



OULUN YLIOPISTO
UNIVERSITY of OULU

OULUN YLIOPISTON KAUPPAKORKEAKOULU

Pauliina Toivanen

**METSÄNKASVATUS, HIILENSIDONTA JA HIILIKORVAUSMEKANISMIN VAIKUTUS
METSÄNHOIDON KANNATTAVUUTEEN**

Pro gradu -tutkielma
Taloustieteen maisterikoulutus
Kesäkuu 2020

Yksikkö Taloustieteen, rahoituksen ja laskentatoimen yksikkö			
Tekijä Toivanen Pauliina		Työn valvoja Kopsakangas-Savolainen M. tutkimusprofessori	
Työn nimi Metsänkasvatus, hiilensidonta ja hiilikorvausmekanismin vaikutus metsänhoidon kannattavuuteen			
Oppiaine Taloustiede	Työn laji Pro gradu	Aika Kesäkuu 2020	Sivumäärä 71
Tiivistelmä <p>Tutkielman tarkoituksena on selvittää jatkuvapeitteisen ja jaksollisen metsänkasvatuksen ominaisuuksia ja taloudellista kannattavuutta. Lisäksi arvioidaan metsänhoitomenetelmien vaikutukset metsän hiilensidontaan ja tarkastellaan miten hiilensidontaan linkitetty hiilikorvausmekanismi vaikuttaa metsänhoidon kannattavuuteen.</p> <p>Tutkielman kirjallisuuskatsaus keskittyy ilmastonmuutoksen vaikutuksiin metsänkasvatuksen näkökulmasta, metsänkäsittelymallien ominaisuuksiin, hiilikorvausmekanismin perusteisiin sekä ekologiaa ja ekonomiaa yhdistäviin teoreettisiin metsänkäsittelymalleihin.</p> <p>Tutkielman empiirisessä osiossa tutkitaan, kuinka korkokanta ja päästöoikeuksien hinnat vaikuttavat metsänhoitomenetelmien kannattavuuteen. Jatkuvapeitteisen kasvatuksen osalta tarkastellaan simulaatioskenaarioiden avulla erilaisia hakkuutapoja, joissa vaihdellaan hakkuiden voimakkuutta ja aikaväliä. Jaksollisen kasvatuksen osalta tarkastellaan metsänhoidon suositusten mukaista kasvatusta. Työssä on käytetty lyhyen aikavälin hiilikorvausmekanismeja, jossa metsänomistajalle maksetaan metsän hiilivarastosta vuosi kerrallaan. Lyhyen aikavälin hiilikorvausmekanismin vaikutuksia ei ole aikaisemmin tutkittu jatkuvapeitteisen kasvatuksen yhteydessä.</p> <p>Työn tärkeimpiä havaintoja olivat, että korkokannan vaihtelulla oli merkittävä vaikutus puun myyntitulojen nettohyötyihin sekä eri skenaarioiden suhteellisiin eroihin. Jaksollinen kasvatus oli selkeästi kannattavampaa 2 %:n ja 3 %:n korkokannoilla, mutta 4 %:n korkokannalla jatkuvapeitteisen kasvatus vaihtui kannattavimmaksi metsänhoitomenetelmäksi. Kun lyhyen aikavälin hiilikorvausmekanismi otettiin mukaan tarkasteluun, ei korkokannan vaihtelu muuttanut jaksollisen kasvatuksen asemaa kannattavimpana menetelmänä. Korkokannalla oli kuitenkin huomattava vaikutus hakkuutulojen ja hiilikorvaustulojen suhteellisiin osuuksiin kokonaistuloista. Myöskään hiilen hinnan vaihtelu 10 €/tCO₂, 20 €/tCO₂ ja 30 €/tCO₂ välillä ei horjuttanut jaksollisen kasvatuksen skenaarion asemaa kannattavimpana. Jatkuvapeitteisen menetelmän skenaario vaihtui kannattavammaksi vasta hiilen hinnalla 44,05 €/tCO₂. Hinnan vaihtelulla kuitenkin oli samanlainen vaikutus hakkuutulojen ja hiilikorvaustulojen suhteellisiin osuuksiin kokonaistuloista, kuin koron vaihtelullakin. Hiilikorvausmekanismin hyödyntäminen kasvatti metsänomistajan tulojen nettohyötyä merkittävästi kaikissa skenaarioissa.</p> <p>Tulokset poikkeavat osittain aiemmasta tutkimuksesta. Tulokset riippuvat kuitenkin vahvasti valitusta metsän lähtötilanteesta, käytetystä metsänhoitomenetelmästä, hiilikorvausmekanismin ominaisuuksista, sekä siitä onko menetelmänä käytetty optimointia vai skenaarioanalyysiä.</p>			
Asiasanat Metsänhoitomenetelmät, jatkuvapeitteinen kasvatus, lyhyen aikavälin hiilikorvausmekanismi			
Muita tietoja			

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	ILMASTO, TALOUS JA METSÄT	9
	2.1 Ilmastonmuutos	9
	2.2 Metsien hyödyntäminen ja metsäteollisuuden merkitys Suomelle	12
3	METSÄNHOITOMENETELMÄT	15
	3.1 Metsänhoitomenetelmien tavoitteet.....	15
	3.2 Tasaikäinen ja jatkuvapeitteinen metsänkasvatus	18
	3.3 Eri metsänhoitomenetelmien taloudellinen kannattavuus	22
4	METSIEN HIILENSIDONTA	27
	4.1 Metsien hiilinielut ja niihin liittyvät poliittiset tavoitteet	27
	4.2 Hiilikorvausmekanismit	30
	4.3 Tutkimustuloksia hiilikorvausmekanismeista.....	33
	4.4 Hiilikorvausmekanismit käytännössä	36
	4.4.1 Kalifornian hiilikorvausmekanismi	36
	4.4.2 Uuden-Seelannin hiilikorvausmekanismi	37
	4.4.3 Suomeen suunniteltu hiilikorvausmekanismi ja yksityiset palveluntarjoajat	38
5	METSIENKÄSITTELYMALLIEN TEOREETTISET KEHYKSET	40
	5.1 Faustmannin malli	40
	5.2 Hartmanin malli	41
	5.3 Tahvosen malli.....	43
	5.4 Tahvosen malli täydennettynä hiilensidonnalla	44
6	TUTKIMUSMENETELMÄ	48
	6.1 Aineisto	48
	6.2 Skenaarioiden luominen	48
	6.3 Taloudellisen analyysin malli.....	50

7	TULOKSET.....	53
8	TULOSTEN VERTAILU AIKAISEMPIIN TUTKIMUKSIIN.....	60
9	YHTEENVETO	62

KUVIOT

- Kuvio 1. Suomen energian kokonaiskulutuksen prosentuaaliset osuudet energialähteittäin vuonna 2019. Mukailten Suomen virallinen tilasto (SVT), 2020. 11**
- Kuvio 2. Pienaukkohakkuumenetelmä. Keltaisella pohjalla vasta hakatut pienaukot ja tummanoranssilla pohjalla jo aiemmin tehdyt pienaukot, jotka ovat alkaneet uudistua aukon reunapuiden siementämänä. Vaaleanoranssi rengas tummemman ympärillä osoittaa, miten alkuperäistä pienaukkoa voidaan myöhemmin laajentaa. (Mukaiillen Äijälä, ym. 2019)..... 20**
- Kuvio 3. Metsänhoitomenetelmien moninaisuus hakattujen puiden ja jäljelle jäävien puiden näkökulmasta (mukaiillen Kuuluvainen ym., 2012, s. 722). 21**
- Kuvio 4. Jaksollisen ja jatkuvapeitteisen metsänhoidon tulovirtojen vertailu nuorena kasvatusmetsikössä. 23**
- Kuvio 5. Jaksollisen ja jatkuvapeitteisen metsänhoidon kannattavuuden arviointi (lainattu seminaariesityksestä Assmuth 2020). 26**
- Kuvio 6. Hiilipörssin integrointi päästöoikeusmarkkinoille (mukaiillen Nurmi & Ollikainen, 2019). 32**
- Kuvio 7. Puun hakkuukertymät eri skenaarioissa. 53**
- Kuvio 8. Vuosittainen keskimääräinen hiilivarasto eri skenaarioissa 61 vuoden tarkastelujaksolla. 54**
- Kuvio 9. Vuosittainen keskimääräinen hiilivarasto jatkuvapeitteisen kasvatuksen skenaarioissa 91 vuoden tarkastelujaksolla. 55**
- Kuvio 10. Tulojen nettonykyarvot euroissa eri skenaarioissa, kun käytetyt korkokannat ovat 2 %, 3 % ja 4 %. Taulukossa kirjaimen R jälkeen on ilmoitettu käytetty hakkuuintervalli ja kirjaimen L jälkeen hakkuun jälkeisen puuston pinta-ala. Alimpana skenaario TRAD61 kuvaa jaksollista metsänhoitomenetelmää..... 56**
- Kuvio 11. Puun myyntitulojen ja hiilikorvausten nettonykyarvot euroissa korkokannoilla 2 %, 3 % ja 4 % ja päästöoikeushinnalla 20 €/tCO₂ eri skenaarioissa. 57**
- Kuvio 12. Puun myyntitulojen ja hiilikorvausten nettonykyarvot eri skenaarioissa korkokannalla 3 % ja päästöoikeushinnoilla 10, 20 ja 30 €/tCO₂..... 58**

1 JOHDANTO

Vuonna 2014 alusta voimaan tullut uusi metsälaki sallii metsänomistajien käyttää entistä monipuolisempia metsänhoidon menetelmiä mukaan lukien jatkuvapeitteinen kasvatus. Lakimuutos on herättänyt kiivasta keskustelua jatkuvapeitteisen kasvatuksen hyödyistä, riskeistä ja kannattavuudesta. Koska jatkuvapeitteinen kasvatus on metsänhoidollinen menetelmä, jota ei ole hyödynnetty vuosikymmeniin, on syytä tutkia sen tarjoamia mahdollisuuksia ja sen aiheuttamia riskejä ennen sen laajamittaista käyttöönottoa.

Lisäksi metsien kyky sitoa hiiltä on merkittävä työkalu ilmastonmuutoksen hillinnässä ja siksi on tärkeää selvittää hiilikorvausmekanismien mahdollisuutta kannustaa metsänomistajia kasvattamaan hiilivarastoja ja hiilinieluja metsissään. Metsien hiilensidonta ei nykyisellään kuulu Euroopan Unionin päästökaupan piiriin, mutta hiilikorvausjärjestelmän liittäminen päästökauppaan olisi ainakin teoriassa mahdollista. Tulevaisuudessa metsien hiilensidontan liittyminen päästökauppaan voi potentiaalisesti myös kasvattaa metsänomistajien metsästä saatavia kokonaistuloja.

Jatkuvapeitteisen metsänhoidon kannattavuutta on viime vuosina tutkittu runsaasti (ks. Juutinen ym., 2020). Jonkin verran tutkimuksia on tehty sen vaikutuksista ekosysteemipalveluihin kuten hiilensidontaan, marja- ja sienisatoihin, lajien elinympäristöjen turvaamiseen sekä vapaa-ajanpalveluiden tarjoamiseen (Pukkala, 2016; Peura ym., 2018). Hiilikorvausmekanismin eli metsänkasvatuksesta metsänomistajalle maksettavan korvauksen vaikutuksista jatkuvapeitteiseen metsänkasvatukseen on kuitenkin vasta vähän tutkimuksia.

Tämän tutkielman tarkoituksena on selvittää jatkuvapeitteisen ja jaksollisen metsänkasvatuksen ominaisuuksia ja taloudellista kannattavuutta. Lisäksi arvioidaan metsänhoitomenetelmien vaikutukset metsän hiilensidontaan ja tarkastellaan miten hiilensidontaan linkitetty hiilikorvausmekanismi vaikuttaa metsänhoidon kannattavuuteen.

Tutkielman kirjallisuuskatsauksessa esitetään, kuinka ilmastonmuutos vaikuttaa metsänkasvuun ja kuinka metsänkasvatukselle on aina asetettu tiettyjä päämääriä,

jotka ovat vaihdelleet ajan saatossa. Lisäksi esitellään erilaisten metsänhoitomenetelmien, erityisesti jaksollisen ja jatkuvapeitteisen menetelmän ominaisuuksia sekä vertaillaan menetelmien eroavaisuuksia erilaisista näkökulmista. Hiilinieluihin liittyen esitellään Euroopan Unionin poliittisia tavoitteita hillitä ilmastonmuutosta metsien avulla, sekä esitetään LULUCF-asetuksen, eli maankäyttö-, maankäytön muutos ja metsätalous -sektoria määräävä Euroopan Unionin asetuksen teknisiä ominaisuuksia ja vaatimuksia Suomen metsille. Vaikka hiilikorvausmekanismilla on vankka taloustieteellinen teoreettinen pohja, eivät järjestelmät ole kuitenkaan toimineet käytännössä. Käytännön ongelmiksi ovat nousseet esimerkiksi korkeat aloituskustannukset, sanktioiden välttely sekä pitkät sitoutumisajat. Lopuksi esitellään vielä metsänkäsittelymallien teoreettiset kehykset, joiden avulla voidaan selvittää taloudellisesti optimaalinen metsänkiertoaika. Tässä tutkielmassa esitellään lyhyesti Faustmannin, Hartmanin sekä Tahvosen mallit perusmuodoissaan ja korostetaan niiden erilaisia näkökulmia.

Tutkielman empiirisessä osiossa tutkitaan, kuinka korkokanta ja päästöoikeuksien hinnat vaikuttavat metsänhoitomenetelmien kannattavuuteen. Jatkuvapeitteisen kasvatuksen osalta tarkastellaan simulaatioskenaarioiden avulla erilaisia hakkuutapoja, joissa vaihdellaan hakkuiden voimakkuutta ja aikaväliä. Jaksollisen kasvatuksen osalta tarkastellaan metsänhoidon suositusten mukaista kasvatusta. Tutkielmassa käytettävää aineistoa on aikaisemmin käytetty Juutinen ym. (2008a) tutkimuksessa, jossa tarkasteltiin puuntuotannon kannattavuutta. Tässä työssä aikaisempaa tarkastelua laajennetaan liittämällä mukaan hiilikorvausmekanismi. Kirjallisuudessa on esitetty useita erilaisia hiilikorvausjärjestelmiä (Lintunen ym., 2016; Assmuth & Tahvonen, 2018; Juutinen ym., 2008b), ja tässä työssä on valittu käytettäväksi niin sanottu lyhyen aikavälin (vuokraus)mekanismi, jossa metsänomistajalle maksetaan metsän hiilivarastosta vuosi kerrallaan (Juutinen ym. 2008b). Lyhyen aikavälin hiilikorvausmekanismin vaikutuksia ei ole aikaisemmin tutkittu jatkuvapeitteisen kasvatuksen yhteydessä.

Tämä tutkielma koostuu yhdeksästä pääluvusta. Johdannon jälkeisessä, toisessa luvussa taustoitetaan ilmastonmuutoksen ja metsien yhteyttä sekä metsien hyödyntämisen merkitystä Suomelle. Kolmannessa kappaleessa esitellään ja vertaillaan erilaisia metsänhoidollisia menetelmiä historiallisesta, käytännöllisestä ja

taloudellisesta näkökulmasta. Neljännessä kappaleessa perehdytään metsien hiilensidontakykyyn ja hiilikorvausmekanismeihin, joissa hiilivarastoa kasvattavalle metsänomistajalle maksetaan korvausta hiilinielujen kasvattamisesta. Viidennessä kappaleessa esitellään klassikoiksi muodostuneita sekä verraten uusia metsänhoidon ekologiaa ja ekonomiaa yhdistäviä teoreettisia malleja ja niiden tulkintaa. Kuudennessa, seitsemännessä ja kahdeksannessa kappaleessa esitellään tutkimusmenetelmä, tutkimustulokset ja niiden vertailu aiempien tutkimusten tuloksiin. Yhdeksäs kappale kokoaa yhteen tutkielman johtopäätökset.

2 ILMASTO, TALOUS JA METSÄT

2.1 Ilmastonmuutos

Ilmaston lämpeneminen on todellinen ilmiö, jonka syntymiseen ihmisten toiminta on suuresti vaikuttanut. Viimeisimmät kolme vuosikymmentä ovat olleet lämpimämpiä kuin edeltävät vuosikymmenet 1850-luvun jälkeen. Maailmanlaajuinen maan ja merenpinnalta mitatut keskilämpötilat ovat nousseet 0,85 °C vuosien 1880 ja 2012 välillä. Tämä lämpeneminen on tapahtunut ympäri maapallon, ei vain tietyillä alueilla. (IPCC, 2013.)

Tutkimukset ovat osoittaneet, että hiilidioksidin, metaanin ja dityppioksidin pitoisuudet ilmakehässä ovat kasvaneet viime vuosikymmenten aikana, mistä on seurannut helposti havaittavia muutoksia ilmakehässä, maalla, merissä ja jäätiköissä. Ihmisen toiminta, kuten fossiilisten polttoaineiden käyttö sekä maankäytön muutokset vaikuttavat kaasujen ja aerosolien määrään ilmakehässä, missä ne reagoivat pilvien ja otsonin kanssa. Näistä kemiallisista reaktioista syntyy muuntunutta otsonia sekä aerosolihiukkasia, jotka hajottavat, heijastavat ja imevät itseensä auringosta saapuvaa lyhytaaltosäteilyä ja muuttavat siten ilmakehän säteilyenergiatasapainoa. Pienillä muutoksilla ilmakehän kaasuihin ja aerosoleihin on suuri vaikutus auringosta saapuvaan lyhytaaltosäteilyyn ja maasta avaruuteen heijastuvaan pitkäaaltosäteilyyn, joilla vuorostaan on tärkeä merkitys ilmakehän säteilytasapainolle. (Cubasch ym., 2013.)

Vuosisadan loppuun mennessä ilmaston keskilämpötila tulee ennustettujen skenaarioiden mukaan lämpenemään 1,5 – 4,8 °C maailmanlaajuisesti. Lämpeneminen tulee olemaan voimakkaampaa maalla kuin merellä. Lisäksi lämpeneminen on jopa 2–3 kertaa voimakkaampaa arktisella alueella kuin maailmassa keskimäärin (IPCC, 2018). Ilmastonmuutoksen seurauksena lämpöaallot, ennätyspakkaset, rankkasateet ja äärimmäiset kuivakaudet tulevat lisääntymään. Nykyiset merivirrat tulevat heikkenemään, jäätiköt jatkavat kutistumistaan ja merenpinta tulee kohoamaan. (IPCC, 2013.)

Ilmastonmuutos vaikuttaa myös Suomen ilmasto-olosuhteisiin ja muutokset tulevat olemaan huomattavia. Keskitalven lämpötila tulee nousemaan arviolta 2–7°C ja sademäärät lisääntyvät erityisesti talvisin 3–36 % vuosisadan loppuun mennessä (Ruosteenoja ym., 2016). Koska talvien lämpötila tulee kohoamaan, tulee lumipeitepäivien määrä vähenemään jopa 20–40 % (Marttila ym., 2005).

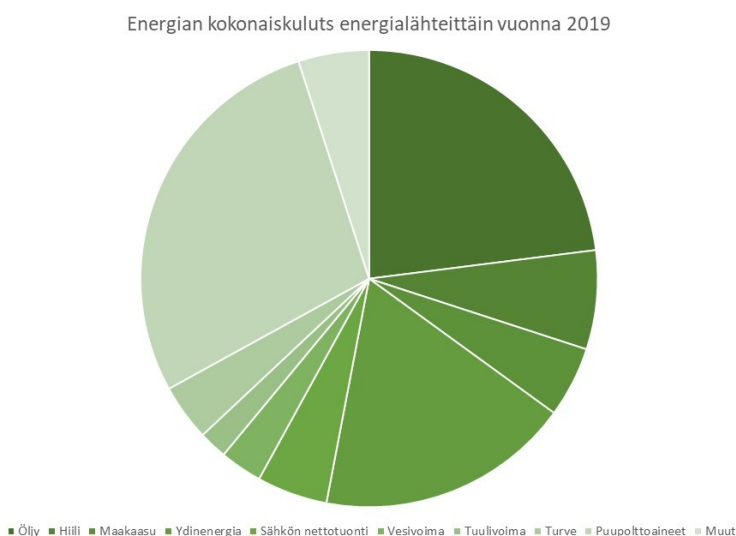
Lämpötilojen nousu ja sademäärien lisääntyminen vaikuttavat myös metsien kasvuun. Puuston kasvun arvioidaan tehostuvan maanlaajuisesti jopa 44 % aikajaksolla 2050–2099 verrattuna vuosiin 1961–1990. Tämä tehostumisen lisäys tapahtuu eri suhteissa Pohjois- ja Etelä-Suomessa. Etelä-Suomessa kasvu tehostuu arvion mukaan noin 12 %, kun Pohjois-Suomessa puunkasvu voi lisääntyä jopa 109 %. Tästä seuraa myös kasvava hakkuupotentiaali, joka kasvaa edellä mainitussa aikaikkunassa Etelä-Suomessa 56 % ja Pohjois-Suomessa 168 %. Pohjois-Suomen merkittävästä prosentuaalisesta hakkuupotentiaalin kasvusta huolimatta, absoluuttinen hakkuupotentiaali säilyy Etelä-Suomessa ($5\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{v}^{-1}$) olennaisesti suurempana kuin Pohjois-Suomessa ($3\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{v}^{-1}$). Olosuhteiden muuttuessa metsäkuusi väistyy männyn tieltä ja koivu tulee valtaamaan alueita, joita nyt peittävät pääsääntöisesti männyt. Koko maassa männyn prosentuaalinen osuus tulee kasvamaan 47 %:sta 68 %:iin, koivun osuus kasvaa 10 %:sta 20 %:iin ja kuusen osuus laskee 43 %:sta vain 12 %:iin. Nämä muutokset tapahtuvat arviolta aikajaksolla 2070–2099 verrattuna aikajaksoon 1961–1990. (Kellomäki ym., 2005; Kellomäki ym., 2008.)

Koska elävän biomassan määrä tulee kasvamaan näin merkittävästi, on sillä vaikutusta myös metsien hiilensidontaan. Hiilensidonta tehostuu prosentuaalisesti enemmän Pohjois-Suomessa kuin Etelä-Suomessa, johtuen tehostuneemmasta kasvusta. Koko maassa hiiltä ennustetaan sitoutuvan 30 % enemmän vuosina 2070–2099 kuin vuosina 1961–1990. (Kellomäki ym., 2008.)

Ilmastonmuutoksella on näiden puuston kasvun kannalta positiivisten seurausten lisäksi myös negatiivisia vaikutuksia. Roudan keston lyhentyessä kovien tuulien aiheuttamat tuulituhot tulevat yleistymään. Kesäaikana kuivuus ja pitkät hellejaksot voivat lisätä metsäpalojen määrää. Lämpötilojen vaihtelun äärevöitymisellä voi olla myös odottamattomia vaikutuksia ravinnetasapainoihin, mikä voi johtaa puuston kunnan heikkenemiseen ja altistamiseen muille tuhoille. Kesien kuivuus ja talvien

kosteus tulevat yleisesti lisäämään metsätautien ilmaantuvuutta. Myös osa hyönteisistä hyötyy ilmastonmuutoksen tuomista sääolosuhteista, jolloin hyönteistuhojen riski kasvaa. (Asikainen ym., 2012.)

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi fossiilisten polttoaineiden käyttämisestä halutaan enenevässä määrin siirtyä kasvattamaan bioenergian käyttöä. Bioenergiaa saadaan hyödyntämällä biopolttoaineita, joita saadaan kasvattamalla biomassaa metsissä, soilla ja pelloilla. Suomen uusiutuvien energian lähteistä yli 80 % tulee bioenergiasta. Yli 30 % koko maan energiankulutuksesta tuotetaan jo nyt biopolttoaineilla. Biomassasta ja jätteestä tuotetun energian käytön arvioidaan kasvavan jopa 77 % vuosien 2008 ja 2030 välillä. Suomessa metsäteollisuus laajentaa energiantuotantoa nestemäisiin biopolttoaineisiin ja kehittää uusia teknologioita bioenergian tuottamiseksi. Kuviossa 1 on esitetty Suomen energian kokonaiskulutuksen prosentuaaliset osuudet energialähteittäin vuonna 2019. (Asikainen ym., 2012; Bioenergia, 2020.)



Kuvio 1. Suomen energian kokonaiskulutuksen prosentuaaliset osuudet energialähteittäin vuonna 2019. Mukailten Suomen virallinen tilasto (SVT), 2020.

Samaan aikaan kun biomassojen energiakäyttöä halutaan lisätä, halutaan metsien hiilinieluja hyödyntää hiilidioksidin sitomiseen. Hiilinielujen oleellinen rooli ilmastonmuutoksen hillinnässä tiedostetaan ja siksi EU vaatii asetuksin jäsenmaitaan ylläpitämään ja vahvistamaan hiilinielujaan (Maa- ja metsätalousministeriö, 2020c).

Metsäpolitiikan avulla pyritään ohjaamaan metsänkäyttöä siten, että ristiriitaiset tavoitteet toisaalta suojelun ja hiilinielujen lisäämisestä ja toisaalta puuntuotannon lisäämisestä teollisuudelle ja energiantuotantoon voitaisiin saavuttaa tasapainoisella tavalla (Luonnonvarakeskus, 2016c).

2.2 Metsien hyödyntäminen ja metsäteollisuuden merkitys Suomelle

Suomen pinta-alasta jopa 73 % on metsämaata. Metsätaloustuotantoon soveltuvaa pinta-alaa on noin 20,3 miljoonaa hehtaaria, josta noin 60 % on yksityisessä, 25 % valtion, 10 % yritysten ja loput noin 5 % kuntien, seurakuntien, säätiöiden ja yhteismetsien omistuksessa. Tällä alueella kasvaa noin 2,4 miljardia kuutiometriä puuta. Puuston tilavuus on noin 143 kuutiometriä hehtaarilla Etelä-Suomessa ja 87 kuutiometriä hehtaarilla Pohjois-Suomessa. Vaikka Suomessa on noin 30 kotoperäistä puulajiketta, noin 97 % metsien puustosta on mäntyä, kuusta, ja koivua. Suurin osa metsistä on useamman lajin sekametsiä. (Ministry of Agriculture and Forestry, Natural Resources Institute Finland, 2019.)

Jo esiteolliselta ajalta lähtien Suomessa on huomattavissa määrin hyödynnetty puutavaraa lämmitykseen, ruoanvalmistukseen, rakentamiseen ja kaskeamiseen. Tervanpoltto ja metalliteollisuuden ruukkien puuntarpeet nostivat puuntuotannon massateolliselle tasolle (Ministry of Agriculture and Forestry, Natural Resources Institute Finland, 2019). Sahateollisuuden laajeneminen 1700-luvulta lähtien kasvatti järeän tukkipuun kysyntää ja vasta 1900-luvulla kemiallisen puunjalostusteollisuuden kasvun myötä pienikokoinen kuitupuun on nostanut kaupallista arvoaan (Kasanen, 2011).

Vuonna 2018 raakapuuta käytettiin 74 miljoonaa kuutiometriä, jonka lisäksi sahaketta ja purua kului noin 10 miljoonaa kuutiometriä. Tästä 64 miljoonaa kuutiometriä oli suomalaista raakapuuta, josta 35 miljoonaa kuutiometriä meni selluteollisuuden käyttöön ja 27 miljoonaa kuutiometriä sahateteollisuuteen (Puuinfo, 2020). Puunjalostuksen sivuvirrat ohjataan sellu- ja paperitehtailta kemikaalien valmistukseen ja energian tuotantoon. Puun käyttökohteita 2020-luvulla ovat paperin ja sahatavaran lisäksi kankaat, lääkkeet, kemikaalit, elintarvikkeet, rehut, muovit,

kosmetiikka, pakkausmateriaalit ja biopolttoaineet. (Maa- ja metsätalousministeriö, 2020a.)

Suomi on kokoonsa suhteutettuna metsäteollisuudesta riippuvaisin valtio koko maailmassa (Maa- ja metsätalousministeriö, 2020a). Vuonna 2018 metsäteollisuuden ulkomaankauppa oli arvoltaan 13,17 miljardia euroa. Tämä on 21% Suomen koko 64 miljardin euron tavaraviennistä. Tärkeimpiä metsäteollisuuden vientituotteita ovat paperi, kartonki sekä massa. Viennin tärkeimpiä kohdemaita ovat Saksa, Kiina ja Britannia. Metsäteollisuustuotteita tuotiin vuonna 2018 pääasiassa Ruotsista, Virosta ja Brasiliasta ja yhteensä 1,59 miljardin euron arvosta. Tärkeimpiä tuontiartikkeleita olivat kartonki, huonekalut ja valkaistu sulfaattisellu. (Luonnonvarakeskus, 2019.)

Vuonna 2014 metsäsektorin suora verokertymä oli yhteensä 1920 miljoonaa euroa ja epäsuora verokertymä 1940 miljoonaa euroa. Suora ja epäsuora verokertymä olivat yhteensä siis 3860 miljoonaa euroa. Metsäsektori työllisti vuonna 2014 suorasti ja epäsuorasti yhteensä noin 138 700 henkeä, mikä oli 5,5 % kaikista 2,5 miljardista työllisestä. (Ernst & Young Oy, 2017).

Metsäteollisuuden merkitys Suomen taloudelle on ollut ja on edelleen merkittävä, ja vuonna 2018 metsäteollisuuden viennin arvo oli kaikkien aikojen korkein (Metsäteollisuus, 2018). On kuitenkin epävarmaa mihin suuntaan alan merkitys kehittyy tulevaisuudessa. Alalla on näkyvissä monia positiivisia muutosvoimia kuten digitalisaatio, ilmastonmuutos, kaupungistuminen ja väestönkasvu. Digitalisaation avulla metsäsektorilla on mahdollisuus kehittää toimialaa tehokkaammaksi ja luoda uusia innovaatioita. Ilmastonmuutos kiihdyttää metsien kasvua ja kaupungistuminen sekä väestönkasvu kiihdyttävät puutuotteiden kysyntää. Metsäteollisuuden merkitys taloudessa voi lisäksi korostua, mikäli puutuotteiden jalostusastetta pystytään nostamaan korkeammaksi. Uusia korkean jalostusasteen tuotteita ovat esimerkiksi kemiallisen metsäteollisuuden tuotteet elintarvike-, lääke-, kosmetiikka- sekä tekstiiliteollisuuteen. (TEM, 2018.)

Samanaikaisesti, kun puunkäytön lisäämisen paineet ja mahdollisuudet kasvavat, voimistuu edelleen muiden kuin puuntuotannollisten tavoitteiden merkitys päätöksenteossa. Metsiä halutaan enenevässä määrin hyödyntää myös matkailu- ja

virkestystoiminnassa ja luonnonsuojelun merkitys korostuu. Huoli ilmastonmuutoksesta tulee näkymään metsäteollisuudessa poliittisena ohjauksena ja vaatimuksena ottaa metsäluonto paremmin huomioon metsänhoidon käytännöissä. Samalla kun digitalisaatio luo alalle mahdollisuuksia, se myös voimakkaasti heikentää sanomalehti-, kirjoitus- ja painopapereiden kysyntää. (Niskanen ym., 2008.)

Tulevaisuudessa alan mahdollisuuksia luovat kiertotalous, biotalous, myönteinen ilmapiiri puun hyödyntämiselle, innovatiivinen tuotekehitys ja globaalit markkinat. Uhkakuvia kuitenkin luovat heikentynyt kilpailukyky ja kannattavuus, Suomen logistisesti kaukainen sijainti maailmanmarkkinoista, kauppasotien ja pandemioiden vaikutukset vientiin sekä rakentamisen nopeasti muuttuvat suhdanteet. (TEM, 2018.)

3 METSÄNHOITOMENETELMÄT

3.1 Metsänhoitomenetelmien tavoitteet

Metsienhoitomenetelmiä on kehitetty metsän luontaisen kehityksen sekä ihmisten toimien vaikutusten arvioinnin perusteella. Yhteiskunnassa vallitsevat metsiin ja metsänhoitoon liittyvät näkemykset ja arvot määrittävät hyväksyttävät ja suositeltavat metsänhoidolliset toimenpiteet. Sovellettavat menetelmät heijastavat oman aikansa yhteiskunnallisia ja taloudellisia päämääriä ja niinpä nykyisetkin hyvinä pidettävät menetelmät saattavat näyttäytyä virheellisinä ja haitallisina tulevaisuudessa, mikäli arvot ja päämäärät muuttuvat. Peruseriaatteena kautta aikain on kuitenkin ollut puuntuotannon turvaaminen, jonka alaisuuteen tai rinnalle on tunnistettu myös muita päämääriä. (Parviainen & Seppänen, 1994).

Parviainen ja Seppänen (1994) tunnistavat 1900-luvulla olleen kuusi erilaista metsänhoitomenetelmien aikakautta. Vuosisadan alussa 50–75 % maamme metsäalasta oli kaskiviljelyn piirissä ja kaskitalouden jälkeen metsät olivat nuoria ja lehtipuuvaltaisia. Sahapuun kysynnän vuoksi määrämittaharsinta oli yleisin hakkuumenetelmä metsiköissä, joita ei ollut kaskettu. 1910–1920-luvuilla Saksasta saapui uusia metsänhoidollisia aatteita, harsinta korvattiin uudistamishakkuilla ja siirryttiin jaksottaiseen metsikkötalouteen. Vuonna 1928 yksityismetsälaki kielsi metsän hakkaamisen paljaaksi ja velvoitti metsän uudistumisesta huolehtimiseen. 1920–1930-luvuilla julkaistiin tutkimuksia, joissa korostettiin määrämittaharsinnan haitallisia vaikutuksia metsikön biologiseen ja geneettiseen rakenteeseen sekä puuntuotantokyvyn heikkenemiseen. Lisäksi painotettiin metsien luontaisen kehitykseen perustuvaa luonnonmukaista käsittelyä, jossa hyödynnettiin alaharvennuksia ja uudistaminen tapahtui luontaisesti.

1950-luvulla sotakorvausten ajamana pyrittiin tehostamaan ja laajentamaan metsäteollisuutta. Puunkorjuussa alettiin hyödyntämään traktoria ja hoitomenetelmiin tehtiin teknisiä parannuksia. Soita ryhdyttiin ojittamaan, metsiä lannoittamaan ja maata muokkaamaan koneellisesti. Uudistuskypsät metsät avohakattiin paljaaksi ja uudistettiin viljelemällä puuntuotannon maksimoimiseksi. 1970–1980-luvuilla intensiivikausi metsätaloudessa kääntyi laskuun jatkuvasti nousevien metsänhoidon

kustannusten, luonnonsuojelijoiden kritiikin sekä käytettyjen menetelmien epävarmojen seurausten vuoksi. Metsiin alettiin enenevissä määrin liittää muitakin kuin puuntuotannollisia arvoja ja arvojen toteutumista vaadittiin. Metsiltä haluttiin virkistäytymis-, poronhoito- ja metsästysmahdollisuuksia, marjoja, sieniä ja jäkälää. Lisäksi haluttiin suojella metsää ja säilyttää luonnontilaisia alueita. Herättiin myös ilmansaasteiden aiheuttamiin vaikutuksiin metsien terveyteen ja ryhdyttiin suosimaan terveyslannoituksia, sekametsärakennetta, sekä metsän yli-ikäisyyden ja liiallisen tiheyden välttämistä. Viimeisenä 1900-luvun aikakautena 1990-luvulla metsätalouskeskustelu kansainvälistyi voimakkaasti. Kansainvälisiä sopimuksia allekirjoitettiin metsien monimuotoisuuden ja ekologisen kestävyuden turvaamiseksi. (Parviainen & Seppänen, 1994.)

Niskasen ym. (2008) mukaan 2000-luvulla metsäteollisuuden keskittyneisyys aikakauslehtipaperituotantoon osoitti alan haavoittuvuuden ja tuotantokapasiteettia karsittiin voimakkaasti. Tehtaiden sulkeminen ja alan taloudelliset vaikeudet tulivat yllätyksenä jopa monille metsäsektorin tutkijoille ja analyytikoille, sillä yhtäaikaaisesti tapahtui monia alaan vaikuttavia tapahtumia kuten Yhdysvaltain dollarin heikkeneminen, heikentynyt paperin kysynnän kasvu lännessä, Aasian paperituotannon kapasiteetin nopea kasvu, Venäjän asettamat puutullit ja huippusuhdanteessa asetettuihin pääoman tuottovaatimukseen tarrautuminen (Niskanen ym., 2008). Kasanen (2011) mukaan vuonna 2008 alkanut taantuma pakotti metsäteollisuuden kiihtyvään rakennemuutokseen ja Maa- ja metsätalousministeriön Kansallinen metsäohjelma 2015 jouduttiin uudistamaan alalla tapahtuneiden suurten muutosten vuoksi. Uudessa ohjelmassa painotettiin puuvarojen kasvattamisen sijaan taloudellista ja ekologista kannattavuutta, metsäteollisuuden kilpailukykyisyyttä, uusien tuotteiden ja palveluiden tutkimista ja kehittämistä, sekä puuenergian käytön lisäämistä (Kansallinen metsäohjelma 2015, 2008).

2010-luvulla suomalaisten luontosuhde kehittyi edelleen enemmän metsien moninaisten palveluiden kuten virkistyskäytön ja kulttuuriarvojen arvostamiseen (Kansallinen metsästrategia 2025, 2015). Muuttuneet tavoitteet näkyivät myös uudistuneessa metsälaisissa, joka astui voimaan 1.1.2014. Lain muutoksen myötä metsänomistajien mahdollisuudet toteuttaa tavoitteidensa mukaista metsätaloutta laajeni avaramman metsänhoitomenetelmien kirjon tullessa lailliseksi (Koistinen ym.,

2017). Ympäristötietoisuuden lisääntyminen kasvattaa puun suosiota uudistuvana materiaalina ja väestön kasvu lisää uusiutuvan energian tuottamiseen tarvittavan raaka-aineen kysyntää. Kansallisen metsästrategian 2025 tavoitteena onkin kasvattaa hakkuita 65 miljoonasta kuutiometrillä 80 miljoonaan kuutiometriin pyrkien samalla parempaan metsäluonnon monimuotoisuuteen ja metsien sosiaalisesti ja ekologisesti kestävään käyttöön.

Samaan aikaan aletaan laajemmin tarkastella metsänkäyttöä kolmitahoisen kehikon läpi. Tässä suuntauksessa metsää tarkastellaan yhtäaikaaisesti kokonaisuutena ekologisen, taloudellisen ja sosiaalisen kestävyuden näkökulmista. Metsänhoitomenetelmät nousevat puheenaiheeksi valtamediaan suomalaisten ympäristöjärjestöjen aloittaman Avohakkuut historiaan! -kampanjan ja virallisen Lakialoite avohakkuiden lopettamiseksi valtion mailla – kansalaisaloitteen myötä. Vaatimuksena on siis luopua avohakkuista valtion metsissä ja siirtyminen jatkuvan kasvatuksen menetelmään ilmastonmuutoksen torjumiseksi, eläinten elinympäristöjen ja vesistöjen puhtauden suojelemiseksi, sekä alueiden soveltuvuuden virkistyskäyttöön takaamiseksi. Aloitteen on allekirjoittanut yli 62 000 suomalaista ja se on jätetty eduskunnan käsiteltäväksi 22.10.2019. (Suomen luonnonsuojeluliitto, 2019; Hannonen, 2020.)

2010-luvun loppupuolella kansainvälinen kysyntä ja biotaloutta suosiva politiikka saavat metsäteollisuuden suunnittelemaan useita uusia investointikohteita. Näitä hahmoteltuja suuria hankkeita ovat ainakin Kemijärven Boreal Bioref sellutehdas, Kemin Metsä Groupin sellutehdas ja Kaidin biopoltoainetehdas, sekä Paltamon Kaicellin sellutehdas. Näiden hankkeiden puuntarve olisi yhteensä noin 17 miljoonaa kuutiometriä vuodessa. Teoriassa tämä puumäärä voisi olla mahdollista tuottaa täysin Suomessa, mutta todennäköisesti osa tuotaisiin ulkomailta. Suurten hankkeiden rahoitus- ja lupaprosessit ovat kuitenkin pitkiä, eikä ole varmuutta mitkä hankkeista lopulta toteutuvat. (Hyytinen, 2019.)

Loppukädessä metsänomistaja on se, joka päättää millaisia tavoitteita metsäomaisuudelleen asettaa. Vallalla olevat käsitykset, trendit, poliittiset ohjeistukset ja suositukset, sekä tietenkin voimassa oleva metsälaki voivat vaikuttaa tähän päätökseen. Tärkeässä asemassa on kuitenkin metsänomistajan omat arvostukset

ja taloudelliset päämäärät. Omistaja voi asettaa metsänsä pääasialliseksi käyttötarkoitukseksi esimerkiksi puuntuotannon, taloudelliset tulot, metsien monikäytön, luonnon monimuotoisuuden tai maiseman säilyttämisen. Tavoitteet voivat olla myös yhdistelmä näitä kaikkia ja yksittäisellä metsäkohteella voi olla eri tavoin käsiteltyjä kuvioita. (Äijälä, 2019.)

3.2 Tasaikäinen ja jatkuvapeitteinen metsänkasvatus

Tasaikäinen kasvatus, tasaikäisrakenteisen metsän kasvatus ja jaksollinen kasvatus ovat termejä, joilla kuvataan metsänhoitomenetelmää, jossa metsä perustetaan kylväen, istuttamalla tai luontaisesti, sen jälkeen sen annetaan kasvaa, kunnes siihen tehdään taimikonhoitoja, nuoren metsän hoitoa sekä harvennushakkuuta. Kiertoajan lopuksi uudistuskypsään metsään tehdään päätehakkuu, joka voidaan tehdä erilaisin menetelmin riippuen jäljelle jätettävien puiden määrästä ja käyttötarkoituksesta. Metsä on uudistuskypsä, kun uudistamisen tuomat hyödyt ylittävät kasvatuksen jatkamisen tuomat hyödyt. Uudistamisella tavoitellaan, siis uutta hyväntuottoista puusukupolvea aiemman päätehakatun metsän tilalle (Luonnonvarakeskus, 2016b). Uudistusmenetelmiä ovat avohakkuu, siemenpuuhakkuu sekä suojuspuuhakkuu. *Avohakkuussa* voidaan joko kaataa kaikki alueen puut tai jättää 5–10 säästöpuuta. *Siemenpuuhakkuussa* nimensä mukaisesti jätetään hakattavalle alueelle siemenpuut, jotka siementävät seuraavan puusukupolven ja jotka sitten uuden taimikon kasvettua korjataan pois *ylispuuhakkuuksi* kutsutussa toimenpiteessä. Siemenpuita jätetään suositusten mukaan noin 50–150 per hehtaari. *Suojuspuuhakkuuta* hyödynnetään varjoisissa oloissa menestyvien lajien metsissä. Menetelmässä jätetään 200–400 suojuspuuta tarjoamaan varjoa uusille taimille. (Äijälä, 2019; Suomen Metsäyhdistys, 2019.)

Tasaikäisen metsänhoidon harvennusmenetelmä on *ala- ja yläharvennus*. Alaharvennuksessa poistetaan vialliset ja sairaat puut, valtapuita pienemmät puut, sekä mutkaiset, paksuksaiset ja tukkiosaltaan haaroittuneet valtapuut. Tämä edistää hyvälaatuisen puuston kasvua ja nopeuttaa järeytymistä. Yläharvennuksessa metsästä kaadetaan suurimpia puita sekä heikompia pieniä puita, mikä tasoittaa jäljelle jäävän puuston kokoeroja ja yhtenäistää siten päätehakkuusta saatavan puutavaran laatua. (Valkonen, 2017; Äijälä, 2019.)

Jatkuva metsänkasvatus on puolestaan metsänhoitomenetelmä, jossa puustoa on metsässä jatkuvasti, eikä sitä avohakata missään vaiheessa. Metsäala siis näyttää metsältä koko ajan eikä muutu hakkuiden myötä avoimeksi hakkuuaukioksi. Jatkuvan kasvatuksen erilaiset menetelmät ovat olleet lailla kiellettyjä vuodesta 1927 lähtien vuoden 2014 alkuun saakka, jolloin metsälain muutokset astuivat voimaan. Uusien menetelmien on tarkoitus täydentää metsänhoitoperiaatteiden valikoimaa, eikä syrjäyttää vanhoja. Koska uusia menetelmiä ei ole ehditty vielä laajasti tutkimaan tai tarkastelemaan erilaisissa olosuhteissa, myöskään termistö ei ole ehtinyt vakiintua, mutta muutamia virallisia laissakin käytettyjä termejä on jo olemassa. (Valkonen, 2017.)

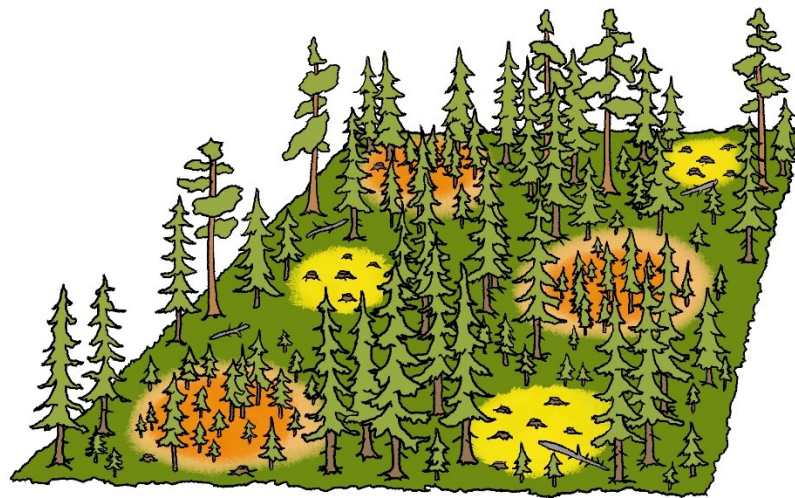
Jatkovaa kasvatusta ovat esimerkiksi *peitteinen metsänkasvatus* ja *avohakkuuton metsänkasvatus*. Näissä menetelmissä metsälössä kasvaa aina jonkin verran puita, eli maata ei koskaan hakata täysin puuttomaksi. Peitteisyys voi olla erittäin harvaa, jolloin pystyyn jätetään ainoastaan siemen- tai suojuspuusto, joka siementää ja suojaa seuraavan puusukupolven. Peitteisyys voi olla myös hyvin tiheää, jolloin metsälöistä tehdään vain valikoituja poimintahakkuita. (Valkonen, 2017).

Eri-ikäisrakenteinen metsänkasvatus, *eri-ikäisrakenteisen metsän kasvatus* ja *metsän erirakenteiskasvatus* sekä *jatkuva kasvatus* ovat yleistermejä, jotka tarkoittavat kaikki suunnilleen samaa eli metsänkasvatusperiaatetta, jossa ei hyödynnetä avohakkuuta. *Eri-ikäiskasvatuksessa* metsässä annetaan kasvaa eri-ikäisiä ja -kokoisia puita, ja poimintahakkuissa pyritään poistamaan hyväkuntoisia suuria sekä sairaita puita ja jättämään pienempiä, hyväkuntoisia vielä kasvamaan. Hakkuun jälkeen pienien puiden kasvu kiihtyy ja metsä tihenee. (Valkonen, 2017.)

Eri-ikäisrakenteisessa metsänkasvatuksessa käytettävä hakkuumenetelmä on *poimintahakkuu*, joka on myös virallinen laissa käytetty termi. Menetelmässä poistetaan metsän suurimpia puita, jolloin pienemmille puille syntyy uutta kasvutilaa. Myös taimettumisesta huolehditaan jättämällä suuria, hyvälaatuisia puita siemenpuiksi. Sairaata ja huonokuntoiset puut poistetaan koosta riippumatta ja liian tiheet ryhmittymät harvennetaan. (Äijälä ym., 2019.)

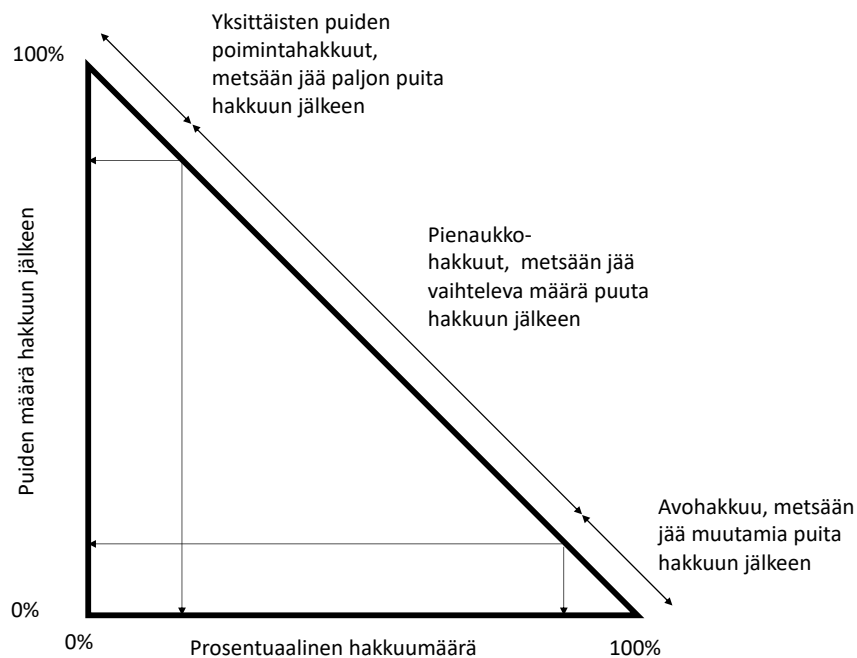
Pienaukkohakkuumenetelmässä metsään hakataan pieniä avohakkuuaukkoja, joihin kasvaa uusi puusto aukon reunapuiden siementämänä. Kun aukko on taimettunut, voidaan seuraavaksi hakata uusi aukko edellisten viereen tai laajentaa aikaisempia aukkoja. Menetelmää selventää kuvio 2. Metsälaissa on määrätty, että alle 0,3 hehtaarin kokoisia pienhakkuuaukkoja ei tarvitse istuttamalla uudistaa, vaan ne katsotaan osaksi erirakenteiskasvatusta ja ne voidaan jättää taimettumaan luonnollisesti. (Valkonen, 2017.)

Pienaukkohakkuun hyödyntäminen ainoana menetelmänä voi kuitenkin olla haasteellista, sillä tuulituhoriski kasvaa merkittävästi, mikäli jäljelle jääneet puut ovat kasvaneet tiheässä eivätkä ole tottuneet tuuli- tai lumirasitukseen. Menetelmä sopii kuitenkin hyvin korpikuusikoihin, joissa aukot taimettuvat tehokkaasti ja nopeasti. (Äijälä, 2019.)



Kuvio 2. Pienaukkohakkuumenetelmä. Keltaisella pohjalla vasta hakatut pienaukot ja tummanoranssilla pohjalla jo aiemmin tehdyt pienaukot, jotka ovat alkaneet uudistua aukon reunapuiden siementämänä. Vaaleanoranssi rengas tummemman ympärillä osoittaa, miten alkuperäistä pienaukkoa voidaan myöhemmin laajentaa. (Mukaiillen Äijälä, ym. 2019).

Harsinta ja *määrämittaharsinta* ovat negatiivisen maineen saaneita termejä, jotka kuvaavat hakkuumenetelmää, jossa metsästä hakataan kaikki parhaat ja arvokkaimmat, tiettyyn määrämittaan kasvaneet puut. Historiallisessa merkityksessä tällä on tarkoitettu myös sitä, että metsään jätetään vain heikot ja sairaat puut ja metsä jätetään uusiutumaan mitään hoitotoimenpiteitä tekemättä. Menetelmää on kutsuttu myös ”metsän saalistamiseksi”. Toiminta tähtää nopeisiin voittoihin, eikä pitkäaikaissuunnitelmia tulevaisuuden metsälön laadun takaamiseksi tehdä. Uutena terminä esiintyy kuitenkin *metsänhoidollinen harsinta*, jolla tarkoitetaan eri-ikäiskasvatuksen hakkuutapaa. (Valkonen, 2017.)



Kuvio 3. Metsänhoitomenetelmien moninaisuus hakattujen puiden ja jäljelle jäävien puiden näkökulmasta (mukaillen Kuuluvainen ym., 2012, s. 722).

Kuviossa 3 havainnollistetaan erilaisten metsänhoitomallien moninaisuutta ja korostetaan, että menetelmiä ei ole vain kahta: jatkuvapeitteinen ja vastakohtana jaksollinen kasvatusmenetelmä. Nämä kaksi mainittua menetelmää ovat vain asteikon ääripäät ja väliin jää laaja kirjo erilaisia menetelmiä, joissa hakkuumäärät ja hakkuun jälkeen jäljelle jäävän puustopeitteen määrä vaihtelee. Metsänpeite on näissä menetelmissä enemmän tai vähemmän jatkuvaa ja hakkuut tehdään pienaukkoina tai suurempina aukkoina, jotta uusilla taimilla olisi tilaa kasvaa. Kun jatkuvapeitteinen

kasvattaminen määritellään laajasti, voidaan käsitteen alle katsoa kuuluvan myös nämä ääripäiden väliin jäävät menetelmät. (Kuuluvainen ym., 2012.)

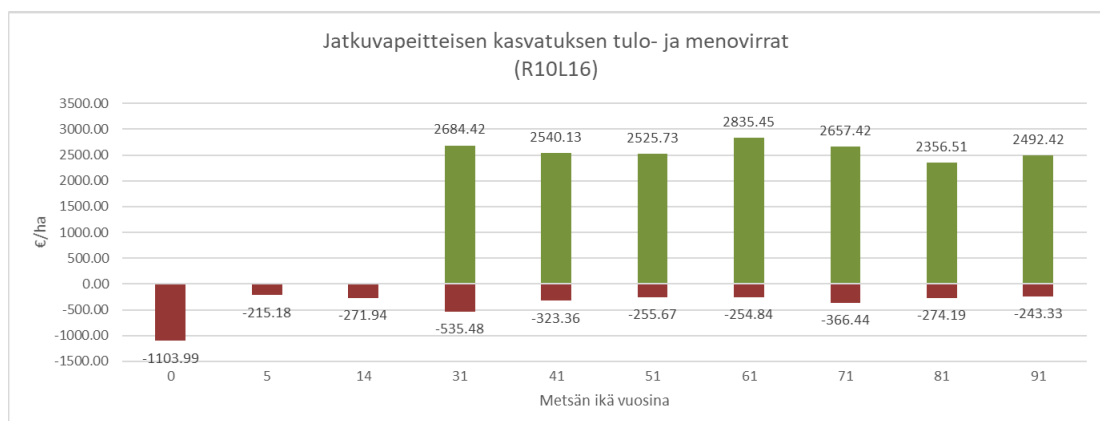
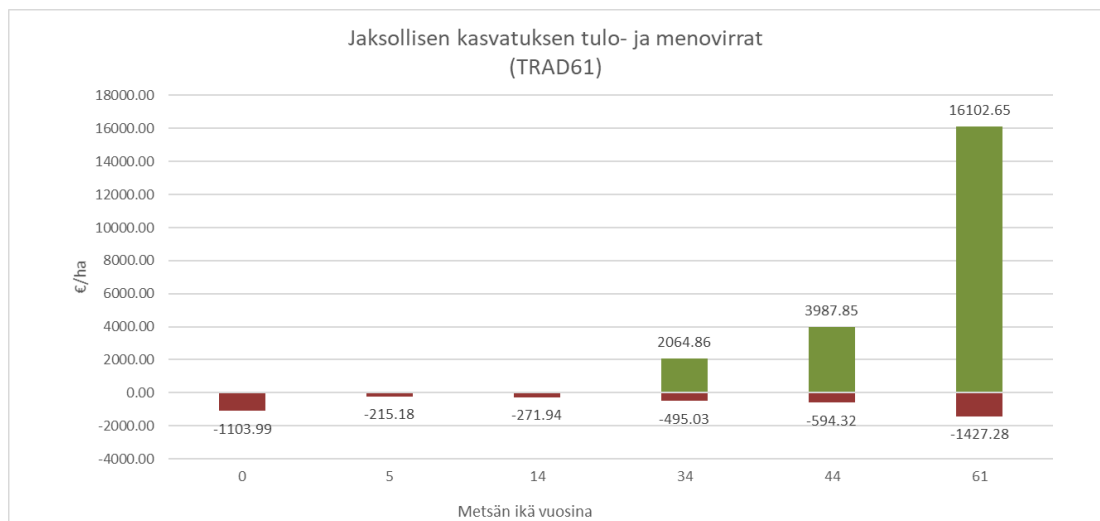
3.3 Eri metsänhoitomenetelmien taloudellinen kannattavuus

Jaksollista metsänhoitomenetelmää on tutkittu taloudellisesta näkökulmasta laajasti ja jaksollista kasvua kuvaavia malleja on kehitetty jo pitkään. Näissä malleissa pyritään tyypillisesti maksimoimaan puun myynnistä saatavien tulojen nettonykyarvo optimoimalla metsän uudistaminen, hakkuiden määrä, tapa ja ajoitus, sekä kasvatusjakson kiertoajan pituus (Tahvonen & Rämö, 2016a). Mallit perustuvat pitkälti Faustmannin kiertoaikamalliin, jonka tavoitteena on maksimoida puuntuotannon taloudellinen nettotuotto laskemalla optimaalinen kasvatusjakson kiertoaika. Ei ole kuitenkaan varmuutta siitä, että jaksollinen metsänhoito tuottaa taloudellisesti parhaan tuloksen verrattuna muihin menetelmiin. Tämän vuoksi on alettu kehittää uusia malleja, joita ei ole rajoitettu tuottamaan vain jaksollisen menetelmän mukaisia tuloksia. Näissä malleissa optimitilanteen tulokseksi voi tulla myös ikuisuuteen jatkuvat harvennukset ilman päätehakkuuta, eli toisin sanoen jatkuvan metsänkasvatuksen menetelmä. Uusilla malleilla pyritään vastaamaan myös vaatimukseen ottaa huomioon luonnon monimuotoisuuden ylläpitäminen, metsien häviäminen ja hävittäminen, sekä ilmastonmuutoksen aiheuttamat riskit. (Tahvonen, 2015b.)

Kuvio 4 havainnollistaa jaksollisen ja jatkuvapeitteisen metsänhoidon tulo- ja menovirtojen eroavuuksia. Kuvioista näkee kuinka jaksollisessa metsänhoidon menetelmässä tulot painottuvat voimakkaasti päätehakkuuseen. Suurin osa pääomasta on sitoutuneena tukkipuihin, jotka pääosin kaadetaan vasta uudishakkuussa. Päätehakkuun jälkeen täytyy Metsälain 2. luvun 8. §:n nojalla teettää luonnollinen tai keinollinen uudistaminen eli uusien taimien istutus tai kylvö. Alueella on oltava uusi taimikko 10-25 vuoden kuluessa puunkorjuun päättymisestä. Lisäksi on huolehdittava täydennysistutuksista ja muista jälkitöistä. Näistä töistä syntyy ainoastaan kuluja. Kun metsä on kasvanut ensiharvennusikään, tehdään nimen mukaisesti ensimmäinen harvennus nuoreen metsään ja toimenpiteestä syntyy kustannuksia, mutta mahdollisesti myös hieman tuloja pienikokoisen energia- ja kuitupuun myynnistä. Ensiharvennusta seuraavissakin harvennuksissa kuitupuun osuus on suuri suhteessa

tukkipuuhun, jolloin tulot jäävät pieniksi. (Äijälä ym., 2019, Metsälaki 12.12.1996/1093.)

Jatkuvapeitteisen metsänhoidon menetelmässä tulo- ja menovirrat ovat paljon tasaisemmat. Hakkuissa kaadetaan pääasiassa suurikokoisia ja arvokkaita tukkipuita, mutta myös pienempiä energia- ja kuitupuuksi soveltuvia yksilöitä. Jatkuvapeitteisessä menetelmässä voidaan hyödyntää luonnollista uudistumista, jolloin siinä ei synny kustannuksia uusien taimien istuttamisesta vaan jäljelle jäävät puut siementävät uudet taimet. Tulevien harvennusten onnistuminen taloudellisesti, laadullisesti ja määrällisesti riippuu oleellisesti luonnollisen uudistumisen onnistumisesta ja uusien taimien kasvusta. (Äijälä ym., 2019.)



Kuvio 4. Jaksollisen ja jatkuvapeitteisen metsänhoidon tulovirtojen vertailu nuoressa kasvatusmetsikössä.

Esimerkkikuvio 5 havainnollistaa jaksollisen ja jatkuvan metsänkasvatuksen menetelmien taloudellisen kannattavuuden vertailun riippuvuutta erilaisista tekijöistä. Ensinnäkin, mikäli metsän uudistuskustannukset eli puiden istuttamisen tai kylvön kustannukset ovat korkeat, on luontainen uudistaminen ja jatkuvapeitteinen kasvatus silloin kannattavampaa (Tahvonen & Rämö, 2016a). Jos uudistamiskustannukset ovat matalat kääntyy tilanne jaksollisen kasvattamisen eduksi.

Myös käytettävä diskonttokorko eli laskennallinen tekijä, joka muuntaa korkokannan avulla tulevaisuudessa saatavat tulot nykyhetken arvoonsa, vaikuttaa metsänhoitomallin kannattavuuteen (Tahvonen & Rämö, 2016a; Juutinen ym., 2018a). Tahvosen ja Rämön (2016) tekemien laskelmien mukaan 1 % diskonttokorolla tasaikäinen kasvatus on kannattavampaa kasvupaikan laadusta riippumatta, kun istutuskustannukset ovat 0–1000 €, 2 % diskonttokorolla tasaikäinen kasvatus on kannattavampaa kaikilla kasvupaikoilla ainoastaan, kun istutuskustannukset ovat 0€. Jatkuvapeitteinen kasvatus on kannattavampaa kaikilla kasvupaikoilla, kun korkokanta on 3–4 % ja istutuskustannukset ovat 500–2000 €. Näiden tulosten valossa vain diskonttokorko huomioon ottaen, 2 % korkeammalla diskonttokorolla jatkuvapeitteinen metsänkasvatus kääntyy tasaikäistä metsänkasvatusta kannattavammaksi. (Tahvonen & Rämö, 2016a.)

Kasvupaikan laatu on määritelty puiden kasvunopeuden mukaan eri alueilla. Heikkolaatuisella alueella puut siis kasvavat vähemmän pituutta samassa ajassa kuin keskimääräisellä tai hyvälaatuisella kasvupaikalla. Tahvosen ja Rämön (2016a) saamien tulosten mukaan näyttäisi siltä, että hyvällä kasvupaikalla tasaikäinen kasvatus on kannattavampaa kuin jatkuvapeitteinen kasvatus, myös korkeilla diskonttokoroilla ja korkeammilla istutuskustannuksilla kuin heikkotasoisella tai keskimääräisellä kasvupaikalla. Jatkuvapeitteinen kasvatus taas on kannattavampaa heikoilla ja keskimääräisillä kasvupaikoilla kun diskonttokorko on yli 2 %.

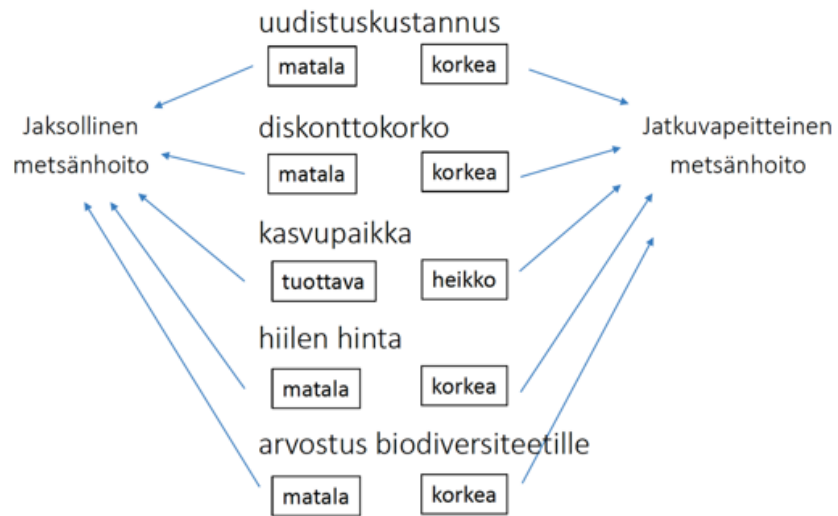
Mikäli metsien kykyä sitoa hiiltä halutaan tehokkaammin hyödyntää ilmastonmuutoksen torjunnassa, voitaisiin muodostaa hiilenkorvausmekanismi, jonka välityksellä metsänomistajalle maksettaisiin korvauksia hiilensidonnasta. Tällöin hiilensidonnan hinnalla voi olla oleellinen vaikutus jaksollisen ja jatkuvapeitteisen metsänhoitomuodon valitsemisen kannalta. Assmuth'n ja Tahvosen (2017) mukaan

hiilikorvausmekanismin käyttö pidentää optimaalista hakkuiden kiertoaikaa ja tekee jatkuvapeitteisestä metsänhoidosta jaksollista kannattavampaa.

Kun metsien biodiversiteettiä ja metsien monikäyttöisyyttä halutaan ylläpitää ja kasvattaa on metsänhoitomenetelmän valinnalla suuri merkitys tavoitteiden saavuttamisen kannalta, mutta myös taloudellisesta näkökulmasta. Peuran ym. (2018) saamien tulosten mukaan jatkuvapeitteinen metsänkasvatus menestyi paremmin hiilensidonnassa ja hiilenvarastoinnissa, mustikoiden kasvussa, maiseman koetussa kauneudessa, suurien puiden tuottamisessa sekä puuston nettohykyarvolla mitattuna. Lisäksi se tarjosi paremman elinalueen esimerkiksi lajeille kuten pikkutikalle, pohjantikalle, pyylle ja pyrstötiäiselle. Jaksollinen metsänkasvatusmenetelmä taas menestyi paremmin puolukan ja sienien, sekä hakattavan biomassan tuottamisessa. Lisäksi se tuotti elinalueita paremmin metsolle ja liito-oravalle. Vaikka jatkuvapeitteinen metsänkasvatus tarjoaa metsänhoitomenetelmänä mahdollisuuden metsien paremmalle monikäyttöisyydelle, se ei automaattisesti takaa korkeampaa monimuotoisuuden tasoa tai parempia ekosysteemipalveluita. (Peura ym., 2018.)

Jatkuvapeitteinen metsänkasvatus voi olla kannattavampaa pitkällä tähtäimellä, mutta metsän lähtötilanteella on oma vaikutuksensa siihen, milloin metsänhoitomuotoa kannattaa vaihtaa menetelmästä toiseen (Tahvonen & Rämö, 2016a; Juutinen ym., 2018a). Juutisen ym. (2018a) saamien tulosten mukaan muutos tasaikäisestä kasvatuksesta jatkuvapeitteiseen kasvatukseen oli kannattavaa silloin, kun metsässä oli lähtötilanteessa eri ikäisiä ja kokoisia puita. Tällainen metsä oli siis lähellä jatkuvapeitteisen metsän tasapainotilaa ja siirtymä olisi helppo menetelmästä toiseen. Tasaikäinen kasvatus oli suhteellisesti kannattavampaa säilyttää hoitomenetelmänä, kun lähtötilanteessa metsä oli juuri hakattu avomaa tai kasvuiältään nuori metsikkö.

Kumpi on kannattavampaa?



Kuvio 5. Jaksollisen ja jatkuvapeitteisen metsänhoidon kannattavuuden arviointi (lainattu seminaariesityksestä Assmuth 2020).

4 METSIEN HIILENSIDONTA

4.1 Metsien hiilinielut ja niihin liittyvät poliittiset tavoitteet

EU:n ilmastopolitiikassa metsät ja niiden kyky sitoa hiiltä esitetään tärkeänä keinona hillitä ilmastomuutosta (Asikainen, 2019). Metsät, maaperä ja meret ovat ainoita hiiltä sitovia mekanismeja, kunnes teollinen päästöjen sidonta kehittyy laajasti käytettäväksi keinoksi (Luonnonvarakeskus, 2016a; Ilmasto-opas, 2020). Puusto, kasvit, levät ja muu biomassa sitovat itseensä hiilidioksidia osana yhteyttämistä. Metsiin ja maaperään varastoitunutta hiilimäärää kutsutaan hiilivarastoksi. Kun hiilivarasto kasvaa ja hiiltä sitoutuu metsiin entistä enemmän, voidaan metsiä kutsua hiilinieluiksi. Jos taas hiiltä vapautuu enemmän kuin sitä sitoutuu, toimii metsä silloin hiilidioksidin ja metaanin lähteenä. Metsät voivat siis olla niiden käytöstä riippuen joko hiilinieluja tai päästölähteitä. Kasvihuonekaasuinventariolla kuvataan hiilivaraston muutoksia eli hiilen sidonnan ja vapautumisen vaihtelua puustosta, kuolleista puista sekä maaperästä. Metsien hiilivarastoja ja -nielujen kasvattamista on tärkeää seurata, sillä metsiä hävitetään jatkuvasti maatalous- ja rakennettujen alueiden laajetessa, jolloin metsät muuttuvat päästölähteiksi. (Seppälä, 2015; Maa- ja metsätalousministeriö, 2020c).

LULUCF-asetus (*land use, land use change and forestry*) eli maankäyttö-, maankäytön muutos ja metsätalous -sektoria määräävä Euroopan Unionin asetus (EU) 2018/841 määrittää hiilidioksidinielujen ja -päästöjen määrittelyperiaatteet ja kohtelun ilmastotavoitteiden yhteydessä seurantajaksolla vuosina 2021–2030. Seurantakauden aikana kyseiseltä sektorilta ei saa aiheuta laskennallisia päästöjä valtiollisella tasolla. Mikäli sektori kuitenkin aiheuttaa laskennallisen päästön, on aiheutuva päästö korvattava taakanjakosektorin toimilla tai hankkimalla LULUCF-yksiköitä toiselta EU-jäsenvaltiolta. Asetus ei siis sido yksittäisiä yrityksiä eikä metsänomistajia. (Maa- ja metsätalousministeriö, 2020b.)

Asetus vaatii jokaisen jäsenmaan laskemaan sektoriin kuuluville metsille, viljelysmaalle ja ruohikkoalueille vertailutasot, jotka määräytyvät tarkastelukauden 2000–2009 toteutuneiden metsänhoitoon liittyvien tunnuslukujen mukaisesti. Seurantajaksolla 2021–2030 metsänhoitokäytäntöjen oletetaan jatkuvan samalla

tavalla kuin tarkastelujaksolla 2000–2009. Asetuksella pyritään olemaan rajoittamatta metsien käytön tasoa liiallisesti, mutta samalla ylläpitämään ja vahvistamaan hiilinieluja.

Seurantajaksolla 2021–2030 tutkitaan hiilinielujen todellista kehitystä ja verrataan sitä tarkastelujaksolta laskettuun vertailutasoon. Mikäli nielut ovat kasvaneet vertailutasoa suuremmiksi saa siitä laskennallista hyötyä ilmastotavoitelaskentaan. Tämä laskennallinen nieluhyöty voi olla kuitenkin maksimissaan 3,5% valtion perusvuoden kokonaispäästöistä eli Suomen tapauksessa 2,5 Mt CO₂ vuosittain. Mikäli nielut ovat pienentyneet vertailutasoon nähden aiheutuu tästä laskennallinen päästö. Tässä päästölaskennassa käytetään kuitenkin lievennyksenä metsäjoustoa, joka lasketaan maakohtaisesti. Suomi voi hyödyntää seurantakaudella 44 miljoonan hiilidioksiditonin joustoa, eli hiilinielut voivat huveta jouston verran ennen kuin laskennallista päästöä katsotaan haitaksi valtion ilmastotavoitelaskennassa. (Maa- ja metsätalousministeriö, 2020b.)

Viimeisimmässä Luonnonvarakeskuksen tekemässä hiilinielujen vertailutasoraportissa vertailutasoksi Suomen hiilinielujen koolle ehdotetaan vertailukaudelle 2021–2025 kun puutuotteita ei oteta huomioon -21,16 miljoonaa tonnia CO₂ -ekvivalenttia, ja -27,64 miljoonaa tonnia CO₂ -ekvivalenttia, kun puutuotteet otetaan huomioon hiilivarastoa laskettaessa. Vertailukaudelle 2026–2030 vastaavat vertailutasot ovat -19,06 Mt CO₂ -ekv. sekä -26,07 Mt CO₂ -ekv. (Ministry of Agriculture and Forestry, Natural Resources Institute Finland, 2019.)

Nykyisillään Suomen metsät ovat merkittävä hiilinielu, sillä ne nielevät noin 40% Suomen vuotuisista kasvihuonepäästöistä (Luonnonvarakeskus, 2012). Luonnonvarakeskuksen 28.05.2020 julkaiseman uutisen mukaan vuodelta 2019 saadut ennakkotiedot osoittavat Suomen LULUCF-sektorin hiilinielun kasvaneen merkittävästi vuoteen 2018 verrattuna. Sektorin nielun laskettiin olevan -17,4 miljoonaa tonnia CO₂ -ekvivalenttia. Tämä kasvu johtui 8 %:n hakkuiden pienenemisestä vuoteen 2018 verrattuna. (Luonnonvarakeskus, 2020.)

Asikainen ym., (2012) mukaan hakkuista kokonaan pidättäytymällä voidaan metsissä varastoida maksimimäärä hiiltä. Tehokkaasta kasvusta ja vähäisestä kuolleisuudesta

huolimatta käsitellyissä metsissä hiilivarasto on aina pienempi. Luonnonvaraisten metsien lisääminen hiilivaraston kasvattamiseksi kasvattaa kuitenkin myös hyönteis- ja sienituhojen sekä metsäpalojen riskiä. Näiden riskien realisoituessa luonnonvaraisesta metsästä vapautuu käsiteltyä metsää enemmän hiiltä. Käsitellyissä metsissä puuston hiilen nettosidonta voi kuitenkin olla luonnonmetsiä suurempaa ja siten hiilivaraston ylläpitämiseksi onkin oleellista käyttää hakattu puusto esimerkiksi puurakentamisessa ja muissa käyttökohteissa, joissa hiili vapautuu hitaasti. Tällä voidaan kompensoida hoitamattomien metsien suurempaa kokonaishiilivarastoa.

Pääministeri Sanna Marinin hallitusohjelmassa on asetettu tavoitteeksi Suomen hiilineutraalisuus vuonna 2035 ja hiilinegatiivisuus pian sen jälkeen. Tämä tavoite pyritään saavuttamaan nopeuttamalla päästövähennystoimia ja vahvistamalla hiilinieluja (Valtioneuvosto, 2019). Suomen Ilmastopaneelin raportin *Päästövähennyspolku kohti hiilineutraalia Suomea – hahmotelma* mukaan tämä tavoite voidaan saavuttaa, mikäli vuoteen 2035 mennessä päästöt (pois lukien LULUCF-sektori) vähenevät 68 % vuoden 1990 päästötasoon nähden. Ilmastopaneelin esittämän skenaarion mukaan LULUCF-sektorin nettonielu vuonna 2035 voi olla -24,2 miljoonaa hiilidioksidiekvivalentti tonnia, jolloin hiilinielut ylittävät päästöt 1,1 miljoonalla hiilidioksidiekvivalentti tonnilla. Skenaarion toteutuminen vaatii kuitenkin lähtökohtaisesti, että kivihiilen käytöstä luovutaan vuoteen 2029 mennessä, turpeen energiakäytöstä ja fossiilisesta lämmitysöljystä luovutaan vuoteen 2035 mennessä, fossiilisten polttoaineiden käyttöä korvataan vähäpäästöisellä sähköllä ja että digitalisaatio ja kiertotalouden sovellukset tehostavat yhteiskunnan yleistä energiankäyttöä 20 %:lla vuosina 2016–2035. Lisäksi päästövähennystavoitteet asetetaan energiateollisuudelle, teollisuuden ja rakentamisen energiapäästöille, liikenteelle ja muulle polttoaineen käytölle, teollisuusprosesseille, maataloudelle ja jätteiden käsittelylle. Skenaariossa puuntuotannolle on asetettu hakkuutasot, jotka ovat vuosille 2015–2024 keskimäärin 77 miljoonaa kuutiometriä ja vuosille 2024–2034 keskimäärin 82 miljoonaa kuutiometriä. Näitä suuremmat hakkuut voivat merkittävästi vaikeuttaa hiilineutraalisuuden saavuttamista tavoitellussa ajassa. (Seppälä ym., 2019a.)

Ilmastoneutraalius eli ihmisperäisten päästöjen ja päästönielujen tasapaino ei riitä ilmaston keskimääräisen lämpötilanousun säilyttämiseksi alle kahden asteen vaan

tavoitteen saavuttaminen vaatii nettonegatiivisia päästöjä. YK:N ilmastopöytäkirjassa on määritelty oikeudenmukaisuusperiaate, jonka mukaan rikkaampien teollisuusmaiden tulee reagoida ilmastotoimilla tehokkaammin kuin köyhempien kehitysmaiden, ja siten Suomenkin tulee olla ilmastoasioissa edelläkävijä Euroopan Unioninkin sisällä. (Seppälä ym., 2019a.)

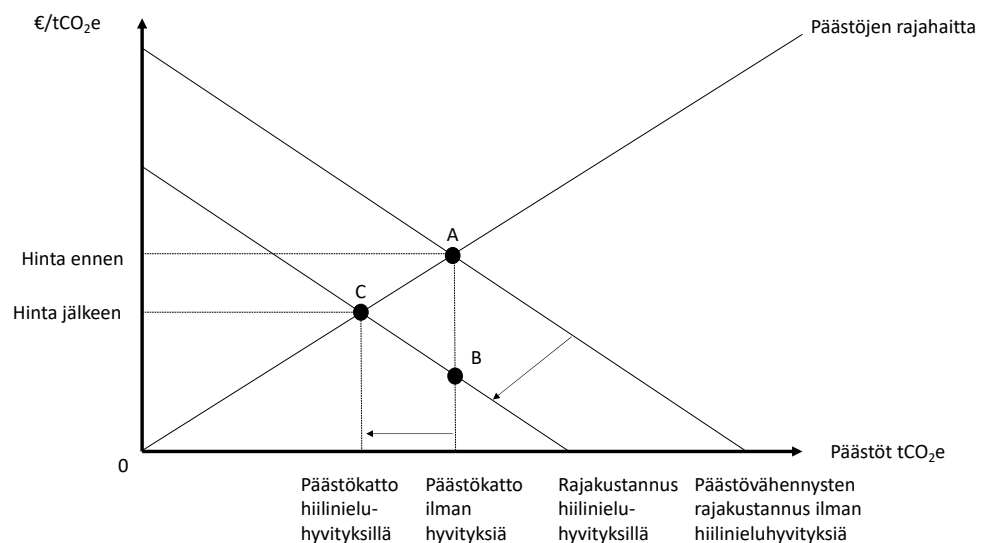
4.2 Hiilikorvausmekanismit

Hiilikorvausmekanismi on menetelmä, jossa metsänomistajille maksetaan hiilensidontapalveluiden tuottamisesta. Hiilikorvausmekanismin mahdollisia toteutustapoja on monia, mutta se voisi olla esimerkiksi osa EU:n päästöoikeusmarkkinoita samaan tapaan kuin Uudessa-Seelannissa (Nurmi & Ollikainen, 2019). Nykyisellään LULUCF-sektori on siis jätetty EU:n päästökaupasta pois, mutta se olisi hiilipörssin välityksellä mahdollista liittää osaksi päästöoikeusmarkkinaa. Päästöoikeusmarkkinoilla käydään kauppaa päästöoikeusyksiköillä, joita vastuussa oleva viranomainen on laskenut liikkeelle päästökaton rajoittaman määrän. Markkinoilla toimivilla tahoilla on erilaisia tarpeita päästöoikeuksille ja niinpä oikeuksista aletaan käydä kauppaa ja niille muodostuu hinta. Vastuussa oleva viranomainen vaatii tietyin väliajoin osoittamaan, että kaikilla toimijoilla on päästöjään vastaava määrä päästöoikeuksia. Päästöoikeusyksikkö oikeuttaa yhden hiilidioksidiekvivalenttitonnin päästöön ja oikeuksia voi käyttää esimerkiksi kansainvälisten sopimusten asettamien päästövähennystavoitteiden saavuttamiseen. Päästövähennyshyvitys voidaan myöntää yhden hiilidioksidiekvivalenttitonnin päästövähennyksestä, joka ylittää päästövähennysten perusuran. Hiilipörssissä hiilineluhyvitys toimisi päästövähennyshyvityksen tavoin. (Nurmi & Ollikainen, 2019.)

Teoreettisesta näkökulmasta yrityksille on edullisinta rajoittaa päästönsä tasolle, jolla päästövähennyksen rajakustannus on yhtä suuri kuin päästöoikeusyksikön markkinahinta. Yhteiskunnallisessa optimitilanteessa päästökaupan tasapainotilassa päästövähennyksen rajakustannus on yhtä suuri kuin päästöistä yhteiskunnalle koitua rajahaitta. Päästövähennyksillä on nouseva rajakustannuskäyrä, sillä oletettavasti yritykset tekevät helpot ja halvat päästövähennystoimet ennen vaikeita ja kalliita toimia. Tämän ajattelukaavan mukaan päästövähennykset halventuvat kaikilla

päästötasoilla, mikäli mukaan yhtälöön otetaan hiilipörssi, sillä hiilinielujen lisäämisessäkin voidaan hyödyntää ensin helpot ja halvat toimenpiteet. Nämä toimenpiteet ovat todennäköisesti edullisempia viimeisimpään päästövähennystoimenpiteeseen verrattuna. Tässä menetelmässä pitäisi siis laskea hiilinielujen lisääminen päästövähennykseksi ja hyödyntää hiilinieluhuvelytyksiä päästöoikeusyksiköinä. Nyt metsänomistajan kannattaa tuottaa hiilinieluja se määrä, jolla hiilinielun tuottamisen rajakustannus vastaa päästöoikeusyksikön hintaa. Hiilinieluhuvelytysten integroiminen päästökauppaan laskee päästövähennysten rajakustannusta ja päästöoikeuksien hintatasoa. Rajakustannusten laskiessa tulee päästökaton tasoa kiristää, jotta saavutettaisiin uusi markkinatasapaino, jossa rajahaitta ja rajakustannus ovat tasapainossa, mutta aiempaa matalammalla hintatasolla ja tiukemmilla päästörajoituksilla. (Nurmi & Ollikainen, 2019.)

Edellä kuvattua tilannetta kuvaa esimerkkikuvio 6, jossa kohta A kuvastaa alkuperäistä päästöoikeusmarkkinoiden tasapainotilaa, jossa hiilinieluhuvelytyksiä ei ole vielä integroitu osaksi markkinaa. Päästövähennysten rajakustannuksia osoittava käyrä siirtyy vasemmalle nuolen osoittamalla tavalla, kun hiilinieluhuvelytykset otetaan markkinoilla huomioon päästöoikeusyksiköinä. Tämä madaltaa päästövähennysten rajakustannusta, mitä kuvaa kohta B. Yhteiskunnan optimitila ja uusi markkinoiden tasapainotila saavutetaan pisteessä C, kun päästökattoa tiukennetaan yhteiskunnan kokeman rajahaitan mukaiseksi.



Kuvio 6. Hiilipörssin integrointi päästöoikeusmarkkinoille (mukaillen Nurmi & Ollikainen, 2019).

Teoreettinen malli on havainnollistava, mutta on muistettava, että se kuvastaa vain yleisiä taloudellisia lainalaisuuksia eikä ota huomioon todellisuuden monimutkaisuutta. Tämä malli ei esimerkiksi ota kantaa siihen, miten päästökaupan yhteiskunnallinen optimi tulisi määritellä tai miten se saadaan mitattua ja asetettua oikein kaikkia tyydyttävällä tavalla kansainvälisissä tilanteissa. Malli ei myöskään ota huomioon lisäisyyden ongelmaa eli kysymystä siitä myönnetäänkö hiilinieluhyvityksiä jokaisesta sidotusta hiilitonnista vaiko vain perusuran ylittäviltä hiilitonneilta. Perusuran ylittävillä hiilinieluilla tarkoitetaan hiilinieluja, jotka ovat syntyneet erityisten toimenpiteiden seurauksena, jotka eivät olisi syntyneet automaattisesti osana metsien kasvun normaalikehitystä. (Nurmi & Ollikainen, 2019.)

Mikäli lisäisyyttä halutaan hyödyntää hiilinieluhyvitysten pohjana, tulee määritellä perusura, joka kuvastaa hiilinielujen luontaista kehitystä ilman ihmisten toimia, jotka erityisesti tähtäävät niiden lisäykseen. Tällaista perusuraa ei kuitenkaan voida mitata luonnontieteellisin menetelmin vaan se tulee mallintaa esimerkiksi taloudellisen optimoinnin kautta saatavaa hiilinielun kehitysuraa käyttäen, mikä lisää mallin epävarmuutta. (Juutinen ym., 2018b; Nurmi & Ollikainen, 2019.)

Teoreettinen malli ei myöskään ota kantaa siihen, miten hiilivuotokysymys tulisi ratkaista. Hiilivuotoa syntyy, kun osa metsänomistajista alkaa kasvattaa hiilinieluja ja pidättäytyy puunmyynnistä, puun tarjonta laskee ja nostaa puutavaran hintaa, mikä vuorostaan kannustaa hakkuumäärien lisäämiseen niitä metsänomistajia, jotka eivät ole hiilikorvausmekanismin piirissä. Hiilinielujen lisäys toisaalla saattaa johtaa siis hiilinielujen vähentymiseen toisaalla. Hiilivuotokysymyksen kannalta on siis oleellista, onko hiilikorvausmekanismiin osallistuminen vapaaehtoista vai pakollista ja voiko hiilinielun pienenemisestä perusuran alapuolelle saada sanktioita. (Nurmi & Ollikainen, 2019.)

Seuraava ratkaistava ongelma on transaktiokustannukset, jotka syntyvät hiilinieluhyvitysten määrittämiseen, mittaukseen, valvontaan, todentamiseen, organisoimiseen ja toteutukseen liittymissä toimenpiteissä. Näiden kustannusten

vuoksi hiilinieluhyvityksen tuottamisen rajakustannus on sen teoreettista minimiä korkeampi ja samalla se voi tehdä hiilinieluhyvityksestä kokonaisuudessaan kalliimman toimenpiteen kuin päästövähennystoimenpiteet ovat. On havaittu, että transaktiokustannukset ovat suhteellisesti sitä pienempiä, mitä suurempi metsäprojekti on kyseessä eli mitä suuremmalle metsälle määrittelyä ja mittausta suoritetaan. Tämän vuoksi on oleellista kehittää perusuran määrittämiselle ja hiilinieluhyvitysten korvausmekanismeille halvempia menetelmiä, jotta myös pienten metsien omistajat pääsevät mukaan päästöoikeusmarkkinoille. (Nurmi & Ollikainen, 2019.)

Hiilinieluihin liittyy myös pysyvyysongelma. Hiilinieluun sitoutunut hiili vapautuu ilmakehään lopulta välttämättä joko hakkuun, metsäpalon tai lahoamisen seurauksena. Hiilidioksidipäästövähennys eli tuottamatta jäänyt päästö taas pysyy ikuisesti pois ilmakehästä. Tämän vuoksi hiilinieluhyvitys ei täydellisesti vastaa päästövähennystä. Ongelmaa voidaan lähestyä kohtelemalla hiilensitomista väliaikaisena hiilivarastona ja määrittelemällä sille väliaikaisen arvon tai vaatimalla hiilinielujen kasvattamisprojekteilta pitkiä hankeaikoja. (Nurmi & Ollikainen, 2019.)

4.3 Tutkimustuloksia hiilikorvausmekanismeista

Lintunen, Laturi ja Uusivuori (2016) kuvaavat tutkimuksessaan kahden erilaisen hiilikorvausjärjestelmän yhtäläisyyksiä ja eroavaisuuksia. He jaottelevat nämä mallit ostoperusteiseen ja vuokraperusteiseen järjestelmään. Ostoperusteisessa järjestelmässä vastuussa oleva viranomainen vähitellen ”ostaa” metsän kasvattaman hiilinielun maksamalla korvausta metsänomistajalle. Kaataessaan metsää, metsänomistaja ”ostaa” hiilinielun takaisin itselleen, maksamalla sanktiomaksun viranomaiselle. Tämä järjestelmä perustuu metsän ja sitä kautta hiilivaraston kasvuun. Vuokraperusteisessa järjestelmässä metsänomistajille maksetaan ”vuokraa” metsässä olevan hiilivaraston suuruuden perusteella ja mikäli metsä kaadetaan, ei metsässä silloin ole mitään vuokrata, ja vuokratulot painuvat nolnaan (Uusivuori ym., 2007). Metsänomistaja voi alkaa vuokrata hiilivarastoaan jälleen, kun uusi puusukupolvi on istutettu. Tämä järjestelmä perustuu kulloinkin olemassa olevaan hiilivarastoon. Nämä kaksi järjestelmää johtavat yhtäläisiin seurauksiin markkinoilla, mikäli metsänomistajilla on rationaaliset odotukset hiilen hinnalle, heillä on pääsy täydellisille pääomamarkkinoille ja mikäli hiilikorvausjärjestelmän luontihetkellä

ostoperusteisessa järjestelmässä viranomaisen maksaa metsänomistajalle korvauksen hetkisestä, jo olemassa olevasta hiilivarastosta. Metsänhoitotoimien tai hiilensidonnan vertailutason asettaminen ja noudattaminen ei myöskään pitäisi vaikuttaa metsänomistajien käytökseen, mutta se alentaa järjestelmän kustannuksia.

Näiden kahden järjestelmän tuottamien tulovirtojen nettonykyarvot ovat toisiaan vastaavat, mutta meno- ja tulovirrat poikkeavat toisistaan. Ostoperusteisessa järjestelmässä rahaa liikkuu molempiin suuntiin viranomaiselta metsänomistajalle ja toisin päin. Lisäksi ostoperusteisen järjestelmän luontivaiheessa viranomaisen joutuu maksamaan korkeita aloitusmaksuja silloisista hiilivarastoista. Vuokraperusteisessa järjestelmässä raha kulkee vain viranomaiselta metsänomistajalle, eikä aloitusmaksuja tarvitse maksaa. Jos kuitenkin järjestelmissä halutaan hyödyntää hiilensidonnan vertailutasoa, muuttuvat järjestelmät enemmän toistensa kaltaisiksi, sillä silloin aloitusmaksut pienenevät ja vuokraperusteisessa järjestelmässäkin saatetaan joutua maksamaan korvauksia myös metsänomistajalta viranomaiselle. (Lintunen ym., 2016.)

Juutinen ym. (2018b) tutkivat erityisesti kuinka lyhyen aikavälin hiilikorvausjärjestelmä (short-term carbon subsidy scheme), josta Lintunen ym. (2016) käyttivät nimitystä vuokraperusteinen järjestelmä, vaikuttaa hiilinielujen kasvattamiseen boreaalisissa metsissä. Heidän mukaansa tällainen hiilikorvausjärjestelmä vaikuttaa ratkaisevasti optimaaliseen metsähoidolliseen malliin ja harvennusstrategiaan. Hiilikorvausjärjestelmä pidentää metsänkasvatuksen kiertoaikaa, mutta vaikutukset kiertoaajan pitenemiseen riippuvat metsikön vallitsevasta puulajista. Kuusimetsissä optimaalinen kiertoaika nousi jopa 25 vuodella samalla kun mäntymetsissä kiertoaajan pidentyminen jäi häviävän pieneksi. Lisäksi heidän tutkimustuloksensa osoittivat, ettei hiilikorvauksen euromääräinen kasvattaminen kaikissa tapauksissa kasvata metsänkasvatuksen kiertoaikaa. Tutkimuksessa esitetty lyhyen aikavälin hiilikorvausmekanismi nostaisi metsänkasvatuksen kannattavuutta metsänomistajan näkökulmasta, mikäli kaupankäyntikustannukset ovat pienet. Heidän laskelmiensa mukaan lisäisyyttä vaativassa järjestelmässä transaktiokustannusten kannattavuusraja oli 34 €/ha⁻¹ kun päästöoikeuden hinta on 15 €/tCO₂⁻¹ ja 80 €/ha⁻¹ kun päästöoikeuden hinta oli 30 €/tCO₂⁻¹. Ilman lisäisyysvaatimusta metsänomistaja hyötyy järjestelmään

liittymisestä, mikäli transaktiokustannukset ovat maksimissaan 62 €/ha⁻¹ ja 139 €/ha⁻¹ edellä mainituilla päästöoikeushinnoilla. (Juutinen ym., 2018b.)

Myös Assmuth ja Tahvonen (2018) ovat saaneet vastaavia tuloksia. He ovat käyttäneet tutkimuksessaan pitkäkestoista hiilikorvausjärjestelmää, josta Lintunen ym. (2016) käyttivät nimitystä ostoperusteinen järjestelmä. Tulosten mukaan, kun metsä sitoo optimaalisen eli maksimaalisen määrän hiiltä, on kannattavampaa viivyttää harvennuksia ja kasvattaa metsän tiheyttä. Hiilinieluhyvityksen tai päästöoikeuden hinnan nousu voi pidentää tai lyhentää optimaalista kiertoaikaa riippuen käytetystä korkokannasta sekä puutuotteiden hiilensidontakyvystä. Hiilikorvausmekanismin hyödyntäminen myös tekee kannattavaksi siirtymisen tasaikäisestä kasvatuksesta jatkuvapeitteiseen kasvatukseen, kun skenaarioissa käytettiin realistisia muuttujien arvoja. (Assmuth & Tahvonen, 2018.)

Pukkala (2020) on tutkinut hiilen hinnan vaikutusta hakkuisiin, silloin kun metsänomistaja optimoi samanaikaisesti puuntuotannon ja hiilensidonnasta saatavat korvaukset. Hänen saamiensa tulosten mukaan, mikäli metsänomistajille maksettaisi 150 € jokaiselta sidotulta hiilitonnilta (40,90 €/hiilidioksiditonni) metsänomistajien kannattaisi lopettaa hakkuut seuraavaksi sadaksi vuodeksi koko maassa. Jo 100 €/sidottu hiilitonni (27,30 €/hiilidioksiditonni) riittää tekemään hakkuista pidättäytymisen kannattavaksi Pohjois-Suomessa ja hinnalla 50 €/sidottu hiilitonni hakkuista kannattaa vähentää 80 %. Mikäli hiilikorvausjärjestelmää halutaan käyttää poliittisena ohjauskeinona, saavutetaan suurin suhteellinen vaikutus hinnalla 50 €/sidottu hiilitonni (13,60 €/hiilidioksiditonni) ja vaikutus on suurempi Pohjois- kuin Etelä-Suomessa. Hiilenkorvausjärjestelmän käyttöönotto lisää hiilensidontaa ja on riippuvainen hiilen hintatasosta. Hiilen hinnalla 50 €/sidottu hiilitonni hiilensidonta voi kasvaa maanlaajuisesti jopa 50 % ja hinnalla 100 €/sidottu hiilitonni 70 %. Hinnan nostaminen edelleen ei enää lisännyt hiilensidontaa. Hakkuista luopuminen johtaa kuitenkin metsien tihentymiseen ja vanhenemiseen, josta voi seurata riskejä kuten metsäpaloja, myrskyvaurioita ja hyönteisongelmia, joiden seurauksena hiiltä voi mahdollisesti vapautua enemmän kuin hakkuissa. (Pukkala, 2020.)

4.4 Hiilikorvausmekanismit käytännössä

4.4.1 Kalifornian hiilikorvausmekanismi

Kalifornian osavaltioon on perustettu vuonna 2006 päästökauppajärjestelmä, joka ei kata metsäsektoria. Päästökaupassa voi kuitenkin hyödyntää hiilinieluhyvityksiä, joita voi saada Yhdysvaltain metsäprojekteista, karjaprojekteista, ilmakehän otsonia poistavista projekteista, kaupunkiympäristön metsitysprojekteista sekä kaivosmetaania keräävistä projekteista. Kansallisten metsäprojektien hiilinieluhyvityksiä voi saada California Air Resources Boardin (ARB) The Forest Offset Protocol -ohjelman (FOP) hyväksymistä hiilinieluhankkeista. Näitä hiilinieluhankkeita ovat uudelleenmetsittäminen, hiilensidontaa edistävä metsänhoito ja metsäkadon estävät hankkeet. Uudelleenmetsitys tarkoittaa hanketta, jossa paljas tai heikkokasvustoinen alue metsitetään vähintään 30 vuoden kiertoajaksi. Hiilensidontaa edistävässä metsänhoitoprojektissa metsän hoitomenetelmää ja kiertoaikaa muutetaan siten että metsä sitoo enemmän hiiltä kuin mitä se perusuralla sitoisi. Metsäkatoa estävissä hankkeissa pyritään säilyttämään metsää, joka ilman projektia tulisi hakatuksi ja maa-alue tulisi muutetuksi toiseen käyttötarkoitukseen. Tässä projektissa metsänomistajan tulee osoittaa, että maa-alue olisi markkina-arvoltaan suurempi muussa käytössä kuin metsämaana ja voi siten saada kompensatiota tästä menetyksestä. (Nurmi & Ollikainen, 2019; Seppälä ym., 2019b.)

Hiilinieluhyvityksiä saa vain perusuran ylittäviltä hiilinieluilta eli lisäisestä hiilensidonnasta. Pysyvyysoongelma on ratkaistu vaatimalla, että hiilivarasto säilytetään vähintään 100 vuotta hankekauden päättymisen jälkeen. Hankkeissa mukana olevissa metsissä on luvallista suorittaa hakkuita, mikäli vuotuinen hiilivaranto ei pienene perusuran alapuolelle ja samalla sidotun hiilen ja biomassan määrä kasvaa pitkällä aikatahtimella. Jatkuvan kasvatuksen menetelmää hyödynnettäessä eivät hakkuut saa ylittää 60 % puuston kokonaismäärästä. Tässä järjestelmässä puutuotteiden katsotaan varastoivan hiiltä tietyn ajan verran riippuen tuotteesta; hiilidioksidin ei siis katsota vapautuvan heti hakkuiden yhteydessä. (Nurmi & Ollikainen, 2019 Seppälä ym., 2019b.)

Kalifornian metsäprojekteihin osallistuminen on ollut vähäistä korkeiden transaktiokustannusten vuoksi, sillä kustannukset ovat samat projektin koosta riippumatta ja ne jatkuvat koko projektin ajan, vaikka tulot painottuvat projektin alkuun. Sadan vuoden hiilivaraston säilyttämisaika, jolta ei makseta korvauksia, vähentää myös projektien kiinnostavuutta, sillä sen vuoksi projektiin joutuu sitoutumaan useamman sukupolven ajaksi ja näin pitkä sitoutuminen heikentää merkittävästi metsään sitoutuneen pääoman likviditeettiä. Lisäksi projektiin osallistuvien metsämaiden tulee olla suuria, jotta hanke olisi kannattava. Vuonna 2015 kriittinen koko oli 600 hehtaaria samalla kun päästövähennysyksikön hinta oli 15–20 dollaria. Suomessa yksityisomistuksessa olevista metsistä vuonna 2016 vain 5 % on yli sadan hehtaarin kokoisia (SVT, 2019). (Seppälä ym., 2019b.)

4.4.2 Uuden-Seelannin hiilikorvausmekanismi

Metsätalous on osittain mukana Uuden-Seelannin päästökauppajärjestelmässä. Tässä järjestelmässä hyvityksen saa kokonaishiilinieluista pelkän lisäyksen sijaan, mutta myös nielun pienentymisestä joutuu maksamaan täysimääräisesti. Ennen vuotta 1990 istutetut metsät liitetään automaattisesti osaksi järjestelmää ja vuoden 1989 jälkeen istutetut metsät voivat liittyä vapaaehtoisesti. Vapaaehtoisesti liitettyjen metsien tapauksessa metsänomistaja saa päästöoikeusyksiköitä kasvattamalla hiilinieluja ja joutuu ostamaan päästöoikeuksia, mikäli hiilinielut pienenevät. Hiilivaraston muutoksista, saaduista korvauksista ja omistussuhteista tulee pitää kirjaa ja raportoida niistä järjestelmän ylläpitäjälle. Saadut korvaukset täytyy palauttaa, mikäli metsä halutaan poistaa päästökauppajärjestelmästä. Ennen vuotta 1990 istutettujen metsien omistajat eivät ole oikeutettuja hiilinielujen kasvattamisesta saataviin korvauksiin. Ne joutuvat ostamaan päästöoikeuksia, mikäli ne aikovat hakkauttaa metsän ja muuttaa metsämaan johonkin toiseen maankäyttötarkoitukseen kuten maatalousmaaksi. Tavanomaisesta metsänhoidosta ei aiheudu sanktioita. (Nurmi & Ollikainen, 2019.)

Järjestelmä ei ole onnistunut tavoitteissaan vähentää metsäkatoa, kannustaa uudelleenmetsitykseen tai pidempiin kiertoaikoihin. Metsänomistajat hakkasivat tavallista enemmän metsää jo ennen järjestelmän käynnistymistä, jotta ne välttäisivät myöhemmin voimaan astuvat korvausvelvollisuudet. Maatalousmaan korkeampi tuotto on myös ajanut metsänomistajia metsien hävittämiseen. Uudelleenistutukseen

ei ole ollut kannusteita puun ja päästöoikeusyksiköiden alhaisen hintatason vuoksi. Kiertoaikojä on lyhennetty tulevaisuuden hakkuista seuraavien suurempien sanktioiden pelossa. Vapaaehtoisuus on johtanut siihen, että suuret hakkuut teetetään ennen järjestelmään liittymistä, jolloin vältytään sanktioiden maksamiselta ja saadaan korvausta sellaisesta metsänkasvattamisesta, joka olisi tapahtunut ilman järjestelmääkin. (Nurmi & Ollikainen, 2019.)

4.4.3 Suomeen suunniteltu hiilikorvausmekanismi ja yksityiset palveluntarjoajat

7.2.2020 Yle Uutiset uutisoi Maa- ja metsätalousministeriön alkavan selvittää valtiorahoitteisen hiilikorvausmekanismin mahdollisuuksia (Niiranen, 2020). Lisäksi Suomen ympäristökeskuksen käynnissä olevassa (2018–2020) IBC-Carbon -hankkeessa yhtenä seitsemästä tavoitteesta on kehittää korvausjärjestelmä, joka kannustaa metsänomistajia tuottamaan hiilensidonta- ja muita ekosysteemipalveluita. Suunnitellussa järjestelmässä yhteiskunta tarjoaisi metsänomistajille hiilensidonnasta korvausta yksikkökorvausten, neuvottelupohjaisten korvausten sekä ekologisten kompensatioiden muodossa (IBC-Carbon, 2019).

Tämä tarkoittaa sitä, ettei Suomella ainakaan vielä ole käytössä yksittäistä virallista valtiollista hiilikorvausjärjestelmää. Useita yksityisiä yrityksiä on kuitenkin ilmaantunut markkinoille tarjoamaan hiilensidontapalveluita yksityisille kuluttajille ja yrityksille, jotka haluavat vapaaehtoisesti kompensoida aiheuttamaansa hiilijalanjälkeä. Nämä yritykset tarjoavat palveluita, joiden avulla voi hyvittää esimerkiksi lyhyestä kotimaisesta lennosta aiheutuneet hiilidioksidipäästöt. Palvelun hinnalla yritys ostaa ja mitätöi Gold Standard-sertifioituja VER (voluntary emission reductions) tai CER (certified emission reductions) päästövähennysyksiköitä asiakkaan valitsemasta päästövähennyshankkeesta pääasiassa ulkomailta tai ostaa päästöoikeuksia suoraan EU:n päästökauppajärjestelmästä (Ilmastoapu, 2018; Karbonautti, 2018; Nordic Offset, 2020; CO₂Esto, 2020). Suomen Luonnonsuojeluliiton Hiilipörssi taas käyttää asiakkaidensa sijoittamat rahat Suomessa sijaitsevien ojitettujen soiden ennallistamiseen, jotta ne muuttuisivat päästölähteestä hiilivarastoksi (Hiilipörssi, 2020). Lisäksi löytyy yrityksiä, jotka istuttavat puita maksua vastaan ja yrityksiä, jotka vuokraavat metsää määräajaksi, esimerkiksi viideksi vuodeksi (Istutapuita.fi, 2020; Act4Planet, 2020). Tällaisten

palveluiden laatu ja niiden tuottamien päästövähennysten todellisuus, mitattavuus ja lisäisyys on kuitenkin asetettu kyseenalaiseksi, sillä päästöjen laskentaperusteet eivät ole vakiintuneet ja voivat siten vaihdella yritysten välillä, eikä pientä, mutta kasvavaa päästökompensaatiomarkkinaa säädellä tai valvota (Niemistö ym., 2019; Haapanen, 2019).

5 METSIENKÄSITTELYMALLIEN TEOREETTISET KEHYKSET

5.1 Faustmannin malli

Saksalaisen Martin Faustmannin (1849) esittämä optimikiertoaikamalli kuvaa taloudellisesti tehokasta puuntuotantoa ja siinä yhdistyvät taloudellisten päämäärien optimointi ja metsän biologisen kasvun kehitys (Tahvonen, 1999). Faustmannin mallin lähtökohtana on, että puusto kaadetaan kokonaisuudessaan kiertoajan päätteeksi ja uudet puut istutetaan välittömästi hakkuun jälkeen. Tämän kierron on tarkoitus toistua saman mittaisena ikuisuuteen asti (Gane & Linnard, 1968). Faustmannin malli kuvaa siis jaksollista metsänhoitomenetelmää. Mallin toimivuus vaatii seuraavat lähtöoletukset toimiakseen: 1) pääomamarkkinat toimivat täydellisesti lainan sekä metsämaan suhteen, 2) puunmyynti- ja istutuskustannukset ovat muuttumattomia vakioita, sekä 3) metsän biologista kasvua kuvaava funktio tunnetaan ja se on muuttumaton (Kuuluvainen & Valsta, 2009).

Malli perustuu yhtälöön, joka kuvastaa ensimmäisen kierron jälkeen saatavien nettotulojen nykyarvoa:

$$pq(t)e^{-rt} - c \tag{1}$$

Yhtälössä (1) p kuvastaa puun markkinahintaa, funktio $q(t)$ kuvastaa puuston kasvufunktiota, joka riippuu ajasta t , e^{-rt} on kerroin, jonka avulla tulo saadaan diskontattua nykyhetkeen, r on korkokanta ja c kuvastaa istutuskustannuksia. Kun näiden kiertoaikojen ajatellaan jatkuvan ikuisuuteen ja samalla halutaan maksimoida taloudellinen hyöty, muuntuu yhtälö muotoon:

$$\text{Maksimoi } NPV_{\infty}(t) = (pq(t)e^{-rt} - c)[1 + e^{-rt} + e^{-2rt} + e^{-3r} \dots] = \frac{(pq(t)e^{-rt} - c)}{(1 - e^{-rt})} \tag{2}$$

Tavoitteena on maksimoida metsästä saatavan taloudellisen hyödyn nettonykyarvo etsimällä optimaalinen kiertoaika t . Termi $\frac{1}{1 - e^{-rt}}$ kuvastaa tässä ikuisuuteen jatkuvia

tulovirtoja. Merkitään selvyuden vuoksi $pq(t) = G(t)$, joka siis kuvastaa koko puuston rahallista arvoa hetkellä t ja derivoidaan maksimoitava yhtälö kiertoajan suhteen:

$$\frac{dNPV_{\infty}(t)}{dt} = \frac{G'(t)e^{-rt} - re^{-rt}G(t)}{1 - e^{-rt}} - \frac{(G(t)e^{-rt} - c)re^{-rt}}{(1 - e^{-rt})^2} = 0 \quad (3)$$

Optimaalinen kiertoaika t^* , joka maksimoi metsämaan arvon saadaan laskettua yhtälöstä:

$$G'(t^*) = rG(t^*) + \frac{r(G(t^*)e^{-rt^*} - c)}{1 - e^{-rt^*}} \quad (4)$$

Yhtälön (4) mukaan tulot maksimoituvat, kun päätehakkuu tehdään silloin, kun puuston arvonmuutos on yhtä suuri kuin korkotulot, jotka saataisiin, jos puustoon ja paljaaseen metsämaahan sitoutunut pääoma sijoitettaisiin johonkin muuhun sijoituskohteeseen täydellisillä markkinoilla. (Kuuluvainen & Valsta, 2009.)

5.2 Hartmanin malli

Hartmanin mallin avulla voidaan laskea metsän optimaalinen hakkuuikä ottaen huomioon, että metsä tuottaa puun lisäksi muita palveluita, joilla on arvoa. Näiden muiden palveluiden voidaan ajatella olevan esimerkiksi metsän tarjoamia virkistysmahdollisuuksia tai puuston tarjoamaa suojaa tulvilta, mutta myös metsän kykyä sitoa hiiltä. Mallissa käytetään oletuksia, että metsää hoidetaan tasaikäisen puuston periaatteella ja että puutavaran hinnat pysyvät samana yli ajan. Lisäksi oletetaan, että tutkittavasta metsästä saatava puutavara ja palvelut ovat pieniä suhteessa kokonaistarjontaan, jolloin yksittäisillä myyjillä tai ostajilla ei ole kykyä vaikuttaa markkinahintaan. (Hartman, 1976.)

Merkitään edelleen $G(t)$:llä t ikäisestä metsästä saatavia puunmyyntituloja kuten aiemminkin ja lisäksi metsän muita palveluita t ikäisessä metsässä termillä $F(t)$. Termien r , t , e^{-rt} ja $\frac{1}{1 - e^{-rt}}$ merkitykset samoin kuin Faustmannin mallissa.

Tavoitteena on siis maksimoida yhtälö $U(t)$, joka kuvastaa metsästä saatavaa hyötyä:

$$U(t) = G(t)[e^{-rt} + e^{-2rt} + e^{-3rt} + \dots] + \int_0^t e^{-rx} F(x) dx [1 + e^{-rt} + e^{-2rt} + \dots] = \frac{G(t)e^{-rt} + \int_0^t e^{-rx} F(x) dx}{1 - e^{-rt}} \quad (5)$$

Ensimmäisen kertaluvun ehto $U(t)$:n maksimoinnille on:

$$U'(t) = \frac{[G'(t)e^{-rt} - re^{-rt}G(t) + F(t)e^{-rt}]}{1 - e^{-rt}} - \frac{[G(t)e^{-rt} + \int_0^t e^{-rx} F(x) dx](re^{-rt})}{(1 - e^{-rt})^2} = 0 \quad (6)$$

Tämä voidaan esittää myös muodossa:

$$\frac{G'(t)}{G(t)} = r \left(\frac{1}{1 - e^{-rt}} + \frac{\int_0^t e^{-rx} F(x) dx}{G(t)(1 - e^{-rt})} \right) - \frac{F(t)}{G(t)} \quad (7)$$

Kun $F(t) \equiv 0$, eli metsän tarjoamat muut kuin puuntuotannolliset palvelut jätetään huomioimatta, yhtälöstä voidaan tulkita, että metsä kannattaa kaataa, kun metsän arvokasvu on yhtä suuri kuin diskonttokorko eli metsänkasvatuksen korkokustannukset. Tämä on siis sama tulos kuin Faustmannin kaavassa. Koska muille palveluille halutaan kuitenkin antaa arvo ja siten $F(t)$ sisällyttää laskelmaan, ja koska $F(t)/G(t) > 0$, tulkitaan, että puusto tulisi kaataa optimitilanteessa silloin, kun metsän kasvuprosentti on vähemmän kuin diskonttokorko. Koska metsän kasvuprosentti laskee mitä vanhempi puusto on, saavutetaan optimaalinen hakkuuikä tämän mallin mukaan myöhemmin kuin mallissa, jossa ei huomioida metsälle muuta arvoa kuin tuotettu puutavara. (Hartman, 1976.)

Termi $F(t)/G(t)$ kuvastaa hakkaamattoman metsän tuottamien muiden palveluiden (tietyllä ajanjaksolla t) suhdetta metsästä saatavaan puutavaran varastoarvoon. Mikäli tämä suhdeluku on suurempi kuin diskonttokorko, on koko yhtälön oikea puoli negatiivinen. Tämä tarkoittaisi, että optimaalisella hakkuuhetkellä metsän kasvuprosentin tulisi olla negatiivinen tai ettei metsää tulisi hakata lainkaan. (Hartman, 1976.)

5.3 Tahvosen malli

Tahvonen (2016b) esittelee mallin, jossa ei lähtökohtaisesti oleteta joko jaksollista tai jatkuvapeitteistä metsänhoitotapaa, vaan se määräytyy optimoinnin kautta. Hän arvostelee muita malleja siitä, että niissä on ennalta asetettu rajoitteeksi tuottaa vain tuloksia, jotka noudattavat tasaikäisen puuston menetelmää. Tahvosen mukaan tasaikäistä ja jatkuvapeitteistä metsänhoitomenetelmää voidaan aidosti vertailla taloustieteellisestä näkökulmasta vain silloin kun optimointimalli määrittää endogeenisesti parhaan mahdollisen hoitomenetelmän ottaen huomioon taloudelliset ja biologiset tekijät. Tahvosen malli on epälineaarinen matemaattinen ohjelmointiongelma (nonlinear programming problem), joka on monimutkaisempi kuin optimointimallit, joissa metsänhoitomenetelmä on ennalta määrätty tasaikäiseksi.

Tahvosen malli perustuu puuston kehitystä kuvaavaan yhtälöön:

$$x(t) = g(t)f[x(t)] - h(t), \quad x(t_0) = x_0 \quad (8)$$

Funktiossa (8) $x(t)$ kuvaa puuston tilavuutta (m^3), g kuvaa ajasta t riippuvaa kasvua ja $f[x(t)]$ kuvaa puuston tilavuudesta riippuvaa kasvua. Funktio $h(t)$ kuvastaa harvennuksen määrää ja $x(t_0) = x_0$ kuvaa puuston lähtötilanteen tilavuutta. (Tahvonen, 2016b.)

Optimaalinen hakkuuaika saadaan laskettua maksimoimalla funktio (Tahvonen, 2016b):

$$\max_{h(t), T} J(T) = -w + \int_0^T p_1 h(t) e^{-rt} dt + e^{-rT} [p_2 x(T) + V] \quad (9)$$

Funktiossa (9) p_1 kuvastaa harvennuksesta saatavaa kantohintaa ja p_2 pätehakkuun kantohintaa. Termi w kuvastaa istutuskustannuksia ja T tasaikäisen metsänkasvatuksen kiertoaikaa. V kuvastaa paljaan maan arvoa, joka voidaan laskea metsätalouskäytössä olevalle maalle kaavalla (Tahvonen, 2016b):

$$V = \frac{-w + \int_0^T p_1 h(t) e^{-rt} dt + e^{-rT} p_2 x(T)}{1 - e^{-rT}} \quad (10)$$

Ensimmäisen kertaluvun ehto V :n maksimoinnille on (Tahvonen, 2015):

$$ph(T) + px'(T) - rpx(T) - rV = 0, \quad (11)$$

kun paikallisesti optimaalinen aika avohakkuiden välillä (T) on äärellinen, ja

$$\lim_{T \rightarrow \infty} [ph(T) + px'(T) - rpx(T) - rV] \geq 0, \quad (12)$$

kun paikallisesti optimaalinen aika avohakkuiden välillä (T) on rajaton. Ensimmäisen yhtälön mukaan päätehakkuuaika on optimaalinen, kun harvennuksista saatavat tulot ovat yhtä suuret kuin päätehakkuutulosten ja paljaan maan arvon summa. Jälkimmäisestä yhtälöstä voidaan tulkita, että päätehakkuu ei ole optimaalista, mikäli jatkuvasta harvennuksesta saatavat tulot ylittävät yhteenlasketut päätehakkuutulot ja paljaan maan arvon. (Tahvonen, 2015.)

5.4 Tahvosen malli täydennettynä hiilensidonnalla

Tahvosen mallin avulla voidaan tutkia myös hiilensidonnän vaikutusta taloudelliseen optimiin. Assmuth ja Tahvonen (2018) esittää teoreettisen mallin hiilensidonnän tarkasteluun, jossa metsänhoitotapa määräytyy endogeenisesti. Tätä on tutkittu myös muuntamalla edellä esitetty teoreettinen malli sen numeeriseen muotoon (Tahvonen & Rämö, 2016a):

$$\begin{aligned} \max_{(h_{st}, \delta_t, t=t_0, \dots, T, T)} J(x_{t_0}, T) = \\ \frac{-w + \sum_{t=t_0}^{T-1} [R(h_t) - C_{th}(h_t) - \delta_t C_f] b^{\Delta(t+1)} + [R(x_T) - C_{cl}(x_T) - \delta_T C_f] b^{\Delta(T+1)}}{1 - b^{\Delta(T+1)}} \end{aligned} \quad (13)$$

ehdoilla:

$$(1) x_{1,t+1} = \phi(x_t) + [1 - \alpha_1(x_t) - \mu_1(x_t)]x_{1t} - h_{1t}, t = t_0, \dots, T$$

$$(2) x_{s+1,t+1} = \alpha_s(x_t)x_{st} + [1 - \alpha_{s+1}(x_t) - \mu_{s+1}(x_t)] x_{s+1,t} - h_{s+1,t}, \\ s = 1, \dots, n-1, t = t_0, \dots, T$$

$$(3) h_{st} = \delta_t h_{st}, s = 1, \dots, n, t = t_0, \dots, T$$

$$(4) x_{t_0}, \text{ on annettu,}$$

sekä $x_{st} \geq 0, h_{st} \geq 0, t = t_0, \dots, T, s = 1, \dots, n$ ja $T \in [t_0, \infty)$. (Tahvonen & Rämö, 2016a.)

Kaavassa (13) x_{st} kuvastaa puiden lukumäärää kokoluokassa s aikajakson t alussa. $0 \leq \alpha_s(x_t) \leq 1$ kuvastaa puiden osuutta, joka siirtyy seuraavaan kokoluokkaan jokaisen ajanjakson päätteeksi. Vastaavasti $0 \leq \mu_s(x_t) \leq 1$ kuvastaa puiden osuutta, joka kuolee ajanjaksolla t . $1 - \alpha_1(x_t) - \mu_1(x_t)$ kuvastaa osuutta puista, jotka säilyvät nykyisessä kokoluokassaan. Puuston luonnollinen uusiutuminen riippuu metsän lähtötilanteesta x_t sekä uusiutumista kuvastavasta funktiosta ϕ . h_{st} kuvastaa kaadettavia puita ajanjakson t päätteeksi. $w \geq 0$ kuvastaa istutus-/kylvökustannuksia. Harvennuksista saatavat tuotot $R(h_t)$ ja päätehakkuista saatavat tuotot $R(x_T)$ riippuvat kaadettujen puiden määrästä ja koosta. Harvennuskustannuksia kuvaa termi $C_{th}(h_t)$ ja päätehakkuun kustannuksia termi $C_{cl}(x_T)$. Harvennusten kiinteitä kustannuksia kuvaa termi C_f . Kiinteiden kustannusten vuoksi harvennusta ei välttämättä kannata tehdä jokaisen ajanjakson päätteeksi. Kaavassa tämä ominaisuus on huomioitu käyttämällä binaarimuuttujaa $\delta_t: \mathbb{Z} \in [0,1], t = t_0, t_0 + 1, \dots$ sekä Boolean operaattoria $h_t = \delta_t h_t$. Termi $b^\Delta = 1/(1+r)^\Delta$ merkitsee diskonttaustekijää, jossa r kuvastaa vuosittaista korkokantaa ja Δ ajanjakson pituutta vuosina. Mikäli aikaa kuvastavan termin T optimaaliseksi arvoksi saadaan jokin äärellinen arvo, on päätöshakkuun tekeminen silloin optimaalista. Mikäli T :n optimiarvoksi saadaan ääretön luku, on silloin optimaalista jatkaa harvennuksia ikuisuuteen asti ja olla tekemättä päätehakkuuta lainkaan. (Tahvonen & Rämö, 2016a.)

Yllä esitettyä Tahvosen mallin numeerista versiota on täydennetty hiilivaraston kehittymistä kuvaavalla osalla. Hiilivarastoa kuvaavassa kaavassa otetaan huomioon kasvavien puiden biomassan, kuolleiden puiden biomassan sekä tukki- ja kuitupuun biomassojen erilaiset hiilen sitoutumisen ja vapautumisen dynamiikat. Metsään muodostuvalla hiilivarastolla nähdään olevan sosiaalista arvoa ilmastonmuutoksen

torjunnassa ja siten metsänomistajia on syytä kannustaa hiilivaraston kasvattamiseen tukijärjestelmän muodossa. Tukijärjestelmässä metsänomistajalle maksetaan, kun metsä kasvaa ja sitoo entistä enemmän hiiltä. Vastavuoroisesti metsänomistaja joutuu maksamaan korvauksia, kun hiiltä vapautuu metsän kaatamisen ja puiden luonnollisen poistuman yhteydessä. (Assmuth ym., 2018.)

Hiilensidonnan taloudellista arvoa voidaan kuvata funktiolla:

$$Q_t = p_c \theta \{B_{t+1}(x_{t+1}) - B_t(x_t) + [1 - \alpha_\sigma(r)]y_{\sigma,t}(h_t) + [1 - \alpha_\omega(r)]y_{\omega,t}(h_t) + [1 - \alpha_d(r)][d_{m,t}(x_t) + d_{h,t}(h_t)]\} \quad (14)$$

Kaavassa (14) $p_c \geq 0$ ($\text{€} \cdot tCO_2^{-1}$) kuvastaa hiilen hintaa. Biomassan kokonaismäärää ajanjakson t alussa kuvastaa $B_t(x_t) = \rho \eta \varpi_t$, jossa ρ kuvastaa runkopuun massaa kuiva-aineeksi muunnettuna, termi η muuntaa runkopuun kuiva-aine massan koko puun kuiva-ainemassaksi, ja termi $\varpi_t = \sum_{s=1}^n x_{s,t}(v_{\sigma,s} + v_{\omega,s})$ kuvastaa myyntikelpoista puumateriaalin tilavuutta aikajakson t alussa. Biomassan muutosta kuvastaa siis yhtälö $B_{t+1}(x_{t+1}) - B_t(x_t)$. Yhteen kuiva-aineyksikköön on sitoutuneena hiiltä termin θ verran. $y_{\sigma,t}$ ja $y_{\omega,t}$ kuvastavat tukki- ja kuitupuun hakkuumääriä kuiva-ainemassana ilmaistuna. Hiili ei vapaudu puutuotteista välittömästi kaadon yhteydessä, vaan vähitellen. Kuolleen puun kuiva-ainemassaa kuvastavat termit $d_{m,t}$ ja $d_{h,t}$. Kuollutta puuta syntyy luonnollisesti, mutta myös hakkuujätteen muodossa. (Assmuth ym. 2018.)

Puunkorjuut voidaan optimoida ikuisuuteen jatkuvalla aikahorisontilla ottaen huomioon hiilensidonnan sosiaalinen ja taloudellinen arvo yhtälön $J(x_0, T)$ avulla (Assmuth ym., 2018):

$$\max_{\{h_{st}, \delta_t, T \in [t_1, \infty)\}} J(x_0, T) = \frac{-w + \sum_{t=0}^T Q(x_t, h_t) b^{\Delta(t+1)} + \sum_{t=t_1}^T [R(h_t) - C_i(h_t) - \delta_t C_f] b^{\Delta(t+1)}}{1 - b^{\Delta(T+1)}} \quad (15)$$

Ehdoilla:

$$(1) x_{1,t+1} = \phi(x_t) + [1 - \alpha_1(x_t) - \mu_1(x_t)]x_{1t} - h_{1t}, t = t_1, t_1 + 1, \dots, T$$

$$(2) x_{s+1,t+1} = \alpha_s(x_t)x_{st} + [1 - \alpha_{s+1}(x_t) - \mu_{s+1}(x_t)]x_{s+1,t} - h_{s+1,t}, \\ s = 1, \dots, n-2, t = t_1, t_1 + 1, \dots, T$$

$$(3) x_{n,t+1} = \alpha_{n-1}(x_t)x_{n-1,t} + [1 - \mu_n(x_t)]x_{nt} - h_{nt},$$

$$(4) \delta_t \in \{0,1\}, t = t_1, t_1 + 1, \dots, T$$

$$(5) x_{st} \geq 0, s = 1,2, \dots, n, t = t_1, t_1 + 1, \dots, T + 1$$

$$(6) h_{st} = \delta_t h_{st} \geq 0, s = 1,2, \dots, n, t = t_1, t_1 + 1, \dots, T$$

$$(7) x_{T+1} = 0$$

$$(8) x_{s,t_1} \text{ on annettu.}$$

Ehdot (1–3) kuvastavat metsän kehitystä puiden taimettuessa, kasvaessa ja siirtyessä kokoluokasta toiseen sekä puiden luonnollista kuolleisuutta ja poistumista hakkuiden myötä. Ehto (4) määrää binäärimuuttujan δ_t saamaan joko luvun 0 tai 1 riippuen siitä, onko harventaminen kyseisellä ajanjaksolla t kannattavaa vai ei riippuen kiinteiden kustannusten suuruudesta. Ehto (5) määrää, että puiden lukumäärä ei voi olla negatiivinen missään kokoluokassa. Ehto (6) määrää, että hakkuiden määrä ei voi olla negatiivinen. Ehto (7) toteaa, että päätehakuun jälkeen aikana $T + 1$ metsässä ei ole jäljellä yhtään puuta. Viimeinen ehto numero (8) kertoo, että optimointi onnistuu vain, jos metsän lähtötilannetta kuvastavat tiedot ovat tiedossa. (Assmuth ym., 2018.)

Mallin mukaan optimaalinen kiertoaika pitenee, kun hiilensidonnalle annetaan taloudellinen arvo. Lisäksi harvennuksia kannattaa viivyttää ja metsän tiheyttä kannattaa kasvattaa. Kun hiilen hinta on tarpeeksi korkea, kannattaa jaksollisesta kasvattamisesta siirtyä jatkuvapeitteiseen kasvattamiseen. Tähän vaikuttaa kuitenkin myös diskonttokorko. Kun korko on 2 % kannattaa menetelmää vaihtaa, kun hiilen hinta on 30 €/tCO₂, mutta kun korko on 4 % niin jatkuvapeitteinen kasvattaminen on kannattavaa jo silloin kun hiilen hinta on 0 €/tCO₂. (Assmuth ym., 2018.)

6 TUTKIMUSMENETELMÄ

6.1 Aineisto

Tutkimuksessa käytetään Luonnonvarakeskukselta (Luke) saata aineistoa. Aineisto on kuvattu tarkemmin Juutinen ym. (2018a) artikkelissa. Aineisto perustuu EFIMOD-mallilla tehtyihin simulointeihin. EFIMOD kuvaa puun kasvua ja biologisten aineiden kiertoa pohjoisissa lauhkean vyöhykkeen metsissä. Malli simuloi metsikkötasolla männyn, kuusen ja koivun kasvua erilaisissa maaperissä ja ilmasto-olosuhteissa Euroopassa. Jokaista metsikön puuta simuloidaan yksittäin ottaen huomioon niiden kasvua määrittävät tekijät kuten valonsaanti, saatavilla olevat ravintoaineet ja vedensaanti. Malli kuvaa myös sitä, miten biomassaa jakautuu eri puunosiin, kuinka luontainen uusiutuminen tapahtuu ja miten pintakasvillisuus kehittyy. EFIMOD-malliin on liitetty myös ROMUL-malli, joka kuvastaa maaperän orgaanisen aineksen ja typen kulkua ja vaikutusta puustoon. EFIMOD-mallin avulla voi simuloida lyhyen ja pitkän ajan simulaatioita luonnontilaisista ja hoidetuista metsistä erilaisilla metsäalueilla, erilaisissa ilmasto-olosuhteissa ja erilaisin metsänhoitomenetelmin käsiteltynä. Mallin avulla voi tuottaa tuloksia hiilen ja typen määrästä maaperässä ja puustossa, hiilidioksidipäästöistä, puuston kasvusta ja tuotosta. (Komarov, 2003.)

Tässä työssä tarkastellaan elävään puustoon sitoutunutta hiiltä. Maahan sitoutunut hiili jätetään tarkastelun ulkopuolelle, koska käytännössä olisi hyvin vaikea todentaa maahan sitoutuneen hiilen määrä hiilikorvausta laskettaessa. Työssä ei siis myöskään tarkastella puutuotteisiin mahdollisesti sitoutuvaa hiiltä.

6.2 Skenaarioiden luominen

Edellä esitetyistä optimointimalleista poiketen tässä tutkielmassa ei hyödynnetä optimointia, vaan tarkastellaan erilaisia skenaarioita metsänhoitotavoista. Skenaarioiden pohjana on dataa maaperästä ja ilmastosta 100 x 100 m kokoisesta metsäkuvioista, joka sijaitsee Suomessa, Juupajoella (61°50'47N, 24°17'35E). Kaikissa skenaarioissa on sama lähtötilanne, jossa metsässä on 2 000 kappaletta istutettuja viisivuotiaita kuusia, joiden rinnankorkeusläpimitta on 0,3 cm ja korkeus 1,4 m. Kuusien seassa on 100 kappaletta mäntyjä, 100 kappaletta koivuja ja 50 kappaletta

haapaa. Simuloinnin alussa tehdään maanmuokkaus ja istutus. Istutuksen jälkeen metsikössä suoritetaan taimikonhoito (ajanhetki 5) ja ensiharvennus (ajanhetki 14). Näissä toimenpiteissä poistetaan pääasiassa muita lajeja kuin kuusta. Varsinaiset hakkuut aloitetaan aikaisintaan 31 vuoden päästä istutuksesta. Jatkovapeitteisessä kasvatuksessa metsän uusiutuminen tapahtuu luonnollisesti simuloimalla satunnaisesti sijoiteltuja uusia puita metsikköön. Viisi prosenttia suurista puista (rinnankorkeusläpimitta >25 cm) jätetään metsään turvaamaan siementuotantoa ja siten metsän luonnollista uusiutumista. (Juutinen ym., 2018a.)

Jatkuvassa kasvatuksessa poimintahakkuut siis aloitetaan, kun simulaatiometsikkö saavuttaa 31 vuoden iän ja puustopinta-ala on $22,1 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$. Kahden perättäisen poimintahakkuun välistä aikaa kuvataan vuosissa tekijällä R. Hakkuun voimakkuutta kuvataan jäljelle jäävällä puuston pohjapinta-alalla L (m^2ha^{-1}), jolloin matala L:n arvo kertoo voimakkaasta harvennuksesta ja korkea L:n arvo vähäisestä harvennuksesta. Hakkuissa on simuloitu poistettavan kaikista kokoluokista satunnaisesti valikoidut puut, jotka ovat rinnankorkeusläpimitaltaan ≥ 18 cm. Lisäksi osassa skenaarioista on poistettu rinnankorkeusläpimitaltaan ≥ 16 cm, jotta on saavutettu tavoiteltu hakkuunjälkeinen pohjapinta-ala. Skenaarioiden hakkuissa metsästä poistetaan rungot (100 %), oksat (90 %) ja lehdet (50 %). Osa hakkuujätteestä jätetään metsään. (Juutinen, 2018a.)

Jatkovapeitteisen kasvatuksen eri skenaariot muodostettiin muuttamalla hakkuiden aikaväliä ja intensiteettiä. Simulaation aikajänne oli 91 vuotta, mikä valikoitui toistamalla pisin 30 vuoden intervalli kaksi kertaa sen jälkeen, kun metsä oli saavuttanut ensin 31 vuoden iän. Lyhyempien intervallien skenaarioissa intervaleja toistettiin, kunnes saavutettiin sama simulaation kokonaiskesto aika. Käytetyt intervalliajat olivat 10, 15, 20 ja 30 vuotta ja käytetyt hakkuunjälkeiset puustopinta-alat olivat 4, 6, 8, 10, 12 ja $16 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$. Jatkossa eri skenaarioita merkitään lyhenteillä. Esimerkiksi lyhenne R10L16 tarkoittaa skenaarioita, jossa tehdään hakkuut 10 vuoden välein ja pohjapinta-ala hakkuun jälkeen on $16 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$. (Juutinen, 2018a.)

Tasaikäisen metsänhoidon skenaariossa (TRAD) simuloitiin istutus, taimikonhoito ja ensiharvennus samalla tapaa kuin jatkovapeitteisessä kasvatuksessa. Niiden jälkeen kaksi alaharvennusta suoritettiin metsikön ollessa 34 ja 44 vuoden iässä, niin että

jäljelle jäävä puustopinta-ala oli 18 m²ha⁻¹. Päätehakkuu simuloitiin metsikön ollessa 61 vuoden iässä, jolloin runkojen rinnankorkeusläpimitta oli saavuttanut 27,2 cm paksuuden ja puustopinta-ala oli 31 m²ha⁻¹. Tämä skenaarion parametrit eivät ole optimaalisia tasaikäisen kasvatuksen eri menetelmävaihtoehtojen joukossa, mutta ne vastaavat nykyisiä kuusenkasvatusmenetelmiä Suomessa (Äijälä ym., 2014.) (Juutinen, 2018a.)

6.3 Taloudellisen analyysin malli

Metsänhoidon kannattavuutta tutkittiin hakkuista saatavien tulovirtojen nettonykyarvojen perusteella. Harvennusintervallia kuvataan termillä t_s ($t_s=10,15, 20$ ja 30) ja simulaation aikajaksoa termillä T . Harvennusten voimakkuutta (m³ha⁻¹) aikana t skenaariossa s kuvaavat termit h_{lts} tukkipuulle ja h_{pts} kuitupuulle. Tienvarsihintoja (€m⁻³) eri puutavaralajeille merkitään termeillä p_l ja p_p . Hakkuutuloja aikana t skenaariossa s kuvaa lauseke $R_{ts} = p_l h_{lts} + p_p h_{pts}$. Harvennuskustannuksia (€ha⁻¹) merkitään termillä c_{ts} , joka sisältää hakkuu- ja kuljetuskustannukset. Korkokantaa merkitään r :llä. Uudistamiskustannuksia (€ha⁻¹) aikana t kuvataan termillä w_t , joka sisältää maanmuokkauksen ja puiden istutuksen ajanhetkellä $t=0$ sekä taimikonhoidon ja ensiharvennuksen kustannukset ajanhetkellä $t=5$ ja $t=14$. Lähtötilanteeksi valittiin paljas maa, jolloin hakkuutulojen nettonykyarvo saatiin laskemalla seuraavasta yhtälöstä:

$$\pi_s = - \sum_{t=0}^a w_t e^{-rt} + \sum_{t=a}^{T-t_s} (R_{ts} - c_{ts}) e^{-rt} + (R_{Ts} - c_{Ts}) e^{-rT} (1 - e^{-rt_s})^{-1} \quad (16)$$

Yhtälössä (16) t on aika vuosina, a on ensimmäinen harvennusaika (vuosi 31 istutuksesta) ja T viimeinen harvennusaika (vuosi 91 istutuksesta). Metsikön tasapainotilan mukainen ikuisesti toistuva nettohakkuutulo arvioitiin olettamalla se vastaamaan viimeisintä simuloitua nettohakkuutuloa. Tätä kuvastaa yhtälön (16) viimeisin termi. (Juutinen, 2018a.)

Hiilensidonnasta saatavat tulot on laskettu selvittämällä puuston vuosittain sitoman hiilen määrä jokaiselle skenaariolle erikseen ja kerrottuna sidotun hiilen määrää

valikoiduilla päästöoikeuskaupan hiilen hinnalla €/tCO₂, joka on muutettu kertoimella $(1 - (\frac{1}{(1+r)^1}))$ lyhyen aikavälin hiilikorvausjärjestelmän korvaushinnaksi. Tässä tutkielmassa lyhyen aikavälin hiilikorvausjärjestelmällä tarkoitetaan vapaaehtoista järjestelyä, jossa metsänomistajat voivat tuottaa nopeakiertoisia, sitoumuskaudeltaan vain vuoden mittaisia päästöoikeuksia, jotka he voivat sitten myydä esimerkiksi päästöoikeusmarkkinoilla. Tuotettujen oikeuksien määrä lasketaan metsän sitoman hiilen kokonaismäärästä, eikä sitä verrata ennalta määrättyyn perusuraan. Päästöoikeudet ovat vuoden määräaikaista ja ne tulee myydä ennen oikeuden raukeamista. Oikeuksia voi myydä vuosittain niin kauan kun metsään ei tehdä päätehakkuuta. Metsänomistajilla on oikeus liittyä tai jättäytyä pois hiilikorvausjärjestelmästä jokaisen vuoden mittaisen sitoumuskauden päätyttyä. Tässä järjestelmässä metsänomistaja ei joudu maksamaan sanktiomaksuja hakkuista, vaan hän voi aina valita onko hiilen sitomisesta saatavat korvaukset vaiko hakkuista saatavat tulot hänelle kannattavampi toimintatapa. Mikäli metsänomistaja päättää hakata metsäänsä on hänellä vähemmän päästöoikeuksia myytävänä.

Hiilikorvauksesta saatavien tulojen nykyarvo lasketaan seuraavasti:

$$\tau_{CS} = \sum_{t=0}^{300} p_C C_{ts} e^{-rt} \quad (17)$$

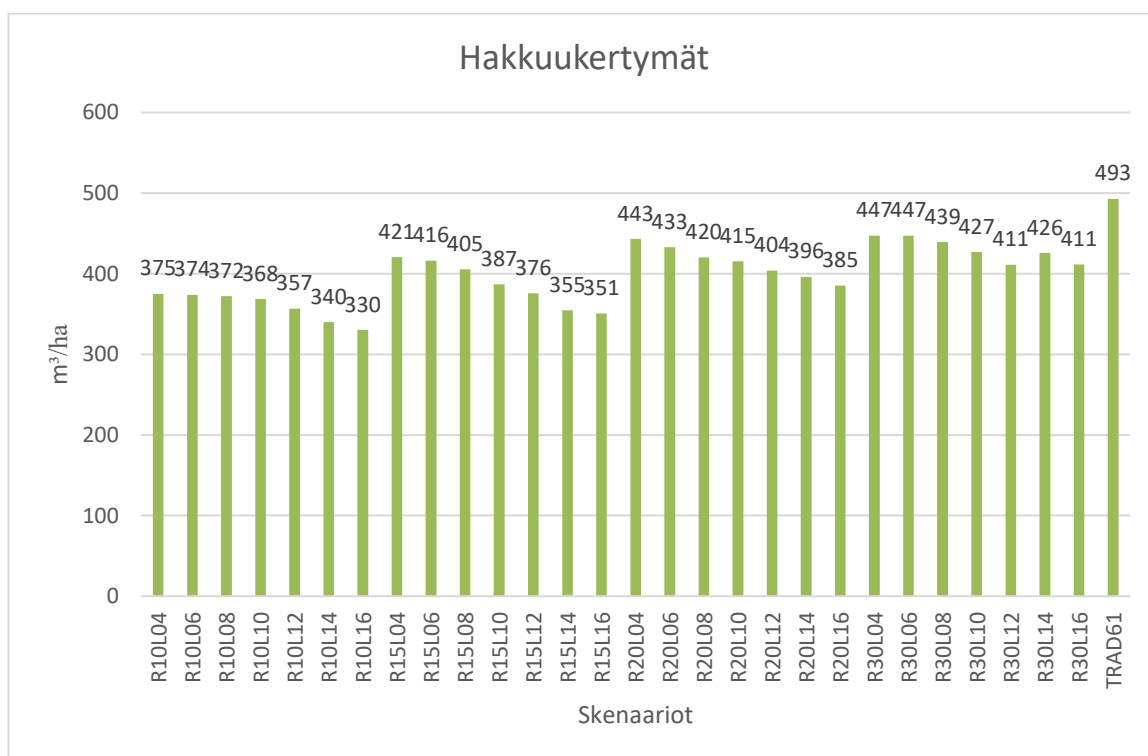
Yhtälössä (17) p_C on hiilen hinta ja C_{ts} on sitoutuneen hiilen määrä hetkellä t skenaariossa s . Jatkuvapeitteisen kasvatuksen osalta laskelmissa oletettiin, että vuoden 91 jälkeen hiilen määrä vastaa viimeisen simuloidun aikavälin hiilenmäärää vuoteen 300 saakka jokaisessa skenaariossa. Diskonttauksen vuoksi 300 vuoden jälkeen toteutuvalla hiilen määrällä ei ole käytännössä merkitystä, minkä vuoksi tarkastelua ei jatkettu pidemmälle. Jaksollisen kasvatuksen osalta oletettiin, että tulevat rotaatiot kyseisen 300 vuoden aikana ovat samanlaisia kuin simuloitu rotaatio.

Aanalyysissä päästöoikeuskaupan hiilen hintana käytettiin 10 €/tCO₂, 20 €/tCO₂ ja 30 €/tCO₂. Nämä hinnat valikoituivat käytettäväksi, sillä yhden EUA:n hinta on vaihdellut 2,70 euron ja 30,52 euron välillä koko toiminta-aikanaan keväästä 2008 lähtien (Ember, 2020). EUA on Euroopan Unionin päästöoikeuskaupan päästöoikeusyksikkö. Valittuja päästöoikeuskaupan hintoja vastaavat lyhyen

aikajakson hiilikorvausjärjestelmän hinnat ovat 0,30 €/tCO₂, 0,59 €/tCO₂ ja 0,89 €/tCO₂.

7 TULOKSET

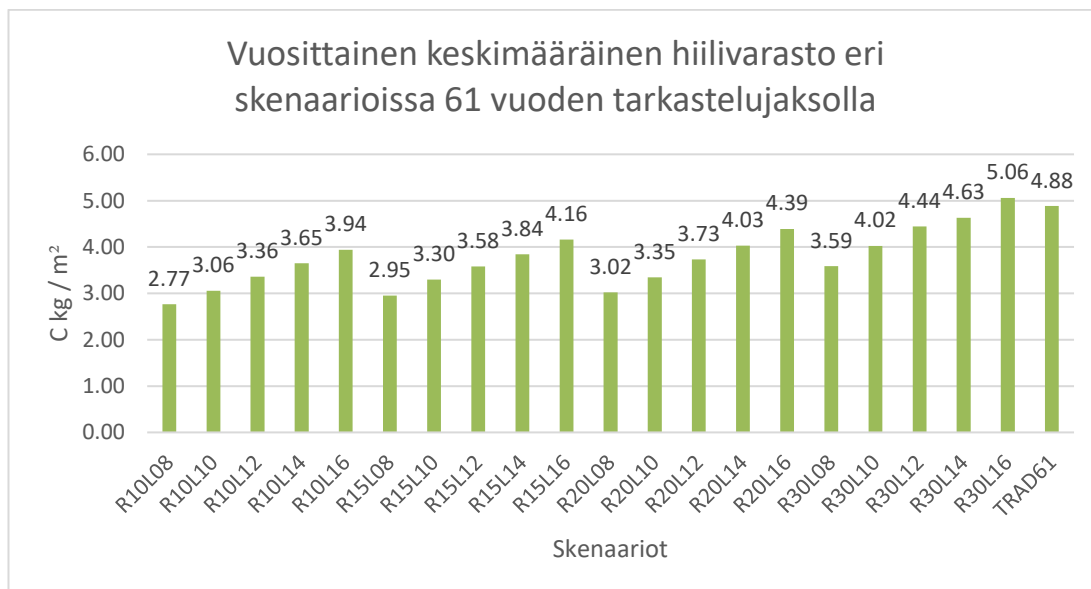
Aluksi tarkasteltiin eri skenaarioiden hakkuukertymiä m³/ha. Tarkastelu aloitettiin hakkuukertymistä, sillä metsätaloudesta saatavat tulot riippuvat pitkälti siitä kuinka paljon metsästä kaadetaan myytävää puutavaraa. Hakkuukertymät olivat intuitiivisestikin suurempia skenaarioissa, joissa hakkuun jälkeinen puuston pohjapinta-ala oli pienempi. Lisäksi kertymä oli suurinta jaksollisen menetelmän skenaariossa, jossa hakkuukertymä oli 493 m³/ha. Jatkuvapeitteisen menetelmän skenaarioista R30L04 ja R30L08 tuottivat suurimmat hakkuukertymät ollen 447 m³/ha. Tulos oli 9 % heikompi kuin jaksollisen menetelmän skenaario. Heikoin jatkuvapeitteisen kasvatuksen skenaario oli vain 33 % jaksollista skenaariota huonompi hakkuukertymältään. Hakkuukertymiä kuvataan kuviossa 7.



Kuvio 7. Puun hakkuukertymät eri skenaarioissa.

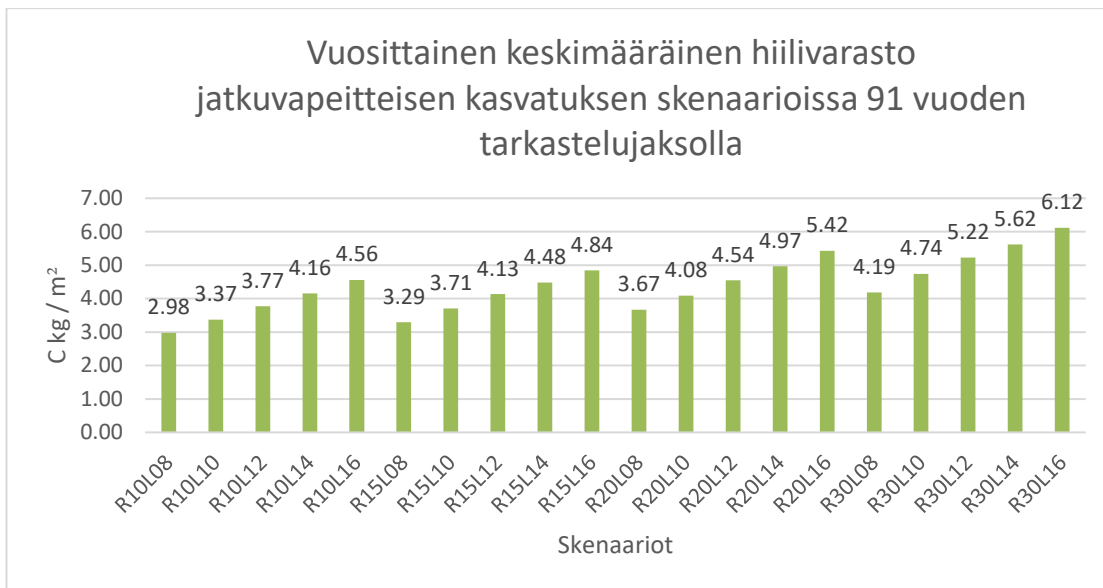
Seuraavaksi tarkasteltiin puustoon sitoutuneen hiilen vuosittaista keskimääräistä hiilivarastoa. Ensinnäkin vertailuun otettiin kaikki skenaariot 61 vuoden tarkastelujaksolla. Kuvioista nähdään, että keskimääräinen hiilivarasto on suurin jatkuvapeitteisen menetelmän skenaariossa R30L16, jossa hiiltä oli sitoutuneena 5,06 kg/m².

Huomionarvoista on, että jaksollisen menetelmän skenaario TRAD61 keskimääräinen vuotuinen hiilivarasto oli tänä aikana $4,88 \text{ kg/m}^2$, mikä on vain 3,5 % vähemmän kuin parhaassa jatkuvapeitteisessä skenaariossa. Näitä tuloksia kuvataan kuviossa 8.



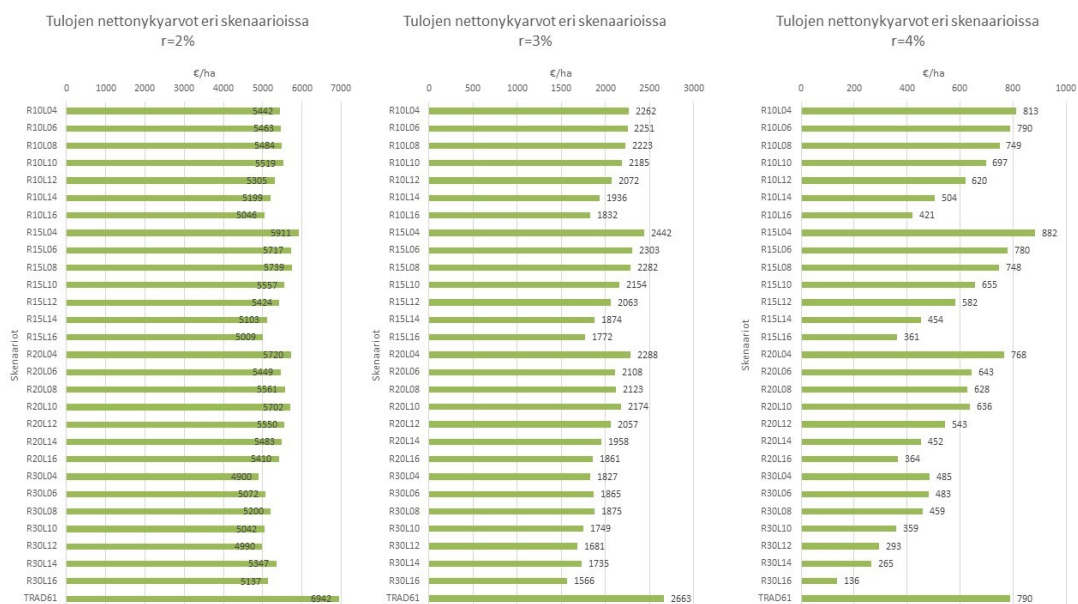
Kuvio 8. Vuosittainen keskimääräinen hiilivarasto eri skenaarioissa 61 vuoden tarkastelujaksolla.

Kun tarkastelujaksoa pidennettiin 91 vuoteen, jätettiin jaksollisen kasvatuksen skenaario pois vertailusta, sillä siinä puustoon sitoutunut hiilivarasto nollautuu päätehakkuussa metsän ollessa 61 vuoden ikäinen. Edelleen skenaariossa R30L16 keskimääräinen vuotuinen hiilivarasto on suurin, sillä siinä hakkuita tehdään harvemmin ja hakkuumäärät ovat pienempiä. Tulokset on kuvattu kuviossa 9.



Kuvio 9. Vuosittainen keskimääräinen hiilivarasto jatkuvapeitteisen kasvatuksen skenaarioissa 91 vuoden tarkastelujaksolla.

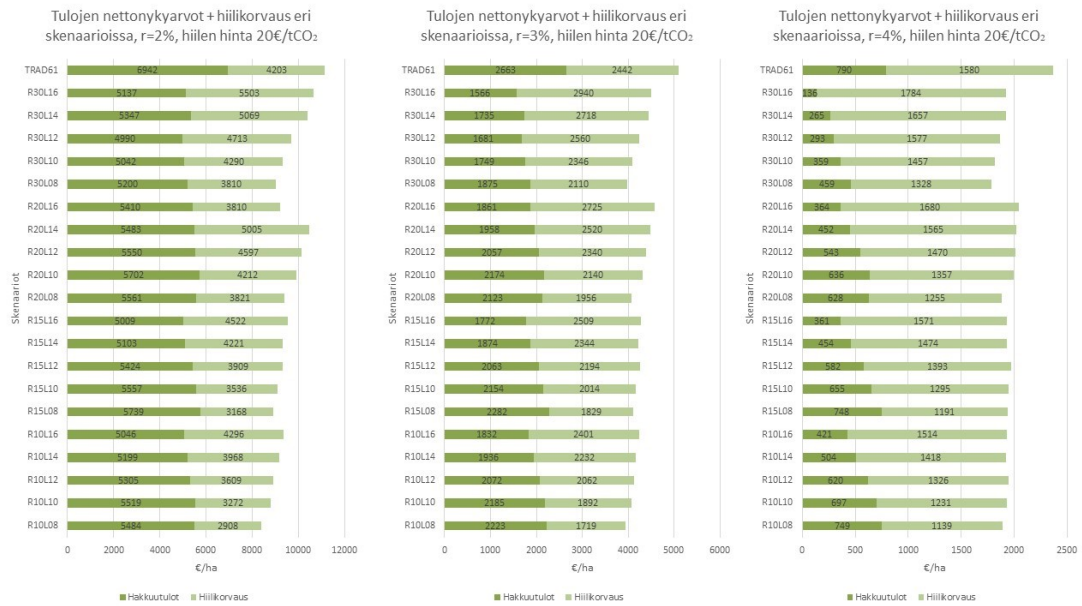
Kolmanneksi tutkittiin korkokannan vaikutusta eri skenaarioiden tuottamien tulojen nettonykyarvoon ilman hiilikorvausta. Kun korkokantana käytettiin 3 %, osoittautui jaksollisen metsänkasvatuksen menetelmä (TRAD61) selkeästi taloudellisesti kannattavimmaksi skenaarioksi. Toiseksi kannattavin skenaario oli R15L04 viidentoista vuoden kiertoajalla ja 4 m²ha⁻¹ hakkuun jälkeisellä puuston pohjapinta-alalla. Näiden kahden parhaan skenaarion välillä oli 221 euroa, eli R15L04 oli tulokseltaan 8,3 % heikompi kuin TRAD61. Tuloksia on kuvattu kuviossa 10.



Kuvio 10. Tulojen nettonykyarvot euroissa eri skenaarioissa, kun käytetyt korkokannat ovat 2 %, 3 % ja 4 %. Taulukossa kirjaimen R jälkeen on ilmoitettu käytetty hakkuuintervalli ja kirjaimen L jälkeen hakkuun jälkeisen puuston pinta-ala. Alimpana skenaario TRAD61 kuvaa jaksollista metsänhoitomenetelmää.

Kun korkokantana käytettiin 2 %, oli jatkuvapeitteisen metsänhoidon menetelmän skenaario TRAD61 vielä selkeämmin jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen skenaarioita kannattavampaa taloudellisesti. Skenaarion TRAD61 tuottama nettotulo oli 15 % korkeampi kuin parhaan jatkuvapeitteisen kasvatuksen skenaarion R15L04 nettotulo. Erot jatkuvapeitteisen kasvatuksen skenaarioiden välillä tasoittuivat pieniksi nettonykyarvojen vaihdellessa 4 900 €/ha ja 5 911 €/ha välillä. Kun korkokanta nostettiin 4 %:iin nousi skenaario R15L04 selkeästi skenaarioista kaikkein kannattavimmaksi jättäen jaksollisen kasvatuksen skenaarion 10 % nettonykyarvoltaan heikommaksi. Lisäksi erot jatkuvapeitteisen kasvatuksen skenaarioissa nousivat merkittävästi tuottavimman skenaarion ollessa 882 €/ha ja heikoin skenaario vain 136 €/ha.

Neljänneksi tarkasteltiin eri skenaarioiden tuottamia nettonykyarvoja, kun korkokantaa vaihdeltiin edellä kuvatulla tavalla ja metsän sitomasta hiilidioksidista maksettiin päästöoikeuskaupan hinta 20 €/tCO₂, joka vastaa lyhyen aikavälin hiilikorvausjärjestelmän korvaushintaa 0,59 €/tCO₂. Aluksi käytettiin jälleen korkokantaa 3 %, jolloin TRAD61 oli taloudellisesti kannattavin vaihtoehto 5 105 euron nettonykyarvolla. Toiseksi paras vaihtoehto R20L16 4 586 euron nettonykyarvolla oli jaksollisen menetelmän skenaariota 10 % heikompi. Huomionarvoista on se, että huomioitaessa myös hiilikorvauksen tuomat tulot metsänomistajalle muuttui jatkuvapeitteisten skenaarioiden joukossa kannattavimmaksi vaihtoehto, jossa kiertoaika oli pidempi (30>15) ja hakkuiden jälkeisen puuston pohjapinta-ala suurempi (16>4). Tulokset on kuvattu kuviossa 11.

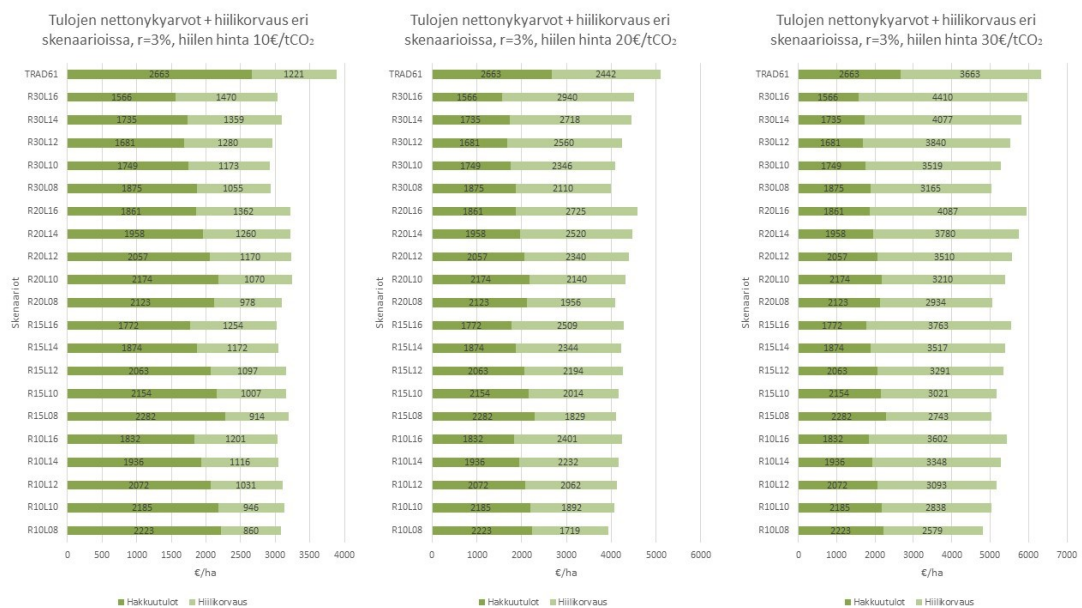


Kuvio 11. Puun myyntitulojen ja hiilikorvausten nettohyödykkeet euroissa korkokannoilla 2 %, 3 % ja 4 % ja päästöoikeushinnalla 20 €/tCO₂ eri skenaarioissa.

Kun korkokanta laskettiin 2 %:n osoittautui skenaario TRAD61 edelleen kannattavimmaksi 11 145 euron nettohyödykkeellään. Toiseksi paras skenaario oli R30L16 ja kolmanneksi paras R20L14. Hiilikorvaus teki siis pitkät kiertajat ja pienemmät hakkuumäärät kannattavimmiksi. Korkokannalla 4 % oli TRAD61 jälleen kannattavin nettohyödykkeellä 2 370 euroa. Toiseksi parhaiten menestyi skenaario R20L16 2 044 euron nettohyödykkeellä. Heikoin tulos oli skenaariossa R30L08 1 787 euroa, mikä oli kannattavinta skenaariota 25 % heikompi.

Tärkeä havainto kuvista 11 on se, että hiilikorvauksen mukaan tuominen kasvattaa metsänomistajan tulojen nettohyödykettä huomattavasti kaikilla korkokannoilla. Lisäksi huomataan, että hiilikorvauksen suhteellinen osuus tulojen kokonaismäärästä on huomattavan suuri. Tätä puunmyyntitulojen ja hiilikorvauksen suhdetta kuvastaa hyvin jaksollisen kasvatuksen skenaarion tulojakaumat [hakkuutulot/hiilikorvaus] korkokannalla 2 % [62 %/38 %], 3 %:lla [52 %/48 %] ja 4 %:lla [33 %/67 %]. Muissakin skenaarioissa kehitys on vastaavan suuntaista. Huomionarvoista on myös se, että korkokannan vaihtelu vaikutti siihen, mikä jatkuvapeitteisen kasvatuksen skenaarioista osoittautui kannattavimmaksi suhteessa muihin saman menetelmän skenaarioihin.

Lopuksi hiilikorvauksen hintaa vaihdeltiin pitäen korkokanta vakiona 3 %:ssa. Kun päästöoikeuskaupan hiilen hintana käytettiin 10 €/tCO₂ (0,30 €/tCO₂) oli jaksollisen metsänkasvatuksen menetelmä selkeästi kannattavampi kuin yksikään jatkuvapeitteisen kasvatuksen skenaarioista. Toiseksi paras skenaario R20L10 oli jopa 16 % TRAD61:stä heikompi. Hiilen hinnalla 20 €/tCO₂ (0,59 €/tCO₂) TRAD61 on edelleen kannattavin skenaario, mutta ero kannattavimpaan jatkuvapeitteisen menetelmän skenaarioon R20L16 on enää 10%. Kun hintaa nostettiin edelleen 30 €/tCO₂:n (0,89 €/tCO₂) oli jaksollisen kasvatuksen skenaario kannattavin ja toiseksi paras skenaario R30L16 oli vain 6 % heikompi. Mitä korkeampi hiilenkorvaushinta, sitä suurempi osuus kokonaistuloista muodostui hiilikorvauksesta. Hiilen hinnalla 30 €/tCO₂ (0,89 €/tCO₂) skenaariossa TRAD61 hiilikorvauksen osuus kokonaistuloista oli jo 58 %. Näitä tuloksia kuvataan kuviossa 12.



Kuvio 12. Puun myyntitulojen ja hiilikorvausten nettonykyarvot eri skenaarioissa korkokannalla 3 % ja päästöoikeushinnoilla 10, 20 ja 30 €/tCO₂.

Jälleen huomion arvoista on se, että hinnan vaihtelulla oli vaikutus siihen, mikä jatkuvapeitteisen kasvatusmenetelmän skenaarioista osoittautui kannattavimmaksi suhteessa saman kasvatusmenetelmän skenaarioihin. Hinnan vaihtelu valituilla hinnoilla ei syrjäyttänyt jaksollisen kasvatuksen skenaariota kannattavimpana skenaariona. Jatkuvapeitteisen kasvatuksen vaihtoehdoista skenaario R30L16 vaihtui jaksollisen kasvatuksen skenaariota TRAD61 kannattavimmaksi vasta hiilen hinnalla

44,05 €/tCO₂ (1,30 €/tCO₂). Mitä suuremmaksi hiilen hintaa nostettiin, sitä suuremmaksi hiilikorvauksen osuus metsänomistajan kokonaistuloista muodostui.

8 TULOSTEN VERTAILU AIKAISEMPIIN TUTKIMUKSIIN

Saadut tulokset poikkeavat ainakin Assmuth'n ym. (2018) saamista tuloksista. Tässä tutkielmassa käytetty lyhyen aikavälin hiilikorvausmenetelmä kuitenkin poikkeaa Assmuth'n ym. käyttämästä pitkän aikavälin hiilikorvausmenetelmästä. Lisäksi on huomioitava, että Assmuth ym. (2018) käyttivät optimointia ja tässä tutkielmassa on tutkittu aihetta skenaarioiden avulla. Heidän saamiensa tulosten mukaan kannattaa menetelmää vaihtaa jaksollisesta jatkuvapeitteiseen, kun korkokanta on 2 % ja kun hiilen hinta on 30 €/tCO₂⁻¹. Mikäli korkokantana käytetään 4 % niin jatkuvapeitteinen kasvattaminen on kannattavaa jo hiilen hinnalla 0 €/tCO₂⁻¹.

Parkatin ym. (2019) saamien tulosten mukaan myös metsän lähtötilanteella on merkitystä siihen, mikä metsänkasvatusmenetelmä on kannattavin. Lähtötilanne vaikuttaa siihen, kuinka pitkin kiertoajoin ja kuinka monen kiertoajan jälkeen kannattaa siirtyä kasvatusmenetelmästä toiseen. Tässä tutkielmassa metsän lähtötilanteeksi valittiin paljas maa. Mikäli lähtötilanteeksi olisi valittu varttunut metsä, jossa olisi jo valmiiksi eri ikäisiä ja kokoisia puita, olisi jatkuvapeitteinen kasvatusmenetelmä todennäköisesti osoittautunut kannattavammaksi jo alhaisilla korkokannoilla ja hiilen hinnoilla (Juutinen, 2018a).

Tulokset ovat saman suuntaisia kuin Juutisen ym. (2018b), joiden tuloksissa jaksollisen kasvatuksen menetelmällä käsitellyssä metsässä hiilikorvausjärjestelmän mukaan tuominen pidensi optimaalista metsän kiertoaikaa 25 vuodella. Tässä tutkielmassa saatujen tulosten mukaan jatkuvapeitteisten skenaarioiden joukossa parhaan nettonykyarvon tuotti skenaario R15L04 (korkokanta 3 %), kun hiilikorvausmekanismia ei otettu huomioon. Hiilikorvausmekanismi huomioitaessa nettonykyarvoltaan kannattavin jatkuvapeitteisen kasvatuksen skenaario oli R20L16 (korkokanta 3 %). Kannattavin kiertoaika piteni siis 15 vuodesta 20 vuoteen hiilikorvausmekanismin myötä. Kiertoajan piteneminen ei ollut yhtä voimakasta kuin Juutisen ym. (2018b) saamien tulosten mukaan, mutta on huomioitava, että Juutinen ym. Tutkivat jaksollisen kasvatuksen menetelmällä käsiteltä metsää ja tässä tutkielmassa keskityttiin jatkuvapeitteisen kasvatuksen tuloksiin. Lisäksi käytetyt skenaariot voivat vaikuttaa tähän tulokseen.

Juutinen ym. (2018b) myös painottivat, että hiilikorvausmekanismi nostaisi metsänkasvatuksen kannattavuutta, mikäli kaupankäyntikustannukset ovat pienet. Tässä tutkielmassa näitä kaupankäyntikustannuksia ei ole huomioitu kannattavuutta laskettaessa. Laskelmissa ei myöskään ole otettu kantaa hiilinielujen lisäisyysvaatimukseen. Juutisen ym. (2018b) mukaan lisäisyysvaatimus ei muuttanut optimaalista metsänhoitomenetelmää, mutta se heikensi huomattavasti metsänkasvatuksen taloudellista kannattavuutta verrattuna tilanteeseen, jossa metsänomistajille maksettiin hiilikorvauksia kaikseta sidotusta hiilestä.

9 YHTEENVETO

Tässä tutkielmassa on käsitelty jatkuvapeitteisen ja jaksollisen metsänkasvatuksen ominaisuuksia ja taloudellista kannattavuutta. Lisäksi on arvioitu metsänhoitomenetelmien vaikutuksia metsän hiilensidontaan ja tarkasteltu miten hiilikorvausmekanismi vaikuttaa metsänhoidon kannattavuuteen metsänomistajan näkökulmasta.

Ilmastonmuutoksen aiheuttama lämpötilojen nousu ja sademäärien lisääntyminen tehostavat metsien kasvua Suomessa. Tästä seuraa myös kasvava hakkuupotentiaali, jonka on arvioitu kasvavan Etelä-Suomessa 56 % ja Pohjois-Suomessa 168 %. Suomi on kokoonsa suhteutettuna metsäteollisuudesta riippuvaisin valtio koko maailmassa ja vuonna 2018 metsäteollisuuden ulkomaankauppa olikin 21 % Suomen koko 64 miljardin euron tavaraviennistä. Ilmastonmuutoksen ja siihen liitettyjen poliittisten hillintätoimien vaikutukset voivat siten voimakkaasti vaikuttaa koko Suomen talouteen.

Metsänhoitomallit ovat moninaisia ja tässä tutkielmassa halutaan korostaa, että menetelmiä ei ole vain kahta: jatkuvapeitteinen kasvatus ja sen vastakohtana jaksollinen kasvatusmenetelmä. Nämä kaksi mainittua menetelmää ovat vain asteikon ääripäät ja väliin jää laaja kirjo erilaisia menetelmiä, joissa hakkuumäärät ja hakkuun jälkeen jäljelle jäävän puustopeitteiden määrä vaihtelee. Jaksollisen ja jatkuvapeitteisen metsänhoidon tulo- ja menovirrat eroavat kuitenkin toisistaan oleellisesti. Jaksollisessa metsänhoidon menetelmässä tulot painottuvat voimakkaasti päätehakkuuseen, kun jatkuvapeitteisen metsänhoidon menetelmässä tulo- ja menovirrat toteutuvat paljon tasaisemmin.

Vaikka jaksollista metsänhoitomenetelmää on tutkittu taloudellisesta näkökulmasta laajasti, ei ole kuitenkaan varmuutta siitä, että jaksollinen metsänhoito tuottaa taloudellisesti parhaan tuloksen verrattuna muihin menetelmiin. Tämän vuoksi on kehitetty uusia malleja, joita ei ole rajoitettu tuottamaan vain jaksollisen menetelmän mukaisia tuloksia. Uusilla malleilla pyritään vastaamaan myös vaatimukseen ottaa huomioon luonnon monimuotoisuuden ylläpitäminen sekä ilmastonmuutoksen aiheuttamat riskit. Yksi tällainen uusi malli, jossa optimaalinen

metsänhoitomenetelmä määräytyy endogeenisesti, on Tahvosen malli, jonka mukaan päätehakkuu ei ole optimaalista, mikäli jatkuvasta harvennuksesta saatavat tulot ylittävät yhteenlasketut päätehakkuutulot ja paljaan maan arvon.

EU:n ilmastopolitiikassa metsät ja niiden kyky sitoa hiiltä esitetään tärkeänä keinona hillitä ilmastomuutosta. Tällä hetkellä metsät, maaperä ja meret ovat ainoita hiiltä sitovia mekanismeja, kunnes teollinen päästöjen sidonta kehittyy laajasti käytettäväksi keinoksi. Metsiin ja maaperään varastoitunutta hiilimäärää kutsutaan hiilivarastoksi. Kun hiilivarasto kasvaa ja hiiltä sitoutuu metsiin entistä enemmän, voidaan metsiä kutsua hiilinieluiksi. Jos taas hiiltä vapautuu enemmän kuin sitä sitoutuu, toimii metsä silloin hiilidioksidin ja metaanin lähteenä. Metsät voivat siis olla niiden käytöstä riippuen joko hiilinieluja tai päästölähteitä. EU:n LULUCF-asetuksella (*land use, land use change and forestry*) eli maankäyttö-, maankäytön muutos ja metsätalous -sektoria määräävällä asetuksella pyritään ohjaamaan jäsenmaita edistämään hiilivarastojensa ylläpitoa ja hiilinielujen kasvattamista.

Hiilikorvausmekanismi, jossa metsänomistajalle maksetaan hiilivaraston kasvattamisesta metsässään, perustuu taloustieteelliselle teorialle päästövähennyksestä yritykselle koituvan rajakustannuksen ja päästöistä yhteiskunnalle koituvan rajahaitan yhteensovittamisesta sekä hiilidioksidipäästöjen päästöoikeusyksikön hinnan muodostumisesta päästöoikeusmarkkinoilla. Erilaisia mekanismeja on myös tutkittu teoreettisesti ja on huomattu, että järjestelmän toimivuuteen ja kannattavuuteen vaikuttavat esimerkiksi se, onko järjestelmä vuokra- vai ostoperusteinen, mikä on transaktiokustannusten taso, mikä on hiilen hintataso sekä mikä on valittu diskonttaus korko. Käytännössä hiilikorvausmekanismit eivät ole vielä tähän mennessä onnistuneet tavoitteissaan, sillä niiden osallistumiskustannukset ovat nousseet korkeiksi ja järjestelmien vapaaehtoisuutta on käytetty hyväksi sanktioiden välttelyssä.

Tämän tutkielman empiirisen osion oleellisia havaintoja ovat, että puun hakkuukertymissä olevat erot jaksollisen ja jatkuvapeitteisen kasvatuksen skenaarioissa ovat suhteellisen pieniä, mutta jaksollisella menetelmällä hakkuut ovat suurempia kuin missään jatkuvapeitteisen menetelmän skenaariossa. Vuotuinen keskimääräinen hiilivarasto 61 vuoden tarkastelujaksolla oli jaksollisen kasvatuksen

skenaariossa lähes samalla tasolla kuin parhaassa jatkuvapeitteisen kasvatuksen skenaariossa. Lisäksi huomattiin, että korkokannan vaihtelulla oli merkittävä vaikutus puun myyntitulojen nettohyötyihin sekä eri skenaarioiden suhteellisiin eroihin. Jaksollinen kasvatusta oli selkeästi kannattavampaa 2 %:n ja 3 %:n korkokannoilla, mutta 4 %:n korkokannalla jatkuvapeitteisen kasvatuksen skenaario R1504 vaihtui kannattavimmaksi metsänhoitomenetelmäksi. Kun lyhyt aikainen hiilikorvausmekanismi otettiin mukaan tarkasteluun, ei korkokannan vaihtelu muuttanut jaksollisen kasvatuksen asemaa kannattavimpana menetelmänä. Korkokannalla oli kuitenkin huomattava vaikutus hakkuutulojen ja hiilikorvaustulojen suhteellisiin osuuksiin kokonaistuloista. Mitä korkeampi korkokanta oli, sitä suuremmaksi hiilikorvauksen osuus kasvoi. Myöskään hiilen hinnan vaihtelu 10 €/tCO₂, 20 €/tCO₂ ja 30 €/tCO₂ välillä ei horjuttanut jaksollisen kasvatuksen skenaarion asemaa kannattavimpana. Jatkuvapeitteisen menetelmän skenaario vaihtui kannattavammaksi vasta hiilen hinnalla 44,05 €/tCO₂. Hinnan vaihtelulla kuitenkin oli samanlainen vaikutus hakkuutulojen ja hiilikorvaustulojen suhteellisiin osuuksiin kokonaistuloista, kuin korkokannan vaihtelullakin. Hiilikorvausmekanismin hyödyntäminen kasvatti metsänomistajan tulojen nettohyötyä merkittävästi kaikissa skenaarioissa.

LÄHTEET

- Act4Planet (2020). Metsien hiilinielut – avainasemassa ilmastotavoitteiden saavuttamisessa! Haettu osoitteesta: https://www.act4planet.fi/epages/Act4planet.sf/fi_FI/?ObjectPath=/Shops/2019042002/Categories/Act4Planet
- Asikainen, A., Viiri, H., Neuvonen, S., Nevalainen, S., Lintunen, J., Laturi, J., Uusivuori, J., Venäläinen, A., Lehtonen, I., Ruosteenoja, K. (2019). Ilmastonmuutos ja metsätuhot – Analyysi ilmaston lämpenemisen seurauksista Suomessa. Suomen Ilmastopaneelin raportti.
- Asikainen, A., Ilvesniemi, H., Sievänen, R., Vapaavuori, E., & Muhonen, T. (toim.) (2012). Bioenergia, ilmastonmuutos ja Suomen metsät. Metlan työraportteja 240. Haettu osoitteesta: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp240.htm>
- Assmuth, A. (2020). Seminaariesitys (*Jatkuvapeitteisen metsänhoidon taloudesta* seminaarissa *Riittääkö puuta kaikille?* Lapin Yliopisto. Rovaniemellä 17.01.2020.
- Assmuth, A., Rämö, J. & Tahvonen, O. (2018). Economics of size-structured forestry with carbon storage. *Canadian Journal of Forest Research* 48, 11–22. Doi:10.1139/cjfr-2017-0261
- Assmuth, A. & Tahvonen, O. (2018). Optimal carbon storage in even- and uneven-aged forestry. *Forest Policy and Economics* 87, 93–100. Doi: 10.1016/j.forpol.2017.09.004
- CO₂Esto (2020). Miten CO₂-päästöleikkuri toimii? Haettu osoitteesta: <https://co2esto.com/co2-paastoleikkuri/yksityisille>
- Cubasch, U., Wuebbles, D., Chen, D., Facchini, M. C., Frame, D., Mahowald, N. & Winther, J.-G. (2013). Introduction. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ember (2020). EUA Price. Haettu osoitteesta: <https://ember-climate.org/carbon-price-viewer/>
- Ernst & Young Oy, (2017). *Metsäteollisuuden toimialakatsaus. Verokertymä, työllistävä vaikutus ja arvonmuodostus*. Haettu osoitteesta: https://www.metsateollisuus.fi/uploads/2017/11/24153855/Mets%C3%A4teollisuus-ry_taloudjalanjalki_1120171.pdf
- Gane, M. (editor) & Linnard, W. (transl.), (1968). Martin Faustmann and the Evolution of Discounted Cash Flow: Two Articles from the Original German of 1849. Commonwealth Forestry Institute, University of Oxford, Institute paper 42. From the original article Faustmann, M. (1849). Berechnung des Wertes welchen

Waldboden sowie noch nicht haubare Holzbestände für die Waldwirtschaft besitzen. Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung, 15.

Haapanen, L. (2019). Hampurilainen, matka, lounas – ostosten päästöjä voi hyvittää, mutta yrityksiltä vaaditaan läpinäkyvyyttä: ”Tilanne on villi länsi”. Yle. Haettu osoitteesta: <https://yle.fi/aihe/artikkeli/2019/12/31/hampurilainen-matka-lounas-ostosten-paastoja-voi-hyvittaa-mutta-yrityksilta>

Hannonen, P. (2020). Aloite on nyt jätetty eduskuntaan – näin voit auttaa sitä eteenpäin. Avohakkuut historiaan! Haettu osoitteesta: <http://avohakkuuthistoriaan.fi/index.php/2019/10/30/aloite-on-nyt-jatetty-eduskuntaan-nain-voit-auttaa-sita-eteenpain/>

Hartman, R. (1976). The Harvesting Decision When a Standing Forest Has Value. *Economic Inquiry* 14, 52-58. doi: 10.1111/j.1465-7295.1976.tb00377.x

Hiilipörssi (2020). Miksi suo? Haettu osoitteesta: <https://hiiliporssi.fi/miksi-suo/>

Hyytinen, T. (2019). Uusista sellutehtaista juostaan kilpaa – kiinalaiset ratkaisevat, montako uutta tehdasta Suomeen mahtuu. Yle Uutiset 31.8.2019. Haettu osoitteesta: <https://yle.fi/uutiset/3-10946009>

IBC-Carbon (2019). Työpaketti 5: Metsänomistajille suunnatun korvausjärjestelmän kehittäminen. Haettu osoitteesta: https://www.ibccarbon.fi/fi-FI/Tyopaketit/Tyopaketti_5

Ilmastoapu (2018). Tietoa meistä. Haettu osoitteesta: <https://www.ilmastoapu.fi/yleist-tietoa/tietoa-meist>

Ilmasto-opas (2020). Hiilinieluista huolehtiminen. Haettu osoitteesta: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/7c821f90-9605-4f9d-827b-894301c1e009/hiilinieluista-huolehtiminen.html>

IPCC, (2013). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, (2018). Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.

- Istutapuita.fi (2020). Osta puita. Haettu osoitteesta: <https://istutapuita.fi/osta-puita/>
- Juutinen, A., Ahtikoski, A., Mäkipää, R. & Shanin, V. (2018a). Effect of harvest interval and intensity on the profitability of uneven-aged management of Norway spruce stands. *Forestry* 00, 1–14.
- Juutinen, A., Ahtikoski, A., Lehtonen, M., Mäkipää, R. & Ollikainen, M. (2018b). The impact of short-term carbon payment scheme on forest management. *Forest Policy and Economics* 90, 115-127. doi: 10.1016/j.forpol.2018.02.005
- Juutinen, A., Ahtikoski, A., Rämö, J. (2020). Puuntuotannon kannattavuuteen vaikuttavat tekijät jatkuvapuiteisessä metsänkasvatuksessa. *Metsätieteen aikakauskirja*: artikkeli id 10313. Haettu osoitteesta: <https://metsatieteenaikakauskirja.fi/article/10313>
- Kansallinen metsäohjelma 2015, (2008). Lisää hyvinvointia monimuotoisista metsistä – Valtioneuvoston periaatepäätös. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 3/2008.
- Kansallinen metsästrategia 2025, (2015). Valtioneuvoston periaatepäätös 12.2.2015. Maa- ja metsätalousministeriö 6/2015.
- Karbonautti (2018). Näin toimimme. Haettu osoitteesta: <https://www.karbonautti.com/our-story>
- Kasanen, M. (2011). Yksityismetsänomistajien valinnat metsänhoidossa 2000-luvun Suomessa. Oulun Yliopisto, Humanistinen tiedekunta, Acta Univ. Oul.
- Kellomäki, S., Strandman, H., Nuutinen, T., Peltola, H., Korhonen, K.T. & Väisänen, H. (2005). Adaptation of forest ecosystems, forests and forestry to climate change. FINADAPT Working Paper 4. *Finnish Environment Institute Mimeographs* 334, Helsinki.
- Kellomäki, S., Peltola, H., Nuutinen, T., Korhonen, K. & Strandman, H. (2008). Sensitivity of managed boreal forests in Finland to climate change, with implications for adaptive management. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 363, 2341–2351. Doi: 10.1098/rstb.2007.2204
- Koistinen, A., Matila, A. & Lahti, E. (2017). Metsälakiuudistus käytännön metsätalouden kannalta. Tapion raportteja nro 18. Haettu osoitteesta: <https://tapio.fi/wp-content/uploads/2019/10/Metsalakiuudistus-raportti.pdf>
- Komarov, A., Chertov, O., Zudin, S., Nadporozhskaya, M., Mikhailov, A., Bykhovets, S., Zudina, E. & Zoubkova, E. (2003). EFIMOD 2 – a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems. *Ecological Modelling* 170, 373–392.
- Kuuluvainen, J. & Valsta, L. (2009). *Metsäekonomian perusteet*. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press Oy Yliopistokustannus, HYY Yhtymä.

- Kuuluvainen, T., Tahvonen, O. & Aakala, T. (2012). Even-Aged and Uneven-Aged Forest Management in Boreal Fennoscandia: A Review. *Ambio* 41, 720–737. Doi: 10.1007/s13280-012-0289-y
- Lintunen, J., Laturi, J. & Uusivuori, J. (2016). How should a forest carbon rent policy be implemented? *Forest Policy and Economics* 69, 31–39. Doi: 10.1016/j.forpol.2016.04.005
- Luonnonvarakeskus (2012). *Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL) -tutkimusohjelman loppuraportti*. Metsät ja ilmastonmuutos: MIL-tutkimusohjelmasta uutta tietoa. Haettu osoitteesta: <http://www.metla.fi/ohjelma/mil/loppuraportti.htm>
- Luonnonvarakeskus (2016a). *Metsät ja ilmastonmuutos*. Haettu osoitteesta: <https://www.luke.fi/tietoa-luonnonvaroista/metsa/metsat-ja-ilmastonmuutos/>
- Luonnonvarakeskus (2016b). *Metsänuudistaminen*. Haettu osoitteesta: <https://www.luke.fi/tietoa-luonnonvaroista/metsa/metsanhoito/uudistaminen/>
- Luonnonvarakeskus (2016c). *Metsäpolitiikka*. Haettu osoitteesta: <https://www.luke.fi/tietoa-luonnonvaroista/metsa/metsapolitiikka/>
- Luonnonvarakeskus (2019). *Puun tuontimäärä kasvoi selvästi vuonna 2018*. Haettu osoitteesta: <https://www.luke.fi/uutinen/puun-tuontimaara-kasvoi-selvasti-vuonna-2018/>
- Luonnonvarakeskus (2020). Kasvihuonekaasuinventaarion pikaennakkotiedot 2019: hakkuiden väheneminen kasvatti LULUCF-sektorin nielua, maataloussektorin päästö ennallaan. Haettu osoitteesta: <https://www.luke.fi/uutinen/kasvihuonekaasuinventaarion-pikaennakkotiedot-2019-hakkuiden-vaheneminen-kasvatti-lulucf-sektorin-nielua-maataloussektorin-paasto-ennallaan/>
- Maa- ja metsätalousministeriö (2020a). *Metsäteollisuus Suomessa*. Haettu osoitteesta: <https://mmm.fi/metsat/puun-kaytto/metsateollisuus-suomessa>
- Maa- ja metsätalousministeriö (2020b). *Maankäyttösektorin sisällyttäminen EU:n ilmastotavoitteisiin*. Haettu osoitteesta: <https://mmm.fi/lulucf>
- Maa- ja metsätalousministeriö (2020c). *Metsien hiilinielut*. Haettu osoitteesta: <https://mmm.fi/luonto-ja-ilmasto/energia-ja-ilmastopolitiikka/eu-energia-ja-ilmastopolitiikka/metsien-hiilinielut>
- Marttila, V., Granholm, H., Laanikari, J., Yrjölä, T., Aalto, A., Heikinheimo, P., Honkatuki, J., Järvinen, H., Liski, J., Merivirta, R. & Paunio, M. (2005). Ilmastonmuutoksen kansallinen sopeutusstrategia. *Vammalan Kirjapaino Oy*, Vammala.
- Metsälaki 12.12.1996/1093. Haettu: <https://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1996/19961093#L2P8>

- Metsäteollisuus (2018). Tilastot. Metsäteollisuuden viennin arvo oli 2018 kaikkien aikojen korkein. Haettu osoitteesta: <https://www.metsateollisuus.fi/tilastot/metsateollisuus/>
- Ministry of Agriculture and Forestry, Natural Resources Institute Finland (2019). *National Forestry Accounting Plan for Finland*. Haettu osoitteesta: <https://www.luke.fi/wp-content/uploads/2019/12/NFAP-for-Finland-20-December-2019.pdf>
- Niemistö, J., Soimakallio, S., Nissinen, A. & Salo, M. (2019). *Lentomatkustuksen päästöt. Suomen Ympäristökeskuksen raportteja 2*, 2019. S. 25–26. Haettu osoitteesta: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/292417/SYKEra_2_2019.pdf?sequence=6&isAllowed=y
- Niiranen, P. (2020). Valtio kaavailee tukea hiilinielua lisääville metsänomistajille – kymmenet yritykset myyvät jo päästöjen kompensatioita. *Yle Uutiset* 7.2.2020. Haettu osoitteesta: <https://yle.fi/uutiset/3-11194812>
- Niskanen, A., Donner-Amnell, J., Häyrynen, S. & Peltola, T. (2008). Metsän uusi aika – kohti monipuolisempaa metsäalan elinkeinorakennetta. *Joensuun Yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta, Silva Carelica* 53.
- Nordic Offset (2020). *Tietoa päästökaupasta*. Haettu osoitteesta: <https://nordicoffset.fi/tietoa-paastokaupasta/>
- Nurmi, V. & Ollikainen, M. (2019). Kohti hiilipörssiä? Suomessa esitetyt hiilipörssiin liittyvät aloitteet tutkimuskirjallisuuden ja kansainvälisten kokemusten valossa. *Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:17*.
- Parkatti, V-P., Assmuth, A., Rämö, J. & Tahvonen, O. (2019). Economics of boreal conifer species in continuous cover and rotation forestry. *Forest Policy and Economics* 100, 55–67.
- Parviainen, J. & Seppänen, P. (1994). *Metsien ekologinen kestävyys ja metsänkasvatusvaihtoehdot*. Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja 511.
- 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. Doi: 10.1016/j.biocon.2017.10.018
- Pukkala T. (2016). Which type of forest management provides most ecosystem services? *Forest Ecosystems* 3 article 9. Doi.org/10.1186/s40663-016-0068-5.
- Pukkala, T. (2020). At what carbon price forest cutting should stop. *Journal of Forest Research*. Doi: 10.1007/s11676-020-01101-1

- Puuinfo (2020). Puuston kasvu ja käyttö. Haettu osoitteesta: <https://www.puuinfo.fi/puutieto/suomen-mets%C3%A4t/puuston-kasvu-ja-k%C3%A4ytt%C3%B6>
- Seppälä, J., Kanninen, M., Vesala, T., Uusivuori, J., Kalliokoski, T., Lintunen, J., Saikku, L., Korhonen, R. & Repo, A. (2015). Metsien hyödyntämisen ilmastovaikutukset ja hiilinielujen kehittyminen. Suomen Ilmastopaneelin raportti. Haettu osoitteesta: <https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2018/10/Metsien-hyodyntamisen-ilmastovaikutukset-ja-hiilinielujen-kehittyminen.pdf>
- Seppälä, J., Savolainen, H., Sironen, S., Soimakallio, S. & Ollikainen, M. (2019a). Päästövähennyspolku kohti hiilineutraalia Suomea – hahmotelma. Haettu osoitteesta: https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2019/10/Suomen-p%C3%A4%C3%A4st%C3%B6v%C3%A4hennyspolku_final.pdf
- Seppälä, J., Saikku, L., Soimakallio, S., Lounasheimo, J., Regina, K. & Ollikainen, M. (2019b). Hiilineutraalius ilmastopolitiikassa – valtiot, alueet ja kunnat. Suomen Ilmastopaneelin raportti 5/2019. Haettu osoitteesta: https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2019/09/Hiilineutraalius_ilmastopaneeli_2019_FINAL.pdf
- Suomen luonnonsuojeluliitto (2019). Avohakkuut historiaan – kampanja eteni seuraavaan vaiheeseen. Haettu osoitteesta: <https://www.sll.fi/2019/03/22/avohakkuut-historiaan-kampanja-eteni-seuraavaan-vaiheeseen/>
- Suomen Metsäyhdistys (2019): Jaksollinen metsänkasvatus (periodic cover silviculture). Haettu osoitteesta: <https://smy.fi/sanasto/jaksollinen-metsankasvatus-periodic-cover-silviculture/>
- Suomen virallinen tilasto (SVT) (2019). Metsämaan omistus. Luonnonvarakeskus. Haettu osoitteesta: <https://stat.luke.fi/metsamaan-omistus>
- Suomen virallinen tilasto (SVT) (2020). Energian hankinta ja kulutus [verkkojulkaisu]. ISSN=1799-795X. 4. Vuosineljännes 2019. Helsinki: Tilastokeskus. Haettu osoitteesta: http://www.stat.fi/til/ehk/2019/04/ehk_2019_04_2020-04-17_tie_001_fi.html
- Tahvonen, O. (1999). Faustmannin kiertoaikamallista ja sen yleistyksistä. *Metsätieteen aikakauskirja* 3, 544–548.
- 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
- Tahvonen, O. (2015). Economics of Naturally Generating, Heterogenous Forests. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economics* 2, 309-337. doi: 10.1086/681587

- Tahvonen, O. & Rämö, J. (2016a). Optimality of continuous cover vs. clear-cut regimes in managing forest resources. *Canadian Journal of Forest Research* 46(7), 891–901. Doi: 10.1139/cjfr-2015-0474
- Tahvonen, O. (2016b). Economics of rotation and thinning revisited: the optimality of clearcuts versus continuous cover forestry. *Forest Policy and Economics* 62, 88–94.
- TEM (2018). *Toimialaraportit – Puutuoteteollisuus*. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisu 37/2018. Haettu osoitteesta: <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161135/Toimialaraportit%20-%20Puutuoteteollisuus.pdf>
- Uusivuori, J. & Laturi, J. (2007). Carbon rentals and silvicultural subsidies for private forests as climate policy instruments. *Canadian Journal of Forest Research* 37, 2541–2551. Doi: 10.1139/X07-071
- Ruosteenoja, K., Jylhä, K. & Kämäräinen, M. (2016). Climate Projections for Finland Under the RCP Forcing Scenarios. *Geophysica* 51, 17–50.
- Valkonen, S. (2017). *Metsän jatkuvasta kasvatuksesta*. Metsäkustannus Oy.
- Valtioneuvosto, 2019. Pääministeri Sanna Marinin hallituksen ohjelma 10.12.2019. Valtioneuvoston julkaisu 2019:31. Haettu osoitteesta: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-808-3>
- Äijälä, O., Koistinen, A., Sved, J., Vanhatalo, K. & Väisänen, P. (toim.) (2014). *Metsänhoidon suositukset. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisuja*.
- Äijälä, O., Koistinen, A., Sved, J., Vanhatalo, K. & Väisänen, P. (toim.) (2019). *Metsänhoidon suositukset. Tapion julkaisuja*.