

**Pro gradu -tutkielma**

**Metsänhoidon mahdollisuudet metsien hiilivarastojen  
kasvattamiseen ja vaikutukset metsänkasvatuksen  
kannattavuuteen**

**Juha Vuorikko**



**Jyväskylän yliopisto**

Bio- ja ympäristötieteiden laitos

Ympäristötiede ja -teknologia

24.02.2018

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta  
Bio- ja ympäristötieteiden laitos  
Ympäristötiede ja -teknologia

Vuorikko Juha: Metsänhoidon mahdollisuudet metsien hiilivarastojen kasvattamiseen ja vaikutukset metsänkasvatuksen kannattavuuteen  
Pro gradu -tutkielma: 42 s., 1 liite (5 s.)  
Työn ohjaajat: Prof. Mikko Mönkkönen ja TkT Anna Repo  
Tarkastajat: FT, Dos. Elisa Vallius ja TkT Anna Repo  
Helmikuu 2018

---

Hakusanat: Ilmastonmuutos, metsänomistaja, päästökauppa, hakkuu, talous

## TIIVISTELMÄ

Hiilidioksidipitoisuuden kasvu ilmakehässä on tärkein syy antropogeeniseen ilmastonmuutokseen, ja nopeita toimia tarvitaan, jotta maapallon keskilämpötilan nousu saataisiin rajattua 2 °C asteeseen. Hiilidioksidipitoisuuden lisääntyminen johtuu muun muassa fossiilisten polttoaineiden käytöstä ja metsäpinta-alan pienenemisestä. Metsät sitovat kasvaessaan ilmakehän hiiltä itseensä ja toimivat siten hiilinieluinä ja -varastoinä. Toisaalta metsien hyödyntämisenä raaka-aineena on suuri taloudellinen merkitys Suomessa. Lisääntyvän puunkäytön vuoksi on tärkeää löytää ratkaisuja siihen, miten metsiä voitaisiin edelleen hyödyntää samalla säilyttäen metsien hiilivarasto mahdollisimman suurena. Tässä työssä selvitettiin metsämallinnuksen avulla eri metsänhoitomenetelmien vaikutusta keskimääräiseen hiilensidontaan ja metsän nettonykyarvoon erilaisilla metsätyypeillä, eri ajanjaksoilla ja korkokannoilla sekä laskettiin eri menetelmien kustannustehokkuutta keskimääräisen hiilivaraston kasvattamiseksi. Suurimman nettonykyarvon antavan metsänhoitomenetelmän vaihtaminen enemmän keskimääräistä hiiltä varastoivaan menetelmään johti halvimmillään 5–3 301 €/t C kustannuksiin riippuen korkokannasta, tarkasteluajasta ja metsätyypistä. Tulosten mukaan lisäsitoutuneen hiilitonnin kustannus voi metsänhoitomenetelmää vaihtamalla tulla joissain tapauksissa halvemmaksi kuin EU:n päästökaupassa kirjoitushetkellä oleva hiilitonnin hinta. Tämän perusteella voisi olla taloudellisesti ja ilmastonmuutoksen hillinnän kannalta mielekäästä tutkia sellaisten järjestelmien kehittämistä, joissa esimerkiksi metsänomistajat sitoutuisivat kasvattamaan metsiensä hiilivarastoa ja heille korvattaisiin tästä aiheutuvat tulonmenetykset.

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ, Faculty of Science  
Department of Biological and Environmental Science  
Environmental Science and Technology

Vuorikko Juha: Possibilities to increase forest carbon stocks with forest management and impacts on the profitability of forestry  
Master thesis: 42 p., 1 appendices (5 p.)  
Supervisors: Prof. Mikko Mönkkönen and D.Sc. (Tech.). Anna Repo  
Inspectors: PhD, Docent Elisa Vallius and D.Sc. (Tech.). Anna Repo  
February 2018

---

Key words: Climate change, forest owner, emission trading, logging, economy

## **ABSTRACT**

The biggest reason to anthropogenic climate change is growing carbon dioxide levels in the atmosphere. Fast actions are needed if we want to restrain global warming below 2 °C. Burning fossil fuels and reducing forest area are the main reasons for growing levels of carbon dioxide. On the one hand, forests sequester and store atmospheric carbon, and hence act as carbon sinks and storages, on the other hand forestry is an important part of the Finnish economy. Therefore, it is important to find solutions to maintain large forest carbon stocks if the use of wood will increase in future. The aim of this study was to investigate how different forest management regimes affect average carbon storages, net present value and the cost-efficiency of increased carbon stock in different forest types, with different interest rates and time periods. When the management regime that gave the biggest net present value was switched to other management regime that lead to larger average carbon storage, the lowest price of the additional carbon varied from 5 to 3 301 €/t C depending on the interest rate, studied forest type and time period. In some cases, the cost of additional forest carbon ton was lower than the price of carbon ton in the EU emission trading system. These results may be used to further study of developing system in which the forest owners commit to increase the average carbon storage in their forests and they would be paid any losses to profit that this kind of activity would affect.

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>1 JOHDANTO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 TUTKIMUKSEN TAUSTAA</b> .....	<b>3</b>
2.1 Ilmastonmuutos ja ilmastopolitiikka.....	3
2.2 Metsien merkitys globaalissa hiilenkierrossa.....	4
2.3 Metsien hiilivarastot Suomessa.....	4
2.3.1 Puuston hiilivarasto.....	4
2.3.2 Maaperän hiilivarasto.....	5
2.3.3 Ilmastonmuutoksen vaikutus metsien hiilivarastoon.....	5
2.3.4 Metsänkäsittelyn vaikutukset metsien hiilivarastoon.....	6
2.4 Suomen metsävarat ja metsien hakkuut.....	7
2.5 Suomen metsävarojen taloudellinen merkitys.....	8
<b>3 AINEISTOT JA MENETELMÄT</b> .....	<b>9</b>
3.1 Aineisto.....	9
3.1.1 SIMO-laskentaohjelma.....	9
3.1.2 BERG-työryhmän malli ja aineisto.....	9
3.1.3 Muutokset aineistoon.....	11
3.2 Menetelmät.....	12
3.2.1 Aineiston käsittely.....	12
3.2.2 Lisääntyneen hiilensidonnan yksikkökustannus.....	13
<b>4 TULOKSET</b> .....	<b>16</b>
4.1 Metsänhoitomenetelmien vaikutus metsien hiilivarastoihin.....	16
4.2 Metsänhoitomenetelmien vaikutus nettonykyarvoon.....	20
4.3 Kustannustehokkaat keinot kasvattaa metsien hiilivarastoja.....	24
<b>5 TULOSTEN TARKASTELU</b> .....	<b>28</b>
5.1 Metsänhoitomenetelmien vaikutus metsien hiilivarastoihin.....	28
5.2 Metsänhoitomenetelmien vaikutus nettonykyarvoon.....	30
5.3 Kustannustehokkaat keinot kasvattaa metsien hiilivarastoja.....	31
5.4 Epävarmuudet.....	34
<b>6 JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....	<b>35</b>
<b>KIITOKSET</b> .....	<b>36</b>
<b>KIRJALLISUUS</b> .....	<b>36</b>
<b>LIITE 1. Eri metsänhoitomenetelmien metsänkäsittelyt eri metsätyypeille</b> .....	<b>43</b>

## 1 JOHDANTO

Ihmisen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt sekä hiilinielujen ja -varastojen pieneneminen ovat keskeisessä roolissa ilmastonmuutoksessa, joka uhkaa maailmanlaajuisesti luonnon ja ihmisten hyvinvointia (IPCC 2014). Hiilidioksidipäästöjä ja hiilidioksidin määrää ilmakehässä on vähennettävä, ja Suomi on esimerkiksi ratifioinut Pariisin sopimuksen yhtenä keinona vastata ilmastonmuutokseen (Ympäristöministeriö 2016). Pariisin sopimuksen tavoitteena on pitää maapallon keskilämpötilan nousu selvästi alle kahdessa asteessa verrattuna esiteolliseen aikaan ja pyrkiä toimiin, joilla lämpeneminen saataisiin pysäytettyä alle 1,5 asteeseen (UN 2015). Tällä hetkellä vaikuttaa siltä, että ilmoitetut toimet ovat riittämättömiä Pariisin sopimuksen tavoitteiden saavuttamiseksi ja päästövähennystavoitteita pitäisi tiukentaa (Rogelj ym. 2016). Ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kasvua voidaan hillitä esimerkiksi vähentämällä fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja lisäämällä hiilinieluja ja -varastoja (IPCC 2014).

Metsät voivat toimia tällaisina hiilinieluinä ja -varastoinä. Seppälä ym. (2015) toteavat, että metsän hiilivarasto koostuu maaperässä olevasta hiilestä, kuolleesta puusta ja puuston biomassasta. Metsät sitovat kasvaessaan ilmakehästä hiiltä itseensä, ja jos hiilivarasto kasvaa, metsät toimivat hiilinieluinä. Toisaalta hiiltä vapautuu metsistä hakkuiden takia sekä luonnollisesti hajotustoiminnan seurauksena. Jos metsän hiilivarasto pienenee, metsä toimii silloin hiililähteenä (Seppälä ym. 2015).

Kansallisen metsästrategian 2025 mukaan metsät ovat Suomen tärkein hiilinielu, ja niihin sitoutuvan hiilidioksidin määrä vaihtelee vuosittain (Valtioneuvoston periaatepäätös 2015). Esimerkiksi ajanjaksolla 1990–2012 metsien hiilinielu vaihteli 22–50 miljoonan tonnin välillä vastaten noin 30–60 % Suomen kokonaispäästöistä (Valtioneuvoston periaatepäätös 2015). Metsillä on suuri merkitys Suomen kokonaispäästöille, koska ne hiilinieluinä toimiessaan kompensoivat Suomen hiilidioksidipäästöjä.

Metsien hyödyntäminen raaka-aineen lähteenä on kuitenkin tärkeää Suomen talouden kannalta. Esimerkiksi vuoden 2016 viennistä metsäteollisuuden osuus oli 21,9 % (Tulli 2017), ja vuonna 2013 metsätalous ja metsäteollisuus työllistivät 65 000 henkilöä (Metsäntutkimuslaitos 2014). Lisäksi metsistä saatavalla bioenergialla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita ja lisätä energiaomavaraisuutta (Valtioneuvoston periaatepäätös 2015). Puupolttoaineiden osuus energian kokonaiskulutuksesta vuonna 2016 oli 26 % ollen

siten tärkein energian lähde Suomessa (Tilastokeskus 2017 a). Kansallisen metsästrategian 2025 mukaan puunkäyttöä lisätään tulevaisuudessa, mikä johtaa hiilinielujen pienenemiseen (Valtioneuvoston periaatepäätös 2015). Tämän vuoksi on tärkeää selvittää, kuinka metsien lisääntyvästä käytöstä johtuvaa hiilivaraston pienenemistä voitaisiin kompensoida. Suurin osa Suomen metsistä on metsätalouskäytössä (Metsäntutkimuslaitos 2014), jolloin yksi varteenotettava tapa lisätä hiilivaraston kokoa voisi löytyä metsänhoidon muutoksista. Tutkimuksissa on esimerkiksi havaittu, että harvennusten vähentäminen ja kiertoajan pidentäminen kasvattavat metsän hiilivarastoa (Richards & Stokes 2004, Ruiz-Peinado ym. 2016).

Metsänhoitomenetelmien muuttaminen ja suositusten antaminen ei vielä itsessään kuitenkaan riitä, sillä lopullisen päätöksen metsissä käytettävistä metsänhoitomenetelmistä tekevät metsänomistajat. Metsänomistajilla voi olla esimerkiksi erilaisia tavoitteita ja näkemyksiä metsiensä hoidossa (Hänninen ym. 2011). Joissain tapauksissa metsänomistajan suurin kannustin metsänhoitomenetelmän valintaan saattaa olla metsästä saatava tuotto. Tämän vuoksi suurimpiin hiilen varastoihin johtavat menetelmät eivät valikoidu käyttöön, jos ne alentavat samalla metsästä saatuja tuloja. Ongelmaa voisi yrittää ratkaista selvittämällä, kuinka paljon eri metsänhoitomenetelmien käyttäminen keskimäärin varastoi hiiltä eri ajanjaksoilla ja voisiko alentuneiden tulojen kompensoiminen metsänomistajille toimia kustannustehokkaana ratkaisuna keskimääräisenhiilivaraston kasvattamisessa ja ilmastonmuutoksen ehkäisyssä.

Tässä pro gradu -työssä selvitettiin keskimääräisen hiilivaraston lisäämisen kannalta kustannustehokkaimmat metsänhoitomenetelmät verrattuna suurimpaan nettonykyarvoon johtavaan metsänhoitomenetelmään. Selvitys tehtiin simuloitun data-aineiston avulla käyttäen eri tarkasteluajanjaksoja, metsätyyppejä ja korkokantoja. Työn tutkimuskysymykset olivat:

1. Miten paljon metsänhoitomenetelmät vaikuttavat metsän kykyyn varastoida hiiltä?
2. Miten metsänhoitomenetelmät vaikuttavat metsän nettonykyarvoon?
3. Mikä on kustannustehokkain metsänhoitomenetelmä lisätä metsän keskimääräisen hiilivaraston kokoa verrattuna suurimman nettonykyarvon antavaan metsänhoitomenetelmään?

## 2 TUTKIMUKSEN TAUSTAA

### 2.1 Ilmastonmuutos ja ilmastopolitiikka

Hallitustenvälisen ilmastonmuutospaneelin mukaan ilmastonmuutoksen vaikutuksia on jo nyt havaittavissa ympäri maapalloa (IPCC 2014). Esimerkiksi merissä on havaittu lämpenemistä ja happamoitumista, äärimmäisten sääilmiöiden määrä on kasvanut ja jäätiköt ovat pienentyneet (IPCC 2014). Fossiiliset polttoaineet ovat ihmistoiminnasta peräisin olevan hiilidioksidin päälähde ja muita lähteitä ovat esimerkiksi maankäytön muutokset, metsätalous ja sementin valmistus (IPCC 2014). Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli esittää, että jos kasvihuonekaasupäästöjä ei rajoiteta, ilmasto lämpenee edelleen ja vaarana ovat peruuttamattomat, vakavat ja kaikkialle ulottuvat vaikutukset (IPCC 2014).

Ilmaston lämpenemistä yritetään ehkäistä kansainvälisillä neuvotteluilla ja sopimuksilla. Näitä sopimuksia ovat esimerkiksi vuonna 1992 tehty YK:n ilmastonmuutosta koskeva puitesopimus ja sen alaiset vuosina 1997 tehty Kioton pöytäkirja ja 2015 tehty Pariisin sopimus (UN 2017). Suomen on osallistuttava myös päästövähennystalkoisiin. Esimerkiksi EU:ssa ehdotus Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksesta esittää jäsenvaltioiden kasvihuonepäästöjen vähennyksistä Suomelle 39 % vähennystä vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoden 2005 tasoon (Euroopan komissio 2016). Lisäksi Suomi pyrkii pitkällä aikavälillä hiilineutraaliksi yhteiskunnaksi, ja energia- ja ilmastotiekartta 2050 esittää, että Suomi tavoittelee vuoteen 2050 mennessä 80–95 % kasvihuonekaasupäästövähennyksiä verrattuna vuoden 1990 tasoon (TEM 2014).

Jos halutaan saavuttaa Pariisin sopimuksen tavoitteet ja estää ilmaston lämpeneminen yli 2 °C verrattuna esiteolliseen aikaan, on toimittava nopeasti (IPCC 2014). Päästöjä on vähennettävä huomattavasti seuraavien vuosikymmenien aikana, ja hiilidioksidipäästöt tulisi saada loppumaan vuosisadan loppuun mennessä muiden pitkäikäisten kasvihuonekaasupäästöjen ohella (IPCC 2014). Hiilidioksidipäästöt ovat olleet melko vakaita pari viimeistä vuotta, mutta uusimpien arvioiden mukaan viime vuonna päästöt näyttäisivät kasvaneen uuteen ennätykseen (Jackson ym. 2017). Jackson ym. (2017) toteavatkin, että aika on loppumassa, jos halutaan pysyä 2°C tavoitteessa, puhumattakaan 1,5°C tavoitteesta.

## 2.2 Metsien merkitys globaalissa hiilenkierrossa

Postin ym. (1990) mukaan hiili kiertää maapallolla kolmen suuren hiilivaraston välillä. Nämä varastot koostuvat ilmakehästä, meristä ja maanpäällisistä systeemeistä, jotka voidaan jakaa vielä erillisiin varastoihin, kuten esimerkiksi kasvillisuuden ja maaperän orgaanisen hiilen varastoiksi (Post ym. 1990). Hallitustenvälinen ilmastomuutospaneeli (IPCC 2000) tarkentaa, että maanpäällisissä ekosysteemeissä hiiltä on sitoutuneena elävään biomassaan, hajoavaan orgaaniseen ainekseen ja maaperään. Kasvaessaan yhteyttävät kasvit sitovat ja varastoivat hiiltä itseensä ilmakehästä (Post ym. 1990) ja metsillä on sen takia suuri merkitys hiilenkierrolle (Luyssaert 2007). Osa metsän sitomasta hiilestä päätyy lopulta maaperään karikkeen ja kuolleiden puiden muodossa (Sievänen ym. 2012).

Hiili kiertää maanpäällisten ekosysteemien ja ilmakehän välillä yhteyttämisen, hengityksen, hajotustoiminnan ja palamisen seurauksena (IPCC 2000). Post ym. (1990) esittävät, että luonnollisessa hiilenkierrossa ilmakehän ja kasvillisuuden välinen hiilenkierto olisi tasapainossa. Luontainen hiilenkierto on kuitenkin häiriintynyt suurten hiilivarastojen välillä ihmistoiminnan takia (Post ym. 1990). Esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden polttaminen on johtanut siihen, että hiiltä on siirtynyt maaperän pitkäaikaisista hiilivarastoista ilmakehään (Post ym. 1990).

Hiilenkierron ja ilmastomuutoksen yhteydessä usein puhutaan hiilinieluista, hiililähteistä ja hiilitaseesta. YK:n (UN 1992) mukaan nielut ovat prosesseja, mekanismeja ja toimintoja, jotka vähentävät kasvihuonekaasujen määrää ilmakehästä ja lähteitä ovat toiminnot ja prosessit, jotka lisäävät kasvihuonekaasujen määrää ilmakehään. Hiilitase on hiilivaraston muutos aikayksikössä (vuodessa), ja metsän hiilitaseen laskennassa huomioidaan puuston kasvu, kokonaispoistuma sekä kuolleeseen puuainekseen ja maaperään sitoutunut ja näistä vapautunut hiili (Seppälä ym. 2017, Hildén ym. 2016).

## 2.3 Metsien hiilivarastot Suomessa

### 2.3.1 Puuston hiilivarasto

Metsien hiilitaseeseen tärkein vaikuttava tekijä on puuston hiilivaraston vaihtelu (Sievänen ym. 2012), ja Suomessa puuston biomassa on sitoutunut noin 700 miljoonaa tonnia hiiltä (Valtioneuvoston periaatepäätös 2015). Valtakunnan metsien 12. inventoinnin alustavien tietojen mukaan puuston määrä on lisääntynyt 110 miljoonaa m<sup>3</sup> vuosien 2009–2013 ja 2014–2016 mittausten välillä (Luke 2017).



### 2.3.2 Maaperän hiilivarasto

Maaperän hiilivarastolla tarkoitetaan maaperässä olevaa orgaanista ainesta, kuten eri hajoamisvaiheessa olevia eläinten, kasvien ja mikrobien jäännöksiä (Post ja Kwon 2000). Maaperän hiilivarasto on biomassaan sitoutunutta hiilivarastoa suurempi boreaalisissa metsissä (IPCC 2000) ja noin kaksi kolmasosaa metsään varastoituneesta hiilestä sijaitsee maaperässä (Liski 2000). Suomessa maaperän hiilivaraston arvellaan olevan noin 1 300 miljoonaa tonnia kangasmetsissä ja 5 500 miljoonaa tonnia soilla (Valtioneuvoston periaatepäätös 2015, Luke 2012). Maalaji vaikuttaa hiilen vapautumiseen tai sitoutumiseen maaperään. Esimerkiksi tilastokeskuksen (2017 b) mukaan metsien kivennäismaiden hiilidioksidin nettopoistuma ilmakehästä vaihtelee vuosittain ja vuonna 2015 se oli 12 miljoonaa tonnia CO<sub>2</sub> ekvivalenttia. Vastaavasti metsien orgaanisten maiden hiilidioksidin nettopäästö vaihtelee vuosittain ja vuonna 2015 se oli 6,2 miljoonaa tonnia CO<sub>2</sub> ekvivalenttia (Tilastokeskus 2017 b). Vertailuna Suomen kasvihuonekaasujen kokonaispäästöt vuonna 2016 olivat 58,8 miljoonaa tonnia CO<sub>2</sub> ekvivalenttia, kun lukuun ei laskettu mukaan maankäyttö, maankäytön muutokset ja metsätalous -sektoria (Tilastokeskus 2016).

Maaperässä olevan hiilen määrä vaihtelee riippuen syntyvän karikkeen ja hajoamisen seurauksena vapautuvan hiilen suhteesta (Liski 2000). Liskin (2000) mukaan hiili on pysyvämmän varastoitunut maaperään kuin puuston biomassaan. Tämän takia muutokset maaperän hiilivarastossa ovat pienempiä, mutta toisaalta siellä on suuri potentiaali isoille päästöille, jos orgaanisen aineen hajotustoiminta kiihtyy (Sievänen 2012).

### 2.3.3 Ilmastonmuutoksen vaikutus metsien hiilivarastoon

Puuston kasvunopeus vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti metsät voivat sitoa itseensä hiiltä ilmakehästä. Cannell ym. (1998) toteavat, että metsien kasvu on jo nyt lisääntynyt ja lisääntyy tulevaisuudessa entisestään kohonneen hiilidioksidipitoisuuden, kasvaneen typpilaskeuman ja ilmastonlämpenemisen seurauksena. Tämä voi vaikuttaa metsien kiertoaikoihin ja taloudelliseen tuottavuuteen, millä voi olla vaikutusta metsien hiilensidontaan (Pussinen ym. 2002).

Liskin ym. (2006) mukaan Suomessa metsien hiilitaseeseen vuosittaista vaihtelua aiheuttaa esimerkiksi sään vaihtelu, joka vaikuttaa eri tavalla kasvillisuuden, karikkeen ja maaperän hiilivarastoon. Esimerkiksi lämpeneminen voi johtaa parantuneeseen kasvuun, mikä lisää hiilen sitoutumista. Toisaalta lämpeneminen myös edistää hajotustoimintaa, jolloin

hiilidioksidia vapautuu karikkeesta ja maaperästä enemmän ilmakehään (Liski ym. 2006). Kirschbaum (1995) esittää, että erityisesti viileillä alueilla ilmastonlämpeneminen voi johtaa maaperän hiilivaraston pienenemiseen orgaanisen aineen hajoamisnopeuden kasvun myötä.

#### 2.3.4 Metsänkäsittelyn vaikutukset metsien hiilivarastoon

Ihmisen toimet vaikuttavat metsien kykyyn toimia hiilinieluna, hiililähteenä ja hiilivarastoina. Suuri osa puuston hiilestä sijaitsee puun rungoissa (Cooper 1983), ja puun korjuu metsistä pienentää siten metsien hiilivarastoa ja välitöntä hiilinielua (Mäkipää 2012, Hilden ym. 2016). Jos puunkorjuussa hakkuut yhdessä luonnollisen poistuman kanssa ylittävät puuston vuosittaisen kasvun, metsä toimii hiililähteenä (Lehtonen 2009).

Useiden tutkimusten mukaan metsänhoitomenetelmillä voidaan vaikuttaa metsien hiilivarastoon ja siten hiilenkiertoon (Liski ym. 2001, Johnson ym. 2002, Kaipainen ym. 2004, Lasch ym. 2005, Johnson & Curtis 2001). Jos kasvillisuuteen saadaan varastoitua enemmän hiiltä, se pienentää ilmakehän hiilivaraston kokoa ja auttaa ponnisteluissa ilmastonmuutosta vastaan (Post ym. 1990).

Liski ym. (2006) toteavat, että metsien hakkuiden ja harvennusten intensiteetti aiheuttaa vuosittaista vaihtelua metsien hiilitaseeseen. Esimerkiksi hakkuiden ja harvennusten lisääminen pienentävät puuston biomassassa olevaa hiilen määrää, mutta toisaalta lisäävät väliaikaisesti karikkeeseen ja maaperään sitoutuneen hiilen määrää (Liski ym. 2006). Liski (2000) esittää myös, että puiden runsaampi määrä ja suurempi koko kasvattavat maaperän hiilivarastoa, koska kariketta muodostuu enemmän. Toisaalta kiertoajan pidentämisestä johtuva puiden suuri koko voi johtaa maaperän hiilivaraston pienenemiseen verrattuna nopeaan kiertoaikaan (Kaipainen ym. 2004). Kaipaisen ym. (2004) mukaan pidemmällä kiertoajalla muodostuu vähemmän hakkuutähteitä ja hakkuutähteiden määrä suhteessa hakkuumäärään on pienempi isommilla puilla.

Puuta on joskus ajateltu myös ilmaston kannalta neutraaliksi, koska puun poltosta vapautuva hiilidioksidi sitoutuu takaisin metsään, jos hakattu alue metsitetään uudelleen. Metsä kasvaa kuitenkin hitaasti ja voi kestää useita vuosikymmeniä, että sama määrä hiiltä sitoutuu uuteen puusukupolveen kuin aiemman puuston hyödyntämisestä on vapautunut. Tällöin puuston hyödyntäminen voimistaa kasvihuoneilmiötä ja edistää ilmastonmuutosta kyseisen kiertoajan verran. (Cherubini ym. 2011, Helin ym. 2013).

Suurimman mahdollisen tuoton tavoittelu metsästä yhdessä mahdollisimman suuren hiilivaraston kanssa ei ole Ikosen (2006) mukaan mahdollista. Tämän takia on tärkeää selvittää, että millä metsänhoitomenetelmillä voitaisiin lisätä hiilivaraston kokoa mahdollisimman kustannustehokkaasti. Mononen (2003) on tutkinut lisätyn hiilensidonnan kustannuksia Etelä-Suomalaisessa männikössä SMA-ohjelmiston avulla ja Nerg (2009) tutki metsän kiertoajan vaikutusta metsänkasvatuksen kannattavuuteen ja hiilensidontaan MOTTI-metsikkösimulaattorilla. Monosen (2003) ja Nergin (2009) tutkimuksessa tutkittiin tilannetta, jossa puusto oli jo olemassa. Lisäksi heidän tutkimuksissaan ei huomioitu jatkuvapeitteisen kasvatuksen vaikutusta tai maaperän hiilivarastoa ja sen kehitystä. Siksi olisi tärkeää selvittää, kuinka tilanne muuttuu, kun lähdetään liikkeelle paljaalta maalta ja otetaan maaperän hiilivarasto ja jatkuvapeitteinen kasvatus mukaan laskelmiin.

#### **2.4 Suomen metsävarat ja metsien hakkuut**

Suomi on metsäinen maa, ja valtakunnan metsien 11. inventoinnin mukaan Suomessa on metsätalousmaata 26,2 miljoonaa hehtaaria, josta 34 % on rajoitetussa puuntuotannossa tai kokonaan puuntuotannon ulkopuolella (Korhonen ym. 2017). Puuston määrä on noin 2,4 miljardia kuutiometriä ja vuotuinen kasvu arviolta 105,5 milj. m<sup>3</sup>, josta talousmetsien osuus on noin 99 milj. m<sup>3</sup> (Korhonen ym. 2017).

Tulevaisuudessa Suomen metsien hakkuita aiotaan lisätä. Yksi Pääministeri Sipilän hallituksen strategisen ohjelman 29.5.2015 kärkihankkeista on ”Puu liikkeelle ja uusia tuotteita metsästä” (Valtioneuvoston kanslia 2015). Sen tavoitteena on muun muassa puun käytön monipuolistaminen, käytön lisääminen 15 miljoonalla kuutiometrillä vuodessa ja jalostusarvon kasvattaminen (Valtioneuvoston kanslia 2015). Kansallinen metsästrategia 2025 esittää, että runkopuun vuotuisen kasvun tavoite vuonna 2025 on 100–110 milj. m<sup>3</sup> ja runkopuun hakkuukertymä 80 milj. m<sup>3</sup> vuodessa (Valtioneuvoston periaatepäätös 2015). Vertailuna vuonna 2013 runkopuun vuotuinen kasvu oli 99 milj. m<sup>3</sup> ja runkopuun hakkuukertymä 65 milj. m<sup>3</sup> (Valtioneuvoston periaatepäätös 2015). Näin ollen runkopuun kasvusta hakattiin noin 65 % vuonna 2013, ja jos tavoitetasot toteutuvat vuonna 2025, runkopuun vuotuisesta kasvusta hakataan noin 76 %. Myös oksien, kantojen ja juurakoiden korjuumäärän kasvattamista tavoitellaan vuodelle 2025. Tavoitteena on korjata yhteensä 8 milj. m<sup>3</sup>, kun vuonna 2013 korjattiin 4 milj. m<sup>3</sup> (Valtioneuvoston periaatepäätös 2015).

Valtioneuvoston periaatepäätöksen (2015) mukaan Suomi on sitoutunut ylläpitämään 17–18 miljoonan tonnin hiilidioksidinielua vuoteen 2020 asti, mutta sen jälkeen metsien

puuston ja maaperän hiilinielu tulee pienemään puun käytön lisääntymisen takia. Hiilinielun tavoitetaso vuodelle 2025 on 10–17 milj. t CO<sub>2</sub>, joka on selvästi pienempi kuin aikaisempi hiilidioksidinielun tavoite (Valtioneuvoston periaatepäätös 2015). Kansallinen metsästrategia 2025 esittääkin, että ilmastonmuutoksen hillinnässä painopistettä siirretään hiilinieluista fossiilisten raaka-aineiden korvaamiseen uusiutuvilla raaka-aineilla (Valtioneuvoston periaatepäätös 2015). Kuitenkin Pariisin sopimus (UN 2015) kehottaa osapuolia suojelemaan ja parantamaan nieluja ja varastoja, jotka sitovat kasvihuonekaasuja. Aiheesta on käyty myös paljon julkista keskustelua Suomessa ja esimerkiksi keväällä 2017 julkaistussa tutkijoiden julkilausumassa todetaan, että puunkorjuusta johtuva hiilinielun pieneneminen voidaan rinnastaa ilmakehän kannalta päästöihin (BIOS 2017).

## **2.5 Suomen metsävarojen taloudellinen merkitys**

Yksityismetsät ovat merkittävässä roolissa puhuttaessa Suomen metsistä. Metsänomistajat voidaan jakaa karkeasti neljään ryhmään: yksityiset tahot omistavat 67 %, valtio 18 %, yhtiöt 9 % ja yhteisöt 6 % puuntuotannossa olevasta metsämaasta (Korhonen ym. 2017). Vuositasolla kantorahatulot yksityismetsistä ovat noin 1,5 miljardia euroa ja teollisuuden käyttämästä raakapuusta noin 80 % on lähtöisin yksityismetsistä (Valtioneuvoston periaatepäätös 2015). Leppäsen & Torvelaisen (2015) mukaan yksityisten metsätilojen lukumäärä (alarajana 2 ha) vuonna 2013 oli 347 000 ja keskikoko 30,1 ha. Yksityismetsänomistajia oli 632 000 vuonna 2013, kun mukaan lasketaan puoliset ja yhtymän tai kuolinpesän jäsenet (Leppänen & Torvelainen 2015). Tämä tarkoittaa sitä, että noin 12 % suomalaisista omistaa metsää, kun tilakoon alarajaksi asetetaan 2 hehtaaria. Hänninen (2011) esittää, että yksityismetsänomistajien tavoitteet vaihtelevat, mutta esimerkiksi monitavoitteisten osuus on noin 30 % ja metsästä elävien osuus noin 20 % metsänomistajista. Monitavoitteisille metsänomistajille tärkeää on sekä taloudellinen hyöty että aineettomat hyödyt metsästä. Metsästä elävillä metsänomistajilla korostuvat työmahdollisuudet metsässä ja sieltä saatavat tulot (Hänninen 2011).

Kansallinen metsästrategia 2025 esittää yhdeksi tavoitteekseen, että ”metsätalous on aktiivista ja yritysmäistä” (Valtioneuvoston periaatepäätös 2015). Tavoitteessa todetaan, että aktiivista metsien hyödyntämistä tarvitaan puun saatavuuden varmistamiselle ja että se on yksi edellytys uusille metsäalan investoinneille. Tavoitteessa puhutaan myös siitä, että on tarpeen luoda edellytyksiä yritysmäisen metsätalouden harjoittamiselle, jossa korostuu muun muassa kasvuhakuisuus ja kustannustietoisuus. Lisäksi tavoitteessa todetaan, että

yrittymäinen metsänomistus voi olla omistajalleen pää- tai sivuelinkeino ja toiminnassa korostuu puuntuotannosta saatavat tulot (Valtioneuvoston periaatepäätös 2015).

### **3 AINEISTOT JA MENETELMÄT**

#### **3.1 Aineisto**

##### **3.1.1 SIMO-laskentaohjelma**

Tässä työssä käytetty aineisto oli tuotettu BERG-työryhmän (Boreal Ecosystems Research Group) mallilla, joka perustui SIMO-laskentaohjelmistoon (Rasinmäki ym. 2009). SIMO-laskentaohjelmiston nimi tulee sanoista simulointi ja optimointi. SIMO-laskentaohjelmisto sisältää erilaisia malleja ja mallikirjastoja, joiden avulla simulointi ja optimointi toteutetaan (Kalliovirta ym. 2008). Mallivalikoima sisältää puu- ja metsikkötason malleja, joita on yleisesti käytetty metsäsuunnittelulaskennoissa Suomessa. Metsänhoito ja -käsittelymallit sisältävät yleisimpiä toimenpiteitä kuten päätehakkuu, harvennus, ennakkoraivaus, taimikonhoito, luontainen uudistus, istutus ja maanmuokkaus. Simulointi perustuu malliketjujen kokoelmiin ja malliketjut sisältävät erilaisten toimintojen sarjoja. Ohjelma pääättelee syötetyn aineiston ja malliketjuissa määriteltyjen laskentatehtävien avulla simuloinnin etenemisen. Simulointia varten määritellään myös simuloinnin ohjausparametrien arvot, joita ovat esimerkiksi: simuloinnin aloitusvuosi, simulointijakson pituus ja simuloinnin lopetusehdot (Kalliovirta ym. 2008). Suomessa maaperän hiilenkiertoa on mallinnettu Yasso07-mallilla (Tuomi ym. 2009) ja puuston kehitystä Suomen valtakunnan metsien inventointi -aineiston perusteella laadittujen mallien avulla (Hynynen ym. 2002).

##### **3.1.2 BERG-työryhmän malli ja aineisto**

Tässä työssä käytettiin 16 erilaisen metsänhoitomenetelmän (Taulukko 1) simulaatiota viidelle teoreettiselle kuviolle, jotka vastasivat viittä erilaista metsätyyppiä (Taulukko 2). Teoreettiset kuviot sijaitsivat mineraalimailla Keski-Suomessa. Kaikkia metsänhoitomenetelmiä ei simuloitu kaikille metsätyypeille, vaan metsänhoitomenetelmien valinnat perustuivat pitkälti hyvän metsänhoidon suosituksille (Äijälä ym. 2014). Käytetyistä metsänhoitomenetelmistä 14 perustui metsänhoitosuosituksiin pienin muutoksin (BAU, business as usual), yksi menetelmä oli jättää metsä kokonaan käsittelemättä (SA, set aside) ja viimeinen menetelmä oli jatkuvapeitteinen kasvatus (CCF, continuous cover forestry). Eri metsätyypeillä metsänhoitomenetelmien metsänkäsittelytoimet saattoivat

tapahtua eri aikoina tai kaikkia menetelmiä ei käytetty kaikille metsätyypeille erilaisten metsänhoidon suositusten vuoksi (Liite 1).

Taulukko 1. Simuloitujen metsänhoitomenetelmien eroavaisuuksia. Hakkuun ajankohta -sarake kertoo, kuinka monta vuotta päätehakkuuta on aikaistettu tai viivästetty verrattuna metsänhoidon suosituksiin. Harvennukset sallittu -sarake kertoo, miten harvennukset on sallittu simulaatiossa suhteessa päätehakkuuseen.

Metsänhoitomenetelmän koodi	Hakkuun ajankohta (v)	Harvennukset sallittu	Lisätiedot
BAU	Suositus	Jälkeen	
BAU_5	+5	Jälkeen	
BAU_10	+10	Jälkeen	
BAU_15	+15	Jälkeen	
BAU_m5	-5	Jälkeen	
BAUwGTR	Suositus	Jälkeen	Jätetty enemmän jättöpuita
BAUwoT_m20	-20	Ei	
BAUwT	Suositus	Ennen ja jälkeen	
BAUwT_5	+5	Ennen ja jälkeen	
BAUwT_10	+10	Ennen ja jälkeen	
BAUwT_15	+15	Ennen ja jälkeen	
BAUwT_30	+30	Ennen ja jälkeen	
BAUwT_GTR	Suositus	Ennen ja jälkeen	Jätetty enemmän jättöpuita
BAUwT_m5	-5	Ennen ja jälkeen	
CCF	-	-	Jatkuvapeitteinen kasvatus
SA	-	-	Ei toimenpiteitä

Vallitseviin käytäntöihin nojaavissa menetelmissä simulointi perustui muun muassa metsätyypin puuston ikään, pääpuulajin pituuteen ja puuston pohjapinta-alaan. Muutokset vallitseviin käytäntöihin olivat muun muassa päätehakkuun aikaistaminen tai viivästyttäminen, harvennusten salliminen ja säästöpuiden suuremman määrän jättäminen. Jatkuvapeitteisen kasvatuksen menetelmässä uusiutuminen tapahtui luontaisesti ja puuta poistettiin vain yläharvennuksin. Yläharvennusten ajankohdat riippuivat puuston

pohjapinta-alasta. BERG-työryhmän mallissa jatkuvapeitteisen kasvatuksen mallinnus perustui Pukkalan ym. (2013) malliin.

Taulukko 2. Käytetyt metsätyypit ja pääpuulajit metsätyypeittäin.

Pääpuulaji	Metsätyyppi
Kuusi ( <i>Picea abies</i> )	Lehtomainen kangas (OMT)
Kuusi ( <i>Picea abies</i> )	Tuore kangas (MT)
Mänty ( <i>Pinus sylvestris</i> )	Kuivahko kangas (VT)
Mänty ( <i>Pinus sylvestris</i> )	Kuiva kangas (CT)
Mänty ( <i>Pinus sylvestris</i> )	Karukko kangas (CIT)

Data-aineistosta valittiin oleelliset tiedot tämän työn kannalta, joita olivat maaperän hiili (soil\_carbon\_ct), biomassan hiili (biomass carbon), ikä (stand age), metsätyyppi (SC), simulaatio vuosi (year), pääpuulaji (MAIN\_SP), metsän tuottoarvo eri koroilla (PV\_x), kassavirta (cash\_flow) ja jättopuiden biomassa (BM\_reserve\_living\_NS\_ct ja BM\_reserve\_living\_dec\_ct). Maan arvo jätettiin laskelmissa huomioimatta, koska lähtöoletuksena oli, että maata ei osteta eikä myydä missään kohtaa tarkastelujaksoa.

Simulaatio alkoi päätehakkuun jälkeen puhtaalta maalta, jolloin yhden hehtaarin kokoisella alueella kutakin metsätyyppiä ei ollut ennestään puustoa. Metsätyyppejä oli viisi erilaista ja niiden pääpuulajeina vaihtelivat kuusi (*Picea abies*) ja mänty (*Pinus sylvestris*) (Taulukko 2). Aineisto kattoi 100 vuoden ajanjakson, joka oli jaettu viiden vuoden tarkastelujaksoihin. Tähän työhön valittiin 40, 60, 80 ja 100 vuoden tarkasteluhetket. Ensimmäiseksi tarkasteluhetkeksi valittiin 40 vuotta, jotta saatiin selville, voisiko metsänhoidon muutokset kiertoajan alussa auttaa saavuttamaan ilmastotavoitteita jo lyhyellä aikavälillä. Seuraavat tarkasteluhetket olivat 20 vuoden välein, jotta metsänkäsittelyitä ehti tapahtua eri metsänhoitomenetelmien välillä.

### 3.1.3 Muutokset aineistoon

Kaikille metsänhoitomenetelmille lisättiin istutuskulut, varhaistaimikonhoitokulut ja taimikonhoitokulut päätehakkuiden jälkeen, jos kyseiset metsänkäsittelyt ehtivät tapahtua tarkasteluajan puitteissa. Lisätyt kulut olivat samat kuin simulaation alussa esiintyneet kulut kyseisellä metsänhoitomenetelmällä ja metsätyypillä.

## 3.2 Menetelmät

### 3.2.1 Aineiston käsittely

Simuloitu aineisto oli tiedostomuodossa CSV, jota käsiteltiin RStudio (2016) ja Microsoft Excel (2016) -ohjelmilla. Kokonaishiilivarasto saatiin laskemalla yhteen biomassan, maaperän ja jättöpuiden hiilivarastot. Työssä selvitettiin keskimääräinen hiilivarasto eri metsänhoitomenetelmillä eri metsätyypeille valituilla tarkasteluajanjaksoilla. Tulos saatiin laskemalla keskiarvo ajanjaksolla varastoituneesta hiilestä. Keskimääräinen hiilivarasto valittiin tarkastelun kohteeksi, koska hiilivaraston koko voi muuttua huomattavasti tehtyjen metsänkäsittelyiden takia, jolloin valitulla tarkasteluhetkellä olisi voinut olla suuri vaikutus tuloksiin. Keskimääräinen hiilivarasto eriteltiin vielä erikseen keskimääräiseen maaperän ja biomassan hiilivarastoon, jotta niitä voitiin tarkastella erikseen.

Nettonykyarvo valittiin kannattavuuden mittariksi, koska se huomioi korkojen vaikutuksen ja sitä käytetään esimerkiksi Metsäkeskus Tapion metsänhoidon suosituksissa (Sved & Koistinen 2015). Svedin ja Koistisen (2015) mukaan nettonykyarvossa lasketaan tulevaisuuden tulojen ja menojen nykyarvon erotus, kun arvot on diskontattu ja siten korjattu nykyhetken arvoiksi. Nettonykyarvon ollessa positiivinen investointi kannattaa tehdä, koska silloin se antaa tuottovaatimusta suuremman tuoton. Negatiivinen nettonykyarvo tarkoittaa sitä, että investointi ei ole kannattava, koska vaihtoehtoisesta sijoituksesta voisi saada paremman tuoton (Sved & Koistinen 2015).

Kustannusten, tuottojen ja metsän tuottoarvo muutettiin nettonykyarvoksi diskonttaamalla. Kassavirran nettonykyarvossa laskettiin yhteen tarkasteluhetkeen mennessä toteutuneet kustannukset ja tulot. Tuloja tuli esimerkiksi harvennuksista ja hakkuista. Menoja aiheuttivat muun muassa istutus ja taimikonhoito. Pukkalan (2005) mukaan metsän tuottoarvo tarkoittaa ”kaikkien tulevien nettotulojen nykyhetkeen diskontattujen arvojen summaa”. Metsän tuottoarvo ja kassavirta laskettiin erikseen kaikilla työssä käytetyillä korkokannoilla. Metsän nettonykyarvo laskettiin siten, että tarkasteluhetken kassavirran diskontattu nettonykyarvo lisättiin tarkasteluhetken puuston diskontattuun tuottoarvoon. Kassavirran nettonykyarvon laskemisessa käytettiin RStudio (2016) -ohjelman tvn-pakettia (Truppia 2015), jolla voitiin laskea muun muassa nettonykyarvo epäsäännölliselle kassavirralle.



Käytetty korkokanta vaikuttaa pitkien kiertoaikojen takia voimakkaasti nykyarvoon (Äijälä ym. 2014). Tässä työssä korkokannoiksi valittiin 1 %, 3 % ja 5 %, koska vuodesta 2000 kirjoitus hetkeen asti peruskorko vaihteli 0–5,25 % välillä (Suomen Pankki 2017).

Metsänkäsittelyistä aiheutuvat kustannukset vaihtelivat hieman metsätyyppien välillä (Taulukko 3). Kaikilla metsätyypeillä simulaatio alkoi istutuksella, ja mahdollinen maanmuokkaus tuli vasta avohakkuun jälkeen. Tämän vuoksi CT-männiköllä ja CIT-männiköllä ei ole maanmuokkaus kuluja, koska näillä metsätyypeillä ei ehtinyt tulla avohakkuuta simulointiajan puitteissa. Taimikon varhaisoidon tai taimikon hoidon tekeminen riippui metsänhoidon suosituksista ja siksi niitä ei tehty kaikilla metsätyypeillä.

Taulukko 3. Metsänkäsittelytoimien kustannukset metsätyypeittäin. Viivalla merkityjä käsittelyitä ei tehty kyseiselle metsätyypille simulaation aikana.

Metsätyyppi	Käsittely ja sen kustannus €/ha			
	Istutus	Taimikon varhaishoito	Taimikon hoito	Maanmuokkaus
OMT-kuusikko	510	220	250	250
MT-kuusikko	510	220	250	250
VT-männikkö	627	220	-	125
CT-männikkö	627	-	250	-
CIT-Männikkö	627	-	250	-

Työssä käytetyt puutavaralajien hinnat vaihtelivat 11–55 €/m<sup>3</sup> (Taulukko 4). Jatkuvapeitteisen kasvatuksen tapauksessa (CCF) käytettiin harvennuksen hintaa kaikissa yläharvennuksissa.

Taulukko 4. Mallinnuksessa käytetyt puutavaralajien hinnat.

Hakkuu	Puutavaralajin hinta €/m <sup>3</sup>			
	Mäntytukki	Mäntykuitu	Kuusitukki	Kuusikuitu
Ensiharvennus	40	11	42	19
Harvennus	50	13	50	21
Päätehakkuu	55	17	55	25

### 3.2.2 Lisääntyneen hiilensidonnan yksikkökustannus

Hiilensidonnan yksikkökustannusta voidaan laskea usealla eri tavalla. Richards ja Stokes (2004) esittävät katsausartikkelissaan kolme erilaista tapaa määrittää yksikkökustannus

sidotulle hiilitonnille. Heidän mukaansa nämä menetelmät ovat: virtaperiaate, keskimääräinen varastonuutoksen periaate ja diskonttausmenetelmä (menetelmien suomennot Valsta ym. 2005). Virtaperiaatteessa kustannusten nettoarvo jaetaan lisääntyneen hiilen määrällä (summatu positiivinen ja negatiivinen hiilivirta). Keskimääräisen varaston muutoksen periaatteessa kustannusten nettoarvo jaetaan keskimääräisen hiilivaraston muutoksella. Diskonttausmenetelmässä huomioidaan kustannusten ja hiilensitoutumisen ajankohta. Eli siinä lasketaan hiilivirran vuosittaisen kustannuksen arvo jaettuna vuosittaisella hiilivirtojen summalla (Richards ja Stokes 2004). Tässä tutkimuksessa käytettiin yksikkökustannuksen laskennassa keskimääräistä varastonmuutoksen periaatetta, koska hiilivaraston kokoa laskettaessa päädyttiin laskemaan keskiarvoista hiilivarastoa.

Metsien taloudellisen merkittävyyden takia tässä tutkimuksessa päädyttiin kustannustehokkuutta laskettaessa vertailemaan muita metsänhoitomenetelmiä suurimman nettoarvon antavaan metsänhoitomenetelmään. Lisäsitoutuneen keskimääräisen hiilitonnin kustannus laskettiin siten, että metsästä saatava nettoarvo pysyi samana kuin suurimman nettoarvon antavassa metsänhoitomenetelmässä. Oletuksena oli, että lisääntynyt keskimääräinen hiilivarasto korvataan kokonaan

Lisäsitoutuneen hiilitonnin kustannus saatiin kaavalla:

$$((a - b) / (c - d)) \times (-1), \quad (1)$$

jossa  $a$  on tarkasteltavan menetelmän antama nettoarvo,  $b$  on suurimman nettoarvon antavan menetelmän nettoarvo,  $c$  on tarkasteltavan menetelmän antama keskimääräinen hiilivarasto ja  $d$  on suurimman nettoarvon antavan menetelmän keskimääräinen hiilivarasto. Tuloksista tuli negatiivisia arvoja, koska muiden metsänhoitomenetelmien nettoarvo oli pienempi kuin suurimman nettoarvon antavan menetelmän nettoarvo. Jos tarkasteltava metsänhoitomenetelmä johti myös pienempään keskimääräiseen hiilivarastoon, yhtälön tuloksista tuli positiivisia arvoja. Sen vuoksi tulokset kerrottiin kaavassa vielä  $-1$ :llä, jotta mielekkäistä arvoista saatiin positiivisia lukuja. Tämän jälkeen negatiiviset arvot tarkoittivat sitä, että tarkasteltava metsänhoitomenetelmä antoi pienemmän nettoarvon ja johti vähäisempään keskimääräiseen hiilen varastointiin kuin suurimman nettoarvon antava menetelmä.

Tämän takia negatiiviset arvot saaneet metsänhoitomethodet voitiin sivuuttaa, koska työn tavoitteena oli löytää kustannustehokkaimmat vaihtoehdot.

Tässä työssä laskettiin kustannus tonnille hiiltä (€/t C) hiilivarastoa kasvatettaessa. Päästövähennystoimien vertailtavuuden takia usein kuitenkin käytetään hiilidioksiditonin hintaa (€/t CO<sub>2</sub>), kuten esimerkiksi EU:n päästökaupassa. Yksi EU:n päästökaupan kauppapaikoista on European Energy Exchange (EEX) ja esimerkiksi lokakuun lopussa hiilidioksiditonin hinta oli siellä 7,23 euroa (EEX 2017). Jotta hiilitonin ja hiilidioksiditonin hintaa voitiin vertailla keskenään, selvitettiin hiilen ja hiilidioksidin massan välinen muuntokerroin seuraavien yhtälöiden avulla.

Hiilen (C) moolimassa on 12,0107 g/mol, hapen (O<sub>2</sub>) moolimassa on 31,9988 g/mol ja hiilidioksidin (CO<sub>2</sub>) moolimassa on 44,0095 g/mol. Hiiligramman ainemäärä saatiin yhtälöllä:

$$n(C) = \frac{m(C)}{M(C)}, \quad (2)$$

jossa  $n(C)$  on hiilen ainemäärä (mol),  $m(C)$  on hiilen massa (1 g) ja  $M(C)$  on hiilen moolimassa (12,0107 g/mol). Seuraavalla yhtälöllä laskettiin hiilidioksidin massa hiiligramman ainemäärän avulla:

$$m(CO_2) = n(C) \times M(CO_2), \quad (3)$$

jossa  $m(CO_2)$  on hiilidioksidin massa (g),  $n(C)$  on hiiligramman ainemäärä (0,0833 mol) ja  $M(CO_2)$  on hiilidioksidin moolimassa (44,0095 g/mol).

Laskujen perusteella 1 gramma hiiltä vastasi 3,6660 grammaa hiilidioksidia, eli muuntokertoimeksi tuli 3,6660. Näin olleen tonni hiiltä vastaa 3,6660 tonnia hiilidioksidia.

Muuntokertoimen avulla selvitettiin edelleen EEX -huutokaupan hiilitonin hinta yhtälöllä:

$$7,23 \text{ €/t CO}_2 \times 3,6660, \quad (4)$$

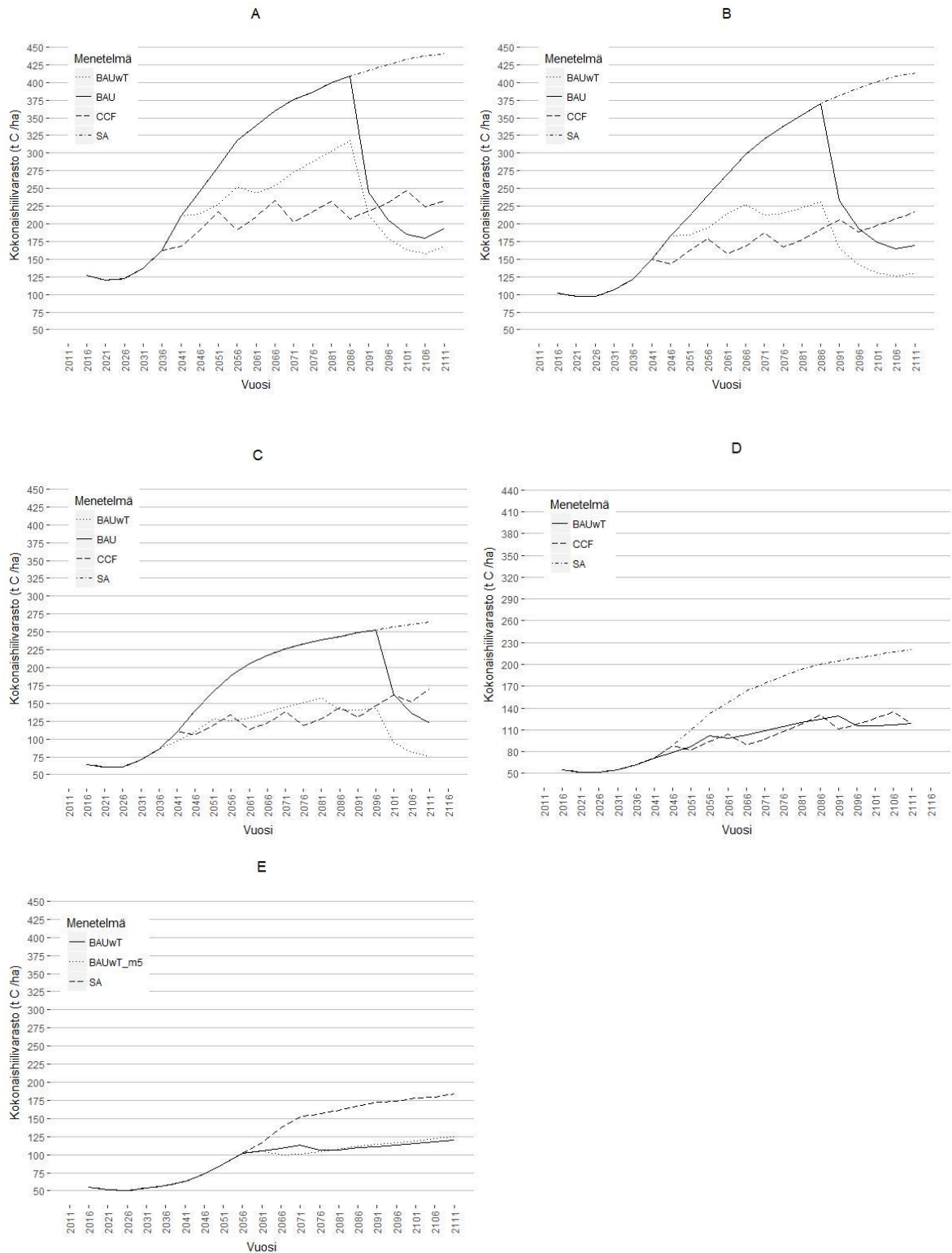
jossa 7,23 on hiilidioksiditonin hinta ja 3,6660 muuntokerroin. Vastaukseksi saatiin 26,84 €/t C.

## 4 TULOKSET

### 4.1 Metsänhoitomenetelmien vaikutus metsien hiilivarastoihin

Keskimääräisen hiilivaraston kokoon vaikuttivat huomattavasti tarkastelu-aika, metsätyyppi ja harvennusten salliminen (Kuva 1). Kaikilla tarkastelujaksoilla ja metsätyypeillä metsänhoitomenetelmä SA (metsän käsittelemättä jättäminen) johti suurimpiin keskimääräisen hiilivaraston arvoihin. SA-menetelmän kanssa saman suuruisia arvoja antoivat muutkin metsänhoitomenetelmät silloin, kun metsänkäsittelyitä ei ollut vielä ehtinyt tapahtua. Kaikilla tarkasteluajanjaksoilla metsänhoitomenetelmät, joihin harvennuksia ei tehty, varastoivat metsässä yleensä enemmän hiiltä kuin menetelmät, joissa harvennuksia tehtiin. Myös hakkuiden viivästyttäminen lisäsi keskimääräistä hiilivaraston kokoa kaikilla tarkastelujaksoilla ja metsätyypeillä. Esimerkiksi BAU\_m5 (239 t C/ha) sai BAU variaatioista pienimmät ja BAU\_15 (287 t C/ha) suurimmat keskimääräiset hiilivaraston arvot 100 vuoden tarkastelujaksolla OMT-kuusikoissa (Taulukko 5).

Vähiten keskimääräistä hiiltä metsään varastoiva menetelmä oli useimmiten CCF-menetelmä tarkastelujaksosta riippumatta. Kyseinen metsänhoitomenetelmä varastoi metsään vähiten keskimääräistä hiiltä OMT-kuusikossa kaikilla tarkastelujaksoilla sekä MT-kuusikossa ja VT-männikössä 40, 60 ja 80 vuoden tarkastelujaksoilla. CT-männikössä CCF-menetelmä varastoi hiiltä vähiten 60, 80 ja 100 vuoden tarkastelujaksoilla. CT ja CIT-männiköissä hakkuita sisältävien käsittelyjen erot olivat lähes olemattomia keskimääräisen hiilivarastoinnin suhteen kaikilla tarkasteluajanjaksoilla. Ravinteikkaimmilla metsätyypeillä keskimääräinen hiilivarasto oli suurempi kuin vähäravinteisimmilla metsätyypeillä samalla tarkasteluajanjaksolla (Taulukko 5). Tutkimuksen suurimmat keskimääräiset hiilivarastot löytyivät 100 vuoden tarkastelujaksolla OMT-kuusikosta, jossa eri menetelmien vaihteluväli ilman SA-menetelmää (307 t C/ha) oli 194–287 t C/ha (Taulukko 5).



Kuva 1. Eräiden metsänhoitomenetelmien kokonaishiilivarastojen kehitys OMT-kuusikossa (A), MT-kuusikossa (B), VT-männikössä (C), CT-männikössä (D) ja CIT-männikössä (E). Metsänhoitomenetelmät kussakin tapauksessa on valittu siten, että ne edustavat mahdollisimman laajasti menetelmien välistä vaihtelua.

Taulukko 5. Keskimääräinen hiilivarasto eri metsätyypeillä ja eri metsänhoitomenetelmillä 60 ja 100 vuoden ajanjaksoilla. Suurimmat arvot on lihavoitu ja viivalla merkityissä kohdissa kyseistä metsänhoitomenetelmää ei ole käytetty kyseisellä metsätypillä.

Metsänhoito- menetelmä	Keskimääräinen hiilivarasto t C/ha									
	OMT- kuusikko		MT- kuusikko		VT- männikkö		CT- männikkö		CIT- männikkö	
	60	100	60	100	60	100	60	100	60	100
	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
BAU	233	250	183	209	133	162	-	-	-	-
BAU_5	233	262	183	221	133	169	-	-	-	-
BAU_10	233	275	183	233	133	175	-	-	-	-
BAU_15	233	287	183	244	-	-	-	-	-	-
BAU_m5	233	239	183	199	133	155	-	-	-	-
BAUwGTR	233	250	183	210	133	162	-	-	-	-
BAUwoT_ m20	220	222	172	176	133	135	-	-	-	-
BAUwT	195	207	157	163	101	110	77	94	77	91
BAUwT_5	195	216	157	169	101	114	77	94	77	91
BAUwT_10	195	226	157	175	101	117	77	94	77	91
BAUwT_15	195	236	157	181	101	120	77	94	77	91
BAUwT_30	195	253	157	192	101	120	77	94	77	91
BAUwT_ GTR	195	207	157	163	101	110	77	94	77	91
BAUwT_m5	195	199	157	158	101	107	77	94	75	91
CCF	173	194	139	161	99	117	75	93	-	-
SA	<b>233</b>	<b>307</b>	<b>183</b>	<b>262</b>	<b>133</b>	<b>180</b>	<b>97</b>	<b>140</b>	<b>83</b>	<b>119</b>

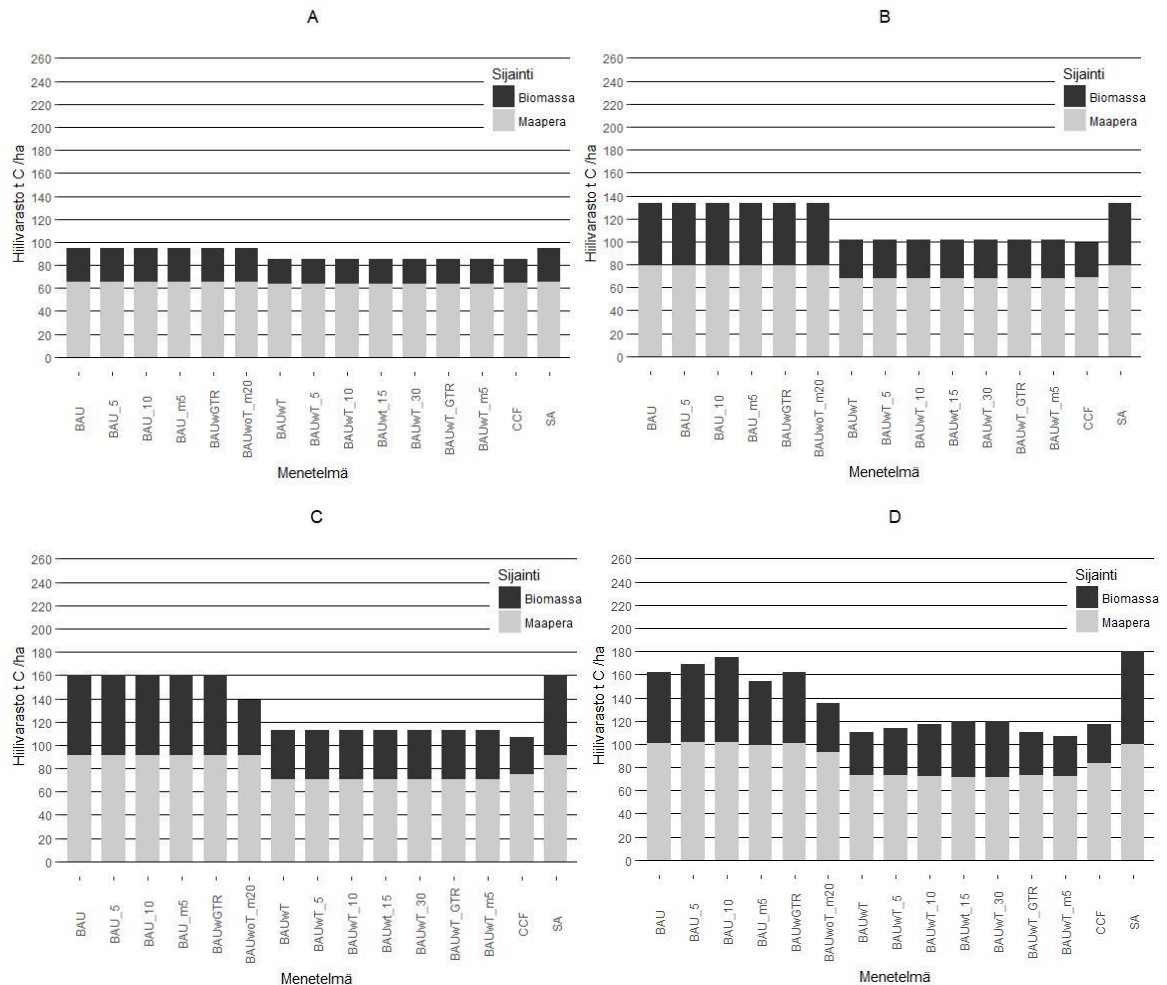
Tarkastelu-aika vaikutti myös keskimääräisen hiilivaraston kokoon. Kaikilla metsätyypeillä 40 vuoden tarkastelujaksolla hiiltä oli varastoitunut tarkastelluista aikajaksoista keskimäärin vähiten ja 80 vuoden tarkastelujakson tulokset sijoittuvat 60 ja 100 vuoden tarkastelujaksojen väliin. Jos harvennusten vaikutusta ja SA-menetelmää ei huomioida, 40 ja 60 vuoden tarkastelujaksoilla eri metsänhoitomenetelmien välillä ei ollut niin selviä eroja keskimääräisen hiilivaraston suhteen, koska metsänkäsittelyitä ei ollut ehtinyt vielä välttämättä tapahtua.

Metsänhoitomenetelmien väliset erot keskimääräisen hiilivaraston koossa korostuivat sitä enemmän mitä pidempi tarkastelujakso oli. Esimerkiksi VT-männiköissä vasta 100 vuoden

tarkastelujakso toi esiin selkeämpiä eroja (Kuva 2). Keskimääräisessä hiilivarastossa hiiltä oli enemmän maaperässä kuin puuston biomassassa kaikilla metsätyypeillä ja tarkastelujaksoilla. Pitkällä tarkastelujaksolla (100 vuotta) biomassassa olevan keskimääräisen hiilen määrä alkoi lähennellä maaperässä olevan hiilen määrää, kun metsää ei käsitelty lainkaan (SA-menetelmä). Lyhyimmällä tarkastelujaksolla (40 vuotta) eri käsittelymenetelmien välillä ei ollut juurikaan eroja hiilen jakautumisessa maaperän ja biomassan hiilivarastoon eri metsätyypeillä. Kuitenkin harvennukset sallivat metsänhoitomenetelmät erottuivat pienemmällä keskimääräisen biomassan hiilivarastoilla kaikilla tarkasteluajanjaksoilla. Maaperän keskimääräinen hiilivarasto vaihteli vähemmän kuin biomassan keskimääräinen hiilivarasto OMT-kuusikossa eri metsänhoitomenetelmien kesken kaikilla tarkasteluajanjaksoilla (Taulukko 6). Myös muilla metsätyypeillä biomassan keskimääräinen hiilivarasto vaihteli eri menetelmien kesken enemmän kuin maaperän keskimääräinen hiilivarasto kaikki tarkastelujaksot huomioiden.

Taulukko 6. OMT-kuusikon maaperän ja biomassan hiilivarastojen vaihteluvälit eri tarkasteluajanjaksoilla.

Tarkastelu- ajanjakso	Maaperän hiilen vaihteluväli (t C/ha)	Biomassan hiilen vaihteluväli (t C/ha)
40	121–125	34–52
60	128–141	45–96
80	136–153	48–125
100	144–164	50–146



Kuva 2. Keskimääräisen hiilivaraston koko ja sijainti eri menetelmillä 40 (A), 60 (B), 80 (C) ja 100 (D) vuoden tarkastelujaksolla VT-männikössä.

#### 4.2 Metsänhoitomenetelmien vaikutus nettonykyarvoon

Tarkastelujaksosta, metsätypistä ja korkokannasta riippuen suurimman nettonykyarvon antava metsänhoitomenetelmä vaihteli, mutta useimmissa tapauksissa kuitenkin CCF-menetelmä antoi suurimman nettonykyarvon (Taulukko 7). Pienimpään nettonykyarvoon johtavassa menetelmässä ei vaikuttanut olevan selvää trendiä. Käytetty korkokanta, tarkastelu-aika, harvennusten salliminen ja metsätyyppi vaikuttivat huomattavasti nettonykyarvoon.

Korkokannankasvu pienensi metsän nettonykyarvoa, jos tarkastelu-aika pysyi samana. Esimerkiksi OMT-kuusikossa 100 vuoden tarkastelujaksolla ja 1 % korkokannalla BAUwT-menetelmä antoi nettonykyarvoksi 26 926 €/ha (Taulukko 8). Vastaavasti 3 % korkokannalla nettonykyarvo oli 4 854 €/ha (Taulukko 9) ja 5 % korkokannalla vain 1 049 €/ha (Taulukko 10). Myös negatiiviset nettonykyarvot olivat mahdollisia. Esimerkiksi 100 vuoden tarkastelujaksolla 5 % korolla CT-männikössä BAUwT-menetelmä antoi nettonykyarvoksi



-434 €/ha (Taulukko 10), mikä tarkoittaa sitä, että paljaalle maalle vaadittavat investoinnit eivät ole kannattavia tällä korkokannalla vaan aiheuttavat tuottoa suuremmat kustannukset.

Taulukko 7. Suurimpaan nettonykyarvoon johtava metsänhoitomenetelmä eri metsätyypeillä, tarkastelujaksoilla ja korkokannoilla. Useita-merkintä tarkoittaa, että usea menetelmä johti samaan nettonykyarvoon. Samoja tuloksia tuli esimerkiksi silloin, kun menetelmien välillä ei ehtinyt tulla eroja.

Tarkastelu -jakso	Metsätyyppi				
	OMT- kuusikko	MT- kuusikko	VT- männikkö	CT- männikkö	CIT- männikkö
40					
1 %	BAUwoT _m20	Useita	Useita	CCF	Useita
3 %	Useita	Useita	Useita	CCF	Useita
5 %	CCF	CCF	CCF	CCF	Useita
60					
1 %	Useita	CCF	CCF	CCF	Useita
3 %	CCF	CCF	CCF	CCF	Useita
5 %	CCF	CCF	CCF	CCF	Useita
80					
1 %	BAUwT	Useita	CCF	CCF	Useita
3 %	BAUwT_ m20	BAUwoT_ m20	CCF	CCF	Useita
5 %	CCF	CCF	CCF	CCF	Useita
100					
1 %	BAUwoT _m20	CCF	CCF	CCF	Useita
3 %	CCF	CCF	CCF	CCF	Useita
5 %	CCF	CCF	CCF	CCF	Useita

Metsänhoitomenetelmät, jotka sallivat harvennukset antoivat suuremman nettonykyarvon kuin vastaavat metsänhoitomenetelmät, jotka eivät sallineet harvennusta kaikilla tarkastelujaksoilla. Esimerkiksi MT-kuusikolla 80 vuoden tarkastelujaksolla ja 3 % korolla metsänhoitomenetelmät, jotka eivät sallineet harvennuksia antoivat keskimäärin noin 20 % pienemmät nettonykyarvot kuin metsänhoitomenetelmät, joissa harvennukset olivat sallittu.

Korkokannan pysyessä samana kiertoajan pidentäminen päätehakkuita lykkäämällä pienensi usein myös nettonykyarvoa kaikilla metsätyypeillä niissä tapauksissa, joissa hakkuut ehtivät toteutua. Esimerkiksi OMT kuusikossa 100 vuoden tarkastelujaksolla 3 % korolla BAU-

muunnoksissa BAU\_m5 sai suurimman ja BAU\_15 pienimmän nettonykyarvon (Taulukko 9). Tämä johtui siitä, että tulojen lykkääntyminen pienentää nettonykyarvoa, koska varoja ei voida sijoittaa mahdollisesti paremman tuoton antavaan kohteeseen. CCF-menetelmän suuret nettonykyarvot johtuivatkin osittain siitä, että tuloja tulee metsästä tiheämpään tahtiin kuin päätehakkuun sisältävissä menetelmissä.

Taulukko 8. Kassavirran ja tuottoarvon nettonykyarvo 1 % korkokannalla eri metsätyypeillä ja menetelmillä 100 vuoden ajanjaksolla. Suurimmat arvot ovat lihavoitu ja viivalla merkityissä kohdissa kyseistä metsänhoitomenetelmää ei ole käytetty kyseisellä metsätyypillä.

Metsänhoito- menetelmä	Nettonykyarvo 1 % korkokannalla (€/ha)				
	OMT- kuusikko	MT- kuusikko	VT- männikkö	CT- männikkö	CIT- männikkö
BAU	21 669	18 006	9 698	-	-
BAU_5	21 683	18 316	9 690	-	-
BAU_10	16 795	14 672	9 808	-	-
BAU_15	16 486	14 441	-	-	-
BAU_m5	22 253	18 675	10 705	-	-
BAUwGTR	21 505	17 859	9 591	-	-
BAUwoT_ m20	<b>28 796</b>	20 963	12 926	-	-
BAUwT	26 926	18 093	11 518	7 914	<b>6 652</b>
BAUwT_5	26 812	17 984	11 711	7 914	<b>6 652</b>
BAUwT_10	26 094	17 205	12 003	7 914	<b>6 652</b>
BAUwT_15	26 183	17 343	11 438	7 914	<b>6 652</b>
BAUwT_30	22 381	16 753	11 438	7 914	<b>6 652</b>
BAUwT_ GTR	26 602	17 886	11 238	7 914	<b>6 652</b>
BAUwT_m5	27 502	18 295	12 237	7 914	6 191
CCF	24 195	<b>23 114</b>	<b>16 160</b>	<b>10 995</b>	-

Taulukko 9. Kassavirran ja tuottoarvon nettohyötyarvo 3 % korkokannalla eri metsätyypeillä ja menetelmillä 100 vuoden ajanjaksolla. Suurimmat arvot ovat lihavoitu ja viivalla merkityissä kohdissa kyseistä metsänhoitomenetelmää ei ole käytetty kyseisellä metsätyypillä.

Metsänhoito- menetelmä	Nettonyötyarvo 3 % korkokannalla (€/ha)				
	OMT- kuusikko	MT- kuusikko	VT- männikkö	CT- männikkö	CIT- männikkö
BAU	2 598	2 122	615	-	-
BAU_5	2 243	1 820	482	-	-
BAU_10	1 636	1 380	380	-	-
BAU_15	1 357	1 131	-	-	-
BAU_m5	3 027	2 502	857	-	-
BAUwGTR	2 560	2 089	595	-	-
BAUwoT_ m20	4 859	3 375	1 592	-	-
BAUwT	4 854	2 569	1 839	348	<b>13</b>
BAUwT_5	4 617	2 448	1 792	348	<b>13</b>
BAUwT_10	4 278	2 226	1 759	348	<b>13</b>
BAUwT_15	4 072	2 124	1 455	348	<b>13</b>
BAUwT_30	3 114	1 719	1 455	348	<b>13</b>
BAUwT_ GTR	4 780	2 521	1 786	348	<b>13</b>
BAUwT_m5	5 118	2 686	1 968	348	-164
CCF	<b>5 742</b>	<b>3 656</b>	<b>3 034</b>	<b>1 289</b>	-

Taulukko 10. Kassavirran ja tuottoarvon nettonykyarvo 5 % korkokannalla eri metsätyypeillä ja menetelmillä 100 vuoden ajanjaksolla. Suurimmat arvot ovat lihavoitu ja viivalla merkityissä kohdissa kyseistä metsänhoitomenetelmää ei ole käytetty kyseisellä metsätyypillä.

Metsänhoito- menetelmä	Nettonykyarvo 5 % korkokannalla (€/ha)				
	OMT- kuusikko	MT- kuusikko	VT- männikkö	CT- männikkö	CIT- männikkö
BAU	-95	-177	-527	-	-
BAU_5	-232	-299	-576	-	-
BAU_10	-365	-406	-614	-	-
BAU_15	-457	-490	-	-	-
BAU_m5	81	-25	-458	-	-
BAUwGTR	-104	-185	-531	-	-
BAUwoT_ m20	851	448	-175	-	-
BAUwT	1 049	223	115	-434	<b>-547</b>
BAUwT_5	948	171	91	-434	<b>-547</b>
BAUwT_10	853	117	72	-434	<b>-547</b>
BAUwT_15	775	75	-12	-434	<b>-547</b>
BAUwT_30	498	-71	-12	-434	<b>-547</b>
BAUwT_ GTR	1 031	212	104	-434	<b>-547</b>
BAUwT_m5	1 161	278	150	-434	-600
CCF	<b>1 786</b>	<b>727</b>	<b>560</b>	<b>-94</b>	-

### 4.3 Kustannustehokkaat keinot kasvattaa metsien hiilivarastoja

Keskimääräisen lisäsitoutuneen hiilitonnin kustannus vaihteli paljon riippuen metsätyypistä, tarkasteluhetkestä ja korkokannasta. Kaikille metsätyypeille löytyi jollain tarkasteluhetkellä ja korkokannalla ainakin yksi menetelmän vaihdos, jolla hiilivaraston kokoa voitiin kasvattaa. Kuitenkaan kaikissa tilanteissa mielekästä metsänhoitomenetelmän vaihdosta ei löytynyt, koska suurimman nettonykyarvon antava metsänhoitomenetelmä varastoi metsässä myös keskimäärin hiiltä yhtä paljon kuin vaihtoehtoiset metsänhoitomenetelmät. Esimerkiksi 40 vuoden tarkastelujaksolla metsänhoitomenetelmän mahdollisia vaihdoksia löytyi vain 5 % korkokannalla (Taulukko 11).

CCF-menetelmä johti useissa tilanteissa suurimpaan nettonykyarvoon muttei suurimpaan keskimääräiseen hiilivarastoon. Sen takia se oli enimmäkseen pois vaihdon kohteena oleva

metsänhoitomenetelmä niillä metsätyypeillä, joissa se oli vaihtoehtona metsän käsittelyksi. Ainoastaan muutama muu menetelmä antoi suurimman nettohyötyarvon ja ne voitiin korvata jollain toisella menetelmällä, joka varastoi metsässä niitä enemmän keskimääräistä hiiltä (Taulukko 12, Taulukko 13, Taulukko 14).

Taulukko 11. Keskimääräisen lisähiilen sitomiseksi kustannustehokkain metsänhoitomenetelmän vaihdos suurimman nettohyötyarvon antavasta metsänhoitomenetelmästä eri korkokannoilla 40 vuoden tarkastelujaksolla. Useita-merkintä tarkoittaa, että usea menetelmä johti samaan lisäsitoutuneeseen hiilen määrään ja lisähiilitonnin hintaan. Samoja tuloksia tuli esimerkiksi silloin, kun menetelmien välillä ei ehtinyt tulla eroja.

Metsätyyppi	Kustannustehokkain menetelmän vaihdos	Lisäsitoutunut hiili (t C/ha)	Lisähiilitonnin hinta (€/t C)
OMT-kuusikko			
5 %	CCF → Useita	20	16
MT-kuusikko			
5 %	CCF → Useita	8	23
VT-männikkö			
5 %	CCF → Useita	10	9

Lisäsitoutuneen hiilitonnin kustannuksessa oli paljon vaihtelua. OMT-kuusikossa lisäsitoutuneen hiilitonnin kustannuksen vaihteluväli oli 12–2 354 €/t C kaikki menetelmien vaihdokset, tarkastelujaksot ja korkokannat huomioiden. Vastaavasti vaihteluvälit olivat MT-kuusikossa 7–3522 €/t C, VT-männikössä 6–22 795 €/t C, CT-männikössä 117–3301 €/t C ja CIT-männikössä 5 €/t C. Kaikissa tarkastelluissa tilanteissa CT-männikössä tehdyt metsänhoitomenetelmän vaihdokset johtivat huomattavasti korkeampaan kustannustehokkaimman lisähiilitonnin kustannukseen kuin muilla metsätyypeillä samalla tarkasteluajalla ja korkokannalla (Taulukko 12, Taulukko 13, Taulukko 14).

Lisäsitoutuneen hiilitonnin kustannus voi jäädä alhaiseksi jo lyhyelläkin tarkastelujaksolla. Esimerkiksi OMT-kuusikossa 40 vuoden tarkastelujaksolla CCF-menetelmän vaihtaminen eri menetelmään voi varastoida metsässä hiiltä keskimäärin 20 t/ha enemmän ja lisähiilitonnin kustannukseksi muodostui 16 euroa (Taulukko 11). Metsänhoitomenetelmää vaihtamalla halvimmaksi lisähiilitonnin hinnaksi muodostui kaikki tarkasteluvaihtoehdot huomioiden 5 €/t C CIT-männikössä 60 vuoden tarkastelujakson kohdalla 5 % korkokannalla. Toisaalta menetelmän vaihtamisella keskimääräinen hiilivarasto kasvoi vain

2 t C/ha. Yleisesti ottaen vaikuttaa siltä, että korkokannan kasvaessa keskimääräisen lisähiilitonnin kustannus pieneni kaikilla tarkastelujaksoilla.

Taulukko 12. Keskimääräisen lisähiilen sitomiseksi kustannustehokkain metsänhoitomenetelmän vaihdos suurimman nettonykyarvon antavasta metsänhoitomenetelmästä eri korkokannoilla 60 vuoden tarkastelujaksolla. Useita-merkintä tarkoittaa, että usea menetelmä johti samaan lisäsitoutuneeseen hiilen määrään ja lisähiilitonnin hintaan. Samoja tuloksia tuli esimerkiksi silloin, kun menetelmien välillä ei ehtinyt tulla eroja.

Metsätyyppi	Kustannustehokkain menetelmän vaihdos	Lisäsitoutunut hiili (t C/ha)	Lisähiilitonnin hinta (€/t C)
<b>OMT-kuusikko</b>			
3 %	CCF → BAUwoT_m20	47	22
5 %	CCF → BAUwoT_m20	47	18
<b>MT-kuusikko</b>			
1 %	CCF → BAU	44	59
3 %	CCF → BAUwoT_m20	33	25
5 %	CCF → BAUwoT_m20	33	7
<b>VT-männikkö</b>			
1 %	CCF → Useita	34	6
3 %	CCF → Useita	34	34
5 %	CCF → Useita	34	23
<b>CT-männikkö</b>			
1 %	CCF → Useita	2	470
3 %	CCF → Useita	2	266
5 %	CCF → Useita	2	131
<b>CIT-männikkö</b>			
5 %	BAUwT_m5 → Useita	2	5

Metsänhoitomenetelmien välillä oli suurta vaihtelua keskimääräisen lisäsitoutuneen hiilen määrässä ja kustannuksissa. Suurimman nettonykyarvon antavan metsänhoitomenetelmän vaihtaminen lisähiilensidonnan kannalta halvimpaan yksikkökustannukseen johtavaan metsänhoitomenetelmään satoi keskimääräistä hiiltä lisää 1–83 t/ha kaikki tarkasteluvaihtoehdot huomioiden. Aineistosta löytyi myös tapauksia, joissa jotkin metsänhoitomenetelmät sitoivat metsään vähemmän keskimääräistä hiiltä sekä antoivat pienemmän nettonykyarvon kuin suurimman nettonykyarvon antava metsänhoitomenetelmä. Esimerkiksi OMT-kuusikossa 100 vuoden tarkastelujaksolla 1 %

korkokannalla suurimpaan nettonykyarvoon johtavan metsänhoitomenetelmän (BAUwoT\_m20) vaihtaminen CCF-menetelmään pienentäisi keskimääräistä hiilivarastoa 28 t C/ha ja nettonykyarvoa 4 600 €/ha (Taulukko 5, Taulukko 8).

Taulukko 13. Keskimääräisen lisähiilen sitomiseksi kustannustehokkain metsänhoitomenetelmän vaihdos suurimman nettonykyarvon antavasta metsänhoitomenetelmästä eri korkokannoilla 80 vuoden tarkastelujaksolla. Useita-merkintä tarkoittaa, että usea menetelmä johti samaan lisäsitoutuneeseen hiilen määrään ja lisähiilitonnin hintaan. Samoja tuloksia tuli esimerkiksi silloin, kun menetelmien välillä ei ehtinyt tulla eroja.

Metsätyyppi	Kustannustehokkain menetelmän vaihdos	Lisäsitoutunut hiili (t C/ha)	Lisähiilitonnin hinta (€/t C)
OMT-kuusikko			
1 %	BAUwT → Useita	59	33
3 %	BAUwT-m5 → BAUwT	9	12
5 %	CCF → BAUwT	32	19
MT-kuusikko			
3 %	BAUwoT_m20 → Useita	51	20
5 %	CCF → Useita	67	12
VT-männikkö			
1 %	CCF → Useita	53	79
3 %	CCF → Useita	53	49
5 %	CCF → Useita	53	23
CT-männikkö			
1 %	CCF → Useita	3	591
3 %	CCF → Useita	3	285
5 %	CCF → Useita	3	117

Taulukko 14. Keskimääräisen lisähiilen sitomiseksi kustannustehokkain metsänhoitomenetelmän vaihdos suurimman nettohyötyarvon antavasta metsänhoitomenetelmästä eri korkokannoilla 100 vuoden tarkastelujaksolla. Useita-merkintä tarkoittaa, että usea menetelmä johti samaan lisäsitoutuneeseen hiilen määrään ja lisähiilitonnin hintaan. Samoja tuloksia tuli esimerkiksi silloin, kun menetelmien välillä ei ehtinyt tulla eroja.

Metsätyyppi	Kustannustehokkain menetelmän vaihdos	Lisäsitoutunut hiili (t C/ha)	Lisähiilitonnin hinta (€/t C)
<b>OMT-kuusikko</b>			
1 %	BAUwoT_m20 → BAU_5	40	176
3 %	CCF → BAUwoT_m20	27	33
5 %	CCF → BAUwT_30	58	22
<b>MT-kuusikko</b>			
1 %	CCF → BAU_5	60	80
3 %	CCF → BAUwoT_m20	15	18
5 %	CCF → BAU_15	83	15
<b>VT-männikkö</b>			
1 %	CCF → BAU_10	58	109
3 %	CCF → BAU_10	58	46
5 %	CCF → BAU_10	58	20
<b>CT-männikkö</b>			
1 %	CCF → Useita	1	3 301
3 %	CCF → Useita	1	1 008
5 %	CCF → Useita	1	363

## 5 TULOSTEN TARKASTELU

### 5.1 Metsänhoitomenetelmien vaikutus metsien hiilivarastoihin

Eri metsänhoitomenetelmien keskimääräisen hiilivaraston koko vaihteli metsätyypeittäin ja valitun tarkasteluajanjakson mukaan. Harvennuksia ja SA-menetelmää lukuun ottamatta OMT, MT ja VT-metsätyypeillä erot eri metsänhoitomenetelmien välillä tulivat selkeämmin näkyviin vasta pidemmällä ajanjaksoilla, jolloin metsänhoitomenetelmissä olevat käsittelytoimet ehtivät toteutua. CT ja CIT-metsätyypeillä kasvu oli hitaampaa ja eri metsänhoitomenetelmät antoivat samoja tuloksia, koska käsittelytoimia ei ehtinyt tapahtua. Keskimääräisen hiilensitoutumisen vaihtelu eri metsänhoitomenetelmien kesken oli suurempaa biomassaan sitoutuneessa hiilessä kuin maaperään sitoutuneessa hiilessä. Maaperän keskimääräinen hiilivarasto oli kaikilla metsänhoitomenetelmillä



tarkastelujaksosta ja metsätyypistä riippumatta suurempi kuin biomassan keskimääräinen hiilivarasto. Tulos on linjassa aikaisempien tutkimustulosten kanssa (Liski 2000, IPCC 2000).

OMT, MT ja VT-metsätyypeillä vaikutti siltä, että metsänhoitomenetelmät, joissa ei ollut harvennusta mukana, varastoivat metsään keskimäärin enemmän hiiltä kaikilla tarkastelujaksoilla verrattuna harvennukset salliviin metsänhoitomenetelmiin. Tulos tukee näkemystä, että harvennusten välttäminen lisää hiilensidontaa ja keskimääräistä hiilivaraston kokoa (Trivino ym. 2015). Myös hakkuiden myöhentäminen vaikuttaisi kasvattavan keskimääräisen hiilivaraston kokoa kaikilla metsätyypeillä ja tarkastelujaksoilla. Samanlaiseen tulokseen hakkuiden viivästyttämisestä päätyivät myös Richards ja Stokes (2004).

Useissa tarkastelluista tilanteista metsänhoitomenetelmä CCF vaikutti johtavan pienimpään tai yhtä pieneen keskimääräisen hiilivaraston kokoon kuin joku muu metsänhoitomenetelmä. Tilanne voi olla erilainen, jos tarkastellaan lähtötilanteessa eri ikäisiä metsiköitä eri ajanjaksoilla. Esimerkiksi Peuran ym. (2018) tutkimuksessa CCF-menetelmän ja RFM-menetelmän (vastaa tämän tutkimuksen BAUwT-menetelmää) keskimääräiset hiilivarastot olivat keskenään lähes saman kokoisia. Heidän tutkimuksessaan tarkasteltiin lähtötilanteessa eri ikäisiä ja eri tyyppisiä metsiä, kun tässä tutkimuksessa taas lähdettiin liikkeelle paljaalta maalta. Tulosten eroavaisuutta voi selittää esimerkiksi se, että paljaalta maalta lähdeettäessä 100 vuoden aikana CCF-menetelmällä ehtii toteutua useita yläharvennuksia, kun BAUwT-menetelmällä vain muutama harvennus ja päätehakkuu. BAU-menetelmiin verrattuna tilanne vielä korostuu, koska BAU-menetelmissä ei tehdä harvennuksia (Kuva 1).

Tässä tutkimuksessa keskimääräisessä hiilivaraston koossa ei huomioitu puutuotteisiin sitoutunutta hiiltä ja esimerkiksi Valstan ym. (2006) mukaan puutuotteiden hiilinielua pitäisi tarkastella metsien hiilitaseen kanssa. Esimerkiksi jatkuvan kasvatuksen menetelmässä (CCF) hakataan yleensä vain tukkipuun kokoisia puita (Lähde ym. 2010), jolloin puusta voidaan saada enemmän sahatavaraa ja siten kenties pidempiaikaisen hiilivaraston omaavia tuotteita. Profft ym. (2009) arvioivat metsien hakkuita ja erilaisten puutuotteiden hiilivaraston kestoja Saksan Thüringenin osavaltiossa. Heidän mukaansa noin 47 % vuotuisista hakkuista päättyy lyhytikäisiin tuotteisiin (esim. energiapuu ja kuormalavat), jossa hiili säilyy keskimäärin alle 25 vuotta. Parketin ja huonekalujen kaltaisiin tuotteisiin vuotuisesta hakkuusta meni noin 31 %, joissa hiilivarasto säilyy keskimäärin 25–30 vuotta.

Rakennusmateriaaliksi päätyi vain 22 % vuotuisista hakkuista ja joissa hiilivarasto säilyy keskimäärin 51 vuotta (Profft ym. 2009).

Metsän käsittelemättä jättäminen (SA) varastoi kaikilla metsätyypeillä keskimäärin eniten hiiltä metsään paitsi niissä tilanteissa, joissa metsänhoitomenetelmissä ei ehtinyt tapahtua käsittelytoimenpiteitä. Näin ollen puhtaasti hiilen varastoitumisen kannalta paras vaihtoehto oli se, että metsälle ei tehty mitään. Samankaltaiseen tulokseen päätyivät myös Cooper (1983), Thornley & Cannell (2000) ja Garcia-Gonzalo ym. (2007). Vanhojen metsien hiilensidonnasta on olemassa hieman erilaisia näkemyksiä, millä voi olla vaikutusta SA-vaihtoehdon hiilivaraston kokoon. Esimerkiksi Toropaisen & Mäkelin (1994) mukaan metsät voivat toimia vain rajallisen ajan hiilidioksidinieluinä. Luyssaert ym. (2008) taas esittävät, että vastoin yleistä käsitystä, vanhatkin metsät sitovat hiiltä. Kalliokoski ja Repo (2015) kuitenkin esittävät, että bioottisten ja abioottisten häiriöiden määrä voi muuttua Suomessa ilmastonmuutoksen takia. Jos tulevaisuudessa häiriöt lisääntyvät voimakkaasti, tämä voi vaikuttaa metsien hiilivaraston kokoon varsinkin metsätalouskäytön ulkopuolisissa metsissä (Kalliokoski ja Repo 2015). Tällöin SA-menetelmä ei välttämättä olisikaan keskimääräisen hiilensidonnän kannalta selvästi paras menetelmä pidemmällä tarkastelujaksolla, varsinkin jos puutuotteiden elinkaaret otettaisiin laskelmissa huomioon. Tutkimuksia häiriöiden muutoksista ja niiden vaikutuksista metsien hiilinieluun Suomen osalta on kuitenkin tehty vain vähän (Kalliokoski & Repo 2015).

## **5.2 Metsänhoitomenetelmien vaikutus nettonykyarvoon**

Metsän nettonykyarvossa oli vaihtelua riippuen käytetystä metsänhoitomenetelmästä, metsätyypistä, harvennusten sallimisesta, tarkastelujaksosta ja korkokannasta. Tarkastelluista metsänhoitomenetelmistä CCF-menetelmä johti useimmiten suurimpaan nettonykyarvoon. Varsinkin suuremmilla korkokannoilla tai hitaammin kasvavilla metsätyypeillä CCF-menetelmä osoittautui nettonykyarvon kannalta parhaaksi menetelmäksi. Tahvonen (2009) esittääkin, että korkokannan noustessa jatkuvan kasvatuksen menetelmä (CCF) voi tulla taloudellisesti kannattavammaksi. Nopeakasvuisella OMT kuusikolla lyhyt kiertoaika (BAUwoT\_m20) matalilla koroilla oli usein nettonykyarvon kannalta paras menetelmä. Tulosta tukee näkemys, että taloudellisesti kannattavin kiertoaika on rehevien metsätyyppien kuusikoissa usein lyhyempi kuin suositusten mukainen kiertoaika (Hyytiäinen & Tahvonen 2002). Hyytiäisen ja Tahvosen (2002) mukaan korkokannan kasvun pitäisi lyhentää kiertoaikoja. Tämän työn tulokset

tukevat heidän näkemystään. Vertailtaessa metsänhoitomenetelmiä keskenään suuremmilla koroilla, vaikutti siltä, että samalla metsätyypillä ja samalla tarkastelujaksolla metsänhoitomenetelmät, joissa päätehakkuuta oli aikaistettu, johtivat suurempiin nettonykyarvoihin. Myös harvennukset sallivat metsänhoitomenetelmät näyttäisivät saaneen suurempia nettonykyarvoja kuin metsänhoitomenetelmät, joissa harvennukset eivät olleet sallittuja.

### **5.3 Kustannustehokkaat keinot kasvattaa metsien hiilivarastoja**

Metsänhoitomenetelmien kustannustehokkuuteen sitoa lisää keskimääräistä hiiltä vaikutti erityisesti tarkastelu-aika ja korkokanta. Lähes kaikilla metsätyypeillä löytyi metsänhoitomenetelmiä eri korkokannoilla ja tarkastelujaksoilla, jotka sitovat keskimäärin enemmän hiiltä metsään kuin suurimman nettonykyarvon antava metsänhoitomenetelmä. CCF-menetelmä antoi suurimman nettonykyarvon metsälle useimmissa tarkastelutilanteissa, mutta keskimääräisen hiilivaraston suhteen oli usein parempiakin menetelmiä. Tämän takia CCF-menetelmä oli useimmiten poisvaihdon kohteena oleva metsänhoitomenetelmä.

Tarkasteltaessa tuloksien soveltamista käytäntöön, kustannustehokkaimman keskimääräisen hiilivaraston kasvattamisesta, vertailukohdaksi sopii esimerkiksi EU:n päästökaupan hinta hiilitonnille, joka oli noin 27 euroa syksyllä 2017 (EEX 2017). Aineiston perusteella kustannustehokkaimmista metsänhoitomenetelmien vaihdoksista mahdollisia voisivat olla menetelmät, joiden keskimääräinen lisähiilitonnin hinta ei ylitä päästökaupassa olevaa hiilitonnin hintaa. Tällaisia menetelmiä löytyi varsinkin suuremmilla koroilla kaikilla tarkasteluajanjaksoilla. Aineiston perusteella osa metsänhoitomenetelmien vaihdoksista voisi olla hyvin edullisia verrattuna EU:n päästökaupan hintoihin. Esimerkiksi jos MT-kuusikossa metsänomistaja haluaisi käyttää metsänhoitomenetelmää, joka antoi suurimman nettonykyarvon 80 vuoden tarkastelujaksolla koron ollessa 5 % (CCF-menetelmä), menetelmän vaihtaminen lisähiilitonnilta halvimpaan metsänhoitomenetelmään sitoisi hiiltä keskimäärin 67 t/ha enemmän ja keskimääräisen lisäsitoutuneen hiilen hinnaksi tulisi vain 12 €/t C. Kustannustehokkuuteen vaikuttaa voimakkaasti hiilidioksiditonin hinta. Jos hinta nousee, yhä useampi metsänhoitomenetelmän vaihdos voi tulla kustannustehokkaaksi tai hintaero voi kasvaa jo ennestään kustannustehokkaissa metsänhoitomenetelmissä. Vuonna 2017 EU:n päästökaupassa hiilitonnin hinta vaihteli välillä 16–29 €/t C (EEX 2018). Tämän

tutkimuksen perusteella EU:n päästökaupan hinnan alittavat vaihtoehdot lisähiilitonnilta kasvattivat keskimääräistä hiilivarastoa 2–83 t C/ha.

Metsänhoitosuosituksen muuttamisen vaikutusta hiilivaraston kasvattamiseksi ja sen kustannusten selvittämiseksi on mallinnettu esimerkiksi Valstan ym. (2006) ja Nergin (2009) tutkimuksissa, joissa he selvittivät metsän kiertoajan pidennyksen vaikutuksia. Kummassakin tutkimuksessa muutettiin metsänhoitosuosituksia pidentämällä metsän kiertoaikaa 10 vuodella (Valsta ym. 2006, Nerg 2009). Heidän tutkimuksensa erosivat tästä tutkimuksesta siten, että kummankaan laskelmissa ei huomioitu maaperän hiilen vaikutusta, he käyttivät MOTTI-metsikkösimulaattoria laskelmissaan, heidän tarkastelunsa lähti liikkeelle jo varttuneesta metsästä, he tarkastelivat vain kiertoajan pidennyksen vaikutuksia ja heidän tarkastelemissaan metsiköt sijaitsivat Etelä-Suomessa (Valsta ym. 2006, Nerg 2009). Lisäksi Valstan ym. (2006) tutkimuksessa hiilensidonnin kustannukset diskontattiin lisähiilensidonnin alkuun eli hetkeen, jolloin normaalisti olisi tullut avohakkuu. Nergin (2009) tutkimuksessa taas hiilensidonnin kustannukset diskontattiin simuloinnin aloitushetkeen eli eri ikäisten metsiköiden lähtötilanteeseen. Valstan ym. (2006) työssä tarkasteltiin hiilivaraston kasvattamista ja sen kustannuksia kuusikoille (4 kpl MT-kuusikkoa ja 3 kpl OMT-kuusikkoa) ja männiköille (4 kpl VT-männikköä ja 4 kpl MT-männikköä). Heidän laskelmissaan päätehakkuu olisi normaalisti tullut keskimäärin 75 vuoden iässä männiköille ja 58 vuoden iässä kuusikoille. Nerg (2009) tarkasteli neljää OMT-kuusikkoa (keski-ikä 56 vuotta), neljää MT-kuusikkoa (keski-ikä 57 vuotta) ja neljää VT-männikköä (keski-ikä 79 vuotta). Sekä Valstan ym. (2006) että Nergin (2009) tutkimuksissa laskettiin hiilensidonnin yksikkökustannusta 3 % korkokannalla. Tämän tutkimuksen hiilensidonnin yksikkökustannuksia kyseisellä korkokannalla verrattaessa Valstan ym. (2006) ja Nergin (2009) tuloksiin parhaiten vastaavat vaihtoehdot ovat OMT-kuusikko ja MT-kuusikko 60 vuoden tarkasteluhetkellä ja VT-männikkö 80 vuoden tarkasteluhetkellä.

Valstan ym. (2006) laskelmissa 10 vuoden kiertoajan pidennys johti kuusikossa keskimäärin noin 12 t C/ha lisäykseen noin 41 €/t C yksikkökustannuksella. Vastaavasti männikössä hiilen lisäys oli noin 6 t C/ha noin 206 €/t C yksikkökustannuksella. Nergin (2009) mukaan 10 vuoden kiertoajan pidennys johti OMT-kuusikoissa noin 23 t C/ha lisäykseen noin 14 €/t C yksikkökustannuksella, MT-kuusikoissa 15 t C/ha lisäykseen noin 12 €/t C yksikkökustannuksella ja VT-männikössä noin 17 t C/ha lisäykseen noin 26 €/t C

yksikkökustannuksella. Tässä työssä suurimman nettonykyarvon antavan metsänhoitomenetelmän vaihtaminen enemmän hiiltä sitovaan menetelmään halvimmalla yksikkökustannuksella johti OMT-kuusikossa noin 47 t C/ha lisäykseen noin 22 € t/C yksikkökustannuksella, MT-kuusikossa noin 33 t C/ha lisäykseen noin 25 € t/C yksikkökustannuksella ja VT-männikössä noin 53 t C/ha lisäykseen noin 49 € t/C yksikkökustannuksella (Taulukko 12, Taulukko 13). Vertailun perusteella vaikuttaa siltä, että metsänhoitomenetelmän valinnalla lähdettäessä paljaalta maalta liikkeelle voidaan varastoida metsään enemmän hiiltä kuin varttuneen metsän kiertoaikaa pidentämällä. Valstan ym. (2006) tutkimukseen verrattuna tämä hiilen lisäys voidaan tehdä halvemmalla yksikkökustannuksella, mutta Nergin (2009) tutkimuksen perusteella metsän kiertoajan pidentäminen voisi kuitenkin johtaa halvempaan lisähiilensidonnan yksikkökustannukseen. Tulokset eivät ole täysin vertailtavissa keskenään erilaisten lähtökohtien takia, mutta ne ovat suuntaa antavia ja antavat osviittaa siitä, että millä keinoin erilaisissa lähtötilanteissa voidaan saavuttaa suurempi hiilivaraston koko pienimmällä yksikkökustannuksella.

Keskimääräisen hiilivaraston kokoa kasvattavien metsänhoitomenetelmien aiheuttamia kustannuksia voidaan verrata myös EU:n taakanjakosektorin tavoitteiden saavuttamisen kustannuksiin. Taakanjakosektorin päästöihin kuuluvat ne EU:n kasvihuonekaasupäästöt, jotka eivät sisälly päästökauppaan. Näitä ovat kasvihuonekaasupäästöt liuottimista, teollisuusprosesseista, energiankäytöstä, jätteistä ja maataloudesta (Lindroos ja Ekholm 2015). VTT:n raportissa käsitellään eri keinoja, joilla EU:n taakanjakosektorin tavoitteet voitaisiin saavuttaa vuoteen 2030 mennessä ja niiden kustannuksia (Lindroos ja Ekholm 2015). Esimerkiksi heidän mukaansa tieliikenteen päästöjä voitaisiin vähentää joukkoliikennettä edistämällä. Lindroos ja Ekholm (2015) arvioivat, että vuonna 2030 päästövähennysten marginaalikustannukset olisivat 40 €/t CO<sub>2</sub> ekvivalenttia (noin 147 €/t C) päästövähennystavoitteen ollessa -32 % ja 130 €/t CO<sub>2</sub> ekvivalenttia (477 €/t C) päästövähennystavoitteen ollessa -40 % vuoden 2005 tasosta. Metsänhoitomenetelmien vaihtaminen suurimman nettonykyarvon antavasta menetelmästä enemmän hiiltä varastoivaan menetelmään vaikuttaa tämän vertailun perusteella kustannustehokkaalta ratkaisulta, koska useassa tilanteessa menetelmän vaihdoksen yksikkökustannus jäi esimerkiksi alle 50 €/t C.

Kustannustehokkuutta ja sen käytännöllisyyttä tarkasteltaessa täytyy kuitenkin kiinnittää huomiota myös lisäsitoutuneen hiilen määrään. Joissain tilanteissa nimittäin lisähiilitonnin

kustannus voi muodostua hyvinkin alhaiseksi, mutta menetelmän vaihdoksella saatava hyöty voi olla vain muutamia tonneja hehtaaria kohden (Taulukko 12). Tämän takia parhaiten käyttöön voisivat soveltua ne metsänhoitomenetelmät, jotka sitovat mahdollisimman paljon hiiltä kohtuullisin kustannuksin.

Metsänomistajille koituu kuitenkin tulon menetyksiä, jos he käyttävät jotain muuta kuin suurimman nettohyötyarvon antavaa metsänhoitomenetelmää. Hänninen (2016) haastatteli pääkaupunkiseudulla 15 metsänomistajaa ja heidän suhtautumistaan hiilivarastojen kasvattamiseen heidän omissa metsissään. Hiilivaraston kasvattamisesta maksettava korvaus oli haastateltavien mielestä kiehtova ajatus, mutta epäilyksiä heissä herätti korvauksen suuruus. Monet haastatelluista totesivat, että haluaisivat ensin vertailla, että tuottaisiko hiilen sidonta tarpeeksi verrattuna perinteiseen metsätalouteen. Kaikille haastatteluun osallistuneille korvaus hiilensidonnasta ei olisi kuitenkaan osallistumisen ainoa kriteeri. Osa pohti myös, että he voisivat kasvattaa hiilivarastoa myös ilman korvauksia, mutta pienemmällä alalla (Hänninen 2016). Håbesland ym. (2016) selvittivät norjalaisten metsänomistajien halukkuutta osallistua hypoteettiseen ohjelmaan, jossa metsän hiilivaraston kasvattamisesta maksettaisiin korvaus. Heidän selvityksensä mukaan metsänomistajien osallistuminen riippuisi suuresti toimista, joita metsän omistaja velvoitettaisiin tekemään, ohjelman luonteesta ja erityisesti korvauksen suuruudesta (Håbesland ym. 2016).

#### **5.4 Epävarmuudet**

Tulokset perustuvat simuloituun aineistoon ja erinäisiin malleihin. Mallit eivät koskaan pysty täysin kuvaamaan todellisuutta, joten tuloksiin liittyy epävarmuutta. Esimerkiksi Mäkinen ja Holopainen (2009) esittävät, että metsän todellinen kasvu voi erota huomattavasti kasvusimulaattorin ennusteesta, koska luonnon prosesseihin liittyy paljon satunnaisuutta, jota on vaikea ottaa huomioon. Jatkovapeitteisen kasvatuksen kasvumalleihin liittyy vielä suurempaa epävarmuutta, koska Niemisen (2017) mukaan vasta vuoden 2014 lakimuutos mahdollisti jatkovapeitteisen kasvatuksen ja siten tietoa kyseisestä menetelmästä on kertynyt vasta vähän. Puun tulevien hintojen ennustaminen on mahdotonta, mikä vaikuttaa lisäksi mallien luotettavuuteen (Mäkinen ja Holopainen 2009). Myös simulaation pitkä aika luo epävarmuustekijöitä. Esimerkiksi korkokannan kehitystä ei voida tietää etukäteen ja sillä on keskeinen merkitys tuloksiin. Tässä työssä käytetty malli ei myöskään ota huomioon ilmastonmuutoksen vaikutuksia, joilla voi olla merkitystä niin

metsän kasvulle kuin maaperään varastoituvalle hiilelle. Yksi iso epävarmuuden lähde on myös valitut tarkasteluajankohdat. Tuloksiin vaikuttaa huomattavasti se, että kuinka metsänhoitomenetelmien metsänkäsitteilyt ehtivät toteutua valituilla ajanjaksoilla. Mallit ja simulaatiot tarjoavat kuitenkin mahdollisuuden ennustaa tulevaa tämänhetkisen parhaan tietämyksen mukaan.

## **6 JOHTOPÄÄTÖKSET**

Metsänhoitomenetelmän valinnalla on vaikutusta metsän nettohyötyarvoon ja metsän kykyyn varastoida hiiltä. Tämän tutkimuksen perusteella metsänhoitomenetelmän valinnalla voidaan lisätä keskimääräistä hiilivaraston kokoa metsissä ja pyrkiä ehkäisemään siten ilmastomuutosta. Pariisin sopimuksen tavoitteiden saavuttamiseksi tarvitaan pikaisia toimia, mutta metsänhoitomenetelmien muutoksista ei löydy kuitenkaan nopeita ja kustannustehokkaita ratkaisuja tällä hetkellä. Tilanne voi kuitenkin muuttua, jos esimerkiksi korot nousevat. Pidemmällä tähtäimellä metsänhoitomenetelmän valinnalla voidaan auttaa saavuttamaan ilmastotavoitteita kustannustehokkaasti.

Edellä oleva pätee kuitenkin vain tilanteeseen, jossa lähdetään liikkeelle paljaalta maalta. Siksi lisätutkimusta tarvitaan siitä, että kannattaisiko metsänhoitomenetelmää muuttaa kesken kiertoajan ja millaisia vaikutuksia sillä olisi hiilivaraston kokoon ja metsästä saataviin tuloihin. Lisäksi lisätutkimusta tarvitaan puutuotteiden vaikutuksesta hiilenkiertoon. Tässä tutkimuksessa ei huomioitu metsästä poistuvan puun käyttökohdetta ja elinkaarta, mikä voi vaikuttaa metsänhoitomenetelmän valintaan hiilivaraston kasvattamisen kannalta.

Tämä tutkimus kuitenkin osoitti, että metsänhoitomenetelmän vaihtamisella suurimman nettohyötyarvon antavasta menetelmästä voidaan useissa tapauksissa kasvattaa metsän keskimääräistä hiilivarastoa ilman suuria kustannuksia metsänomistajille. Metsänomistajat eivät kuitenkaan välttämättä vaihda metsänhoitomenetelmää ilman kannustinta. Maailmalla onkin tehty esimerkiksi kokeiluja, joissa ekosysteemipalveluiden ylläpidosta ja lisäämisestä maksetaan korvauksia alueen haltialle. Metsän keskimääräisen hiilivaraston kasvattaminen voisi toimia myös tällaisena ekosysteemipalvelun tehostamisena. Sen vuoksi jatkossa voisi olla mielekäästä selvittää, että kannattaisiko kehittää järjestelmää, jossa metsänomistajille korvattaisiin keskimääräisen hiilivaraston kasvattamisesta aiheutuvat tulonmenetykset. Tämä mahdollistaisi sen, että metsiä voitaisiin edelleen hyödyntää puuraaka-aineena ja

toimeentulon lähteenä ilman tulojen menetyksiä samalla kun jatkettaisiin taistelua ilmastonmuutosta vastaan.

## KIITOKSET

Kiitos kaikille, jotka auttoivat tämän Pro gradu -työn tekemisessä. Suuret kiitokset ansaitsevat erityisesti työni ohjaajat Anna Repo ja Mikko Mönkkönen, jotka jaksoivat kärsivällisesti ohjeistaa ja kannustaa minua.

Erityiskiitos vielä Lauralle tuesta ja tsemppaamisesta.

## KIRJALLISUUS

- BIOS 2017. Tutkijoiden julkilausuma: Suomen metsänkäyttösuunnitelmat kiihdyttäisivät ilmastonmuutosta ja heikentäisivät luonnon monimuotoisuutta. 24.3.2017. Saatavissa: <http://bios.fi/julkilausuma/julkilausuma240317.pdf>.
- Cannell M., Thornley J., Mobbs D. & Friend A. 1998. UK conifer forests may be growing faster in response to increased N deposition, atmospheric CO<sub>2</sub> and temperature. *Forestry* 71: 277-296, doi:10.1093/forestry/71.4.277.
- Cherubini F., Peters G.P., Berntsen T., Stromman A.H. & Hertwich E. 2011. CO<sub>2</sub> emissions from biomass combustion for bioenergy: atmospheric decay and contribution to global warming. *Global Change Biology Bioenergy* 3: 413-426, doi:10.1111/j.1757-1707.2011.01102.x.
- Cooper C. 1983. Carbon Storage in Managed Forests. *Canadian Journal of Forest Research* 13: 155-166, doi:10.1139/x83-022.
- EEX 2017. European Energy Exchange AG. <https://www.eex.com/en/> (luettu: 30.10.2017).
- EEX 2018. EUA Primary Auction Report 2018. European Energy Exchange AG. Saatavissa: <https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/auction-market/european-emission-allowances-auction/european-emission-allowances-auction-download>.
- Euroopan komissio 2016. Factsheet on the Commission's proposal on binding greenhouse gas emission reductions for Member States (2021-2030). [http://europa.eu/rapid/press-release\\_MEMO-16-2499\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-16-2499_en.htm). (luettu: 12.12.2017).
- Garcia-Gonzalo J., Peltola H., Briceno-Elizondo E. & Kellomäki S. 2007. Changed thinning regimes may increase carbon stock under climate change: A case study from a Finnish boreal forest. *Climatic Change* 81: 431-454.
- Håbesland D.E., Kilgore M.A., Becker D.R., Snyder S.A., Solberg B., Sjolie H.K. & Lindstad B.H. 2016. Norwegian family forest owners' willingness to participate in carbon offset programs. *Forest Policy and Economics* 70: 30-38, doi:10.1016/j.forpol.2016.05.017.
- Helin T., Sokka L., Soimakallio S., Pingoud K. & Pajula T. 2013. Approaches for inclusion of forest carbon cycle in life cycle assessment - a review. *Global Change Biology Bioenergy* 5: 475-486, doi:10.1111/gcbb.12016.
- Hildén M., Soimakallio S., Seppälä J. & Liski J. 2016. Metsien hiilinielut otettavat mukaan biotalouden kestävyystarkasteluihin. Suomen ympäristökeskus. Saatavissa:



- [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/164752/SYKE\\_PolicyBrief\\_Metsien\\_hiilinielut\\_I\\_18072016.pdf?sequence=4](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/164752/SYKE_PolicyBrief_Metsien_hiilinielut_I_18072016.pdf?sequence=4).
- Hynynen, J., Ojansuu, R., Hökkä, H., Siipilehto, J., Salminen, H., & Haapala, P. 2002. Models for predicting stand development in MELA System. Metsäntutkimuslaitos.
- Hyytiäinen K. & Tahvonen O. 2002. Economics of forest thinnings and rotation periods for Finnish conifer cultures. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17: 274-288, doi:10.1080/028275802753742945.
- Hänninen H. 2011. Yksityismetsänomistuksen rakenne. Metsätehon iltapäiväseminaari 24.5.2011, Helsinki. Metsäntutkimuslaitos. Saatavissa: <http://www.metla.fi/hanke/3458/HHanninen-Metsateho-24052011.pdf>.
- Hänninen H., Karppinen H. & Leppänen J. 2011. Suomalainen metsänomistaja 2010. *Metlan työraportteja* 208. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2011/mwp208.pdf>.
- Hänninen M. 2016. Metsänomistajien suhtautuminen hiilen sidonnan lisäämiseen omissa metsissään. Liiketaloudellisen metsäekonomian Pro gradu –tutkielma. Helsingin yliopisto.
- Ikonen A. 2016. Intensiivisen metsänhoidon vaikutukset biomassan tuotantoon ja hiilen sidontaan eteläisessä Suomessa. Metsätieteen Pro gradu –tutkielma. Itä-Suomen yliopisto.
- IPCC 2000. IPCC special report. Summary for policymakers. Land use, land-use change, and forestry. Saatavissa: <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srl-en.pdf>.
- IPCC 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jackson R.B., Le Quere C., Andrew R.M., Canadell J.G., Peters G.P., Roy J. & Wu L. 2017. Warning signs for stabilizing global CO2 emissions. *Environmental Research Letters* 12: 110202, doi:10.1088/1748-9326/aa9662.
- Johnson D. & Curtis P. 2001. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest Ecology and Management* 140: 227-238, doi:10.1016/S0378-1127(00)00282-6.
- Johnson D., Knoepp J., Swank W., Shan J., Morris L., Van Lear D. & Kapeluck P. 2002. Effects of forest management on soil carbon: results of some long-term resampling studies. *Environmental Pollution* 116: S201-S208, doi:10.1016/S0269-7491(01)00252-4.
- Kaipainen T., Liski J., Pussinen A. & Karjalainen T. 2004. Managing carbon sinks by changing rotation length in European forests. *Environmental Science & Policy* 7: 205-219, doi:10.1016/j.envsci.2004.03.001.
- Kalliokoski, T. & Repo, A. 2015. Mitä metsämallit kertovat Suomen metsien hiilinielun tulevasta kehityksestä? Osa 2 julkaisussa Seppälä, J., Vesala, T. ja Kanninen, M. (toim.): *Metsien hyödyntäminen ja ilmastonmuutoksen hillintä*. Suomen ilmastopaneelin raportti 4/2015. Saatavissa: [http://www.ilmastopaneeli.fi/uploads/selvitykset\\_lausunnot/Mets%C3%A4ty%C3%B6t\\_taustaraportit\\_2015\\_final.pdf](http://www.ilmastopaneeli.fi/uploads/selvitykset_lausunnot/Mets%C3%A4ty%C3%B6t_taustaraportit_2015_final.pdf)

- Kalliovirta J., Mäkinen A. & Rasinmäki J. 2008. SIMO (SIMulointi ja Optimointi) - käyttöopas, versio 0.4.0. Helsingin yliopisto. Saatavissa: [svn.simo-project.org/simo/tags/0.4.1/docs/SIMOn\\_manuaali.doc](http://svn.simo-project.org/simo/tags/0.4.1/docs/SIMOn_manuaali.doc).
- Kirschbaum M.U.F. 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology and Biochemistry* 27: 753-760.
- Korhonen K., Ihalainen A., Ahola A., Heikkinen J., Henttonen H., Hotanen J-P., Nevalainen S., Pitkänen J., Strandström M. & Viiri H. 2017. Suomen metsät 2009–2013 ja niiden kehitys 1921–2013. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 59/2017. Luonnonvarakeskus. Saatavissa: [http://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/540537/luke-luobio\\_59\\_2017.pdf?sequence=6&isAllowed=y](http://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/540537/luke-luobio_59_2017.pdf?sequence=6&isAllowed=y).
- Lasch P., Badeck F., Suckow F., Lindner M. & Mohr P. 2005. Model-based analysis of management alternatives at stand and regional level in Brandenburg (Germany). *Forest Ecology and Management* 207: 59-74, doi:10.1016/j.foreco.2004.10.034.
- Lehtonen A. 2009. Suomen kasvihuonekaasuinventaarit ja metsien merkitys hiilitaselle. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2009. Saatavissa: <https://www.metsatieteenaikakauskirja.fi/pdf/article6767.pdf>.
- Leppänen J. & Torvelainen J. 2015. Tilasto: Metsämaan omistus 2013. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 5/2015. Luonnonvarakeskus. Saatavissa: [http://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/485473/luke-luobio\\_5\\_2015.pdf?sequence=4](http://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/485473/luke-luobio_5_2015.pdf?sequence=4).
- Lindroos T & Ekholm T. 2016. Taakanjakosektorin päästökehitys ja päästövähennystoimet vuoteen 2030. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T245.pdf>.
- Liski J. 2000. Millainen kiertoaika eduksi metsien hiilitaloudelle? *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2000 s.639—642. Saatavissa: <http://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/533606/hiili.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Liski J., Lehtonen A., Palosuo T., Peltoniemi M., Eggers T., Muukkonen P. & Makipää R. 2006. Carbon accumulation in Finland's forests 1922-2004 - an estimate obtained by combination of forest inventory data with modelling of biomass, litter and soil. *Annals of Forest Science* 63: 687-697, doi:10.1051/forest:2006049.
- Liski J., Pussinen A., Pingoud K., Mäkipää R. & Karjalainen T. 2001. Which rotation length is favourable to carbon sequestration? *Canadian Journal of Forest Research* 31: 2004-2013.
- Luke 2012. Metsien hiilivarasto (1.4). <http://www.metla.fi/metinfo/kestavyys/c1-carbon-stock.htm>. (luettu: 13.12.2017).
- Luke 2017. Valtakunnan metsien inventointi: Puuston kasvu noussut edelleen – Pohjois-Suomessa metsät järetyvät. <https://www.luke.fi/uutiset/valtakunnan-metsien-inventoinnin-tulosjulkistus-2017/>. (luettu: 5.2.2018).
- Luyssaert S., Inglis I., Jung M., Richardson A.D., Reichstein M., Papale D., Piao S.L., Schulzes E, Wingate L., Matteucci G., Aragao L., Aubinet M., Beers C., Bernhofer C., Black K.G., Bonal D., Bonnefond J., Chambers J., Ciais P., Cook B., Davis K.J., Dolman A.J., Gielen B., Goulden M., Grace J., Granier A., Grelle A., Griffis T.,

- Gruenwald T., Guidolotti G., Hanson P.J., Harding R., Hollinger D.Y., Hutrya L.R., Kolar P., Kruijt B., Kutsch W., Lagergren F., Laurila T., Law B.E., Le Maire G., Lindroth A., Loustau D., Malhi Y., Mateus J., Migliavacca M., Misson L., Montagnani L., Moncrieff J., Moors E., Munger J.W., Nikinmaa E., Ollinger S.V., Pita G., Rebmann C., Rouspard O., Saigusa N., Sanz M.J., Seufert G., Sierra C., Smith M., Tang J., Valentini R., Vesala T. & Janssens I.A. 2007. CO<sub>2</sub> balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. *Global Change Biology* 13: 2509-2537, doi:10.1111/j.1365-2486.2007.01439.x.
- Luyssaert S., Schulze E.-., Boerner A., Knohl A., Hessenmoeller D., Law B.E., Ciais P. & Grace J. 2008. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455: 213-215, doi:10.1038/nature07276.
- Lähde E., Laiho O. & Pukkala T. 2010. Eri- ja tasarakenteiskasvatuksen vertailua Pohjoismaissa. *Metlan työraportteja* 176. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2010/mwp176.pdf>.
- Metsäntutkimuslaitos 2014. *Metsätilastollinen vuosikirja* 2014. Saatavissa: <http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/julkaisut/vsk/2014/index.html>.
- Microsoft Excel 2016. Microsoft Office 365 ProPlus. Versio 1711.
- Mononen J. 2003. Hiilidioksidikompensaation vaikutus metsänkasvatuksen kannattavuuteen ja metsänhoitoon. Liiketaloudellisen metsäekonomian Pro gradu – tutkielma. Helsingin yliopisto.
- Mäkinen A & Holopainen M. 2009. Menetelmiä metsikön nettonykyarvolaskentaan liittyvän epävarmuuden hallintaan. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2009. Saatavissa: <https://www.metsatieteenaikakauskirja.fi/pdf/article6342.pdf>.
- Mäkipää R. 2012. Ilmastonmuutos ja metsien hoito vaikuttavat metsien hiilitaseeseen. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2012. Saatavissa: <https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/533143/RaisaM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Nerg K. 2009. Metsän kiertoajan vaikutus hiilensidontaan ja metsänkasvatuksen kannattavuuteen. Liiketaloudellisen metsäekonomian Pro gradu – tutkielma. Helsingin yliopisto.
- Nieminen A. 2017. Monipuoliset metsänhoitomenetelmät käyttöön suometsissä. *Tapion raportteja* nro. 22. Saatavissa: <http://tapio.fi/wp-content/uploads/2018/01/Monipuoliset-metsanhoitomenetelmat-kayttoon-syuometsissa.pdf>.
- Peura M., Burgas D., Eyvindson K., Repo A. & Mönkkönen M. 2018. Continuous cover forestry is a cost-efficient tool to increase multifunctionality of boreal production forests in Fennoscandia. *Biological Conservation*. 217: 104-112, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320717308170>.
- Post W., Peng T., Emanuel W., King A., Dale V. & Deangelis D. 1990. The Global Carbon-Cycle. *American Scientist* 78: 310-326.
- Post W. & Kwon K.C. 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology* 6: 317-327, doi:10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x.
- Profft I., Mund M., Weber G., Weller E. & Schulze E. 2009. Forest management and carbon sequestration in wood products. *European Journal of Forest Research* 128: 399-413, doi:10.1007/s10342-009-0283-5.

- Pukkala T. 2005. Metsikön tuottoarvon ennustemallit kivennäismaan männiköille, kuusikoille ja rauduskoivikoille. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2005: 311–322.
- Pukkala T., Lähde E. & Laiho O. 2013. Species Interactions in the Dynamics of Even- and Uneven-Aged Boreal Forests. *Journal of Sustainable Forestry* 32: 371-403, doi:10.1080/10549811.2013.770766.
- Pussinen A., Karjalainen T., Makipaa R., Valsta L. & Kellomaki S. 2002. Forest carbon sequestration and harvests in Scots pine stand under different climate and nitrogen deposition scenarios. *Forest Ecology and Management* 158: 103-115, doi:10.1016/S0378-1127(00)00675-7.
- Rasinmäki J., Makinen A. & Kalliovirta J. 2009. SIMO: An adaptable simulation framework for multiscale forest resource data. *Computers and Electronics in Agriculture* 66: 76-84, doi:10.1016/j.compag.2008.12.007.
- Richards K. & Stokes C. 2004. A review of forest carbon sequestration cost studies: A dozen years of research. *Climatic Change* 63: 1-48, doi:10.1023/B:CLIM.0000018503.10080.89.
- Rogelj J., Den Elzen M., Höhne N., Fransen T., Fekete H., Winkler H., Schaeffer R., Sha F., Riahi K. & Meinshausen M. 2016. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 C. *Nature* 534: 631-639.
- RStudio 2016. RStudio Team. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.
- Ruiz-Peinado R., Bravo-Oviedo A., Montero G. & del Rio M. 2016. 'Carbon stocks in a Scots pine afforestation under different thinning intensities management'. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 21: 1059-1072, doi:10.1007/s11027-014-9585-0.
- Seppälä J., Kanninen M., Vesala T., Uusivuori J., Kalliokoski T., Lintunen J., Saikku L., Korhonen R. & Repo A. 2015. *Ilmastopaneelin raportti* 3/2015. Saatavissa: [http://www.ilmastopaneeli.fi/uploads/selvitykset\\_lausunnot/Metsien%20hy%C3%B6dynt%C3%A4misen%20ilmastovaikutukset%20ja%20hiilinielujen%20kehittyminen.pdf](http://www.ilmastopaneeli.fi/uploads/selvitykset_lausunnot/Metsien%20hy%C3%B6dynt%C3%A4misen%20ilmastovaikutukset%20ja%20hiilinielujen%20kehittyminen.pdf).
- Seppälä J., Asikainen A., Kalliokoski T., Kanninen M., Koskela S., Ratinen I. & Routa J. 2017. Tutkijoiden pääviestit metsien käytön ilmastovaikutuksista. *Suomen ilmastopaneelin raportti* 1/2017. Saatavissa: [http://www.ilmastopaneeli.fi/uploads/selvitykset\\_lausunnot/Ilmastopaneeli\\_mets%C3%A4v%C3%A4itt%C3%A4m%C3%A4t\\_final\\_%202017.pdf](http://www.ilmastopaneeli.fi/uploads/selvitykset_lausunnot/Ilmastopaneeli_mets%C3%A4v%C3%A4itt%C3%A4m%C3%A4t_final_%202017.pdf).
- Sievänen R., Lehtonen A., Ojanen P. & Salminen O. 2012. Metsien hiilitaseet, *Metlan työraportteja* 240. Saatavissa: [http://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/536147/mwp240\\_4\\_4.3.pdf?sequence=16&isAllowed=y](http://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/536147/mwp240_4_4.3.pdf?sequence=16&isAllowed=y).
- Suomen Pankki 2017. Peruskoron muutokset vuodesta 1867. Saatavissa: [https://www.suomenpankki.fi/globalassets/fi/tilastot/korot/documents/peruskoron\\_muutokset\\_fi.pdf](https://www.suomenpankki.fi/globalassets/fi/tilastot/korot/documents/peruskoron_muutokset_fi.pdf).
- Sved, J. & Koistinen, A. 2015. Metsänhoidon suositukset kannattavaan metsätalouteen, työopas. *Tapion julkaisuja*. Saatavissa: [http://tapio.fi/wp-content/uploads/2015/09/MHS\\_Kannattava\\_metsatalous\\_201500814.pdf](http://tapio.fi/wp-content/uploads/2015/09/MHS_Kannattava_metsatalous_201500814.pdf).

- Tahvonen O. 2009. Optimal choice between even- and uneven-aged forestry. *Natural Resource Modeling* 22: 289-321, doi:10.1111/j.1939-7445.2008.00037.x.
- TEM 2014. Energia- ja ilmastotiekartta 2050. Parlamentaarisen energia- ja ilmastokomitean mietintö 16. päivänä lokakuuta 2014. *Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja* 31/2014. Saatavissa: [https://tem.fi/documents/1410877/2628105/Energia-+ja+ilmastotiekartta+2050.pdf/1584025f-c5c7-456c-a912-aba0ee3e5052\\_](https://tem.fi/documents/1410877/2628105/Energia-+ja+ilmastotiekartta+2050.pdf/1584025f-c5c7-456c-a912-aba0ee3e5052_)
- Thornley J. & Cannell M. 2000. Managing forests for wood yield and carbon storage: a theoretical study. *Tree Physiology* 20: 477-484.
- Tilastokeskus. 2016. Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2016. [https://tilastokeskus.fi/til/khki/2016/khki\\_2016\\_2017-05-24\\_kat\\_001\\_fi.html](https://tilastokeskus.fi/til/khki/2016/khki_2016_2017-05-24_kat_001_fi.html). (luettu: 5.2.2018).
- Tilastokeskus 2017 a. Energian kokonaiskulutus nousi 2 prosenttia vuonna 2016. [http://www.stat.fi/til/ehk/2016/04/ehk\\_2016\\_04\\_2017-03-23\\_tie\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehk/2016/04/ehk_2016_04_2017-03-23_tie_001_fi.html). (luettu: 6.2.2018).
- Tilastokeskus 2017 b. Suomen kasvihuonekaasupäästöt 1990–2016. Saatavissa: [https://www.stat.fi/static/media/uploads/tup/khkinv/suomen\\_kasvihuonekaasupaastot\\_1990-2016\\_final.pdf](https://www.stat.fi/static/media/uploads/tup/khkinv/suomen_kasvihuonekaasupaastot_1990-2016_final.pdf).
- Toropainen M. & Mäkkeli P. 1994. Metsäsektori myllerryksessä. Metsäntutkimuspäivä Joensuussa 1994. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 500. 62 s. Saatavissa: [http://jukuri.luke.fi/handle/10024/521129\\_](http://jukuri.luke.fi/handle/10024/521129_)
- Trivino M., Juutinen A., Mazziotta A., Miettinen K., Podkopaev D., Reunanen P. & Monkkonen M. 2015. Managing a boreal forest landscape for providing timber, storing and sequestering carbon. *Ecosystem Services* 14: 179-189, doi:10.1016/j.ecoser.2015.02.003.
- Truppia J. 2015. tvn: Time Value of Money Functions. R package version 0.3.0. Saatavissa: [https://CRAN.R-project.org/package=tvn\\_](https://CRAN.R-project.org/package=tvn_)
- Tulli 2017. Ulkomaankauppa 2016 -Taskutilasto. Saatavissa: <http://tulli.fi/documents/2912305/4762055/Ulkomaankauppa+2016+Taskutilasto/5e1d61ab-d19f-4d4f-8de8-05f36c719fb5>.
- Tuomi M., Thum T., Jarvinen H., Fronzek S., Berg B., Harmon M., Trofymow J.A., Sevanto S. & Liski J. 2009. Leaf litter decomposition-Estimates of global variability based on Yasso07 model. *Ecological Modelling* 220: 3362-3371, doi:10.1016/j.ecolmodel.2009.05.016.
- UN 1992. United nations framework convention on climate change. Saatavissa: [https://unfccc.int/files/essential\\_background/background\\_publications\\_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf](https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf).
- UN 2015. Paris agreement. Saatavissa: [http://unfccc.int/files/essential\\_background/convention/application/pdf/english\\_paris\\_agreement.pdf](http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf).
- UN 2017. Background on the UNFCCC: The international response to climate change. [http://unfccc.int/essential\\_background/items/6031.php](http://unfccc.int/essential_background/items/6031.php) (luettu 2.10.2017).
- Valsta L., Ahtikoski A., Horne P., Karttunen K., Kokko K., Melkas E., Mononen J., Pingoud K., Pohjola J. & Uusivuori J. 2006. Puu ilmastonmuutoksen hillitsijänä. *Metsäekonomian laitoksen tutkimusraportteja* 39. Helsingin yliopisto.

- Valsta, L., Pohjola J., Mononen J. & Pingoud K. 2005. Suomen metsät ja puutuotteet ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden hallinnassa. Teoksessa: Riikonen, J. & Vapaavuori E. (toim.). Ilmasto muuttuu – mukautuvatko metsät. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 944. s. 114-122.
- Valtioneuvoston kanslia 2015. Ratkaisujen Suomi. Pääministeri Juha Sipilän hallituksen strateginen ohjelma 295.2015. *Hallituksen julkaisusarja* 10/2015. Saatavissa: [http://valtioneuvosto.fi/documents/10184/1427398/Ratkaisujen+Suomi\\_FI\\_YHDISTETTY\\_netti.pdf/801f523e-5dfb-45a4-8b4b-5b5491d6cc82\\_](http://valtioneuvosto.fi/documents/10184/1427398/Ratkaisujen+Suomi_FI_YHDISTETTY_netti.pdf/801f523e-5dfb-45a4-8b4b-5b5491d6cc82_)
- Valtioneuvoston periaatepäätös 2015. Kansallinen metsästrategia 2025. Valtioneuvoston periaatepäätös 12.2.2015. Maa- ja metsätalousministeriö. Saatavissa: [http://mmm.fi/documents/1410837/1504826/Kansallinen+mets%C3%A4strategia+2025/c8454e55-b45c-4b8b-a010-065b38a22423\\_](http://mmm.fi/documents/1410837/1504826/Kansallinen+mets%C3%A4strategia+2025/c8454e55-b45c-4b8b-a010-065b38a22423_)
- Ympäristöministeriö 2016. Tiedote 14.11.2016. Suomi ratifioi ilmastopöimöksen. [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Ilmasto\\_ja\\_ilma/Suomi\\_ratifioi\\_Pariisin\\_ilmastopöimukse\(40889\)](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Ilmasto_ja_ilma/Suomi_ratifioi_Pariisin_ilmastopöimukse(40889)) (luettu 12.12.2017).
- Äijälä, O., Koistinen, A., Sved, J., Vanhatalo, K. & Väisänen, P. (toim.) 2014. Metsänhoidon suositukset. *Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisuja*.











