

**ENERGIAPUUHARVENNUS OSANA  
METSÄNKASVATUSTA JA  
ILMASTONMUUTOKSEN HILLITSEMISTÄ**

**Helsingin yliopisto**

Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta

Liiketaloudellisen metsäekonomian Pro gradu -työ

Kalle Karttunen

Helsinki 2006

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos — Institution — Department Metsäekonomian laitos	
Tekijä — Författare — Author Karttunen, Kalle			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Energiapuuharvennus osana metsänkasvatusta ja ilmastomuutoksen hillitsemistä			
Oppiaine — Läroämne — Subject Liiketaloudellinen metsäekonomia			
Työn laji — Arbetets art — Level Pro gradu -työ		Aika — Datum — Month and year Huhtikuu 2006	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 85 + liitteet
Tiivistelmä — Referat — Abstract			
<p>Tutkimuksessa vertailtiin energiapuuharvennuksen sisältämää metsänkasvatusta metsänhoitosuositusten mukaiseen metsänkasvatukseen. Metsänhoitosuositusten mukaiset taimikonhoito ja ainespuun ensiharvennus korvattiin energiapuuharvennuksella, joka toteutettiin vaihtoehtoisesti 10, 12 ja 14 metrin valtapituusvaiheissa. Tutkimus perustui Etelä-Suomessa sijaitseviin metsikkökoelohiin (12 kpl), joita simuloitiin käyttäen MOTTI-metsikkösimulaattoria.</p> <p>Tutkimuksessa tarkasteltiin vaihtoehtoisella metsänkasvatuksella aikaansaattavia ilmastohyötyjä hiilensidonnan ja energiasubstituution avulla. Energiasubstituution ja kannattavuuden laskennassa energiapuuharvennuksen energiapuulle asetettiin arvo sen korvatessa fossiilisen polttoaineen kivihii- len hiilidioksidipäästöjä. Ohjausekeinoina testattiin lisäksi energiapuuharvennuksen Kemera-tukia.</p> <p>Energiapuuharvennuksen sisältämässä metsänkasvatuksessa hiilensidonnan ja energiasubstituution yhteisvaikutuksesta saatiin keskimäärin 26–90 % lisäys kiertoajan alkuun diskontattuihin laskennal- lisiin päästövähennyksiin verrattuna metsänhoitosuositusten mukaiseen metsänkasvatukseen. Ener- giasubstituutiolla saatiin lisättyä päästövähennyksiä enemmän kuin nuoren metsän tiheimmän met- sänkasvatuksen aikaansaamalla hiilensidonnan lisäyksellä.</p> <p>Tutkimuksen mukaan energiapuuharvennuksen ottaminen osaksi metsänkasvatusta on kannattavam- paa kuin metsänhoitosuositusten mukainen metsänkasvatus, mikäli hiilidioksidin hintataso on kes- kimäärin yli 15 €/CO<sub>2</sub> (siirtohinnoittelu tienvarteen) ja Kemera-tuet säilyvät muuttumattomina. Il- man Kemera-tukia energiapuun tienvarsihinnan tulisi olla keskimäärin yli 21 €/m<sup>3</sup>. Kustannustehok- kainta energiapuuharvennus on toteuttaa 12 metrin valtapituusvaiheessa, kun vain energiasubstituut- io otetaan huomioon.</p> <p>Vaihtoehtoisen metsänkasvatuksen mukaisesti taimikonhoito voitaisiin toteuttaa aikaisemmin tai nykyisiä metsänhoitosuosituksia lievempänä. Tällöin nuoren metsän harvennus voisi olla kannatta- vaa toteuttaa joko ainespuu- tai energiapuukorjuuna tai aines- ja energiapuun integroituna korjuuna, riippuen vallitsevien menetelmien korjuukustannusten ja aines- ja energiapuun välisistä hintasuhteis- ta.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Hiilensidonta, energiasubstituutio, energiapuuharvennus, päästövähennys, nettohyöty			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Metsäekonomian laitos			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information			

## Sisällysluettelo

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b> .....	<b>1</b>
1.1	Ilmastomuutos .....	1
1.2	Ilmastopolitiikka ja päästökauppa.....	2
1.3	Energiapuu .....	6
1.3.1	Energiapuupotentiaali .....	6
1.3.2	Energiapuuharvennus.....	7
1.4	Tutkimuksen tarkoitus .....	8
<b>2</b>	<b>HIILINIELUT JA SUBSTITUUTTIOT</b> .....	<b>11</b>
2.1	Metsät ja puutuotteet ilmastomuutoksen hillitsijänä.....	11
2.2	Metsien hiilinielut ja niiden arvottaminen .....	13
2.3	Puutuotteiden hiilinielu, materiaalisubstituutio ja energiasubstituutio .....	15
2.4	Puuenergian energiasubstituutio .....	18
<b>3</b>	<b>OHJAUSKEINOT</b> .....	<b>21</b>
3.1	Ohjauskeinojen valinta .....	21
3.2	Ohjauskeinot energiasubstituution edistämiseksi.....	23
3.3	Energiapuuharvennus osana metsänkasvatusta.....	25
<b>4</b>	<b>MENETELMÄT JA AINEISTO</b> .....	<b>27</b>
4.1	Menetelmävaihtoehdot .....	27
4.2	Päästövähennyksien ja taloudellisten tunnuslukujen laskenta .....	30
4.2.1	Hiilensidonnan yksikkökustannukset .....	32
4.2.2	Energiasubstituution yksikkökustannukset .....	33
4.2.3	Kannattavuus .....	35
4.2.4	Oletukset .....	37
4.3	Simulointi.....	38
4.3.1	Motti-metsikkösimulaattori.....	38
4.3.2	Simuloinnin asetukset .....	39
4.4	Aineisto.....	40
<b>5</b>	<b>TULOKSET</b> .....	<b>42</b>
5.1	Päästövähennykset.....	42
5.1.1	Hiilensidonnan päästövähennykset.....	42
5.1.2	Energiasubstituution päästövähennykset .....	43
5.2	Yksikkökustannukset.....	44
5.2.1	Hiilensidonnan kustannukset.....	45
5.2.2	Energiasubstituution kustannukset .....	46
5.3	Kannattavuus.....	47
5.3.1	Hiilensidonnan kannattavuus .....	48
5.3.2	Energiasubstituution kannattavuus .....	50
5.3.3	Energia- ja ainespuuvarhennuksen nettotulos .....	52
5.4	Kertymät .....	55
5.4.1	Nuoren metsän kertymäpotentiaali .....	55
5.4.2	Puutavaralajikertymät kiertoajalla .....	57
<b>6</b>	<b>TULOSTEN TARKASTELU</b> .....	<b>59</b>
6.1	Päästövähennykset.....	59

6.2	Yksikkökustannukset.....	60
6.2.1	Hiilensidonnan kustannukset.....	60
6.2.2	Energiasubstituution kustannukset .....	61
6.2.3	Energiasubstituution ja hiilensidonnan yhteisvaikutus.....	63
6.3	Kannattavuus.....	63
6.3.1	Hiilensidonnan kannattavuus .....	63
6.3.2	Energiasubstituution kannattavuus .....	65
6.3.3	Energiapuu- ja ainespuuharvennuksen nettotulos .....	66
6.4	Ohjauskeinot .....	68
6.4.1	Ohjauskeinot päästövähennyksien edistämiseksi .....	68
6.4.2	Energiapuharvennuksen sisältämä metsänkasvatus.....	70
<b>7</b>	<b>PÄÄTELMÄT JA SUOSITUKSET .....</b>	<b>74</b>
7.1	Energiapuharvennuksen sisältämän metsänkasvatuksen ilmastohyödyt ..	74
7.2	Energiapuharvennus osaksi metsänkasvatusta .....	75
7.3	Ohjauskeinot päästövähennyksien edistämiseksi.....	77
7.4	Lisätutkimuksen tarve.....	78
	<b>LÄHTEET.....</b>	<b>80</b>

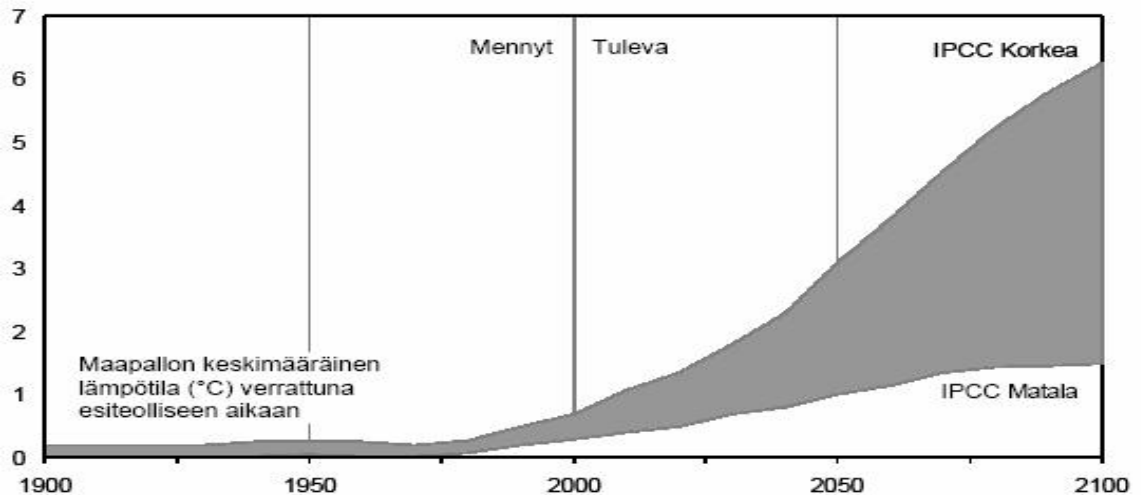
LIITTEET

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Ilmastonmuutos

Maapallon ilmaston oletetaan lämpenevän kasvihuonekaasujen määrän lisääntyessä ilmakehässä. Kasvihuonekaasut vähentävät auringosta tulevan säteilyn heijastumista takaisin avaruuteen. Ilmaston lämpenemistä aiheuttavia kasvihuonekaasuja ovat hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), metaani (CH<sub>4</sub>) ja dityppioksidi (N<sub>2</sub>O). Muita kasvihuonekaasuja ovat mm. klooratut hiilivedyt, fluoriyhdisteet sekä bromiyhdisteet. Hiilidioksidin osuus lämmitysvaikutuksesta on 64 %. (IPCC 2001a)

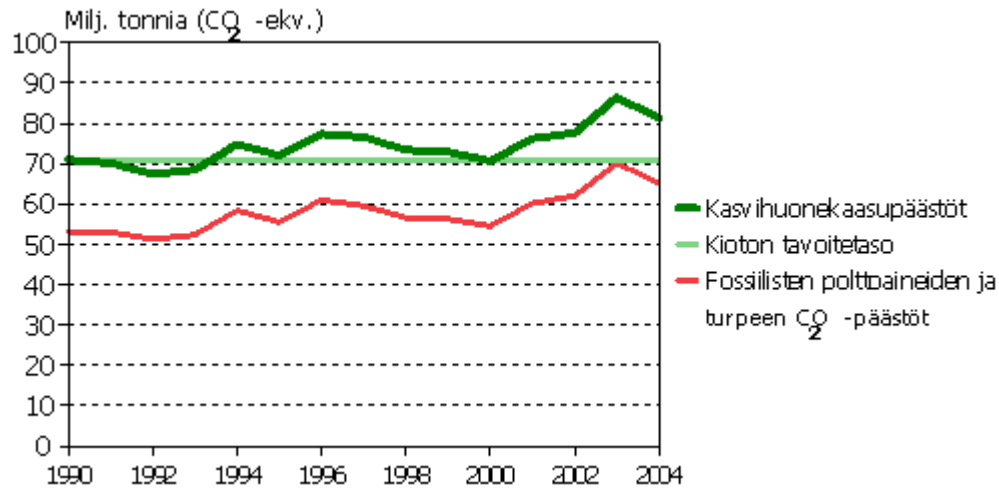
Viimeisen sadan vuoden aikana maapallon keskilämpötila on noussut  $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$  ja suurin muutos on tapahtunut pohjoisella pallonpuoliskolla (IPCC 2001a). Maapallon keskilämpötilan arvioidaan kohoavan 1.4–5.8 °C seuraavan sadan vuoden kuluessa (IPCC 2000) (kuva 1). Arvioiden toteutuminen riippuu kasvihuonepäästöjen tulevasista kehitymisestä. Keskilämpötilan nousun toteutumisen on ennakoitu aiheuttavan monia vakavia seurauksia, kuten merenpinnan nousua, hirmumyrskyjä, ilmansaasteongelmia, puhtaan veden vähenemistä, väestöjen muuttoaaltoja, ekologisia muutoksia ja taloudellisia kustannuksia.



Kuva 1. Maapallon keskilämpötilan mitattu nousu vuosina 1900–2000 verrattuna esiteolliseen aikaan ja kansainvälisen ilmastopaneelin (IPCC) esittämät arviot tulevasta keskilämpötilan noususta. (KTM 2001)

## 1.2 Ilmastopolitiikka ja päästökauppa

Ennusteet ilmaston muuttumisesta, sen seurauksista ja niiden voimakkuuksista ovat epävarmoja, mutta mahdolliset kielteiset seuraukset nähdään yleisesti niin merkittäviksi, että riskejä halutaan välttää. YK:n ilmastomuutoksen puitesopimuksen alainen vuonna 1997 solmittu Kioton pöytäkirja sisältää kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamiseen liittyviä velvoitteita. Kioton pöytäkirjan ratifioineet teollisuusmaat ovat sitoutuneet vähentämään kasvihuonekaasupäästöjään tietyn prosenttiosuuden verran vuoden 1990 tasosta ensimmäisen sopimuskauden (2008–2012) aikana. Suomi on sitoutunut laskemaan päästönsä vuoden 1990 tasolle velvoitekauden aikana (kuva 2), kun EU:n kokonaisvelvoite on vähentää kasvihuonekaasupäästöjään 8 % vuoden 1990 tasosta. (Lapveteläinen ja Sievänen 2003)



Kuva 2. Suomen kasvihuonekaasupäästöt, hiilidioksidipäästöt ja Kioton tavoitetaso 1990–2004 (Tilastokeskus)

Päästökauppa tarkoittaa kaupankäyntiä päästöoikeuksilla. Kioton pöytäkirjan mukaisen päästökaupan on tarkoitus käynnistyä vuonna 2008. Kaupan kohteena Kioton pöytäkirjassa on osapuolille allokoitu päästöyksiköillä mitattu sallittu päästömäärä. Jos jonkin maan päästöt alittavat sille määrätyn päästörajan, voi se myydä jäljelle jäävän päästöoikeuden maalle, joka ei pysy omassa kiintiössään. Päästöoikeuksille määräytyy todennäköisesti pikkuhiljaa markkinahinta, joka vastaa kullakin hetkellä teollisuusmaiden käytössä olevien päästöjen vähentämisen rajakustannuksia. (Lapvetäinen ja Sievänen 2003)

Joustomekanismien, kuten päästökaupan, käytön perusajatus on, että globaalisti päästöjen vähentäminen pitäisi tehdä siellä, missä vähentämisen rajakustannukset ovat matalimmat (KTM 2000). Päästökauppa ei sinänsä vähennä päästöjä, mutta se on kustannustehokas keino ennalta määrätyn ympäristövaikutuksen aikaansaamiseksi (Kioton pöytäkirjan... 2003).

EU:n päästökauppa on itsenäinen järjestelmä, jota ei ole kytketty Kioton pöytäkirjaan, vaikka taustalla ovatkin Kioton pöytäkirjan tavoitteet (Hämekoski 2005). EU:n sisäinen päästökauppa on alkanut vuonna 2005. Päästökaupan hintataso on noussut korkeaksi (kuva 3). Järjestelmän alkuvaiheeseen kuuluu vain energiatuotannon ja energiaintensiivisen teollisuuden CO<sub>2</sub>-päästöt, eivätkä nieluhankkeet ole vielä mukana. Ensimmäisellä sopimuskaudella (2008–2012) voidaan maankäytön, maankäytön muutosten ja metsätalouden toimia, joita kutsutaan myös hiilinieluiksi, käyttää hyväksi ilmastonmuutoksen torjunnassa joko lisäämällä hiilen sidontaa ilmakehästä esimerkiksi uutta metsää istuttamalla tai vähentämällä päästöjä esimerkiksi rajoittamalla metsänhävitystä. (Lapveteläinen ja Sievänen 2003)



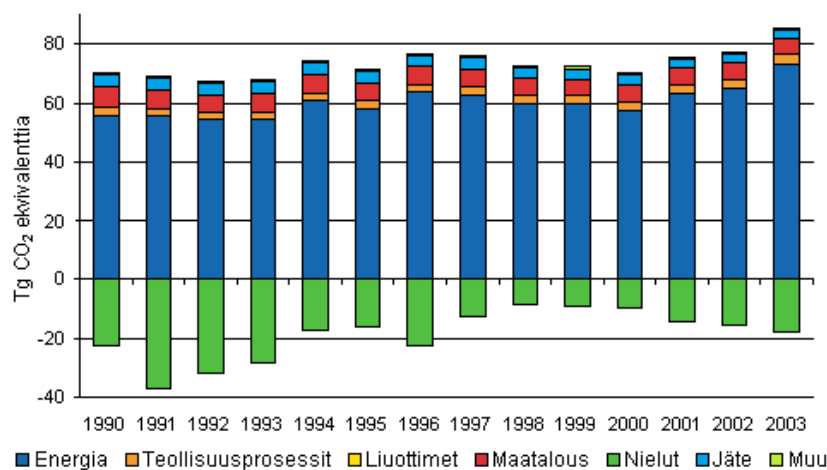
Kuva 3. Päästökaupan hintatason (€/CO<sub>2</sub> tn) kehittyminen kaupankäynnin alusta (Nordpool).

Hiilinieluihin liittyy suuria epävarmuustekijöitä, joten periaatteena on hyväksilukea vain ihmistoimin aikaansaadut hiilinielut. Kioton pöytäkirjan artiklalla 3.3 osapuolet päättivät, että niin sanotun LULUCF-sektorin päästöt ja nielut metsittämis-, uudelleenmetsittämis-, ja metsänhävitystoimista vuodesta 1990 lähtien tulee ottaa mukaan laskentaan päästötavoitteisiin pyrittäessä. Lisäksi pöytäkirjan artikla 3.4 antaa mahdollisuuden tiettyjen, tarkemmin määrittelemättömien lisätoimien mukaan ottami-



seen. Artikla 3.4 mahdollistaa nieluhyvityksen saamisen metsänhoito-, viljelysmaan hoito, laidunmaan hoito- ja uuden kasvipeitteen muodostamistoimenpiteistä. Nieluhyvitys mahdollistaa päästöjen kompensoimisen. (Lapveteläinen ja Sievänen 2003)

On todennäköistä, että artiklaan 3.4 sitoutuminen merkitsisi koko metsänhoidon alaisen alueen liittämistä nielulaskentaan, eikä tiettyjen osa-alueiden valinta olisi mahdollista. Kun metsänhoito tai tietty metsänhoidon alainen alue on liitetty artiklan 3.4 vaikutuspiiriin, se pysyy mukana laskennassa tulevillakin sitoumuskausilla, vaikka metsät muuttuisivatkin hiilen lähteiksi. Valinnoilla voi olla huomattavia vaikutuksia pitkällä aikavälillä. Lyhyellä aikavälillä tarkasteltuna Suomen metsät ovat olleet merkittävä hiilinielu (kuva 4). Ensimmäisellä Kioton sitoumuskaudella 2008–2012 hiilinielun on arvioitu olevan vuosittain 3–10 milj. CO<sub>2</sub> tn (MMM 2000). Epävarmuutta aiheuttavat sekä biologinen vaihtelu että hakkuumäärät. Suomi ei kuitenkaan käytä artiklan 3.4 mukaisia nieluja ainakaan ensimmäisellä sopimuskaudella (Valtioneuvoksen selonteko eduskunnalle 24. päivänä marraskuuta 2005. viit. Melkas 2006).



Kuva 4. Kasvihuonekaasupäästöt ja nielusektori vuosina 1990–2003 (Mt CO<sub>2</sub> ekv.) (Tilastokeskus).

## 1.3 Energiapuu

### 1.3.1 Energiapuupotentiaali

Puuenergian käytön lisääminen on Suomelle tärkeä keino toteuttaa ilmastosopimusta. Puun käyttö energiantuotannossa on määritelty päästökauppajärjestelmässä kasvi-huoneneutraaliksi, joten poltosta aiheutuneita hiilidioksidipäästöjä ei tarvitse hyvittää päästöoikeuksina. Energiapuun poltossa vapautuva hiilidioksidi sitoutuu metsän kasvuun ja vapautuisi joka tapauksessa esimerkiksi hakkuutähteiden lahotessa. Energiapuulla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita, jolloin saavutetaan ilmastonmuutoksen ehkäisemisessä tärkeitä päästövähennyksiä.

Kauppa- ja teollisuusministeriön vuonna 2003 päivittämässä Uusiutuvan energian edistämishjelmassa 2003–2006 on ehdotettu useita toimia metsähakkeen tuotannon lisäämiseksi ja erityishuomio on kiinnitetty nuorten metsien pienpuun hyödyntämiseen. Uusiutuvien energialähteiden edistämishjelman ja Kansallisen metsäohjelman tavoitteena on lisätä energiapuun, pääasiassa kiinteiden puupolttoaineiden, eli polttopuun ja energiahakkeen, vuotuista käyttöä 5 milj. m<sup>3</sup> vuoteen 2010 mennessä (KTM 2003a).

Vuoden 2010 puupolttoaineiden käytön lisäyksestä oletetaan saatavan nuoren metsän energiapuuharvennuksista ja ensiharvennuksista 1.6 milj. m<sup>3</sup> ja päätehakkuiden hakkuutähteestä 3.4 milj. m<sup>3</sup> (Hakkila 2004). Pientalokiinteistöissä poltettiin lämmityskaudella 2000–2001 6.1 milj. m<sup>3</sup>, josta raakapuuta oli 5.1 ja jättepuuta 1.0 milj. m<sup>3</sup>.

Määrä oli 9 % suurempi kuin lämmityskaudella 1992–1993, jolloin vastaava tutkimus tehtiin (Sevola ym. 2003).

Teknisesti korjuukelpoista ainespuuntuotantoon kelpaamatonta metsähaketta on arvioitu saatavan 10–16 milj. m<sup>3</sup> vuodessa. Metsähakkeen vuosituotannon tavoite, 5 milj. m<sup>3</sup> vuoteen 2010 mennessä, näyttää saavutettavalta (Harstela 2004). Kaukaisempana, vuoden 2025, tavoitteena on 10 milj. m<sup>3</sup> vuotuinen tuotanto. Puuenergian teknologiaohjelman 1999–2003 (Hakkila 2004) mukaan teknisesti korjuukelpoisista nuoren metsän harvennuksista, joiden oletetaan olevan ainespuuhakkuulle sopimattomia kohteita, arvioidaan yksistään saatavan vuosittain 5 milj. m<sup>3</sup> metsäbiomassaa.

Energiapuukertymät männikön ainespuun korjuun yhteydessä ovat olleet yhteensä noin 47 tn/ha, josta 26 % saadaan taimikonharvennuksessa ja loput 74 % päätehakkuussa. Päätehakkuussa kantojen nostosta biomassaa kertyy 20 tn/ha, joka on 43 % koko energiapuun kertymästä. Kuusikossa energiapuuta kertyy yhteensä 105 tn/ha, josta taimikonharvennuksen biomassa on 22 %, ja loput 78 % päätehakkuusta. Kantojen nostosta kertyy noin 40 % koko energiapuukertymästä. (Hynynen ja Ahtikoski 2004)

### **1.3.2 Energiapuuharvennus**

Energiapuuharvennuksiksi kutsutaan nuoren metsän kunnostusta, jossa poistuma korjataan energiapuuksi. Myös varsinainen ensiharvennus voi olla energiapuun korjuuseen soveltuva kohde, jos ainespuun lisäksi tulee riittävästi energiapuuta (Hakkila 2004).

Jos metsikön nuoruusvaiheen harvennuskäsittely on poikennut optimaalisesta ja on päädytty ylitheyteen ja ainespuuleimikolle epätaloudelliseen poistumarakenteeseen, kannattavaksi vaihtoehdoksi saattaa jäädä koko ensiharvennuspoistuman ohjaaminen energiapuukäyttöön (Hakkila 2004). Ensiharvennuskertymän talteenotto voidaan toteuttaa joko energiapuun (kokopuu) korjuuna, ainespuun korjuuna tai aines- ja energiapuun integroituna korjuuna (Ahtikoski ym. 2004).

Taimikonhoidon viivästäminen energiapuuharvennuksen vuoksi saattaa alentaa metsän tuottoa, jota saattaa lisäksi korostaa ajourien aikainen avaaminen ja korjuuvauriot. Olisikin luonnollista hankkia energiapuuta teollisen ainespuun tuotannon ulkopuolella olevista ensiharvennusemetsistä, mikäli energiatuotannon suhteellinen puustamaksukyky paranee esimerkiksi päästökaupan seurauksena. (Harstela 2004)

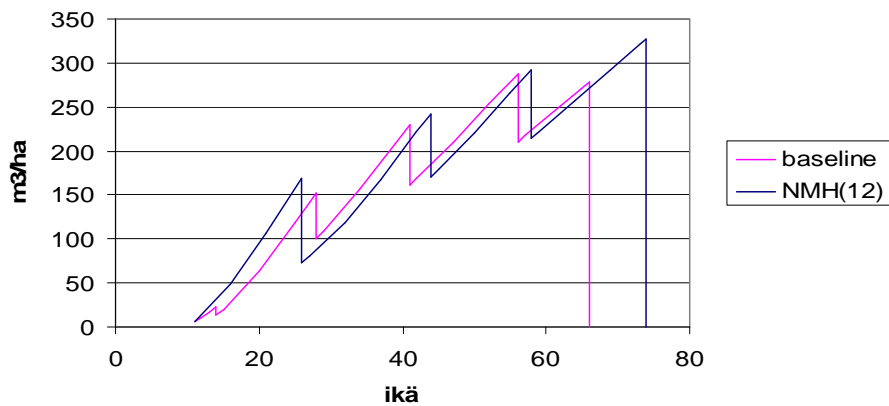
#### **1.4 Tutkimuksen tarkoitus**

Tutkimus on osa tutkimuskonsortiota ”Suomen metsät ja puutuotteet ilmastonmuutoksen torjunnassa - nielut ja substitootit sekä niiden taloudellinen ja oikeudellinen ohjaus” (Valsta ym. 2006). Tutkimuskonsortion tavoitteena on tukea metsäluonnonvaran taloudellista ja ympäristöystävällisesti tehokasta hoitoa tarkastelemalla, miten metsiä ja puutuotteita voidaan käyttää ilmastonmuutoksen torjunnassa (metsä- ja puutuotteiden nielut, bioenergia, materiaalisubstituoitio).

Tämän tutkimuksen tarkoitus on tuottaa tietoa energiapuuharvennuksen sisältämän metsänkasvatuksen käyttömahdollisuuksista ilmastopolitiikan keinona. Tutkimuksen tavoitteena on vertailla eri metsänkasvatuksen vaihtoehtojen vaikutusta päästöväh-

nyksiin, kun hiilensidonnän ja energiasubstituution lisäyksen vaikutus otetaan huomioon.

Tutkimuksen tarkoitus on selvittää kiertoajan alun tiheämmän kasvatuksen merkitystä hiilensidonnän kannalta ja energiapuuharvennuksesta saatavan energiapuun merkitystä energiasubstituution kannalta (kuva 5). Tarkoituksena on myös selvittää energiapuuharvennuksen sisältämän metsänkasvatuksen merkitystä yksityisen metsänomistamisen kannattavuudelle.



Kuva 5. Tuoreen kankaan männikkökoelan (n:o 4) taimikonhoidon sisältämä metsänhoitosuosituksen mukainen metsänkasvatus (baseline) ja vaihtoehtoinen metsänkasvatus, jossa nuoren metsän harvennus tehdään 12 metrin valtapituusvaiheessa (NMH 12).

Tarkoitus on lisäksi tutkia poliittisten ohjauskeinojen merkitystä metsänomistamisen kannattavuudelle. Poliittisina ohjauskeinoina testataan päästökaupan mukaisesti energiapuulle tulevaa hintaetua verrattuna fossiiliseen polttoaineeseen kivihiileen hiilidioksidin korvaavuuden perusteella sekä energiapuuharvennukseen saatavia Kera-tukia. Tavoitteena on tuottaa tietoa käytännön metsätalouden tarpeisiin ja löytää kustannustehokkaita vaihtoehtoja päästövähennyksien lisäämiseksi.

Tutkimustulosten perusteella on tavoitteena saada vastaus seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

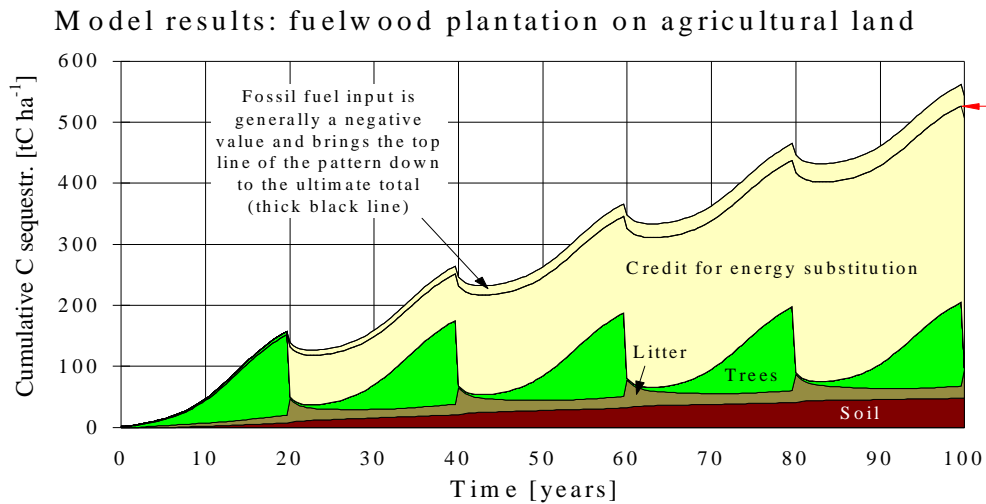
- Miten suuria päästövähennyksiä vaihtoehtoisen metsänkasvatuksen hiilensidonnalla ja energiasubstituutiolla on mahdollista saada aikaan?
- Mitkä ovat vaihtoehtoisen metsänkasvatusketjun vaikutukset metsänomistamisen kannattavuuteen nettonykyarvoina ja mitkä ovat eri harvennustapojen (energiapuu- ja ainespuuharvennus) nettotulokset?
- Millainen merkitys eri ohjauskeinoilla on kannattavuudelle?

## **2 HIILINIELUT JA SUBSTITUUTTIOT**

### **2.1 Metsät ja puutuotteet ilmastonmuutoksen hillitsijänä**

Metsillä ja puutuotteilla on kahtalainen merkitys ilmakehän hiilidioksidipitoisuuksien hallinnassa. Ensinnäkin metsien ja puutuotteiden sisältämän biomassan kokonaisvarastoja voidaan lisätä niin, että saadaan aikaan hiilinielu ilmakehästä. Toiseksi puulla voidaan korvata energiaintensiivisempiä materiaaleja tai fossiilisia polttoaineita, jolloin voidaan saada aikaan puun substituutio- eli korvaavuushyötyjä.

Nämä kaksi vaikutustapaa ovat laadullisesti erilaisia. Nieluvaikutus on luonteeltaan tilapäinen perustuen puuaines- ja hiilivaraston kasvuun. Metsien biomassan määrää eli hiilensidontaa voidaan kasvattaa vain rajallinen määrä, ja myöhemmin hiilinielut voivat jopa muuttua hiilen lähteiksi. Kun nielut on hyödynnetty, ei niitä voida käyttää ilmastopolitiikan välineenä. Substituutiovaikutusta voidaan sen sijaan hyödyntää kestävästi ja aikaansaada pysyvämpi vuosittainen vähennys fossiilisen hiilen päästöihin ilmakehään (kuva 6). Substituutiovaikutuksen olennaisena tekijänä on metsistä kestävästi hyödynnettävissä oleva puuainevirta tai hiilen virta, jonka suuruus riippuu sekä metsäpinta-alasta että kasvunopeudesta. (Pingoud 2006)



Kuva 6. Malli hiilensidonnalla ja energiasubstituutiolla aikaansaataavasta päästövähennyksestä, kun peltomaalla tuotetaan energiapuuta, joka käytetään korvaamaan fossiilisia polttoaineita. (Schlamadinger 2005)

Materiaali- ja energiasubstituution hyödyntämistä käytännön ilmastopolitiikassa vaikeuttaa yksinkertaisten kvantitatiivisten mittareiden puuttuminen, jotka kuvaisivat puubiomassan käytöllä saavutettavia fossiilisten hiilidioksidipäästöjen vähennyksiä. Puutuotteiden kokonaishiilitaseessa on otettava huomioon puun käyttöketjun välilliset ja välittömät vaikutukset sekä näiden dynamiikka.

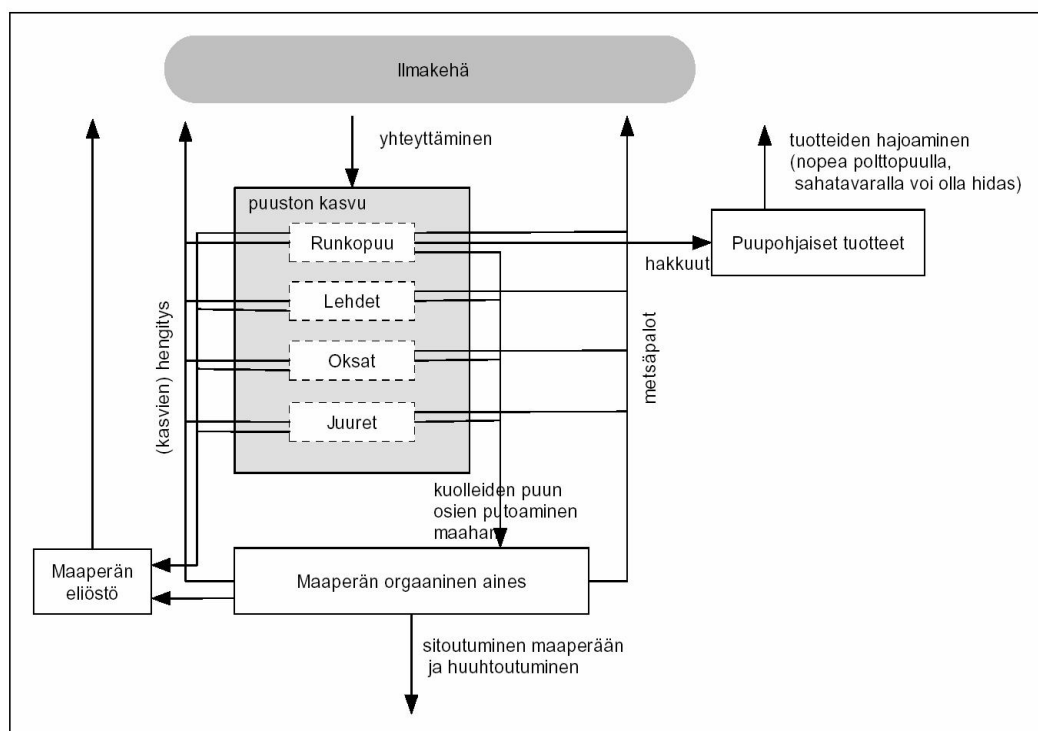
Puunkäytön aikaansaamaa päästöjen vähennyspotentiaalia ja hiilen sitoutumista metsiin pitäisi pystyä vertaamaan ilmastovaikutuksen kannalta, kun suunnitellaan tehosta ilmastopolitiikkaa. Tähän vertailuun ei ole olemassa yksikäsitteistä tapaa (Chomitz 2000). Taloustieteen näkökulmasta johdonmukainen tapa tarkastella hiilen varastointia on laskea yhden vuoden varastoinnin arvo koron käsitteen avulla. Materiaali- ja energiasubstituution vaikutus voidaan liittää tähän tarkasteluun ja laskea kokonaisuuden kannalta edullisin metsänhoitotapa.



## 2.2 Metsien hiilinielut ja niiden arvottaminen

Metsät toimivat hiilivarastona eli hiilinieluna sitoessaan yhteyttämisessä hiilidioksidia puihin, maaperään ja muuhun kasvillisuuteen (kuva 7). Vain valtamerissä on enemmän hiiltä kuin metsissä. Hiilensidonnan lisääminen metsän puihin on mahdollista joko lykkäämällä hakkuita tai tehostamalla metsänhoitoa. Metsien hiilensidonnalle voidaan mieltää arvo niiden lisätessä päästövähennyksiä, kun hiilidioksidipäästöille on olemassa vero tai päästökaupan mukainen hintataso.

Kuva 3.1 Metsän hiilenkierto



Kuva 7. Metsän hiilenkierto (Indufor 2000 s.8)

Metsät voisivat sisältää nykyistä huomattavasti enemmän hiiltä. Taloudellisen tarkastelun lähtökohtana on metsänomistaja, joka käsittelee metsiään omien tavoitteidensa kannalta parhaalla mahdollisella tavalla. Jos metsään sidotun hiilen määrää lisätään,

poiketaan metsänomistajan muutoin valitsemasta metsänhoidosta, jolloin syntyy kustannus. Metsien hoidon ja metsäpolitiikan kannalta on kiinnostavaa, millä tavoin metsien hiilinieluja voitaisiin lisätä kustannustehokkaasti. Tätä varten on laskettava hiilinielun lisäämisestä koituvat yksikkökustannukset. Hiiliyksikön yksikkökustannukset tarkoittavat kustannuksia jaettuna hiilivirran suuruudella. Yksikkökustannusten ollessa positiivisia, saavutetaan ns. winwin-tuloksia, jolloin sekä kannattavuus paranee että hiilensidonta lisääntyy. (Valsta ym. 2005)

Yksikkökustannuksien laskenta ei ole yksinkertaista, sillä metsien hiilivarantoa lisäävät toimenpiteet kohdistuvat yleensä johonkin ajanjaksoon eivätkä vain yksittäiseen vuoteen. Vertailtavaksi tulee näin ollen kahden aikauran, kustannusten ja hiilivirran, suhde (Valsta ym. 2005). Yksikkökustannusten laskemiseksi on erotettu seuraavat kolme tapaa; virtaperiaate, keskimääräisen varastomuutoksen periaate ja diskonttausmenetelmä (Richards & Stokes 2004).

Diskonttausmenetelmä antaa hiilinieluille aikapainotuksen, joka määräytyy diskonttauskoron perusteella. Tällöin aiemmin tapahtuvilla nieluilla on suurempi arvo (Valsta ym. 2005). Taloustieteen näkökulmasta metsien hiilensidonnalla aikaansaadun päästövähennyksen arvoa voidaan verrata hiilivaraston suuruuteen, kun lasketaan varastoinnin arvo koron käsitteen avulla (Marland ym. 2001).

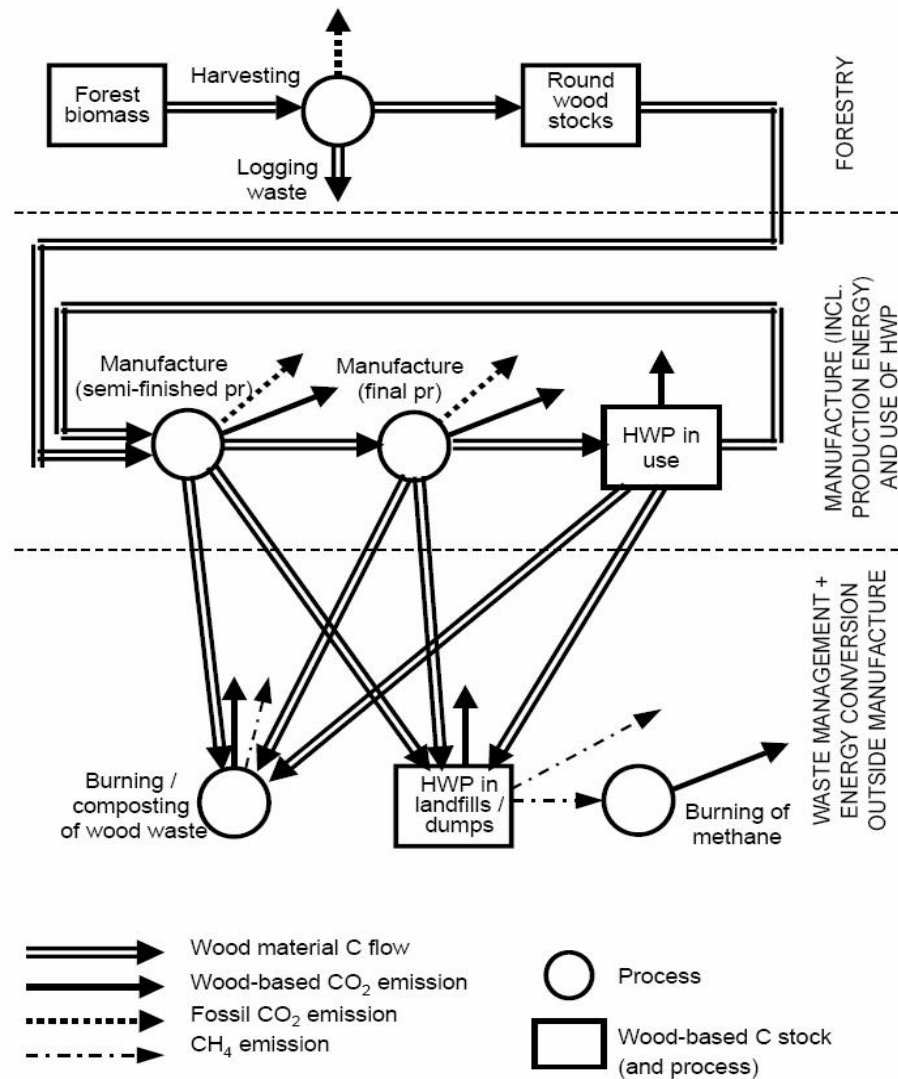
Moura-Costa ja Stuart (1998) arvioivat hiilimarkkinoiden kehittymismahdollisuuksia ja toteutuneita metsällisiä hiilensidontaprojekteja eri puolilla maailmaa. Hiilensidonnan kustannukset sidottua hiiliyksikköä kohti osoittautuivat monissa tapauksissa päästövähennystoimenpiteiden kustannuksia pienemmiksi. Niskasén ym. (1996) ja Pussisen

ym. (2000) mukaan hiilensidonnan kannattavuuteen vaikuttivat huomattavasti käytetyn koron suuruus ja hiilelle oletettu arvo. Monosen (2003) tutkimus vahvistaa käsitystä hiilensidonnan kustannustehokkuudesta, sillä hiilensidonnan lisäyksen (10–20 %) kustannukset vaihtelivat männikkökoaloissa keskimäärin 1.2–4.5 €/CO<sub>2</sub> tn, kun metsänkasvatus optimoitiin puuntuotannon ja hiilensidonnan suhteen.

Pohjolan ym. (2004) tutkimuksen mukaan harvennusten lykkääminen ja harvennusvoimakkuuden alentaminen on kustannustehokkaampaa hiilensidonnan kannalta kuin kiertoajan pidentäminen tutkituissa männikkökoaloissa. Hiilensidonnan lisäyksen kustannukset olivat melko alhaiset, yksikkökustannusten ollessa 1–6 €/CO<sub>2</sub> tn, riippuen sidottavan hiilen määrästä ja koelakohtaisista tekijöistä. Kiertoajan pidentämisellä aikaansaadun hiilensidonnan lisäyksen yksikkökustannukset olivat keskimäärin 20 €/CO<sub>2</sub> tn.

### **2.3 Puutuotteiden hiilinielu, materiaalisubstituutio ja energiasubstituutio**

Puutuotteilla on kolme keskeistä merkitystä ilmastomuutoksen hillitsijänä. Puutuotteet toimivat hiilidioksidin varastona (hiilinielu), puutuotteiden valmistaminen aiheuttaa vähemmän päästöjä kuin monien muiden puutuotteille vaihtoehtoisten energiantensiivisten materiaalien valmistaminen (materiaalisubstituutio) ja lisäksi elinkaaren lopussa puutuotetta voidaan kierrättää ja lopulta käyttää energiaksi korvaamaan fossiilisia polttoaineita (energiasubstituutio). (kuva 8)



Kuva 8. Puutuotteiden (HWB = Harvested wood products) elinkaaren hiilivirrat ja kasvihuonekaasujen päästöt (Pingoud ym. 2003).

Puutuotteisiin sitoutuvan hiilen huomioon ottamiseksi Kioton pöytäkirjaan on esitetty kolme laskentaperiaatetta: varastonmuutosperiaate, tuotantoperiaate ja virtaperiaate. Lähestymistavat eroavat siinä, kohdistetaanko metsätuotteista vapautuva hiili puun tuottaja- vai kuluttajamaalle. Lisäksi on sopimatta, missä laajuudessa metsätuotteet otettaisiin huomioon. (Pohjola 2000)

Puutuotteiden globaali hiilivarasto on kasvussa, mutta arviot varaston kasvusta vaihtelevat 30–140 miljoonaa hiilitonnia vuodessa. Suomen rakennuskannan keskimääräinen vuotuinen varastonkasvu on tutkimusten mukaan vaihdellut 0.13 ja 0.19 miljoonan hiilitonnin välillä. Kokonaishiilivaraston arvioitiin vuonna 2000 olleen Suomessa 17.4 miljoonaa hiilitonnia. (Pingoud ym. 2003, Pingoud ja Perälä 2000).

Puutuotteilla aikaansaattavia hiilinieluja ei voida kasvattaa loputtomasti. Korvaavuuseli substituutiovaikutusta voidaan sen sijaan käyttää kestävästi, eikä se edellytä hiilivarastojen jatkuvaa kasvua. Nieluista poiketen puutuotteiden substituutiovaikutukset ovat mukana jo Kioton ilmastopimoksessa, koska niissä on kyse fossiilisen hiilen päästövähennyksistä. Substituutiovaikutusten laskennassa pitää vertailla puutuotteen elinkaaren aikaisia päästöjä sille vaihtoehtoisten materiaalien päästöihin. Puutuotteilla aikaansaattavat ilmastohyödyt ovat periaatteessa suurempia, jos puuta voidaan käyttää sekä materiaalien korvaajana että bioenergiana. (Pingoud 2006)

Puun käyttöketjut eroavat toisistaan ilmastovaikutusten suhteen. Puutuotteilla aikaansaattavan ilmastohyödyn kannalta oleellista on säästää energiaa puutuotteen valmistusprosessissa ja korvata päästöintensiivisempiä tuotteita. Ilmastohyödyn kannalta oleellista on käyttää puuta pitkän elinkaaren tuotteisiin, jotka voidaan lopulta käyttää bioenergiaksi. (Pingoud ym. 2006)

Ilmastohyötyjen aikaansaamisen kannalta on ratkaisevaa mitä puutavaralajeja tuotetaan ja missä puuraaka-ainetta voidaan hyödyntää. Ilmaston kannalta saattaisi olla edullista suunnata puun käyttöä siten, että pienempi osa puuraaka-aineesta käytettäisiin energiantensiivisten ja lyhytkestoisten tuotteiden valmistukseen. (Pingoud ym.

2006). Tukkipuusta valmistettavilla puutuotteilla voidaan saada aikaan ilmastohyötystä, kun taas kuitupuusta valmistettavilla paperituotteilla saadaan aikaan usein ilmastohaittoja. Metsänkasvatuksella voidaan vaikuttaa kiertoajan puutavaralajikertymiin.

## **2.4 Puuenergian energiasubstituutio**

Puun käyttö energiantuotannossa on määritelty päästökauppajärjestelmässä kasvihuoneneutraaliksi, joten poltosta aiheutuneita hiilidioksidipäästöjä ei tarvitse hyvittää päästöoikeuksina. Energiapuun poltossa vapautuva hiilidioksidi sitoutuu metsän kasvuun ja vapautuisi jokatapauksessa esimerkiksi hakkuutähteiden lahotessa. Energiapuulla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita, jolloin saavutetaan ilmastomuutoksen ehkäisemisessä tärkeitä päästövähennyksiä.

Puupolttoainetta on perinteisesti käytetty kotitalouden tulisijoissa ja lämmityskattiloissa pilkkeenä. Haketta on käytetty vielä melko vähän runsaasta potentiaalistaan huolimatta. Käyttöön ovat vaikuttaneet polttoaineen laatu ja hinta. Palakooltaan, kosteus- ja lämpöarvoltaan korkeampilaatuisemman kokopuu- tai rankahakkeen tuotantokustannukset ovat olleet kalliimmat kuin vaihtoehtoisten polttoaineiden kuten turpeen ja kivihiihen. (Alakangas 2000)

Biopolttoaineiden käyttökohteet ja -määrät riippuvat niiden kilpailukyvystä muihin polttoaineisiin verrattuna. Biopolttoaineilla voidaan edistää uusiutuvien luonnonvarojen osuutta sähkön ja lämmön tuotannossa ja korvata fossiilisten polttoaineiden aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä (Helynen ym. 2002). Suurin energiapuun käytön li-

säysmahdollisuus on teollisuuden ja kaukolämmön sähköä ja lämpöä tuottavissa laitoksissa (CHP-laitokset) (Asplund ym. 2005).

Seppälän ja Siekkisen (1990) mielestä hiilitaseen kannalta puun polttaminen energiantuotannossa ei vaikuttaisi kovinkaan edulliselta verrattuna muihin polttoaineisiin, sillä puun päästökerroin on korkeampi kuin fossiilisten polttoaineiden (taulukko 1). Poltettaessa puuta vapautuu yhtä tuotettua energiayksikköä kohti maakaasuun verrattuna kaksinkertainen ja öljyynkin verrattuna keskimäärin puolitoistakertainen määrä hiilidioksidia ilmakehään. Kivihiilen etu puuhun verrattuna on vajaa 15 prosenttia.

Taulukko 1. Taulukon ominaispäästökertoimet ovat yleisesti käytettyjä keskimääräisiä kertoimia, jotka todellisuudessa vaihtelevat polttoaine-erittäin (Jantunen & Nevanlinna 1990).

Polttoaine	Päästökerroin (tn C/toe)
Kivihiili	1.05
Öljy	0.77
Maakaasu	0.6
Biomassa (puu)	1.2

Puun käyttöketjussa syntyy lähes poikkeuksetta fossiilisia hiilipäästöjä eli puun käyttöketju lisää absoluuttisesti kasvihuonekaasupäästöjä (Pingoud ja Lehtilä 2002). Substituutiosta onkin aina kyse suhteellisista päästövähennyksistä. Kasvihuonevaikutukseltaan edullisesta substituutiosta on kyse silloin, kun puutuoteketjun päästöt ovat pienempiä kuin sen korvaaman ketjun päästöt.

Mikäli puupolttoaine tuotetaan siten, että puuston kasvu on suurempaa kuin poistuma, puun sisältämä hiili vain kiertää ilmakehän ja biomassan välillä, eikä ilmakehän hiilidioksidipitoisuus puuta poltettaessa lisääny. Poikkeuksena ovat puun korjuussa ja kuljetuksessa käytetyt nestemäiset poltto- ja voiteluaineet, joiden energiamäärä on

suuruusluokaltaan 3 % puun energiamäärään verrattuna (Hakkila 2004). Toisaalta lähellä tuotetun puubiomassan voi olettaa saavuttavan ilmastohyötyjä myös logistiikassa korvaamalla etenkin kaukaa tuodun kivihiilen. Suomeen tuodaan kivihiiltä Puolasta, Venäjältä, Norjasta, Kolumbiasta, Venezuelasta sekä muutamista muista maista ja sitä käytetään Suomessa pääasiassa rannikkokaupunkien voimalaitoksissa (Alakangas 2000).

Polttoaineiden päästökertoimet vaihtelevat myös polttoaineluokkien sisällä, polttoaineen laadusta riippuen. Tilastokeskuksen kasvihuonekaasujen inventaariossa ja energiakyselyissä sekä päästökaupan päästölupahakemuksissa käytettävä polttoaineluokitus ja päästökertoimet (CO<sub>2</sub> tn/TJ) olivat seuraavat: öljyt (63.1–77.4), hiili (75–108), maakaasu (56.1), turve (97–105.9). Biopolttoaineita ei lasketa Suomen kasvihuonekaasuinventaarion kokonaispäästömäärään, eikä myöskään huomioida päästökaupassa. Biomassan (puu) oletuspäästökerroin oli 109.6 CO<sub>2</sub> tn/TJ (Tilastokeskus). Puun kuiva-aineen hiilipitoisuus vaihtelee eri puulajien välillä. Pieniläpimittaisten puiden vaihteluväli on ollut n. 46–53 % kuiva-aineesta (Nurmi 1993).

Kokopuuhakkeen ominaisuuksia on tutkittu eniten ensiharvennumänniköillä. Lämpöarvoon vaikuttaa voimakkaasti puuaineksen kosteus, joka on ollut kaatotuoreella ensiharvennumännyn kuorellisella runkokuulla keskimäärin 58,3 % ja latvusmassalla 52,4 %. Kaatohetken korkea kosteus yleensä alenee korjuun ja varastoinnin aikana jonkin verran. Ensiharvennumännyn tehollinen lämpöarvo on 40 % kosteudessa noin 1.9–2 MWh/m<sup>3</sup>. (Hakkila ym. 1995)



### 3 OHJAUSKEINOT

#### 3.1 Ohjauskeinojen valinta

Ilmastopolitiikan tavoitteiden toteuttamiseksi tarvitaan erilaisia ohjauskeinoja. Ohjauskeinoja on tarkasteltava kokonaisvaltaisesti, sillä yksinomaan metsänomistajan toimien ohjaus ei ratkaise esimerkiksi hiilinielujen kokonaistaseen tasapainoista kehitystä. Mikäli ilmastonmuutosta ehkäisevät strategiat aiheuttavat muiden toimintojen estymistä, kuten metsänomistajien puunmyyntitulojen pientymistä, ohjauskeinoissa on varmistettava asianmukainen kompensatio yksittäisille haitankärsijöille.

Ohjauskeinoja on jaoteltu niiden luonteen ja keskeisten piirteiden perusteella informatiivisiin, taloudellisiin ja hallinnollisiin (Kokko 2003). Näiden lisäksi voidaan mainita erilaiset vapaaehtoiset järjestelyt (Melkas 2004). Käytännössä ympäristöpoliittiset ohjauskeinot muodostavat kokonaisuuden, josta ei voi erottaa yksittäistä ohjauskeinoa, vaan keinoja on tarkasteltava suhteessa toisiinsa. Yleensä ohjauksessa yhdistellään useita keinoja niin, että ne tukevat ja täydentävät toisiaan. Ohjauskeinojen väliset rajat ovat siis häilyviä (Sairinen 2000).

Informatiivisissa ohjauskeinoissa keskeistä on juuri tiedon hankinta ja hallinta sekä sen käyttö ympäristöä koskevassa päätöksenteossa. Taloudellisissa ohjauskeinoissa keskeisenä tavoitteena on tehdä ympäristölle vähemmän haitallisesta toiminnasta taloudellisesti kannattavampaa kuin haitallisesta. Hallinnollisissa ohjauskeinoissa viranomaisilla on vahva asema. (Melkas 2004)

Ohjauskeinojen taloudellisesti tehokas käyttö vaatii tietoa palvelujen tuottamasta hyödystä ja tuotannon kustannuksista. Yhteiskunnan rajalliset resurssit vaativat kustannustehokkuutta. Ohjauskeinojen valinnalla voidaan vaikuttaa tiedon tuottoon ja kustannustehokkuuteen. Niin yksityis- kuin kansantaloudellisessakin mielessä olennainen kustannustekijä on vaihtoehtoiskustannus. Taloudellisten ohjauskeinojen tarkoituksena on tehdä yhteiskunnan tahtoma maankäyttö, kuten hiilinielujen ylläpito, yksityisen metsänomistajan näkökulmasta vähintään yhtä tuottavaksi kuin muut maankäyttömuodot. Myös kansantaloudellisesti eri käyttömuotojen yhteensovittaminen on tärkeää. Puuntuotannon, luonnon monimuotoisuuden suojelun ja hiilinielutoimintojen taloudellisesti tehokas yhteensovittaminen vaatii huolellista ohjauksen suunnittelua.

Jos taloudellinen ohjaus suunnitellaan ja toteutetaan hyvin, sillä on useita etuja verrattuna perinteiseen hallinnolliseen ohjaukseen. Taloudellinen ohjaus sallii toimijoiden itse valita parhaan tavan vähentää päästöjä. Tämä on kustannustehokasta, koska toimija tuntee itse oman kustannusfunktionsa parhaiten. Taloudellisella ohjauksella saavutetaan optimaalinen päästötaso mahdollisimman vähäisin kustannuksin, kun päästövähennykset allokoituvat sinne, missä ne on edullisinta toteuttaa. (Anttonen 2000)

Oikealla tukipolitiikalla voidaan saavuttaa selkeitä ns. winwin-tilanteita, joissa sama metsänkäsittelytapa parantaa sekä hiilensidontaa että turvaa monimuotoisuutta. Winwin-tilanteita, joissa saavutetaan kaksi hyötyä samalla kertaa, on mahdollista löytää myös perinteisessä metsänhoidossa. Metsiä on perinteisesti kasvatettu pitkälti Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion laatimien metsänhoitosuosituksen mukaises-

ti, joten yleisiä harvennuskasvatusta muuttamalla voitaisiin luoda yksinkertainen ohjauskeino metsien hiilivarastojen lisäämiseksi (Valsta ym. 2006). Tällöin voidaan päästä lähemmäksi metsänomistajalle optimaalista metsänkasvatusta, jolloin parhaimmillaan sekä kannattavuus paranee että hiilensidonta lisääntyy.

Metsien kasvattaminen nykyistä Tapion metsänhoitosuosituksiin (Hyvän metsänhoidon... 2001) perustuvaa metsänkasvatusta tiheämpänä voisi olla sekä taloudellisesti että ilmastollisesti mielekkäämpi vaihtoehto hiilensidonnan lisäämiseksi. Harvennuskasvatusten nosto tasaisissa ja nuorella iällä tiheissä metsissä olisi tehokas ja edullinen ohjauskeino. (Pohjola ym. 2006)

Metsien hiilinielutoiminnan ja bioenergian tuottamisen säätelyn ohjauskeinoja voidaan tarkastella seuraavien kriteerien valossa: ympäristöllinen tehokkuus, joustavuus, oikeudenmukaisuus, kustannustehokkuus, dynaaminen tehokkuus ja hallinnollinen tehokkuus. Lisäksi ohjauskeinojen yhteensopivuuteen metsien biodiversiteetin turvaamisen ohjauksen ja kestävänsä metsätalouden strategian kanssa tulee kiinnittää erityistä huomiota. (Melkas 2004)

### **3.2 Ohjauskeinot energiasubstituution edistämiseksi**

Uusiutuvan energian edistämisen keskeisimmät toimenpidealueet ovat teknologian kehittäminen ja käyttöönotto sekä taloudelliset ohjauskeinot, etenkin energiaverotus, investointituet ja metsähakkeen tuotantoketjun tuet. Keskeisin tavoite on saada tuotantoketjut kilpailukykyisiksi avoimilla energiamarkkinoilla. (KTM 2003b)

Ilmastopoliittisia ohjauskeinoja ovat jo käytössä olevat päästökauppajärjestelmä sekä metsähakkeen korjuun ja haketuksen tuki, sillä näillä on selkeästi energiapuun kysyntää edistävä vaikutus, kun ne ohjaavat sähkön ja lämmön tuotantoa korvaamaan fossiilisia energialähteitä puulla (Uusivuori 2006). Nämä saattavat yksipuolistaa ilmastovaikutusta energia- ja materiaalisubstituuttien käyttöön, jolloin metsien pidemmän aikavälin kasvun nielupotentiaali voi osin jäädä hyödyntämättä (Mononen 2006).

Kestävän Metsätalouden Rahoituslain (Laki kestävän... 1996) ja asetusten mukaisesti taimikonhoitoon ja nuoren metsän harvennukseen sekä energiapuun korjuuseen ja haketukseen on mahdollista saada valtion tukea. Suomi on jaettu kolmeen tukivyöhykkeeseen, joissa on erisuuruiset tuet. Kaikki tutkimuksen metsikkökoealat sijaitsivat tukivyöhykkeellä 1, jossa tuet ovat seuraavat (Kemera-opas 2005):

- pinta-alaperusteinen taimikonhoito (palkattu ulkopuolinen työvoima) 126,5 €/ha.
- pinta-alaperusteinen erittäin vaikea taimikonhoito tai nuoren metsän harvennus (2. kehitysluokka ja palkattu ulkopuolinen työvoima) 210,5 €/ha.
- tuki energiapuun kasaamiseen 3,5 €/m<sup>3</sup> ja kuljetukseen 3,5 €/m<sup>3</sup>.
- haketustuki (maksetaan haketta energiakäyttöön toimittavalle) rahoituslainojalla hoidetusta nuoresta metsästä tai energiapuun korjuukohteelta peräisin olevasta energiapuulle 1,7 €/irto-m<sup>3</sup> eli 4,16 €/m<sup>3</sup>, kun yksi kuutio sisältää 2,43 irtokuutiometriä haketta (Hakkila ja Fredriksson 1996).

Nuoren metsän hoidon, energiapuun korjuun ja haketuksen lisäksi tukea on mahdollisuus saada myös nuoren metsän hoitohankkeen toteutusselvitykseen (42,10 €/ha),

energiapuun korjuun toteutusselvitykseen (4,21 €/ha) ja haketuksen toteutusselvitykseen (0,09 €/irto-m<sup>3</sup> eli 0,22 €/m<sup>3</sup>) (Kemera-opas 2005). Toteutusselvityksestä voidaan maksaa maanomistajalle tukea vain silloin, kun hän itse ei ole toteutusselvityksen laatija.

### **3.3 Energiapuuharvennus osana metsänkasvatusta**

Energiapuun kysynnän kasvaessa sen talteenoton mahdollisuus kannattaa ottaa huomioon jo taimikonhoidossa. Näin energiapuuta voidaan korjata kustannustehokkaasti myöhemmässä energiapuuharvennuksessa. Metsänomistajan kannattaa harkita energiapuuharvennuksen ottamista osaksi metsänkasvatusketjua, mikäli energiapuulla on omaa käyttöä tai lähialueella on ulkopuolista kysyntää. Käytännössä energiapuuharvennus osana metsänkasvatusketjua tarkoittaa sitä, että taimikonhoidossa jätetään kasvamaan tavanomaista enemmän runkoja. (Heikkilä ja Siren 2005a)

Männiköissä voi olla perusteltua laatupuun kasvatuksessa, hirvituhoriskin takia tai energiapuuta kasvatettaessa jättää taimikonhoidossa tavallista enemmän puita kasvamaan. Kuusikoissa joudutaan usein ennen taimikonhoitovaihetta tekemään vähintään reikäperkaus ja taimikon harvennus joudutaan uusimaan lehtipuiden vahvan kasvun takia. Energiapuukorjuu ja sitä edeltävä taimikon varhaishoito reikäperkauksena voi tarjota taloudellisesti hyvän, vaihtoehtoisen kasvatusketjun. (Fredriksson 2004)

Kaikkea energiapuupotentiaalia ei ole perusteltua korjata talteen, vaan korjuukelpoisen energiapuupotentiaalin määrä riippuu pääasiassa tuotantoteknologiasta ja kilpai-

levien polttoaineiden yleisestä hintakehityksestä (Hakkila 2004). Päätehakuun hakkuutähteen kokonaismäärästä suositellaan jätettäväksi korjaamatta noin 30 % (Koistinen ja Äijälä 2005). Nuoren metsän energiapuuharvennuksessakin on suositeltavaa ravinnehävikin ehkäisemiseksi jättää hakkuutähdettä korjaamatta, vaikka koneellinen energiapuuharvennus kokopuuna olisikin mahdollista.

Heikkilän ja Sirenin (2005b) tutkimuksen mukaan ensiharvennuskohteissa, joiden kuitupuukertymä jää alle 20 m<sup>3</sup> hehtaarilla, kannattaa harvennus tehdä kokopuukorjuuna. Mikäli myyntikelpoista kuitupuuta kertyy tätä enemmän, kannattava vaihtoehto on lykätä harvennusta ja tähdätä ainespuun korjuuseen.

Ahtikosken ym. (2004) tutkimuksen mukaan energiapuun talteenotto oli metsänomistajan näkökulmasta aines- ja energiapuun integroitua korjuuta kannattavampaa sekä konehakuuna että moottorisahahakuuna. Tutkimuksen mukaan Kemera-kohteissa ei yleensä kannattaisi tehdä integroitua korjuuta, vaan ennemmin ottaa kertymä talteen pelkkänä energiapuuna tai ainespuuna.

Suurin hinta, jonka yritys voisi energiapuusta kannattavasti maksaa, lähenteli korjuuoloiltaan parhaissa kohteissa kuitupuun kantohintatasoa, ollen noin 10 €/m<sup>3</sup> (Ahtikoski ym. 2004). Tukipolitiikalla ei kuitenkaan pitäisi Kivelän (2002) mukaan tukea energiapuun kantohintaa. Mikäli Kemera-tuet pidetään sellaisella tasolla, ettei energiapuun kantohinta saavuta ainespuun kantohintoja, ei voitane puhua kilpailun vääristymisestä (Harstela 2004).

## 4 MENETELMÄT JA AINEISTO

### 4.1 Menetelmävaihtoehdot

Tutkimuksessa vertaillaan Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisemille metsänhoitosuosituksille (Hyvän metsänhoidon... 2001) vaihtoehtoisen metsänkasvatusketjun vaikutuksia metsänomistajan kannattavuudelle, kun otetaan puuntuotannon ohella huomioon myös hiilensidonta ja energiasubstituutio. Tapion metsänhoitosuosituksien mukaisesti toteutetun taimikonhoidon ja ensiharvennuksen sisältämä metsänkasvatus korvataan metsänkasvatuksella, jossa taimikonhoitoa lykätään ja toteutetaan nuoren metsän harvennus eri valtapituusvaiheissa (10, 12 tai 14 metriä) energiapuuharvennuksena sekä vertailun vuoksi myös ainespuuharvennuksena.

Tutkimuksen vaihtoehtoisissa metsänkasvatusmenetelmissä nuoren metsän harvennus valittiin toteutettavaksi 10, 12 ja 14 metrin valtapituusvaiheissa, koska silloin on mahdollista vertailla tiheimmän nuoren metsän kasvatuksen, harvennuskertymän ja ajankohdan lykkääntymisen välisiä vaikutuksia. Tarkoituksena on selvittää vaihtoehtoisten metsänkasvatusmenetelmien vaikutusta sekä hiilidioksidin päästövähennyksiin että metsänomistajan kannattavuuteen nettonykyarvoina kiertoajan alussa.

Puunkäytön aikaansaamaa päästöjen vähennyspotentiaalia ja hiilen sitoutumista metsiin pitäisi pystyä vertaamaan ilmastovaikutuksen kannalta, kun suunnitellaan tehokasta ilmastopolitiikkaa. Tähän vertailuun ei ole olemassa yksikäsitteistä tapaa (Chomitz 2000).

Hiilensidonnan ja päästövähennysten yksikkökustannukset tarkoittavat kustannuksia jaettuna hiilivirran suuruudella. Yksikkökustannusten laskemiseksi on erotettu seuraavat kolme tapaa (Richards & Stokes 2004):

- Virtaperiaate: Diskontataan kustannukset jonain ajanjaksona ja jaetaan ajanjakson positiivisten ja negatiivisten hiilivirtojen summalla
- Keskimääräisen varastonmuutoksen periaate: Diskontataan kustannukset jonain ajanjaksona ja jaetaan ajanjakson keskimääräisen hiilivaraston muutoksella
- Diskonttausmenetelmä: Diskontataan kustannukset jonain ajanjaksona ja jaetaan ajanjakson diskontattujen positiivisten ja negatiivisten hiilivirtojen summalla

Diskonttausmenetelmä antaa hiilinieluille aikapainotuksen, joka määräytyy diskonttauskoron perusteella. Tällöin aiemmin tapahtuvilla nieluilla on suurempi arvo (Valsa ym. 2005). Taloustieteen näkökulmasta metsien hiilensidonnalla aikaansaadun päästövähennyksen arvoa voidaan verrata hiilivaraston suuruuteen, kun lasketaan varastoinnin arvo koron käsitteen avulla. Tällöin esimerkiksi 3 % korkokannalla yhden tonnin päästövähennys on yhtä arvokas kuin 33.3 tonnin varaston ylläpitäminen yhden vuoden ajan (Marland ym. 2001). Materiaali- ja energiasubstituution vaikutus voidaan liittää tähän tarkasteluun ja laskea kokonaisuuden kannalta edullisin metsänhoitotapa.

Ilmastopimuksen mukaisissa kansallisissa päästöinventaariorissa käytetään kansainvälisen ilmastopaneelin IPCC:n ohjeistoja. Sovellettavasta raportointiperiaatteesta on tullut ilmastopoliittinen kiistakysymys, josta ei ole päästy yksimielisyyteen.



Kaikkien maiden pitäisi noudattaa samaa periaatetta, jotta puutuotteiden hiilitase laskettaisiin globaalisti oikein, eikä samaa nielua tai päästöä laskettaisi kahteen kertaan tai jätettäisi huomioimatta (Pingoud 2006). Puutuotteisiin sitoutuneen hiilen mittaamiseksi on esitetty kolme kilpailevaa raportointiperiaatetta; varastonmuutos-, tuotanto- ja virtaperiaate (Pingoud ja Skog 2003). Pohjimmiltaan laskentamalleja on neljä (IPCC 2001b):

- Kansainvälisen ilmastopaneelin peruslähestymistapa, jossa oletetaan, että kaikki puunkorjuussa kaadettava puumassa hajoaa heti, eli tuotteisiin ei sitoudu lainkaan hiiltä.
- Varastonmuutosperiaate: Tarkastellaan metsätuotteiden hiilivarastojen muutoksia kunkin kansallisvaltion rajojen sisällä. Periaatetta on arvosteltu siitä, että se tarjoaa maalle nielun myös kestävämmästä kasvatetusta tuontipuusta.
- Tuotantoperiaate: Metsätuotteen tuottajamaa ottaa vastuulleen metsätuotteen koko elinkaaren hiilitaseen riippumatta siitä, onko tuote käytössä omassa maassa vai vientimarkkinoilla. Periaate johtaa moniin käytännön ongelmiin, koska puun alkuperämaata voi olla vaikea selvittää valmiista tuotteesta.
- Virtaperiaate: Tarkastellaan hiilivirtoja ilmakehästä metsätuotteisiin ja päinvastoin, eikä kiinnitetä huomiota hiilivarastojen muutoksiin eri maissa. Ollaan kiinnostuneita vain siitä, missä hiili sidotaan puunkasvun muodossa ja missä päästö ilmakehään tapahtuu, eli missä puutuote lopullisesti hajoaa ja muuttuu hiilidioksidiksi. Periaatteen seurauksena esimerkiksi kaikesta tuontipuenergiasta tulisi kansallisella tasolla fossiilisia polttoaineitakin pahempi päästölähde. (Pingoud 2006)

## 4.2 Päästövähennyksien ja taloudellisten tunnuslukujen laskenta

Tässä tutkimuksessa käytetään hiilensidonnan ja energiasubstituution päästövähennysten ja kustannusten laskennassa diskonttausmenetelmää (Richards & Stokes 2004). Puutuotteisiin sitoutunutta hiiltä ei oteta huomioon, vaan oletetaan, että kaikki puunkorjuussa kaadettava puumassa hajoaa heti, eli tuotteisiin ei sitoudu lainkaan hiiltä (IPCC 2001b). Hiilensidonnan laskennassa tarvitaan koealojen simulointien puustotiedoista saatavat puustokertymät. Simulointijakson lopun (1-5 vuotta) puustokertymistä laskettu hiilensidonnan lisäys sekä päästöt, eli hakkuumäärät kerrottuna hiiliyksikön oletetulla reaalaisella markkinahinnalla diskontataan kiertoajan alkuun valitulla korkokannalla, jolloin sekä hiilensidonta että päästöt tulevat otetuksi huomioon tasavertaisesti ajan suhteen. Yksikkökustannuslaskennassa tämä tehdään olettaen, ettei hiiliyksiköllä ole markkinahintaa.

Energiasubstituution laskennassa energiapuuharvennuksen toteuttamisajankohdan energiapuulla aikaansaatu päästövähennys kerrottuna hiiliyksikön oletetulla markkinahinnalla diskontataan kiertoajan alkuun valitulla korkokannalla. Yksikkökustannuslaskennassa tämä tehdään olettaen, ettei hiiliyksiköllä ole markkinahintaa.

Metsätaloudessa investointien kannattavuuden kriteerinä käytetään usein nettotulojen nykyarvoa. Tulevaisuuteen sijoittuvien tulojen ja menojen nettonykyarvo saadaan diskonttaamalla eri aikoina tapahtuvat erät nykyhetkeen (kiertoajan alku) päätöksentekijän valitsemalla korkokannalla. Tällä menetelmällä eri investointivaihtoehdot saadaan keskenään vertailukelpoisiksi. Vaihtoehtoisina korkokantoina on yleisesti

metsäekonomiassa käytetty korkokantoja 3 % ja 4 %. Muita korkokantoja voidaan käyttää kuvailemaan korkokannan merkitystä tuloksiin.

Hiilensidonnasta ja energiasubstituutiosta koituvia kustannuksia voidaan tarkastella eri metsänkasvatuksen vaihtoehtojen välillä laskemalla yksikkökustannukset. Yksikkökustannukset tarkoittavat kustannuksia jaettuna hiilivirran suuruudella. Eri valtapituusvaiheissa toteutetun nuoren metsän harvennuksen sisältämän metsänkasvatuksen taloudellisen tuloksen netto nykyarvo vähennettynä Tapion metsänhoitosuosituksen mukaisen taimikonhoidon sisältämän metsänkasvatuksen tuloksen netto nykyarvolla (=kustannukset), jaettuna kiertoajan alkuun diskontatun päästövähennyksen lisäyksellä (=hiilivirta), antaa kustannukset lisättyä yksikköä kohden.

Tämän lähestymistavan kiinnostavuutta korostaa se, että keskusteltaessa joustomekanismeista on haluttu yleensä huomioida ainoastaan ihmistoimin aikaansaadut hiilinielut ja päästövähennykset. Yksikkökustannus kertoo millaisella vähimmäisyksikkökustannuksella tulisi metsänomistajan tulonmenetyksiä kompensoida, jos tavoitteena olisi hiilinielun tai energiasubstituution avulla aikaansaadun päästövähennyksen lisäys ja tulojen pysyminen ennallaan. Eli tällöin metsänomistajalle ei koituisi hiilinielun tai energiasubstituution kasvattamisesta taloudellista tappiota, eikä toisaalta taloudellista hyötyäkään. Yksikkökustannusten laskeminen on tärkeää, kun miettään kustannustehokkaita ohjauskeinoja, joiden tarkoituksena olisi edistää metsien hiilinieluja ja/tai fossiilisten polttoaineiden korvaamista energiapuulla. (Mononen 2003)

#### 4.2.1 Hiilensidonnan yksikkökustannukset

Hiilensidonnan laskennassa käytetään pääpuulajien keskimääräisiä biomassakertoimia (Lehtosen ym. 2003), joilla runkopuun kuutiomäärät voidaan muuntaa koskemaan koko puun biomassaa (BEFs = Biomass expansion factors). Biomassa muutettiin hiileksi olettamalla kaikkien puulajien ja biomassaositteiden hiilipitoisuuden olevan 50 % kuiva-aineesta (Nurmi 1993, 1997). Männyssä on näin ollen 353 kg. hiiltä/m<sup>3</sup> ja kuusessa 407 kg. hiiltä/m<sup>3</sup>. Hiilensidonnan laskennassa kaikkien puulajien oletettiin olevan pääpuulajia koko kiertoajalla. Hiili voidaan muuttaa laskennallisesti hiilidioksiditonneiksi muuntokertoimilla (44/12) (Glossary: Carbon... 1990).

Hiilensidonnan yksikkökustannukset saadaan, kun nuoren metsän harvennuksen (NMH 10, 12 & 14) sisältämän metsänkasvatuksen taloudellisen tuloksen nettonykyarvo vähennetään Tapion metsänhoitosuosituksen mukaisen metsänkasvatuksen taimikonhoidon (baseline) sisältävän tuloksen nettonykyarvolla ja jaetaan kiertoajan alkuun diskontatun hiilensidonnan lisäyksellä. Kaavan muodossa asia voidaan esittää seuraavasti:

$$\text{€CO}_2 \text{ tn} = [(\text{NPV}_2 - \text{NPV}_1)] / [(\text{VOL}_2 - \text{VOL}_1) * (\text{w} * \text{k})]$$

jossa,

**NPV<sub>2</sub>** = kiertoajan alkuun diskontattu tulojen ja kustannusten erotuksen nettonykyarvo vaihtoehtoisessa metsänkasvatuksessa

**NPV<sub>1</sub>** = kiertoajan alkuun diskontattu tulojen ja kustannusten erotuksen nettonykyarvo metsänhoitosuosituksen mukaisessa metsänkasvatuksessa (baseline)

**VOL<sub>2</sub>** = kiertoajan alkuun diskontattujen puuston simulointijaksojen tilavuuk-  
sien summa (tilavuuskasvut - hakkuupoistumat) vaihtoehtoisessa metsänkasvatukses-  
sa

**VOL<sub>1</sub>** = kiertoajan alkuun diskontattujen puuston simulointijaksojen tilavuuk-  
sien summa (tilavuuskasvut - hakkuupoistumat) metsänhoitosuosituksen mukaisessa  
metsänkasvatuksessa (baseline)

**w** = Puun sisältämä hiili (Männiköt: 0.353 Mg/m<sup>3</sup>) (Kuusikot: 0.407  
Mg/m<sup>3</sup>)

**k** = Muuntokerroin hiilestä hiilidioksidiksi (44/12)

#### **4.2.2 Energiasubstituution yksikkökustannukset**

Taloudellisessa ainespuun vaihtoehtolaskennassa kaikkien lehtipuiden oletetaan olevan koivua. Energiapuuharvennuksen energiasubstituutilaskennassa kokopuuker-  
tymän oletetaan myös olevan kokonaisuudessaan koivua, jonka muuntokertoimeksi asetetaan ensiharvennuskoivun puuaineen kuiva-tuoretiheys (470 kg/m<sup>3</sup>) (Hakkila 2004) muutettuna hiileksi (50 %) (Impola 1998), eli 235 kg. hiiltä/m<sup>3</sup>. Tuloksiin hiili muutetaan hiilidioksiditonneiksi muuntokertoimilla laskien.

Nuoren metsän harvennuksen energiapuun sisältämän hiilen oletetaan korvaavan energiatuotannossa fossiilista polttoainetta kivihiiltä päästökertoimien suhdeluvun mukaisesti: biomassa (puu) 1.20 tC/toe ja kivihiili 1.05 tC/toe (ks. taulukko 1) (Jan-  
tunen ja Nevanlinna 1990). Päästökerroin ilmaisee hiilimäärän tuotettua energiayk-  
sikköä kohti. Energiasubstituutiovaikutusta laskettaessa muuntokertoimeksi lisättiin

puun ja kivihiilen päästökertoimien suhdeluvun mukainen substituutiokerroin (0.875).

Nuoren metsän harvennuksissa korjuukustannusten laskenta perustuu Laitilan (2004) laskureihin. Laskurissa voidaan kokopuu toimittaa tienvarteen koneelliseen tai manuaaliseen kaatokasaukseen perustuvalla korjuuketjulla tai se voidaan korjata korjuurilla. Korjuuketjutiedoissa on valmiina oletusarvoina käytetty keskimääräisiä arvoja erilaisille kustannuksille. Käyttäjä voi antaa uudet arvot malliin asetetuille oletusarvoille, sillä korjuukustannuksen laskentaperusteet vaihtelevat konetekijöistä riippuen. Valmiit kustannusperusteet ovat joustavasti muunnettavissa laskentatilanteen mukaisiksi. (Laitila 2005)

Energiapuun kokopuun korjuukustannuslaskennassa käytetään kokopuun keskikokona energiapuuharvennuksen kokonaispotentiaalia (100 % energiapuukertymä) jaettuna poistettavien puiden runkolukumäärällä. Energiapuukertymäksi oletetaan 85 % kokopuun kokonaiskertymästä. Energiapuuharvennuksen korjuukustannukset (kaato, kasaus, metsäkuljetus) perustuvat koealatietoihin ja ”Timberjack 720 keräävän kaatopään” tuottavuusfunktioihin (Laitila 2004). Korjuukustannuslaskelmissa metsäkuljetuksen keskikuljetusmatkaksi asetetaan 250 m, kuten ainespuuharvennuksissakin, harvennuspinta-alaksi hehtaari ja energiapuuharvennuksen organisaatiokustannuksiksi ja energiapuukasojen peittämiskustannuksiksi yhteensä 2.9 €/m<sup>3</sup>.

Energiasubstituution yksikkökustannukset saadaan, kun nuoren metsän energiapuuharvennuksen sisältämän metsänkasvatuksen taloudellisen tuloksen nettohyötyarvo vähennetään Tapion metsänhoitosuosituksen mukaisen taimikonhoidon sisältämän

metsänkasvatuksen (baseline) tuloksen nettonykyarvolla ja jaetaan kiertoajan alkuun diskontatulla energiasubstituutiovaikutuksella. Kaavan muodossa asia voidaan esittää seuraavasti:

$$\text{€CO}_2 \text{ tn} = [(\text{NPV}_2 - \text{NPV}_1)] / [(\text{VOL}_2 - \text{VOL}_1) * (\text{w} * \text{k} * \text{s})]$$

jossa

**NPV<sub>2</sub>** = kiertoajan alkuun diskontattujen tulojen ja kustannusten nettonykyarvo vaihtoehtoisessa metsänkasvatuksessa

**NPV<sub>1</sub>** = kiertoajan alkuun diskontattujen tulojen ja kustannusten nettonykyarvo metsänhoitosuosituksen mukaisessa metsänkasvatuksessa (baseline)

**VOL<sub>2</sub>** = Energiapuuharvennuksen kertymätilavuus (85 %) diskontattuna kiertoajan alkuun

**VOL<sub>1</sub>** = 0 (baseline)

**w** = Energiapuun sisältämä hiili (0.235 Mg/m<sup>3</sup>)

**k** = Muuntokerroin hiilestä hiilidioksidiksi (44/12)

**s** = Substituutiokerroin (energiapuu vs. kivihiili) (0.875)

### 4.2.3 Kannattavuus

Nettonykyarvolaskelmissa käytetään reaalisia tukkuhintaindeksillä korjattuja pitkän aikavälin, vuosien 1978–2004 kantohintojen trendin mukaisia arvoja vuodelle 2005 (taulukko 2) (LIITE 1). Tienvarsihintojen laskemiseksi kantohintoihin lisätään vuoden 2004 puutavaralajittaiset korjuukustannukset (taulukko 3) (Väkevä ja Örn 2005). Laskelmissa hakkuiden puuerien kantorahatulot saadaan tienvarsihinnan ja korjuukustannusten (ks. kappale 4.3 MOTTI-metsikkösimulaattori) erotuksena, jolloin puu-

erän ominaisuudet tulee otetuksi huomioon. Metsänhoitokustannuksissa käytetään vuoden 2004 keskikustannuksia (Metsäteho Oy) (taulukko 4) (Strandström 2005). Metsänhoitotoimenpiteitä olivat maanmuokkaus (äestys), istutus ja perkaus/harvennus. Nuoren metsän harvennuksissa lasketaan erikseen nettotulos korjuukustannusten ja hiilidioksidin eri hintatasojen (10, 20 ja 30 €/CO<sub>2</sub> tn) sekä Kemera-tukien perusteella ja lisätään lopullisiin nettonykyarvolaskelmiin.

Taulukko 2. Kantohintojen trendin mukainen arvo vuodelle 2005.

	Trendiarvo, €/m <sup>3</sup>
Mäntytukki	46.50
Kuusitukki	41.59
Koivutukki	46.18
Mäntykuitu	13.77
Kuusikuitu	22.46
Koivukuitu	14.90

Taulukko 3. Puutavaralajikohtaiset puunkorjuun ja kaukokuljetuksen kustannukset vuonna 2004 (Väkevä & Örn 2005).

	Puunkorjuu, €/m <sup>3</sup>	Kaukokuljetus, €/m <sup>3</sup>
Mäntytukki	6.02	5.64
Kuusitukki	5.53	5.02
Vaneritukki	7.55	6.76
Mäntykuitu	10.88	6.73
Kuusikuitu	10.30	6.19
Lehtikuitu	12.40	6.53
Keskiarvo	8.43	6.01

Taulukko 4. Vuoden 2004 metsänhoidon keskikustannukset (Strandström 2005).

Työlaji	Kustannus €/ha
Äestys	124
Muu maanmuokkaus	220
Kylvö	294
Männyn istutus	505
Kuusen istutus	521
Perkaus/harvennus	246
Nuoren metsän kunnostus	228

Tässä tutkimuksessa hiilensidonnan kannattavuuslaskennassa hiilidioksidille asetetaan arvoksi 10 €/CO<sub>2</sub> tn, jolloin puuhun sitoutuneella hiilellä on arvo sen lisäessä



päästövähennyksiä. Energiasubstituution kannattavuuslaskennassa hiilidioksidille asetetaan vertailtaviksi hintatasoiksi 10, 20 ja 30 €/CO<sub>2</sub> tn päästökaupan siirtohinnittelun mukaisesti. Tällöin puun sisältämällä hiilellä on arvo fossiilisen kivihiilen hiilidioksidipäästöjen korvaavuuden perusteella.

#### 4.2.4 Oletukset

Tarkasteltavien metsien on oletettu kuuluvan yksityisen metsänomistajan omistukseen ja metsänomistajan oletetaan valitsevan metsänkasvatuksen, joka antaa metsän yhdelle kiertoajalle suurimman kiertoajan alkuun diskontattujen tulojen ja kustannusten erotuksen mukaisen nettonykyarvon. Diskonttauskorot oletetaan vakioiksi (täydelliset pääomamarkkinat). Samoin puun hinnat ja hiilen hinnat oletetaan reaalisesti vakioiksi, kuten myös puuntuotannon kustannukset. Ulkoisvaikutuksia ei ole, tai niillä ei ole vaikutuksia päätöksentekoon.

Tutkimuksessa käytettävät kasvumallit oletetaan olevan harhattomia reaktiossaan puuston tiheyden muutokseen. Kasvuolosuhteet ja kasvufunktiot oletetaan muuttumattomiksi, joten esimerkiksi ilmastonlämpenemisen ei oleteta vaikuttavan puuston kasvuun tulevaisuudessa. Metsälain asettamat rajoitukset, metsänhoitosuositukset ja tuet oletetaan muuttumattomiksi, kuten uudistamisläpimitat, harvennusrajat ja Keme-  
ra-tuet.

Tutkimuksessa hiilensidonnan ja energiasubstituution laskennan tarkoituksena on vertailla vaihtoehtoisia metsänkasvatusmenetelmiä ja niiden vaikutuksia hiilen eri hintatasoilla ja korkokannoilla metsänomistajan talouteen. Tarkoituksena on löytää

kustannustehokkaita menetelmiä, jotka lisäävät hiilensidontaa ja/tai energiasubstitutiota olettamalla hiili markkinakelpoiseksi tuotteeksi, mikä yhtenä metsätalouden tuotoksena kannustaisi metsänomistajaa uudenlaiseen metsänhoitoon. Tällöin hiilensidonnassa odotetaan hiilitaseen muodostuvan pysyvästi uuteen tasapainotilaan ja hiilinielun suurenevan aluetasolla tai kiertoajoilla keskimäärin. Energiasubstituutiossa odotetaan energiapuun korvaavan pysyvästi fossiilista polttoainetta, kivihiihtä, jolloin saadaan pysyvä vähennys fossiilisen hiilen päästöihin ilmakehään ja näin hiilitase muodostuisi pysyvästi uuteen tasapainotilaan.

### **4.3 Simulointi**

#### **4.3.1 Motti-metsikkösimulaattori**

Tutkimuksessa käytetään Metsäntutkimuslaitoksen kehittämää MOTTI-metsikkösimulaattoria, jolla voi muodostaa luotettavia puuston kehityssennusteita metsikkötasolla. MOTTI-simulaattoriin on sisällytetty uusimmat ja luotettavimmat puuston kehityksen ennustemallit, joilla voidaan kasvattaa metsikkökoealojen puustoja valittujen asetusten ja rajoitusten mukaisesti. (Hynynen ym. 2005)

Tutkimuksessa käytetyt MOTTI-simulaattorin kasvumallit perustuvat laajoihin maastoaineistoihin. Mallit on pyritty laatimaan mahdollisimman kattavasti maantieteellisen alueen, kasvupaikan sekä puulajien suhteen. Kasvumallien tavoitteena on myös kuvata metsänhoidon toimenpiteiden vaikutusta mahdollisimman totuudenmukaisesti. Mallit ovat luotettavimmillaan Etelä-Suomen oloissa valtapituuden ollessa yli 8 metriä. (Hynynen ym. 2005)

### 4.3.2 Simuloinnin asetukset

MOTTI-simulaattorin simuloinneissa taimikonhoito toteutetaan Tapion metsänhoitosuosituksen (Hyvän metsänhoidon... 2001) mukaisesti männikkökoealoissa 6-7 metrin valtapituudessa ja mikäli lähtötilanteen valtapituus on yli 7 metriä, taimikonhoito toteutetaan heti (suurin valtapituus lähtötilanteessa 7.4 metriä). Kuusikkokoealoissa taimikonhoito toteutetaan 4-5 metrin valtapituudessa ja mikäli lähtötilanteen valtapituus on yli 5 metriä, taimikonhoito toteutetaan heti (suurin valtapituus lähtötilanteessa 5.63 metriä). Runkoluku taimikonhoidon jälkeen sekä männikköettä kuusikkokoealoissa asetetaan 1800 kpl/ha.

Nuoren metsän harvennukset tehdään vaihtoehtoisesti valtapituuden ylittäessä tai ollessa 10, 12 ja 14 metriä. Valtapituus tarkoittaa hehtaarilla sadan paksuimman puun aritmeettista keskipituutta (Ärölä 2002). Asetettu runkolukutavoite nuoren metsän harvennuksen jälkeen on männikkökoealoissa 1100 kpl/ha ja kuusikkokoealoissa 1200 kpl/ha. Loput harvennukset ja päätehakkuu automaattisimuloidaan Tapion harvennusohjeiden mukaisesti alaharvennuksina, joka toteutuu metsänhoitosuosituksen mukaisten harvennusrajojen puoleen väliin. Lisäksi rajoitetaan harvennusten maksi-  
mipoistumaa, joka saa olla enintään 35 % puuston koko tilavuudesta. Nuoren metsän harvennuksissa toimenpide tehdään aina runkolukumääritelmän mukaisesti, joten tilavuuden pudotus saattaa olla aika rajukin, mikä voisi altistaa metsikön esimerkiksi tuuli- ja lumituhoille tai aiheuttaa liian harvana kasvaen vajaatuottoisuutta. Päätehakkuukriteerinä käytetään metsälain mukaista keskiläpimittaa, joka vaihtelee puula-  
jin ja kasvupaikan mukaisesti.

MOTTI-simulaattorin asetuksissa puutavaralajien vähimmäislatvaläpimitat ovat seuraavat; männyllä (tukki 14.5 cm, kuitu 7 cm), kuusella (tukki 15.5 cm, kuitu 8 cm) ja lehtipuilla (tukki 16.5 cm, kuitu 6 cm).

#### 4.4 Aineisto

Metsäntutkimuslaitoksen aineistosta valittiin 12 mitattua koealaa, jotka sijaitsivat Etelä-Suomessa. Valintaa tehdessä koealat ryhmiteltiin pääpuulajin ja kasvupaikan mukaan kolmeen ryhmään, joita olivat tuoreen kankaan männiköt, kuivahkon kankaan männiköt ja tuoreen kankaan kuusikot. Metsikkökoealojen lähtöikä oli keskimäärin 12 vuotta ja runkoluku keskimäärin 3362 kpl/ha (vaihteluväli 2603–4800 kpl/ha) (taulukko 5).

Taulukko 5. Tutkimuksessa simuloitujen metsikkökoealojen lähtötietoja:

N	= runkoluku/ha
PPA	= pohjapinta-ala
$D_g$	= pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta
$H_g$	= pohjapinta-alalla painotettu keskipituus
$H_{dom}$	= valtapituus
V	= tilavuus, m <sup>3</sup> /ha

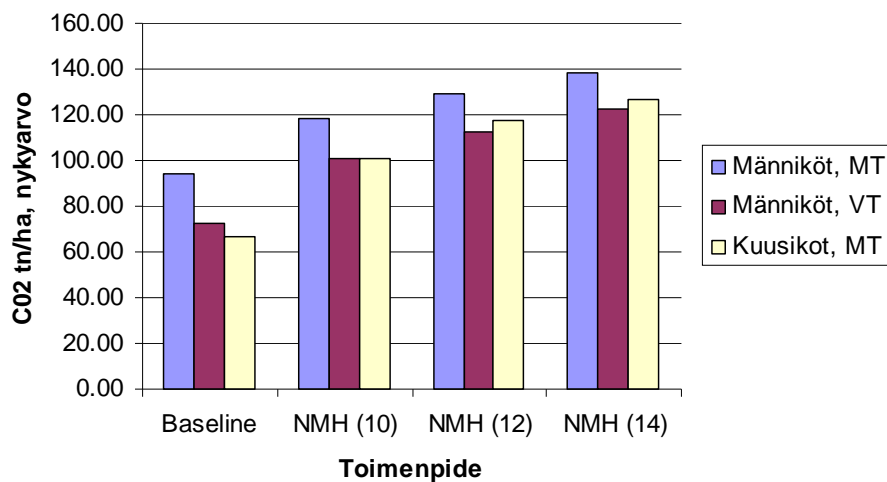
Koeala	Kasvupaikka	Pääpuulaji	Ikä	N	PPA	$D_g$	$H_g$	$H_{dom}$	V	Kunta
1	Tuore	Mänty	13	2917	3.1	5.23	4	4.81	9.29	Padasjoki
2	Tuore	Mänty	12	4333	16.08	8.73	6.41	7.4	57.26	Orimattila
3	Tuore	Mänty	11	2740	2.39	4.89	4.83	5.56	7.59	Asikkala
4	Tuore	Mänty	11	2603	2.1	4.44	4.02	4.96	6.13	Asikkala
<b>Keskiarvo</b>			<b>12</b>	<b>3148</b>	<b>5.92</b>	<b>5.82</b>	<b>4.82</b>	<b>5.68</b>	<b>20.07</b>	
5	Kuivahko	Mänty	11	2790	6.36	7.08	5.26	6.75	20.64	Asikkala
6	Kuivahko	Mänty	11	2732	3.5	5.36	4.09	5.03	10.35	Asikkala
7	Kuivahko	Mänty	11	2990	6.18	6.78	5.05	7.12	19.89	Orimattila
8	Kuivahko	Mänty	15	4800	5.41	5.67	4.96	7.19	17.3	Orimattila
<b>Keskiarvo</b>			<b>12</b>	<b>3328</b>	<b>5.36</b>	<b>6.22</b>	<b>4.84</b>	<b>6.52</b>	<b>17.05</b>	
9	Tuore	Kuusi	11	3118	5.41	6.62	4.95	4.12	16.99	Asikkala
10	Tuore	Kuusi	10	2902	2.99	5.05	3.89	4.3	9.05	Padasjoki
11	Tuore	Kuusi	11	3636	5.02	5.86	4.43	5.63	14.8	Padasjoki
12	Tuore	Kuusi	12	4788	3.33	3.94	4.46	5.47	9.88	Orimattila
<b>Keskiarvo</b>			<b>11</b>	<b>3611</b>	<b>4.19</b>	<b>5.37</b>	<b>4.43</b>	<b>4.88</b>	<b>12.68</b>	
<b>Keskiarvot kaikki yhteensä</b>			<b>12</b>	<b>3362</b>	<b>5.16</b>	<b>5.80</b>	<b>4.70</b>	<b>5.70</b>	<b>16.60</b>	

Metsikkökoeala-aineiston valintakriteereinä olivat pääpuulajin ja kasvupaikan lisäksi metsikköiden nuoret iät, runkoluku ja valtapituudet, jolloin taimikonhoito Tapion metsänhoitosuosituksen (Hyvän metsänhoidon... 2001) mukaisesti oli vielä mahdollista toteuttaa. Pääpuulajin runkoluvun tuli olla riittävä, jolloin taimikonhoito voidaan tehdä siten, että lehtipuita ei tarvitse jättää simulointivaiheessa tai niiden määrä jää vähäiseksi. Taimikonhoidossa harvennetaan kummankin pääpuulajin metsikkökoeala runkolukuun 1800 kpl/ha. Metsikkö kasvatetaan sekä taimikonhoidon sisältämässä (baseline) että nuoren metsän harvennuksen sisältämässä (NMH) metsänkasvatuksessa yhden puulajin (pääpuulaji) metsikkönä.

## 5 TULOKSET

### 5.1 Päästövähennykset

Energiapuuharvennuksen sisältämällä metsänkasvatuksella, hiilensidonnan ja energiasubstituution yhteisvaikutuksesta, saatiin keskimäärin 26–90 % lisäys kiertoajan alkuun diskontattuihin päästövähennyksiin verrattuna metsänhoitosuosituksen mukaiseen metsänkasvatukseen. Absoluuttisina lukuina ilmaistuna saavutettiin keskimäärin 24–60 CO<sub>2</sub> tn/ha suuruisia päästövähennyksien lisäyksiä (paljas metsämaa = 0) (kuva 13).

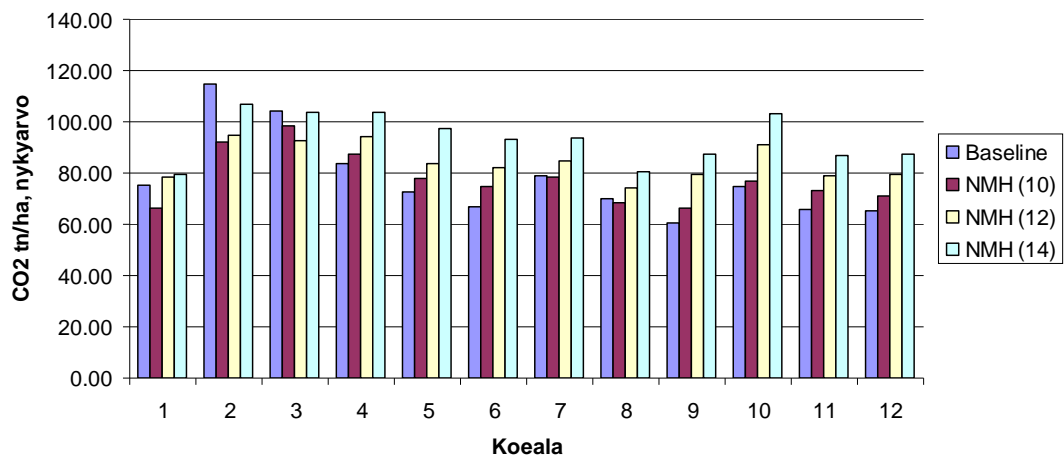


Kuva 13. Koealojen keskimääräiset hiilensidonnalla ja energiasubstituutiolla aikaansaadut diskonttausmenetelmän mukaiset päästövähennykset kiertoajan alussa (3 % korkokanta).

#### 5.1.1 Hiilensidonnan päästövähennykset

Vaihtoehtoinen metsänkasvatus lisäsi hiilensidontaa verrattuna metsänhoitosuosituksen mukaiseen metsänkasvatukseen kaikissa muissa vaihtoehdoissa paitsi männiköi-

den nuoren metsän harvennuksen toteutuessa 10 metrin valtapituusvaiheessa (männiköiden MT ja VT keskiarvo). Vaihtoehtoisen metsänkasvatuksen hiilensidonnan kiertoajan alun lisäys verrattuna metsänhoitosuosituksien mukaiseen metsänkasvatukseen vaihteli pääpuulajista, kasvupaikasta ja energiapuuharvennuksen ajankohdasta riippuen (vaihteluväli keskimäärin -2–23 %) (männiköiden MT ja VT keskiarvo). Metsänhoitosuositukseen perustuva metsänkasvatus satoi vain kahdessa metsikkökoelassa (2 ja 3) enemmän hiiltä kuin eri valtapituusvaiheissa toteutettujen nuoren metsän harvennuksien sisältämät metsänkasvatukset (kuva 12).



Kuva 12. Hiilensidonnän päästövähennykset kiertoajan alkuun diskontattuna (3 % korkokanta).

### 5.1.2 Energiasubstituution päästövähennykset

Energiapuuharvennuksen energiapuulla aikaansaatujen päästövähennyksien vaikutus kiertoajan alun lisäykseen vaihteli koelasta ja energiapuuharvennuksen ajankohdasta riippuen ollen keskimäärin 34–53 % suurempi kuin metsänhoitosuosituksien mukainen metsänkasvatuksen kiertoajan alkuun diskontattu päästövähennys, mikäli vaihtoehtoisen metsänkasvatuksen hiilensidonnalla aikaansaadut päästövähennykset

oletetaan samoiksi kuin metsänhoitosuosituksen mukaisen metsänkasvatuksen päästövähennys (taulukko 6).

Taulukko 6. Energiasubstituution avulla aikaansaadut diskonttausmenetelmän mukaiset päästövähennykset kiertoajan alussa (CO<sub>2</sub> tn/ha) (3 % korkokanta).

	Männiköt, MT		Männiköt, VT		Kuusikot, MT	
Baseline	94.38	0	72.15	0	66.64	0
NMH (10)		32.51		25.67		29.37
NMH (12)		39.43		30.99		34.77
NMH (14)		40.04		31.40		35.59

## 5.2 Yksikkökustannukset

Tuloksissa on ilmoitettu keskimääräisiä arvoja pääpuulaji- ja kasvupaikkaryhmittelyn mukaisesti, ellei toisin mainita. Keskimääräiset tulokset poikkeavat siten hieman koealakohtaisista tuloksista (LIITE 2).

Energiapuuharvennuksen sisältämässä metsänkasvatuksessa koko kiertoajan hiilensidonnalla ja energiasubstituutiolla yhteisvaikutuksena diskonttausmenetelmällä (3 % korkokanta) aikaansaatuisten päästövähennyksien yksikkökustannukset vaihtelivat keskimäärin 11–58 €/CO<sub>2</sub> välillä riippuen koealaryhmästä ja energiapuuharvennuksen ajankohdasta. Kustannustehokkainta oli toteuttaa energiapuuharvennus tuoreen kankaan kuusikoissa, jossa yksikkökustannukset vaihtelivat keskimäärin 11–20 €/CO<sub>2</sub> välillä. Kustannustehottominta oli toteuttaa energiapuuharvennus tuoreen kankaan männiköissä 10 metrin valtapituusvaiheessa (58 €/CO<sub>2</sub>). Mikäli hiilensidontan ja energiasubstituution yhteisvaikutus otetaan huomioon, kustannustehokkainta oli lykätä energiapuuharvennus 14 metrin valtapituusvaiheeseen (vaihtelu keskimäärin 11–25 €/CO<sub>2</sub>), jolloin hiilensidonnalla aikaansaatu kiertoajan alkuun diskontattu päästövähennyksien lisäyksen vaikutus oli suurin.



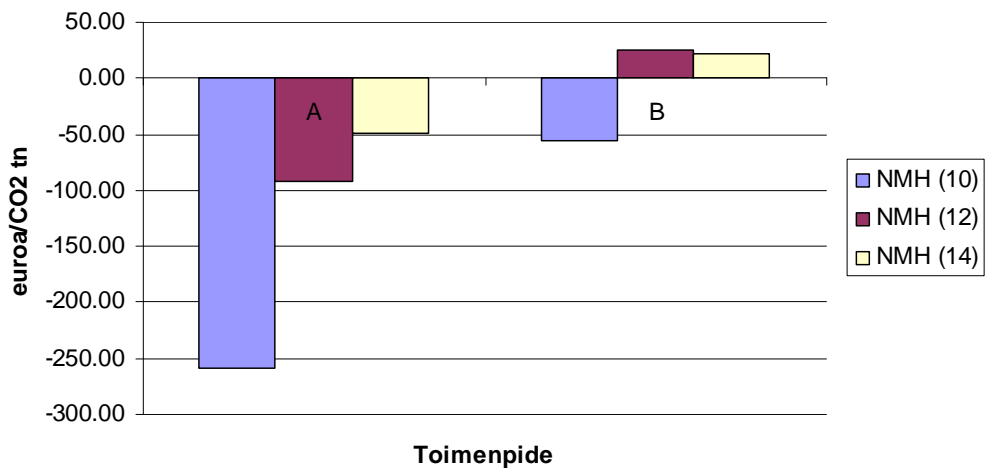
### 5.2.1 Hiilensidonnan kustannukset

Hiilensidonnan yksikkökustannukset olivat positiivisia kaikkien koealojen keskiarvoissa, kun simuloinneissa metsiköt kasvatettiin ilman taimikonhoitoa 14 metrin valtapituusvaiheeseen ja niihin tehtiin ainespuuensiharvennus (taulukko 7). Kuivahkon kankaan männiköiden ja tuoreen kankaan kuusikoiden koealojen keskiarvoissa ainespuuensiharvennuksen toteuttaminen 12 metrin valtapituusvaiheessa tuotti myös positiiviset yksikkökustannukset hiilensidonnalle. Energiapuuharvennuksen sisältämän metsänkasvatuksen hiilensidonnan yksikkökustannukset olivat kaikkien koealojen keskiarvojen osalta negatiivisia, sillä energiapuukorjuun kustannukset olivat korkeat, eikä energiapuulle puutavaralajina oletettu mitään arvoa.

Taulukko 7. Hiilensidonnan yksikkökustannukset (€/CO<sub>2</sub> tn) vaihtoehdoiselle metsänkasvatukselle 3% korkokannalla. A=NMH energiapuuksi. B=NMH ainespuuksi.

	A	B
Männiköt, MT		
NMH (10)	ei lisäystä	ei lisäystä
NMH (12)	ei lisäystä	ei lisäystä
NMH (14)	-303.69	82.88
Männiköt, VT		
NMH (10)	-257.91	-55.38
NMH (12)	-91.69	25.45
NMH (14)	-48.85	22.52
Kuusikot, MT		
NMH (10)	-153.59	-65.04
NMH (12)	-57.45	7.80
NMH (14)	-38.12	18.94

Kuivahkon kankaan männiköiden hiilensidonnan positiivisia yksikkökustannuksen tuloksia voidaan pitää luotettavampina kuin muiden kasvupaikkojen koealaryhmien, sillä kuivahkon kankaan koealoilla ei ollut koivun lisäksi muita lehtipuita, jotka muuten laskettiin koivuainespuuksi (kuva 9).



Kuva 9. Hiilensidonnän yksikkökustannukset (€/CO<sub>2</sub> tn) vaihtoehtoiselle metsänkasvatukselle 3% korkokannalla kuivahkon kankaan männikkökoalojen keskiarvojen perusteella.

### 5.2.2 Energiasubstituution kustannukset

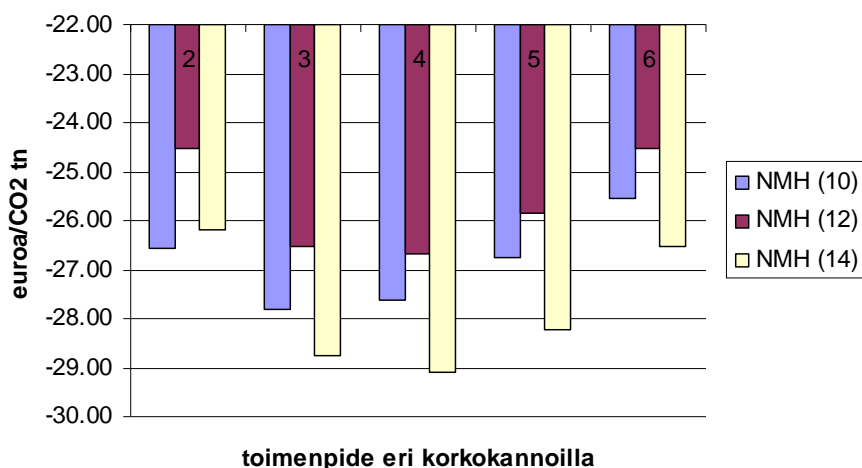
Energiapuuharvennuksen sisältämän metsänkasvatuksen energiasubstituution yksikkökustannukset vaihtelivat koelasta, energiapuuharvennuksen ajankohdasta ja korkokannasta riippuen ja olivat keskimäärin 28 €/CO<sub>2</sub> tn (3 % korkokanta).

Korkokannan merkitys energiasubstituution yksikkökustannuksiin oli tulosten mukaan kahtalainen. Käytettäessä yli 4 % korkokantaa yksikkökustannukset alkavat pienentyä, mutta myös pienemmillä korkokannoilla (< 4 %) päästään pienempiin yksikkökustannuksiin. Kuusikkokoaloissa korkokannan muutosilmiö korostuu siten, että alhaisemmillä korkokannoilla päästään pienempiin yksikkökustannuksiin ja korkeammilla korkokannoilla yksikkökustannukset alkavat pienentyä vasta yli 4 % korkokannalla (paitsi NMH14), kun vastaavilla männikkökoaloilla yksikkökustannukset alkavat pienentyä yli 3 % korkokannalla (taulukko 8). Energiasubstituution yk-

sikkökustannukset olivat korkokannasta riippumatta alhaisimmat 12 metrin valtapi-tuusvaiheessa toteutetussa energiapuuharvennuksessa (kuva 10).

Taulukko 8. Energiasubstituution yksikkökustannukset (€/CO<sub>2</sub> tn) 2–6 % korkokannoilla.

	2 %	3 %	4 %	5 %	6 %
Männiköt, MT					
NMH (10)	-28.74	-28.44	-27.81	-26.98	-26.10
NMH (12)	-26.85	-27.11	-26.63	-25.74	-24.69
NMH (14)	-30.40	-30.36	-29.51	-28.21	-26.69
Männiköt, VT					
NMH (10)	-26.09	-27.66	-27.23	-26.02	-24.49
NMH (12)	-24.54	-26.48	-26.10	-24.67	-22.72
NMH (14)	-26.64	-29.58	-29.45	-27.74	-25.09
Kuusikot, MT					
NMH (10)	-24.81	-27.29	-27.80	-27.23	-26.00
NMH (12)	-22.16	-25.94	-27.30	-27.19	-26.15
NMH (14)	-21.50	-26.28	-28.37	-28.69	-27.78



Kuva 10. Energiasubstituution yksikkökustannukset (€/CO<sub>2</sub> tn) vaihtoehtoiselle metsänkasvatukselle 2–6 % korkokannalla kaikkien koalojen keskiarvojen perusteella.

### 5.3 Kannattavuus

Yksikkökustannukset antoivat suuntaa siitä, miten paljon metsänomistajan tuloja tulisi kompensoida, jos tavoitteena on metsänkasvattamisen kannattavuuden säilyttäminen ennallaan. Metsänomistajalle ei olisi ollut kompensatiosta huolimatta tar-

jolla erityistä taloudellista kannustinta muuttaa metsänhoitopäätöksiä lainkaan. Hiilensidonnan kannattavuuden laskennassa tilannetta viedään pidemmälle olettaen, että hiilensidonnasta maksettaisiin metsänomistajalle kompensatiota ja energiasubstitutiion kannattavuuden laskennassa, että energiapuulla olisi markkina-arvo korvaavuuden perusteella. Kannattavuutta tarkastellaan 3 % ja 4 % korkokannoilla ja energiapuuharvennuksessa tarkastellaan myös Kemera-tukien vaikutusta kannattavuuteen.

### **5.3.1 Hiilensidonnan kannattavuus**

Hiilensidonnan kannattavuustarkastelussa metsään sitoutuvalla hiilelle oletetaan markkinahinnaksi 10 €/CO<sub>2</sub> tn, joka yhdessä puuntuotannon kanssa vaikuttaa simuloitijaksottain todettujen hiilivarannon muutosten mukaan taloudelliseen tulokseen.

Hiilensidonnan lisäyksellä aikaansaadun kannattavuuden parantuminen verrattaessa nuoren metsän harvennuksen hiilensidonnan kannattavuutta eri valtapituusvaiheissa metsänhoitosuosituksen mukaiseen metsänkasvatuksen hiilensidonnan kannattavuuteen vaihteli korkokannasta (3–4 %), harvennusajankohdasta ja koealaryhmästä riippuen (vaihteluväli keskimäärin -9–36 %). (Taulukot 9a ja b)

Taulukot 9a ja b. Koealojen keskiarvojen nettohyötyarvot, €/ha (A=NMH energia-puiksi) (B=NHM ainespuuksi). Hiilensidonta = Hiilensidontan nettohyötyarvo hiili-dioksidin hintatasolla 10 €/CO<sub>2</sub> tn. Korkokanta a:3 % ja b:4 %.

a: 3 %	A	B	Hiilensidonta
	0 €/CO <sub>2</sub> tn	0 €/CO <sub>2</sub> tn	10 €/CO <sub>2</sub> tn
	€/ha	€/ha	€/ha
<b>Männiköt, MT</b>			
Baseline	1897	1897	944
NMH (10)	972	1826	862
NMH (12)	828	2178	900
NMH (14)	681	2229	984
<b>Männiköt, VT</b>			
Baseline	970	970	721
NMH (10)	260	852	749
NMH (12)	150	1146	811
NMH (14)	42	1301	912
<b>Kuusikot, MT</b>			
Baseline	1673	1673	667
NMH (10)	871	1446	719
NMH (12)	771	1755	823
NMH (14)	737	1985	912

b: 4 %	A	B	Hiilensidonta
	0 €/CO <sub>2</sub> tn	0 €/CO <sub>2</sub> tn	10 €/CO <sub>2</sub> tn
	€/ha	€/ha	€/ha
<b>Männiköt, MT</b>			
Baseline	754	754	826
NMH (10)	17	716	745
NMH (12)	-61	990	785
NMH (14)	-120	1025	862
<b>Männiköt, VT</b>			
Baseline	189	189	625
NMH (10)	-372	105	636
NMH (12)	-419	335	690
NMH (14)	-456	429	776
<b>Kuusikot, MT</b>			
Baseline	722	722	613
NMH (10)	65	524	650
NMH (12)	-4	749	742
NMH (14)	-16	896	821

### 5.3.2 Energiasubstituution kannattavuus

Energiasubstituution kannattavuutta tarkastellessa energiapuuhun sitoutuvalle hiilelle määritetään markkinahinta fossiilisen polttoaineen kivihiilen korvaavuuden perusteella, 10€, 20€ tai 30€. Se vaikuttaa energiapuukertymän lisäyksen mukaan taloudelliseen tulokseen yhdessä puuntuotannon kanssa.

Energiapuuharvennuksen sisältämä metsänkasvatuksen nettonykyarvo oli korkein verrattuna muihin valtapituusvaiheisiin, kun energiapuuharvennus toteutettiin 12 metrin valtapituusvaiheessa korkeammilla hiilidioksidin hintatasoilla (20 ja/tai 30 €/CO<sub>2</sub>). Alhaisilla hiilidioksidin hintatasoilla (0 ja/tai 10 €/CO<sub>2</sub>) nettonykyarvo oli korkein, kun energiapuuharvennus toteutettiin 10 metrin valtapituusvaiheessa verrattuna muihin valtapituusvaiheisiin. Energiapuuharvennuksen sisältämä metsänkasvatus oli kannattavampaa vasta hiilidioksidin hintatasolla 30 €/CO<sub>2</sub> kuin metsänhoitosuosituksiin perustuva metsänkasvatus, kun Kemera-tukia ei ollut otettu huomioon (taulukot 10a ja b).

Taulukot 10a ja b. Koealojen keskiarvojen nettonykyarvot koko kiertoajalta (€/ha) energiasubstituutio eri hiilidioksiditonnin hintatasoilla (0€, 10€, 20€ ja 30€) huomiioon ottaen, korkokannoilla 3 % ja 4 %. Energiapuun oletetaan korvaavan kivihiiiltä.

a: 3 %	0 €/CO <sub>2</sub> tn €/ha	10 €/CO <sub>2</sub> tn €/ha	20 €/CO <sub>2</sub> tn €/ha	30 €/CO <sub>2</sub> tn €/ha
Männiköt, MT				
Baseline	1897	1897	1897	1897
NMH (10)	972	1300	1629	1957
NMH (12)	828	1224	1620	2017
NMH (14)	681	1081	1482	1882
Männiköt, VT				
Baseline	970	970	970	970
NMH (10)	260	517	773	1029
NMH (12)	150	462	774	1086
NMH (14)	42	360	678	997
Kuusikot, MT				
Baseline	1673	1673	1673	1673
NMH (10)	871	1160	1450	1739
NMH (12)	771	1118	1465	1812
NMH (14)	737	1093	1449	1805
b: 4 %				
	0 €/CO <sub>2</sub> tn €/ha	10 €/CO <sub>2</sub> tn €/ha	20 €/CO <sub>2</sub> tn €/ha	30 €/CO <sub>2</sub> tn €/ha
Männiköt, MT				
Baseline	754	754	754	754
NMH (10)	17	286	554	823
NMH (12)	-61	247	555	864
NMH (14)	-120	176	473	769
Männiköt, VT				
Baseline	189	189	189	189
NMH (10)	-372	-167	39	245
NMH (12)	-419	-184	52	287
NMH (14)	-456	-233	-10	214
Kuusikot, MT				
Baseline	722	722	722	722
NMH (10)	65	297	528	760
NMH (12)	-4	261	526	792
NMH (14)	-16	244	504	765

Hiilidioksidin alhaisilla hintatasoilla (0 ja 10 €/CO<sub>2</sub>) energiapuuharvennuksen toteuttaminen osana metsänkasvatusta oli kannattavinta 10 metrin valtapituusvaiheessa, mutta jäi huonommaksi kuin metsänhoitosuosituksiin perustuvan metsänkasvatuksen kannattavuus (baseline), vaikka Kemera-tuet otettiin huomioon. Korkeammilla hiilidioksidin hintatasoilla (20 ja 30 €/CO<sub>2</sub>) energiapuuharvennuksen toteuttaminen oli kannattavinta 12 metrin valtapituusvaiheissa, mikäli Kemera-tuet otettiin huomioon

(taulukko 11). Energiapuuharvennuksen sisältämä metsänkasvatus oli kannattavampaa kuin metsänhoitosuositukseen perustuva metsänkasvatus, mikäli hiilidioksidin hintataso oli keskimäärin yli 15 €/CO<sub>2</sub> tn ja kun energiapuuharvennuksen saatavat Kemera-tuet (ei haketustukea) otettiin huomioon.

Taulukko 11. Koealojen keskiarvojen nettohyödykkeet koko kiertokaudelta (€/ha), energiasubstituutio hiilidioksidin eri hintatasoilla (0€, 10€, 20€ ja 30€) ja energiapuuharvennuksen Kemera-tukien nettohyödykkeellä (ei haketustukea) huomioon ottaen. Korokanta 3 %. Energiapuun oletetaan korvaavan kivihiihtä.

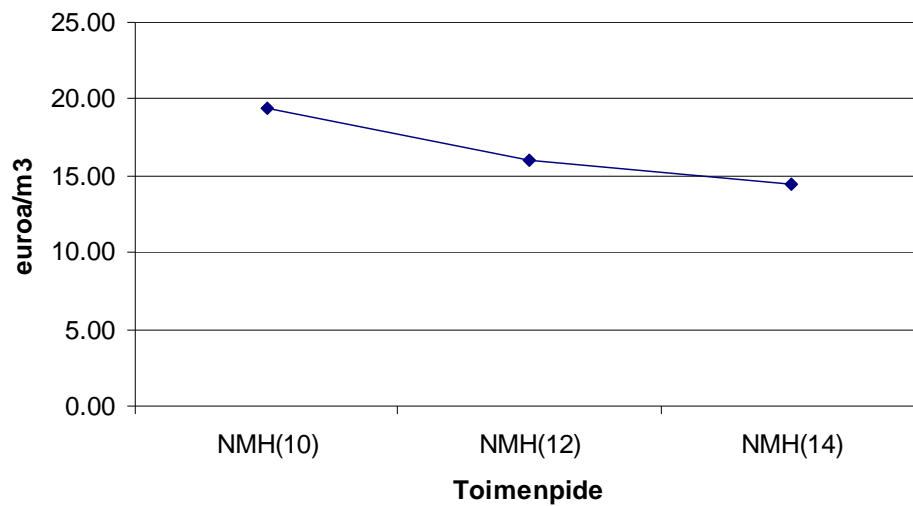
	0 €/CO <sub>2</sub> tn €/ha	10 €/CO <sub>2</sub> tn €/ha	20 €/CO <sub>2</sub> tn €/ha	30 €/CO <sub>2</sub> tn €/ha	Kemera-tuet €/ha
Männiköt, MT					
Baseline	1897	1897	1897	1897	
NMH (10)	1414	1742	2071	2399	442
NMH (12)	1314	1710	2106	2503	486
NMH (14)	1155	1555	1956	2356	474
Männiköt, VT					
Baseline	970	970	970	970	
NMH (10)	629	886	1142	1398	369
NMH (12)	548	860	1172	1484	398
NMH (14)	423	741	1059	1378	381
Kuusikot, MT					
Baseline	1673	1673	1673	1673	
NMH (10)	1270	1559	1849	2138	399
NMH (12)	1206	1553	1900	2247	435
NMH (14)	1166	1522	1878	2234	429

### 5.3.3 Energia- ja ainespuuharvennuksen nettotulos

Energiapuuharvennuksen nettotulos ilmoittaa metsänomistajalle koituvan tuloksen, kun energiapuusta saatavista tuloista ja Kemera-tuista vähennetään korjuukustannukset. Koealojen keskimääräiset korjuukustannukset ilmoittavat, millä energiapuun tienvarsihinnalla energiapuuharvennuksen nettotulos kääntyy positiiviseksi. Nuoren metsän energiapuukorjuu on sitä kalliimpaa, mitä aikaisemmin se toteutetaan. Kustannukset tippuvat suhteessa enemmän siirrettäessä nuoren metsän harvennuksen korjuuta 10 metrin valtapituusvaiheesta 12 metrin valtapituusvaiheeseen kuin 12 metristä 14 metriin (kuva 11). Kaikkien koealojen keskiarvojen eri aikoina toteutettu-



jen energiapuuharvennuksien korjuukustannukset olivat keskimäärin 16.9 €/m<sup>3</sup> (vaihteluväli keskimäärin 13.9–20.7 €/m<sup>3</sup>). Energiapuuharvennuksen korjuukustannusten suuruus riippuu etenkin energiapuun keskikoosta ja hakkuukertymästä.



Kuva 11. Keskimääräiset korjuukustannukset eri valtapitusvaiheissa toteutetuille energiapuuharvennuksille

Ilman Kemera-tukia energiapuuharvennuksen nettotulos kääntyi positiiviseksi hiilidioksidin korkeammilla hintatasoilla (20 ja/tai 30 €/CO<sub>2</sub>) koealaryhmästä ja energiapuuharvennuksen ajankohdasta riippuen (taulukko 12). Energiapuuharvennuksen nettotulos oli positiivinen kaikkien koealojen keskiarvojen osalta, mikäli Kemera-tuet otettiin huomioon (taulukko 13).

Taulukko 12. Energiapuuharvennuksen nettotulos (€/ha ja €/m<sup>3</sup>) hiilidioksidin eri hintatasoilla energiapuun korvatussa kivihiiltä (10 €/CO<sub>2</sub> = 7.54 €/m<sup>3</sup>, ”tienvarsihinta”). Kemera-tukia ei ole otettu huomioon.

	10 €/CO <sub>2</sub>		20 €/CO <sub>2</sub>		30 €/CO <sub>2</sub>		Kemera-tuet, €/m <sup>3</sup>
	€/ha	€/m <sup>3</sup>	€/ha	€/m <sup>3</sup>	€/ha	€/m <sup>3</sup>	
Männiköt MT							
NMH (10)	-833.23	-10.36	-224.08	-2.82	385.08	4.72	14.04
NMH (12)	-859.44	-7.61	-2.93	-0.07	853.59	7.47	13.27
NMH (14)	-846.04	-6.39	162.33	1.15	1170.70	8.69	12.99
Männiköt VT							
NMH (10)	-817.10	-13.16	-314.35	-5.62	188.39	1.92	14.60
NMH (12)	-845.26	-9.11	-104.21	-1.57	636.84	5.97	13.56
NMH (14)	-832.99	-7.01	111.24	0.53	1055.47	8.07	13.09
Kuusikot MT							
NMH (10)	-869.95	-12.04	-298.74	-4.50	272.48	3.04	14.21
NMH (12)	-883.22	-8.79	-93.54	-1.25	696.13	6.29	13.43
NMH (14)	-871.81	-7.31	58.44	0.23	988.69	7.77	13.12

Taulukko 13. Energiapuuharvennuksen nettotulos (€/ha ja €/m<sup>3</sup>) hiilidioksidin eri hintatasoilla energiapuun korvatussa kivihiiltä (10 €/CO<sub>2</sub> = 7.54 €/m<sup>3</sup>, ”tienvarsihinta”). Kemera-tuet otettu huomioon, myös toteutustuet (ei haketustukia).

	10 €/CO <sub>2</sub>		20 €/CO <sub>2</sub>		30 €/CO <sub>2</sub>		Kemera-tuet, €/m <sup>3</sup>
	€/ha	€/m <sup>3</sup>	€/ha	€/m <sup>3</sup>	€/ha	€/m <sup>3</sup>	
Männiköt MT							
NMH (10)	300.92	3.68	910.08	11.22	1519.23	18.76	14.04
NMH (12)	648.06	5.66	1504.58	13.20	2361.09	20.74	13.27
NMH (14)	890.67	6.60	1899.04	14.14	2907.41	21.68	12.99
Männiköt VT							
NMH (10)	156.44	1.44	659.18	8.98	1161.92	16.52	14.60
NMH (12)	487.96	4.45	1229.01	11.99	1970.06	19.53	13.56
NMH (14)	806.91	6.08	1751.15	13.62	2695.38	21.16	13.09
Kuusikot MT							
NMH (10)	206.93	2.18	778.15	9.72	1349.37	17.26	14.21
NMH (12)	523.40	4.64	1313.07	12.18	2102.75	19.72	13.43
NMH (14)	746.99	5.81	1677.24	13.35	2607.48	20.89	13.12

Ainespuuharvennuksen nettotuloksen suuruus riippui siitä, miten tutkimuksen oletukset oli asetettu. Tutkimuksessa oletettiin, että kaikki muut lehtipuut lasketaan koi-  
vuainespuuksi. Etenkin kuusikkokoealoissa muita lehtipuita oli runsaasti, joten ainespuuharvennuksen nettotulos ilman laskennallista korjausta olisi yliarvio. Ainespuuharvennukselle ei myöskään asetettu enakkoraivauksen kustannusta, joka todellisuudessa vasta mahdollistaa ainespuuharvennuksen. Nuoren metsän kunnostuksen pinta-alaperusteisia Kemera-tukia ei otettu huomioon. (taulukko 14)

Taulukko 14. Ainespuuensiharvennuksen nettotulos (€/ha).

1. Nettotulos = Kaikki lehtipuut koivuainespun mukaisesti.
2. Nettotulos = Muiden lehtipuiden osalta koivukantohinta vähennettynä.
3. Nettotulos = 2. Nettotulos, josta on vähennetty ennakkoraivauksen keskikustannus 202 €/ha (Metsäteho Oy) (Kärhä 2005). Kemera-tukia ei ole otettu huomioon.

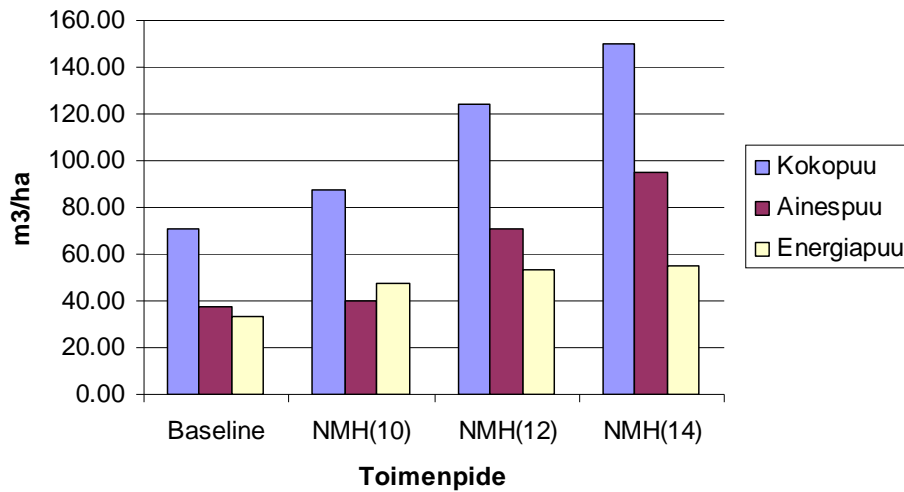
	1. Nettotulos €/ha	2. Nettotulos €/ha	3. Nettotulos €/ha	Kemera-tuet €/ha
<b>Männiköt MT</b>				
NMH (10)	142.50	117.02	-84.98	252.6
NMH (12)	1195.98	1156.04	954.04	252.6
NMH (14)	2052.93	1980.97	1778.97	252.6
<b>Männiköt VT</b>				
NMH (10)	-171.43	-171.43	-373.43	252.6
NMH (12)	755.55	755.55	553.55	252.6
NMH (14)	1921.85	1921.85	1719.85	252.6
<b>Kuusikot MT</b>				
NMH (10)	-303.78	-505.74	-707.74	252.6
NMH (12)	561.95	239.18	37.18	252.6
NMH (14)	1449.80	961.34	759.34	252.6

## 5.4 Kertymät

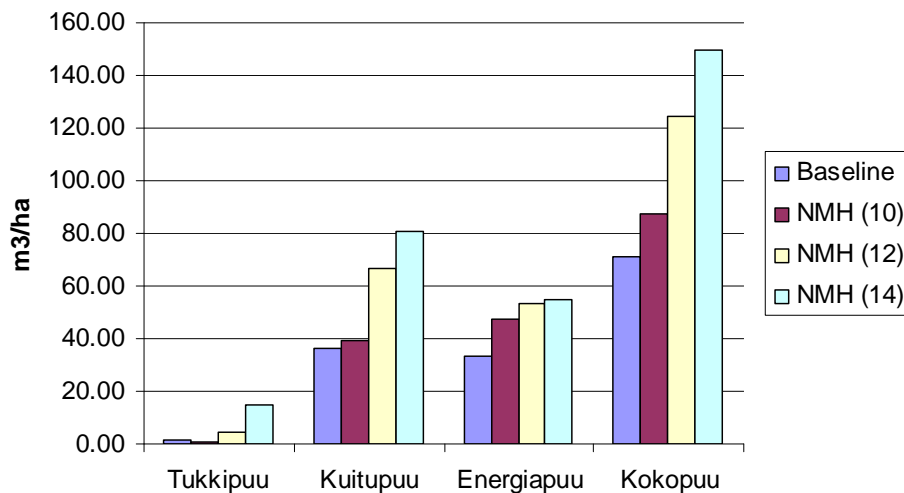
### 5.4.1 Nuoren metsän kertymäpotentiaali

Energiapuuharvennus toteutettiin kokopuuhakkuuna. Ainespuun suuren määrän vuoksi energiapuukertymän oletettiin olevan 85 % koko kertymäpotentiaalista. Kokopuun kertymä vaihteli etenkin metsikkökoealojen lähtötiheydestä ja harvennuksen ajankohdasta riippuen.

Ainespuun osuus nuoren metsän harvennuksien kokopuun kertymäpotentiaalista oli korkea, keskimäärin 46–63 % (kuva 14). Nuoren metsän harvennuksen toteutuessa 14 metrin valtapituusvaiheessa tukkipuun kertymä oli keskimäärin 10 % koko kertymäpotentiaalista (kuva 15).



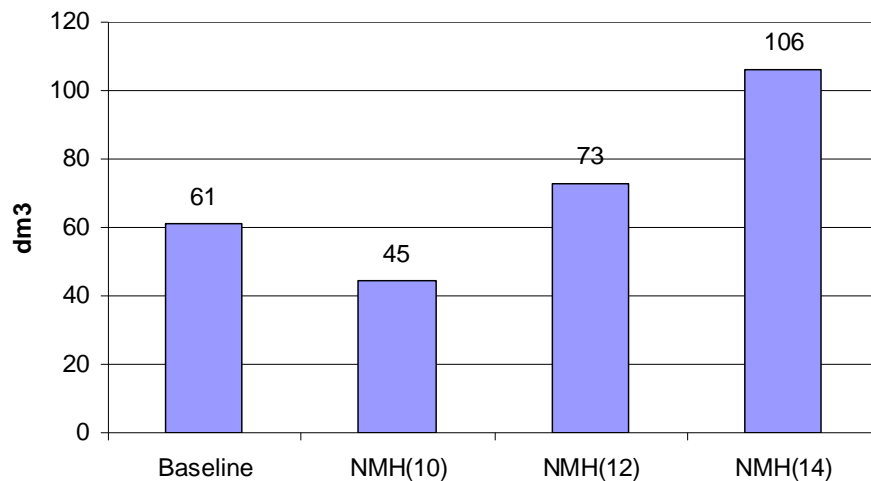
Kuva 14. Kaikkien koalojen keskiarvojen kertymäpotentiaali (100%). Ainespuu (= kuitu- ja tukkipuu), energiapuu (= ainespuuksi kelpaamaton maanpäällinen biomass) ja kokopuu (= ainespuu + energiapuu).



Kuva 15. Kaikkien koalojen keskiarvojen kertymäpotentiaali (100 %) nuoren metsän harvennuksissa.

Metsänhoitosuosituksen mukaiselle metsänkasvatukselle vaihtoehtoisen nuoren metsän harvennuksen sisältämän metsänkasvatuksen ensiharvennuksen kokopuun keski-  
koko vaihteli etenkin koalan lähtötilanteen runkoluvusta, harvennuksen puulajiker-  
tymästä ja ajankohdasta riippuen. Se oli keskimäärin  $74 \text{ dm}^3$ , joka on lähes sama

kuin 12 metrin valtapituusvaiheen keskimääräinen kokopuun keskikoko 73 dm<sup>3</sup> (kuva 16).



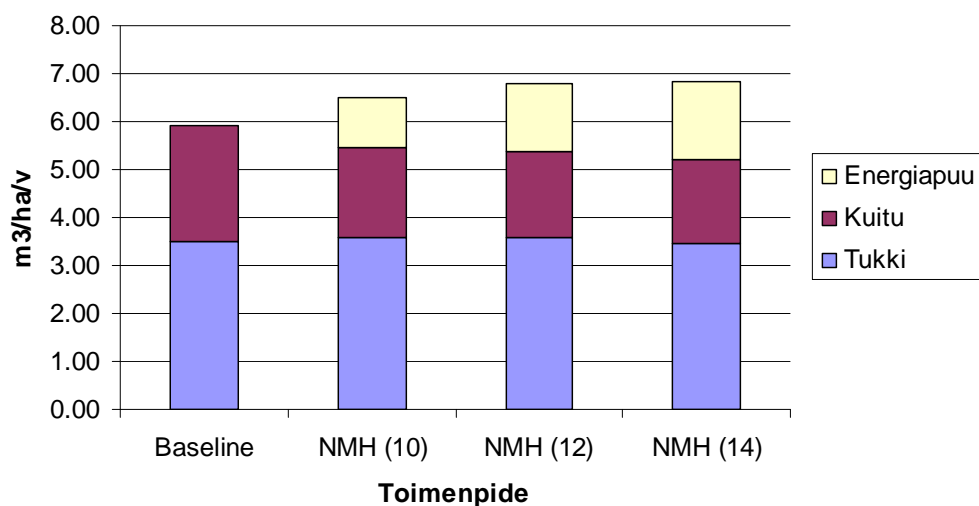
Kuva 16. Kokopuun keskikoko nuoren metsän harvennuksissa.

#### 5.4.2 Puutavaralajikertymät kiertoajalla

Eri metsänkasvatusvaihtoehtojen puutavaralajikertymiä voidaan vertailla keskenään, kun kertymät jaetaan kiertoajalla. Metsikkökoealojen keskimääräisistä vuosittaisista puutavaralajikertymistä voidaan havaita, että energiapuuharvennuksen sisältämän metsänkasvatuksen tukkipuun osuus lisääntyi hieman kaikissa muissa koealojen keskiarvoissa, paitsi silloin kun energiapuuharvennus tehtiin 14 metrin valtapituusvaiheessa männikkökoealoissa (taulukko 15). Tällöin tukkipuuta meni energiapuuharvennuksessa myös energiapuuksi. Kuitupuun osuuden romahtamista selittää voimakas energiapuuharvennus, jossa kuitupuuta meni paljon energiapuuksi (kuva 17).

Taulukko 15. Koealojen kiertoajan keskimääräiset puutavaralajikertymät (kertymä/kiertoaika).

	Ensiharvennusaika	Kiertoaika	Tukki, m <sup>3</sup> /v	Kuitu, m <sup>3</sup> /v	Energiapuu, m <sup>3</sup> /v
<b>Männiköt, MT</b>					
Baseline	31.00	73.00	3.95	2.86	0.00
NMH (10)	21.25	72.50	4.13	2.03	1.11
NMH (12)	26.25	74.75	4.08	1.93	1.52
NMH (14)	31.25	77.00	3.74	2.03	1.74
<b>Männiköt, VT</b>					
Baseline	30.25	77.25	2.84	2.12	0.00
NMH (10)	22.75	82.75	2.89	1.70	0.82
NMH (12)	29.50	86.75	2.85	1.65	1.15
NMH (14)	37.25	92.25	2.77	1.56	1.37
<b>Kuusikot, MT</b>					
Baseline	25.50	57.00	3.66	2.36	0.00
NMH (10)	22.50	61.50	3.75	1.87	1.24
NMH (12)	27.75	64.75	3.76	1.80	1.62
NMH (14)	32.50	67.00	3.83	1.65	1.85



Kuva 17. Kaikkien koealojen kiertoajan keskimääräiset vuosittaiset puutavaralajikertymät.

## 6 TULOSTEN TARKASTELU

### 6.1 Päästövähennykset

Energiapuuharvennuksen sisältämällä metsänkasvatuksella hiilensidonnan ja energiasubstituution yhteisvaikutuksesta koko kiertoajalta saatiin keskimäärin 26–90 % lisäys hiilivaraston muutoksiin perustuviin kiertoajan alkuun diskontattuihin päästövähennyksiin, verrattuna metsänhoitosuositusten mukaiseen metsänkasvatukseen. Absoluuttisina lukuina ilmaistuna saavutettiin keskimäärin 24–60 CO<sub>2</sub> tn/ha suuruisia päästövähennyksiä. Energiasubstituutio oli tehokkaampi keino lisätä päästövähennyksiä kuin hiilensidonta nuoren metsän tiheämmän metsänkasvatuksen avulla.

Hiilensidontaa voidaan kasvattaa vain rajallinen määrä ja myöhemmin hiilinielut saattavat jopa muuttua hiilen lähteiksi (Pingoud 2006). Substituutiovaikutusta on mahdollista hyödyntää kestävästi ja saada aikaan pysyvämpi vuosittainen vähennys fossiilisen hiilen päästöihin ilmakehään. Substituutiovaikutusten suosiminen saattaa kuitenkin yksipuolistaa ilmastovaikutusta energia- ja materiaalisubstituuttien käyttöön, jolloin metsien pidemmän aikavälin kasvun hiilinielupotentiaali voi osin jäädä hyödyntämättä (Mononen 2006).

Nuoren metsän tiheämmällä kasvatuksella oli merkitystä ilmastonmuutoksen hillinnässä hiilensidonnan lisääntymisellä. Metsänhoitosuosituksille vaihtoehtoisella metsänkasvatuksella saatiin hiilensidonnalla aikaan lisäystä kiertoajan alkuun diskontattuihin päästövähennyksiin koelasta ja nuoren metsän harvennuksen ajankohdasta

riippuen keskimäärin -2–23 % (männiköiden MT ja VT keskiarvot yhdistetty). Hiilinieluihin liittyy suuria epävarmuustekijöitä, joten periaatteena on hyväksilukea vain ihmistoimin aikaansaadut hiilinielut (Lapveteläinen ja Sievänen 2003). Kioton pöytäkirjan artikkelit 3.3 ja 3.4 antavat mahdollisuuden tiettyjen metsänhoitotoimenpiteiden avulla aikaansaatavien nielujen lisäyksen hyvittämisen. Nieluhyvitys mahdollistaisi päästöjen kompensoimisen.

Energiasubstituution avulla saatiin koealasta ja energiapuuharvennuksen ajankohdasta riippuen keskimäärin 34–53 % suurempi lisäys kiertoajan alkuun diskontattuihin (3 % korkokanta) päästövähennyksiin verrattuna metsänhoitosuosituksen mukaiseen metsänkasvatuksen kiertoajan alkuun diskontattuun päästövähennykseen, mikäli vaihtoehtoisen metsänkasvatuksen hiilensidonnalla aikaansaadut päästövähennykset oletettiin samoiksi kuin metsänhoitosuosituksen mukaisen metsänkasvatuksen päästövähennykset.

## **6.2 Yksikkökustannukset**

### **6.2.1 Hiilensidonnan kustannukset**

Hiilensidonnan yksikkökustannukset ilmoittavat millaisella vähimmäiskustannuksella tulisi metsänomistajalle hiilensidonnan lisäyksestä koituvia tulonmenetyksiä kompensoida. Positiiviset yksikkökustannukset merkitsevät ns. winwin-tulosta, jossa sekä metsänkasvatuksen nettonykyarvo että hiilensidonta lisääntyvät. Tällainen tulos saatiin kaikkien koealojen keskiarvoissa kasvattamalla metsikkö ilman taimikonhoitoa 14 metrin valtapituusvaiheeseen ja tekemällä ainespuuensiharvennus (ks. taulukko



7). Kuivahkon kankaan männiköiden ja tuoreen kankaan kuusikoiden koealojen keskiarvoissa ainespuuensiharvennuksen toteuttaminen 12 metrin valtapituusvaiheessa tuotti myös winwin-tuloksen. Kuivahkon kankaan männiköiden tuloksia voidaan pitää luotettavampina kuin muiden koealaryhmien, joissa esiintyvien muiden puulajien kertymät laskettiin koivuainespuuksi, sillä kuivahkon kankaan koealoilla ei esiintynyt muita lehtipuita koivun lisäksi. Nykyisten metsänhoitosuositusten mukaisesti taimikonhoito tehdään liian voimakkaana, sillä puuston tiheämpi kasvatus tuottaa suuremman tuloksen nettohyötyarvona.

Metsiä on perinteisesti kasvatettu pitkälti Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion laatimien metsänhoitosuositusten (Hyvän metsänhoidon... 2001) mukaisesti, joten yleisiä harvennusmalleja muuttamalla voitaisiin luoda yksinkertainen ohjauskeino metsien hiilivarastojen lisäämiseksi (Valsta ym. 2006). Metsien kasvattaminen nykyistä tiheämpänä voisi olla sekä taloudellisesti että ilmastollisesti mielekkäämpi vaihtoehto hiilensidonnän lisäämiseksi molemmilla puulajeilla. Harvennusmallien nosto tasaisissa ja nuorella iällä tiheissä metsissä olisi tehokas ja edullinen ohjauskeino. Tällöin voidaan päästä lähemmäksi metsänomistajalle optimaalista metsänkasvatusta, jolloin parhaimmillaan sekä kannattavuus paranee että hiilensidonta lisääntyy.

### **6.2.2 Energiasubstituution kustannukset**

Energiapuuharvennuksen sisältämän metsänkasvatuksen energiasubstituution yksikkökustannukset vaihtelivat koealasta, energiapuuharvennuksen ajankohdasta ja korkokannasta riippuen, ollen keskimäärin 28 €/CO<sub>2</sub> tn (3 % korkokanta). Energiapuun

tienvarsihintana ilmaistuna tämä tarkoittaisi keskimäärin 21 €/m<sup>3</sup>. Metsänomistajan olisi siis tämän tutkimuksen tulosten mukaan kannattavaa ottaa energiapuuharvennus osaksi metsänkasvatusta, mikäli energiapuun tienvarsihinta olisi keskimäärin suurempi kuin 21 €/m<sup>3</sup>.

Mikäli energiapuu oletetaan kuljetettavan kokopuuna käyttöpaikalle (40 km kaukokuljetusmatka) ja haketettavan käyttöpaikalla, on kustannus keskimäärin 10.1 €/m<sup>3</sup> (Laitila 2004). Polttovalmiin metsähakkeen käyttöpaikkahinnan tulisi näin ollen olla yli 30 €/m<sup>3</sup> (n.15 €/MWh), jotta metsänomistajan kannattaisi ottaa tämän tutkimuksen mukainen energiapuuharvennus osaksi metsänkasvatusta, mikäli energiapuuharvennukseen ei olisi saatavissa minkäänlaisia tukia. Polttohakkeen käyttöpaikkahinta oli vuonna 2005 keskimäärin 10.6 €/MWh, kun kivihiilestä maksettiin sisämaassa keskimäärin 14.2 €/MWh (Tilastokeskus).

Korkokannan merkitys energiasubstituution yksikkökustannuksiin on kahtalainen. Käytettäessä yli 4 % korkokantaa yksikkökustannukset alkavat pienentyä, mutta myös alle 4 % korkokannoilla päästään pienempiin yksikkökustannuksiin. Syynä on se, että myös energiapuun päästövähennys diskontataan kiertoajan alkuun, jolloin pienellä korkokannalla energiapuun päästövähennys säilyy suhteellisesti suurempana kuin kustannusten lisäyksen koko kiertoajalta diskontattu nettonykyarvo.

Energiasubstituution yksikkökustannukset olivat korkokannasta riippumatta alhaimmat 12 metrin valtapituusvaiheessa toteutetussa energiapuuharvennuksessa. Energiapuuharvennuksen toteuttaminen 12 metrin valtapituusvaiheessa on siis kus-

tannustehokkaampaa verrattuna muihin valtapituusvaiheisiin, mikäli vain energiasubstituution aikaansaamat päästövähennykset otetaan huomioon.

### **6.2.3 Energiasubstituution ja hiilensidonnan yhteisvaikutus**

Mikäli hiilensidonnan ja energiasubstituution yhteisvaikutus otetaan huomioon, kustannustehokkainta on lykätä energiapuuharvennus 14 metrin valtapituusvaiheeseen (vaihtelu keskimäärin 11–25 €/CO<sub>2</sub> tn), jolloin hiilensidonnalla aikaansaatua päästövähennyksien lisäyksen vaikutus on suurin.

Kustannustehottominta on toteuttaa energiapuuharvennus tuoreen kankaan männiköissä 10 metrin valtapituusvaiheessa (58 €/CO<sub>2</sub> tn). Tällöin sekä hiilensidonnan että energiasubstituution päästövähennykset jäivät verrattain pieniksi ja energiapuukorjuun kustannukset vastaavasti suuriksi.

## **6.3 Kannattavuus**

### **6.3.1 Hiilensidonnan kannattavuus**

Tulosten mukaan nuoren metsän tiheämmällä kasvatuksella aikaansaadun hiilensidonnan kompensoiminen lisäisi merkittävästi metsänomistajan tuloja. Hiilensidonnan suhteellinen kannattavuus parani tutkimuksessa huomattavasti korkokannan kasvaessa, sillä hiilensidonnan tulot painottuvat kiertoajan alkuun.

Niskasen ym. (1996) ja Pussisen ym. (2000) tutkimusten mukaan hiilensidonnan kannattavuuteen vaikuttivat huomattavasti käytetyn koron suuruus ja hiilelle oletettu arvo. Puuntuotannon ja hiilensidonnan yhteistuotanto parantaa metsänhoidon kannattavuutta selkeästi, mikäli otetaan huomioon koko hiilensidonnan vaikutus, koska hiilensidonnan tulot syntyvät valtaosin kiertoajan alkupuolella ja niiden taloudellinen merkitys diskontattuna on suuri (Valsta ym. 2005).

Mikäli puuntuotannon lisäksi hiilensidonnasta maksettaisiin metsänomistajalle 10 €/CO<sub>2</sub> tn, kannattavinta olisi tulosten mukaan toteuttaa nuoren metsän harvennus 14 metrin valtapituusvaiheessa, mikäli harvennus tehtäisiin ainespuuharvennuksena. Hiilensidonnan kiertoajan alkuun diskontatulle nykyarvolle saavutettiin myös korkein kannattavuus, kun nuoren metsän harvennus toteutettiin 14 metrin valtapituusvaiheessa. Energiapuusta ei oletettu saatavan tuloja, joten energiapuuharvennuksen sisältämän metsänkasvatuksen nettonykyarvo jäi tässä tarkastelussa heikoksi.

Hiilensidonnan kannattavuutta parantava vaikutus nettonykyarvoon hiilidioksidin hintatasolla 10 €/CO<sub>2</sub> tn ja 3 % korkokannalla vaihteli koealaryhmästä ja nuoren metsän harvennuksen ajankohdasta riippuen (vaihteluväli keskimäärin 41–88 %), mikäli otetaan huomioon koko hiilensidonnan vaikutus. Hiilensidonnan lisäyksellä aikaansaatu kannattavuuden parantuminen verrattaessa nuoren metsän harvennuksen hiilensidonnan kannattavuutta eri valtapituusvaiheissa metsänhoitosuosituksen mukaisen metsänkasvatuksen hiilensidonnan kannattavuuteen vaihteli korkokannasta (3–4 %), harvennusajankohdasta ja koealaryhmästä riippuen (vaihteluväli keskimäärin -9–36 %).

Nuoren metsän tiheämmällä kasvatuksella saattaa olla positiivisia vaikutuksia hiilensidonnan lisäksi myös puun laatuun. Puun laadun ja nopean kasvun yhdistäminen voi olla mahdollista lisäämällä taimikon tiheyttä luontaisen koivusekapuuston avulla. Koivu kasvaa mäntyä nopeammin ensimmäisinä vuosina, mutta pieni etumatka ei mäntyä haittaa, jos koivun tiheys on kohtuullinen (Valkonen 2005). Oksan paksuus pienenee männiköissä voimakkaasti, kun tiheys kasvaa 1000 rungosta 2500 runkoon hehtaarilla. Tätä suuremmilla tiheyksillä oksien paksuus pienenee, mutta muutos on suhteellisesti vähäisempää. Korkealaatuisen sahatavaran tuottamiseksi viljely- ja kasvatustiheydeksi 3000–4000 runkoa hehtaarilla on pidetty riittävänä mäntyrunkojen oksikkuuslaadun parantamiseksi (Mäkinen ym. 2005). Laatukasvatuksen tiheysvaatimus asettuu tämän tutkimuksen metsiköiden lähtötilanteen runkolukuun, joka oli keskimäärin 3362 kpl/ha.

### **6.3.2 Energiasubstituution kannattavuus**

Tutkimuksen mukaan energiapuuharvennuksen ottaminen osaksi metsänkasvatusta on kannattavampaa kuin metsänhoitosuosituksen mukainen metsänkasvatus, mikäli hiilidioksidin hintataso on keskimäärin yli 15 €/CO<sub>2</sub> ja Kemera-tuet säilyvät muuttumattomina. Ilman Kemera-tukea hiilidioksidin hintatason tulisi olla keskimäärin yli 28 €/CO<sub>2</sub>, jolloin energiapuuharvennuksen ottaminen osaksi metsänkasvatusta olisi kannattavaa, kun energiapuun oletetaan korvaavan kivihiltä. Tutkimuksessa ei oletettu energiapuulle kivihillen hiilidioksidin korvaavuuden ja Kemera-tukien lisäksi muuta hintatasoa. Tämän tutkimuksen mukainen vaihtoehtoinen metsänkasvatus ei ota huomioon myöhempien harvennuksien ainespuun mahdollista ajautumista energiantuotantoon päästökaupan hintatason noustessa.

Sellutehtaiden käyttämän kuitupuun hankinta vaikeutuu päästöoikeuden noustessa yli 15 €/CO<sub>2</sub>, jolloin päästökaupan piirissä olevat energialaitokset pystyvät maksamaan siitä vastaavan hinnan. Laskelmissa on kivihiilen asemasta oletettu puun korvaavan turvetta sekä käytetty mäntykuitupuun vuoden 2002 hankintahintoja (24.6 €/m<sup>3</sup>) (KTM 2004).

Tässä tutkimuksessa energiapuun oletettiin korvaavan kivihiiltä energiantuotannossa. Turpeen päästökerroin on suurempi kuin kivihiilen. Energiapuuharvennuksessa polttoon meni paljon koivukuitua, jonka pitkän aikavälin hintataso oli tässä tutkimuksessa laskennallisesti korkea (tienvarsihinta = 27.3 €/m<sup>3</sup>) verrattuna nykyhintoihin. Nämä tekijät vahvistavat tutkimuksen mukaisen energiapuuharvennuksen sisältämän metsänkasvatuksen kannattavuutta verrattuna vaihtoehtoisiin ainespuuharvennuksen sisältämään tai metsänhoitosuosituksien mukaiseen metsänkasvatukseen.

### **6.3.3 Energiapuu- ja ainespuuharvennuksen nettotulos**

Kaikkien koalojen keskiarvojen eri aikoina toteutettujen energiapuuharvennusten korjuukustannukset olivat keskimäärin 16.9 €/m<sup>3</sup>. Korjuukustannukset vaihtelivat riippuen energiapuuharvennuksen toteutusajankohdasta ja etenkin kokopuun keski-koosta ja kertymästä. Ahtikosken ym. (2004) tutkimuksessa koneellisen energiapuuharvennuksen kokopuukorjuun keskimääräiset kustannukset olivat keskimäärin 17.4 €/m<sup>3</sup>. Koneellisen energiapuu- korjuun suurin kustannus syntyy kaato- kasausvaiheessa, joka maksaa 12–15 €/m<sup>3</sup> (Laitila ym. 2004).

Tutkimuksen energiapuuharvennuksessa päästiin hyvin alhaisiinkin korjuukustannuksiin (vaihteluväli keskimäärin 13.9–20.7 €/m<sup>3</sup>). Tällöin kuitenkin puiden keski-  
koko kasvaa ja ainespuuta alkaa ajautua energiapuuksi.

Energiapuuharvennuksen nettotulos oli positiivinen kaikkien koealojen keskiarvojen osalta, mikäli Kemera-tuet otettiin huomioon. Metsänomistajalle olisi esimerkiksi jäänyt energiapuusta kantohintaa keskimäärin n. 9–14 €/m<sup>3</sup>, mikäli hiilidioksidin hintataso oli 20 €/CO<sub>2</sub> ja Kemera-tuet otettiin huomioon (lukuunottamatta haketustukia). Ilman Kemera-tukia energiapuuharvennuksen nettotulos kääntyi positiiviseksi koealaryhmästä ja energiapuuharvennuksen ajankohdasta riippuen hiilidioksidin korkeammilla hintatasoilla (20 ja/tai 30 €/CO<sub>2</sub>).

Verrattaessa vaihtoehtoista ainespuuharvennuksen nettotulosta energiapuuharvennukseen täytyy ottaa huomioon laskennalliset puutteet, kuten kaikkien lehtipuuker-  
tymien laskenta koivuainespuuksi ja kaatoa haittaavan ennakkoraivauskustannuksen puuttuminen. Mikäli nämä tekijät otetaan huomioon ainespuuharvennuksen kannattavuus laskee huomattavasti etenkin tuoreen kankaan koealaryhmien osalta. Tällöin energiapuuharvennuksen kannattavuus on parempi kuin vaihtoehtoisen ainespuu-  
harvennuksen. Kannattavuuteen vaikuttavat kuitenkin koealaryhmä, toteutusajankohta, hiilidioksidin hintataso ja Kemera-tuet.

## 6.4 Ohjaukeinot

### 6.4.1 Ohjaukeinot päästövähennyksien edistämiseksi

Energiapuuharvennuksen sisältämä vaihtoehtoinen metsänkasvatus oli metsänomistajan näkökulmasta kannattavampaa kuin metsänhoitosuositukseen perustuva metsänkasvatus, mikäli hiilidioksidin hintataso on korkeampi kuin 15 €/CO<sub>2</sub> tn ja energiapuuharvennuksen saatavat Kemera-tuet säilyvät ennallaan. Ilman Kemera-tukia energiapuun tienvarsihinnan tulisi näin ollen olla keskimäärin yli 21 €/m<sup>3</sup>, jolloin energiapuuharvennuksen sisältämällä metsänkasvatuksella saavutettaisiin ns. win-win-tulos, kun sekä kannattavuus että päästövähennykset kasvaisivat. Keskeisin tavoite on saada uusiutuvan energian tuotantoketjut kilpailukykyisiksi avoimilla energiapamarkkinoilla (KTM 2003b).

Energiasubstituution lisäksi päästövähennyksiä saavutettiin nuoren metsän tiheimmän metsänkasvatuksen hiilensidonnallisen lisääntymisellä, mikäli energiapuuharvennus toteutettiin riittävän myöhäisessä vaiheessa. Toisaalta suurempia päästövähennyksiä hiilensidonnalla olisi myös saatu, mikäli energiapuuharvennusta ei olisi tehty niin voimakkaana, sillä harvennuksen poistuma laskettiin päästökseksi.

Energiapuuharvennuksen energiapuun oletettiin korvaavan fossiilista polttoainetta kivihiiltä päästökertoimien mukaisesti, eikä energiapuulle ollut määritetty korvaavuuden ja Kemera-tukien lisäksi muuta hintatasoa. Metsänomistajan näkökulmasta energiapuuharvennuksen toteuttaminen oli 12 metrin valtapituusvaiheessa kannattavampaa korkeammilla hiilidioksidin hintatasoilla kuin muissa valtapituusvaiheissa.



Pelkästään päästövähennyksien näkökulmasta kannattavinta olisi energiapuuharvennuksen sisältämässä metsänkasvatuksessa lykätä energiapuuharvennuksen toteuttamista 14 metrin valtapituusvaiheeseen, jolloin saavutetaan sekä hiilensidonnan että energiasubstituution avulla suurimmat päästövähennykset.

Ilmastopoliittisia ohjauskeinoja ovat jo käytössä olevat EU:n päästökauppajärjestelmä sekä energiapuukorjuun ja haketuksen Kemera-tuet. Näillä on selkeästi energiapuun kysyntää edistävä vaikutus, kun ne ohjaavat korvaamaan fossiilisia polttoaineita puulla sähkön ja lämmön tuotannossa (Uusivuori 2006). Energiapuun puustamaksukyky paranee hiilidioksidin hintatason noustessa kuitupuuhun verrattuna. Siten energiapuukorjuun Kemera-tuilla on merkitystä, kun ne ohjaavat hankkimaan energiapuuksi nuorten metsien pienpuuta ja päätehakkuiden hakkuutähdettä myöhempien hakkuiden ainespuun sijaan. Energiapuuharvennukseen saatavia Kemera-tukia voitaisiin osittain perustella myös kiertoajan alun nuoren metsän tiheämmän metsänkasvatuksen aikaansaamalla hiilensidonnan lisääntymisellä, mikäli hiilensidontaa ei kompensoitaisi markkinalähtöisesti.

Jos markkinalähtöinen taloudellinen ohjaus suunnitellaan ja toteutetaan hyvin, sillä on useita etuja verrattuna perinteiseen hallinnolliseen ohjaukseen. Taloudellinen ohjaus sallii toimijoiden itse valita parhaan tavan vähentää päästöjä. Tämä on kustannustehokasta, koska toimija tuntee itse oman kustannusfunktionsa parhaiten. Taloudellisella ohjauksella saavutetaan optimaalinen päästötaso mahdollisimman vähäisin kustannuksin, kun päästövähennykset allokoituvat sinne, missä ne on edullisinta toteuttaa. (Anttonen 2000)

Metsänhoitosuositusten mukaisen metsänkasvatuksen taimikonhoidon Kemera-tukikriteerit (poistuma > 2000 kpl/ha) eivät täytyneet kaikkien koelajien osalta, joten niitä ei ole otettu tutkimuksessa huomioon. Kemera-tuilla on merkitystä taimikonhoidon kustannuksiin, sillä taimikonhoidon tuki Etelä-Suomessa (1. vyöhyke) on 50 % laskennallisista keskikustannuksista (Kemera-opas 2005). Taimikonhoidon tuki vaatii kuitenkin melko tiukat ehdot taimikonhoidon toteutukselle, kuten yli 2000 kpl/ha taimikon kehitykselle haitallisen rungon poistamista sekä muut kasvatettavan puuston tiheys- ja pituusvaatimukset. Metsänhoitosuositukseen pohjautuva ja Kemera-tukea nauttiva taimikonhoito saattaa kuitenkin olla sijoitettu joko liian aikaiseen ajankohtaan tai se toteutetaan liian voimakkaana, sillä taimikonhoidon kustannukset ovat liian korkeita kiertoajan alussa ja puuston tiheämpi kasvatus tuottaisi paremman tuloksen nettohyötyarvoina.

#### **6.4.2 Energiapuuharvennuksen sisältämä metsänkasvatus**

Uusiutuvien energialähteiden edistämishjelman ja Kansallisen metsäohjelman tavoitteena on lisätä energiapuun, pääasiassa kiinteiden puupolttoaineiden, eli polttopuun ja energiahakkeen, vuotuista käyttöä 5 milj. m<sup>3</sup> vuoteen 2010 mennessä (KTM 2003a). Energiapuun kysynnän voimakkaaseen kasvuun on mahdollista vastata ottamalla energiapuuntuotanto osaksi metsänkasvatusketjua. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin energiapuuharvennuksen sisältämää metsänkasvatusta. Käytännössä energiapuuharvennus osana metsänkasvatusketjua tarkoittaa sitä, että taimikonhoidossa jätetään kasvamaan tavanomaista enemmän runkoja (Heikkilä ja Siren 2005a).

Taimikon tiheämmällä kasvatuksella voidaan säästää taimikonhoidon kustannuksissa. Taimikonhoidon kustannukset heikentävät metsätalouden kannattavuutta, sillä kustannukset sijoittuvat kiertoajan alkuun. Taimikonhoidon kustannukset kasvavat puuston läpimitan kasvun ja poistettavien puiden lisääntymisen myötä. Taimikonhoidon kustannuksissa voidaan mahdollisesti saada säästöjä joko aikaistamalla taimikonhoidon suositusajoitusta tai pienentämällä taimikonhoidossa poistettavien puiden suositusmääriä.

Taimikon tiheämmällä kasvatuksella luontaisesti syntyneitä nopeakasvuisia puulajeja voidaan hyödyntää energiapuun tuottamiseksi. Nämä luontaisesti syntyneet täydentävät puulajit sopivat hyvin energiapuuntuotantoon, sillä energiapuun laatuvaatimukset eivät ole yhtä kovat kuin kuitupuun laatuvaatimukset. Lisäksi energiapuuksi kelpaa runkokuun lisäksi myös muu biomassa, kuten oksat ja latvat, jolloin kertymää saadaan suuremmaksi.

Taimikon tiheämmällä kasvatuksella on myös kääntöpuolensa. Liian tiheä kasvatusasento saattaa supistaa niiden puiden latvusta, joita olisi tarkoitus kasvattaa energiapuuharvennuksen jälkeenkin. Toisaalta taimikonhoidon toteuttaminen reikäperkuuna mahdollistaisi pääpuulajille suotuisimmat kasvuolosuhteet. Tiheä kasvatus mahdollistaa osaltaan puun laatukasvatuksen, kun oksat jäävät pienemmiksi ja karstiuvat paremmin. Tiheämpi kasvatus saattaa kuitenkin lisätä esimerkiksi sieni- tai lumituhoja metsässä.

Koneellisessa energiapuuharvennuksessa energiapuukertymä voidaan ottaa talteen kokopuuna, joka sisältää puun koko maanpäällisen biomassan. Koneellisen energia-

puukorjuun kannattavuuden ratkaisevat riittävän suuri kokopuun keskikoko ja kertymä, jotka toisaalta kasvattavat myös ainespuun osuutta koko energiapuukertymästä. Energiapuuharvennuksessa on kuitenkin suositeltavaa jättää riittävästi hakkuutähdeksi metsään ravinnehävikin ehkäisemiseksi.

Energiapuuharvennuksen koneellisen korjuun kehittyminen on kannattavuuden keskeinen edellytys. Ilman Kemera-tukia energiapuuharvennuksen pienpuuhake ei pärjää hintavertailussa hakkuutähdehakkeen kanssa. Pienpuuhakkeen kustannusten ero hakkuutähdehakkeen kustannuksiin syntyy kaato-kasausvaiheessa, joka maksaa 12–15 €/m<sup>3</sup>. Siksi toiminnan tehostaminen tulisi kohdistua juuri tähän vaiheeseen. Muiden kustannusten osalta pienpuuhake on kilpailukykyistä hakkuutähdeeseen verrattuna. (Laitila ym. 2004)

Koneellinen energiapuukorjuu vaatii metsään tehtävät ajourat, jolloin joudutaan poistamaan myös ainespuuksi kelpaavaa puuta. Osaltaan ajourien takia koneellinen energiapuuharvennuksen toteuttaminen tulee ajoittaa tarkoin. Liian aikaisella energiapuuharvennuksella menetetään puiden potentiaalisen kasvun myötä kannattavuutta ja toisaalta liian myöhäisellä energiapuuharvennuksella ainespuun osuus kasvaa liian suureksi. Harstelan (2004) mukaan taimikonhoidon viivästäminen energiapuuharvennuksen vuoksi saattaa alentaa metsän tuottoa, jota saattaa lisäksi korostaa ajourien aikainen avaaminen ja korjuuvauriot. Taimikonhoidon jälkeinen puuston tiheys tulisikin asettaa siten, että nuoren metsän harvennus voitaisiin myöhemmin toteuttaa kannattavasti joko pelkkänä ainespuu- tai energiapuukorjuuna tai niiden integroituna korjuuna. Ainespuun- ja energiapuun integroidun korjuun menetelmiä tulisi kehittää.

Energiapuuharvennuksen optimaalisen ajankohdan lisäksi pitäisi kiinnittää huomiota optimaaliseen energiapuun korjuukertymään. Energiapuuksi kannattaisi ottaa joko ainespuuksi kelpaamattomia runkoja tai sellaisia puutavaralajeja, joilla ei ole niin suurta taloudellista vaihtoehtoiskustannusta ainespuuna (esim. koivu- ja mäntykuitupu). Tässä tutkimuksessa ainespuun vaihtoehtoiskustannukset nousivat suuriksi, sillä ainespuun kantohintoina käytettiin pitkän aikavälin trendin mukaisia arvoja vuodelle 2005 (LIITE 1), jotka ovat etenkin kuitupuun osalta nykyistä hintatasoa huomattavasti suuremmat.

Nuoren metsän energiapuu on laadultaan parempaa kuin päätehakkuun hakkuutähde. Hakkuutähdehakkeen ongelmana on talvella muun muassa kosteus, pienissä laitoksissa palakoko ja höyrykattiloissa alkaalit, mikäli neulaset ovat mukana (Alakangas 2000). Nuoren metsän energiapuu sisältää enemmän runkopuuta, josta olisi mahdollista jalostaa myös muita energiatuotteita kuin tässä tutkimuksessa oletettua metsähaketta kaukolämmön ja sähkön yhteistuotantoon (CHP-laitokset). Näitä nuoren metsän energiapuusta saatavia tuotteita voisivat olla esimerkiksi polttopuu, rankahake tai liikenteen biopolttoaineet (biodiesel). Biopolttoaineiden pienkäytössä vaaditaan parempaa laatua ja maksukyky on parempi, joten pienkäytön polttoaineiden jalostusarvo on suurempi (Helynen 2005).

## 7 PÄÄTELMÄT JA SUOSITUKSET

### 7.1 Energiapuuharvennuksen sisältämän metsänkasvatuksen ilmastohyödyt

Energiapuuharvennuksen sisältämällä metsänkasvatuksella oli merkitystä ilmasto-  
muutoksen hillinnässä energiasubstituutiolla ja hiilensidonnalla aikaansaatu-  
jen päästövähennyksien lisääntymisellä verrattuna metsänhoitosuositukseen perustuvaan met-  
sänkasvatukseen (26–90 %) (24–60 CO<sub>2</sub> tn/ha). Sekä hiilensidonnan että energiasub-  
stituution merkitys korostuu energiapuuharvennuksen sisältämässä vaihtoehtoisessa  
metsänkasvatuksessa, kun ilmastohyödyt painottuvat kiertoajan alkuun.

Energiasubstituution laskennassa energiapuun merkitys ilmastomuutoksen hillinnäs-  
sä perustui fossiilisen kivihiilen korvaavuuteen. Suurempia päästövähennyksiä olisi  
saatu mikäli kivihiilen sijaan olisi oletettu korvattavan turvetta vaihtoehtoisena polt-  
toaineena, sillä turpeen päästökerroin on suurempi kuin kivihiilen. Toisaalta energia-  
puun oletettiin olevan kokonaisuudessaan koivua, joka sisältää hiiltä kuutiota kohden  
enemmän kuin muut puulajit, jolloin myös laskennalliset ilmastohyödyt korvaavuu-  
den perusteella ovat suurempia.

Nuoren metsän ainespuuharvennus ei sulje pois tiheämmän metsänkasvatuksen hii-  
lensidonnalla aikaansaataavaa ilmastohyötyä, mutta sulkee pois energiapuulla aikaan-  
saatavan päästövähennyspotentiaalin. Vaihtoehtoinen tiheämpi nuoren metsän kasva-  
tus ei sulje pois myöhempiä hiilensidonnan tehostamistoimia, kuten harvennusten  
lieventämistä tai kiertoajan pidentämistä, eikä myöskään myöhempien harvennuksien  
ja päätehakkuun potentiaalisen energiapuun käyttöä. Hiilensidonnan ja energiasubsti-

tuution merkitys vaihtoehtoisessa metsänkasvatusmallissa painottuu kiertoajan alkupuolelle.

Pelkästään ilmastohyötyjen näkökulmasta kannattavinta olisi energiapuuharvennuksen sisältämässä metsänkasvatuksessa lykätä energiapuuharvennuksen toteuttamista 14 metrin valtapituusvaiheeseen, jolloin saavutetaan sekä hiilensidonnan että energiasubstituution avulla suurimmat päästövähennykset. Silloin ainespuukertymä nousee kuitenkin huomattavan suureksi ja kannattavuus nettonykyarvona heikkenee.

## **7.2 Energiapuuharvennus osaksi metsänkasvatusta**

Energiapuun kasvatus voi olla metsänkasvatuksen päätavoite tai se voi olla puuntuotannon ohella osa metsänkasvatusketjua. Energiapuun korjuu sopii luontevasti osaksi metsänkasvatusketjua sekä nuoren metsän harvennuksessa, jolloin voidaan saada pienpuuta energiakäyttöön, että päätehakkuun yhteydessä, jolloin hakkuutähteitä muuten jäisi runsaasti metsään. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin nuoren metsän energiapuuharvennusta osana metsänkasvatusketjua, joka käytännössä mahdollistaa nuoren metsän tiheämmän kasvatuksen.

Tässä tutkimuksessa metsikkökoealojen lähtötilanteen runkoluku oli keskimäärin 3362 kpl/ha (vaihteluväli 2603–4800 kpl/ha). Metsikkökoealoja simuloitiin lähtötilanteen runkoluvun mukaisesti ilman metsänhoitosuosittelun mukaista taimikonhoitoa ja energiapuuharvennus toteutettiin 10, 12 ja 14 metrin valtapituusvaiheissa. Tällöin energiapuuharvennuksen ainespuukertymä nousi toteutusajankohdasta riippuen kuitenkin hyvin suureksi (keskimäärin 45–90 m<sup>3</sup>/ha). Metsänomistajan kannattaa

ottaa tämän tutkimuksen mukainen energiapuuharvennus osaksi metsänkasvatusta, mikäli energiapuun tienvarsihintaa on keskimäärin yli 21 €/m<sup>3</sup>. Energiapuuharvennus osana metsänkasvatusta on kannattavinta toteuttaa 12 metrin valtapituusvaiheessa, kun hiilidioksidi on korkeammalla hintatasolla (20 ja/tai 30 €/CO<sub>2</sub>).

Metsänhoitosuosituksien mukaiseen metsänkasvatukseen verrattuna energiapuuharvennuksen sisältämän metsänkasvatuksen kannattavuutta (nettonykyarvoa) parantaa taimikonhoidon kustannusten puuttuminen, energiapuuharvennuksen aikaisempi toteutuminen ja suurempi kertymä, energiapuukorjuukustannusten aleneminen kokopuun keskikoon ja kertymän kasvaessa sekä energia- ja ainespuun välisen hintasuhteen tasoittuminen.

Tässä tutkimuksessa verrattiin vaihtoehtoisen metsänkasvatuksen kannattavuutta metsänhoitosuosituksiin perustuvaan metsänkasvatukseen, kun otettiin huomioon puuntuotannon lisäksi hiilensidonta ja energiasubstituutio. Tutkimuksen tulosten mukaan vaihtoehtoinen tiheämmän metsänkasvatuksen mukainen nuoren metsän ainespuuharvennuksen sisältämä metsänkasvatus olisi ollut kannattavampaa kuin metsänhoitosuosituksen mukainen metsänkasvatus kaikkien koealojen keskiarvojen mukaisesti kaikissa 14 metrin valtapituusvaiheessa toteutetuilla ainespuuharvennuksilla ja 12 metrin valtapituusvaiheessa kuivahkon kankaan männikkö sekä tuoreen kankaan kuusikkokoealojen keskiarvoissa. Hiilensidontan kompensoiminen olisi korostanut vaihtoehtoisen metsänkasvatuksen kannattavuutta verrattuna metsänhoitosuositusten mukaiseen metsänkasvatukseen. Ainespuuharvennuksen sisältämää vaihtoehtoista metsänkasvatusta olisikin ollut mielekästä verrata energiapuuharven-



nuksen sisältämään metsänkasvatukseen metsänhoitosuosituksen mukaisen metsänkasvatuksen sijaan.

Toisaalta tiheämmän metsänkasvatuksen sisältämän ainespuuensiharvennuksen kannattavuudessa oletettiin kaikkien lehtipuiden olevan koivukuitupuuta, jolloin nettotulos on hieman yliarvio todelliseen tilanteeseen verrattuna. Yliarviota lisää myös MOTTI-simulaattorin asetusten mukaiset tukin vähimmäisläpimitat, harvennusta haittaavan puuston raivauksen kustannusten puuttuminen sekä käytetyt ainespuun reaali hinnat.

### **7.3 Ohjaukset päästövähennyksien edistämiseksi**

Päästövähennyksiä saavutettiin tämän tutkimuksen perusteella sekä nuoren metsän tiheämmällä kasvatuksella aikaansaadulla hiilensidonnan lisääntymisellä että energiapuuharvennuksen energiapuun korvauksella fossiilista polttoainetta kivihiihtä. Ohjaukset suunnitellulla voitaisiin edistää sekä hiilensidonnan että energiasubstituoitua aikaansaamia päästövähennyksiä.

Päästökauppajärjestelmän myötä energiapuun puustamaksukyky paranee hiilidioksidin hintatason noustessa kuitupuuhun verrattuna. Siten energiapuukorjuun Kemera-tuilla on merkitystä, kun ne ohjaavat hankkimaan energiapuuksi nuorten metsien pienpuuta ja päätehakkuiden hakkuutähdettä myöhempien hakkuiden ainespuun sijaan. Energiapuuharvennuksen saatavia Kemera-tukia voitaisiin osittain perustella myös kiertoajan alun nuoren metsän tiheämmän metsänkasvatuksen aikaansaamalla

hiilensidonnan lisääntymisellä, mikäli hiilensidontaa ei kompensoitaisi markkinalähtöisesti.

Metsänhoitosuositukseen pohjautuva ja Kemera-tukea nauttiva taimikonhoito saattaa olla sijoitettu joko liian myöhäiseen vaiheeseen tai se toteutetaan liian voimakkaana. Vaihtoehtoisen metsänkasvatuksen mukaisesti taimikonhoito voitaisiin toteuttaa aikaisemmin tai nykyisiä metsänhoitosuosituksia lievempänä, jolloin jätettäisiin enemmän puita kasvamaan, mikäli taimikkotiheys olisi riittävä. Tällöin nuoren metsän harvennus voisi olla kannattavaa toteuttaa joko aines- tai energiapuukorjuuna tai aines- ja energiapuun intergroituna korjuuna, vallitsevien menetelmien korjuukustannusten ja aines- ja energiapuun välisistä hintasuhteista riippuen.

#### **7.4 Lisätutkimuksen tarve**

Tässä tutkimuksessa vaihtoehtoista metsänkasvatusta verrattiin vallitseviin metsänhoitosuositukseen perustuvaan metsänkasvatukseen, joka ei edusta optimaalista metsänkasvatusta. Tässä tutkimuksessa perusteltiin, että nuoren metsän tiheämpi kasvatusta saattaisi olla kannattavampaa tietyin edellytyksin. Seuraava askel olisi optimoida metsänkasvatus, jossa otettaisiin huomioon puuntuotannon lisäksi energiapuuntuotanto sekä hiilensidonta. Optimoinnilla voitaisiin selvittää tarkemmin esimerkiksi energiapuuharvennuksen optimaalista ajankohtaa ja voimakkuutta.

Tutkimustulokset antoivat viitteitä, että hiilensidonnan ja ainespuuntuotannon kannalta olisi perusteltua kasvattaa metsikköä tiheämpänä ja toteuttaa ensiharvennus 14 metrin valtapituusvaiheessa, mutta energiapuuharvennus oli kannattavinta toteuttaa

12 metrin valtapituusvaiheessa. Koneellista energiapuuharvennusta ei tule sijoittaa ajankohtaan, jolloin puusto on liian pienikokoista, mikä lisää korjuukustannuksia, eikä myöskään ajankohtaan, jolloin puusto on liian suurikokoista, mikä lisää ainespuukertymää. Harvennuksen lykkääminen voisi olla perusteltua, mikäli harvennus toteutettaisiin aines- ja energiapuun integroituna korjuuna. Vaihtoehtoisesti voitaisiin myös toteuttaa lievempi energiapuuharvennus, jossa ei poistettaisi ainespuun mitta-vaatimuksia ylittäviä runkoja. Aines- ja energiapuun integroidun korjuun menetelmiä tulisi kehittää ja kannattavuutta tutkia.

Lisäksi olisi tärkeä tutkia ja kartoittaa riskejä, joita liittyy sekä metsikön tiheämpään kasvatukseen kiertoajan alussa että tiheän puuston koneelliseen harvennukseen. Tällaisia riskejä voivat olla tiheämmän kasvatuksen osalta pääpuulajin latvuksien supistuminen, kasvun hidastuminen, puustotautien lisääntyminen, tuuli- ja lumituhot ja niin edelleen. Koneelliseen energiapuuharvennukseen liittyviä riskejä ovat esimerkiksi korjuuvauriot ja ravinnehävikki.

## LÄHTEET

Ahtikoski, A., Siren, M. & Tantt, V. 2004. Korjuuvaihtoehtojen kannattavuus metsänomistajalle nuoren metsän harvennuksessa hankintakaupalla. Julkaisussa: Metsätieteen aikakauskirja 4/2004. s. 509-525.

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT tiedotteita 2045. 172 s.

Anttonen, K. 2000. Metsän julkishyödykkeiden tarjonnan ohjaukseen. Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja 795, 2000. 94 s.

Asplund, D., Korppi-Tommola, J. & Helynen, S. 2005. Uusiutuvan energian lisäysmahdollisuudet vuoteen 2015.

Chomitz, K. 2000. Evaluating Carbon Offsets from Forestry and Energy Projects – How Do They Compare?. The World Bank Development Research Group, Infrastructure and Environment. Policy Research Working Paper 2357. 25 p.

Fredriksson, T. (toim.). 2004. Polttohakkeen tuotanto harvennuskasvatusmetsissä. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. 25 s.

Glossary: Carbon Dioxide and Climates. 1990 ORNL/CDIAC-39, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee.

Hakkila, P., Kalaja, H. & Saranpää, P. 1995. Etelä-Suomen ensiharvennuskasvatuskuitu- ja energialähteenä. Helsinki. Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja 582.

Hakkila, P. & Fredriksson, T. 1996. Metsämme bioenergian lähteenä. Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja 613: 75-76.

Hakkila, P. 2004. Puuenergian teknologiaohjelma 1999-2003. Teknologiaohjelmara-portti 5/2004. 135 s.

Harstela, P. (toim.). 2004. Metsähake ja metsätalous. Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja 913, 2004. 80 s.

Heikkilä, J. & Siren, M. 2005a. Energiapuuharvennus osaksi metsänkasvatusketjua? Julkaisussa: Tuottava metsänkasvatus. Hynynen, J., Valkonen, S. & Rantala, S. (toim.). Julkaisija: Metsätutkimuslaitos. s.158-159.

Heikkilä, J. & Siren, M. 2005b. Energiapuuharvennus kannattaa osassa nuoria kasvatusmetsiä. [www.metla.fi/tiedotteet/](http://www.metla.fi/tiedotteet/).

Helynen, S., Flyktman, M., Mäkinen, T., Sipilä, K. & Vesterinen, P. 2002. Bioenergian mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. VTT tiedotteita 2145.

Helynen, S., Sipilä, K. & Flyktman, M. 2005. Uusiutuvien energialähteiden edistämishjelman bioenergiaa koskevien taustaoletusten ja tavoitteiden arviointi. VTT prosessit. 28 s.

Hynynen, J & Ahtikoski, A. 2004. Puuntuotanto ja tuotto. Julkaisussa: Harstela, P. (toim.). Metsähake ja metsätalous. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 913: 7-15.

Hynynen, J., Valkonen, S. & Rantala, S. (toim.). 2005. Tuottava metsänkasvatus. Julkaisija: Metsäntutkimuslaitos. 221 s.

Hyvän metsänhoidon suositukset. 2001. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. 95 s.

Hämeikoski, K. 2005. Luento: Kioton pöytäkirja. SYKE. 12.10.2005.

Impola, R. 1998. Puupolttoaineiden laatuohje. Jyväskylä, FINBIO, Julkaisu 5. 33 s.

Indufor (2000). Metsien hiilinielujen todennettavuus Kioton pöytäkirjan soveltamisessa. Taustaselvitys ilmastomuutosprojektille. 52 s.

IPCC (2000) Land Use, Land-Use change, and Forestry – Summary for policy makers

IPCC (2001a) Climate change 2001: Scientific basis. Summary for policy makers

IPCC (2001b): kolmas arviointiraportti. Ilmastomuutos 2001; Ilmastomuutoksen rajoittaminen. Yhteenveto päätöksentekijöille.

Jantunen, M. & Nevanlinna, N. 1991. Kasvihuoneilmiö, ilmastomuutos ja Suomi. Teknillistieteelliset Akatemit 1990:1.

Kemera-opas. 2005. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio ja Metsäkeskus Pirkanmaa 2002-2004. 5.10.2005. 50 s.

Kioton pöytäkirjan toimeenpanon säännöt. 2003. Suomen ympäristö 607. Ympäristöministeriö.

Kokko, K. 2003. Biodiversitettiä turvaavat oikeudelliset periaatteet ja mekanismit. Helsinki 2003.

Koistinen, A. & Äijälä, O. 2005. Energiapuun korjuu. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio.

KTM 2000. Kauppa- ja teollisuusministeriön työryhmä- ja toimikuntaraportteja. Kansallinen päästökauppa. Kioton mekanismit-toimikunnan osamietintö.

KTM 2001. Kauppa- ja teollisuusministeriön selvitykset 1/2001. Kansallinen ilmastostrategia: valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 27.3.2001.

KTM 2003a. Kauppa- ja teollisuusministeriön julkaisuja 2/2003. Kansallisen ilmastostrategian toteutus. 54 s.

KTM 2003b. Kauppa- ja teollisuusministeriön julkaisuja 5/2003. Uusiutuvan energian edistämishjelma 2003-2006. 56 s.

KTM 2004. Kauppa- ja teollisuusministeriön selvitykset. Jatkotarkasteluja selvitykseen ”Päästökaupan vaikutuksia energiasektoriin”.

Kärhä, K. 2005. Ennakkoraivaustavan vaikutus korjuuoloihin ja raivauskustannuksiin. Julkinen jakelu nro 10 2/2005. Metsäteho Oy.

Laitila, J. 2004. Kokopuuhakkeen kustannuslaskentaohjelma. Metsäntutkimuslaitos.

Laitila, J. 2005. Metsähakkeen kustannuslaskentaohjelmat. Bioenergia 2/2005. s. 22-23.

Laitila, J, Asikainen A, Sikanen L, Korhonen K.T. & Nuutinen Y. 2004. Pienpuuhakkeen tuotannon kustannustekijät ja toimituslogistiikka. Metlan työraportteja 3. Saatavissa verkkojulkaisuna: [www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/](http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/)

Laki kestävän metsätalouden rahoituksesta. 1996. Laki 1094/1996. Annettu Helsingissä 12.12.1996.

Lapveteläinen, T. & Sievänen, R. 2003. Kioton sopimuksen LULUCF-artiklat 3.3 ja 3.4 Suomen toimintavaihtoehdot ja niiden vaikutukset metsätalouteen. 37 s.

Lehtonen, A., Mäkipää, R., Heikkinen, J., Sievänen, R. & Liski, J. 2004. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *Forest Ecology and Management* 188 (2004) 211-224.

Marland, G., Fruit, K. & Sedjo, R. 2001. Accounting for sequestered carbon: the question of permanence. *Environmental Science & Policy* 4 (2001) 259-268.

Melkas, E. 2004. Ohjauskeinoista hiilinielujen edistämiseksi metsissä. *Ympäristöjuridiikka* 1/2004. s. 7-26.

Melkas, E. 2006. Kestävän metsätalouden rahoitus hiilipolitiikan ohjauksessa. Julkaisussa: Valsta ym. Puu ilmastonmuutoksen hillitsijänä. Metsäekonomian laitoksen tutkimusraportteja 39. Helsinki 2006.

MMM. 2000. Metsät ilmastopöytäkirjassa ja Kioton pöytäkirjassa. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 1/2000.  
[http://www.mmm.fi/julkaisut/julkaisusarja/MMMjulkaisu2000\\_1.pdf](http://www.mmm.fi/julkaisut/julkaisusarja/MMMjulkaisu2000_1.pdf)

Mononen, J. 2003. Hiilidioksidikompensaation vaikutus metsänkasvatuksen kannattavuuteen ja metsänhoitoon. Liiketaloudellisen metsäekonomian Pro gradu-työ. Helsinki 2003. 70 s.

Mononen, J. 2006. Päästöoikeuden määrittely ja hiilinielukaupan kehittäminen. Julkaisussa: Valsta ym. Puu ilmastonmuutoksen hillitsijänä. Metsäekonomian laitoksen tutkimusraportteja 39. Helsinki 2006.

- Moura-Costa, P. & Stuart, M. 1998. Forestry-based Greenhouse Gas Mitigation: a short story of market evolution. *Commonwealth Forestry Review* 77: 191-202, September 1998.
- Mäkinen, H., Saranpää, P., Venäläinen, M. & Tuimala, A. 2005. Puun laatu ja siihen vaikuttavat tekijät. s. 121-133. Julkaisussa: Hynynen, J., Valkonen, S. & Rantala, S. (toim.). 2005. Tuottava metsänkasvatus. Julkaisija: Metsäntutkimuslaitos. 221 s.
- Niskanen, A., Saastamoinen, O. & Rantala, T. 1996. Economic Impacts of Carbon Sequestration in Reforestation: Examples from Boreal and Moist Tropical Conditions. *Silva Fennica* 30(2-3) research articles.
- Nordpool. Weekly report Nord Pool carbon market [Viitattu 25.9.2005]. <http://www.nordpool.com/>.
- Nurmi, J. 1993. Pienikokoisten puiden maanpäällisen biomassan lämpöarvo. Helsinki. *Acta Forestalia Fennica* 236. 30 s.
- Nurmi, J. 1997. Heating values of mature trees. *Acta Forestalia Fennica* 256. 28 s.
- Pingoud, K. & Perälä, A.-L. 2000. Arvioita puurakentamisen kasvihuonevaikutuksesta. Espoo 2000, Technical Research Centre of Finland, VTT Julkaisuja – No. 840. 58 p.
- Pingoud, K. & Lehtilä, A. 2002. Fossil carbon emissions associated with carbon flows of wood products. Evaluation and development of methods. VTT Research Notes 2189, 138 p.
- Pingoud, K., Perälä, A.-L., Soimakallio, S. & Pussinen, A. 2003. Greenhouse gas impacts of harvested wood products. Evaluation and development of methods. VTT Research Notes 2189, 138 p.
- Pingoud, K. & Skog, K.E. 2003. Appendix 3a.1 Harvested wood products: Basis for future methodological development, pp. 3.257 – 3.272 in IPCC 2003: Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry.
- Pingoud, K. 2006. Puutuotteet ilmastomuutoksessa. Julkaisussa: Valsta ym. Puu ilmastomuutoksen hillitsijänä. Metsäekonomian laitoksen tutkimusraportteja 39. Helsinki 2006.
- Pingoud, K., Pohjola, J., Valsta, L. & Karttunen, K. 2006. Tapaustarkastelu: Metsien ja puutuotteiden yhdistetty vaikutus. Julkaisussa: Valsta ym. Puu ilmastomuutoksen hillitsijänä. Metsäekonomian laitoksen tutkimusraportteja 39. Helsinki 2006.
- Pohjola, J. 2000. Metsät ja puutuotteet hiilinieluna. Julkaisussa: Seppälä, R. (toim.). Suomen metsäklusteri tienhaarassa. Abstract: The Finnish forest cluster at a cross road. Metsäalan tutkimusohjelma WOOD WISDOM, s. 62-68.
- Pohjola, J., Valsta, L. & Mononen, J. 2004. Costs of carbon sequestration in Scots pine stands in Finland. To appear in: *Scandinavian Forest Economics* (40) 81-90.

Pohjola, J., Valsta, L. & Mononen, J. 2006. Metsät hiilinieluinä. Julkaisussa: Valsta ym. Puu ilmastomuutoksen hillitsijänä. Metsäekonomian laitoksen tutkimusraportteja 39. Helsinki 2006.

Pussinen, A., Karjalainen, T., Mäkipää, R. Valsta, L. Kellomäki, S. 2000. Forest carbon sequestration and harvest in Scots pine stand under different climate and nitrogen deposition scenarios. *Forest Ecology and Management* 12.12.2000. 14 s.

Richards, K. & Stokes, C. 2004. A review of forest carbon sequestration cost studies: a dozen years of research. *Climatic Change* 63:1-48.

Sairinen, R. 2000. Regulatory Reform of Finnish Environmental Policy. Yhdyskuntasuunnittelun tutkimus- ja koulutuskeskuksen julkaisuja A 27. Espoo.

Schlamadinger, B. 2005. The GHG Implications and Balances of Bioenergy – Maximizing Reductions. BIOCAP National Conference, Ottawa, 2-3 February, 2005. [http://www.biocap.ca/images/pdfs/conferenceSpeakers/Schlamadinger\\_B.pdf](http://www.biocap.ca/images/pdfs/conferenceSpeakers/Schlamadinger_B.pdf)

Seppälä, H. & Siekkinen, V. 1993. Puun käyttö ja hiilitasapaino. Metlan tiedonantoja 473. Helsinki 1993. 51 s.

Sevola, Y., Peltola, A. & Moilanen, J. 2003. Polttopuun käyttö pientaloissa 2000/2001. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 894. 30 s.

Stranström, M. 2005. Metsänhoito vuonna 2004. Julkinen jakelu nro 13 5/2005. Metsäteho Oy.

Tilastokeskus. Kasvihuonekaasuinventaarior: Polttoaineluokitus. Sivun päivitys 11.2.2005. [Viitattu 27.2.2006]. <http://www.stat.fi/tup/khkinv/polttoaineluokitus.html>.

Tilastokeskus. Kivihiilen, maakaasun ja kotimaisten polttoaineiden käyttäjähinnat lämmöntuotannossa. Sivun päivitys 21.12.2005. [Viitattu 27.2.2006]. [http://www.tilastokeskus.fi/til/ehkh/2005/03/ehkh\\_2005\\_03\\_2005-12-21\\_tau\\_006.xls](http://www.tilastokeskus.fi/til/ehkh/2005/03/ehkh_2005_03_2005-12-21_tau_006.xls)

Tilastokeskus. Kuva 2. Suomen kasvihuonekaasupäästöt 1990-2004. Sivun päivitys 8.12.2005. [Viitattu 27.2.2006]. [http://www.stat.fi/til/ekul/2004/ekul\\_2004\\_2005-12-08\\_kuv\\_016.html](http://www.stat.fi/til/ekul/2004/ekul_2004_2005-12-08_kuv_016.html).

Tilastokeskus. Kuva 4. Kasvihuonekaasupäästöt ja -nielusektori vuosina 1990-2003 (Mt CO<sub>2</sub> ekv.). Sivun päivitys 20.6.2005. [Viitattu 27.2.2006]. [http://www.stat.fi/til/khki/2003/khki\\_2003\\_2005-04-19\\_tie\\_001.html](http://www.stat.fi/til/khki/2003/khki_2003_2005-04-19_tie_001.html).

Uusivuori, J. 2006. Markkinavaikutukset. Julkaisussa: Valsta ym. Puu ilmastomuutoksen hillitsijänä. Metsäekonomian laitoksen tutkimusraportteja 39. Helsinki 2006.

Valkonen, S. 2005. Koivusekoituksella laatupuuta männyn taimikoista. s. 94-95. Julkaisussa: Hynynen, J., Valkonen, S. & Rantala, S. (toim.). 2005. Tuottava metsänkasvatus. Julkaisija: Metsäntutkimuslaitos. 221 s.



Valsta, L., Pohjola, J., Mononen, J., & Pingoud, K. 2005. Suomen metsät ja puutuotteet ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden hallinnassa. s. 114-122. Julkaisussa: Ilmasto muuttuu – mukautuvatko metsät. Riikonen, J. & Vapaavuori, E. (toim.). Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 944, 2005.

Valsta, L., Ahtikoski, A., Horne, P., Karttunen, K., Kokko, K., Melkas, E., Mononen, J., Pingoud, K., Pohjola, J. & Uusivuori, J. 2006. Puu ilmastomuutoksen hillitsijänä. LOPPURAPORTTI, Ympäristöklusterin tutkimusohjelman konsortio ”Suomen metsät ja puutuotteet ilmastonmuutoksen torjunnassa – nielut ja substitootit sekä niiden taloudellinen ja oikeudellinen ohjaus”. Metsäekonomian laitoksen tutkimusraportteja 39. Helsinki 2006. 57 s.

Väkevä, J. & Örn, J. 2005. Puunkorjuu ja kaukokuljetus 2004. Julkinen jakelu nro 124/2005. Metsäteho Oy.

Ärölä, E. 2002. Metsävarojen mittaus ja arviointi. Teoksessa: Tapion taskukirja. Kustannusosakeyhtiö Metsälehti. s. 323-360.

## LIITTEET

LIITE 1. Tukkuhintaindeksillä korjatut kantohinnat vuoden 2004 rahassa ja vuoden 2005 trendin mukaiset arvot kantohinnoiksi.

Vuosi	Mänty- tukki	Kuusi- tukki	Koivu- tukki	Mänty- kuitu	Kuusi- kuitu	Koivu- kuitu
1978	45.15	38.81	41.98	17.82	18.61	11.88
1979	47.28	41.46	45.09	19.64	20.36	14.55
1980	49.13	42.88	44.75	21.59	21.91	17.53
1981	47.70	39.71	41.64	22.34	22.61	17.92
1982	41.81	37.19	42.07	20.01	21.03	16.67
1983	43.02	34.27	41.80	19.16	19.74	14.24
1984	46.48	36.47	45.01	19.26	19.92	13.98
1985	46.33	34.15	44.48	19.20	20.83	13.96
1986	45.11	34.23	46.55	19.56	22.36	13.46
1987	46.99	35.53	48.52	20.16	23.26	14.38
1988	51.44	38.75	53.35	21.77	25.89	17.88
1989	51.75	39.26	53.88	22.51	27.09	18.93
1990	52.14	40.19	53.98	22.92	27.37	19.01
1991	45.12	36.13	48.67	18.91	23.30	15.58
1992	37.53	31.15	41.19	14.07	17.86	13.64
1993	35.51	27.83	37.18	11.59	14.73	12.32
1994	41.08	33.35	41.72	13.65	17.42	13.83
1995	45.38	36.29	44.83	17.08	20.15	18.03
1996	44.51	36.58	44.20	17.53	21.98	17.31
1997	47.60	39.13	47.00	16.99	23.11	16.69
1998	49.88	41.54	49.59	17.20	24.25	17.16
1999	49.66	43.72	49.13	16.21	24.19	16.07
2000	47.89	44.28	46.04	14.96	22.80	14.76
2001	47.72	44.13	45.88	14.91	22.72	14.71
2002	47.45	44.62	46.52	14.47	22.70	14.03
2003	47.13	44.91	44.64	13.80	21.64	13.19
2004	45.70	44.80	40.60	12.40	20.90	11.80
2005	46.50	41.59	46.18	13.77	22.46	14.90

LIITE 2. Koealakohtaiset kiertoajan alkuun diskonttatut nettonykyarvot ja päästövähennykset sekä koealakohtaiset yksikkökustannukset (3 % korkokanta).

Nettonykyarvo, euroa/ha												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Baseline	1697	1667	2111	2111	1314	1187	815	565	1993	1751	1584	1362
NMH (10)	856	598	1176	1259	585	278	166	12	1042	704	1050	687
NMH (12)	680	500	1099	1031	418	156	35	-11	907	577	948	650
NMH (14)	567	223	1038	896	166	43	-56	13	877	504	872	695
Hiilensidonnän päästövähennys CO2 tn/ha												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Baseline	75	114	104	84	73	67	79	70	61	75	66	65
NMH (10)	66	92	99	88	78	75	79	68	66	77	73	71
NMH (12)	78	95	93	94	83	82	85	74	80	91	79	80
NMH (14)	79	107	104	104	97	93	94	81	87	103	87	87
Kustannus hiilensidonnän lisäksi euroa/CO2 tn												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NMH (10)	ei	ei	ei	-212	-147	-111	ei	ei	-165	-549	-74	-113
NMH (12)	-316	ei	ei	-102	-84	-67	-142	-137	-57	-73	-48	-49
NMH (14)	-270	ei	ei	-61	-47	-43	-60	-52	-42	-44	-34	-30
Energiasubstituution päästövähennys, CO2 tn/ha												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NMH (10)	26	42	30	34	28	35	23	17	33	37	23	24
NMH (12)	32	47	36	43	37	40	29	19	40	43	28	28
NMH (14)	35	41	37	47	40	38	31	19	41	43	31	27
Kustannus energiasubstituution lisäksi euroa/CO2 tn												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NMH (10)	-33	-25	-31	-25	-26	-26	-28	-33	-29	-28	-23	-28
NMH (12)	-31	-25	-28	-25	-24	-26	-27	-30	-27	-27	-23	-26
NMH (14)	-32	-35	-29	-26	-29	-30	-28	-30	-27	-29	-23	-24
Hiilensidonta + energiasubstituutio (päästövähennys yhteensä) CO2 tn/ha												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Baseline	75	114	104	84	73	67	79	70	61	75	66	65
NMH (10)	92	134	129	121	106	110	102	85	100	114	96	95
NMH (12)	111	142	129	137	120	122	113	94	119	134	107	107
NMH (14)	115	148	141	150	137	131	125	99	128	147	118	115
Kustannus hiilensidonta + energiasubstituutio euroa/CO2 tn												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NMH (10)	-50	-55	-39	-23	-22	-21	-29	-37	-24	-27	-18	-22
NMH (12)	-29	-43	-42	-20	-19	-19	-23	-24	-18	-20	-15	-17
NMH (14)	-29	-43	-30	-18	-18	-18	-19	-19	-17	-17	-14	-13