

HIILIDIOKSIDIKOMPENSAATION VAIKUTUS
METSÄNKASVATUKSEN KANNATTAVUUTEEN
JA METSÄNHOITOO

Helsingin Yliopisto

Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta
Liiketaloudellisen metsäekonomian Pro gradu-työ
Jyri Mononen

Helsinki 2003

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF
HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos — Institution — Department Department of Forest Economics	
Tekijä — Författare — Author Mononen, Jyri			
Työn nimi — Arbetets titel — Title The effects of carbon subsidies and taxes on economically optimal harvest decisions of privat owned Scots pine stands			
Oppiaine — Läroämne — Subject Business Economics of Forestry			
Työn laji — Arbetets art — Level Thesis		Aika — Datum — Month and year February 2003	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 70 + appendixes
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>The aim of this study was to analyse the costs of carbon sequestration and the effects of carbon subsidies and taxes on private land owners net present value and economically optimal harvest decisions in Scots pine stands of southern Finland. Optimal forest management of six measured stands was simulated under chosen regimes by using Stand Management Assistant-programme by Valsta and Linkosalo 1996.</p> <p>Maximization of net present value over all future rotations was assumed to be the one thing the land owner optimize. Carbon subsidies and taxes had monetary value in the model and carbon was introduced as an additional product to be produced jointly with timber. Only carbon of trees and timber was accounted to forest carbon budget.</p> <p>According to simulations, average increase of even 20 % of carbon stored in the Scots pine stands can be managed at relatively low costs. Depending on the amount of carbon increased and discount rate (3 and 4 %) average cost per ton of carbon dioxide ranged from 1,2 to 4,5 € that might prove to be lower than reducing carbon emissions of industry. Model of carbon subsidies and taxes provided increase of net present value, even when simulating with the lowest assumed carbon dioxide price (2,27 €/per ton). The carbon stored in the forests increased as a consequence of change of optimal forest management in which rotation ages lengthened and thinnings softened.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Carbon sequestration, emission trade, forest management, optimizing, climate change			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information			

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Ilmastonmuutos ilmiönä.....	1
1.2 Ilmastopolitiikka.....	2
1.3 Päästökauppa	5
1.4 Metsien hiilinielut.....	8
1.5 Metsien hiilinielujen markkinat ja hinnoittelu	14
1.6 Metsänomistajan optimointiongelmia	18
2 HAVAINTOJA AIKAISEMMISTA TUTKIMUKSISTA.....	22
2.1 Aikaisempien tutkimusten vertailukelpoisuus.....	22
2.2 Hiilensidonnann potentiaali suomalaisissa metsissä	22
2.3 Hiilensidonnann kustannukset ja kannattavuus.....	23
2.4 Hiilitalous ja metsänhoito	24
2.5 Muut havainnot.....	24
3. TUTKIMUKSEN TAVOITTEET	25
4. MENETELMÄT JA AINEISTO	26
4.1 Stand management assistant (SMA-ohjelmisto)	26
4.2 Ohjelmiston rakenne.....	27
4.3 Tutkimukseen valitut asetukset ja parametrit	28
4.4 Aineisto	30
4.5 Muut oletetut tekijät	31
5. TULOKSET.....	32
5.1 Hiilensidonnann kustannukset	32
5.1 Hiilikompensaatiot ja metsänkasvatuksen kannattavuus.....	37
5.2 Hiilikompensaation vaikutus metsänhoitoon.....	42
5.3.1 Kiertoaika	43
5.3.2 Kasvatushakkuut	46
5.3.3 Keskitilavuuden kasvu	48
6. TULOSTEN TARKASTELU	51
6.1 Hiilensidonnann kustannukset	51
6.2 Hiilensidonnann kannattavuus.....	52
6.3 Vaikutukset metsänhoito-ohjelmaan	53
6.4 Vaikutus hiilinielun kokoon	53
6.5 Muita havaintoja	55
6.5.1 Boniteetti.....	55
6.5.2 Metsälaki	56
6.5.3 Puutuotteet.....	57
7 TULOSTEN VERTAILU AIKAISEMPIIN TUTKIMUKSIIN.....	58
7.1 Hiilensidonnann kustannukset	58
7.2 Hiilensidonnann kannattavuus.....	59
7.3 Vaikutukset metsänhoitoon.....	59
8 PÄÄTELMÄT JA SUOSITUKSET.....	60
8.1 Kompensaatiomallin toimivuus.....	60
8.2 Metsät ja kansallinen ilmastopolitiikka.....	63
8.3 Huomioitavaa tutkimuksen lukijalle	63
8.4 Lisätutkimuksen tarve	66
KIRJALLISUUS.....	70
LIITTEET	

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1	Tutkimuksessa simuloitujen koealojen metsikkötietoja.	30
Taulukko 2	Koealojen simuloituiden nettonykyarvot koko kiertoajalta €/ha ilman hiilikompensaatiota (CO ₂ tn 0 €) ja eri hiilidioksiditonnin hinnoilla (2.27, 13.6 ja 27.2 €) kompensoituina, korkokannalla 3 % ja 4 %.	39
Taulukko 3	Taloudellisesti optimaaliset kiertoajat ilman hiilikompensaatiota 0 €/CO ₂ tonni) ja eri hiilen hinnoilla (2.27, 13.6 ja 27.2 €/CO ₂ tonni) kompensoituina, korkokannoilla 3 ja 4 %.	44
Taulukko 4	Harvennusten taloudellisesti optimaalinen lukumäärä kiertoajalla, 3% (a) ja 4% (b) koroilla, ilman hiilikompensaatiota (CO ₂ tonni 0 €) ja eri CO ₂ hinnoilla kompensoituina.	47
Taulukko 5	Keskimääräinen runkopuun kuutiotilavuus m ³ /ha koko kiertoajalla, 3 ja 4 % koroilla taloudellisesti optimaalisella hakkuuohjelmalla, eri hiilen hinnoilla.	49
Taulukko 6	Keskimääräiset runkotilavuuksien muutosprosentit eri hiilen hinnoilla, koroilla 3 ja 4%.	54
Taulukko 7	Metsälakirajoitteella ja ilman sitä optimoitujen hakkuuohjelmien nettonykyarvot koealalla 4. diskonttauskoroilla 3% (a) ja 4% (b).	56
Taulukko 8	Nettonykyarvot koealalla 4. laskentaperiaatteella, jossa puutuotteiden hiilinielu luetaan metsänomistajan hyväksi ("tuotantoperiaate") ja periaatteella, jossa puutuotteet rajataan metsänomistajan hiilitaseen ulkopuolelle ("varastonmuutosperiaate").	57

KUVALUETTELO

Kuva 1	Ilmastokokousten eteneminen.	3
Kuva 2	Hiilen kierto metsäekosysteemissä (perustuen Induforin raportin “Metsien hiilinielujen todennettavuus Kioton pöytäkirjan soveltamisessa “ 2000, s. 8. kuvaan 3.1).	8
Kuva 3	Hiilinieluprojektin sertifiointi (Induforin raportti “Metsien hiilinielujen todennettavuus Kioton pöytäkirjan soveltamisessa” 2000, s. 27. Kuva 7.1).	11
Kuva 4	Toimintamalliesimerkki yksittäisen metsänomistajan tasolla tapahtuvasta hiilinielujen verifiointista ja kaupasta (soveltaen Induforin raportin “Metsien hiilinielujen todennettavuus Kioton pöytäkirjan soveltamisessa” 2000, kuvaa 9.4).	16
Kuva 5	Esimerkki kasvatusmetsän tilavuuden kehityksestä.	20
Kuva 6	Nykyarvoajattelu. Saman metsikön tuotot 80-vuoden kiertoaajan aikana diskontattuina 4 %:lla ja diskonttaamattomina.	21
Kuva 7	Ylimääräisillä metsänhoitopäätöksillä aikaansaatuisten hiilinielujen kustannukset optimaalisilla hakkuuohjelmilla hehtaaria kohti koealoilla, kun vaadittiin 20 ja 40 kuutiometrin korotukset kiertoaajan optimaalisiin keskikuutiomääriin. Korko 3 %.	34
Kuva 8	Ylimääräisillä metsänhoitopäätöksillä aikaansaatuisten hiilinielujen kustannukset optimaalisilla hakkuuohjelmilla hehtaaria kohti koealoilla, kun vaadittiin 20 ja 40 kuutiometrin korotukset kiertoaajan optimaalisiin keskikuutiomääriin. Korko 4 %.	34
Kuva 9	Ylimääräisillä metsänhoitopäätöksillä aikaansaatuisten hiilinielujen kustannukset hehtaaria kohti optimaalisilla hakkuuohjelmilla, kun vaadittiin 10 ja 20% kuutiomäärien korotukset kiertoaajan optimaalisiin keskikuutiomääriin koealoilla. Korko 3 %.	36
Kuva 10	Ylimääräisillä metsänhoitopäätöksillä aikaansaatuisten hiilinielujen kustannukset hehtaaria kohti optimaalisilla hakkuuohjelmilla, kun vaadittiin 10 ja 20% kuutiomäärien korotukset kiertoaajan optimaalisiin keskikuutiomääriin koealoilla. Korko 4 %.	36
Kuva 11	Hiilen hinnan vaikutus nettonykyarvoihin/ha koealoittain (metsiköt 1-6), joiden pituusboniteetti kasvaa järjestyksessä vasemmalta oikealle. Korkokanta 3 %.	40
Kuva 12	Puunmyyntitulojen ja hiilikompensaatioiden suhteellinen osuus (lukuarvot teoreettisia) diskontattujen rahavirtojen muodostumisessa kiertoaajan aikana, tapauksessa jossa hiilen hinta korkea (27.2 €/CO ₂ tn) ja diskonttauskorko 4 %.	41

Kuva 13	Sama esimerkkitapaus kuin kuvassa 12, mutta rahavirrat nimellisinä, diskontaamattomina.	42
Kuva 14	Metsikön puuston tilavuuden kehitys ja optimaalinen hakkuuohjelma erilaisilla sidotusta hiilestä maksetuilla CO ₂ tonnin hinnoilla koealalla 4.	43
Kuva 15	Optimaalinen kiertoaika erilaisilla hiilen hinnoilla korkokannalla 3% (a) ja 4% (b).	45
Kuva 16a.	Hiilen hinnan (0, 2.27, 13.6 ja 27.2 €/CO ₂ tonni) vaikutus kiertoaajan keskitilavuuteen korkokannan ollessa 3%.	50
Kuva 16 b.	Hiilen hinnan (0, 2.27, 13.6 ja 27.2 €/CO ₂ tonni) vaikutus kiertoaajan keskitilavuuteen korkokannan ollessa 4%.	51

1. JOHDANTO

1.1 Ilmastonmuutos ilmiönä

Maapallon ilmaston oletetaan lämpenevän ihmiskunnan lisätessä ilmakehän kasvihuonekaasujen määrää, mikä vähentää auringosta tulevan säteilyn heijastumista takaisin avaruuteen. Tärkeimmät kasvihuonekaasut ovat hiilidioksidi (CO_2), metaani (CH_4) ja dityppioksidi (N_2O). Muita kasvihuonekaasuja ovat mm. klooratut hiilivedyt (CFC:t ja HCFC:t), fluoriyhdisteet (HFC:t, PFC:t ja SF_6) sekä bromiyhdisteet. Näistä tärkeimmän, hiilidioksidin osuus lämmitysvaikutuksesta on 64 % (IPCC 2000).

Kaikkien kasvihuonekaasujen yhteenlasketut päästöluvut ilmoitetaan yleensä hiilidioksidiekvivalenteiksi, toisin sanoen lämmitysvaikutuksiltaan vastaaviksi hiilidioksidimääräksi muunnettuna. Tässä tutkimuksessa hiiliyksiköitä käsiteltäessä on aina kyse hiilidioksiditonneista (CO_2 tn), ellei toisin erikseen mainita.

Hiilidioksidin määrä on noussut noin 30 % esiteollisesta ajasta ja se nousee edelleen. 90-luvulla vuotuinen lisääntyminen on ollut välillä 0.2 ja 0.8 prosenttia. Tämän seurauksena maapallon keskilämpötilan arvioidaan kohoavan 1.4-5.8 °C seuraavan sadan vuoden kuluessa (IPCC 2000). Tästä on ennustettu aiheutuvan monia vakavia seurauksia, kuten merenpinnan nousua, ilmansaasteongelmia, puhtaan veden vähenemistä, väestöjen muuttoaaltoja, ekologisia muutoksia ja taloudellisia kustannuksia.

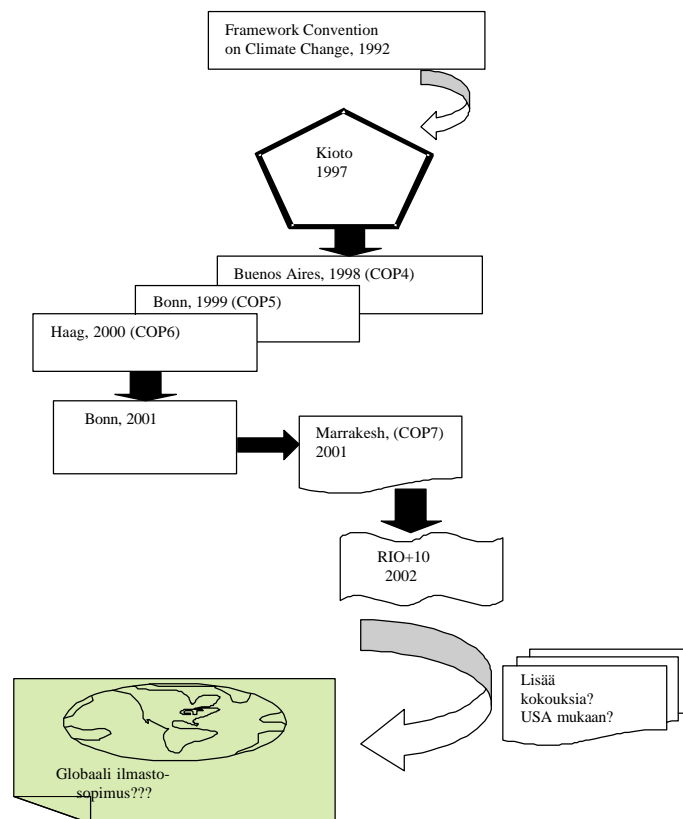
1.2 Ilmastopolitiikka

Ennusteet ilmaston muuttumisesta, sen seurauksista ja niiden voimakkuuksista ovat epävarmoja, mutta mahdolliset kielteiset seuraukset nähdään yleisesti niin merkittäviksi, että riskejä halutaan välttää. YK:n ilmastopimuksen Kiotossa järjestetyn osapuolikokouksen päätös velvoittaa teollisuusmaat vähentämään viiden vuoden sopimuskauden (v. 2008-2012) aikana kasvihuonekaasupäästönsä tasolle, joka on keskimäärin 5 % alle vuoden 1990 tason. EU:n sisäisessä taakanjaossa Suomelle tuli niin sanottu nolla-tavoite, joka sitoo Suomen palauttamaan päästönsä vuoden 1990 tasolle velvoitekauden aikana (KTM 2000).

Kansainväliset ilmastokokoukset ovat edenneet vaihtelevalla menestyksellä lukuisten vaiheiden kautta Yhdistyneiden kansakuntien perustettua Hallitustenvälisen ilmastomuutospaneelin, IPCC:n vuonna 1988 (kuva 1). Globaali ilmastonsuojelun puitesopimus (United Nations Framework Convention on Climate Change), solmittiin vuonna 1992 Rio de Janeirossa. Ilmastopimuksen toimeenpanoon liittyviä kysymyksiä käsitellään vuosittain pidettävässä Ilmastopimuksen sopimuspuolten konferensseissa (Conference of Parties, COP). Useiden osapuolikokousten jälkeen saatiin aikaiseksi Kioton sopimus. Vaikka Kioto olikin suuri läpimurto, ovat neuvottelut jatkuneet nykyhetkeen saakka ilman kaikkien osapuolten yksimielisyyttä.

Haagissa v. 2000 pidetty ilmastokokous ei johtanut kansainväliseen yhteisymmärrykseen ja sopu Kioton mekanismien täyttämistä jäi saavuttamatta. Bonnin ilmastokokouksessa v. 2001 saatiin kuitenkin aikaiseksi sopimus, jossa ovat mukana kaikki maaryhmät tärkeintä yksittäistä päästölähdettä, Yhdysvaltoja lukuun ottamatta, jonka

suurena pitämä päästövähennysvelvoite Kioton pöytäkirjassa pidättelee sitä ainakin toistaiseksi sopimuksen ulkopuolella (MMM 2001). Sittenkin Marrakeshin kokouksessa päästiin sopuun myös Kioton pöytäkirjan täsmennyksistä ja soveltamissäännöistä. Euroopan Unioni Suomi mukaan lukien ratifioi pöytäkirjan Johannesburgissa 2002 pidetyssä kestävän kehityksen huippukokouksessa (Rio+10/WSSD).



Kuva 1. Ilmastokokousten eteneminen.

Suomen hallituksen ohjelmassa todetaan, että hallitukselle on annettu tehtäväksi laatia ja toimeenpanna kansallinen suunnitelma kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämisestä velvoitteiden mukaisesti. Velvoitteet halutaan täyttää ilman talouden ja työllisyyden kasvun, tai julkisen velan laskemisen edellytysten heikentymistä (KTM 2000). Haaste on kuitenkin melkoinen, koska päästövähennystarve tulee olemaan

suuri sovitulla velvoitteilla suhteessa nykyiseen päästötasoon, sekä Kauppa- ja teollisuusministeriön skenaarioihin päästöjen kehityksestä tulevaisuudessa. Lisäksi, riippuen ohjauskeinoista, joilla tavoitteisiin pyritään, olisi lähes mahdotonta välttää rakennemuutoksia esimerkiksi toimialojen välillä ja tuotantotekniikassa (Pohjola 1998). Pahimmillaan teollisuudelle kohdistuvat ylimääräiset kustannukset voisivat johtaa jopa joidenkin toimialojen kilpailukyvyn heikkenemiseen, niin kansallisesti kuin kansainvälisestikin ja sitä kautta paineisiin laskea esimerkiksi työvoimakustannuksia (Pohjola 1998). Siksi onkin tärkeää kartoittaa erilaisten ohjauskeinojen kansantaloudelliset vaikutukset ja hakea kustannustehokkaimmat kokonaisratkaisut. Lisäksi on varauduttava siihenkin, että ensimmäisen velvoitekauden jälkeen seuraa uusia velvoitekausia ilman epäjatkuvuuskohtia, mahdollisesti suuremmilla päästövähennysvaatimuksilla.

Vaihtoehtoisia keinoja vaikuttaa päästöihin voisivat olla esimerkiksi yhtäläinen päästövero hiilelle, polttoaineiden verotuksen kiristäminen ja päästörajoitteiden asettaminen. Näistä ainakin jälkimmäinen näyttää toteutuvan Euroopan Komission esittämän päästökauppadirektiivin muodossa. Siinä Euroopan Unionin teollisuuslaitoksille asetetaan yksipuolisesti päästökiintiöt jo vuodesta 2005 lähtien. Kioton pöytäkirjan mukainen, kaikkien teollisuusmaiden (Yhdysvallat ei välttämättä mukana) välinen päästökauppa alkaa vasta vuonna 2008 (YM 2001).

1.3 Päästökauppa

Kioton pöytäkirja ei aseta valtioille rajoituksia päästötoimista aiheutuvien kustannuksien kohdistamisen suhteen. Pöytäkirja tarjoaa sopijaosapuolille mahdollisuuden hyödyntää niin kutsuttuja joustoja, joita on alettu kutsua Kioton mekanismeiksi.

Kioton mekanismeja ovat seuraavat:

- Hankekohtainen yhteistoteutus (Joint Implementation)
- Puhtaan kehityksen mekanismi (Clean Development Mechanism)
- **Päästökauppa (Emission Trading)**

Joustomekanismien käytön perusajatus on, että globaalisti päästöjen vähentäminen pitäisi tehdä siellä, missä vähentämisen rajakustannukset ovat matalimmat (KTM 2000). Mekanismeille on kuitenkin yhteistä pöytäkirjan rajoitus niiden täydentävästä luonteesta: yksinomaan niillä ei mikään maa voi hoitaa päästövähennystavoitettaan (MMM 2000).

Päästöjen puhtaaseen kiintiöintiin verrattuna päästökauppa tarjoaa lähtökohtaisesti joustavan ja kustannustehokkaan vaihtoehdon päästötavoitteen saavuttamiseksi. Euroopan komission dokumentissa ”Vihreä kirja kasvihuonekaasujen päästökaupasta Euroopan Unionissa” 2000 arvioidaan, että koko unionin laajuiset päästömarkkinat säästäisivät tehokkaamman allokaation avulla noin 20 % Kioton velvoitteiden toteutuskustannuksista.

Päästökauppajärjestelmä voi rakentua kahden eri perusvaihtoehdon tai niiden yhdistelmän varaan (Jaakko Pöyry Consulting Oy 2000):

- 1) Päästöoikeuksien kauppa (allowance trading) eli "cap and trade". Viranomaiset asettavat päästöille kiintiön tai katon, joka jaetaan toimijoille päästöoikeuksina. Mikäli toimija alittaa oman kiintiönsä, se saa myydä (tai tallettaa) ylijääneen osan. Mikäli taas toimija ylittää oman kiintiönsä, se joutuu ostamaan puuttuvan määrän muilta toimijoilta.
- 2) Päästövähennemien kauppa (credit trading) eli "baseline and credit". Viranomaiset määrittävät toimipaikka- tai projektikohtaiset päästötasot. Toimijat, jotka vähentävät päästöjään tämän tason alapuolelle, voivat myydä (tai tallettaa) ylijääneen osan.
- 3) Edellisten yhdistelmä (osa toimijoista sitoutuu päästökattoihin, osa pyrkii esim. ominaispäästöjen vähentämiseen).

UNCTAD:n raportissa vuodelta 1998 todetaan, että kiintiökauppa (cap and trade) on osoittautunut ylivoimaiseksi suhteessa kauppaan päästöoikeuksilla sekä taloudellisesti että ympäristön kannalta.

Päästökaupalle on jo olemassa käytännön pohjaa. Maailman ensimmäinen kansainvälinen sähköpörssi, pohjoismainen Nordpool toimii edelleen ja samanlaisen, monikansallisenkin "markkinapaikan" luominen hiilidioksidille lienee mahdollista. Yhdysvalloissa on happosadeohjelmassa toiminut rikkidioksidin päästökauppa sähköntuotantolaitosten välillä. Kasvihuonekaasujen päästökauppa voisi muistuttaa tietyissä määrin sitä (Jaakko Pöyry Consulting Oy 2000), vaikka kritiikkiä taloudellisesta toimivuudesta, yritysten osallistumishalukkuudesta ja rinnastettavuudesta onkin esitetty

(Liski, M. 1998). Hollanti hankki v. 2001 hiilidioksidin päästöoikeuksia yhteistoteutushankkeesta itäeurooppalaisten investoijien kanssa. Suomesta ainakin Fortum Oyj on saanut toteutettua kaupan, jossa myytiin polttoaineen vaihdolla aikaansaatuja päästövähennyksiä Kanadaan. Lisäksi kaupankäyntiä päästökiintiöillä on kokeiltu simuloidusti Gets2-projektissa (Greenhouse gas and Electricity Trading Simulations 2), jossa 35 eurooppalaista yritystä osallistui virtuaaliyritysten väliseen kauppaan. Mukana Suomen virtuaalisähköyrityksessä olivat Pohjolan Voima, Finergy, Helsingin Energia ja Fortum Oyj (Pohjolan Voima 2001).

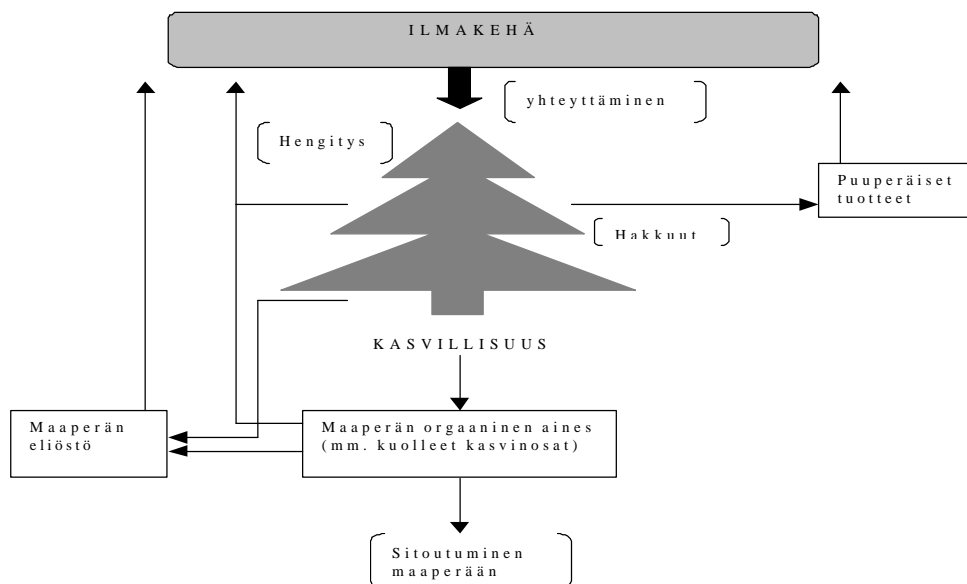
Koska päästötrendi on jo pitkään ollut (Suomessa) nouseva, myytävää ei yksittäisiä tahoja lukuun ottamatta juuri ole, vaan sitä täytyy aikaansaada esim. seuraavin toimin (Jaakko Pöyry Consulting Oy 2000):

- Polttoaineiden vaihto energiantuotannossa
- Energiansäästötoimenpiteet
- Kaatopaikat (esim. metaanin talteenotto)
- **Hiilinielut** (esim. metsät)

Koska Suomen kasvihuonepäästöt ovat jo tällä hetkellä suuremmat kuin Kioton pöytäkirjan mukaisen tavoitevuoden 1990 päästöt (Ympäristöministeriö 2001), olisi kaikissa päästökauppamalleissa runsaasti potentiaalisia ostajia (Jaakko Pöyry Consulting Oy 2000), puhumattakaan tilanteesta, jossa päästökauppa olisi laajamittaisempaa, kansainvälisillä markkinoilla toimivaa.

1.4 Metsien hiilinielut

Metsät hidastavat ilmakehän CO₂ -pitoisuuden kasvua sitoessaan hiilidioksidia ilmasta (kuva 2). Metsien maaperään on sitoutunut yhtä paljon hiiltä kuin sitä on nykyään ilmakehässä, ja kasvillisuuteen puolet tästä määrästä (Liski J. 2000). Vain valtamerissä on enemmän hiiltä kuin metsissä. Vaikka ainoa pysyvä keino estää ilman hiilidioksidipitoisuuden kasvua on vähentää hiilipäästöjä, voisi metsien hiilinielu antaa kuitenkin aikaa sopeutumiseen ja uusiutuvien vaihtoehtojen kehittämiseen.



Kuva 2. Hiilen kierto metsäekosysteemissä (perustuen Induforin raportin ”Metsien hiilinielujen todennettavuus Kioton pöytäkirjan soveltamisessa” 2000, s. 8. kuvaan 3.1)

Hiilinielun suuruus ja siten sen vaikutukset päästörajoitteen saavuttamisen taloudellisiin kustannuksiin riippuvat sovelletusta hiilinielun määritelmästä sekä laskentamenetelmästä. Metsien hiilinielujen laskentamenetelmät vaativat edelleen kansainvälistä kehittämistä ja luotettavuuden arviointia. Kioton pöytäkirjan taloudellisia vaikutuksia

on arvioitu useilla globaaleilla malleilla. Näissä laskelmissa ei kuitenkaan ole otettu huomioon hiilinieluja. (MMM 2000) Hiilinielujen huomioiminen voisi korostaa joustomekanismien merkittävyyttä ja tuoda myös kokonaisedullisempia vaihtoehtoja ilmastopolitiikan toteuttamiseen.

Metsien nielujen sisällyttämistä päästökauppaan on pohdittu kansainvälisesti. Teoreettisesti kyseessä olisi tietyn ulkoisen arvon (hiilidioksidin sitomisen) sisäistäminen metsätalouden harjoittamiseen. Mahdollisen metsänielukaupan erityispiirteenä olisi, että hiilidioksidin sitoutumisen kautta aikaansaatu hiilivaraston lisäys sekä vapautuminen, eli puustomäärän kasvu ja poistuma ovat jo taloudellisen toiminnan eli puukaupan piirissä. Kasvihuonekaasujen päästökauppa loisi uudenlaisen hyödykekaupan. (MMM 2000) Yksittäiselle metsänomistajalle mahdollisesti koituvien kustannusten ja tulonmenetysten korvaaminen edellyttäisi kansallisen päästökaupan kehittämistä, jossa kasvihuonekaasuja päästävät teollisuudenalat kompensoivat metsänomistajia nielujen aikaansaamisesta. (Indufor Oy 2000)

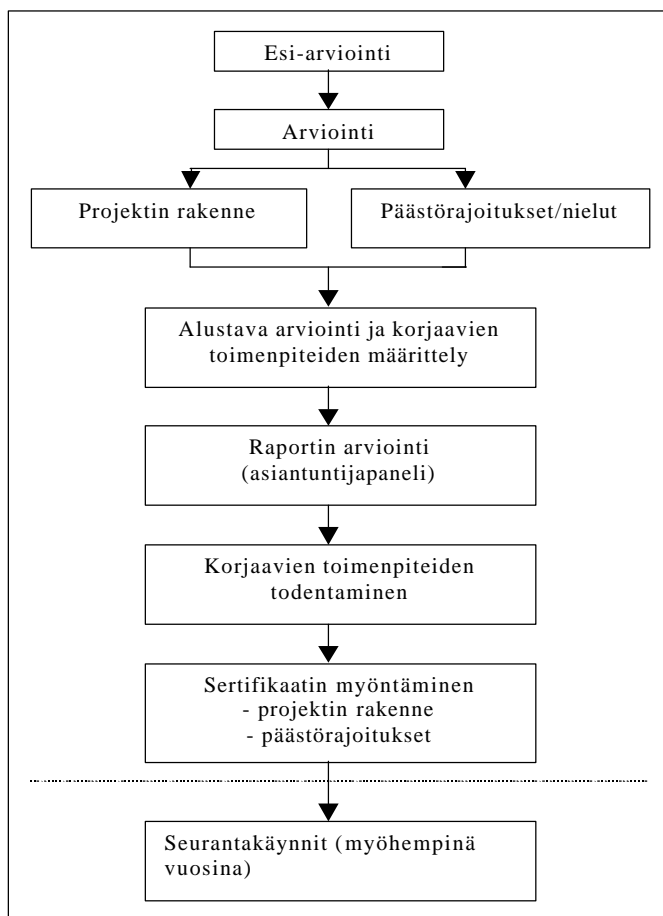
Kioton pöytäkirjan artiklan 3.3 mukainen hiilinielujen laskenta ei ota huomioon olemassa olevalla metsämaalla tapahtuvia puuvarannon ja siihen sitoutuneen hiilen määrän muutoksia. Borealisissa metsissä voi kuitenkin keskimääräisessä varannossa tapahtua suuria muutoksia, jotka ovat paljon merkityksellisempiä kuin metsämaan pinta-alamuutoksiin liittyvät puuston hiilivarannon muutokset. Artiklan 3.3 mukainen laskentatapa ei tuota kannustinta lisätä hiilen nielua tai hiilivarantoa olemassa olevalla metsämaan pinta-alalla esimerkiksi metsien kasvua tai puuvarantoa lisäämällä. (Mäkipää ja Tomppo 1998).

Pöytäkirjan kohdan 3.4 mukaan maat voivat kuitenkin sopia myös muista metsiä koskevista toimista, joiden hiilinielut ja -lähteet lasketaan mukaan päästöihin. Näiksi lisätoimiksi on esitetty mm. **muutoksia nykyisten metsien käsittelyssä**, kuten uusia puuston kiertoaikoja. Kohdan 3.4 lisätoimet voivat koskea suurtakin osaa Suomen metsistä. Jos näin käy, hiilitalouden hallinnasta tulee uusi tavoite metsien käsittelylle entisten tavoitteiden rinnalle. (Liski, J. 2000)

Suomi sai Bonnin ilmastoneuvotteluissa mahdollisuuden hyvittää hyvällä metsänhoidolla pienen osan vuoden 1990 päästöistä. Jos pykälään turvautuminen osoittautuu myös pitkän päälle viisaaksi, sen käyttäminen antaa mahdollisuuden kasvattaa päästöjä hieman täydellisen nollatavoitteen sijaan. Tämä voidaan nähdä kompensationsa ennustetulle metsiemme nettonielulle, vaikka sovittu laskutapa tekeekin metsiemme nielusta vaatimattoman. (MMM 2001) Kokonaan toinen kysymys voisi olla mahdollisilla ylimääräisillä toimilla (esimerkiksi nimen omaan hiilinielun lisäämiseen tähtävällä uudentyyppisellä metsänhoidolla) aikaansaavat nettonielut.

Suomen kasvihuonekaasupäästöt vuonna 1990 olivat ilmastopöytäkirjan sihteeristöille tehdyn raportin mukaan 75,3 miljoonaa hiilidioksiditonnia vastaava määrä. Metsäntutkimuslaitoksen suorittamien tarkennuslaskelmien perusteella metsien nettonielu oli vuonna 1990 23,8 miljoonaa hiilidioksiditonnia. Jos metsiemme puuvaurannon kasvu olisi vuosina 2008-2012 välillä 10-25 milj. m³ vuodessa, niin tällöin kasvun aikaansaama hiilen vuotuinen nettonielu olisi noin 3,5-8,8 Tg vuodessa (Mäkipää ja Tomppo 1998) eli 13-32 miljoonaa CO₂ tonnia vastaava määrä.

Suomen puuston kokonaishiilivaraston vuotuisen nettokasvun ”arvo” voidaan teoriassa määrittellä vaihtoehtokustannusten kautta. Tällöin maamme puuston nettonielun ”arvo” olisi vaihdellut vuosina 1990-1998 noin 84 miljoonan ja 1.28 miljardin euron välillä, kun hiilidioksiditonin hinta olisi 8.4-33.6 euroa kotimaan päästövähennystoimenpiteissä (MMM 2000). Vertailun vuoksi mainittakoon, että Metsätalouden vuosikirjan 1999 mukaan tuona aikana vuotuiset bruttokantorahatulot ovat vaihdelleet n. 0.9 ja 1.7 miljardin euron välillä.



Kuva 3. Hiilinieluprojektin sertifiointi (Induforin raportti ”Metsien hiilinielujen todennettavuus Kioton pöytäkirjan soveltamisessa” 2000, s. 27. Kuva 7.1)

Jotta metsänomistajat voisivat hyödyntää metsiensä hiilinieluja päästökaupassa, on edellytyksenä nielujen verifiointijärjestelmä (kuva 3), jossa varmentaminen tapahtuisi säännöllisesti ja puolueettomasti, perustuen kansallisesti ja kansainvälisesti hyväksytyihin normeihin, samoin periaattein kuin kestävän metsätalouden sertifiointikin (Indufor Oy 2000).

Myös puuperäisiin tuotteisiin sitoutuneen hiilen mittaamisessa on avoimia kysymyksiä, joiden ratkaisu edellyttää sekä teknisiä että poliittisia ratkaisuja. Nykyinen IPCC:n laskentamalli ei lainkaan huomioi tuotteisiin sitoutunutta hiiltä, vaan katsoo sen ikään kuin vapautuneen välittömästi hakkuiden yhteydessä. Niin puuraaka-aineen ja puutuotteiden vientiä kuin tuontia harjoittavien maiden - kuten Suomen - osalta keskeinen kysymys tuotteisiin sitoutuneen hiilen osalta on se, minkä maan hyväksi valtioiden rajat ylittäneeseen metsäteollisuustuotteeseen sitoutunut hiili lasketaan: tuottaneen maan (Suomi) vai tuotteen ostaneen maan (esim. Saksa) hyväksi. (Castren ja Simula 2000)

Pohjimmiltaan laskentamalleja on neljä (IPCC 2001):

- 1) Kansainvälisen ilmastopaneelin peruslähestymistapa, jossa oletetaan, että kaikki puunkorjuussa kaadettava puumassa hajoaa heti, eli tuotteisiin ei sitoudu lainkaan hiiltä.
- 2) Hiilivarantomuutokseen perustuva lähestymistapa (STOX, varastonmuutosperiaate) pohjautuu hiilivarannon muutokseen sekä metsässä että tuotteissa, kunkin kansallisvaltion rajojen sisällä. Kun hiilivarastossa (hakkuutähteet, tuotteet käytössä tai jätteinä) tapahtuu kasvua, lasketaan se nieluksi ja vastaavasti varaston pieneneminen lasketaan päästökseksi. Vaikka osa metsätuotteista olisi valmistettu tuontipuusta, ei

erottelua kotimaisen ja tuodun välillä tarvitse tehdä, koska tarkastellaan koko kotimaassa olevaa metsätuotteiden varastoa.

3) Tuotannon lähestymistapa (PROD, tuotantoperiaate) pohjautuu myös varannon muutoksien mutta tässä tarkastelutavassa valmistettujen (ja vietyjen) tuotteiden hiilen varastomuutokset ovat tuottajamaan hiilitaseessa. Metsätuotteiden tuottajamaa ottaa vastuulleen metsätuotteiden koko elinkaaren hiilitaseen riippumatta siitä onko tuote käytössä omassa maassa vai vientimarkkinoilla.

4) Ilmakehän päästöjen lähestymistapa (FLOW, virtaperiaate) poikkeaa edellisistä tavoista siinä, ettei se kohdistu varantojen muutoksiin vaan keskittyy tuotanto- ja kulutussysteemiin ja ilmakehän väliseen rajapintaan eli hiilidioksidin virtoihin sisään tai ulos ilmakehästä seurantajakson aikana. Virtaperiaatteen mukaan tuoja ottaa tavallaan vastatakseen kaikesta siitä hiilestä, joka metsätuotteiden tuontivirtaan sisältyy.

Massataseiden mielessä virtaperiaate on sama kuin varastonmuutosperiaate lisättynä tuonnilla hiilen päästöinä ja viennillä hiilen nieluina. Sekä virta- että varastonmuutosperiaatetta soveltamalla päädytään maailmanlaajuisesti samaan hiilitaseeseen ilmakehän suhteen, koska tuonti vähennettynä viennillä koko maapallon tasolla laskettuna on nolla. Myös tuotantoperiaatteen soveltaminen johtaa hiilitaseen kannalta samaan lopputulokseen. (MMM 2000).

Tuotteiden huomioonottaminen lisäisi merkittävästi metsäsektorin hiilitaseen positiivisuutta. STOX-menetelmässä vaikutus on kuitenkin kahta muuta vaihtoehtoa ratkaisevasti pienempi, vaikkakin ehkä toimivin: Puutuotteita tuova maa kasvattaa rajojensa sisäpuolella olevaa hiilivarastoa, joka lasketaan hiilen nieluksi. Kun tuote hajoaa

ilmakehään, lasketaan tämä päästökseksi. Koko tuontipuutuotteen elinkaaren yli tarkasteltuna varastomenetelmä on hiilineutraali, koska tuonnin kautta kasvatettu hiilivarasto luokitellaan nieluksi toisin kuin virtamenetelmässä. Varastomenetelmä kannustaa sekä varastojen kasvattamiseen että puutuotteiden suosimiseen niin metsätaloutta harjoittavissa kuin metsätuotteita tuovissa maissa. (Castren ja Simula 2000)

Pääsääntöisesti massa- ja paperiteollisuuden tuotteiden kierto on nopeampaa ja puutuotteiden hitaampaa. Siksi eri tuotteisiin sitoutuu hiiltä eri pituisiksi ajoiksi. Tuotteisiin sitoutunut hiili säilyy myös kuluttajakäytön jälkeen, eli kaatopaikoille sitoutunut hiili voi olla pitkiäkin aikoja poissa kierrosta.

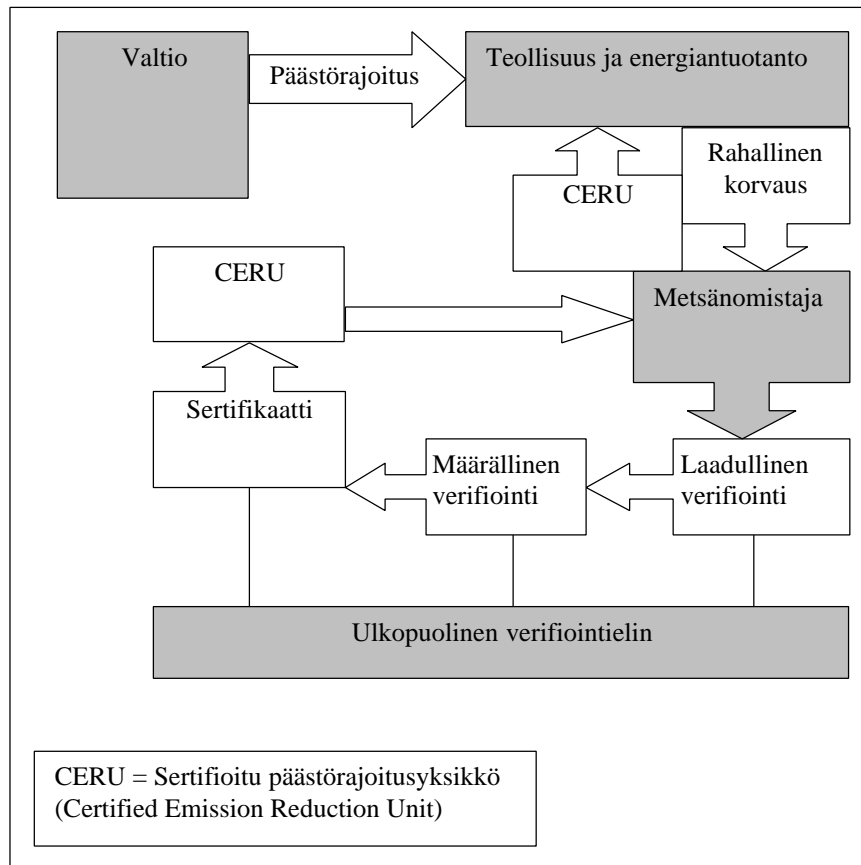
Puutuotteiden käytöllä voi olla myös merkittäviä välillisiä vaikutuksia kasvihuonekaasujen päästöihin. Esimerkiksi kun puu korvaa rakentamisessa muita tuotteita (kuten metalleja ja kiviperäisiä tuotteita), joiden valmistus aiheuttaa huomattavia fossiilisia hiilidioksidipäästöjä, rakentamisen kokonaispäästöt vähenevät. Tämä välillinen vaikutus fossiilisiin hiilidioksidipäästöihin voi olla paljon suurempi kuin nielu, joka aiheutuu itse puutuotevaraston kasvusta. (Pingoud ja Perälä 2001)

1.5 Metsien hiilinielujen markkinat ja hinnoittelu

Hiilinieluille ei ole ainakaan toistaiseksi olemassa toimivia markkinoita ja päästökaupamallit ovat vielä kehitteillä. Metsien osalta myytävää voitaisiin synnyttää perustamalla nimen omaan hiilensidontaan tarkoitettuja istutusalueita tai sitomalla hiiltä uudennlaisella metsänhoidolla jo olemassa olevissa metsissä ja määrittämällä aikaansaatu nettonielu. (Castren 2001)

Yksi Suomessa toimivaksi hahmoteltu malli perustuu järjestelmään, jossa metsänomistaja sitoutuu hiilensidontaan ja siitä maksetaan markkinoilla vallitseva hinta hiilipäästöyksiköistä, joiden yksikkönä on tonnia hiiltä (C-tonni) tai tonnia hiilidioksidia (CO₂-tonni). Sidotun hiilen määrä perustuisi puuston kokonaistilavuudessa tapahtuneen muutoksen mittaamiseen. Tästä hiilivarannon kasvusta osa voitaisiin sertifioida hiilinieluksi (kuva 4). Hyvitysosuus voisi käytännössä olla sangen alhainenkin, jotta varmistetaan ainoastaan ihmistoiminnan aikaansaaman muutoksen hyvitys. (Castren 2001)

Sertifioidut hiilipäästöyksiköt voitaisiin myydä esimerkiksi teollisuus- ja energiantuotantolaitoksille (kuva 4), joille on asetettu määrällinen päästökatto. Hinta muodostuisi maailmanlaajuisen tai alueellisen päästökaupan markkinoilla, samanlaisen marginaalitarkastelun kautta kuin muillakin hyödykkeillä. (Castren 2001)



Kuva 4. Toimintamalliesimerkki yksittäisen metsänomistajan tasolla tapahtuvasta hiilinielujen verifioinnista ja kaupasta (Soveltaen Induforin raportin "Metsien hiilinielujen todennettavuus Kioton pöytäkirjan soveltamisessa" 2000, kuvaa 9.4)

Koska teollisuuslaitoksen päästörajoituskustannusten voi olettaa olevan positiivisia ja marginaalikustannusten kasvavia (lisävähennysten yksikkökustannukset nousevat joka yksiköltä) yksittäisen teollisuuslaitoksen kannattaa rajoittaa omia päästöjään tuotantoteknologiaa muuttamalla kunnes marginaalikustannus vastaa päästöyksiköiden hintaa markkinoilla. (Castren 2001)

Vastaavasti markkinoilla tasapainohinta muodostuu klassisen marginaalitarkastelun mukaan. Korkeilla päästöyksiköiden hinnoilla tarjonta on suurta, koska yritysten kannattaa tuottaa niitä runsaasti, ääritapauksessa yrityksen ehkä kannattaa lakkauttaa teollinen tuotantonsa täysin ja myydä sille allokoitu päästökauppa muille yrityksille.

Markkinakysyntä on toisaalta pientä, koska yritysten kannattaa pikemminkin rajoittaa päästöjään kuin ostaa päästökaupasta markkinoilta. (Castren 2001)

Varsinkin jos Euroopan Komission kaavailema unionin laajuinen päästökauppa toteutuu, yksittäinen yritys on markkinoilla hinnanottaja ja hinta asetetaan eksogeenisesti. Vaikka jotkin suuret energiayritykset ehkä voivatkin vaikuttaa markkinoiden hintatasoon, yksittäiselle metsänomistajalle hinnan voi katsoa olevan puhtaasti ulkoannetun. (Castren 2001)

Hiilen hintaa on vaikeaa ennustaa ja tutkimusta ajatellen on suuntaa haettava aiemmissä tutkimuksissa käytetyistä hinnoista, hiilensidontaprojektien sekä päästövähennystoimenpiteiden arvioituista kustannuksista ja energia- tai päästöveroista. Joitakin esimerkkejä:

- Moura Costa ym. (1998) on arvioinut toteutuneiden hiilinieluprojektien perusteella, että sen hetkinen näkemys hiilinielujen vähimmäismarkkinahinnasta oli noin 3,7 €/ sidottu CO₂ tn.
- Eräs monikansallinen öljy-yhtiö on konsernin sisäisessä hiilikaupassa saanut hiilidioksiditonnin hinnaksi lähes 5,9 €(Indufor 2000).
- IPCC:n Kolmannessa arviointiraportissa kerrotaan globaalien mallinnustutkimusten esittävän Kioton tavoitteiden aiheuttamien kansallisten marginaalikustannusten olevan noin välillä 5,9-178,3 €/tn CO₂ ilman päästökaupaa ja noin 4,5 – 45,4 €/tn CO₂ Annex B –maiden päästökaupassa.

- Kauppa ja teollisuusministeriön (2001) EMS-skenaarion mukaisen päästöjen kehityksen mukaan päästövähennystarve vuonna 2010 on 24 %. Laskelman mukaan päästöjen vähentämiseen vaadittaisiin yhtäläisen päästöveron tapauksessa vero, jonka suuruus on noin 40 €/tn CO₂.
- Jerkkola (1998) arvioi tutkimuksessaan päästöjen jäädyttämiseksi Suomessa tarvittavan veron, jonka suuruus vaihteli erilaisten referenssioletusten välillä 18,5-46,3 €/tn CO₂.

1.6 Metsänomistajan optimointiongelma

Yhtälö $pf(t^*) = rpf(t^*) + rV$, ns. Faustmannin kaava, muodostaa pohjan puuntuotannon taloudelliselle optimoinnille, jossa lähtökohtana on oletus siitä, että metsänomistaja maksimoi diskontattujen nettotulojen summaa tulevaisuudesta.

Yhtälössä:

- p = puun kantohinta
- f = puuston kasvu
- t^* = optimikiertoaika
- r = reaalikorko (diskonttaus korko)
- V = paljaan metsämaan arvo

Taloudellisessa tarkastelussa faustmannilainen kiertoaikamalli perustuu seuraaviin neljään oletukseen (Ollikainen 1996):

- täydellinen tietämys tulevasta puun hinnoista sekä palkoista ja muista puuntuotannon panosten hinnoista
- täydellinen tietämys tulevasta korkotasosta sekä mahdollisuus ottaa ja antaa lainaa rajattomasti vallitsevalla korkotasolla (täydelliset pääomamarkkinat)
- täydellinen tietämys metsän kasvufunktioista ja kasvuolosuhteista annetuilla panoksilla
- täydelliset metsämaan markkinat, joilla on täysin vapaa hinnanmuodostus.

Nämä oletukset jättävät kaiken epävarmuuden ja stokastisuuden pois mallista. Metsänomistajan jälkeläisineen oletetaan vain havainnoivan tai tietävän kaavan parametrien arvot ja noudattavan niiden antamaa optimaalista hakkuukiertoa koko elinaikansa. (Castren 2001) Vaikka oletukset maa- ja pääomamarkkinoiden täydellisyydestä eivät välttämättä ole realistisia ovat viimeisten vuosikymmenien aikana tehdyt tutkimukset osoittaneet, että Faustmannin malli on talousteoreettisesti oikea tapa arvottaa puuntuotantoa (Viitala 2002).

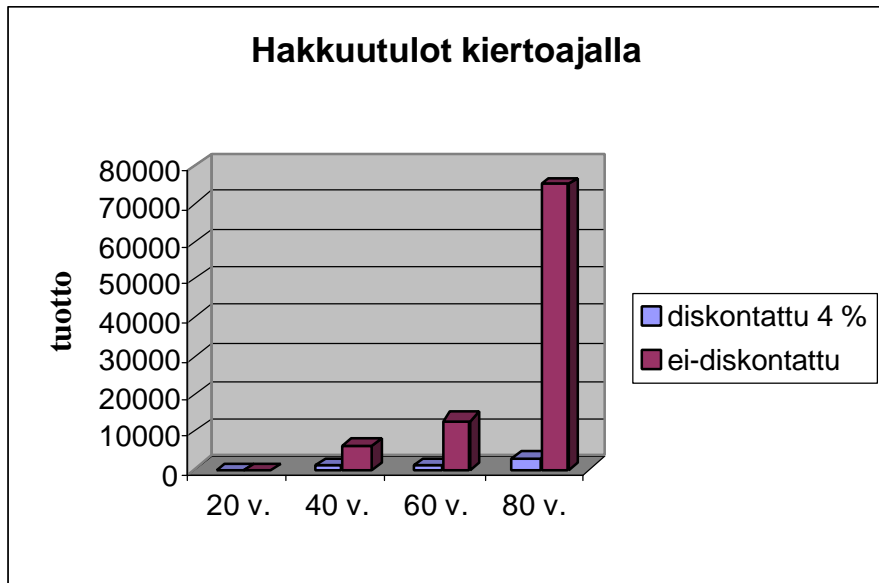
Kun metsikön kasvatusta pyritään optimoimaan huomioiden taloudellisten tavoitteiden lisäksi moninaisia biologisia rajoitteita, etsitään metsikön hakkuuohjelma, joka maksimoi esimerkiksi tulevaisuuden nettotulojen nykyarvoa. Hakkuuohjelman on sisällettävä kiertoajan lisäksi optimoidut (= oikein ajoitetut ja sopivan voimakkaat)

kasvatushakkuut, jotka ovat olennaisia toisaalta puuston kasvun ja laadun sekä toisaalta diskonttausajattelussa tärkeän tulojen ajoituksen kannalta (kuva 5).



Kuva 5. Esimerkki kasvatusmetsän tilavuuden kehityksestä.

Kun tuloja diskontataan nykyarvoiksi, halutaan laskea tulevaisuuden arvot vähempiarvoisempina kuin aiemmin saatavat vastaavat summat. Tämä voidaan perustella pääoman vaihtoehtoisilla tuotoilla ja kustannuksilla. Diskonttauskorko vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti aika pienentää tulevaisuuden rahavirtojen nykyarvoja (kuva 6).



Kuva 6. Nykyarvoajattelu. Saman metsikön tuotot 80-vuoden kiertoajajan aikana diskontattuina 4 %:lla ja diskonttaamattomina.

Valittu hiilikompensaatiomalli on metsänomistajan optimoinnin kannalta olennainen tekijä. Jos hiilinielun kasvu määritellään kertaluontoiseksi, kompensaatiot tulevilla kiertoajoilla saattaisivat jäädä kokonaan pois. Mikäli kompensaatiot ovat jatkuvia, hiilivarannon muutosten mukaisia, metsänomistajaan kohdistuu myös korvausvelvoite, koska kaadetusta puustosta vapautuu hiiltä takaisin ilmakehään, riippuen tosin osittain siitä, kuinka järjestelmä kohdentaisi puutuotteiden hiilitaseen omistuksen.

Toinen keskeinen vaikuttaja on muutettua metsänhoitoa vastaan saatavien kompensaatioiden ajoitus. Mikäli hiilensidonnasta maksetaan vasta hiilensidontasitoumuksen lopussa, voitaisiin varmistaa hiilinielun toteutuminen. Vaikutus metsätalouden tuloihin ja sitä kautta kannustin muuttaa metsänhoitoa jäisi kuitenkin hiilen hinnasta riippuen pieneksi diskonttauskoron alentaessa tulojen nykyarvoa. Pahimmillaan, mikäli hakkuista seuraavia päästöjä ”sakotettaisiin” nopeammalla aikataululla kuin kasvusta seuraavista nieluista hyvitetäisiin, voisi syntyä tilanne, jossa hiilitalouden nykyarvo

tulisi negatiiviseksi (Castren 2001). Sitoumuksen alussa maksetun kompensaation vaikutus olisi luonnollisesti kannustavampi, mutta nielun pysyvyys olisi epävarma. Täydellinen korvaussysteemi seuraisi jatkuvasti muutoksia, vaikuttaen jatkuvasti myös metsätalouden tuloihin tarkastelujaksolla. Tällöin esimerkiksi vuosittain suoritettut mittaukset mahdollistaisivat keskimääräisen vuotuisen muutoksen laskemisen.

2 HAVAINTOJA AIKAISEMMISTA TUTKIMUKSISTA

2.1 Aikaisempien tutkimusten vertailukelpoisuus

Hiilensidonnasta metsätaloudellisin keinoin on tehty lukuisia muita tutkimuksia, joiden tulokset ovat olleet perustekijöiltään melko yhteneväisiä. Luonnollisesti tarkemmissa analyyseissä löytyy eroja johtuen erilaisista maantieteellisistä, puulajittaisista (ym. aineistollisista), tavoitteellisista ja metodologisista lähtökohdista. Tutkimustuloksia verrattaessa onkin tärkeää huomioida lähtökohtien erot tutkimuskohtaisesti.

2.2 Hiilensidonnan potentiaali suomalaisissa metsissä

Karjalainen (1994) kehitti lisensiaattityössään metsien ja puutuotteiden hiilibudjetin arviointimenetelmän, jossa puutuotteiden eri käyttömuodot huomioitiin. Simuloinneissa havaittiin, että metsäsektori kykeni kokonaisuudessaan (Suomessa) hiilen nettosidontaan ainakin männyn ja kuusen osalta. Metsäsektorin keskimääräinen hiilivarasto yli kiertoajan laskettuna oli tutkimuksen mukaan, riippuen metsänkäsittelystä ja ilmastosta, kuusen käyttöön perustuessaan 124,3 – 132,1 Mg C/ha, männyn käyttöön perustuessaan 120,7 – 129,2 Mg C/ha ja rauduskoivun käyttöön perustuessaan

91,2 – 105,8 Mg C/ha (1 Mg = 1 megagramma = 10^6 g). Samanlaisten käsittelemättömien metsiköiden keskimääräinen hiilivarasto oli 18 – 30 % suurempi kuin metsäsektorin keskimääräinen hiilivarasto. Käsittelemättömien metsien keskimääräiset hiilivarannot todettiin siis suuremmiksi kuin käsiteltyjen, minkä perusteella metsänhoitotoimenpiteiden voidaan olettaa pienentävän metsän keskimääräistä hiilivarantoa. Käänteisesti ajatellen metsänhoitotoimenpiteitä vähentämällä voitaisiin metsän keskimääräistä hiilivarantoa lisätä huomattavasti Suomessa.

2.3 Hiilensidonnan kustannukset ja kannattavuus

Moura-Costa ja Stuart (1998) arvioivat hiilimarkkinoiden kehitysmahdollisuuksia ja toteutuneita metsällisiä hiilensidontaprojekteja eri puolilta maailmaa. Hiilensidonnan kustannukset sidottua hiiliyksikköä kohti osoittautuivat monissa tapauksissa päästövähennystoimenpiteiden kustannuksia pienemmiksi. Toisin sanoen hiilen sitominen metsiin voi olla kustannustehokas vaihtoehto ilmastopolitiikassa. Metsien hiilitalouden kannattavuus on arvioitu mahdolliseksi myös Niskasen ym. (1996), Van Kooteenin ym. (1995), Sedjon (1999) ja Castrenin (2001) tuloksissa, riippuen luonnollisesti tutkimusten oletuksista ja kohteista. Niskasen ym. (1996) ja Pussisen ym. (2000) mukaan hiilensidonnan kannattavuuteen vaikuttivat huomattavasti käytetyn koron suuruus ja hiilelle oletettu arvo. Induforin (2000) selvityksessä muistutettiin myös hiilikompensaatiojärjestelmästä koituvista korkeista kustannuksista. Varsinkaan yksittäisten metsälöiden tasolla tapahtuvaa hiilivirtojen verifiointia ja sertifiointia ei siksi pidetty kovin realistisena.

2.4 Hiilitalous ja metsänhoito

Kun tutkimuksissa otettiin tavoitteeksi kasvattaa metsään keskimäärin sitoutuneen hiilen määrää, oli sekä Niskasen ym. (1996), Van Kootenin (1995), Karjalaisen ym. (2000), että Pussisen tuloksissa yhteisenä tekijänä kiertoaikojen pidentyminen. Aikaisemmissa tutkimuksissa huomio onkin kohdistettu juuri päätehakuun ajankohtaan. Kasvatushakkuidenkin vaikutuksia hiilitaseeseen on tutkittu (Sedjo 1999), mutta niiden aktiivista säätelyä hiilensidontaan perustuvassa metsänhoidossa ei ole korostettu ainakaan taloudellisesti optimoiden Suomen olosuhteissa.

2.5 Muut havainnot

Niskanen ym. (1996) havaitsivat metsämaan kasvupotentiaalin odotettavasti vaikuttavan sidottavissa olevan kokonaishiilen määrään. Karjalaisen ym. (2000) tutkimushankkeessa otettiin huomioon myös maaperän hiilivarastot, ja mielenkiintoista on se, että kiertoaikaa lyhennettäessä suurempi hakkuutähteen kertymä kasvatti maaperän hiilivarastoa. Pussisen ym. (2000) julkaisussa muistutetaan mahdollisuudesta paranevista kasvuolosuhteista tulevaisuudessa (ilmaston lämpeneminen, typpilaskeuma), mikä tulisi huomioida laskelmissa. Induforin (2000) selvityksessä visioitiin kaukokartoitusmenetelmien ehkä tulevaisuudessa mahdollistavan yksittäistenkin metsälöiden hiilitase seurannan.

Pohjola (1998) arvioi päästöjen rajoittamisen aiheuttavan taloudessa rakennemuutoksen. Suomen metsäteollisuudessa tuoterakenne muuttuisi sellusta valmistettavan paperin lisätessä osuttaan sähköä käyttävän mekaanisista massoista valmistettavan

paperin kustannuksella. Suomen metsäteollisuuden kilpailukyky saattaisi heikentyä kansainvälisesti, koska Ruotsin ja Kanadan sähköntuotannossa fossiilisten polttoainneiden osuus on pienempi kuin Suomessa.

Pingoud ja Perälä (2001) inventoivat vuosina 1980, 1990 ja 1995 puutuotteiden hiilivarastot Suomessa. Sitoutuneen hiilen määrä oli odotetusti jo Suomenkin tasolla merkittävä. Tarkkaa määritystä tosin hankaloittivat lukuisat tekniset ja laskennalliset epävarmuustekijät.

3. TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tarkastella metsänkasvatuksellisen hiilensidonnan kustannuksia vaihtoehtoiskustannusten avulla ja hiilikompensaation vaikutusta metsänkasvatuksen kannattavuuteen sekä metsänhoitoon. Tutkimus perustuu koealoihin, malleihin ja laskelmiin eteläsuomalaisista männiköistä käyttäen SMA-ohjelmiston (Valsta ja Linkosalo 1996) hiilikomponentilla täydennettyä versiota.

Hiilensidonnan kustannusten määrittely antaa mahdollisuuden arvioida sidottavien hiiliyksiköiden kustannuksia rahamääräisinä ja sitä kautta, vaikkakin karkeasti, metsänhoidollisen hiilensidonnan mahdollisuuksia muodostua vartenotettavaksi joustomekanismivaihtoehdoksi Suomen olosuhteissa.

Tutkimuksessa tarkastellaan myös metsän kasvattamisen kannattavuutta kriteerinä metsänomistajan tulojen nettonykyarvo ja käytettävän korkokannan vaikutusta, kun oletetaan hiilelle toimiva markkinamekanismi, jossa sitoutuvalla ja vapautuvalla hii-

lellä on metsänomistajalle taloudellista merkitystä. Hinta, joka hiiliyksiköille määräytyy, vaikuttaa hiilensidonnan nettohyötyyn. Hintatason jäädessä huomattavan alhaiseksi voi myös vaikutus metsänomistajan käyttäytymiseen jäädä mitättömäksi.

Metsänhoidollisista muutoksista selvitetään hiilikompensaation vaikutukset harvennusten ajoituksiin ja voimakkuuksiin, sekä kiertoaikojen pituuteen olettaen metsänomistajan mukauttavan metsänhoitopäätöksensä uuteen taloudelliseen optimitilaan.

4. MENETELMÄT JA AINEISTO

4.1 Stand management assistant (SMA-ohjelmisto)

Metsikön käsittelyohjeiden laadinnassa voidaan hyödyntää numeerisia malleja puuston kehityksestä. Nämä mallit voidaan yhdistää optimointialgoritmeihin, jolloin voidaan ottaa huomioon samanaikaisesti eri toimenpiteet ja niiden pitkän ajan vaikutukset metsikköön.

Stand Management Assistant (Valsta ja Linkosalo 1996), on ohjelmisto, jolla voidaan analysoida metsikön käsittelyvaihtoehtoja ja sillä voidaan määrittää optimaalisia käsittelyohjelmia erilaisten oletusten vallitessa sekä tarkastella graafisesti optimointituloksia. Maksimoitava tavoitemuuttuja voi olla nettonykyarvo eri korkokannoilla tai puuntuotos.

Ohjelmisto käyttää epälineaarista ohjelmointia optimia etsiessään. Algoritmi on Hooken ja Jeevesin (1961) suora hakumenetelmä. Se ei tarvitse derivaattatietoa, ja se

on moniulotteinen hakumenetelmä rajoittamattomalle epälineariselle ohjelmoinnille. Se soveltuu mm. harvennusten ajoituksen, harvennusvoimakkuuden ja kiertoajan samanaikaiseen tarkasteluun. Esimerkiksi metsälain asettamat käsittelyrajoitukset viedään optimointiin sakkofunktion avulla.

SMA-ohjelmistoa on käytetty kahden eri tyyppisen metsikön kehitysmallin yhteydessä: Kellomäen ym. (1992) SIMA-simulaattori, sekä Hynysen ja Ojansuun (1991) MELA-simulaattori. Tässä tutkimuksessa on käytetty MELA-versiota, jossa metsikön kehitys perustuu tilastollisesti estimoituihin puittaisiin kasvu- ja kuolemismalleihin.

4.2 Ohjelmiston rakenne

Ohjelmiston kolme päätoimintoa ovat simulointi, optimointi ja visualisointi. Managerial Data -osassa määritetään taloudellisia ja toimenpiteitä koskevia tietoja, kuten harvennusten lukumäärä, harvennusten joustavuus, puutavaran hinnat, paljaan maan arvo ja diskonttaus korko. Simuloitava kohde ja sen ikä määritellään erikseen tiedostoista, jotka sisältävät tiedot maantieteellisestä sijainnista, metsätyypistä, perustamistavasta ja puustotunnuksista. Vastaavasti hiilen hinta ja muut siihen tehtävät määritelmät tehdään erilliselle tiedostolle, erikseen ohjelmistoa varten täydennetylle hiilikomponentille, jossa määritellään hiilen hinta ja vapautumisnopeus puutuotteista. Haluttaessa kiertoajan keskimääräiselle puuston tilavuudelle (ja sidotun hiilen määrälle) voidaan asettaa vähimmäistaso.

Optimization Data-osassa määritellään optimoinnin parametrit, alkuratkaisu ja ohjataan optimointia. Simulation View-osa tuottaa kuvaajia valittujen metsikkötunnusten kehityksestä kiertoajan kuluessa. Yksityiskohtainen tekstitulostus tallentuu tiedostoon, josta sitä voidaan jälkikäteen tarkastella. Erilaisten puustotunnuksien kehitystä voidaan esittää myös kuvamuodossa.

4.3 Tutkimukseen valitut asetukset ja parametrit

- Ohjelmisto mahdollistaa metsälain kiertoaika rajoitteiden huomioinnin, mutta tutkimuksen tavoitteiden kannalta on tarkoituksenmukaisempaa olettaa vapaa optimointitilanne, jotta hiilen arvottamisen vaikutukset erotettaisiin ilman ulkoisia tekijöitä. Lain vaikutus testataan pienimuotoisemmin yhdellä aineiston koealoilla.
- Pohjapinta-alan kasvun tason kertoimeksi asetettiin 0.9 johtuen oletuksesta, että valitut koealat edustavat keskimääräistä parempia metsiä.
- Harvennusreaktiokerroin 0.5, tavoitteena realistinen kasvun suureneminen.
- Tukkipuun hinnan järeyskorjaus vastaa Paajasen (1997) esittämiä arvosuhteita.
- Tukkivähennys 30 %, perustellen sillä, että simuloitujen metsien lähtötilanteeltaan hoitamattomia ja siksi ehkä puustollisilta laaduiltaan keskimääräistä huonompia sekä toisaalta kasvupaikoiltaan edullisia, mikä saattaa aiheuttaa sallitun lustonleveyden ylittymisen.
- Harvennusprosentti maksimissaan 40 % tilavuudesta.
- Tukkipuun tienvarsihintam³: 305 mk. (51.3 €). Kuitupuun 160 mk. (26.9 €). Vertailtavissa Metsätilastollisessa vuosikirjassa (1999) esitettyihin trendeihin, korjuukustannukset huomioiden, ilman ALV:a

- Uudistamiskustannukset: 4000 mk/ha. (n. 672.8 €), ilman ALV:a.
- Vaihtoehtoiset korkokannat 3 ja 4 %. Yleisesti metsäekonomiassa käytettyjä korkokantoja.
- Ohjelmiston optimointiosassa asetettu: No. of reoptimizations: 9. No. of random points: 300. No. of neighborhood searches: 2. Convergence tolerance: 0.003. Havaittu aiemmissä töissä riittävän tarkoiksi, eivät kuitenkaan liian raskaita optimoinnin viemän ajan kannalta.
- Hiilen hinnat: Euroa/m³ runkopuuta. (oksien, neulasten, ym. rungon ulkopuolisten osien hiili jätetään huomioimatta). Tuloksiin kuitenkin hiilidioksiditonneiksi muuntokertoimilla laskien. Männyllä 309.1 kg. hiiltä/m³ (Karjalainen ja Kellomäki 1996) ja hiilidioksidiksi kertoimella 44:12.
- Hiilen vapautumisnopeus: Karjalainen T. ym. 1994 mäntysahatavaralle ja kuitupuulle esittämien arvioiden mukaisesti.

Optimoitavat metsänhoitopäätökset ovat harvennusten lukumäärä, voimakkuus ja ajankohta sekä kiertoajan pituus.

4.4 Aineisto

Metsäntutkimuslaitoksen aineistosta valittiin 6 mitattua koealaa eri puolilta Etelä-Suomea. Kriteereinä näytteen valinnassa olivat yhteinen puulaji (mänty), vaihtelevat kasvupaikan ominaisuudet, erilaiset syntyvät ja nuoret iät, joilla tavoiteltiin vaihtelevia lähtötilanteita (taulukko 1). Männiköiksi kohteet lienevät puuntuotoskyvyiltään hyviltä kasvupaikoilta ja lähtötilanteet poikkeavat paljoltikin koealojen kesken, koska simulointien aloitukset käynnistyvät nykyhetkellä, koealasta riippuen 26 – 38 vuoden ikäisissä metsissä, mihin asti metsät ovat kehittyneet taimikonhoitoa lukuun ottamatta ilman hoitotoimenpiteitä.

Taulukko 1. Tutkimuksessa simuloitujen koealojen metsikkötietoja.

H_{100} = pituusboniteetti

N = runkoluku/ha

PPA = pohjapinta-ala

Dg = pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta

Hg = pohjapinta-alalla painotettu keskipituus

H_{dom} = valtapituus

V = tilavuus, m^3/ha

Koe-ala	H_{100}	Perust. tapa	Ikä (v)	N	PPA	Dg	Hg	H_{dom}	V	V tukki	V Kuitu	Kunta
1	23.9	Istutus	25	2375	24.11	12.04	9.64	10.12	124.4	0.0	118.4	Pieksämäki
2	24.3	Luont.	38	1500	23.83	15.48	11.50	12.12	141.3	33.4	104.4	Ruokolahti
3	25.7	Luont.	27	1600	26.18	15.44	12.68	13.04	171.3	23.5	143.8	Kitee
4	27.0	Kylvö	26	1725	19.42	12.90	10.69	12.00	109.0	3.6	98.2	Valkeala
5	28.4	Kylvö	28	1875	26.63	14.17	11.43	12.14	156.6	9.1	143.1	Heinola
6	29.1	Kylvö	29	2325	26.91	13.12	12.23	13.10	170.7	14.9	149.0	Lappeenranta

4.5 Muut oletetut tekijät

Tarkasteltavien metsien on tässä tutkimuksessa oletettu kuuluvan yksityisen metsänomistajan omistukseen ja metsänomistajan ainoaksi tavoitteeksi katsotaan tulojen nykyarvon maksimointi äärettömällä aikahorisontilla. Diskontauskorot, 3 ja 4 %, oletetaan vakioiksi (täydelliset pääomamarkkinat). Samoin puun ja hiilen hinnat oletetaan reaalisesti vakioisiksi, kuten myös puuntuotannon panokset ja metsämaan hinta. Ulkoisvaikutuksia ei ole, tai niillä ei ole vaikutusta päätöksentekoon.

Kasvuolosuhteet ja kasvufunktiot oletetaan muuttumattomiksi; esimerkiksi ilmastonlämpenemisen tai typpilaskeuman lannoitusvaikutuksen ei oleteta vaikuttavan kasvuun tulevaisuudessa. Metsälain asettamien rajoitusten vaikutuksia testataan yhdessä metsikössä esimerkinomaisesti. Ulkoisten rajoitteiden huomioiminen saattaisi estää vapaassa päätöstilanteessa tapahtuvien muutosten havaitsemisen, vaikka reaali maailmassa metsälaki vaikuttaisikin.

Hiilitaseen laskemisessa huomioidaan ainoastaan runkokuun määrän muutokset. Käytännössä hyvinkin olennaiset metsämaan ja maan yläpuolisen muun biomassan hiilitaseet on rajattu pois mallin yksinkertaistamiseksi. Tutkimuksen kompensatiomalli olettaa metsistä jalostettaviin tuotteisiin sitoutuvan hiilen arvon sisältyvän metsänomistajan hyväksi laskettavaan hiilikirjanpitoon.

Tutkimuksessa oletetun kompensatiomallin tarkoituksena on lisätä hiilinielua oletamalla hiili markkinakelpoiseksi tuotteeksi, mikä yhtenä metsätalouden tuotoksena kannustaisi metsänomistajaa uudelleenlaiseen metsänhoitoon. Tällöin odotetaan puuston keskimääräisen tilavuuden kasvavan ja puhuttaessa riittävän suurista määristä eri

metsänomistajia ja eri ikäisiä metsiköitä hiilitase muodostuisi pysyvästi uuteen tasapainotilaan ja hiilinielu suurensi.

Koska koko tutkimusaihe perustuu toistaiseksi pitkälti karkeisiin ennustuksiin ja oletuksiin tulevaisuuden päätöksenteosta sekä osin keskeneräisiin muihin tutkimuksiin, on tarkkoihin lukuihin suhtauduttava kriittisesti ja kiinnitettävä huomiota ennen kaikkea laadullisiin tuloksiin.

5. TULOKSET

5.1 Hiilensidonnan kustannukset

Kun halutaan arvioida hiilensidonnan kustannuksia, voidaan hyödyntää SMA-ohjelmistoa optimoimalla koealojen metsänhoito asettamalla ylimääräisiä rajoitteita. Rajoittamalla optimointiratkaisua vähimmäiskeskikuutiomäärillä kiertoaikaa kohden saadaan tietoa kannattavuuden muutoksesta suhteessa metsänhoito-ohjelmassa tehtyyn muutokseen. Kiertoajan keskitilavuusvaatimuksiksi asetettiin seuraavissa optimointitehtävissä ilman rajoitteita saadut koealakohtaisten kiertoaikojen optimikeskivolyymit/ha lisättynä A) 20 ja 40 kuutiometrillä/ha ja B) 10 ja 20 prosentilla/ha.

Lisävaatimuksella täydennetyin optimoinnin taloudellisen tuloksen nykyarvo vähennettynä ilman keskikuutiorajoitusta optimoidun tuloksen nykyarvolla, jaettuna lisätyillä keskivolyymilla antaa kustannukset lisättyä kuutiometriä kohden. Kustannus kuutiometriä kohden kerrotaan muuntokertoimilla, jolloin saadaan kustannukset sidottua hiiliyksikköä kohden. Kaavan muodossa asia voidaan esittää seuraavasti:

$$C/m^3 = (NPV_2 - NPV_1)/(VOL_2 - VOL_1)$$

$$\Rightarrow C/CO_2 \text{ tn} = C/m^3 * 0.3091 * (44/12)$$

jossa

C = keskimääräinen kustannus lisääntyntä yksikköä (puu m³, tai CO₂ tn) kohden

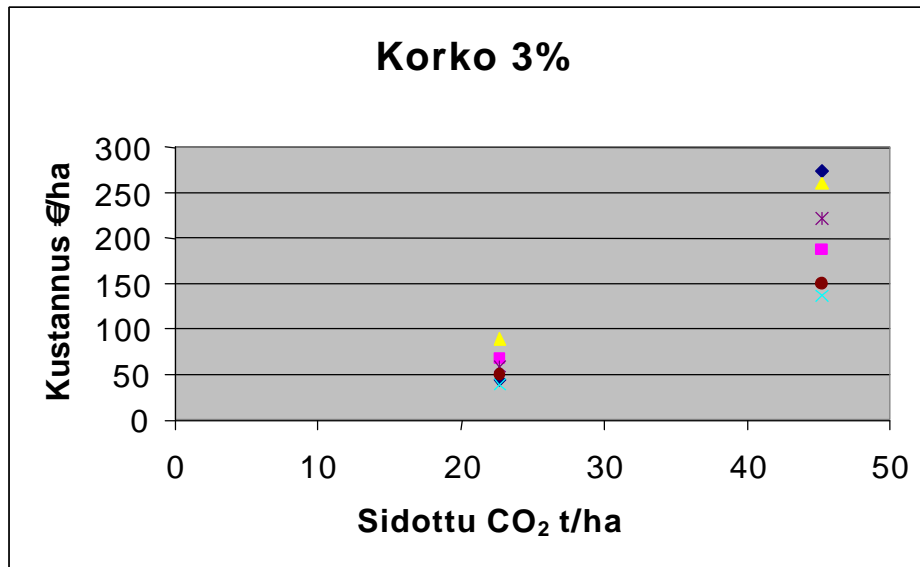
NPV₂ = kiertoajan nettonykyarvo keskikuutiovaatimuksen (rajoitteen) kanssa optimoiden.

NPV₁ = kiertoajan nettonykyarvo ilman keskikuutiovaatimusta (ilman rajoitteita) optimoiden.

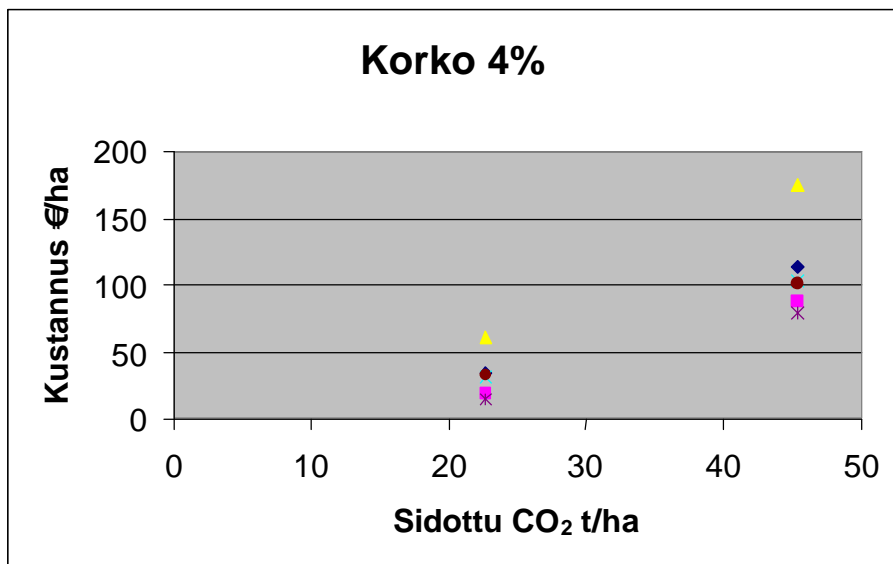
VOL₂ = kiertoajan keskikuutiomäärä rajoitteen kanssa optimoiden.

VOL₁ = kiertoajan keskikuutiomäärä ilman rajoitetta optimoiden.

Tämän lähestymistavan kiinnostavuutta korostaa se, että keskusteltaessa joustomekanismeista on haluttu yleensä huomioida ainoastaan ihmistoimin aikaansaadut, ylimääräiset hiilinielut. Sidottavan hiiliyksikön kustannus kertoo millaisilla hiiliyksikön vähimmäishinnalla tulisi metsänomistajaa kompensoida hiilensidonasta, jonka tavoitteena olisi tietyn suuruinen hiilinielun keskimääräinen kasvu kiertoajalla ja tulojen nettonykyarvon pysyminen ennallaan. Eli metsänomistajalle ei koituisi keskivolyymien ja hiilinielun kasvattamisesta taloudellista tappiota, eikä toisaalta taloudellista hyötyäkään.



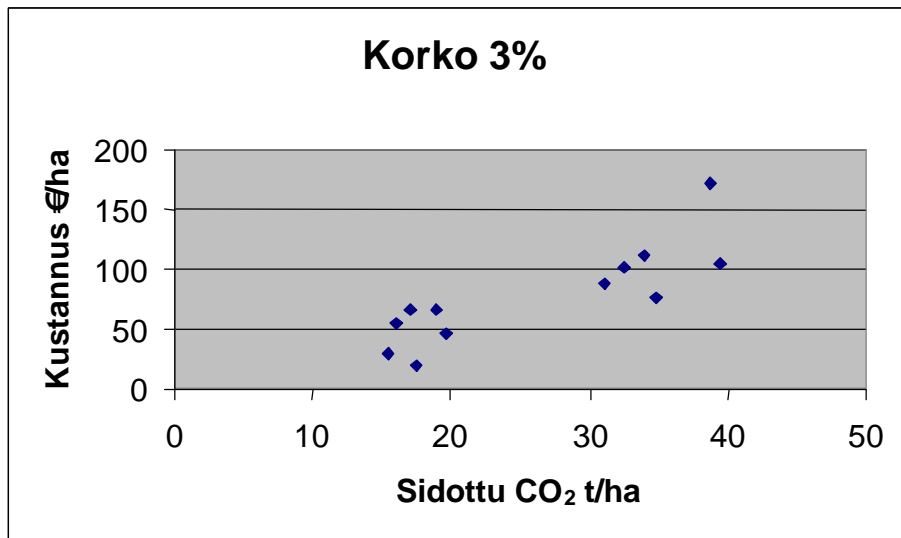
Kuva 7. Ylimääräisillä metsänhoitopäätöksillä aikaansaatujen hiilinielujen kustannukset optimaalisilla hakkuuohjelmilla hehtaaria kohti koaloilla, kun vaadittiin 20 ja 40 kuutiometrin korotukset kiertoajan optimaalisiin keskikuutiomääriin. Korko 3%.



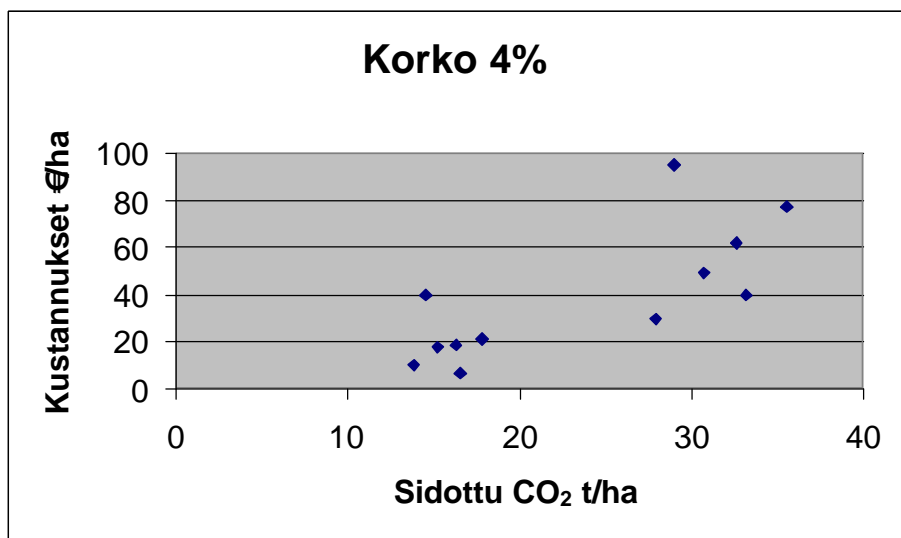
Kuva 8. Ylimääräisillä metsänhoitopäätöksillä aikaansaatujen hiilinielujen kustannukset optimaalisilla hakkuuohjelmilla hehtaaria kohti koaloilla, kun vaadittiin 20 ja 40 kuutiometrin korotukset kiertoajan optimaalisiin keskikuutiomääriin. Korko 4%.

Diskonntauskoron valinta on olennainen kustannuksiin vaikuttava tekijä (Kuvat 7 ja 8). Koron nosto pienentää hiilensidonnan yksikkökustannuksia. Tämä voidaan selittää hakkuutulojen pienenemisellä koron noustessa, jolloin myös muutoksen erotus on pienempi. Vaaditun keskimääräisen lisävolyymien suuruus vaikuttaa myös sidotun hiilitonnin hintaan. Varovaisemmasta, kahdenkymmenen kuutiometrin lisävaatimuksesta selvittää pienemmillä kustannuksilla hiiliyksikköä kohden kuin vaadittaessa neljäkymmentä lisäkuutiometriä keskitilavuuteen. Tämä kertoo nousevista rajakustannuksista, jotka lisäävät hiilensidonnan kustannuksia aina kun keskivolyymia nostetaan optimitasosta suurempaan päin. Mitä suurempia keskitilavuuksia tavoitellaan, sitä epäoptimaalisemmiksi muuttuvat kasvatushakkuut puuntuotannon kannalta (kasvatustiheys kasvaa) ja kasvupotentiaalista riippuen kiertoaikoja joudutaan pidentämään koron ja puuston ikääntymisen (kasvuprosentti pienenee) syödessä samalla kannattavuutta. Tarkemmat koealakohtaiset tulokset löytyvät taulukoituina liitteissä 1 ja 2.

Prosentteissa määritelty keskitilavuuden vähimmäismäärän korotus on hieman kuutiometreissä määriteltyä joustavampi vaatimus, koska metsiköt omaavat lähtötilanteissaan vaihtelevia tilavuuksia (taulukko 1). Arvioitaessa prosenttivaatimuksen joustavuutta kuutiovaatimukseen nähden (kuvat 9 ja 10) johtopäätöksien tekemistä vaikeuttavat kuitenkin vaihtelut boniteeteissa, eikä selvää havaintoa vaikutuksesta kustannusten suhteellisiin muutoksiin voida tällä aineistolla tehdä. Paremmilla kasvupaikoilla alhaisellakin puuston volyymilla voi olla helppo saavuttaa 10, tai jopa 20 prosentin keskitilavuuden lisäys ja päinvastoin. Tarkemmat koealakohtaiset tulokset löytyvät taulukoituina liitteissä 3 ja 4.



Kuva 9. Ylimääräisillä metsänhoitopäätöksillä aikaansaattujen hiilinielujen kustannukset hehtaaria kohti optimaalisilla hakkuuohjelmilla, kun vaadittiin 10 ja 20 % kuutiomäärien korotukset kiertoajan optimaalisiin keskikuutiomääriin koaloilla. Korko 3%.



Kuva 10. Ylimääräisillä metsänhoitopäätöksillä aikaansaattujen hiilinielujen kustannukset hehtaaria kohti optimaalisilla hakkuuohjelmilla, kun vaadittiin 10 ja 20 % kuutiomäärien korotukset kiertoajan optimaalisiin keskikuutiomääriin koaloilla. Korko 4%.

Tulokset saattavat näyttää yksittäistapauksissa epäloogisilta prosentti- ja kiinteään vaatimuksen välillä optimointien ja simulaatioiden satunnaisten ratkaisujen seurauksena. Esimerkiksi liitteen 3 taulukossa koaloilla 1. ja 2. suuremmat vähimmäiskes-

kitilavuusvaatimukset antoivat pienemmät yksikkökustannukset sidotulle hiilelle, kuin maltillisemmat vaatimukset. Kokonaiskannattavuuden optimointi voi kuitenkin johtaa tähän, koska nykyarvon maksimoimisen puun ja hiilensidonnan yhteistuotannossa ei kuulukaan tavoitella hiilensidonnan kustannuksien minimoimista. Esimerkiksi harvennusten lukumäärän muuttuminen uudessa optimiratkaisussa voi vaikuttaa hiilensidonnan kustannuksiin.

5.1 Hiilikompensaatiot ja metsänkasvatuksen kannattavuus

Edellisessä kohdassa saadut hiilensidonnan kustannukset antoivat suuntaa siitä, millä hinnoilla metsänomistajaa tulisi kompensoida sidottua ylimääräistä hiiliyksikköä kohden, jos tavoitteena olisi metsänkasvattamisen kannattavuuden säilyttäminen ennallaan. Toisin sanoen metsänomistajalle ei olisi ollut kompensatioista huolimatta tarjolla erityistä taloudellista kannustinta muuttaa metsänhoitopäätöksiä lainkaan. Ainoastaan vapaaehtoisuus tai pakottava määräys olisi selittänyt muutoksen hyväksymisen. Tässä kohdassa viedään oletettu tilanne pidemmälle olettaen, että kaikella metsän runkopuuhun sitoutuvalla ja siitä vapautuvalla hiilellä on markkinahinta, joka vaikuttaa 5-vuotiskausittain todettujen hiilivarannon muutosten mukaan taloudelliseen tulokseen yhdessä puuntuotannon kanssa. Metsänomistaja saisi tässä mallissa tuloja kun hiiltä on sitoutunut metsän kasvun myötä ja vastaavasti hakkuissa vapautuneesta hiilestä koituisi menoja.

Ensimmäinen kompensatio oletetaan tapahtuvaksi vasta simuloitavan metsän nykyhetken iässä. Kiertoajan alun hiilensidonta laskettiin vuodesta 0 laskelman alkuvuoteen (nykyhetkeen) puuston tilavuuskehityksen perusteella, jonka tilavuuskehityksen

oletettiin noudattavan etukäteen määrättyä koealakohtaista kulkua. Kiertoajan alun arvot prolongattiin laskelman nollahetkeen, jolloin koko kiertoaika tulee katettua. Ensimmäiseen kompensaatioon sisältyy koko simuloinnin aloitushetkeen mennessä sitoutunut hiili. Sekä puunmyynti-, että hiilitulot ja -menot diskontataan kiertoajan alkuhetkeen, minkä kokonaistulojen nettonykyarvoa käytetään mittarina eri vaihtoehtojen edullisuuden vertailussa. Vähimmäiskeskitilavuusvaatimuksia ei ole, vaan metsänomistaja optimoi metsänhoitopäätöksiään vapaasti.

Kiertoajan jälkeen säilyvä hiilinielu puuperäisissä tuotteissa ja hiilen vapautuminen niistä luetaan metsänomistajan hyväksi (tuotantoperiaate, ks. s. 13), mikä voidaan perustella täydellisten markkinoiden oletuksella, jossa kompensaatiot puutuotteista siirtyisivät kantohintoihin, vaikka jokin muu laskentaperiaate, kuten varastonmuutosperiaate, vallitsisikin. Hiilen vapautumisnopeus puutuotteista on arvioitu karkeasti sahatavaran ("tukki") ja massapuun ("kuitu") osuuksien ja vapautumisnopeuksien mukaan.

Simuloituihin kompensaatioihin valittiin hiilidioksiditonille vaihtoehtoiset arvot:

- 0 € (= ei hiilikompensaatiota, vain puuntuotanto optimoidaan)
- 2.27 €
- 13.60 €
- 27.20 €

Arvot edustivat kirjallisuudessa ja muissa julkaisuissa käytettyjen ja arvioitujen (ks. s. 17) hiiliyksikköhintojen vaihtelua ja vähimmäishinnalle saatiin pohjaa edellä olevista tuloksista metsänkasvatuksellisen hiilensidonnan kustannuksista.

Taulukot 2 a ja b. Koealojen simuloidut netto nykyarvot koko kiertoajalta €/ha ilman hiilikompensaatiota (CO₂ tn 0 €) ja eri hiilidioksiditonnin hinnoilla (2.27, 13.6 ja 27.2 €) kompensoituina, korkokannoilla 3 % ja 4 %.

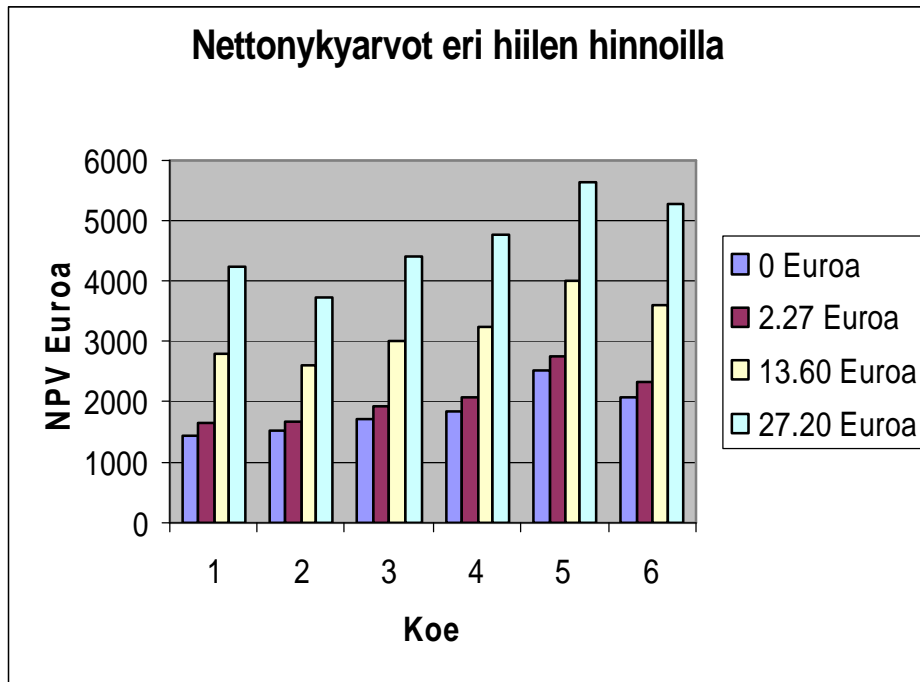
a: 3%

Koeala	Boniteetti, H ₁₀₀	CO ₂ tn hinta			
		0 €	2.27 €	13.60 €	27.20 €
1	23.9	1421.2	1644.1	2788.7	4228.4
2	24.3	1521.5	1691.9	2582.1	3722.3
3	25.7	1703.5	1906.9	3013.2	4407.0
4	27.0	1850.3	2072.2	3243.8	4740.2
5	28.4	2500.9	2746.4	4017.4	5651.1
6	29.1	2070.1	2313.1	3612.8	5268.3

b: 4%

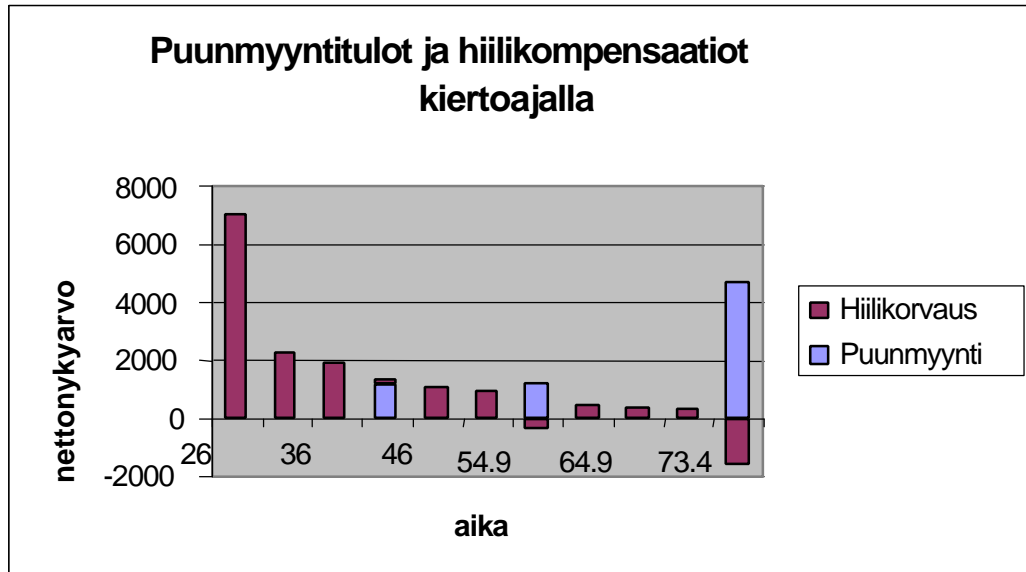
Koeala	Boniteetti, H ₁₀₀	CO ₂ tn hinta			
		CO ₂ tn 0 €	CO ₂ tn 2.27 €	CO ₂ tn 13.60 €	CO ₂ tn 27.20 €
KOE 1	23.9	451.4	618.6	1484.6	2586.9
KOE 2	24.3	428.2	539.8	1152.9	1933.0
KOE 3	25.7	699.7	856.2	1684.3	2772.0
KOE 4	27.0	657.2	823.1	1692.5	2800.6
KOE 5	28.4	1050.1	1230.4	2189.0	3417.4
KOE 6	29.1	807.8	986.4	1942.1	3175.5

Taulukosta 2 havaitaan metsänkasvatuksen kannattavuuden parantuvan selvästi jo alhaisimmalla testatulla hiilen hinnalla (2.27 €/CO₂ tn) verrattuna tilanteeseen, jossa hiilellä ei ole lainkaan arvoa. Hiilen hinnan kasvaessa tulojen nykyarvo jopa moninkertaistuu.



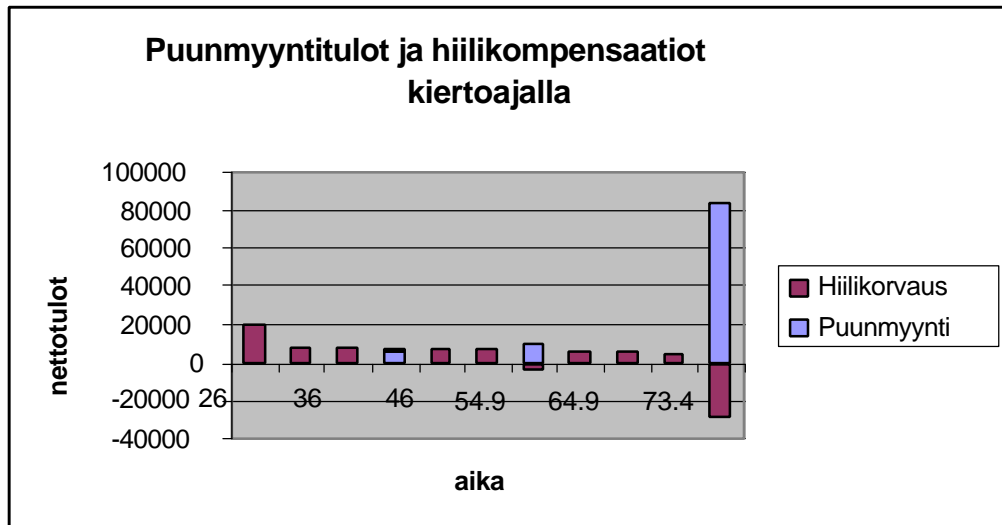
Kuva 11. Hiilen hinnan vaikutus nettonykyarvoihin/ha koelaittain (metsiköt 1-6), joiden pituusboniteetti kasvaa järjestyksessä vasemmalta oikealle. Korkokanta 3 %.

Kuvasta 11 on havaittavissa se, että odotetusti paremman boniteetin metsillä saatiin keskimäärin suuremmat tuotot sekä puhtaassa puuntuotannossa, että yhteistuotannossa hiilen kanssa. Suhteellinen kannattavuuden paraneminen näkyy kuitenkin selvästi kaikissa aineiston metsiköissä.



Kuva 12. Puunmyyntitulojen ja hiilikompensaatioiden suhteellinen osuus (lukuarvot teoreettisia) diskontattujen rahavirtojen muodostumisessa kiertoajan aikana, tapauksessa jossa hiilen hinta korkea (27.2 €/CO₂ tn) ja diskonttauskorko 4 %.

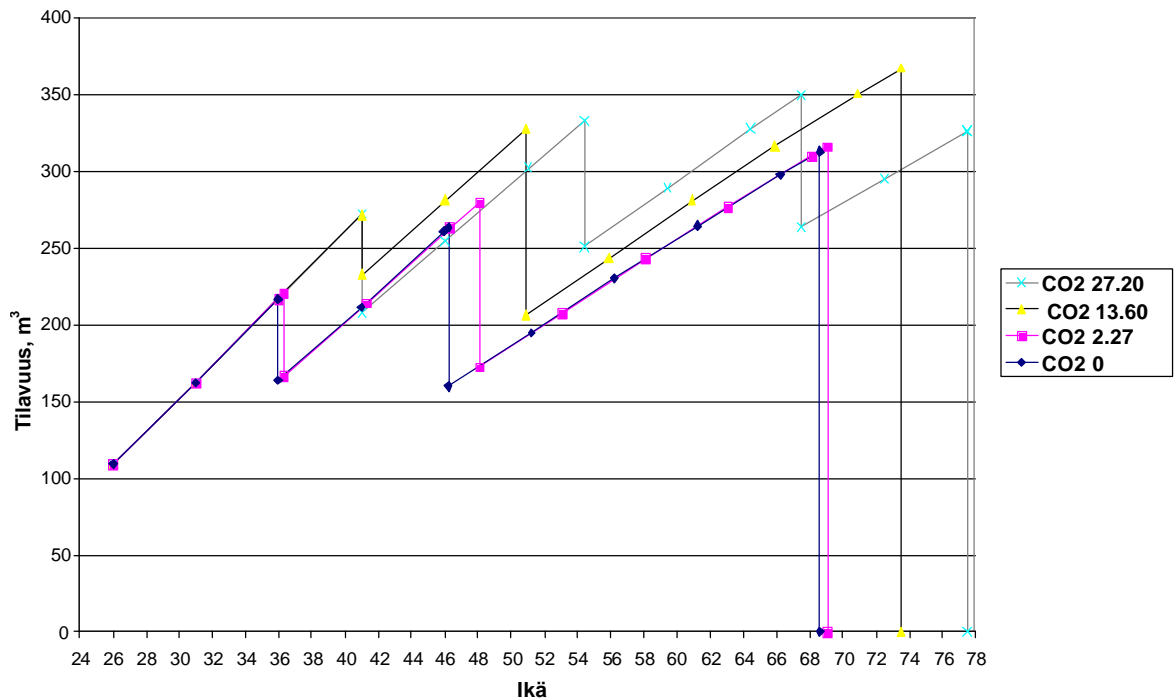
Kuvaa 12 tulkittaessa on huomioitava, että kyseessä on kärjistetty esimerkki, jossa korkeampi hiilen hinta ja diskonttauskorko korostavat hiilensidonnan merkitystä puuntuotantoon nähden. Diskonttauksen merkitys hiilensidonnan tuomalle kannattavuuden paranemiselle on ymmärrettävissä vertailemalla keskenään kuvia 12 ja 13. Suuremmalla korolla hiilikompensaation kannattavuutta parantava vaikutus korostuu, kun kompensaatioiden lisäämät kiertoajan alkupuolen tulot suurenevat suhteessa korkeamman koron pienentämiin loppupään negatiivisiin korvauksiin ja puunmyyntituloihin. Onkin tärkeää kiinnittää huomiota kannattavuuden suhteellisiin muutoksiin, kun verrataan eri diskonttokoroilla laskettuja tuloksia.



Kuva 13. Sama esimerkitapaus kuin kuvassa 12, mutta rahavirrat nimellisinä, diskonttaamattomina.

5.2 Hiilikompensaation vaikutus metsänhoitoon

Kun perinteisen puuntuotannon lisäksi metsätalouteen liitettiin taloudelliseksi vaikuttajaksi hiilitase ja hiilensidonnain tuomat tulot, on luonnollista, että taloudellisen tuoton optimointi edellytti myös uudenlaista hakkuuohjelmaa, jossa toimenpiteiden ajoitukset ja voimakkuudet muuttuivat. Muutoksen suuruuteen vaikutti uuden tuotteen, tässä tapauksessa sidottavan hiilen yksikköhinta. Koealan 4 puuston tilavuuden kehitys eri hiilen hinnoilla optimoiden on nähtävissä kuvassa 14.



Kuva 14. Metsikön puuston tilavuuden kehitys ja optimaalinen hakkuuohjelma erilaisilla sidotusta hiilestä maksetuilla CO₂ tonnin hinnoilla koealalla 4.

5.3.1 Kiertoaika

Tulokset osoittavat kiertoajan olevan merkittävä tekijä metsänhoidossa, jossa on tavoitteena lisätä keskimääräistä hiilinielua, myöskin taloudellisesti tarkasteltuna. Hiilen hinnan noustessa pidentyvät keskimäärin myös kiertoajat, kun nykyarvot maksimoidaan. Taloudellisesti edullisempi myöhäisempi päätehakkuun ajankohta selittyy sillä, että päätehakkuusta saatavat nettotulot ovat kompensatiomallissa pienemmät vapautuvasta hiilestä maksettavan korvauksen vuoksi. Päätehakkuun viivästyttäminen siirtää negatiivista hiilikorvausta myöhemmäksi, jolloin sen nykyarvo osaltaan pienenee. Korkokannan suureneminen vaikuttaa optimaalista kiertoaikaa lyhentävästi, niin perinteiseen puuntuotantoon, kuin tutkimuksessa tarkasteltuun yhteistuotantomalliin perustuvassa tilanteessa.

Taulukot 3 a ja b. Taloudellisesti optimaaliset kiertoajat ilman hiilikompensaatiota (0 €/CO₂ tonni) ja eri hiilen hinnoilla (2.27, 13.60 ja 27.20 €/CO₂ tonni) kompensoituina, korkokannoilla 3 ja 4 %.

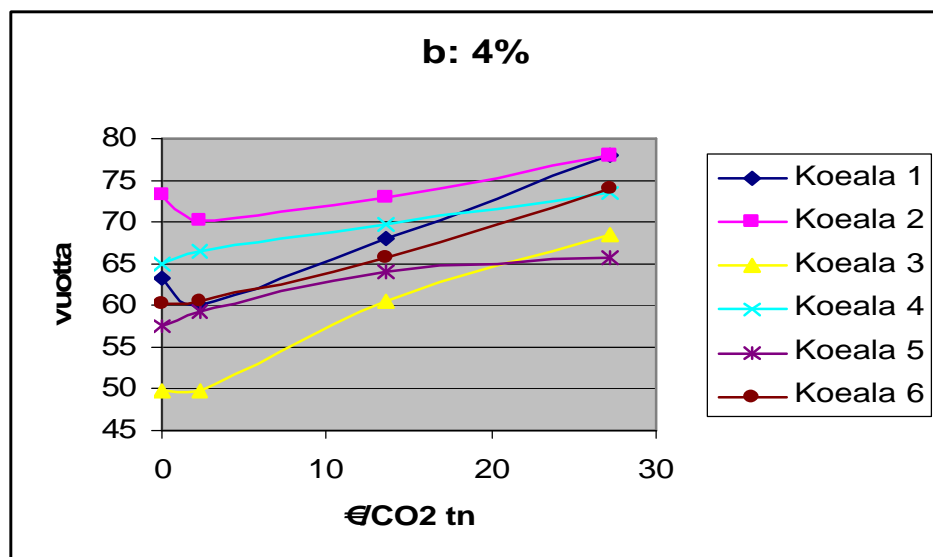
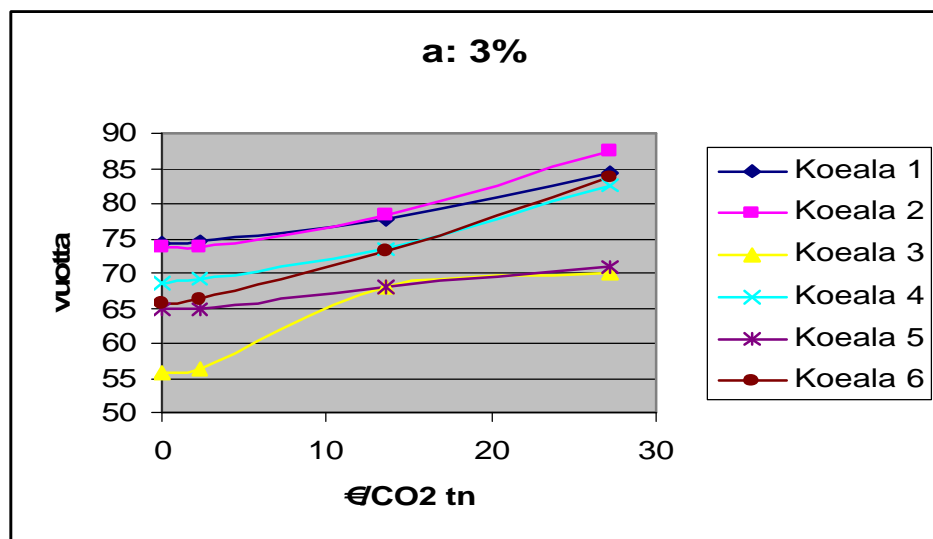
a: 3%

Koeala	H ₁₀₀	Optimikiertoaika, vuotta			
		CO ₂ tn 0 €	CO ₂ tn 2.27 €	CO ₂ tn 13.60 €	CO ₂ tn 27.20 €
1	23.9	74.2	74.7	77.8	84.2
2	24.3	73.8	73.8	78.3	87.3
3	25.7	55.8	56.3	68.1	70.0
4	27.0	68.6	69.1	73.5	82.6
5	28.4	64.9	64.9	67.9	70.8
6	29.1	65.8	66.2	73.1	83.6

b: 4%

Koeala	H ₁₀₀	Optimikiertoaika, vuotta			
		CO ₂ tn. 0 €	CO ₂ tn. 2.27 €	CO ₂ tn. 13.60 €	CO ₂ tn. 27.20 €
1	23.9	63.3	60.0	67.9	77.9
2	24.3	73.3	70.3	73.1	78.0
3	25.7	49.8	49.8	60.6	68.5
4	27.0	65.1	66.4	69.8	73.4
5	28.4	57.4	59.3	63.9	65.8
6	29.1	60.3	60.5	65.7	74.1

Kuten edellä hiilensidonnan kustannuksia tarkastellessa, havaittiin kiertoaikojenkin osalta, etteivät optimiarvot aina mukaudu hiilelle asetettujen hintojen mukaisesti. Taulukosta 3 löytyy yksittäistapauksia, joissa taloudellinen optimiratkaisu onkin hiilen hinnan noustessa jäänyt ennalleen, tai jopa laskenut. Yleisesti ottaen luvut kuitenkin osoittavat kiertoaikojen pidentyvän ja selkeimmin tämä on havaittavissa vertaamalla ilman kompensatioita saatuja kiertoaikoja korkeimmalla hiilen yksikköhinnalla (27.20 €) saatuihin (kuvat 15 a ja b).



Kuvat 15 a ja b. Optimaalinen kiertoaika erilaisilla hiilen hinnoilla korkokannalla 3% (a) ja 4% (b)

Puuntuotoskyvyiltään huonommilla metsiköillä optimaaliset kiertoajat olivat jo ennen hiilikompensatioita keskimäärin pidemmät. Näillä kohteilla kiertoaikoja ei korkeillakaan hiilen hinnoilla kannattanut pidentää enää kovinkaan paljon, koska korkeat puuston iät johtavat vääjäämättä arvokasvun hidastumiseen. Tämä tekijä korostuu kin erityisesti alhaisemmalla (3 prosentin) korolla laskien, etenkin koealoissa 3 ja 5 (kuva 15 a).

5.3.2 Kasvatushakkuut

Kun kiertoajat pidentyivät, voitiin odottaa optimaalisen harvennusten lukumäärän kasvavan, kun jäävän puuston arvokasvua optimoitiin. Otoksen pienuudesta ja metsiköiden satunnaisista ominaiseroista huolimatta olikin havaittavissa optimaalisen harvennusten lukumäärän taipumus kasvaa koron laskiessa ja hiilen hinnan noustessa (taulukko 4), mitkä osoittautuivat edellä kiertoaikoja kasvattaviksi tekijöiksi.

Taulukot 4 a ja b. Harvennusten taloudellisesti optimaalinen lukumäärä kiertoajalla, 3%(a) ja 4% (b) koroilla, ilman hiilikompensaatiota (CO₂ – tonni 0 €) ja eri CO₂ hinnoilla kompensoituna.

a: 3%

Koeala	boniteetti, H ₁₀₀	Harvennusten lukumäärä			
		CO ₂ tn 0 €	CO ₂ tn 2.27 €	CO ₂ tn 13.60 €	CO ₂ tn 27.20 €
1	23.9	3	3	3	3
2	24.3	2	2	2	3
3	25.7	2	2	2	2
4	27.0	2	2	2	3
5	28.4	2	2	2	2
6	29.1	2	2	2	3

b: 4%

Koeala	Boniteetti, H ₁₀₀	Harvennusten lukumäärä			
		CO ₂ tn 0 €	CO ₂ tn 2.27 €	CO ₂ tn 13.60 €	CO ₂ tn 27.20 €
1	23.9	2	2	2	3
2	24.3	3	2	2	2
3	25.7	2	2	2	2
4	27.0	2	2	2	2
5	28.4	2	2	2	2
6	29.1	2	2	2	3

Kuten jo kuvasta 14 voitiin havaita, kasvatushakkuita optimoitaessa harvennukset siirtyivät keskimäärin myöhäisemmiksi ja niiden voimakkuudet laskivat, kun hiilelle annettiin arvo tai kun arvoa nostettiin. Kasvatushakkuissa poistettavan puuston osuutta pienentämällä lisättiin sidotun – ja tuottoa tuovan hiilen määrää, samalla ”tasapainotellen” mahdollisemman hyvän puuntuotannon aikaansaamiseksi optimoiden näin kahden tuotteen kokonaistuotot.

5.3.3 Keskitilavuuden kasvu

Tutkimuksessa havaittiin selvästi kompensaation keskitilavuutta suurentava vaikutus (taulukko 5). Mitä suurempi hiilen hinta, sitä selvempi muutos kohti suurempia tilavuuksia – ja hiilinieluja. Tarkkailtaessa tilavuusmuutoksien herkkyyttä alhaisella hiilen hinnalla (2 €/CO₂ tonni) havaitaan, että muutos perinteiseen metsänkasvatukseen nähden on usein pieni. Korkeammalla korolla suhteellinen muutos on kuitenkin selvemmin nähtävissä, kun hakkuuohjelma antaa korostetummin arvoa kiertoajan alkupäässä tuloja tuottavalle hiilensitomiselle. Hakkuiden voimakkuutta kannattaa tällöin muuttaa kevyemmiksi ja ajoituksia myöhäisemmiksi pientäkin kompensatiota vastaan.

Taulukot 5 a ja b. Keskimääräinen runkopuun kuutiotilavuus m³/ha koko kiertoajalla, 3 ja 4 % koroilla taloudellisesti optimaalisella hakkuuohjelmalla, eri hiilen hinnoilla.

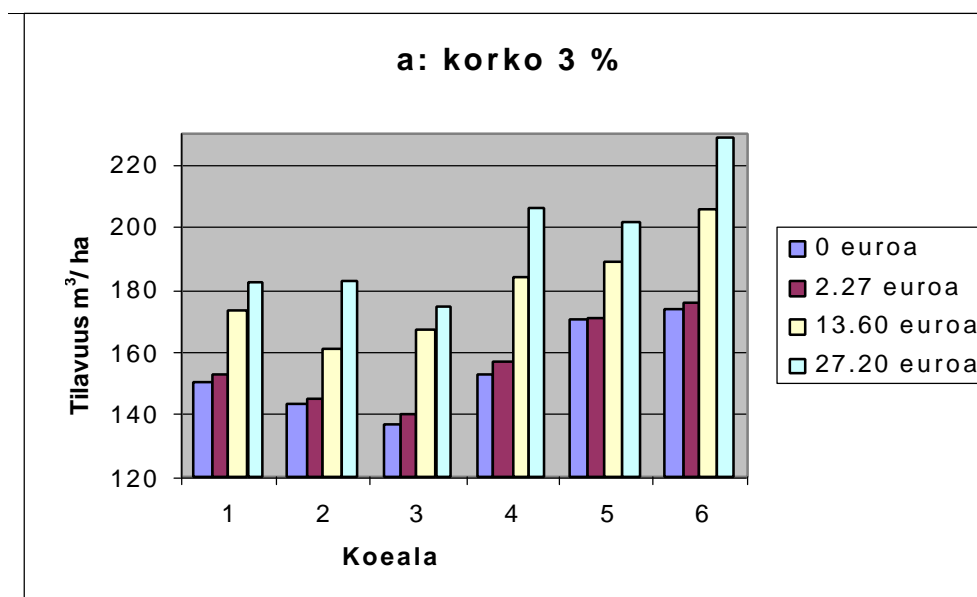
a:

Koeala	Boniteetti, H ₁₀₀	Runkotilavuus m ³ /ha			
		CO ₂ tn 0 €	CO ₂ tn 2.27 €	CO ₂ tn 13.60 €	CO ₂ tn 27.20 €
1	23.9	150.3	153.1	173.5	182.7
2	24.3	143.6	145.6	161.0	182.9
3	25.7	137.4	140.3	167.7	174.6
4	27.0	153.5	157.6	184.4	206.5
5	28.4	170.8	170.9	189.8	202.3
6	29.1	174.0	175.7	205.8	229.1

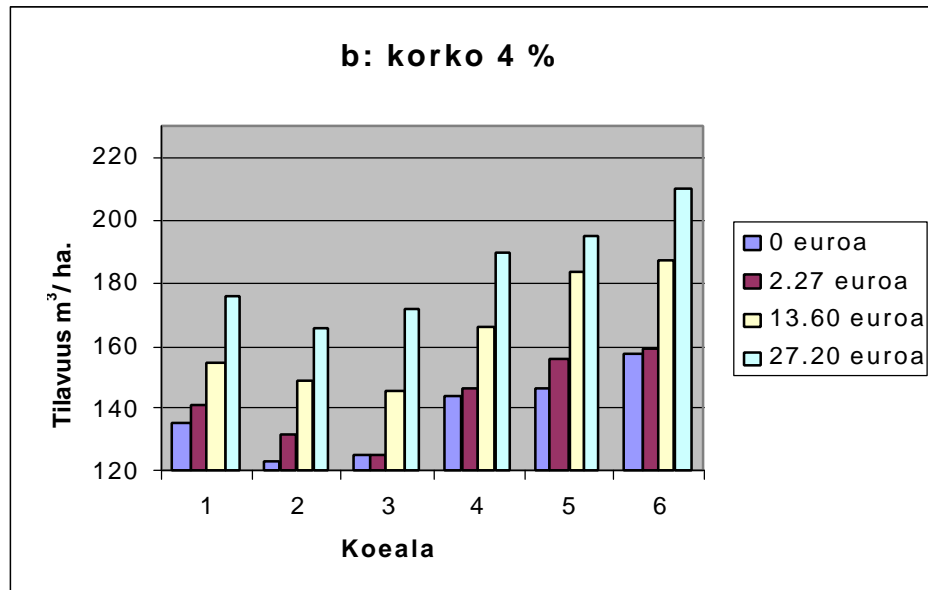
b:

Koeala	Boniteetti, H ₁₀₀	Runkotilavuus m ³ /ha			
		CO ₂ tn 0 €	CO ₂ tn 2.27 €	CO ₂ tn 13.60 €	CO ₂ tn 27.20 €
1	23.9	135.3	140.8	154.6	175.6
2	24.3	122.8	131.7	149.5	165.9
3	25.7	125.2	125.2	146.0	171.3
4	27.0	143.8	146.6	166.3	189.8
5	28.4	146.3	155.7	183.0	194.9
6	29.1	157.2	159.3	187.0	210.3

Koska metsikön keskitilavuuteen vaikuttivat annetuilla hiilen hinnoilla optimaalisten kiertoaikojen arvot ja kasvatushakkuiden ajoitukset sekä lukumäärät, voidaan taulukon 4 runkotilavuuksien muutokset selittää jo pitkälti edellä mainituilla tuloksilla. Kuvista 16 a ja b saa kuitenkin käsityksen erilaisten lähtötilanteiden merkityksestä. Odotetusti huonommilla kasvupaikoilla keskitilavuudet ovat biologisista syistä alhaisemmat ilman kompensatioitakin. Myös muut alkupuuston ominaisuudet (taulukko 1) saattavat vaikuttaa kasvupotentiaaliin paljon ja pitkiäkin aikoja, joten näistäkin tuloksista on syytä tehdä johtopäätöksiä vain suuntaa-antavasti.



Kuva 16 a. Hiilen hinnan (0, 2.27, 13.6 ja 27.2 €/CO₂ tonni) vaikutus kiertoajan keskitilavuuteen korkokannan ollessa 3%.



Kuva 16 b. Hiilen hinnan (0, 2.27, 13.6 ja 27.2 €/CO₂ tonni) vaikutus kiertoajan keskitilavuuteen korkokannan ollessa 4%.

6. TULOSTEN TARKASTELU

6.1 Hiilensidonnan kustannukset

Tärkeä saatu havainto niin kuutiomäärä- kuin prosenttivaatimuksenkin osalta oli suuntaa-antavasti se, että hiilensidonnan kustannukset hiiliyksikköä kohden olivat ainakin tässä aineistossa suhteellisen alhaiset (keskimäärin 3 % korolla 2.6-4.5 €/CO₂-tn ja 4 % korolla 1.2-2.4 €/CO₂-tn) Lisäksi simulaatioiden perusteella, kohtuullisin nielun lisäämistavoittein, metsien hakkuuohjelmia muuttamalla oli mahdollista päästä kohtuullisiin hiilensitomistavoitteisiin ilman biologisia esteitä. Näin ollen

perinteisen metsätalouden rinnalla toimiva hiilensidonta voisi hyvinkin tuottaa myytävää mahdollisessa kasvihuonekaasujen päästökaupassa, kilpailukykyiseen hintaan.

6.2 Hiilensidonnan kannattavuus

Tutkimuksessa oletettu kompensatiomalli osoittautui kaikilla kokeilla hiilen hinnoilla metsänomistajalle edulliseksi ja taloudellisesti kannustavaksi johtaen uudenlaisten metsänhoito-ohjelmien käyttöönottoon. Optimoiden korkeiden hiilen hintojen ja diskonttaus korkojen vallitessa painopiste metsänkasvatuksessa muuttuisi myytävän puun tuotannosta jopa suuremmaksi osin hiilitalouden harjoittamiseen (Kuva 4).

Hiilen sitoutuminen puustoon ei ole pysyvää, vaan puustoon varastoituva hiilinielu vapautuu vähitellen, kiertoajan sisällä harvennushakkuissa ja kiertoajan päätyttyä päätehakkuussa ja viimeistään puuperäisten tuotteiden hajotessa. Näin ollen diskonttaamattomina arvoina hiilensidonta ei tuottaisi mitään. Diskonttauskoron huomioiminen kuitenkin vaikuttaa siten, että kiertoajan alussa kompensoitu nielun kasvu on suhteellisesti arvokkaampaa, kun taas suurimmat hiilen vapautumiset tapahtuvat suuremmaksi osaksi kiertoajan loppupuolella, tai sen jälkeen, ja ovat vastaavasti merkitykseltään pienempiä. Suurempi osa nykyarvoisten tulojen syntymisestä siirtyisi tämän tutkimuksen kompensatiomallissa perinteiseen metsänkasvatukseen nähden aikaisemmaksi.

Hiilikompensaation merkittävä positiivinen kannattavuusvaikutus korostuu juuri metsätaloudessa, jossa alussa vaadittavat investoinnit tuottavat realisoitavaa tuottoa vasta huomattavan pitkän ajan jälkeen. Vertaamalla kuvaa 5 kuvaan 4 saa käsityksen

diskonttauksen vaikutuksesta hiilensidonnan ja puuntuotannon väliseen suhteelliseen kannattavuuteen. Puunmyynnin tuotot ovat diskonttaamattomina suhteessa merkittävämmät, koska päätehakkuun tuotot ovat nimellisarvoiltaan suurimmat kaukaisesta toteutumisestaan huolimatta.

6.3 Vaikutukset metsänhoito-ohjelmaan

Vaikka voidaankin olettaa, että kompensatiomallista johtuva kiertoaikojen piteneminen lisää keskimäärin optimaalista kasvatushakkuiden määrää, ei tässä tutkimuksessa käytettyjen metsien ja hiilen hintojen puitteissa muutos ollut ainakaan merkittävä. Hiilen arvoa kasvatettaessa ja kiertoaikojen edelleen pidentyessä näin tulisi todennäköisesti silti käymään. Korkokannan pienentämisellä olisi sama vaikutus.

Korkeimmilla hiilen hinnoilla (27.2 €) ja alhaisemmalla korolla (3%) optimoiden voitiin havaita suhteellisen (optimaalisen) tilavuuskasvun hidastumista suurempiin hiilen hintoihin siirryttäessä. Optimoidessa törmätään väistämättä metsän biologisiin rajoitteisiin, jotka alkavat heikentää mahdollisuuksia kasvattaa kuutiomääriä loputtomasti ilman taloudellisia tappioita. Olemmattomat tekijät lienevät kasvun taantuminen ja kuolleisuuden lisääntyminen iän myötä ja luonnollisesti myös korkokanta yhdessä ajan kanssa. Näillä seikoilla voidaan myös selittää aiemmin havaitut nousevat rajakustannukset hiilensidonnassa.

6.4 Vaikutus hiilinielun kokoon

Mitä suurempi hiilen hinta oli, sitä suurempia keskitilavuuksia – ja hiilinieluja kannatti metsissä kompensatiomallin vaikuttaessa kasvattaa. Puustoon sitoutuvan hiilen määrän voidaan olettaa kasvavan samassa suhteessa kuin keskitilavuudenkin.

Taulukko 6. Keskimääräiset runkotilavuuksien muutosprosentit eri hiilen hinnoilla, koroilla 3 ja 4%.

korko	Sidotun hiilen lisäys, prosenttia			
	CO ₂ tn 0 €	CO ₂ tn 2.27 €	CO ₂ tn 13.6 €	CO ₂ tn 27.2 €
3 %	0	1.5	16.5	48.5
4 %	0	3.5	18.8	33.4

Taulukko 6 osoittaa diskonttokoron ja hiilen hinnan yhteyden hiilikompensatioiden aikaansaaman keskimääräisen lisänielun suuruuteen aineiston metsiköissä. Matalampi käytetty diskonttokorko yhdessä matalampien hiilen hintojen kanssa näyttäisi aikaansaavan pienemmät kasvut hiilinieluun ja prosentteina muutos voi tällöin näyttää pieneltä. Pienetkin suhteelliset muutokset voivat kuitenkin merkitä tuntuvia hiilinieluja, kun puhutaan suuremmista metsäkokonaisuuksista.

On huomioitava, että taulukon 6 mukaiset hiilinielun kasvuprosentit eivät ole otoksen koosta johtuen yleispäteviä, vaikka ne suuntaa-antavasti kertovat oletetun kompensatiomallin ja annettujen hiilen hintojen vaikutuksen hiilen sitoutumiseen vastaavissa metsissä. Mikäli voitaisiin olettaa normaalimetsärakenne, saataisiin kuitenkin vastaava tulos.

6.5 Muita havaintoja

6.5.1 Boniteetti

Koealoja simuloitaessa havaittiin kasvupaikan puuntuotantokyvyn (kriteerinä pituusboniteetti) vaikuttavan normaaliin puuntuotantoon perustuvassa metsätaloudessa odotetusti, eli paremman boniteetin omaavat metsät tuottavat keskimäärin myös paremman tuoton (kuva 3). Satunnaista vaihtelua koealojen välille tuovat erot syntyta-voissa ja alkutiheyksissä, minkä vuoksi kokonaistuotot eivät välttämättä kaikissa tapauksissa kasva samassa suhteessa puuntuotantokyvyn paranemisen kanssa.

Alhaisimpien boniteettien metsien optimaaliset kiertoajat olivat sekä perinteisen metsänhoidon että hiilikompensaatioilla täydennetyillä simuloinneilla korkeimmat. Odotetusti paremmilla boniteeteilla kannatti ja voitiin kasvattaa suurempia keskitilavuuksia, myös hiilikompensaation voimassa ollen.

Metsänhoidollisesti tulokset antaisivat viitettä siitä, että huonommilla kasvupaikoilla hiilensitomisen toteuttaminen entisestään korkeita optimaalisia kiertoaikoja (etenkin matalammilla koroilla) pidentämällä on vaikeampaa. Koska hiilikompensaatiot lisäsivät silti tällaisissakin metsiköissä optimaalista keskitilavuutta suhteellisen paljon, voidaan todeta, että kasvatustiheys on tärkeä tekijä kun hiilen ja puun yhteistuotannon taloudellista kannattavuutta optimoidaan huonomman boniteetin metsissä.

6.5.2 Metsälaki

Metsälaki rajoittaa metsänomistajan metsänhoidollista päätöksentekoa mm. kiertoajoissa ja harvennusten voimakkuuksissa. Jos tämä tekijä huomioidaan, voidaan olettaa tämän hiilikompensaatiomallin olevan entistäkin houkuttelevampi metsänomistajalle, koska keskitilavuus on jo ennestään puhtaan puuntuotannollista optimiratkaisua korkeampi ja normaalitilanteen ”taloudellisesti kannattamaton ylimääräinen hiilivarasto” muodostuisi tuloja tuottavaksi tekijäksi. Asetettaessa hiilelle riittävän korkea hinta, päädytään jopa samoihin nettonykyarvoihin kuin ilman lakirajoitusta optimoitaessa (taulukko 7). Suhteellinen kannattavuuden paraneminen voi olla tällä kompensatiomallilla suurempi kun oletetaan lähtötilanteeksi metsälaki rajoituksineen.

Taulukot 7 a ja b. Metsälakirajoitteella ja ilman sitä optimoitujen hakkuuohjelmien nettonykyarvot koealalla 4 diskonttauskoroilla 3 % (a) ja 4 % (b).

a: korko 3 %	CO₂ tn 0 €	CO₂ tn 2.27 €	CO₂ tn 13.60 €	CO₂ tn 27.20 €
Metsälaki ei rajoitteena	1850.3 €	2072.2 €	3243.8 €	4740.2 €
Metsälaki voimassa	1783.3 €	2002.2 €	3211.3 €	4740.2 €
Ero (%)	3.8 %	3.5 %	1.0 %	0.0 %

b: korko 4 %	CO₂ tn 0 €	CO₂ tn 2.27 €	CO₂ tn 13.60 €	CO₂ tn 27.20 €
Metsälaki ei rajoitteena	657.2 €	823.1 €	1692.5 €	2800.6 €
Metsälaki voimassa	549.0 €	727.3 €	1631.8 €	2774.3 €
Ero (%)	19.7 %	13.2 %	3.7 %	0.9 %

6.5.3 Puutuotteet

Tutkimuksen kompensatiomalli oletti metsistä jalostettaviin tuotteisiin sitoutuvan hiilen arvon sisältyvän metsänomistajan hyväksi laskettavaan hiilikirjanpitoon. Koska tulevaisuudessa voidaan päätyä kehittyneempiinkin laskentaperiaatteisiin, testattiin tutkimuksessa yleisesti oletetun ”tuotantoperiaatteen” lisäksi yhden koealan osalta myös ”varastonmuutosperiaatteen” vaikutus kannattavuuteen. Tämä toteutettiin asettamalla hiilen vapautumisnopeudeksi 0, jolloin laskennallisesti hiili vapautuu hakkuiden myötä välittömästi ilmakehään aiheuttaen välittömän negatiivisen hiilikorvauksen metsänomistajalle.

Taulukko 8 a ja b. Nettonykyarvot koealalla 4. laskentaperiaatteella, jossa puutuotteiden hiilinielu luetaan metsänomistajan hyväksi (”tuotantoperiaate”) ja periaatteella, jossa puutuotteet rajataan metsänomistajan hiilitaseen ulkopuolelle (”varastonmuutosperiaate”).

a: korko 3 %	CO₂ tn 0 €	CO₂ tn 2.27 €	CO₂ tn 13.60 €	CO₂ tn 27.20 €
”tuotantoperiaate”	1850.3 €	2072.2 €	3243.8 €	4740.2 €
”varastonmuutos-periaate”	1850.3 €	2011.2 €	2895.8 €	4099.7 €
Ero (%)	0.0 %	1.0 %	12.0 %	15.6 %

b: korko 4 %	CO₂ tn 0 €	CO₂ tn 2.27 €	CO₂ tn 13.60 €	CO₂ tn 27.20 €
”tuotantoperiaate”	657.2 €	823.1 €	1692.5 €	2800.6 €
”varastonmuutos-periaate”	657.2 €	783.5 €	1471.2 €	2423.1 €
Ero (%)	0.0 %	5.1 %	15.0 %	15.6 %

Kun puutuotteiden hiilitase jää laskelmassa metsänomistajan hiilikompensaatioiden ulkopuolelle, kannattavuuden paraneminen jää hiilen arvon kasvaessa hieman vaatimattomammaksi. Mitä suurempi hiiliyksikön arvo, sitä suurempi suhteellinen ero

tuloksessa. Tuloksien suunnat nettonykyarvojen kasvusta eivät kuitenkaan muutu ja metsänomistajan kannattaisi oletetulla kompensatiomallilla edelleenkin harjoittaa yhteistuotantoa puuntuotannolla ja hiilensidonnalla. Toisaalta suhteelliset erot ovat siinä määrin suuret eri laskuperiaatteiden välillä, ettei metsänomistuksen kannattavuutta ajatellen voida merkitystä pitää pienenäkään.

Tutkimuksessa käytetty ”tuotantoperiaate” voidaan kuitenkin perustella oletuksella täydellisistä markkinoista, joilla esimerkiksi puuta ostavien tahojen saama rahallinen hyöty siirtyisi myös raakapuun hintoihin, vaikka käyttöön otettaisiin jokin muu laskentatapa, kuten esimerkiksi ”varastonmuutosperiaate”.

7 TULOSTEN VERTAILU AIKAISEMPIIN TUTKIMUKSIIN

7.1 Hiilensidonnann kustannukset

Moura-Costan ja Stuartin (1998) näkemys silloisista vähimmäismarkkinahinnoista hiilelle toteutuneiden metsällisten hiilensidontaprojektien perusteella oli noin 3.7 € sidottua CO₂-tonnia kohden. Muista lähteistä saadut arviot hiilen hinnalle perustuen esimerkiksi yritysten sisäisiin tai keskinäisiin hiilikauppoihin, mallinnustutkimusten tuloksiin ja arvioidun päästövero vaatimuksen tasoon Suomessa olivat yleisesti vielä huomattavasti korkeampia. Tässä tutkimuksessa päästiin yleistäen melko alhaisiin yksikkökustannuksiin (keskimäärin 1.2 – 4.5 euroa/hiilidioksiditonni), kun sidotun hiilen määrää lisättiin koealoilla 10-20 prosenttia, tai 22,7-45,3 tonnia hehtaarilla.

7.2 Hiilensidonnan kannattavuus

Niskanen ym. (1996) totesivat diskonttauskoron vaikuttavan metsällisen hiilensidonnan kannattavuuteen merkittävästi. Odotetusti tämä näkyi samansuuntaisesti tässäkin työssä, vaikka laskelmissa käytettyjen diskonttokorkojen (3 ja 4 %) suhteellinen ero olikin pienempi kuin Niskasen ym. tutkimuksessa (5 ja 10 %). Hiilensidonnan arvottaminen rahallisesti lisäsi selvästi metsällisen investoinnin (uudelleenmetsittäminen) kannattavuutta, samoin kuin se omassa työssäni vaikutti metsänomistamisen kannattavuuteen. Castren (2001) pohdiskeli alhaisten nettohyötyjen vaikutusta metsänomistajan käyttäytymiseen ja epäili, etteivät ne välttämättä aikaansaisi todellisia muutoksia metsänhoito-ohjelmiin. Tässäkin tutkimuksessa kannattavuuden paraneminen jäi joissain tapauksissa (alimmat hiilen hinnat) melko pieniksi ja käytännössä ne eivät ehkä motivoisikaan metsänomistajia tarpeeksi.

7.3 Vaikutukset metsänhoitoon

Karjalainen (1994) totesi käsittelemättömien metsien keskimääräiset hiilivarannot suuremmiksi kuin käsiteltyjen, mikä tukeekin optimaalisten kasvatushakkuiden keventymistä tässä tutkimuksessa, jossa hiilelle annettiin arvo. Samaan vaikutukseen perustuvat myös Van Kootenin ym. (1995) ja Pussisen ym. (2000) tutkimuksissa havaitut kiertoaikojen kasvut. Hiilensidonnan ja hiilitulojen aikaansaaminen perustui tässäkin tutkimuksessa puuston keskimääräisen tilavuuden kasvattamiseen kevyemmällä metsänhoito-ohjelmalla. Voidaankin sanoa, että hiilikompensaatiot muuttavat optimaalista metsänhoito-ohjelmaa ikään kuin perinteisen talousmetsän ja käsittelemättömän metsän kompromissiksi.

8 PÄÄTELMÄT JA SUOSITUKSET

8.1 Kompensaatiomallin toimivuus

Tulosten mukaan ainakin hyväkasvuisissa mäntymetsissä voidaan kiertoajan keskimääräistä puuston tilavuutta lisätä suhteellisen paljonkin metsänhoito-ohjelmaa muuttamalla ilman metsänomistajalle koituvia kohtuuttomia taloudellisia menetyksiä. Tämä tarkoittaa sitä, että hiilidioksidia voitaisiin sitoa puhtaassa puuntuotantoon tähtäävässä kasvatusohjelmassa sitoutuvan hiilen lisäksi huomattaviakin määriä enemmän metsiin alhaisilla kustannuksilla. Riippuen sidottavan hiilen määrästä ja laskennassa käytetystä korkokannasta (3 ja 4 %) keskimääräiseksi sidotun hiilidioksidonnin kustannukseksi muodostui aineiston metsissä 1.2 – 4.5 euroa. Kun saatuja yksikkökustannuksia verrataan esimerkiksi toteutettujen hiilinieluprojektien kustannuksiin, päästöoikeuskaupassa yritysten käyttämiin kauppahintoihin, päästövähennystoimenpiteiden arvioituihin kustannuksiin, tai päästöveroihin, voidaan metsätaloudellinen hiilinielu nähdä kilpailukykyisenä joustomekanismina Kioton ilmastopimuksen velvoitteiden täyttämiseksi.

Metsätaloudellisessa hiilensidonnassa on kuitenkin huomioitava nousevat rajakustannukset. Aina kun lisätään vaatimukseksi uusi, optimiratkaisusta enemmän poikkeava kiertoajan keskitilavuustaso, sidottujen hiiliyksiköiden hinta kasvaa metsänkasvatuksen kannattavuuden kärsiessä pidentyvistä kiertoajoista ja puuston kasvupotentiaalin heikentyessä iän sekä tiheyden myötä. Metsätaloudellisen hiilensidonnan taloudellinen potentiaali on siis rajoitettu.

Tutkimuksen toisessa osassa oletettiin hiilelle rahallinen arvo ja toimiva markkinamekanismi, jossa kaikesta runkopuun hiilen sitoutumisesta ja vapautumisesta kompensoitaisiin metsänomistajan ja esimerkiksi päästöoikeuksia tarvitsevan teollisuuden kesken, viiden vuoden välein tapahtuvien hiilitaseiden mittausten pohjalta. Metsätalouden kannattavuus tutkituilla metsillä paransi näillä oletuksilla selvästi. Oletetun kompensatiomallin voisi uskoa olevan metsänomistajalle riittävä taloudellinen kannustin muuttaa metsänhoitoa puuntuotannon ja hiilensidonnan yhteistuotannoksi. Metsänkasvattamisen tuotto paranee jo pienilläkin hiilen yksikköhinnoilla. Tutkimuksessa alin kokeiltu hiilidioksiditonni hinta, 2,27 euroa, lisäsi selvästi tuloja kaikilla koealoilla sekä 3 että 4 % diskonttokorolla laskien.

Kannattavuuden parantuminen selittyy ennen kaikkea diskonttauskorolla, mikä painottaa kiertoajan alkupäässä saatavien hiilituottojen merkitystä. Laskelmissa käytetyn diskonttauskoron suuruus vaikuttaa tulosten suhteelliseen edullisuuteen huomattavasti. Korkeamman korkokannan käyttö optimoinnissa antaa taloudellisesti paremman suhteellisen tuloksen hiilensidonnan ja puunkasvatuksen yhteistuotannolle normaaliin puuntuotantoon nähden.

Hiilensidonnan ottaminen mukaan metsänhoidon päätöksentekoon muuttaa taloudellisesti optimaalista hakkuuohjelmaa. Hiilen hinnan nouseminen vahvistaa muutosten voimakkuutta. Keskimäärin kiertoajat pitenevät, tosin melko maltillisesti. Edes optimoitaessa suurimmalla tutkimuksessa käytetyllä hiilidioksiditonni hinnalla (27,2 euroa) ei päädytty millään koealalla ainakaan merkittävästi suurempiin kiertoaikoihin, kuin mihin suomalainen metsälaki muutoinkin normaaliolosuhteissa velvoittaa.

Vaikka jo kiertoajan pidentäminen yksistäänkin saa aikaan suuren osan puuston keskimääräisen tilavuuden kasvusta, on kasvatushakkuiden muuttumisellakin merkittävä vaikutus. Mitä korkeampaa hiiliyksikön hintaa optimoidessa käytetään, sitä myöhäisemmiksi ja lievemiksi harvennushakkuut muodostuivat. Näin pystytään vaikuttamaan aikaisemmin saatavien hiilikompensaatioiden suuruuteen. Hiilen hinnan ja kiertoajan noustessa korkeiksi voidaan havaita myös kasvatushakkuiden lukumäärän kasvavan. Näin optimoidaan keskenään ristiriidassa olevat hiilikompensaatiot sidotusta hiilestä ja puunmyyntitulot pitäen yllä samanaikaisesti sekä suurta volyyymia, että riittävän harvaa kasvatustiheyttä.

Oletettu kompensatiomalli siis voitiin osoittaa ainakin tutkimukseen valituissa männiköissä kannattavaksi metsänomistajalle ja kaikkien oletusten vallitessa sillä olisi hiilinielua kasvattava vaikutus. Se, osoittautuuko metsätaloudellinen hiilensidonta lopulta järkeväksi vaihtoehdoksi edes tämän tutkimuksen lupaavia tuloksia antaneen mallin voimassa ollen, riippuu pitkälti hiilelle muodostuvasta hinnasta. Vaikka alhaisenkin hiilen hinnan voitiin osoittaa olevan metsänomistajan kannalta selvästi metsänkasvatuksen kannattavuutta lisäävä tekijä, ei se välttämättä kuitenkaan lisännyt puuston keskitilavuutta (=hiilinielua) kovinkaan merkittävästi hakkuuohjelmaa optimoitaessa. Jos tällöin kokonaisnielukin jää mitättömäksi, voi koko kompensatiojärjestelmän rakentaminen olla kustannustehokkuudeltaan huono. Kuitenkin riittävän laajamittaisesti toteutettuna pienetkin hehtaarikohtaiset muutokset metsien hiilinieluissa voivat muodostua kansallisesti tärkeiksi.

8.2 Metsät ja kansallinen ilmastopolitiikka

Suomen metsät ovat laskentatavasta riippuen merkittävä hiilinielu ja ne voisivat tarjota mahdollisuuden sitoa tuntuviakin määriä hiiltä enemmän kuin tilanteessa, jossa ainoastaan puuntuotanto optimoidaan. Vaikka huomioitaisiin metsälain aikaansaama, jo aiemmin muodostunut puuntuotannollista optimitasoa korkeampi puuston tilavuus, kasvumallien mukaan nielua voitaisiin edelleenkin lisätä. Siksi on syytä tutkia syvemminkin metsätaloudellisen hiilinielun mahdollisuuksia erilaisten oletusten alla. Jos jokin menettelytapa osoittautuu kustannustehokkaaksi tavaksi tuottaa myytäviä päästöoikeuksia tulevaisuudessa kasvihuonekaasujen päästökaupassa, voi tällä olla suurtakin taloudellista merkitystä niin metsiä omistaville tahoille kuin koko yhteiskunnalle.

8.3 Huomioitavaa tutkimuksen lukijalle

Tätä tutkimusta analysoitaessa on syytä huomioida erilaiset epävarmuustekijät tutkimuksen mallissa, kuten puutteellinen hiilivirtojen tuntemus koko metsäekosysteemissä (myös esimerkiksi metsämaassa) eri toimenpiteiden ja mahdollisesti muuttuvien ympäristöolosuhteiden seurauksena. Tutkimuksessa käytetyt arvot hiilen osalta ovat vain oletuksia, eikä myöskään puun markkinahintojen vaihtelua tulevaisuudessa voida ennustaa. Puutuotteiden korvauskysymys on toistaiseksi sopimatta ja vaikka kompensatiot siirtyvät tämän tutkimuksen oletuksen mukaisesti täysimääräisinä kantohintoihin, voi käytännössä ilmetä erilaisiakin hintavaikutuksia täydellisten markkinoiden vallitessa vain teoriassa.

Aineistona oli suppea joukko (6 kpl) ominaisuuksiltaan jossain määrin poikkeavia koealoja. Näiden pohjalta saatuja tuloksia ei voida yleistää koskemaan kaikkia Etelä-Suomen männiköitä, ja tuloksiin on syytä suhtautua varauksella, kun halutaan pohtia hiilensidonnan käytännön toteutusta metsissämme. Havainnot antavat suuntaantavasti kuvan hiilikompensaatioiden aikaansaamista muutoksista oletetuissa olosuhteissa.

Diskonttauskorolla tiedetään olevan suuri vaikutus pitkille aikaväleille tehtäville laskelmille. Tämä on selvästi nähtävissä jo tämän tutkimuksen tuloksissa, vaikka käytössä olivatkin suhteellisen vähän toisistaan poikkeavat ja alhaiset korot. Mikäli korko arvioidaan eri suuruiseksi kuin tässä työssä, poikkeavat tuloksien luvutkin luonnollisesti niin kustannusten, kannattavuuden, kuin metsänhoito-ohjelmien suhteen nyt saaduista. Tuloksien suunnat pysyisivät silti samanlaisina ja laskentakorkoa kasvatettaessa hiilensidonnan suhteellisen kannattavuuden voisi olettaa korostuvan yhä voimakkaammin.

Mikäli tämän työn malliksi oletetaan yksittäisen metsänomistajan tasolla tapahtuva kompensatiojärjestelmä, on käytännön toteuttamiselle olemassa ainakin toistaiseksi monia esteitä. Sen lisäksi, että tällaisen mekanismin luominen toimivaksi on vaikeaa (Suomessa yli 400000 yksittäistä metsälöä), voi olla olemassa myös muita tavoitteiden kanssa ristiriidassa olevia tekijöitä. Pienten, erillisten metsäalojen verifiointi voisi johtaa spekuloivaan osallistumiseen, mikä tulisi huomioida julkisessa päätöksenteossa ja tavoitteenasettelussa. Metsänomistajan kannattaisi liittyä järjestelmään vasta välittömästi päätehakkuun jälkeen, jolloin metsässä ei olisi pitkiin aikoihin hakattavaa ja siten kompensoitavaa hiilen lähdettä (Indufor 2000). Metsälön kehitysluokka-

jakauma vaikuttaisi toisin sanoen kompensatioiden kannattavuuteen. Kuitenkin metsänomistajien valikoivakin käyttäytyminen voisi palvella metsäpoliittista tavoitetta hiilen sidonnan lisäämisessä. Tärkeä tekijä on myös järjestelmään sitoutumisen ajallinen pituus. Mallissa sitoutumisajalla ei ole kuitenkaan vaikutusta, koska tutkimuksessa oletetaan vaikuttavien tekijöiden jatkuvan ikuisesti. Käytännössä tämä voi olla monimutkaisempaa varsinkin jos huomioidaan vastuukysymys kompensoitavien nielujen pysyvyydestä esimerkiksi metsätuhojen osalta.

Hiilinielujen lisääminen metsänhoidollisin menetelmin voi myös aiheuttaa lukuisia kielteisiä sivuvaikutuksia. Hakkuiden lisääminen ja hiilivarastojen pienentäminen voi olla hiilitalouden kannalta jopa perusteltua, jos lisähakkuilla vältetään fossiilisia hiilen päästöjä ilmakehään jossain muualla, esimerkiksi tuottamalla bioenergiaa (Liski 2000) tai jos siten korvataan muita energiaa enemmän kuluttavia rakennusmateriaaleja. Lisäksi, vaikka metsien hakkuut lopetettaisiin kokonaan esimerkiksi Suomessa, on mahdollista, että se johtaisi kuitenkin lähes välittömästi vastaavan suuruiseen hiilinielujen lisääntymiseen puunkäyttöön muualla (MMM 2000).

Riskit sivuvaikutuksista eivät rajoitu ainoastaan ilmastonmuutoksen torjuntaan. Huonoimmillaan hiilikompensaatioon mukautuva metsänhoito voisi aikaansaada ei-toivottuja sosiaalisia tai ympäristöllisiä vaikutuksia mm. luonnon monimuotoisuuden, maiseman suojelun ja paikallisväestön kannalta puulajisuhteiden, kasvatustiheyden, kiertoaikojen, hakkuumäärien ym. tekijöiden muuttuessa radikaalisti. On vaikeaa arvioida kuinka suuret nämä haittavaikutukset olisivat suhteessa positiivisiin sivuvaikutuksiin. Metsien hiilinielujen maksimointi ei välttämättä käy yhteen myöskään kestävänsä metsätalouden kriteerien kanssa (ks. liite 5). Mahdollisesti hiilitalouden

huomioiminen kannustaisi jopa suosimaan Suomelle vieraampaa viljelymetsätaloutta, varsinkin metsityshankkeiden lisääntyessä muualla kuin boreaalisella havumetsävyöhykkeellä, aiheuttaen näin kovenevaa kilpailua suomalaiselle metsätaloudelle ja –teollisuudelle (MMM 2000). Kansantaloudellemme tärkeälle metsäteollisuudelle jo pelkkä hiilikompensaation aiheuttama raakapuun tarjonnan pieneneminen ja siitä seuraava mahdollinen hinnan nousu voisi olla ongelmallista.

Esteenä metsätaloudelliselle hiilensidonnalle on ainakin toistaiseksi ennen kaikkea epätietoisuus tulevista poliittisista ratkaisuista niin kansainvälisesti kuin kansallises-
tikin. Metsien hiilinielujen asema voi heikentyä teollisuuden onnistuessa omilla toimenpiteillään rajoittamaan päästöjään kustannustehokkaasti, jolloin metsien nieluille ei tulisi ainakaan runsaasti kysyntää. Myös muita visioita ”kilpailevien” hiilinielujen aikaansaamiseksi on olemassa, esimerkiksi hiilidioksidin maan- tai vedenalainen varastointi (Andersson 2001). Lisäksi hiilinielujen käytölle yhtenä joustomekanismina asetettiin Bonnin kokouksessa maakohtaiset rajat, jotka määrittelevät kuinka suurelta osin kukin maa voi niitä päästövähennysvaatimuksissaan käyttää (Järvinen 2001).

8.4 Lisätutkimuksen tarve

Lisätutkimukselle näyttäisi olevan tarvetta ainakin seuraavien kysymysten osalta:

- Kuinka voimakkaasti hiilikompensaatioihin mukautuvat uudet metsänkasvatusmallit vaikuttaisivat raakapuun tarjontaan ja sitä kautta metsäteollisuuden raaka-
aineen hankintaan, rakenteeseen ja kannattavuuteen? Kuinka metsäteollisuusyri-
tykset optimoisivat omien metsiensä käytön? Lisääntyisikö tuontipuun määrä?

- Millaiselle tasolle hiiliyksiköiden hintojen tulisi markkinoilla muodostua, jotta metsänomistajalle syntyisi riittävä kannustin liittää metsänsä sertifiointijärjestelmään, joka järjestelmästä riippuen söisi ainakin osan hiilensidonnan tuomista tuotoista? Suuntaa-antavasti tätä voitaisiin kokeilla vähentämällä määrä-ajoin suoritetuista kompensatioista tarkastusten kustannukset (ja lisäämällä ne hakuiden johdosta seuraaviin hiilikorvauksiin) , jotka voisivat perustua arvioihin kestävä metsätalouden sertifiointista aiheutuviin kustannuksiin.
- Kuinka paljon tässä työssä saadut tulokset muuttuisivat, jos käytetään täydellisemmin kaikkia metsäekosysteemin hiilivirtoja huomioivia parametreja? Uusia tuloksia ja arvioita on jo olemassa ja ne tarkentunevat vielä jatkossa. Esimerkiksi metsämaan suuri merkitys voi tiedon lisääntyessä vaikuttaa laskelmiin huomattavastikin. Samoin kohtalaista merkitystä on puutuotteiden laskentaperiaatteilla. Niiden hiilitaseen kohdentaminen on toistaiseksi epäselvä, samoin täydellinen tuntemus hiilen määrästä ja vapautumisesta tuotteittain. Monien tuoteryhmien hiili ei välttämättä vapaudu edes tuotteen käytön jälkeen, vaan saattaa sitoutua pitkiksikin ajoiksi esimerkiksi kaatopaikoille.
- Säilyykö riittävä kannustinvaikutus, jos nieluista hyvitetään ainoastaan osa, esimerkiksi jonkin kertoimen mukaan ja hiilen hyvityshinta jää alhaiseksi? Entä jos hiilikompensaatiota maksettaisiinkin ainoastaan normaalin hakkuuohjelman ylittävistä nielun osasta?
- Kuinka paljon hiilensidonnan kannattavuutta voitaisiin kompensatiojärjestelmässä vielä parantaa, mikäli metsänkasvatuksessa optimoitaisiin muutkin hiilen-

sitoutumisen määrään vaikuttavat metsänhoitotoimenpiteet, kuten maankäsittely, uudistustapa, taimikonhoito, lannoitus, jne.?

- Miten mahdollinen puupolttoaineen arvon ja kysynnän nousu vaikuttaisi optimaaliseen hakkuuohjelmaan? Suuremmat hakkuumäärät voisivat sittenkin tulla kannattavammiksi?
- Ovatko tulokset muiden pääpuulajiemme kohdalla samanlaiset? Mikä puulaji antaa parhaan tuoton yhteistuotannossa? Muuttaisiko hiilikompensaatiojärjestelmä pitkällä aikavälillä puulajien suhteellisia osuuksia maassamme? Miten optimoitaisiin sekametsien kasvatus?
- Millainen verifiointijärjestelmä hiilinielujen todentamiselle vaadittaisiin? Mikä voisi olla teknisesti ja taloudellisesti mahdollista nyt ja tulevaisuudessa?
- Kuinka metsänomistajat suhtautuisivat hiilikompensaatiojärjestelmään? Saataisiinko riittävän suuri osa metsistä mukaan hiilensidonnan piiriin, jotta volyyymi olisi markkinoiden kannalta kiinnostava?
- Jos tarkempia biomassafunktioita päästään jatkossa hyödyntämään vastaavalla optimointiohjelmalla ja esimerkiksi lahovikaisen puun hiili (joka tässä tutkimuksessa oletettiin välittömästi vapautuneeksi) huomioitaisiin optimoinneissa, voisiko hiilen arvo mahdollistaa ainakin osan vanhojen metsien suojelun rahoittamisesta?

- Voitaisiinko osoittaa isommalla otoksella metsätyypin tai boniteetin vaikutus kannattavuuteen? Millaiset metsät olisivat kustannus-tehokkuudeltaan järkeviä liittää kompensatiojärjestelmään?
- Isommalla otoksella voitaisiin myös tarkastella, onko hiilikompensaatiolla pienillä hiilen hinnoilla muuta kuin metsänomistuksen kannattavuutta parantava vaikutus kun huomioidaan metsälaki. Nielun kasvu voisi jäädä alhaisilla hiilen hinnoilla mitättömäksi, koska metsälaki saattaa muutoinkin lisätä puuston keskimääräistä tilavuutta yli metsänomistajan puuntuotannollisen optimitilan.
- Kuinka tulokset poikkeaisivat Pohjois-Suomessa? Vaikka kasvu ja tilavuus ovatkin vaatimattomampia, ovat kiertoajat huomattavasti pidempiä ja siten nielukin pysyvämpi.
- Mikäli hiilelle muodostuisi korkea arvo, voisiko Suomenkin olosuhteissa olla perusteltua perustaa jopa yksinomaan hiilensidontaa varten erityisiä ”puuplantaseja”?
- Miten hiilikompensaatio vaikuttaisi metsän arvon määrittämiseen?

KIRJALLISUUS

Andersson, M. Alankomaat toteuttaa puolet päästövähennyksistään ulkomailla. Artikkelit Ympäristössä 8/2001 s. 28-29.

Castren, T. Simula, M. (2000): Hiilen sitoutumisen edistäminen. Ympäristönsuojelun vuosikirja. Massa- ja paperiteollisuus. Metsäteollisuus ry. Helsinki

Castren, T. 2001. Hiilinieluhyvitysten vaikutus yksityismetsänomistajan tavoitteenasetteluun. Kansantaloustieteen kandidaatintutkielma. 39 s.

Euroopan komissio (2000): Vihreä kirja kasvihuonekaasujen päästökaupassa Euroopan unionissa (komission esittämä). Luonnos. Kom (00)87. Bryssel

Ilmastosopimuksen metsien hiilivarastoja ja nieluja käsittelevä työryhmä. 2000. Metsät ilmastosopimuksessa ja Kioton pöytäkirjassa. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisu 1/2000. Helsinki

Indufor (2000): Metsien hiilinielujen todennettavuus Kioton pöytäkirjan soveltamisessa. Taustaselvitys ilmastomuutosprojektille. www.vn.fi/ktm/6ktm_etu.htm

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

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

Jaakko Pöyry Consulting Oy 2000. Kotimaisen päästökaupan osapuolet Suomen olo-
suhteissa. Kauppa- ja teollisuusministeriön tilaama selvitys.
www.ktm.fi/6ktm_etu.htm

Jerkkola, J. 1998. Hiilidioksidiveron kaksoishyötyvaikutus. Helsinki: ETLA, 109 s.

Järvinen, E. Kioton pöytäkirjan säännöt selviksi. Artikkelit Ympäristössä 8/2001 s.
26-27.

Karjalainen, T. 1994. Simulation of carbon budget for forests and wood-based pro-
ducts: an application for boreal conditions in Finland. Thesis for the licentiate degree
in silviculture. University of Joensuu.

Karjalainen, T. ym. 1994. Role of wood-based products in absorbing atmospheric
carbon. *Silva Fennica* 28(2):67-80.

Karjalainen, T. ja Kellomäki, S. 1996. Greenhouse gas inventory for land use change
and forestry in Finland based on international guidelines. *Mitigation and Adaption
Strategies for Global Change* 1: 51-71.

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

Kauppa ja teollisuusministeriö 2001. Kasvihuonekaasujen vähentämistarpeet ja – mahdollisuudet Suomessa. Kauppa- ja teollisuusministeriön julkaisuja 4/2001.

Liski, J. 2000. Millainen kiertoaika eduksi metsien hiilitaloudelle? Metsätieteen aikakauskirja 4/2000: 639-642.

Liski, M. 1998. Päästökauppa voi pitkittää saasteongelmaa. Vihreä Lanka. www.vihrealanka.fi/98/10/kommentti.htm

Metsätilastollinen vuosikirja 1999. Metsäntutkimuslaitos. Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä 1999. 352 s.

Ministry of the Environment 2001. Finland's National Greenhouse Gas Inventory. www.vyh.fi/eng/environ/state/air/emis/gng/gng/htm

Moura-Costa, P. Stuart, M. 1998. Forestry-based Greenhouse Gas Mitigation: a short story of market evolution. Julkaisu Commonwealth Forestry Review 77: 191-202, september 1998.

Mäkipää, R. ja Tomppo, E. 1998. Suomen metsät ovat hiilinielu – vaikka Kioton ilmastopöytäkirjan mukaan muulta näyttää. Folia Forestalia 2/1998: 268-274.

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.

Ojansuu, R. ym. 1991. Luonnonprosessit metsälaskelmassa (MELA) – Metsä 2000-versio. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 385. 59 s.

Ollikainen Markku (1996): Essays on Timber Supply and Forest Taxation. VATT Tutkimuksia – Research Reports 33.

Paajanen, T. 1997. Laatupuun arvonlisä – mikä on eri lopputuotteiden puustamaksukyky? Metsätieteen aikakauskirja 1997(1):121-124.

Pingoud, K. Perälä, A-L. Pussinen, A. 2001. Carbon Dynamics in Wood Products. MITI 94-99 Second revision.

Pohjola, J. 1998. Metsäsektorin kansantaloudellinen mallintaminen: Ilmastopoliittika ja metsäteollisuuden kilpailukyky. Metsäntutkimuslaitos.

Pohjolan Voima Oy (2001): PVO osallistui päästökauppakokeiluun. www.pvo.fi/page.asp?notice=1&_item_id=31

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. Julkaisu Forest Ecology and management 12.12.2000. 14 s.

Sedjo, R. 1999. Potential for Carbon Forest Plantations in Marginal Timber Forests: The Case of Patagonia, Argentina. Discussion Paper 99-27. 20 s.

UNCTAD 1998. Global Greenhouse Emissions Trader, Issue 10. May 2001.
www.unctad.org

Van Kooten, G. Cornelis. 1995. Effect of Carbon Taxes and Subsidies on Optimal Forest Rotation Age and Supply of Carbon Services. Julkaisu American Journal of Agricultural Economics, May 1995, Issue 2.

Valsta, L. Stand Management Assistant (SMA). 4. Case Studies. METLA.

Viitala, E. 2002. Metsän optimaalinen kiertoaika: Lähestymistavat ja niiden talousteoreettinen perusta. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 848, 2002.

Liite 1. Ylimääräisillä metsänhoitopäätöksillä aikaansaatuisten hiilinielujen keskimääräiset yksikkökustannukset optimaalisilla hakkuuohjelmilla, kun vaadittiin 20 ja 40 kuutiomäärien korotukset kiertoajan keskikuutiomääriin. Korko 3%.

Koela	H₁₀₀/Av. vol. m³/ha	+ 20 m³. Av. vol/ha	+ 40 m³. Av. vol/ha
1	23.9/150.3	ΔNPV-256.0 mk/ha = 12.8 mk/m ³ = 11.3 mk/CO ₂ tn = 1.9 €/CO ₂ tn	ΔNPV-1634.6 mk/ha = 40.9 mk/m ³ = 36.1 mk/CO ₂ tn = 6.1 €/CO ₂ tn
2	24.3/143.6	ΔNPV - 402.2 mk/ha = 20.1 mk/m ³ = 17.8 mk/CO ₂ tn = 3.0 €/CO ₂ tn	ΔNPV - 1106.5 mk/ha = 27.7 mk/m ³ = 24.4 mk/CO ₂ tn = 4.1 €/CO ₂ tn
3	25.7/137.4	ΔNPV - 530.9 mk/ha = 26.5 mk/m ³ = 23.4 mk/CO ₂ tn = 3.9 €/CO ₂ tn	ΔNPV - 1546.2 mk/ha = 38.7 MK/M ³ = 34.1 mk/CO ₂ tn = 5.7 €/CO ₂ tn
4	27.0/153.5	ΔNPV - 240.0 mk/ha = 12.0 mk/m ³ = 10.6 mk/CO ₂ tn = 1.8 €/CO ₂ tn	ΔNPV - 819.6 mk/ha = 20.0 mk/m ³ = 18.1 mk/CO ₂ t = 3.0 €/CO ₂ tn.
5	28.4/170.8	ΔNPV - 348.7 mk/ha = 17.4 mk/m ³ = 15.4 mk/CO ₂ tn = 2.6 €/CO ₂ tn	ΔNPV - 1318.4 mk/ha = 33.0 mk/m ³ = 29.1 mk/CO ₂ tn = 4.9 €/CO ₂ tn
6	29.1/174.0	ΔNPV - 305.0 mk/ha = 15.3 mk/m ³ = 13.5 mk/CO ₂ tn = 2.3 €/CO ₂ tn	ΔNPV - 889.0 mk/ha = 22.2 mk/m ³ = 19.6 mk/CO ₂ tn = 3.3 €/CO ₂ tn
Keskimäärin	26.4/154.9	ΔNPV - 347.1 mk/ha = 17.4 mk/m ³ = 15.3 mk/CO ₂ tn = 2.6 €/CO₂ tn.	ΔNPV - 1219.1 mk/ha = 30.5 mk/m ³ = 26.9 mk/CO ₂ tn = 4.5 €/CO₂ tn

Liite 2. Ylimääräisillä metsänhoitopäätöksillä aikaansaatuisten hiilinielujen keskimääräiset yksikkökustannukset optimaalisilla hakkuuohjelmilla, kun vaadittiin 20 ja 40 kuutiomäärien korotukset kiertoajan keskikuutiomääriin. Korko 4%.

koecala	H₁₀₀ /Av. vol. m³/ ha	+ 20 m3. Av. vol./ha	+ 40 m3. Av. vol./ha
1	23.9/135.3	ΔNPV - 209.0 mk/ha = 10.5 mk/m ³ = 9.2 mk/CO ₂ tn = 1.5 €CO ₂ tn	ΔNPV - 670.4 mk/ha = 16.8 mk/m ³ = 14.8 mk/CO ₂ tn = 2.5 €CO ₂ tn
2	24.3/122.8	ΔNPV - 112.0 mk/ha = 5.6 mk/m ³ = 4.9 mk/CO ₂ tn = 0.8 €CO ₂ tn	ΔNPV - 523.3 mk/ha = 13.1 mk/m ³ = 11.5 mk CO ₂ tn = 1.9 €CO ₂ tn
3	25.7/128.4	ΔNPV - 362.2 mk/ha = 18.1 mk/m ³ = 16.0 mk/CO ₂ tn = 2.7 €CO ₂ tn	ΔNPV - 1038.5 mk/ha = 26.0 mk/m ³ = 22.9 mk/CO ₂ tn = 3.9 €CO ₂ tn
4	27.0/143.8	ΔNPV - 190.4 mk/ha = 9.5 mk/m ³ = 8.4 mk/CO ₂ tn = 1.4 €CO ₂ tn	ΔNPV - 605.3 mk/ha = 15.1 mk/m ³ = 13.4 mk/CO ₂ tn = 2.3 €CO ₂ tn
5	28.4/146.3	ΔNPV - 91.5 mk/ha = 4.6 mk/m ³ = 4.0 mk/CO ₂ tn = 0.7 €CO ₂ tn	ΔNPV - 470.2 mk/ha = 11.8 mk/m ³ = 10.4 mk/CO ₂ tn = 1.7 €CO ₂ tn
6	29.1/157.2	ΔNPV - 198.6 mk/ha = 9.9 mk/m ³ = 8.8 mk/CO ₂ tn = 1.5 €CO ₂ tn	ΔNPV - 603.9 mk/ha = 15.1 mk/m ³ = 13.3 mk/CO ₂ tn = 2.2 €CO ₂ tn
Keskimäärin	26.4/139.0	ΔNPV - 194.0 mk/ha = 9.7 mk/m ³ = 8.6 mk/CO ₂ tn = 1.4 €CO₂ tn	ΔNPV - 651.9 mk/ha = 16.3 mk/m ³ = 14.4 mk/CO ₂ tn = 2.4 €CO₂ TN

Liite 3. Ylimääräisillä metsänhoitopäätöksillä aikaansaatuisten hiilinielujen keskimääräiset yksikkökustannukset optimaalisilla hakkuuohjelmilla, kun vaadittiin 10 ja 20 % kuutiomäärien korotukset kiertoajan keskikuutiomääriin. Korko 3%.

koeala	H₁₀₀/Av.vol. m³/ha	+ 10 % Av. vol./ha	+ 20 % Av. vol./ha
1	23.9/150.3	= + 15.0 m ³ ΔNPV - 390.3 mk/ha = 26.0 mk/m ³ = 23.0 mk/CO ₂ tn = 3.9 €/CO ₂ tn	= + 30.1 m ³ ΔNPV - 664.6 mk/ha = 22.1 mk/m ³ = 19.5 mk/CO ₂ tn = 3.3 €/CO ₂ tn
2	24.3/143.6	= + 14.4 m ³ ΔNPV - 325.5 mk/ha = 22.6 mk/m ³ = 19.9 mk/CO ₂ tn = 3.3 €/CO ₂ tn	= + 28.7 m ³ ΔNPV - 603.6 mk/ha = 21.0 mk/m ³ = 18.6 mk/CO ₂ tn = 3.1 €/CO ₂ tn
3	25.7/137.4	= + 13.7 m ³ ΔNPV - 180.8 mk/ha = 13.2 mk/m ³ = 11.6 mk/CO ₂ tn = 2.0 €/CO ₂ tn	= + 27.5 m ³ ΔNPV - 524.2 mk/ha = 19.1 mk/m ³ = 16.8 mk/CO ₂ tn = 2.8 €/CO ₂ tn
4	27.0/153.5	= + 15.4 m ³ ΔNPV - 118.5 mk/ha = 7.7 mk/m ³ = 6.8 mk/CO ₂ tn = 1.1 €/CO ₂ tn	= + 30.7 m ³ ΔNPV - 452.4 mk/ha = 14.7 mk/m ³ = 13.0 mk/CO ₂ tn = 2.2 €/CO ₂ tn
5	28.4/170.8	= + 17.1 m ³ ΔNPV - 400.2 mk/ha = 23.4 mk/m ³ = 20.6 mk/CO ₂ tn = 3.5 €/CO ₂ tn	= + 34.2 m ³ ΔNPV - 1024.1 mk/ha = 29.9 mk/m ³ = 26.4 mk/CO ₂ tn = 4.4 €/CO ₂ tn
6	29.1/174.0	= + 17.4 m ³ ΔNPV - 272.4 mk/ha = 15.7 mk/m ³ = 13.8 mk/CO ₂ tn = 2.3 €/CO ₂ tn	= + 34.8 m ³ ΔNPV - 626.5 mk/ha = 18.0 mk/m ³ = 15.9 mk/CO ₂ tn = 2.7 €/CO ₂ tn
keskimäärin	26.4/154.9	= + 15.5 m ³ ΔNPV - 281.3 mk/ha = 18.1 mk/m ³ = 16.0 mk/CO ₂ tn = 2.7 €/CO₂ tn	= + 31.0 m ³ ΔNPV - 649.2 mk/ha = 20.8 mk/m ³ = 18.4 mk/CO ₂ tn = 3.1 €/CO₂ tn

Liite 4. Ylimääräisillä metsänhoitopäätöksillä aikaansaatuisten hiilinielujen keskimääräiset yksikkökustannukset optimaalisilla hakkuuohjelmilla, kun vaadittiin 10 ja 20 % kuutiomäärien korotukset kiertoajan keskikuutiomääriin. Korko 4%.

koela	H₁₀₀/Av.vol. m³/ha	+ 10 % Av. vol./ha	+ 20 % Av. vol. /ha
1	23.9/135.3	= + 13.5 m ³ ΔNPV - 108.7 mk/ha = 8.1 mk/m ³ = 7.1 mk/CO ₂ tn = 1.2 €CO ₂ tn	= + 27.1 m ³ ΔNPV - 294.0 mk/ha = 10.8 mk/m ³ = 9.6 mk/CO ₂ tn = 1.6 €CO ₂ tn
2	24.3/122.8	= + 12.3 m ³ ΔNPV - 60.0 mk/ha = 4.9 mk/m ³ = 4.3 mk/CO ₂ tn = 0.7 €CO ₂ tn	= + 24.6 m ³ ΔNPV - 181.2 mk/ha = 7.4 mk/m ³ = 6.5 mk/CO ₂ tn = 1.1 €CO ₂ tn
3	25.7/128.4	= + 12.8 m ³ ΔNPV - 239.4 mk/ha = 18.7 mk/m ³ = 16.6 mk/CO ₂ tn = 2.8 €CO ₂ tn	= + 25.7 m ³ ΔNPV - 565.6 mk/ha = 22.0 mk/m ³ = 19.4 mk/CO ₂ tn = 3.3 €CO ₂ tn
4	27.0/143.8	= + 14.4 m ³ ΔNPV - 112.9 mk/ha = 7.8 mk/m ³ = 6.9 mk/CO ₂ tn = 1.2 €CO ₂ tn	= 28.8 m ³ ΔNPV - 367.9 mk/ha = 12.8 mk/m ³ = 11.3 mk/CO ₂ tn = 1.9 €CO ₂ tn
5	28.4/146.3	= + 14.6 m ³ ΔNPV - 39.3 mk/ha = 2.7 mk/m ³ = 2.4 mk/CO ₂ tn = 0.4 €CO ₂ tn	= + 29.3 m ³ ΔNPV - 236.5 mk/ha = 8.1 mk/m ³ = 7.1 mk/CO ₂ tn = 1.2 €CO ₂ tn
6	29.1/157.2	= + 15.7 m ³ ΔNPV - 127.4 mk/ha = 8.1 mk/m ³ = 7.2 mk/CO ₂ tn = 1.2 €CO ₂ tn	= + 31.4 m ³ ΔNPV - 455.5 mk/ha = 14.5 mk/m ³ = 12.8 mk/CO ₂ tn = 2.2 €CO ₂ tn
keskimäärin	26.4/139.0	= + 13.8 m ³ ΔNPV - 114.6 mk/ha = 8.3 mk/m ³ = 7.4 mk/CO ₂ tn = 1.2 €CO₂ tn	= + 27.8 m ³ NPV - 350.1 mk/ha = 12.6 mk/m ³ = 11.1 mk/CO ₂ tn = 1.9 €CO₂ tn

Liite 5.

Eräiden yksittäisten metsätalouden toimenpiteiden vaikutus hiilen sitoutumiseen 2008-2012

TOIMENPIDE	HIILINIELUVAIKUTUS MILJ. TONNIA CO ₂ / VUOSI	HUOM.
Metsäpalot	-0.09	Metsäpalojen määrä Suomessa on jo niin alhainen, ettei niihin pystytä merkittävästi vaikuttamaan. Pidemmällä tähtäimellä kulutus voi kuitenkin olla hiilineutraalia, koska hakkuutähteet maatuvat.
Kulutus	-0.06	
Uudistusviiveiden estäminen	+0.04	Nopeuttaa uuden puusukupolven syntyä.
Uudistusvarmuuden lisääminen	+0.43	Nopeuttaa uuden puusukupolven syntyä.
Turvetuotantoalueiden metsitys/ennallistaminen	+0.43	Edellyttää lisälannoitusta kivennäislannoitteilla.
Nuoren metsän hoito	-1.76	Taimikon perkaukset ja harvennukset johtavat pienempään, tosin arvokkaampaan, puuston määrään.
Lannoitus	+0.28	
Jätöpuut	-0.10	Vähentää nettokasvua.
Kiertoajan säätely	+/- 24.20	Väliaikainen tasomuutos, suuruusluokka-arvio, vuoden muutoksen vaikutus.
Soiden kunnostus- ja uudisojitus	+8.10	Nopeuttaa puuston kasvua.
Metsien suojele	+3.63	Nykyisten suojelelun alaisten metsien kasvu.
Hakkuutähteiden keräys	lähde (?)	Ravinteiden poistuminen hidastaa kasvua, mutta jos korvataan fossiilisia polttoaineita, nettovaikutus on positiivinen.

+ nielu, - päästö

Lähde: Sievänen (2000)