyttöpuun tuotos kiertoajan aikana jää selvästi potentiaalia alhaisemmaksi (Hynynen ja Niemistö 2001).

Metsänkasvatuksen kannattavuutta mitataan nettotulojen nykyarvon avulla (Hyytiäinen ja Tahvonen 2005). Hakkuut ja metsänhoitotoimenpiteet pyritään tekemään niin, että nettotulojen nykyarvo on mahdollisimman suuri. Nettotulojen nykyarvo lasketaan diskonttaamalla eri ajankohtina syntyneet tulot ja kustannukset yhteismitallisiksi tiettyyn päätöksentekohetkeen ja laskemalla niiden erotus. Diskonttaus tehdään kertomalla eri ajankohtina syntyneet tulot ja kustannukset nykyarvotekijällä  $(1+r)^{-t}$ , missä  $r$  on reaalikorko (jos reaalikorko on 5 %, niin  $r$  on 0,05) ja  $t$  on kyseisten tulojen tai kustannusten toteutumishetki suhteessa tarkasteluhetkeen (Hyytiäinen ja Tahvonen 2005). Metsänkasvatuksen kannattavuuteen vaikuttavat siten tulot ja kustannukset ja niiden ajoittuminen, sekä diskonttauksessa käytetty korkokanta. Tuloihin ja

kustannuksiin vaikuttavat puuntuotoksen lisäksi puumarkkinat, tukipolitiikka, metsänhoitotoihin tarjolla olevan työvoiman saatavuus ja työkustannukset (Hynynen ja Niemistö 2001). Ratkaisevia tekijöitä metsänkasvatuksen kannattavuuden kannalta ovat kasvupaikan resurssien käyttöaste, toimenpiteiden joustavuus muuttuvassa toimintaympäristössä ja tuotetun puun laatu (Hynynen ja Niemistö 2001). Eri käsittelyvaihtoehdoille laskettujen nettotulojen nykyarvojen avulla vaihtoehtojen kannattavuuksia voidaan vertailla. Tässä työssä rajoitutaan tarkastelemaan metsänkasvatusta puuntuotoksen ja taloudellisen kannattavuuden näkökulmasta. Metsätalouden toimintaympäristönä markkinatilanteen, kantohintojen sekä lakien ja säädösten suhteen tarkastellaan nykyhetkeä. Toimintaympäristön muutosta ei energiapuun hinnan mahdollista muutosta lukuun ottamatta käsitellä.

Energiapuuharvennuksen vaikutuksia kiertoajan tuotokseen ja tuottoon on tutkittu varsin vähän. Heikkilän ym. (2007) mukaan energiapuun hinnalla 3 €/m<sup>3</sup> energiapuuharvennus on hyvä vaihtoehto verrattuna ainespuuensiharvennukseen kun ainespuukertymä on alle 20 m<sup>3</sup>/ha. Heikkilän ym. (2009) energiapuun kasvatusta käsitelleessä tutkimuksessa energiapuun ja ainespuun yhdistetty kasvatus voi olla metsänomistajan kannalta kannattavaa kun männiköissä kun energiapuunhinta on 3—5 €/m<sup>3</sup> ja kuusikoissa vastaavasti 8—9 €/m<sup>3</sup>. Tällöin energiapuuharvennus on tehty kokopuukorjuuna. Tantu ym. (2004) ovat tutkineet korjuuvaihtoehtojen kannattavuutta nuoren metsän harvennuksessa. Tutkimuksen mukaan energiapuun talteenotto kokopuuna on useimmiten metsänomistajan kannalta kannattavin vaihtoehto verrattuna ainespuukorjuuseen tai integroituun aines- ja energiapuukorjuuseen. Tutkimuksessa oli sekä männiköitä että kuusikoita ja metsiköt olivat ennen harvennusta pääosin hyvän metsänhoidon suosituksiin verrattuna ylitieheitä. Energiapuuharvennuksen kannalta erityistä ovat energiapuuhun ja energiapuuharvennukseen kohdistuva tukipolitiikka sekä energiapuun hinnoittelu, jotka suoraan vaikuttavat energiapuuharvennuksen kannattavuuteen ja kilpailukykyyn verrattuna tavanomaiseen ensiharvennukseen (Ahtikoski ym. 2008). Metsänomistajalle maksetaan kemera-tukea energiapuun korjuuseen ja haketukseen (Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio ja metsäkeskus Pirkanmaa 2009). Käytännössä tuet ovat edellytys sille, että energiapuuta ylipäättään voidaan kannattavasti ottaa talteen nuorista metsistä. Energiapuuta talteen ottavat yritykset edellyttävät kohteelta kemera-tukikelpoisuutta ja ovat tätä kriteeriä vasten valmiita maksamaan metsänomistajalle energiapuusta hintaa. Käytännössä vain tämä

kantohinta jää metsänomistajan tuloksi. Tässä työssä käsitellään siksi energiapuuharvennuksen tulojen osalta pelkästään energiapuun hintaa eikä tukia huomioida laskelmissa.

## 2.4 Korjuujälki

Harvennushakkuiden korjuujäljen tarkastelussa huomioidaan yleensä puustovauriot, ajourapainumat, ajouraväli ja –leveys sekä harvennusvoimakkuus ja puuvalinta (Kokko ja Sirén 1996). Korjuujälki kuvaa korjuun laatua ja se vaikuttaa metsikön tulevaan puuntuotokseen sekä puuston laatuun. Kasvutappioiden ja puun käyttöarvon alenemisen myötä heikko korjuujälki vaikuttaa myös metsänkasvatuksen taloudelliseen tuottoon. Suuri runkoluku ja läpimittajakauman painottuminen pieniin puihin luo energiapuuharvennuskohteille haastavat korjuuolosuhteet. Tämä johtaa korjuuvaurioiden lisääntymiseen (Wallentin 2007, Vanhatalo 2011). Harvennusvoimakkuuden ja puuvalinnan vaikutuksia ei oteta tämän työn korjuujälkitarkastelussa huomioon. Sen sijaan ne sisältyvät simuloinneissa käytetyn MOTTI-ohjelmiston kasvu- ja harvennussalleihin.

Puustovauriot jaetaan runko- ja juurivaurioihin. Tapion korjuujälkitarkastuksissa runkovaurio on määritelty oletetun katkaisukohdan, juurenniskan, yläpuoliseksi vaurioksi (Vanhatalo 2011). Juurivaurio on juurenniskan alapuolella sijaitseva puun tyven tai korkeintaan metrin etäisyydellä puun keskipisteestä oleva vähintään 2 cm paksun juuren vaurio. Tapion korjuujälkitarkastuksissa määritellään, että ”puu katsotaan korjuun seurauksena vaurioituneeksi kun sen kuori on rikki nilakerrokseen saakka yhdestä tai useammasta kohdasta yhteensä yli 12 cm<sup>2</sup>:n laajuudelta ja puuaineen pintaa on samalla paljastunut yli 1 cm<sup>2</sup>, tai siinä on puuaineen rikkonut, ns. syvävaurio (vaurion koosta riippumatta), tai siinä on kuoren rikkonut viilto tai viiltoja, joiden yhteenlaskettu pituus on yli 50 cm” (Vanhatalo 2011). Puustovauriot tuottavat kasvutappioita tai alentavat rungon käyttöarvoa lahoutumisen tai koroutumisen myötä.

Puustovaurioista johtuvat kasvutappiot aiheutuvat ravinteiden ja veden kulun häiriytymisestä juuriston ja latvuksen välillä (Kokko ja Sirén 1996). Andersson (1984) on tutkimuksessaan todennut, että runkovauriot vähentävät männyllä sädekasvua 6—30

% ja pahimmat juurenniskavauriot jopa 42 %. Pituuskasvuun vaurioilla ei havaittu olevan vaikutusta. Isomäki ja Kallio (1974) ovat tutkineet vaurioiden vaikutusta kuusen kasvuun. Heidän tulostensa mukaan vaurioituminen vähensi kuusella sekä säde- että pituuskasvua. Kasvutappioihin eniten vaikuttavat tekijät olivat vaurion syvyys ja leveys. Puun kuoriosan vauriot vähensivät paksuuskasvua noin 10 % ja puuainekseen ulottuvat syvävauriot noin 20 %. Leveimmät vauriot vähensivät kasvua lähes 35 %. Runkovauriot laskivat sekä säde- että pituuskasvua keskimäärin 15 %. Juurenniskavauriot vähensivät sädekasvua 35 % ja pituuskasvua 40 %. Juurivauriot vähensivät kasvua vastaavasti 35 % ja 25 %. Katkenneista juurista aiheutui pahimmillaan 45 %:n kasvunalennus. Moilanen (1990) sen sijaan sai pro gradu –työssään tulokseksi, että laaja 400 cm<sup>2</sup>:n runkovaurio vähentää ensimmäisen 10 vuoden aikana sädekasvua 6 metrin korkeudella 10 %, mutta rinnankorkeudella kasvun alenemista ei havaittu. Huse (1978) puolestaan totesi, että alle 50 cm<sup>2</sup>:n puustovaurioilla ei ole vaikutusta paksuuskasvuun. 50—100 cm<sup>2</sup>:n vauriot aiheuttivat ensimmäisen 5 vuoden aikana 13 %:n paksuuskasvun alenemisen ja yli 100 cm<sup>2</sup>:n vauriot keskimäärin 28 %:n kasvutappiot. Ensimmäisen viiden vuoden jälkeen kasvutappioita ei enää havaittu. Tutkimustuloksia tarkasteltaessa on huomattava, että eri tutkimusten lähestymistavat ja muun muassa vaurioluokittelu eroavat, mikä vaikeuttaa tulosten vertailua. Tulokset antavat kuitenkin suuntaa puustovaurioiden vaikutuksista puun kasvuun.

Kasvutappioiden lisäksi puustovaurioista johtuva lahoutuminen aiheuttaa taloudellisia menetyksiä. Männyllä lahon merkitys on vähäinen, mutta kuusi on huomattavasti lahoherkempi (Kokko ja Sirén 1996). Lahoutuminen heikentää puun laatua ja lahovikainen puu luokitellaan kuitupuuksi tai korkeintaan energiakäyttöön soveltuvaksi raakiksi (Kokko ja Sirén 1996). Verinahakkasieni (*Stereum sanguinolentum*) on havaittu yleisimmäksi vauriosta syntyneen lahon aiheuttajaksi (Nilsson ja Hyppel 1968, Isomäki ja Kallio 1974, Kallio 1976, Moilanen 1990). Paikoitellen yleinen tyvilahoa aiheuttava juurikäpö (*Heterobasidion annosum*) leviää pääosin juuriston välityksellä ja tuoreista kantopinnoista (Kokko ja Sirén 1996). Juurivauriot ovatkin juurikäävän leviämisen kannalta otollisimpia (Isomäki ja Kallio 1974).

Kuusen vaurioituminen johtaa hyvin suurella todennäköisyydellä lahoutumiseen. Lahoutumisherkkyteen vaikuttavat vaurion syvyys, pinta-ala ja sijainti (Kokko ja Sirén 1996). Syvät ja lähellä juurenniskaa sijaitsevat vauriot aiheuttavat lahon lähes



poikkeuksetta (Nilsson ja Hyppel 1968, Moilanen 1990). Kallion (1973) mukaan laho iskeytyy runkovaurioista 80 %:n todennäköisyydellä ja juurivaurioista lähes varmasti. Myös lahon etenemisnopeus vaikuttaa lahosta aiheutuviin menetyksiin. Lahon etenemisnopeuteen vaikuttavat samat tekijät kuin lahon syntyyn. Vaurion laatu, pinta-ala, sijainti ja vaurioitumisajankohta ovat tärkeimmät lahon etenemiseen vaikuttavat tekijät (Kokko ja Sirén 1996). Isomäki ja Kallio (1974) ovat todenneet rungon ja juurten pintavaurioista syntyneen lahon keskimääräiseksi etenemisnopeudeksi 13,5 cm/vuosi. Rungon ja juurten syvävaurioista alkaneen lahon etenemisnopeus oli 21 cm/vuosi ja juurenniskan syvävaurioista 28 cm/vuosi. Katkenneista juurista alkanut laho levisi jo noin 32 cm/vuosi. Tuloksista nähdään että sekä vaurion laatu että sijainti ovat merkittäviä tekijöitä lahon etenemisen kannalta. Myös muissa tutkimuksissa on päästy samansuuntaisiin tuloksiin (Kärkkäinen 1971, Huse 1978, Moilanen 1990). Hakkila ja Laiho (1967) tutkivat vaurioitumisajankohdan vaikutusta lahon etenemiseen. Heidän tulostensa mukaan laho kehittyy nopeimmin kesäaikaan vaurioituneissa puissa.

Ajourat alentavat metsikön tuotosta. Mitä leveämmät ajourat ja mitä pienempi ajouraväli sitä suurempi on ajourista aiheutuva kasvutappio (Isomäki ja Niemistö 1990). Kasvutappiota syntyy myös siitä, että optimaalisesta puuvalinnasta joudutaan poikkeamaan ajouraa avattaessa (Isomäki ja Niemistö 1990). Erityisesti ylitieheässä metsikössä ajouran reunavyöhyke voidaan joutua yliharventamaan, jotta hakkuupää päästään viemään kauempana oleville puille jääviä puita vaurioittamatta. Ajourien vaikutuksesta tuotokseen on useita tutkimuksia (Bucht 1977, Niemistö 1987, Niemistö 1989, Isomäki ja Niemistö 1990). Bucht (1977) sai tulokseksi, että ajouraharvennus aiheuttaa keskimäärin 8,6 %:n vuotuisen kasvutappion harvennusta seuraavan 9 vuoden aikana verrattuna ajourattomaan harvennukseen. Isomäki ja Niemistö (1990) esittivät 5 eri menetelmää ajourista aiheutuvien kasvutappioiden laskemiseen. Menetelmien antamat keskimääräiset kasvutappiot vaihtelivat 1,1 %:sta 5,6 %:iin. Niemistö (1989) on kehittänyt yhtälön ajourista johtuvan kasvutappion laskemiseksi ajouravälin, ajouran ulkoleveyden ja runkoluvun perusteella. Yhtälön avulla voidaan vertailla ajouraleveyksien ja uravälien vaikutusta kasvutappioon.

$$VL = 100 * (OW - \sqrt{\frac{10000}{N}}) / SI \quad (1)$$

missä

VL = ajourien aiheuttama kasvatappio, %

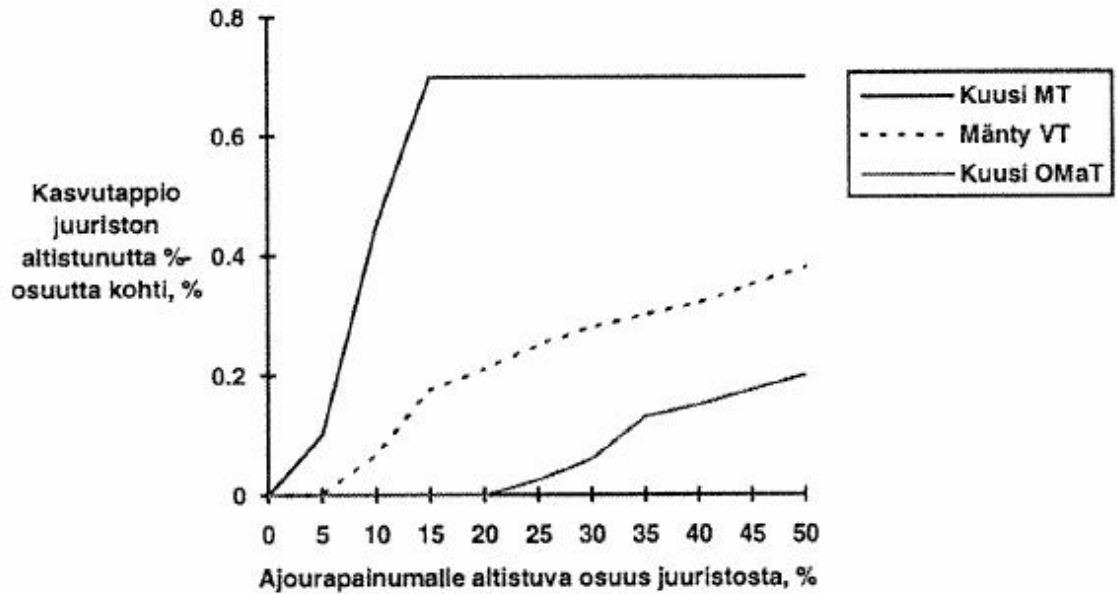
OW = ajouran ulkoleveys, m

N = runkoluku, runkoa/ha

SI = ajouraväli, m

Niemistö (1989) arvioi kasvatappion kestoajaksi 10 vuotta harvennuksesta. Esimerkiksi ajouran ulkoleveydellä 4,5 m, ajouravälillä 20 m ja jäävän puuston runkoluvulla 1000 runkoa/ha kasvatappio on kaavalla laskettuna 6,7 % harvennusta seuraavan 10 vuoden aikana. Ero esimerkiksi 4 metriä leveään ajouraan on 2,5 prosenttiyksikköä. Kokon ja Sirénin (1996) mukaan ajourat ovat hakkuu voimakkuuden jälkeen merkittävin yksittäinen tekijä korjuujäljestä aiheutuvia menetyksiä tarkasteltaessa.

Ajourapainumat aiheuttavat kasvatappioita maan tiivistymisen ja juuriston vaurioitumisen kautta (Kokko ja Sirén 1996). Pääasiassa kasvatappiot johtuvat hienojuuriston vaurioitumisesta (Wästerlund 1989). Wästerlundin (1983) mukaan jo yli 6 cm syvä painuma voidaan luokitella erittäin haitalliseksi. Ajourapainumia käsitelleissä tutkimuksissa on päädytty 4 — 40 %:n kasvatappioihin ajouran reunapuustolle (Ågren 1968, Björkhem ym. 1975, Fries 1976, Olsson 1977, Wästerlund 1992). Kasvatappioiden kestoajaksi on arvioitu tutkimuksesta riippuen kolmesta kymmeneen vuotta. Wästerlund (1983) on laatinut kuvan kasvatappion määrittämiseksi yksittäisen puun juuriston painumalle altistunutta osuutta kohti yli 10 cm syvillä painumilla (kuva 2). Kasvatappio saadaan kuvasta siten, että luetaan käyrältä painumalle altistuvan juuriston osuuden mukainen Y-akselin arvo ja kerrotaan altistunut juuriston osuus Y-akselin arvolla.



Kuva 2. Yli 10 cm syvien ajourapainumien aiheuttamat kasvutappiot. Kuvaaja Kokon ja Sirénin (1996) tutkimuksesta. Alkuperäisen kuvan on tehnyt Wästerlund (1983).

Wästerlund (1986) on myöhemmin laatinut juuriston levinneisyyttä kuvaavan mallin, jossa puun ikä kuvaa juuriston levinneisyyttä (kaava 2).

$$R = 0,21 * A^{0,73} \quad (2)$$

missä

R = juuriston keskimääräinen säde, m

A = puun ikä, v

Mallin perusteella esimerkiksi 25-vuotiaan puun juuriston säde olisi keskimäärin 2,2 m. Ajourapainumille altistuvien puiden määrä voidaan laskea Kokon ja Sirénin (Kokko ja Sirén 1996) esittämällä yhtälöllä, kun tunnetaan juuriston säde, ajouraväli, uraleveys, puuston jakautuminen ja korjuukoneen raideleveys:

$$A = \frac{R - (W - D)/2}{SI} * 2 * d * 100 \quad (3)$$

missä

A = altistuvien puiden osuus, %

$R$  = keskimääräinen juuriston säde, m

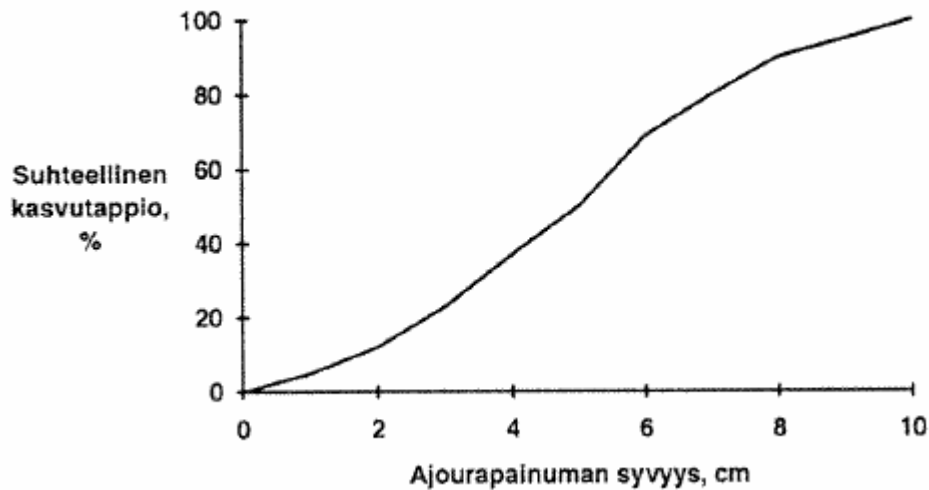
$W$  = ajouran leveys, m

$D$  = korjuukoneen raideleveys, m

$SI$  = ajouraväli, m

$d$  = reunapuuston tiheyskerroin

Olsson (1984) esittää kuvan alle 10 cm:n painumien aiheuttaman kasvutappion määrittämiseksi (kuva 3). Määrittäminen tehdään yli 10 cm:n painumien aiheuttaman kasvutappion perusteella.



**Kuva 3.** Alle 10 cm syvien ajourapainumien aiheuttama suhteellinen kasvutappio (%) verrattuna yli 10 cm painumien aiheuttamiin tappioihin. Kuvaaja Kokon ja Sirénin (1996) tutkimuksesta. Alkuperäisen kuvan on tehnyt Olsson (1984).

Näiden laskentamallien avulla voidaan määrittää ajourapainumista aiheutuvat kasvutappiot hehtaaria kohden erilaisilla ajouraleveyksillä ja -väleillä, kun painumille altistuvan juuriston osuus arvioidaan altistuvien puiden määrän perusteella.

## 2.5 Puun tekninen laatu

Puun laatu voidaan määrittellä sen sopivuudeksi tiettyyn käyttötarkoitukseen (Stöd ym. 2003). Pääsääntöisesti puuta pyritään tuottamaan Suomessa sahatavaraksi ja edelleen rakennuspuuksi. Tällaisen puutavaran tärkeimpänä laatuominaisuutena voidaan pitää

lujuutta. Puun kasvunopeus vaikuttaa puuaineen tiheyteen ja oksaisuuteen sekä oksien läpimittaan (Halinen 1985, Kärkkäinen 2003). Näillä ominaisuuksilla taas on merkittävä vaikutus puun lujuusominaisuuksiin. Hitaammin järeytynyt ja siten tiheämpi ja pienioksisempi puuainekasvu on lujuusominaisuuksiltaan parempaa kuin nopeasti kasvanut (Kärkkäinen 2003). Erityisesti puuston nuoruusvaiheen kehitys vaikuttaa puun oksaisuuteen (Halinen 1985). Puutteellisesta nuoruusvaiheen hoidosta johtuen energiapuuharvennetut kohteet ovat pääosin kasvaneet huomattavan tiheinä. Tiheä kasvatusasento männikön nuoruusvaiheessa johtaa parempaan puun laatuun (Huuuri ym. 1987, Varmola 1996). On kuitenkin huomattava, että laatuhinnoittelua ei tällä hetkellä juuri käytetä puukaupassa. Erikoistapauksia lukuun ottamatta pienioksisesta ja tiheäyisestä puusta ei makseta metsänomistajalle ylimääräistä. Voidaan kuitenkin pohtia, että hakkuupäiden mittausteknologian kehittyessä laatutekijöitä on mahdollista ottaa paremmin huomioon jo apterauksissa. Toisaalta maksuperusteeksi voidaan ottaa tehdasmittaus, jolloin on mahdollista laaduttaa rungot hyvinkin tarkasti ja maksu voidaan suorittaa laadun perusteella. On siis mahdollista, että laadun merkitys kasvaa tulevaisuudessa.

### 3. AINEISTO

#### 3.1 Otanta

Mitatut metsiköt ovat Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion energiapuuhakkuiden korjuujälkiseurantaan satunnaisotannalla valittuja kohteita. Korjuujälkiseurantaan mitatun aineiston avulla metsiköiden valintaperusteena oli mahdollista käyttää pääpuulajia. Metsiköissä on tehty energiapuuharvennus vuonna 2008 tai 2009 ja kohteet ovat saaneet kemera-tukea nuoren kasvatusmetsän harvennukseen. Mukaan valittiin Häme-Uudenmaan, Kaakkois-Suomen, Etelä-Savon ja Keski-Suomen metsäkeskukset. Näiden metsäkeskusten alueilta saatiin riittävä valintakriteerit täyttävä otos. Metsikköjoukko rajattiin ensin kivennäismaalle sekä lisäksi pääpuulajin mukaan kuusikoihin ja männiköihin. Mitattavien metsiköiden valinta tehtiin käytännön rajoitteiden vuoksi sijainnin perusteella. Yhteensä mitattiin 30 metsikköä, joista laskentavaiheessa pudotettiin selkeästi poikkeavien ominaisuuksien vuoksi kaksi metsikköä laskentojen ulkopuolelle. Toinen metsiköistä oli eri-ikäisrakenteinen kuusikko ja toinen selvästi kemera-kriteerit täyttämätön männikkö.

#### 3.2 Mittaukset

Mittaukset tehtiin linjoittain siten, että kuvion pisimmän halkaisijan lävistävältä linjalta mitattiin 10 koalaa. Lähtökohtana mitattaville puustotunnuksille oli MOTTI-ohjelmiston vaatimat tunnuksat. Jokaiselta koalapisteltä mitattiin kaksi erisäteistä ympyräkoalaa.

*Suuremmalta ympyräkoalalta ( $r=7.98$  m)* mitattiin rinnankorkeusläpimitta kaikista kehityskelpoisista ja pituudeltaan yli 1,3 m puista sekä kirjattiin puulaji.

*Pienemmältä ympyräkoalalta ( $r=3.99$  m)* mitattiin lisäksi kaikkien kehityskelpoisten ja pituudeltaan yli 1,3 m puiden pituudet, elävän latvuksen alaraja ja tyviläpimitta. Halkaisijaltaan yli 3 cm:n kannoista mitattiin läpimitta sekä kirjattiin puulaji. Koalan valtapuuston ikä määritettiin oksakiehkuroista laskemalla. (Mittausohje liitteessä 1)

## 4. MENETELMÄT

### 4.1 Puuston mallinnus

Metsiköt mitattiin energiapuuharvennuksen jälkeen, jolloin päästäksemme tilanteeseen ennen harvennusta oli harvennusta edeltävä puusto mallinnettava kantojen perusteella. Elävien puiden kanto- ja rinnankorkeusläpimittojen perusteella ennustettiin jokaiselle mitatulle kannolle lineaarisen regressiomallin avulla rinnankorkeusläpimitta SAS-ohjelmistolla. Ennustamiseen käytettiin sekamallia, joka sisältää sekä kiinteitä että satunnaisia parametreja. Satunnaiset parametrit vaihtelevat satunnaistekijästä, esimerkiksi luokasta tai yksilöstä toiseen (Lappi 1993). Tässä satunnaistekijöinä oli metsikkö ja kantoläpimitta. Ensin muodostettiin koko metsikköjoukon havainnoista yksi puulajikohtainen malli, joka sovitettiin metsiköittäin jokaisen metsikön havainnoista lasketuilla puulajikohtaisilla korjausparametreilla. Mallit muodostettiin puulajeittain siten, että männylle ja kuuselle laskettiin omat mallinsa, rauduskoivulle ja hieskoivulle laskettiin yksi yhteinen malli, ja muille lehtipuille laskettiin havaintojen vähyydestä johtuen yksi koko metsikköjoukkoa koskeva malli sovittamatta sitä metsikkökohtaisesti.

Rinnankorkeusläpimitoista ennustettiin kannoille ja lukupuille pituudet Näslundin pituusmallin avulla (Näslund 1936):

$$h = \frac{d_{1,3}^2}{(\beta_0 + \beta_1 d_{1,3})^2} + 1,3 \quad (4)$$

missä

$h$  = puun pituus

$d_{1,3}$  = puun rinnankorkeusläpimitta

$\beta_0, \beta_1$  = muuttuvat parametrit

Parametrit  $\beta_0$  ja  $\beta_1$  ennustettiin käyttäen lineaarista regressiomallia. Sekamallilla koko metsikköjoukkoa koskeva puulajikohtainen malli sovitettiin metsiköittäin. Puulajikohtaiset pituusmallit muodostettiin samaan tapaan kuin rinnankorkeusläpimittoja ennustettaessa. Puuston mallinnuksessa tai jatkokehityksen

ennustamisessa ei otettu huomioon energiapuuharvennuksen ja mittausajankohdan välistä aikaeroa, joka oli metsiköstä riippuen yhden tai kaksi kasvukautta.

#### 4.2 Metsiköiden jatkokehityksen ennustaminen

Metsiköiden jatkokehityksen ennustamisessa käytettiin Metsäntutkimuslaitoksen kehittämää MOTTI-ohjelmistoa (jatkossa Motti) (Salminen ym. 2005). Sillä voidaan tarkastella ja havainnollistaa erilaisten kasvatusvaihtoehtojen vaikutusta metsikön kehitykseen, hakkuukertymään ja taloudelliseen tulokseen koko kiertoajalla. Motti tuottaa puuston kehitysennusteita kasvu- ja tuotomallien avulla metsikkötasolla. Mallit pohjautuvat laajaan ja kattavaan mittausaineistoon, joka on testattu ja kalibroitu kahdeksannen valtakunnan metsien inventoinnin (VMI8) aineistolla (Salminen ym. 2005).

Metsiköille simuloitiin Motilla hakkuukohtaiset kertymät koko kiertoajalla kolmella erilaisella kasvatusvaihtoehdolla:

**K1:** Tiheän nuoren metsän energiapuuharvennus. Taimikonhoitoa ei ole tehty tai se on tehty puutteellisesti ja ensiharvennus on tehty koneellisena energiapuuharvennuksena. Seuraavat harvennukset ja päätehakkuu tehtiin harvennusmallien mukaan ainespuuhakkuina. Simuloinnin lähtöhetkenä käytettiin energiapuuharvennusajankohtaa. Lähtöpuustona käytettiin energiapuuharvennuksen jälkeistä puustoa.

**K2:** Tiheän nuoren metsän ainespuuntuotantoketju. Kantomittausten ja energiapuuharvennuksessa jätetyn puuston perusteella mallinnettu ylitieheä metsikkö ennen energiapuuharvennusta, jolle simuloitiin tuosta hetkestä eteenpäin ainespuuntuotantoketju harvennusmallien mukaan. Ensiharvennus tehtiin ainespuuharvennuksena hyvän metsänhoidon suositusten mukaisen valtapituuskriteerin täytyttyä.

**HMS:** Hyvän metsänhoidon suositusten mukainen kasvatus. Simuloitiin mitattua metsikköä vastaavalla pituusboniteetilla Tapion hyvän metsänhoidon suositusten



mukainen ainespuun tuotantoon tähtäävä kasvatus. Lähtöpuusto muodostettiin käyttäen mitatun metsikön sijaintia ja kasvupaikkaa sekä kalibroimalla puuston valtapituus samalle käyrälle mitatun metsikön kanssa. Simulointi aloitettiin mahdollisimman läheltä energiapuuharvennetun metsikön ikää, kuitenkin niin, että hyvän metsänhoidon suositusten (Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio 2006) mukainen ensiharvennuksen valtapituuskriteeri ei ollut vielä täyttynyt. Runkolukuna ennen ensiharvennusta HMS-metsiköissä oli 1900 runkoa/ha.

Harvennussalleina käytettiin Tapion hyvän metsänhoidon suositusten (2006) mukaisia pohjapinta-alaan perustuvia malleja. Harvennus tehtiin kun puusto saavutti harvennuskypsyyttä kuvaavan pohjapinta-ala- ja valtapituuskäyrien keskikohdan ja puustoa jätettiin sopivaa harvennusvoimakkuutta kuvaavien raja-arvojen puoliväliin. K2 ja HMS-kasvatusten ensiharvennuskriteerinä käytettiin valtapituutta. Kuusikoissa K2-kasvatuksen ensiharvennus tehtiin pääsääntöisesti 14 metrin valtapituudessa 1000 runkoon/ha. Kuitenkin mikäli runkoluku ennen harvennusta oli yli 3000 runkoa/ha, tehtiin ensiharvennus 13 metrin valtapituudessa. Jos runkoluku ennen harvennusta ylitti 4000 runkoa/ha, tehtiin ensiharvennus 12 metrin valtapituudessa. Myös männiköissä K2-kasvatuksen ensiharvennus tehtiin pääsääntöisesti 14 metrin valtapituudessa 1000 runkoon/ha. Jos runkoluku ennen harvennusta oli yli 2500 runkoa/ha, tehtiin ensiharvennus 13 metrin valtapituudessa 1100 runkoon/ha. Runkoluvun ollessa ennen harvennusta yli 3000 runkoa/ha tehtiin ensiharvennus 12 metrin valtapituudessa 1200 runkoon/ha. Männiköiden alemmat runkolukurajat ja tavoiterunkoluvun nostaminen johtuvat siitä, että mänty sietää kuusta huomattavasti ylitiheyttä ja männikön tuotos laskee herkemmin voimakkaan harvennuksen jälkeen (Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio 2006). Uudistuskypsyyskriteerinä oli pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimita ja päätehakkuu tehtiin metsikön sijainnista riippuen männiköissä MT:llä pohjapinta-alalla painotetun keskiläpimitan ollessa 29,5 – 30,5 cm ja vastaavasti VT:llä 28 cm. Kuusikoissa päätehakkuu tehtiin OMT:llä 28,5 – 31 cm läpimitassa ja MT:llä 27 – 29 cm läpimitassa. Rungon katkontaa määrittävät puutavaralajien minimiläpimitat asetettiin taulukon 1 mukaisiksi.

**Taulukko 1. Puutavaralajien minimiläpimittat (cm)**

	<b>Tukki</b>	<b>Kuitu</b>
<b>Mänty</b>	14,5	6
<b>Kuusi</b>	15,5	7
<b>Lehtipuut</b>	16,5	6

Mikäli metsikössä oli vahva lehtipuusekoitus, painotettiin simuloituissa harvennuksissa alalle alun perin uudistettua puulajia. Puulajisuhteita muokattaessa otettiin huomioon lehtipuiden esiintyminen laikuittain, jolloin poistettavaksi ei voitu valita pelkästään lehtipuita. K2-kasvatuksen ensiharvennuksessa jätettävän puuston puulajijakauma asetettiin pääsääntöisesti samanlaiseksi kuin toteutuneen energiapuuharvennuksen jälkeinen jakauma. Mikäli puusto on energiapuuharvennuksessa harvennettu alle runkolukusuosituksen ja pääpuulajin runkoluku on ennen K2-kasvatuksen ensiharvennusta alle 1000 runkoa/ha, jätettiin harvennuksessa energiapuuharvennusta suurempi lehtipuuosuus. Myöhemmissä harvennuksissa sekä K1 että K2-kasvatuksessa suurennettiin pääpuulajin osuutta ja painotettiin poistumaa muille puulajeille. Männiköissä muita puulajeja suosittiin jätettäväksi järjestyksessä kuusi, rauduskoivu, hieskoivu, muut lehtipuut. Kuusikoissa OMT:llä vastaavasti järjestyksessä rauduskoivu, mänty, hieskoivu, muut lehtipuut ja MT:llä mänty, rauduskoivu, hieskoivu, muut lehtipuut. Painotuksen voimakkuudessa otettiin huomioon jokaisen metsikön ominaispiirteet kuten laikuittaisuus sekä puulajijakauma ensiharvennuksen jälkeen. Laikuttaisuus huomioitiin mittausten aikana tehtyjen havaintojen perusteella. Mitä voimakkaammin metsikkö oli puulajeittain spatiaalisesti jakautunut sitä vähemmän poistumaa voitiin painottaa lehtipuulle. Harvennuksessa poistettiin joka tapauksessa vähintään kymmenen prosenttia jokaisen puulajin pohjapinta-alasta luontaisesta metsiköiden sisäisestä vaihtelusta johtuen.

Harvennuspoistuman määrä ja poistuman rakenne toteutuneissa energiapuuharvennuksissa laskettiin harvennettujen puiden kantomittausten avulla. Laskennassa käytettiin apuna Mottia, jolla energiapuuharvennuksen poistuman kuutiomäärä ja sen rakenne mallinnettiin. Energiapuukertymään laskettiin mukaan runkopuu ja 80 % latvoista ja oksista. Läpimittarajaa energiapuuksi korjattavalle puulle ei asetettu. Muiden hakkuiden ja muiden kasvatusten hakkukohtaiset kertymät simuloitiin Motilla puutavaralajeittain. K1-kasvatuksessa energiapuuharvennuksesta

mahdollisesti seuraava suuremman ravinnepoistuman aiheuttama kasvun taantuma jätettiin simuloinnissa huomioimatta.

### 4.3 Vuosituotoksen laskenta

Vuosituotokset laskettiin Motilla simuloitujen hakkuu- ja puutavaralajikohtaisten kertymien sekä päätehakkuiän perusteella. Hakkuukohtaisista kertymistä laskettiin koko kiertoajan kertymä puutavaralajeittain. Kiertoajan kertymä jaettiin kiertoajan kestolla, josta saatiin vuosituotos. Vuosituotos laskettiin erikseen kokonaisvuosituotoksena, ainespuun vuosituotoksena ja tukkipuun vuosituotoksena. Kokonaisvuosituotokseen sisältyy energiapuu, kuitupuu ja tukkipuu. Ainespuun vuosituotos sisältää kuitupuun ja tukkipuun. HMS- ja K2-kasvatuksissa ei korjattu energiapuuta, jolloin kokonaisvuosituotos ja ainespuunvuosituotos ovat yhtä suuret. Lasketut vuosituotokset jaettiin puolajeittain.

### 4.4 Taloustulosten laskenta

Nettotulojen nykyarvo laskettiin Motilla simuloitujen hakkuu- ja puutavaralajikohtaisten kertymien sekä hakkuiden ajoittumisen perusteella. Nettotulojen nykyarvon tarkastelussa päätöksentekohetki asetettiin energiapuuharvennusajankohtaan. Energiapuuharvennetun metsikön biologinen ikä oli metsikkökohtaisena vertailuikä, jota käytettiin kaikissa metsikön kasvatuksissa päätöksentekohetkenä. Tähän päätöksentekohetkeen diskontattiin metsikön hakkuukohtaiset nettotulot. Joidenkin metsiköiden HMS-kasvatuksen ensiharvennus tehtiin ennen vertailuikää, jolloin ensiharvennuksen tulot prolongattiin vertailuikään. Uudistamis- tai taimikonhoitokustannuksia ei otettu nettotulojen nykyarvon laskennassa huomioon. Nettotulojen nykyarvo laskettiin korkokannoilla 1 – 5 % ja energiapuun hinnoilla 3€/k-m<sup>3</sup> ja 5€/k-m<sup>3</sup>. Päätehakuilla kantohintoina käytettiin marraskuun 2010 koko maan keskihintoja (Metsäntutkimuslaitos 2010a). Ensiharvennuksille laskettiin 20 % alemmat ja myöhemmille harvennuksilla 10 % alemmat kantohinnat kuin päätehakuilla (taulukko 2). Koivutukin ja koivukuidun kantohintoja käytettiin sekä raudus- ja hieskoivulle että muille lehtipuille.

Taulukko 2. Nettotulojen nykyarvon laskennassa käytetyt kantohinnat, €/m<sup>3</sup>.

	Ensiharvennus	Väliharvennukset	Päätehakkuu
<b>Mäntytukki</b>	43,30	48,71	54,12
<b>Mäntykuitu</b>	12,66	14,24	15,82
<b>Kuusitukki</b>	44,07	49,58	55,09
<b>Kuusikuitu</b>	15,06	16,94	18,82
<b>Koivutukki</b>	31,85	35,83	39,81
<b>Koivukuitu</b>	12,74	14,34	15,93

Nettotulojen nykyarvon lisäksi laskettiin energiapuun hinnalle metsikkökohtainen kynnysarvo, jolla K1:n ja HMS:n nettotulojen nykyarvot ovat yhtä suuret. Tässä työkaluna käytettiin MS Excel:n Solver-lisäosaa. Kohdeyhtälönä oli K1:n ja HMS:n nettotulojen nykyarvojen erotus, jonka tavoitearvoksi asetettiin nolla. Ainoana muuttujana oli energiapuun hinta (€/k-m<sup>3</sup>). Kynnys hinta laskettiin kolmen ja viiden prosentin korkokannoilla metsiköittäin.

#### 4.5 Tilastolliset testit

Kasvatusten (K1, K2 ja HMS) välisiä eroja ja niiden tilastollista merkitsevyyttä testattiin pareittain Wilcoxonin testillä vuosituotosten ja nettotulojen nykyarvojen osalta. Testi on ei-parametrinen ja ei sisällä oletusta populaation normaalisuudesta. Sen sijaan oletetaan, että populaation jakauma on jatkuva ja symmetrinen. Testin avulla tutkitaan havaintoparien välisen erotuksen suuntaa ja suuruutta, mistä johdetaan populaatioiden, tässä tapauksessa kasvatusten välisten erojen tilastollinen merkitsevyys (Ranta ym. 1989). Wilcoxonin testiä käytettiin koska, kasvatusten väliset erot oletettiin tässä metsikön sisällä pienemmiksi kuin metsiköiden välillä. Tilastotestit laskettiin PASW (versio 18.0.2) ohjelmistolla. Kaikissa tilastotesteissä tulokset esitettiin merkitseviksi mikäli riskitaso oli 5% ( $p=0,05$ ) tai sitä pienempi.

## 5. TULOKSET

### 5.1 Metsikkötunnukset

Laskennoissa mukana olevista metsiköistä 15 on mäntyvaltaisia ja 13 kuusivaltaisia. Kohteista 13 sijaitsee Kaakkois-Suomen, 8 Häme-Uudenmaan, 6 Keski-Suomen, ja yksi Etelä-Savon metsäkeskuksen alueella. Ainoana OMT-männikkönä metsikkö 16 on käsitelty keskiarvojen laskennassa ja tulkinnassa MT-metsikkönä. Metsiköt jakautuvat varsin tasaisesti kasvupaikoittain. Yhtä lukuun ottamatta kaikki kuivahkon kankaan männiköt sijaitsevat Kaakkois-Suomessa. Tuoreen kankaan kuusikoista suuri osa sijaitsee Keski-Suomessa. Tuoreen kankaan männiköt ja lehtomaisen kankaan kuusikot ovat maantieteellisesti tasaisemmin jakautuneet. Metsiköt olivat iältään 18–33 vuotta. Metsiköiden puustotunnukset ovat taulukossa 3. Keskimääräiset puustotiedot sekä energiapuukertymä kasvupaikoittain ovat kuvina liitteessä 2.

Taulukko 3. Metsikkötunnukset metsiköittäin ja kasvupaikoittaisina keskiarvoina ennen (e) ja jälkeen (j) energiapuuharvennuksen. N=runkoluku/ha, Ppa=pohjapinta-ala/ha, Hdom=valtapituus (100 paksuinta puuta), D=pohjapinta-alalla painotettu rinnankorkeusläpimitta.

<i>Metsikkö</i>	<i>Sijainti</i>	<i>Ikä</i>	<i>N<sub>e</sub></i>	<i>N<sub>j</sub></i>	<i>Ppa<sub>e</sub></i>	<i>Ppa<sub>j</sub></i>	<i>H<sub>dom e</sub></i>	<i>H<sub>dom j</sub></i>	<i>D<sub>e</sub></i>	<i>D<sub>j</sub></i>
<b>Männiköt (keskimäärin)</b>		<b>26,9</b>	<b>3267</b>	<b>1158</b>	<b>24,5</b>	<b>13,0</b>	<b>13,1</b>	<b>12,9</b>	<b>12,7</b>	<b>14,2</b>
<b>Lehtomainen kangas</b>		<b>23</b>	<b>3260</b>	<b>940</b>	<b>32,8</b>	<b>15,8</b>	<b>12,8</b>	<b>12,8</b>	<b>13,8</b>	<b>15,8</b>
16	Häme-Uusimaa	23	3260	940	32,8	15,8	12,8	12,8	13,8	15,8
<b>Tuorekangas</b>		<b>26,3</b>	<b>2914</b>	<b>1046</b>	<b>24,9</b>	<b>13,0</b>	<b>13,4</b>	<b>13,2</b>	<b>13,3</b>	<b>14,9</b>
1	Häme-Uusimaa	26	2765	1005	29,1	14,8	13,2	13,1	14,1	15,5
2	Kaakkois-Suomi	28	3180	820	27,8	13,4	17,0	15,6	15,0	16,8
4	Häme-Uusimaa	29	3140	1240	27,8	15,8	14,3	14,2	13,8	15,7
7	Kaakkois-Suomi	22	5505	1805	18,6	9,7	11,7	11,7	9,3	11,3
8	Kaakkois-Suomi	18	2550	1250	22,1	12,7	10,4	10,3	12,7	13,3
15	Häme-Uusimaa	28	2325	665	24,0	11,6	14,0	14,0	14,9	16,9
<b>Kuivahko kangas</b>		<b>27,9</b>	<b>3576</b>	<b>1284</b>	<b>23,1</b>	<b>12,6</b>	<b>13,0</b>	<b>12,8</b>	<b>12,1</b>	<b>13,6</b>
3	Kaakkois-Suomi	30	2630	1290	20,0	11,1	15,5	15,5	12,8	14,0
6	Kaakkois-Suomi	25	3760	1400	22,4	11,2	11,3	11,2	11,1	12,1
9	Kaakkois-Suomi	30	5575	1515	26,9	13,3	12,4	12,4	10,7	12,7
10	Kaakkois-Suomi	33	5475	1595	26,0	12,0	12,0	11,3	10,4	11,9
11	Kaakkois-Suomi	23	2135	1195	16,2	10,7	11,1	11,0	11,7	12,5
12	Kaakkois-Suomi	32	3960	1120	28,7	15,0	16,4	16,3	13,4	16,0
13	Kaakkois-Suomi	25	2055	935	21,1	12,0	13,1	12,6	13,4	14,2
14	Häme-Uusimaa	25	3020	1220	23,6	15,5	11,9	11,9	13,5	15,0
<b>Kuusikot (keskimäärin)</b>		<b>25,1</b>	<b>3632</b>	<b>1374</b>	<b>27,2</b>	<b>12,8</b>	<b>14,9</b>	<b>14,1</b>	<b>12,8</b>	<b>13,8</b>
<b>Lehtomainen kangas</b>		<b>25,3</b>	<b>3408</b>	<b>1281</b>	<b>25,9</b>	<b>12,6</b>	<b>14,6</b>	<b>13,8</b>	<b>12,8</b>	<b>14,1</b>
17	Häme-Uusimaa	23	4510	1170	20,3	8,4	14,1	13,5	11,2	13,4
19	Kaakkois-Suomi	29	3575	1295	23,9	9,7	17,5	14,9	12,1	13,2
22	Kaakkois-Suomi	26	1720	940	28,7	18,3	17,0	16,9	16,2	17,0
23	Häme-Uusimaa	25	3695	1775	31,1	17,4	13,4	13,4	12,8	13,8
24	Etelä-Savo	24	3894	1406	24,1	13,0	12,8	12,8	11,6	13,9
28	Keski-Suomi	25	2365	845	23,2	8,3	13,1	11,8	13,8	14,7
30	Keski-Suomi	25	4095	1535	30,2	13,1	14,6	13,6	12,3	12,6
<b>Tuorekangas</b>		<b>25,0</b>	<b>3856</b>	<b>1468</b>	<b>28,8</b>	<b>13,2</b>	<b>15,3</b>	<b>14,4</b>	<b>12,6</b>	<b>13,5</b>
18	Häme-Uusimaa	23	8163	3088	23,4	10,8	14,5	14,1	8,1	9,3
21	Kaakkois-Suomi	30	2169	1094	32,7	12,8	16,6	15,5	16,0	14,6
25	Keski-Suomi	22	4035	1295	30,2	14,4	15,1	14,9	12,5	14,3
26	Keski-Suomi	25	2585	1065	30,0	14,1	16,6	14,0	14,8	15,3
27	Keski-Suomi	19	4060	1600	21,4	12,6	13,0	13,0	10,8	12,6
29	Keski-Suomi	26	3745	1065	35,0	14,2	16,0	14,8	13,6	15,0

## 5.2 Vuosituotos

### Männiköt

HMS antaa männiköissä niukasti suurimman vuosittaisen kokonais(energiapuu+kuitu+tukki)-, ainespuu(kuitu+tukki)- ja tukkituotoksen sekä MT:llä että VT:llä (kuvat 4, 5 ja 6). Erojen tilastolliset merkitsevyydet on merkitty kuviin kirjaimin. Kasvatusten välisten erojen tilastollista merkitsevyyttä on testattu kasvupaikan sisällä. Mikäli kasvatukset saavat saman kirjaimen, niiden välillä ei ole tilastollisesti merkisevää eroa. Esimerkiksi kuvassa 5 OMT-kuusikoissa HMS ei eroa tilastollisesti merkitsevästi K1:stä tai K2:sta. K1:n ja K2:n välillä sen sijaan on tilastollisesti merkitsevä ero.

Mikäli lehtipuuosuutta ei huomioida, kasvaa ero HMS:n eduksi erityisesti MT:llä. Tukkipuun tuotokseen lehtipuuosuus ei kuitenkaan vaikuta merkittävästi ja erot ovat kasvatusten välillä pienet. VT:llä lehtipuuosuus on pieni, ja vaikuttaa siten vain vähän vuosituotokseen. Havupuun vuosituotokset ovat VT:llä kasvatusten välillä hyvin lähellä toisiaan.

K1:n ja K2:n välillä ei ole merkittävää eroa kokonaisvuosituotoksessa. Ainespuun tuotoksessa K2 on MT:llä selkeästi K1:n edellä. Myös VT:llä ero on samansuuntainen, mutta pieni. Tukkipuun vuosituotoksessa K1 ja K2 ovat samalla tasolla.

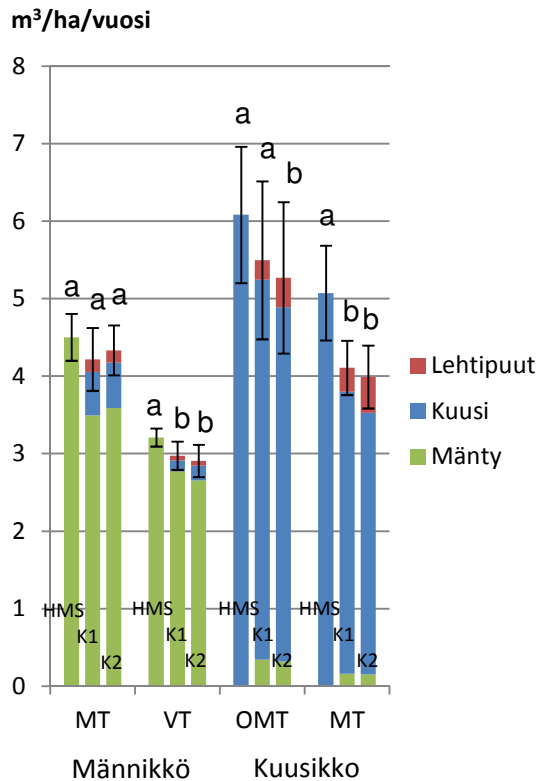
MT-männiköissä keskimääräinen kokonaisvuosituotos HMS-kasvatuksella oli 8,1 m<sup>3</sup>/ha, K1:llä 8,0 m<sup>3</sup>/ha ja K2:lla 7,8 m<sup>3</sup>/ha. Metsiköiden välillä on kuitenkin huomattavia eroja ja keskihajonta on suuri (liite 3). Metsiköiden 8 ja 16 kohdalla kokonaisvuosituotos on sekä K1 että K2-kasvatuksessa HMS-kasvatusta suurempi. Tukiin keskimääräisen vuosituotoksen erot ovat samaa suuruusluokkaa kuin kokonaisvuosituotoksen (kuva 6). Myös tukiin vuosituotoksen keskihajonnat ovat huomattavan suuret (liite 3).

Keskimääräinen kokonaisvuosituotos VT:llä on HMS-kasvatuksella 5,8 m<sup>3</sup>/ha, K1:llä 5,6 m<sup>3</sup>/ha ja K2:lla 5,2 m<sup>3</sup>/ha. Kuivahkolla kankaalla keskihajonnat ovat suhteellisen pienet. K2-kasvatus jää poikkeuksetta heikoimmaksi vaihtoehdoksi. Kolmessa metsikössä K1-kasvatus tuottaa suuresta energiapuukertymästä johtuen enemmän kuin

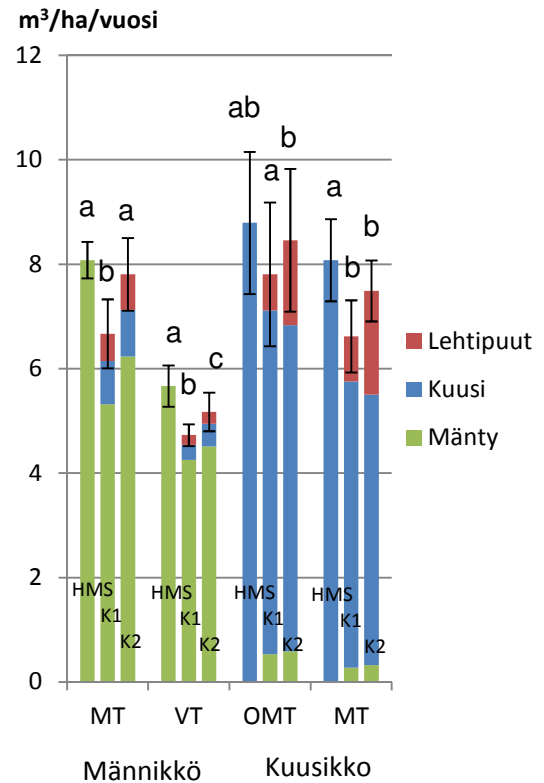
HMS-kasvatus. HMS-kasvatus tuottaa tukkia vuosittain  $0,3 \text{ m}^3/\text{ha}$  muita kasvatuksia enemmän.

Keskimääräinen kiertoaika tuoreella kankaalla on HMS-kasvatuksella 59 vuotta, K1:llä 60 vuotta ja K2:lla 64 vuotta. Kuivahkolla kankaalla vastaavasti 71 vuotta, 74 vuotta ja 77 vuotta. (kuva 7) Tuoreella kankaalla ero HMS:n ja K1:n välillä on pieni. K2:n kiertoaika on selvästi edellisiä pidempi. Kuivahkolla kankaalla sekä K1 että K2 ovat huomattavasti HMS-kasvatusta jäljessä.

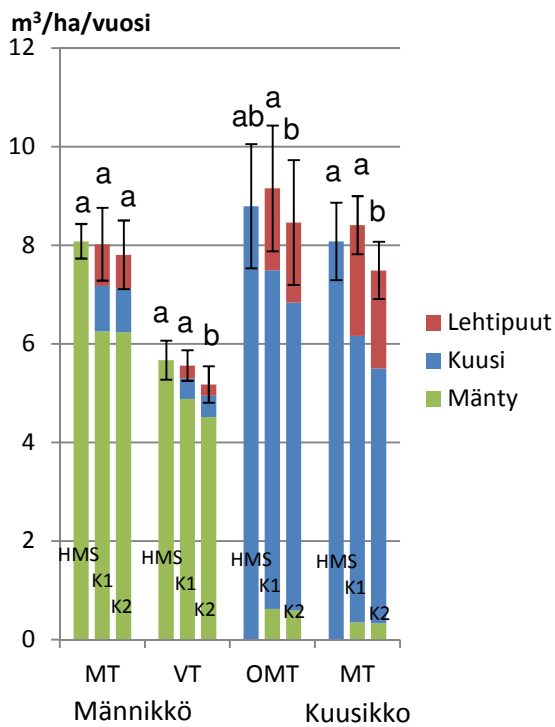




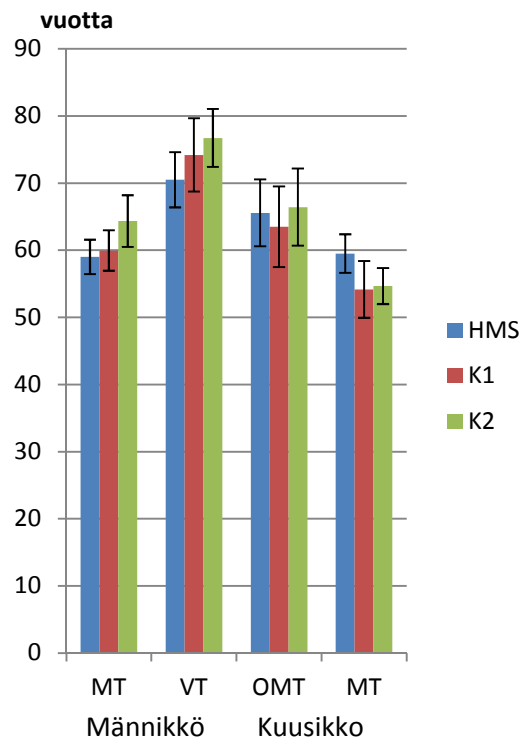
**Kuva 4. Kokonaisvuosituotos puulajeittain. Palkit kuvaavat keskihajontaa ja kirjaimet tilastollista merkitsevyyttä (Wilcoxon).**



**Kuva 5. Ainespuun vuosituotos puulajeittain. Palkit kuvaavat keskihajontaa ja kirjaimet tilastollista merkitsevyyttä (Wilcoxon).**



**Kuva 6. Tukkipuun vuosituotos puulajeittain. Palkit kuvaavat keskihajontaa ja kirjaimet tilastollista merkitsevyyttä (Wilcoxon).**



**Kuva 7. Kiertoaika. Palkit kuvaavat keskihajontaa.**

### Kuusikot

Kuusikoissa K1-kasvatuksen kokonaisvuosituotos on suuresta energiapuukertymästä johtuen HMS-kasvatusta korkeampi sekä OMT:llä että MT:llä. Kuitenkin jos lehtipuuosuus jätetään huomioimatta, on HMS:n kokonaistuotos selkeästi korkein. Tukkipuun vuosituotos on HMS:llä noin 1 m<sup>3</sup>/ha korkeampi kuin K1:llä ja K2:lla. (kuvat 4, 5 ja 6)

K1:llä on K2:ta korkeammat sekä kokonaisvuosituotos että tukkipuun vuosituotos. Tukkipuun vuosituotoksessa ero on kuitenkin vain 0,2 m<sup>3</sup>/ha. Havupuuosuutta tarkasteltaessa myös ainespuun vuosituotos on K1:llä korkeampi.

OMT-kuusikoissa keskimääräinen kokonaisvuosituotos HMS-kasvatuksella oli 8,8 m<sup>3</sup>/ha, K1:llä 9,2 m<sup>3</sup>/ha ja K2:lla 8,5 m<sup>3</sup>/ha. MT:llä keskimääräiset kokonaisvuosituotokset ovat vastaavasti 8,1 m<sup>3</sup>/ha, 8,4 m<sup>3</sup>/ha ja 7,5 m<sup>3</sup>/ha. Keskihajonta on kuusikoissa selvästi suurempaa kuin männiköissä. Erityisesti OMT:llä keskihajonta peittää kasvatusten väliset erot. Metsikkökohtaisissa kokonaisvuosituotoksissa ei ole selkeää samansuuntaisuutta (liite 3). Aines- ja tukkipuun vuosituotoksissa HMS eroaa suurella osalla kuusikoita selkeästi muiden kasvatusten yläpuolelle.

Keskimääräinen kiertoaika OMT:llä on HMS-kasvatuksella 66 vuotta, K1:llä 64 vuotta ja K2:lla 66 vuotta. MT:llä vastaavasti 60 vuotta, 54 vuotta ja 55 vuotta (kuva 7). OMT:llä K1 johtaa niukasti lyhimpään kiertoaikaan, mutta ero jäävät keskihajonnan sisälle. MT:llä sekä K1 että K2 antavat selkeästi HMS-kasvatusta lyhyemmän kiertoajan.

### **5.3 Nettotulojen nykyarvo**

#### Männiköt

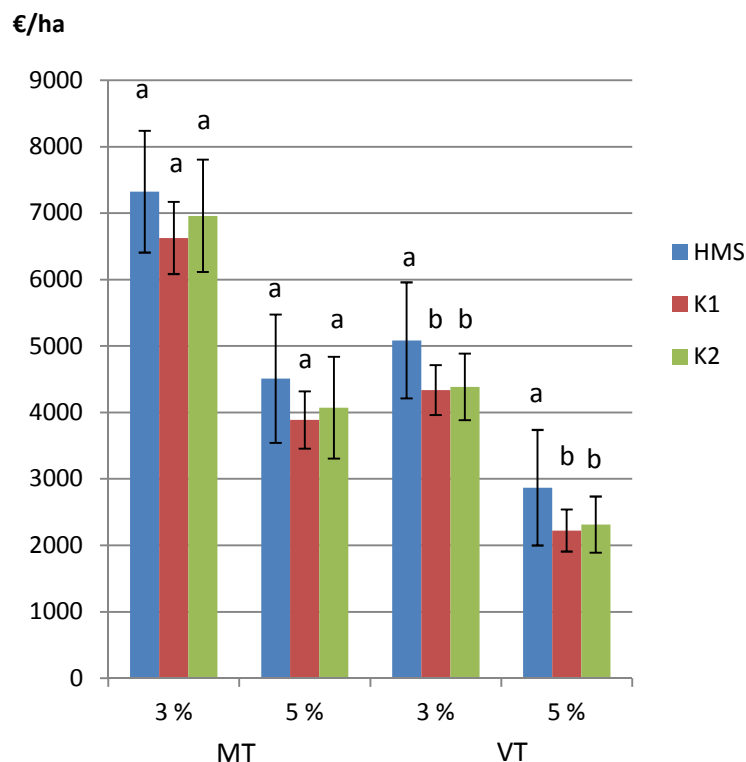
Kasvatusten taloudellinen tuotto kiertoajalla esitetään nettotulojen nykyarvoina. Männiköissä HMS antaa suuremman nettotulojen nykyarvon kuin K1 (kuvat 8 ja 9). Ero säilyy lähes muuttumattomana korkokannasta riippumatta. Myöskään energiapuun

hinnan korotus kolmesta eurosta viiteen euroon/k-m<sup>3</sup> ei muuta tilannetta merkittävästi Metsiköiden välinen vaihtelu on männiköissä kuusikoita pienempää (liite 4).

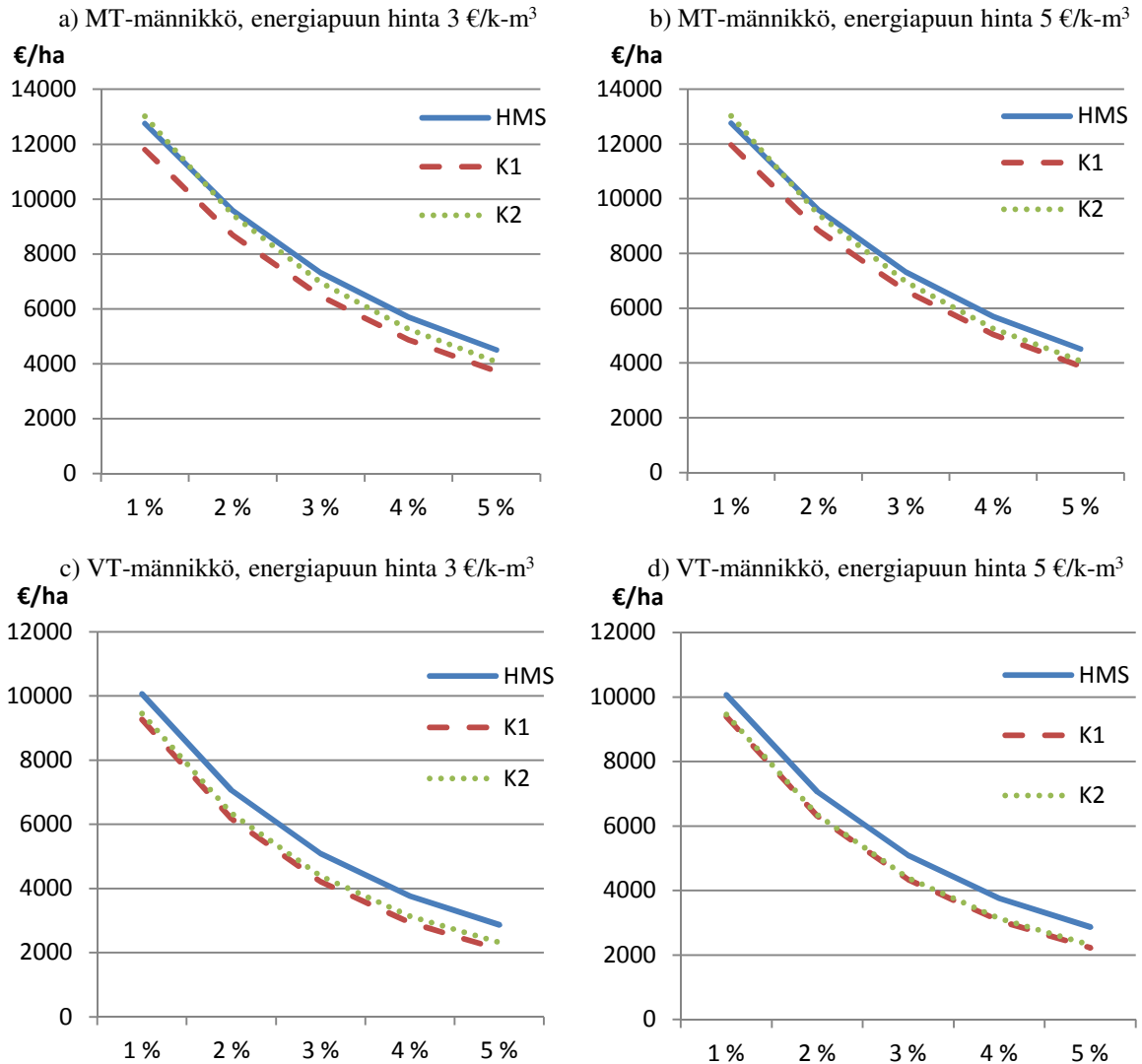
MT:llä K2 antaa yhden prosentin korkokannalla suuremman nettotulojen nykyarvon kuin HMS. Korkokannan kasvaessa K2 putoaa HMS:n alapuolelle. Kaikilla käytetyillä korkokannoilla ja energiapuun hinnoilla K2 antaa MT:llä suuremman nettotulojen nykyarvon kuin K1.

VT:llä sekä HMS:n ja K1:n että K1:n ja K2:n väliset erot säilyvät korkokannasta riippumatta samoina. Kolmen ja viiden euron/k-m<sup>3</sup> energiapuun hinnoilla K2 antaa vielä lievästi suuremman nettotulojen nykyarvon kuin K1.

Energiapuun hinta, jolla K1 tuottaa saman nettotulojen nykyarvon kuin HMS on kolmen prosentin korkokannalla MT:llä 14 €/k-m<sup>3</sup> ja VT:llä 17 €/k-m<sup>3</sup> (taulukko 4). Viiden prosentin korkokannalla vastaavasti 12 €/k-m<sup>3</sup> ja 15 €/k-m<sup>3</sup>.



**Kuva 8. Männiköiden nettotulojen nykyarvo kasvatuksittain suhteessa korkokantaan energiapuun hinnalla 5€/k-m<sup>3</sup>. Palkit kuvaavat keskihajontaa ja kirjaimet tilastollista**

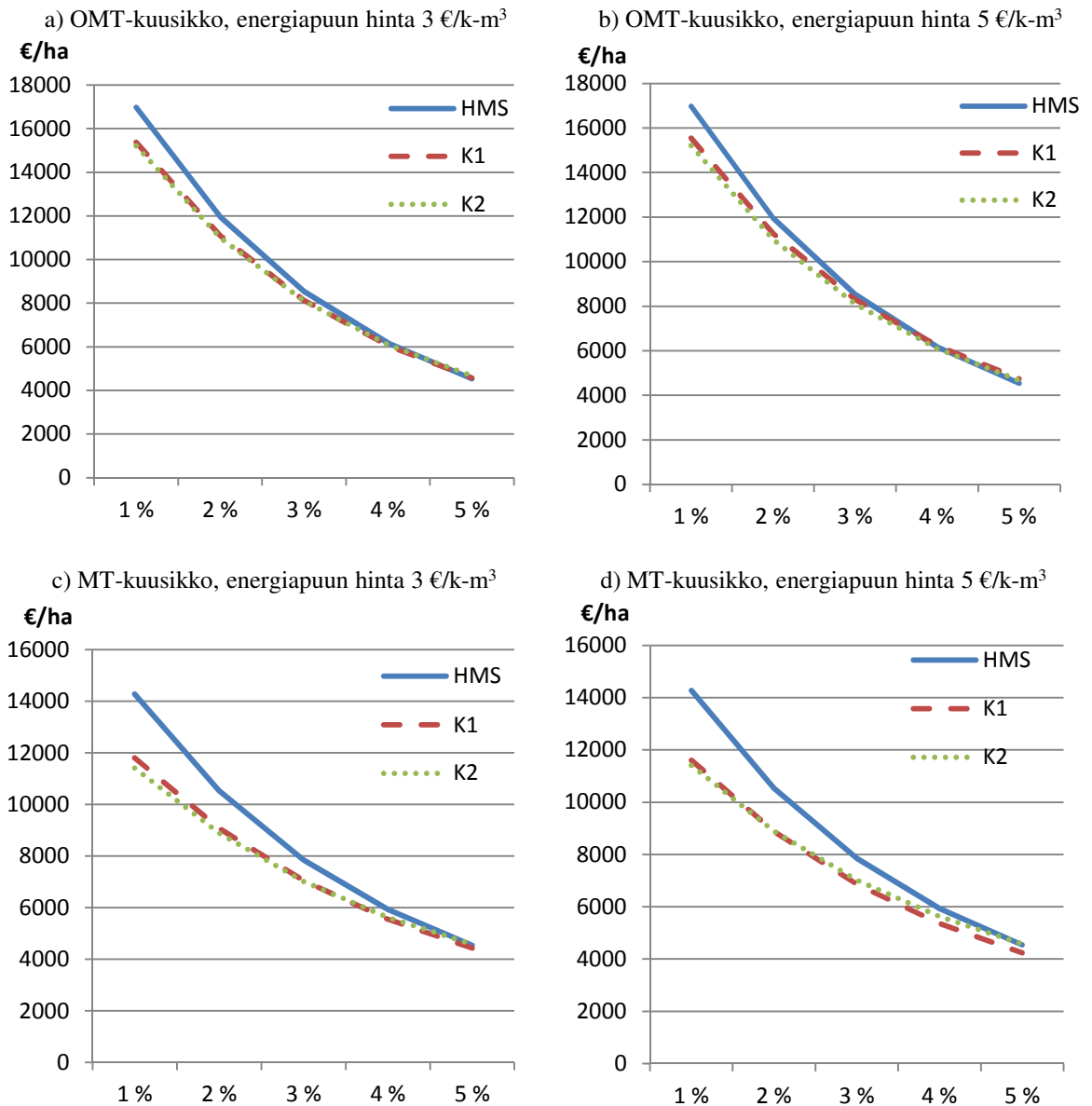


**Kuva 9. Männiköiden nettotulojen nykyarvo kasvatuksittain suhteessa korkokantaan.**

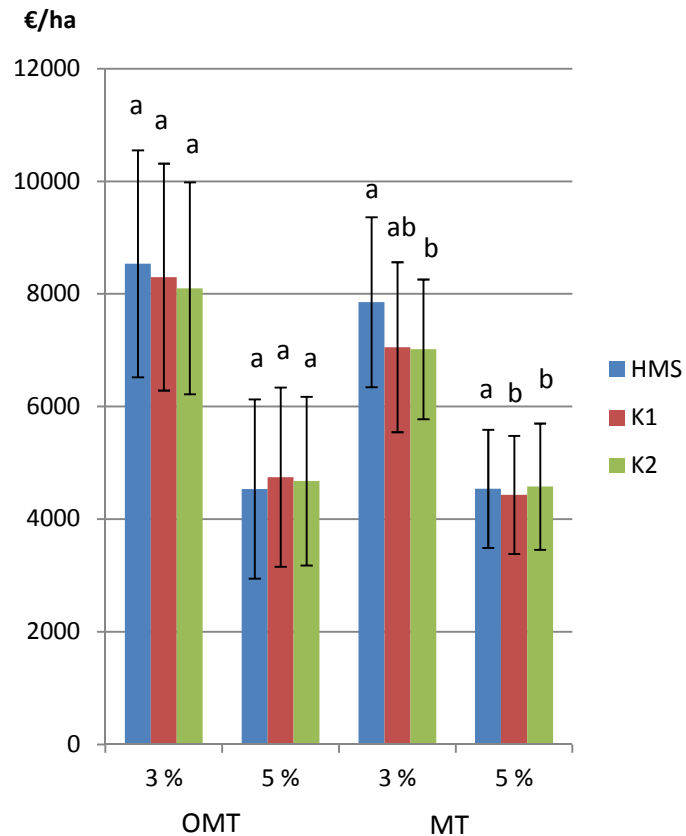
### Kuusikot

Kuusikoissa yhden prosentin korkokannalla HMS antaa selvästi suurimman nettotulojen nykyarvon (kuva 10). Korkokannan kasvaessa HMS:n ja muiden kasvatusten välinen ero kaventuu. 5 prosentin korkokannalla ja 3 euron energiapuunhinnalla HMS:n ja K1:n nettonykyarvot ovat samalla tasolla (kuvat 10 ja 11). K1 ja K2 ovat käytetyillä energiapuun hinnoilla samalla tasolla. Jo muutaman euron korotus energiapuun hinnassa nostaa K1:n tuottoisammaksi. Kasvupaikkojen välillä ei ole merkittävää eroa Metsiköiden välillä on kuitenkin huomattavaa vaihtelua (liite 4).

Energiapuun hinta, jolla K1 tuottaa saman nettotulojen nykyarvon kuin HMS on kolmen prosentin korkokannalla OMT:llä 8 €/k-m<sup>3</sup> ja MT:llä 10 €/k-m<sup>3</sup> (taulukko 4). Viiden prosentin korkokannalla vastaavasti 2 €/k-m<sup>3</sup> ja 4 €/k-m<sup>3</sup>.



**Kuva 10. Kuusikoiden nettotulojen nykyarvot kasvatuksittain suhteessa korkokantaan.**



Kuva 11. Kuusikoiden nettotulojen nykyarvo kasvatuksittain suhteessa korkokantaan energiapuun hinnalla 5€/k-m<sup>3</sup>. Palkit kuvaavat keskihajontaa ja kirjaimet tilastollista merkitsevyyttä (Wilcoxon).

Taulukko 4. Energiapuun kynnyshinta (€/k-m<sup>3</sup>), jolla K1:n mukaiset diskontatut nettotulot yhtä suuret kuin HMS:n mukaiset vastaavat. Kynnysarvot laskettu sekä kolmen että viiden prosentin korkokannoilla.

	3 %	5 %
<b>Männikkö</b>	<b>15,2</b>	<b>13,3</b>
MT	13,7	11,8
VT	16,6	14,6
<b>Kuusikko</b>	<b>8,8</b>	<b>2,9</b>
OMT	8,0	2,4
MT	9,7	3,6
<b>Keskimäärin</b>	<b>12,3</b>	<b>8,5</b>

## 6. TULOSTEN TARKASTELU

### 6.1 Vertailu energiapuuharvennetun ja Hyvän metsänhoidon suositusten mukaisesti hoidetun metsikön välillä

Männiköissä erot ovat kokonaisvuosituotoksen osalta pienet. Kuusikoissa K1-kasvatus antaa suurimman kokonaisvuosituotoksen. Tämä johtuu useasta tekijästä. Kuusikoiden energiapuuharvennuskertymä oli tuoreella kankaalla keskimäärin 85 m<sup>3</sup> ja lehtomaisella kankaalla 99 m<sup>3</sup>. Suurehko kertymä koostui pääosin lehtipuusta, josta huomattava osa on ainespuuksi kelpaamatonta. Lehtipuuston kasvu on nuoruusvaiheessa havupuita nopeampaa, jolloin lehtipuusto kasvattaa kokonaisvuosituotosta erityisesti nuorena metsikössä (Valkonen 2000). Kun lehtipuusto korjataan suurelta osin ensimmäisessä harvennuksessa ja kasvatetaan havupuuvaltainen puusto kiertoajan loppuun, päästään korkeampaan keskimääräiseen kokonaisvuosituotokseen. Jos tarkastellaan pelkkää havupuun osuutta kokonaisvuosituotoksesta, kääntyy ero selkeästi HMS-kasvatuksen hyväksi.

Ainespuun vuosituotos on luonnollisesti K1-kasvatuksella alempi kuin HMS-kasvatuksella, koska K1-kasvatuksen ensimmäisen harvennuksen kertymä käytetään kokonaan energiaksi. Lehtomaisen kankaan kuusikoita lukuun ottamatta erot ainespuun vuosituotoksessa K1:n ja HMS:n välillä ovat tilastollisesti merkitseviä.

HMS-kasvatus antaa sekä männiköissä että kuusikoissa suurimman keskimääräisen tukkipuun vuosituotoksen. Männiköissä erot ovat varsin pienet, joskin kuivahkolla kankaalla ero on tilastollisesti merkitsevä. Kuusikoissa ero on keskimäärin huomattava. Lehtomaisen kankaan kuusikoiden suuresta keskihajonnasta johtuen ero ei niillä ole kuitenkaan tilastollisesti merkitsevä. Tiheän ja usein lehtipuuston varjostuksessa tapahtuvan alkukehityksen myötä järeytyminen hidastuu (Huuri ym. 1987, Varmola 1996). Kuusikoissa lehtipuuston varjostuksella on huomattava vaikutus myös pituuskasvuun (Valkonen 2000). Harvennuksen jälkeen erityisesti puuston paksuuskasvu kiihtyy (Niemistö 2005). Kun päätehakkuukriteerinä käytetään läpimittaa, jää puuston pituus päätehakkuuhetkellä energiapuuharvennuskohdeilla Hyvän metsänhoidon suositusten mukaisesti kasvatettua metsikköä alhaisemmaksi. Tämä vähentää selvästi tukkipuun tuotosta.

HMS-kasvatus on männiköissä kiertoajaltaan lyhin. Tämä johtuu siitä, että K1- ja K2-kasvatusten tiheä alkukehitys hidastaa järeytymistä (Huuri ym. 1987, Varmola 1996), jolloin päätehakkuuläpimitta saavutetaan myöhemmin. Kuusikoissa sen sijaan HMS-kasvatus antaa K1-kasvatusta pidemmän kiertoajan. Tämä voi osaltaan johtua siitä, että ylitiheässä metsikössä, erityisesti kuusikoissa pituusjakauma on laaja, jolloin valtapituutta edustavat puut jäävät harvennuksen jälkeen harvaan, saavat paljon kasvutilaa ja järeytyvät nopeasti. Kuusi pystyy käyttämään harvennuksessa vapautuneen tilan mäntyä nopeammin hyväkseen (Niemistö 2005). Harvennusreaktio näkyy erityisesti paksuuskasvun kiihtymisenä (Niemistö 2005), jolloin päätehakkuuläpimitta täyttyy verrattain nopeasti. Niemistön (2005) mukaan hyvin harvapuustoisessa metsikössä pituuskasvu on hitaampaa. Siten valtapuuston harvuudesta kertoo myös K1-kasvatusten pienempi valtapituus päätehakkuuhetkellä.

Männiköissä HMS-kasvatus antaa kaikilla käytetyillä energiapuun hinnoilla ja korkokannoilla K1-kasvatusta suuremman nettotulojen nykyarvon. Korkokannan kasvaessa suhteellinen ero HMS-kasvatuksen ja K1-kasvatuksen välillä kasvaa männiköissä varsin jyrkästi. Kuivahkolla kankaalla 3 %:n korkokannalla ja 5 euron energiapuun hinnalla suhteellinen ero on 17 % ja 5 %:n korkokannalla jo 29 % HMS:n hyväksi. Tuoreella kankaalla ero on vastaavasti 11 % ja 16 %. Suhteellinen ero on siis erityisesti kuivahkolla kankaalla huomattavan suuri. Energiapuunhinnan kasvaessa ero K1:n ja muiden kasvatusten välillä pienenee. HMS-kasvatuksen lyhyempi kiertoaika ja energiapuuharvennuksen kuusikoita pienempi kertymä johtaa siihen, että männiköissä energiapuun kynnyshinta, jolla K1-kasvatus antaa yhtä suuren nettotulojen nykyarvon kuin HMS-kasvatus on varsin korkea. Jo aikaisemmassa tutkimuksessa on todettu, että verrattuna suositusten mukaiseen kasvatukseen hoitorästit ja niistä johtuva ylitiheys, suuri lehtipuuosuus sekä pidempi kiertoaika laskevat männiköissä metsänkasvatuksen kannattavuutta merkittävästi (Hynynen 1998).

Päinvastoin kuin männiköissä, kuusikoissa kasvatusten väliset nettotulojen nykyarvojen erot kapenevat korkokannan kasvaessa. 5 %:n korkokannalla kasvatukset ovat käytännössä tasoissa. Tuoreella kankaalla 3 %:n korkokannalla ja 5 euron energiapuun hinnalla suhteellinen ero on 11 % ja 5 %:n korkokannalla 2 % HMS:n hyväksi. Lehtomaisella kankaalla ero on 3 %:n korkokannalla 3 % HMS:n hyväksi. 5 %:n



korkokannalla ero on kääntynyt jo toisin päin K1-kasvatuksen antaessa 4 % korkeamman nettotulojen nykyarvon. Energiapuun kynnyshinta on 5 %:n korkokannalla enää noin 3 €/m<sup>3</sup>. Kuusikoiden alhainen kynnyshinta selittyy K1:n lyhyemmällä kiertoajalla ja suurella energiapuukertymällä. Energiapuuharvennus tehdään kuusikoissa pääsääntöisesti HMS:n ensiharvennusta aiemmin, jolloin suuri energiapuukertymä saa suuren arvon nettotulojen nykyarvoa laskettaessa. Tulosten perusteella suurehkon lehtipuusuuden kasvattaminen kuusikossa ensiharvennukseen asti voi parantaa metsänkasvatuksen kannattavuutta, kun ensimmäinen harvennus tehdään energiapuuharvennuksena ja kokopuukorjuuna. Tällöin kertymä nousee niin suureksi, että jo 3 €/m<sup>3</sup> energiapuun hinnalla ainespuuensiharvennusta aikaisemmin suoritettava energiapuuharvennus vaikuttaa nettotulojen nykyarvoon merkittävästi. Valkonen (2000) tutkittuaan kaksijaksoisen kuusi-koivusekamatsikön tuotosta ja kannattavuutta on saanut vastaavan suuntaisia tuloksia. Valkosen (2000) mukaan kaksijaksoisen sekametsikön kasvattaminen 30 vuoden ikään saakka on parhaimmillaan huomattavasti puhdasta kuusikkoa kannattavampaa. Tutkimuksen hakkuutuloissa on tosin huomioitu ainoastaan ainespuu. Tällaisen kasvatusmallin yhteydessä on erittäin tärkeää huolehtia siitä, että mahdollisesti alikasvosasemaan jääneen kuusen kasvukyky ja tekninen laatu säilyvät hyvänä. Muutoin kuusen harvennuksen jälkeinen kasvun kiihtyminen voi olla erittäin hidasta (Valkonen 2000, Niemistö 2005). Kasvureaktion viivästyminen alentaa nopeasti metsänkasvatuksen kannattavuutta viivästyttämällä tulevia hakkuutuloja. Tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että ylitiheydestä ja puuston kilpailusta johtuvaa kasvukyvyn heikkenemistä sekä puuston kykyä reagoida harvennukseen on vaikeaa mallintaa eivätkä käytetyt kasvumallit ole varmasti tässä suhteessa aukottomat. On mahdollista, että Motin kasvumallit yliarvioivat lehtipuuston varjostukseen jääneen kuusikon kyvyn reagoida harvennuksessa lisääntyneeseen kasvutilaan. Tämä voi herkästi muuttaa kasvatusten välistä kannattavuusvertailua K1-kasvatuksen eduksi. Nettotulojen nykyarvoja tarkasteltaessa on huomattava että erot eivät valtaosin ole tilastollisesti merkitseviä riippumatta puulajista, kasvupaikasta tai kasvatuksesta.

## 6.2 Vertailu energiapuuharvennetun ja ainespuu harvennetun ylitieheen metsikön välillä

K2-kasvatus (ainespuu harvennettu ylitieheä metsikkö) jää kokonaisvuosituotoksen osalta muita kasvatuksia pienemmäksi sekä männiköissä että kuusikoissa. Myöhennetyistä ensiharvennuksista seuraa ylitieheässä metsikössä puuston luonnollista kuolemista, jolloin osa tuotoksesta menetetään (Hynynen 1998). K2-kasvatuksen ensiharvennuksessa suuri osa puustosta on pienen läpimitan ja osittain teollisuudelle käyttökelvottomien puulajien vuoksi ainespuuksi kelpaamatonta, jolloin osa harvennuspoistumasta jää hyödyntämättä ja kokonaisvuosituotos jää K1-kasvatusta (energiapuu harvennettu metsikkö) alemmaksi. Ainespuun vuosituotoksen osalta on syytä huomioida erityisesti havupuun osuus. Männiköissä energiapuu harvennettu metsikkö tuottaa K2-kasvatusta vähemmän havuainespuuta. Kuusikoissa ero on päinvastoin. Energiapuu harvennus kohdistuu männillä huomattavasti voimakkaammin havupuulle. Kuusikoissa sen sijaan energiapuukertymä on valtaosin lehtipuuta. Näin energiapuu harvennettu kuusikko tuottaa suuresta energiapuupoistumasta huolimatta enemmän havuainespuuta kuin K2-kasvatus. K1-kasvatus antaa useimmiten suuremman tukkipuun vuosituotoksen kuin K2-kasvatus. Erot eivät kuitenkaan ole tilastollisesti merkitseviä.

K1-kasvatus johtaa sekä männiköissä että kuusikoissa K2-kasvatusta lyhyempään kiertoaikaan. Tämä johtuu K2-kasvatuksessa myöhemmin tehdystä ensiharvennuksista. Myöhäinen ensiharvennus hidastaa puuston järeyskehitystä (Huuri ym. 1987) ja päätehakuuläpimitta saavutetaan myöhemmin.

Männiköissä K2-kasvatus antaa suuremman nettotulojen nykyarvon kuin K1-kasvatus. Kuivahkolla kankaalla kasvatusten välinen suhteellinen ero suurenee korkokannan kasvaessa ollen yhdestä neljään prosenttia tarkastelluilla korkokannoilla. Tuoreella kankaalla suhteellinen ero näyttää viiden euron energiapuun hinnalla tasoittuvan korkeammilla korkokannoilla noin 5 %:n tuntumaan. Kuusikoissa K1-kasvatus antaa erityisesti pienillä korkokannoilla K2-kasvatusta suuremman nettotulojen nykyarvon. Korkokannan kasvaessa ero kääntyy tuoreella kankaalla toisinpäin ja suhteellinen ero kasvaa varsin jyrkästi K2-kasvatuksen hyväksi. Lehtomaisella kankaalla ero on korkokannasta riippumatta vain muutaman prosentin luokkaa. Pääosin voidaan todeta,

että nettotulojen nykyarvon ero on pieni K1- ja K2-kasvatusten välillä puulajista ja kasvupaikasta riippumatta. Energiapuun hinnan mahdollisen nousun myötä energiapuuharvennus nousee nopeasti kannattavammaksi vaihtoehdoksi. Tämä on linjassa aiemman Heikkilän ym. (2007) pääosin männiköitä käsitelleen tutkimuksen kanssa.

### 6.3 Korjuujälki

Haastavat korjuuolosuhteet näkyvät energiapuuharvennusten korjuujäljessä. Lähtöpuuston suuri runkoluku, tiheä alikasvos sekä vesasyntyisten puiden suuri määrä lisäävät runkovaurioita ja kaventavat ajouraväliä. Korjuujäljen vaikutuksia tarkastellaan tässä Tapion valtakunnallisten harvennushakkuiden ja energiapuuharvennusten korjuujäljen tarkastusmittausten perusteella. Vuoden 2009 ja 2010 tarkastusmittauksissa energiapuuharvennuskohteista virheellisiä tai huomautuksen saaneita oli yli puolet (Äijälä 2010, Vanhatalo 2011). Tavanomaisissa harvennushakkuissa osuus on 32 % (2009) ja 34 % (2010). Puustovaurioiden ja urapainaumien määrä oli energiapuuharvennuksilla lähes kaksinkertainen perinteisiin harvennuksiin verrattuna. Ajouraväli oli noin 40 %:ssa energiapuuharvennuksista alle suositellun 20 metrin. Sekä energiapuuharvennusten että perinteisten harvennusten korjuujälki on huonontunut viime vuosien aikana (Vanhatalo 2011).

Puustovaurioita tarkastelleista tutkimuksista voidaan karkeasti summata, että puustovauriosta aiheutuu puulle noin 15 %:n kasvutappio vauriota seuraavan 5 vuoden ajaksi (esim. (Isomäki ja Kallio 1974, Huse 1978). Jos ensimmäisen harvennuksen jälkeen jäävää puustoa on 1000 runkoa/ha ja puustovaurioprocentti on 5,4, kuten vuonna 2010 energiapuuharvennuksilla (Vanhatalo 2011), on koko metsikölle puustovaurioista aiheutuva kasvutappio 0,8 %. Tavanomaisten harvennusten vaurioprocentilla 3,7 (Vanhatalo 2011) päädytään 0,6 %:n kasvutappioon. Ero energiapuuharvennusten ja perinteisten harvennusten välillä olisi siis vain 0,2 %-yksikköä. Jos tämä 5 vuoden aikainen kasvutappio suhteutetaan koko kiertoajan kasvuun, puustovaurioista kasvutappioiden syntyvät menetykset ovat lopulta häviävän pienet. Kuusikoissa puustovauriot aiheuttavat menetyksiä myös lahoutumisen kautta (Kokko ja Sirén 1996). Lahoutumisen kannalta haitallisimpia ovat juuri- ja juurenniskavauriot (Nilsson ja

Hyppel 1968, Kallio 1973, Moilanen 1990). Juurivaurioiden osuus on sama sekä energiapuuharvennuksilla että perinteisillä harvennuksilla (Vanhatalo 2011). Kallio (1973) on todennut, että kuusella runkovaurioon iskee 80 %:n todennäköisyydellä laho. Kokon ja Sirénin (1996) esimerkkilaskelmissa 6 %:n vaurioitumisella ja metsikön 80 %:n kuusiosuudella lahoutumisesta aiheutuva tappio on 4,3 m<sup>3</sup>/ha. 6 %:n vaurio-osuus vastaa varsin lähelle energiapuuharvennusten vaurioprosenttia. Kun oletetaan, että tälle tappion osuudelle maksetaan kuusitukin hinnan sijasta mäntykuidun hinta, on tappio noin 160 € hehtaarilla nykyisillä kantohinnoilla. Tappio realisoituu osin myöhemmissä harvennuksissa ja osin päätehakkuussa. Kun euromääräinen tappio diskontataan ensiharvennushetkeen olettaen, että tappio realisoituu keskimäärin 30 vuoden kuluttua, jää tappion nettonykyarvoksi 3 %:n korkokannalla 66 €. Esimerkiksi tässä työssä lasketusta energiapuuharvennetun OMT-kuusikon keskimääräisestä kiertoajan nettotulojen nykyarvosta tappio on 0,8 %. Eron perinteisiin harvennuksiin voidaan olettaa olevan samaa luokkaa kuin puustovaurioiden aiheuttamien kasvutappioiden osalta, noin 0,2 %-yksikköä.

Ajourista aiheutuvaa kasvutappiota voidaan tarkastella Niemistön (1989) esittämällä kaavalla. Laskettaessa Tapon vuoden 2010 tarkastusmittausten tuloksista saaduilla keskimääräisillä ajouraveyeyksillä, ajouraväleillä ja 1000 runkoa/ha runkoluvulla (Vanhatalo 2011), saadaan kasvutappioksi energiapuuharvennuksilla 5,6 % ja tavanomaisilla harvennuksilla 5,3 %. Ero johtuu energiapuuharvennusten keskimäärin yli metrin pienemmästä ajouravälistä. On huomattava, että kasvua verrataan tässä ajourattomaan metsikköön. Varsinaisesta korjuujäljen vaihtelusta johtuva ero harvennustapojen välillä on tässä tapauksessa hyvin pieni.

Ajourapainumaprosentti oli vuonna 2010 energiapuuharvennuksilla 3,5 ja tavanomaisilla harvennuksilla 2,1 (Vanhatalo 2011). Tähän on laskettu yli 10 cm syvät painumat. Urapainumista aiheutuvia kasvutappioita voidaan tarkastella aiempien tutkimustulosten perusteella. Wästerlundin esittämällä mallilla laskettuna 25-vuotiaan puun juuriston säde on keskimäärin 2,2 m. Kokon ja Sirénin (1996) yhtälöllä saadaan ajourapainumille altistuvien puiden osuudeksi energiapuuharvennuksilla 13,9 % ja perinteisillä harvennuksilla 13,1 %, kun juuriston säde on edellä laskettu 2,2 m, ajouran leveys on 4,3 m (Vanhatalo 2011), ajouraväli on energiapuuharvennuksilla 20,1 m ja perinteisillä harvennuksilla 21,3 m (Vanhatalo 2011), raideleveys on 2,7 m ja puuston

tiheyskertoimeksi oletetaan 1. Jos arvioidaan, että altistuvan puun juuristosta altistuu keskimäärin 20 %, saadaan Wästerlundin (1983) kuvaajasta (kuva 2) puun kasvutappioksi esimerkiksi MT-kuusikossa  $0,7 * 20 = 14$  %. VT-männikössä ja OMT-kuusikossa kasvutappio jäisi kuvaajan mukaan huomattavasti pienemmäksi. Kun puukohtainen kasvutappio suhteutetaan altistuvien puiden määrän mukaan koko metsikköön, saadaan keskimääräiseksi kasvutappioksi energiapuuharvennuksilla 2,0 % ja perinteisillä harvennuksilla 1,8 %.

Aiempiin tutkimuksiin pohjautuvan tarkastelun perusteella tämän hetkinen korjuujäljen ero energiapuuharvennusten ja tavanomaisten harvennusten välillä ei tuota merkittävästi suurempia menetyksiä energiapuuharvennuksilla. Korjuuvaurioiden seurausvaikutusten muodostumisessa on huomattava määrä muuttujia. Käytössä olevat Tapion korjuujälkitarkastusten tulokset eivät ole riittävän tarkat seurausvaikutusten kattavaan tarkasteluun. Aiemmista tutkimuksista voidaan kuitenkin saada suuntaa antavia lukuja mahdollisista menetyksistä. Tämä tarkastelu on tehty pääosin Kokon ja Sirénin (1996) tutkimuksen pohjalta ja saadut luvut vastaavat varsin hyvin heidän esimerkkilaskelmiensa tuloksia. On tärkeää huomata, että korjuujäljestä aiheutuvat seurausvaikutukset realisoituvat pääosin vasta myöhemmissä harvennuksissa ja päätehakkuussa. Tällöin vaikutus nettotulojen nykyarvoon jää varsin vähäiseksi. Korjuuvaurioista koituvat menetykset eivät ole tämän hetkiselällä korjuujäljellä niin suuret, että ne merkittävästi muuttaisivat kasvatusten välistä paremmuutta.

#### **6.4 Tulosten luotettavuus ja yleistettävyy**

Tulosten luotettavuus riippuu aineiston edustavuudesta ja käytettyjen kasvumallien tarkkuudesta. Tutkimus perustuu metsikkömittauksiin ja mitattujen metsiköiden jatkokehityksen ennustamiseen MOTTI-ohjelmistolla. Vertailunkohtana käytetyn Hyvän metsänhoidon suositusten mukaisen kasvatusvaihtoehdon (HMS) kehitys ja tulokset perustuvat pelkästään mallipohjaiseen ennusteeseen. Tämä heikentää jossain määrin kasvatusten (HMS vs. K1 ja HMS vs. K2) vertailtavuutta, sillä K1- ja K2-kasvatusvaihtoehdoissa lähtötilanteet perustuivat maastomittauksiin. Tämä ei kuitenkaan vaikuta oleellisesti tuloksiin ja niistä tehtäviin johtopäätöksiin. Kaikki maastomittaukset on tehnyt sama mittaja, mikä todennäköisesti osaltaan pienentää

mittaustulosten virhettä, tai ainakin tekee virheestä systemaattisen. Aikaväli energiapuuharvennuksen ja mittaushetken välillä on voinut vaikuttaa kantomittausten tarkkuuteen. Osa metsiköistä oli vahvasti vesakoitunut tai heinittynyt energiapuuharvennuksen jälkeen, mikä vaikeutti kantojen löytämistä. Tämä on voinut johtaa poistuman lievään aliarvioon. Suurimmillaan kahden vuoden eroa harvennus- ja mittaushetken välillä ei otettu huomioon puuston kasvun suhteen. Energiapuuharvennuksen jälkeen tapahtunutta kasvua ei vähennetty puustomittausten tuloksista. Tällä ei kuitenkaan ole ratkaisevaa merkitystä tulosten kannalta. Kasvun vähentäminen vaatisi kasvun ennustamista, mikä osaltaan sisältäisi virhettä.

Aineiston edustavuus määrää tulosten yleistettävyyden. Tutkimukseen mitattiin suhteellisen suuri joukko metsiköitä varsin laajalta alueelta Etelä- ja Keski-Suomesta. Otanta tehtiin Tapion korjuujälkitarkastuksiin valittujen kohteiden joukosta. Tarkastusmittauksiin kohteet on valittu satunnaisotannalla kaikkien energiapuunkorjuun kemera-tukea saaneiden kohteiden joukosta. Tähän tutkimukseen kohteet valittiin pääpuulajin ja sijainnin perusteella. Sijainnin käyttäminen mittaustyön käytännön resurssien vuoksi valintakriteerinä on painottanut mittauskohteita tietyille alueille. Energiapuuharvennusten suorituksessa on selkeitä eroja alueellisesti (Vanhatalo 2011). Tämä voi jonkin verran heikentää tulosten yleistettävyyttä. Metsiköistä ei ollut saatavissa uudistamistietoja vaan pääpuulajitieto on metsiköstä energiapuuharvennuksen jälkeen. On todennäköistä, että erityisesti männylle uudistetulla tuoreella kankaalla varhaisoidon laiminlyönti johtaa usein männyn häviämiseen metsiköstä luontaisesti syntyneen lehtipuuston kilpailun vuoksi. Männyn kuolleisuus on varjostuksessa suurta verrattuna kuuseen (Valkonen 2000). Siksi erityisesti männiköistä mukaan on todennäköisesti valikoitunut sellaisia metsiköitä, joissa on tehty jonkinlaisia varhaishoitotoimenpiteitä. Tulokset eivät siten ole täysin yleistettävissä kaikkiin männylle uudistettuihin metsiköihin, sillä tämän työn tuloksia vastaaviin tuotoksiin ja tuottoihin pääseminen vaatii männiköissä todennäköisesti jonkinlaisia toimenpiteitä ennen ensimmäistä harvennusta. Toisaalta tulos tällaisenaan vastaa metsiköitä, joiden pääpuulaji vielä nuoren kasvatusmetsän vaiheessa on mänty.

Mitatun metsikköjoukon hajonta on varsin suuri. Tämä luo epävarmuutta tulosten keskiarvoistamiseen, mikä näkyy siinä, että kasvatusten välillä esiintyy varsin vähän tilastollisesti merkitseviä eroja. Jotta tulosten luotettavuutta voitaisi tältä osin parantaa,

olisi tutkimusaineiston oltava huomattavasti laajempi. Tutkimusaineistoa voisi toisaalta myös rajata tiukemmin esimerkiksi metsikkötunnusten perusteella tietynlaisiin metsiköihin, jolloin metsikköjoukko olisi homogeenisempi.

MOTTI-ohjelmiston luotettavuutta on testattu aiemmissä tutkimuksissa (Matala ym. 2003, Ahtikoski ym. 2004, Huuskonen ja Ahtikoski 2005). Tulosten perusteella Mottia voidaan luotettavasti käyttää metsänhoitotoimenpiteiden ja –toimenpideketjujen vertailuun. Mahdolliset systemaattiset virheet kasvumalleissa esiintyvät kaikissa kasvumalleissa, jolloin vaihtoehtojen vertailtavuus periaatteessa säilyy. Ylitiheä lähes luontaisenkaltaisen metsikkö ja toisaalta kuusialikasvoksen kehittyminen ovat erittäin haastavia mallinnettavia. On mahdollista, että näiden osalta kasvumalleihin sisältyy enemmän virhettä kuin suositusten mukaisesti hoidetun metsikön kasvumalleihin.

Ravinnehävikin aiheuttamaa kasvutappiota ja abiottisia tekijöitä kuten tuuli- ja lumituhoja ei otettu tutkimuksessa huomioon. Poistuman puulajijakaumasta johtuen voidaan olettaa, että ravinnehävikistä ei aiheudu niin suurta kasvutappiota, että se muuttaisi kasvatusten välisiä eroja merkittävästi, kuten luvussa 2.1 on tuotu esiin. Tuuli- ja lumituhojen riskin on havaittu lisääntyvän tiheissä ja voimakkaasti harvennetuissa metsiköissä (Persson 1975, Laiho 1987, Valinger ym. 1994). Tämä on tiedostettava metsikön käsittelyä suunniteltaessa.

## 7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Hyvän metsänhoidon suositusten mukainen kasvatus (HMS) johtaa odotetusti pääsääntöisesti parhaaseen tulokseen. Männiköissä tuotoserot jäävät kasvatusten välillä suhteellisen pieniksi. Taloudelliselta tulokseltaan Hyvän metsänhoidon suositusten mukainen kasvatus antaa kuitenkin selkeästi parhaan tuloksen. Tämä johtuu ylitieänä kasvaneiden männiköiden paksuuskasvun hidastumisesta ja siten kiertoajan pitenemisestä. Pienehkö energiapuukertymä ei männiköissä riitä kompensoimaan pidempää kiertoaikaa metsikön tuoton osalta. Vaaditaan merkittävää energiapuuhinnan nousua, että ylitieänä kasvatettu energiapuuharvennettu metsikkö (K1) olisi männiköissä kilpailukykyinen kasvatusmalli. Kuusikoissa energiapuuharvennettu ylitieä metsikkö näyttää kuitenkin olevan taloudelliselta tulokseltaan kilpailukykyinen jo varsin alhaisella energiapuuhinnalla. Tämä johtuu pääosin metsikön nuoruusvaiheen lehtipuutuotoksesta, mikä saadaan parhaiten hyödynnettyä kokopuukorjuuna suoritettavalla energiapuuharvennuksella. Erityisesti ylitieissä nuorissa kuusikoissa oleva huomattava lehtipuusekoitus tasaa energiapuuharvennetun ja ylitieän ainespuuensiharvennetun metsikön (K2) kokonaistuotosten eroja suhteessa HMS-kasvatukseen. Lehtipuusekoitus säilyy K1 ja K2 kasvatusvaihtoehdoissa kiertoajan loppuun asti ja on pois järeän havupuutukin tuotoksesta. Näin ollen kuusikoissa K1:n ja K2:n tukkipuun tuotos jää reilusti HMS-kasvatusta alhaisemmaksi. HMS-kasvatuksessa ensiharvennus ajoittui lähes aina myöhemmäksi kuin toteutunut energiapuuharvennus, mikä osaltaan parantaa K1-kasvatuksen kilpailukykyä metsänkasvatuksen kannattavuutta tarkasteltaessa.

Nuorissa metsissä, joissa taimikonhoito on jäänyt tekemättä tai viivästynyt, energiapuuharvennus on hyvä vaihtoehto. Energiapuuharvennus johtaa pääosin parempaan tuotokseen kuin pelkästään ainespuuhakkuu. Ainespuuensiharvennettu metsikkö on kuitenkin pääosin taloudellisesti kannattavampi vaihtoehto, mutta erot kasvatusten välillä ovat niin pienet, että mahdollinen energiapuun hinnan nousu kääntäisi nopeasti tilanteen energiapuuharvennetun vaihtoehdon eduksi. Kasvupaikkojen välillä ei ole merkittäviä eroja tarkasteltaessa kasvatusten välistä paremmuutta.



Korjuujälki on Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion korjuujäljen tarkastusten perusteella energiapuuharvennuksilla heikompaa kuin ainespuuensiharvennuksilla (Äijälä 2010, Vanhatalo 2011). Tästä aiheutuvat kasvu- ja laatutappiot ovat kirjallisuuskatsauksen perusteella siinä määrin vähäiset, että heikommalla korjuujäljellä ei ole merkittävää vaikutusta tämän tutkimuksen tuloksiin ja kannattavuusvertailuun.

## LÄHTEET

Ahtikoski, A., Päätaalo, M., Niemistö, P., Karhu, J. & Poutiainen, E. 2004. Effect of alternative thinning intensities on the financial outcome in silver birch (*Betula pendula* Roth) stands: a case study based on long-term experiments and Motti stand simulations. *Baltic Forestry* 10(2):46-55.

Ahtikoski, A., Heikkilä, J., Alenius, V. & Siren, M. 2008. Economic viability of utilizing biomass energy from young stands—The case of Finland. *Biomass and Bioenergy* 32(11):988-996.

Andersson, L. 1984. Inverkan av stamskador på tillväxten hos tall. Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift 84(5):53-62.

Björkhem, U., Lundeberg, G. & Scholander, J. 1975. Rotförekomst och tryckhållfasthet i skogsmark. Skogshögskolan, avdelning för skogsekologi och skoglig märklara. *Rapporter och uppsatser* 22:60 s.

Bucht, S. 1977. Vad kostar stickvägarna i tillväxt? The Influence of strip roads on increment at the first thinning in Scots pine forests. *Skogen* 6:218-222.

Fries, J. 1976. Körskador och produktionsförluster. Skogshögskolan, Institutionen för skogsproduktion. *Rapporter och uppsatser* 40:64 s.

Hakkila, P. 1991. Hakkuupoistuman latvusmassa. *Folia forestalia* 773. 24 s.

Hakkila, P. 2005. Fuel from early thinnings. *International Journal of Forest Engineering* 16(1):11-14.

Hakkila, P. & Laiho, O. 1967. Kuusen lahoaminen kirvesleimasta. On the decay caused by axe marks in Norway spruce. *Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja* 64:(3):34 s.

Halinen, M. 1985. Männyn nuoruusvaiheen kasvunopeuden vaikutus sahatavaran laatuun. *Silva Fennica* 19(4):377-385.

Heikkilä, J., Sirén, M. & Äijälä, O. 2007. Management alternatives of energy wood thinning stands. *Biomass and Bioenergy* 31(5):255-266.

Heikkilä, J., Sirén, M., Ahtikoski, A., Hynynen, J., Sauvula, T. & Lehtonen, M. 2009. Energy wood thinning as a part of stand management of Scots pine and Norway spruce. *Silva Fennica* 43(1):129-146.

Heikkilä, J. & Sirén, M. 2005. Energiapuuharvennus osaksi kasvatusketjua? *Julkaisussa: Hynynen, J., Valkonen, S. & Rantala, S. (toim). Tuottava metsänkasvatus. Metsäkustannus, Helsinki. s. 158-159.*

Heikkilä, J., Laitila, J., Tantt, V., Lindblad, J., Sirén, M., Asikainen, A. et al. 2005. Karsitun energiapuun korjuuvaihtoehdot ja kustannustekijät. *Metlan työraportteja* 10. *Metsäntutkimuslaitos, Helsinki. 56 s.*

- Helmisaari, H., Finér, L., Kukkola, M., Lindroos, A., Luiro, J., Piirainen, S. et al. 2008. Energiapuun korjuu ja metsän ravinnetase. Julkaisussa: Kuusinen, M. & Ilvesniemi, H. (toim). Energiapuun korjuun ympäristövaikutukset, tutkimusraportti. Tapion ja Metlan julkaisuja, s. 18-29.
- Helynen, S., Flyktman, M., Asikainen, A. & Laitila, J. 2007. Metsätaloutteen ja metsäteollisuuteen perustuvan energialiiketoiminnan mahdollisuudet. VTT Tiedotteita - Research Notes 2397:66 s.
- Hetemäki, L. & Hänninen, R. 2009. Arvio Suomen puunjalostuksen tuotannosta ja puunkäytöstä vuosina 2015 ja 2020 [Elektroninen aineisto]. Metla, Vantaa. 63 s.
- Huse, K. J. 1978. Misfargning of mikroflora i sår efter tynningsdrift i granskog. Summary: Discoloration and microflora in wounds due to thinning operation in stands of *Picea abies* (L.) Karst. Rapp. Norsk Inst. Skogforsk. Avd for skogvern, forstpatologi 33.
- Huuri, O., Lähde, E. & Huuri, L. 1987. Tiheyden vaikutus nuoren istutusmännikön laatuun ja tuotokseen. *Folia forestalia* 685. 48 s.
- Huuskonen, S. & Ahtikoski, A. 2005. Ensiharvennuksen ajoituksen ja voimakkuuden vaikutus kuivahkon kankaan männiköiden tuotokseen ja tuottoon. *Metsätieteen aikakauskirja* (2):99-115.
- Hynynen, J. 1998. Nuorten metsien harventamattomuuden seuraukset. Julkaisussa: Hänninen, H. (toim.). Puuvarojen käyttömahdollisuudet. Metsäkustannus Oy, Helsinki. s. 79-85.
- Hynynen, J. & Niemistö, P. 2001. Kannattava puuntuotanto - tavoitteellista metsänhoitoa vai taloudellista optimointia? *Metsätieteen aikakauskirja* (1):45-49.
- Hyytiäinen, K. & Tahvonen, O. 2005. Metsänkasvatusketjujen edullisuusvertailu ja puuntuotannon kannattavuus. Julkaisussa: Hynynen, J., Valkonen, S. & Rantala, S. (toim). Tuottava metsänkasvatus. Metsäkustannus, Helsinki. s. 164-173.
- Iittiläinen, P. 2003. Korjuujälki harvennushakkuussa. Metsäteho, Helsinki. 32, 2 s.
- Immonen, K. 2001. Hakkuukonetyömaan ennakkoraivaus. Metsäteho, Helsinki. 7, 1 s.
- Isomäki, A. & Kallio, T. 1974. Consequences of injury caused by timber harvesting machines on the growth and decay of spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Acta Forestalia Fennica* 136:25 s.
- Isomäki, A. & Niemistö, P. 1990. Ajourien vaikutus puuston kasvuun Etelä-Suomen nuorissa kuusikoissa. *Folia Forestalia* 756:36 s.
- Kallio, T. 1973. *Peniophora gigantea* (Fr.) Masee and wounded spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). Suomen metsätieteellinen seura, Helsinki. 28 s.

Kallio, T. 1976. *Peniophora gigantea* (Fr.) Masseur and wounded spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) 2. Suomen metsätieteellinen seura, Helsinki. 17 s.

Kokko, P. & Sirén, M. 1996. Harvennuspuun korjuujälki, korjuujäljen seurausvaikutukset ja niiden arviointi. Metsäntutkimuslaitos, Vantaa. 70 s.

Kurkela, E., Simell, P., McKeough, P. & Kurkela, M. 2008. Synteesikaasun ja puhtaan polttokaasun valmistus. VTT publications 682, Espoo. 54, 5 s.

Kärhä, K., Keskinen, S., Liikkanen, R. & Lindroos, J. 2006. Kokopuunkorjuu nuorista metsistä. Metsätehon raportti 193:79 s.

Kärhä, K., Laitila, J., Jylhä, P., Nuutinen, Y. & Keskinen, S. 2009. Kokopuun paalaus - tuotantoketjun tuottavuus ja kustannukset. Metsätehon raportti 211:60 s.

Kärhä, K., Juha, E., Lahtinen, P., Räsänen, T., Keskinen, S., Saijonmaa, P. ym. 2010. Kiinteiden puupolttoaineiden saatavuus ja käyttö Suomessa vuonna 2020. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja. Energia ja ilmasto 66:68 s.

Kärhä, K. 2007. Metsähakkeen tuotantokalusto vuonna 2007 ja tulevaisuudessa. Metsätehon katsaus 28. 4 s.

Kärkkäinen, M. 1971. Lahon leviäminen puunkorjuun aiheuttamista kuusen runko- ja juurivaurioista. *Silva Fennica* 5:(3):226-233.

Kärkkäinen, M. 2003. Puutieteen perusteet. Metsäkustannus Oy, Helsinki. 451 s.

Laiho, O. 1987. Metsiköiden alttius tuulituhoille Etelä-Suomessa. *Folia forestalia* 706. 24 s.

Laitila, J., Asikainen, A. & Anttila, P. 2008. Energiapuuvarat. Julkaisussa: Kuusinen, M. & Ilvesniemi, H. (toim). Energiapuun korjuun ympäristövaikutukset, tutkimusraportti. Tapion ja Metlan julkaisuja, s. 6-12.

Laitila, J., Leinonen, A., Flyktman, M., Virkkunen, M. & Asikainen, A. 2010. Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet. VTT Tiedotteita – Research Notes 2564:143 s.

Lappi, J. 1993. Metsäbiometrian menetelmiä. Joensuun yliopisto. Metsätieteellinen tiedekunta, Joensuu. 182 s.

Matala, J., Hynynen, J., Miina, J., Ojansuu, R., Peltola, H., Sievänen, R. et al. 2003. Comparison of a physiological model and a statistical model for prediction of growth and yield in boreal forests. *Ecological Modelling* 161(1-2):95-116.

Metsäntutkimuslaitos. 2010a. Metinfo.

– 2010b. Laatuseloste. Puun energiakäyttö.

<<http://www.metsanomistus.fi/metinfo/tilasto/laatu/puupolttoaine.htm>> luettu 19.4.2011.

– 2010c. Metsätilastollinen vuosikirja 2010. Sastamala. 470 s.

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

Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio ja metsäkeskus Pirkanmaa. 2009. Kemera-opas. 50 s.

Moilanen, J. 1990. Korjuuvaurion vaikutus kuusen kasvuun, lahoutumiseen ja käyttöarvoon. Helsingin yliopisto, Helsinki. 49 s.

Niemistö, P. 2005. Metsän käsittely. Julkaisussa: Hynynen, J., Valkonen, S. & Rantala, S. (toim). Tuottava metsänkasvatus. Metsäkustannus, Helsinki. s. 73-120.

– 1989. A simulation method for estimating growth losses caused by strip roads. *Scandinavian Journal of Forest Research* 4(2):203-214.

– 1987. A method for evaluating the effect of strip roads on the growth and yield of coniferous stands. Swedish university of agricultural sciences. Faculty of forestry. Research notes 98

Nilsson, P. & Hyppel, A. 1968. Studier över rötangrepp i särskador hos gran. Sveriges Skogsförbundets Tidskrift 66:675-713.

Näslund, M. 1936. Skogsförsöksanstaltens gallringsförsök i tallskog. Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt 29, 169 s.

Ojansuu, R. 2005. Kavupaikka ja puuntuotoskyky. Julkaisussa: Hynynen, J., Valkonen, S. & Rantala, S. (toim). Tuottava metsänkasvatus. Metsäkustannus, Helsinki. s. 49-72.

Olsson, M. 1977. Körskador i skogsbruket - ett markvårdsproblem. Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift. Häfte (2-3):233-247.

Olsson, P. 1984. Beräkning av tillväxt- och kvalitetsnedsättning orsakad av skador i gallring. Skogsarbeten. Stencil 16.

Pekkarinen, M. 2010. Kohti vähäpäästöistä Suomea. Uusiutuvan energian velvoitepaketti. Esitelmä 20.4.2010

Persson, P. 1975. Stormskador på skog-uppkomstbetingelser och inverkan av skogliga åtgärder. Skogshögskolan, Institutionen för skogsproduktion. Rapporter och uppsatser 36:294 s.

Pesonen, M. 2005. Korjuun suunnittelu ja toteutus -opas. Metsäteho, Helsinki. 96, 4 s.

Ranta, E., Rita, H. & Kouki, J. 1989. Biometria : tilastotiedettä ekologeille. 2. painos. Yliopistopaino, Helsinki. 569 s.

Salminen, H., Lehtonen, M. & Hynynen, J. 2005. Reusing legacy FORTRAN in the MOTTI growth and yield simulator. *Computers and Electronics in Agriculture* 49(1):103-113.

Sipilä, K., Valli, R., Vesanto, T., Parkkonen, L., Kuusisto, R., Broadstreet, N. ym. 2006. Liikenteen biopolttoaineiden tuotannon ja käytön edistäminen Suomessa. Työryhmän mietintö. KTM julkaisuja (11): 18.4.2011.

Stöd, R., Sirén, M., Tantt, V. & Verkasalo, E. 2003. Jäävän puuston ja poistuman tekninen laatu ensiharvennuskäytöksissä. *Metsätieteen aikakauskirja* (4):439-464.

Tantt, V., Ahtikoski, A. & Sirén, M. 2004. Korjuuvaihtoehtojen kannattavuus metsänomistajalle nuoren metsän harvennuksessa hankintakaupalla. *Metsätieteen aikakauskirja* (4):509-525.

Tilastokeskus. 2010. Tilasto: Energian hankinta, kulutus ja hinnat [verkkopublication]. 7.4.2011.

Tuikkanen, J. 2010. Hakkuu-uramenetelmän opas. Pohjoisen Keski-Suomen oppimiskeskus, Tarvaala. 32 s.

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2010. Suomen kansallinen toimintasuunnitelma uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian edistämisestä direktiivin 2009/28/EY mukaisesti.

Valinger, E., Lundqvist, L. & Brandel, G. 1994. Wind and snow damage in a thinning and fertilisation experiment in *Pinus Sylvestris*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 9(2):129-134.

Valkonen, S. 2000. Kuusen taimikon kasvattamisen vaihtoehdot Etelä-Suomen kivennäismailla: Puhdas kuusen viljelytaimikko, vapautettu alikasvos ja kuusi-koivusekataimikko. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 763. 83, 92 s.

Wallentin, C. 2007. Thinning of Norway spruce. Doctor's Dissertation Swedish University of Agricultural Sciences, Alnarp. 116 s.

Valsta, L., Ahtikoski, A., Horne, P., Karttunen, K., Kokko, K., Melkas, E. ym. 2006. Puu ilmastonmuutoksen hillitsijänä. Tutkimusraportteja, Helsingin yliopisto 39:54 s.

Vanhatalo, K. 2011. Korjuujäljen valtakunnalliset tarkastustulokset 2010, Harvennushakkuut & Energiapuuharvennukset. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio, 32 s.

Varmola, M. 1996. Nuorten viljelymänniköiden tuotos ja laatu. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 585. 70 s.

Wästerlund, I. 1989. Are present forestry machines smooth terrain-machines? *SFM meddelande* 38:21-34.

– 1986. Skador på mark och rötter. Tänk till i gallringsfrågan! Nya tankar kring stickvägar, skador och teknik i gallring. Uppsats och resultat nr. 52. Sveriges Lantbruksuniversitet. Institutionen för skogsteknik:56-63.

– 1983. Kantträdens tillväxtförluster vid gallring p.g.a. jordpackning och rotskador i stickväg. -En sammanställning och bearbetning av litteraturuppgifter. Summary: Growth reduction of trees near strip roads resulting from soil compaction and damaged roots. A literature survey. Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift 2:97-109.

Wästerlund, I. 1992. Extent and causes of site damage due to forestry traffic. Scandinavian Journal of Forest Research 7(1):135-142.

Ågren, A. 1968. Produktionsförluster till följd av virkestransport i gallringsskog - Ska vi gallra? Sveriges Skogsvårdsförbund:30-34.

Äijälä, O. 2010. Harvennushakkuiden ja energiapuuharvennusten korjuujäljen tarkastusten tulokset 2009. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio, 29 s.

– 2009. Harvennushakkuiden ja energiapuuharvennusten korjuujäljen tarkastusten tulokset 2008. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio, 27 s.

–, Kuusinen, M. & Koistinen, A. 2010. Energiapuun korjuu ja kasvatust : hyvän metsänhoidon suositukset. Metsäkustannus Oy, Helsinki. 56 s.

## LIITTEET

### LIITE 1.

#### Mittausohje

Hermannin Lallukka

Pro gradu

Mittaukset tehdään linjoittaisesti siten, että kuvion pisimmän halkaisijan lävistävältä linjalta mitataan 10 koealaa. Koealojen keskipisteiden väli on vähintään 20 m. Jokainen koealapiste on vähintään 10 m kuvion reunasta. Koealaväli määritetään siten, että kartalta mitattu kuvion pisin lävistävä halkaisija jaetaan kymmenellä. Tämä koealaväli jaettuna kahdella on ensimmäisen koealan etäisyys kuvion reunasta.

**Mikäli linjalle ei mahdu vähimmäisvälin puitteissa kymmentä koealaa:** Mitataan linjalle mahtuvat koealat käyttäen koealavälinä *linjan pituus/koealojen lukumäärä*. Loput koealat mitataan toiselta samansuuntaiselta linjalta ensimmäisen linjan eteläpuolelta. Linjojen välinen etäisyys on 20 m. Koealat sijoittuvat toiselle linjalle siten, että koealojen välinen etäisyys on jälleen *linjan pituus/linjalle jäävien koealojen lukumäärä*. Ensimmäisen koealan etäisyys kuvion reunasta on koealaväli/2.

**Mikäli koealalle osuu mittausta häiritsevä tie, sähkölinja, kuvion reuna tai muu este:** Siirretään kyseistä koealaa mittauslinjan suhteen kohtisuoraan siten, että koealapisteen etäisyys tähän esteeseen on vähintään 10 m. Siirto tapahtuu siihen suuntaan, johon 10 metrin etäisyys saavutetaan lyhyemmällä siirrolla.

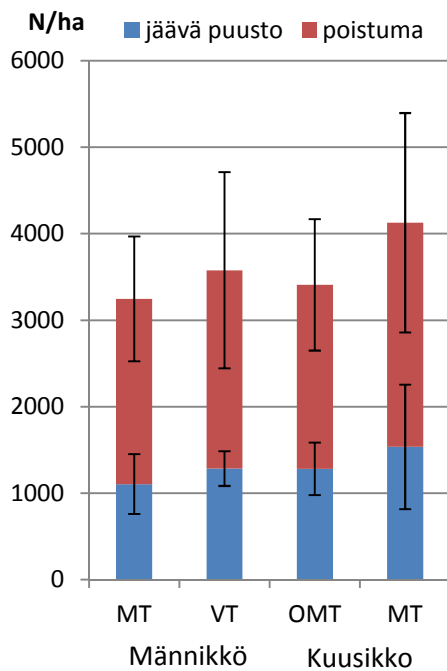
Jokaiselta koealapisteeltä mitataan kaksi erisäteistä ympyräkoetalaa.

*Pienemmältä ympyräkoetalta ( $r=3.99$  m, määritetään onkivavalla)* kaikista kehityskelpoisista ja pituudeltaan yli 1,3 m puista määritetään puulaji ja mitataan läpimitta rinnankorkeudella (1,3m syntypisteestä), tyviläpimitta kuvitellusta kantoleikkauskohdasta noin 10 cm syntypisteestä, pituus ja elävän latvuksen alaraja. Läpimitat mitataan yhdestä suunnasta kohtisuoraan koealan sädettä vastaan. Koealan valtuuston ikä määritetään oksakiehkuroista laskemalla. Kannoista mitataan läpimitaltaan yli 3 cm kantojen läpimitta katkaisukohdasta sekä määritetään puulaji.

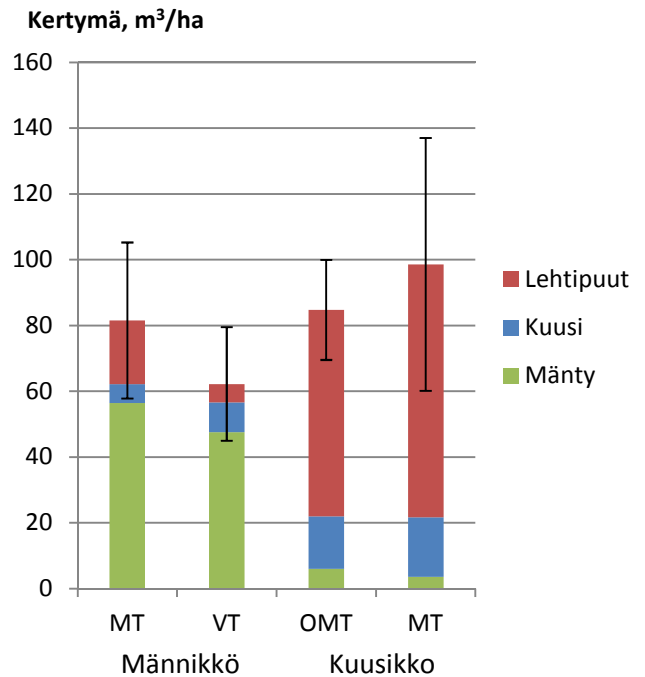
*Suuremmalta ympyräkoetalta ( $r=7.98$  m, määritetään metsurimitalla tai vertexillä)* mitataan rinnankorkeusläpimitta kaikista kehityskelpoisista ja pituudeltaan yli 1,3 m puista kuten pienemmällä koealalla ja määritetään puulaji.



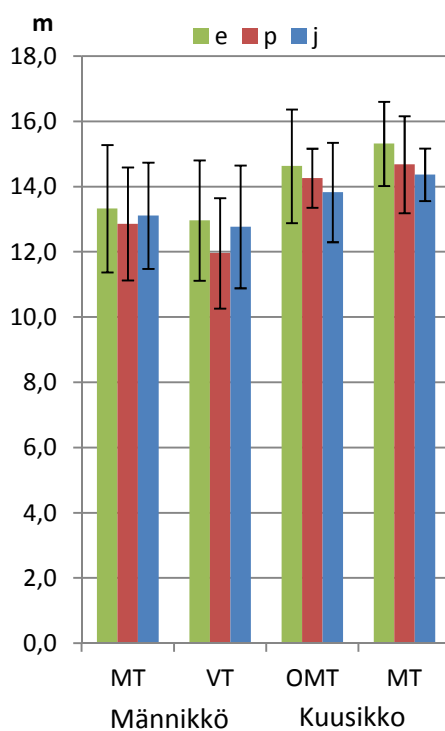
## LIITE 2.



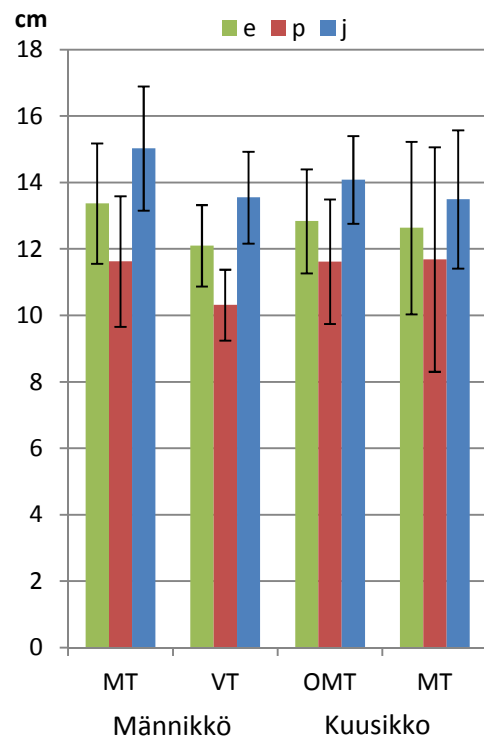
**Kuva 1.** Energiapuuharvennetun metsikön runkoluku. Palkit kuvaavat keskihajontaa.



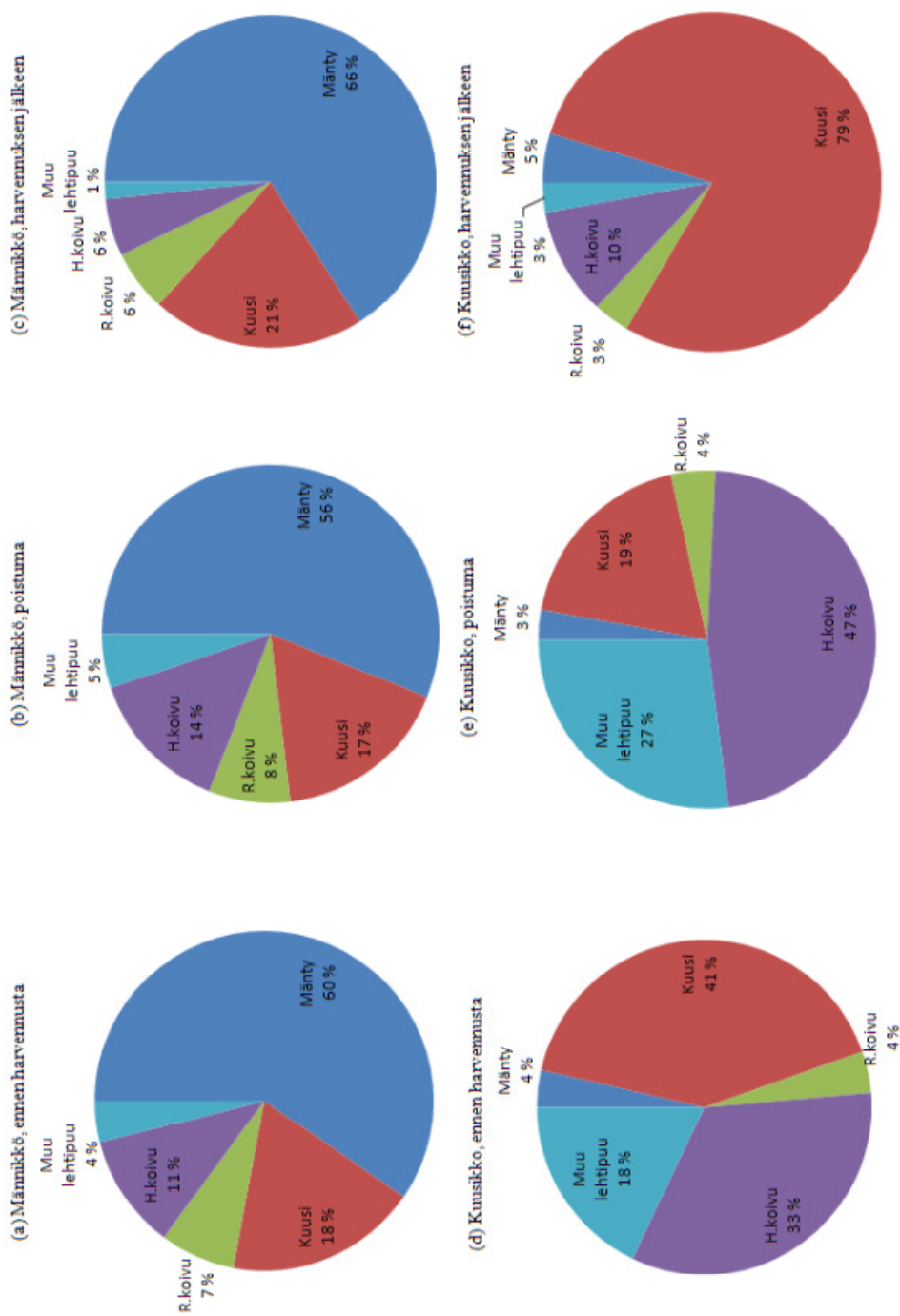
**Kuva 2.** Energiapuukertymä puulajeittain. Palkit kuvaavat keskihajontaa.



**Kuva 3.** Valtapituus ennen energiapuuharvennusta (e), harvennuksen jälkeen (j) sekä poistumassa (p). Palkit kuvaavat keskihajontaa.

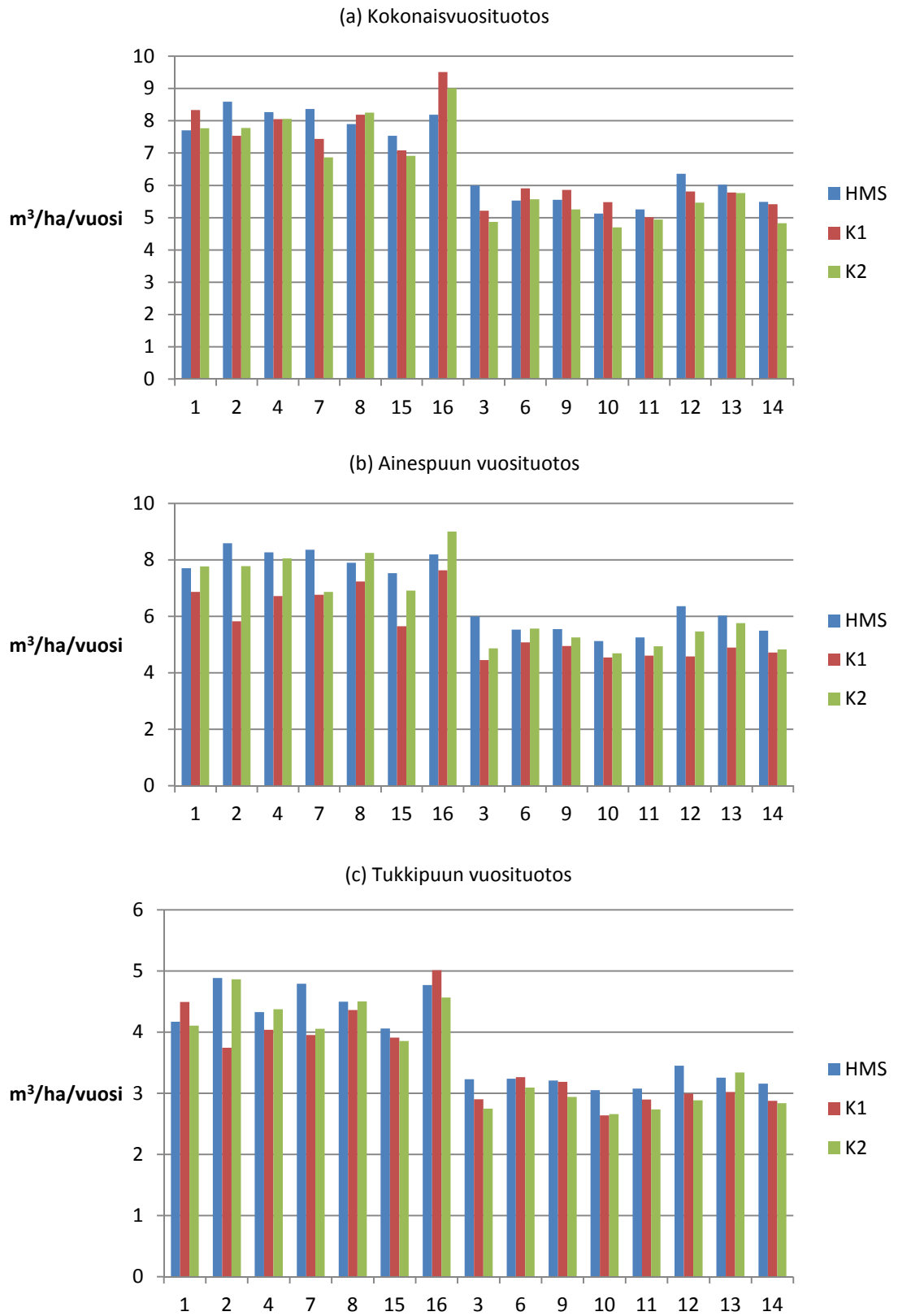


**Kuva 4.** Puuston pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta ennen energiapuuharvennusta (e), harvennuksen jälkeen (j) sekä poistumassa (p). Palkit kuvaavat keskihajontaa.

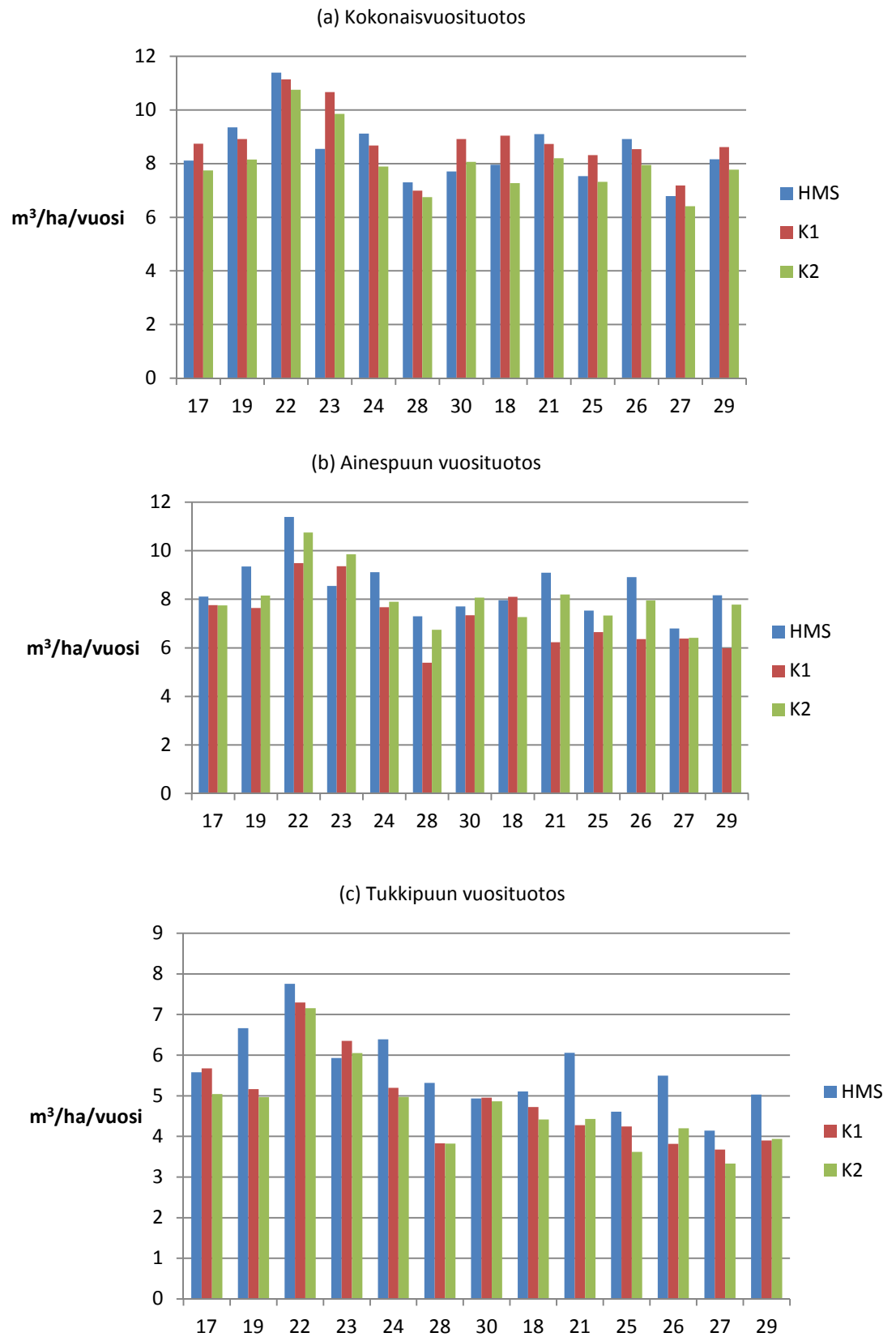


Kuva 5. Energiapuuharvennetun metsikön keskimääräinen puulajijakauma ennen harvennusta, harvennuksen jälkeen ja poistumassa.

## LIITE 3.

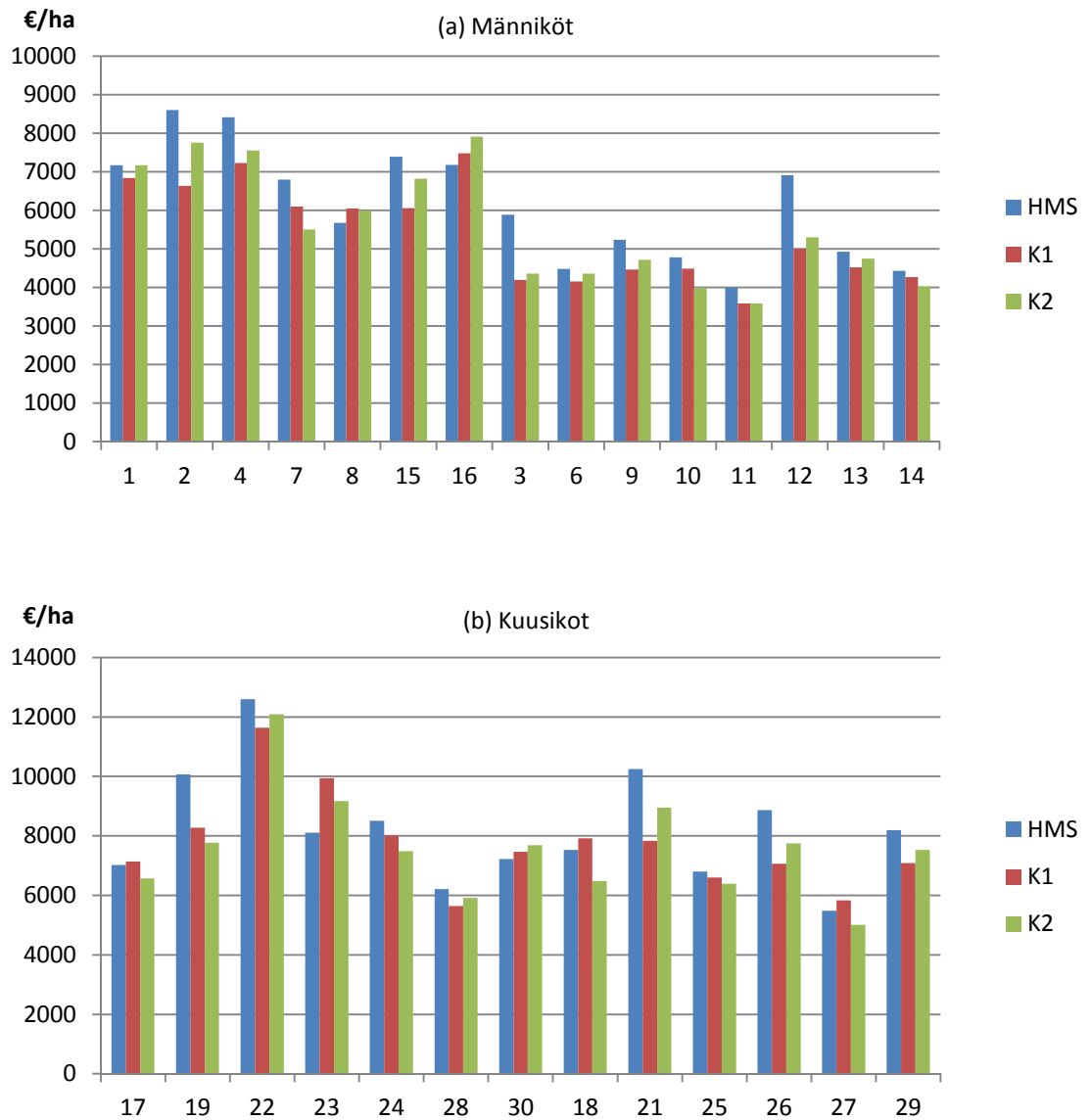


Kuva 1. Männiköiden vuosituotokset metsiköittäin. MT: Metsiköt 1, 2, 4, 7, 8, 15. OMT: Metsikkö 16. VT: 3, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14.



Kuva 2. Kuusikoiden vuosituotokset metsiköittäin. OMT: Metsiköt 17, 19, 22, 23, 24, 28 ja 30. MT: Metsiköt: 18, 21, 25, 26, 27, 29.

## LIITE 4.



**Kuva 1. Kasvatusten nettotulojen nykyarvot metsiköittäin 3 %:n korkokannalla ja 5 €/k-m<sup>3</sup> energiapuun hinnalla.**