

Ilmastopaneeli

METSIEN HYÖDYNTÄMINEN JA ILMASTONMUUTOKSEN
HILLINTÄ

Toimittaneet

Jyri Seppälä¹, Timo Vesala² ja Markku Kanninen²

¹ Suomen ympäristökeskus

² Helsingin yliopisto

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	6
JOHDANTO	7
OSA 1: ASIAANTUNTIJAKYSELY METSIEN HYÖDYNTÄMISEN ILMASTOVAIKUTUKSISTA – KYSELYASETELMA JA VASTAUSTEN YHTEENVETO	9
Laura Saikku	
1. JOHDANTO	9
2. METSIEN KÄYTÖN LISÄÄMISEN/VÄHENTÄMISEN JA KEINOT.....	9
2.1 Metsien käyttöä pitää lisätä ilmastosyistä	9
2.2 Metsien käyttöä pitää lisätä muista syistä	11
2.3 En osaa sanoa	12
2.4 Metsien ilmastovaikutus kasvaa metsien käytön myötä	13
3. METSIEN HIILINIELUT JA KANSAINVÄLISET PÄÄSTÖVÄHENNYKSET.....	16
3.1 Ei pitäisi muuttaa.....	16
3.2 Pelisäännöstöä tulisi muuttaa.....	16
3.3 Ei osaa sanoa	17
4. PUUN ENERGIANKÄYTÖN CO2-PÄÄSTÖJEN PELISÄÄNNÖSTÖ KANSAINVÄLISESSÄ ILMASTOSOPIMUKSESSA	17
4.1 Tulee säilyttää nykyisenä	17
4.2. Tulee muuttaa.....	18
5. TÄRKEIMMÄT TUTKIMUSTARPEET	18
5.1 Kokonaisvaltaiset metsien käytön ilmastovaikutukset	18
5.2 Luonnontieteellisten perusteiden tutkimus	18
5.3 Metsien käytön yhteiskunnallinen optimointi	19
5.4 Ohjauskeinot ja politiikka.....	19
5.5 Globaalit näkökohdat	19
5.6. Metsien kasvun lisääminen metsänhoidolla	20
5.7 Muut	20
6. JOHTOPÄÄTÖKSET.....	20
KIRJALLISUUTTA	22

OSA 2: MITÄ METSÄMALLIT KERTOIVAT SUOMEN METSIEN HIILINIELUN TULEVASTA KEHITYKSESTÄ?.....25

Tuomo Kalliokoski ja Anna Repo

TIIVISTELMÄ.....25

1. JOHDANTO – MALLIEN TYPOLOGIAA JA KESKEISIÄ ELEMENTTEJÄ26

2. METSIEN KASVUA KUVAAVAT MALLIT26

2.2 MELA.....26

2.2 EFISCEN27

2.3 SIMA.....27

2.4 FinnFor – Puuston kasvun ilmastovastemalli28

2.5 Muita puuston ja metsien kasvu kuvaavia malleja.....29

3. ILMASTONMUUTOSSKENAARIOT30

4. TUTKIMUSTEN PÄÄTULOKSET31

4.1 Ilmastonmuutoksen ja metsän käsittelyn vaikutus puiden kasvuun ja metsien hiilivarastoon.....31

4.2 Ilmastonmuutoksen ja metsien käsittelyn suhteellinen vaikutus.....34

4.3 Metsähakkeen energiakäytön lisäämisen vaikutukset hiilinieluun.....35

4.4 Metsähakkeen energiakäytön päästöt35

4.5 Ojitettujen soiden hiilitase.....37

4.6 Metsien muut ilmastovaikutukset38

5. EPÄVARMUUKSISTA38

5.1 Epävarmuus metsien käyttöskenaarioissa38

5.2 Epävarmuus kasvun muutoksen ennusteissa38

5.3 Epävarmuus hiilivaraston muutoksissa40

5.4 Epävarmuus metsissä esiintyvistä häiriöistä muuttuneessa ilmastossa41

6. JOHTOPÄÄTÖS.....42

KIRJALLISUUS43

LIITE 1 Mallinnustutkimusten läpikäymiseen käytetyt kysymykset, sekä vastaukset kysymyksiin kustakin tutkimuksesta.....51

**OSA 3: TALOUSTIETEELLISEN MALLINNUKSEN ROOLI METSIIN JA METSIEN KÄYTTÖÖN
KOHDISTUVIEN ILMASTONMUUTOKSEN HILLINTÄTOIMIEN ARVIOINNISSA 53**

Jussi Lintunen ja Jussi Uusivuori

TIIVISTELMÄ.....	53
1. JOHDANTO	54
2. TALOUSTIETEELLISEN OSION ROOLI ENNUSTEMALLEISSA.....	55
3. KUSTANNUS-HYÖTYANALYYSI JA OHJAUSKEINOT.....	56
4. METSÄT JA ILMASTONMUUTOKSEN HILLINTÄ	57
KIRJALLISUUS.....	59

ALKUSANAT

Suomen ilmastopaneeli edistää tieteen ja politiikan välistä vuoropuhelua ilmastokysymyksissä. Se antaa suosituksia ilmastopoliittiseen päätöksentekoon ja vahvistaa monitieteellistä näkemystä eri sektoreiden toiminnassa. Paneelin tehtävänä on arvioida ilmastopoliitiikan johdonmukaisuutta ja toimenpiteiden riittävyyttä. Tärkeä osa paneelin työtä on edistää ja käydä yhteiskunnallista keskustelua ilmastokysymyksistä. Käsillä oleva raportti vastaa tähän haasteeseen. Se kokoaa tärkeän tietopaketin toimista, joilla edistetään yhteiskunnan siirtymistä kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa. Aineiston toivotaan palvelevan eri yhteiskunnan osapuolten tietotarvetta ilmastonmuutoksen hillinnässä ja synnyttävän uusia aloitteita ja ratkaisuja kestävänsä metsätalouden alueella.

Aineiston tuottamisessa on ollut keskeisessä roolissa joukko suomalaisia asiantuntijoita, jotka ovat asiantuntevalla panoksellaan selvittäneet ilmastopaneelin kantaa tähän osa-alueeseen. Ilmastopaneeli kiittää heitä tehdystä työstä. Kiitokset ansaitsevat myös aihealueen työpajaan osallistuneet asiantuntijat, jotka antoivat arvokkaita näkemyksiä selvitystyön eri osa-alueisiin.

Suomen ilmastopaneeli 29.11.2015

JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen hillintä vaatii voimakkaita toimia lähivuosikymmeninä. Aina viime vuoteen asti globaalit kasvihuonekaasupäästöt ovat lisääntyneet vuosi vuodelta. Vuonna 2014 CO₂-päästöjen kasvun arvioitiin pysähtyneen (Oliver ym. 2015). Tällä hetkellä on kuitenkin epäselvää kuinka pysyvästä muutoksesta on kyse. Muutos olisi tarpeen, sillä haasteena on saada päästöt laskemaan riittävän nopeasti globaalilla tasolla samalla kun kehittyvät taloudet ja kehitysmaat varaustuvat. Kansainvälisen ilmastopaneelin IPCC:n 13.4.2014 julkistamien skenaarioiden mukaan kasvihuonekaasupäästöjä tulee vähentää globaalisti 40–70 prosenttia vuoden 2010 tasosta vuoteen 2050 mennessä, jotta poliittisesti asetettua kahden asteen lämpötilanousua maapallolla ei ylitetä.

Suomen ilmastopaneelin mukaan kauaskatseista politiikkaa olisi ennakoida toimia, jotka ennen pitkää ovat väistämättömiä. Kiirehtiminen kasvihuonekaasujen nollapäästöisyyteen on Suomenkin suunta, koska Suomi on muiden teollisuusmaiden tavoin sitoutunut (UNFCCC, 3. artiklan periaate) vähentämään kasvihuonekaasupäästöjään köyhiä maita nopeammin. Suomi on Euroopa-neuvoston päätöksellä sitoutunut vähentämään 80-95 prosenttia päästöjään vuoteen 2050 mennessä (Työ- ja elinkeinoministeriö 2013). Suomen päästövähennykset eivät kuitenkaan päättyne tähän, sillä globaalit päästövähennyspolut, joilla on hahmoteltu maapallon lämpötilanousun pitäminen kahden asteen rajoissa, edellyttävät päästöjen vähentämistä edelleen vuoden 2050 jälkeen (van Vuuren ym. 2011). Kehittyneille maille näköpiirissä olevat kasvihuonekaasupäästöjen nollatavoitteet 2070 - 2080 mennessä muodostavat erityisen haasteen, sillä kaikkien päästölähteiden voimakkaaseen vähentämiseen ei ole tiedossa ratkaisuja (etenkin ruoan tuotannon alueella). Vähäisiin nettopäästöihin pääseminen on mahdollista poistamalla kasvihuonekaasuja ilmakehästä esimerkiksi lisäämällä metsien hiilinieluja ja pitkäaikaisia hiilivarastoja.

Suomen energia- ja ilmastopolitiikassa metsillä on erityisen tärkeä rooli. Metsäenergian lisääminen on keskeinen keino, jolla Suomi pyrkii eroon fossiilisista polttoaineista. Puun energiakäytöstä syntyvät päästöt ovat olleet Suomen tapaisille maille Kioton ilmastopöytäkirjassa ”nollapäästöisiä”, jos samaan aikaan metsien hiilinielulle asetetut tavoitteet pystytään saavuttamaan ja metsämaata ei hävitetä. EU:n päästövähennystavoitteissa metsäenergian päästöjä ei otettu huomioon. Tilanteeseen saattaa tulla muutos jo lähitulevaisuudessa. Erityisesti EU:ssa on nähty, että maankäyttösektorin päästöt, jossa myös metsien hiilitaseet nieluineen ovat mukana, tulee sisällyttää tavalla tai toisella EU:n tulevaan ilmastopolitiikkaan.

Metsät näyttävät myös merkittävää roolia Suomen biotalousstrategiassa. Metsästä pyritään saamaan uudet kasvun eväät hiipuneelle vientiteollisuudellemme. Tämän muutos tulisi tehdä samalla kun Suomen tulee täyttää kansainväliset ilmastositoumukset. Suomelle on siis erityisen tärkeää, että metsiin kohdistuvat strategiset linjaukset ja kauaskantoiset investointipäätökset perustuvat oikeaan ymmärrykseen metsiemme roolista ilmastonmuutoksen hillinnässä, näin myös liittyen mahdollisiin uusiin ilmastopoliittisiin ratkaisuihin kansainvälissä sopimuksissa. Päätöksentekoa tukevan tietoaikoinen luominen on kuitenkin osoittautunut hankalaksi, sillä tutkijajoukosta löytyy sekä metsien hyödyntämisen voimakkaita puolestapuhujia sekä kriittisiä henkilöitä, jotka kyseenalaistavat metsien hyödyntämisen edut ilmastonmuutoksen hillinnässä.

Tätä taustaa vasten ilmastopaneeli päätti vuoden 2014 lopulla tehdä selvityksen, jonka tarkoituksena oli koota nykytietämys metsiemme hiilinielujen kehityksestä ja metsien hyödyntämisen ilmastovaikutuksista (Seppälä ym. 2015). Ilmastopaneelin työn tueksi tehtiin kolme erillistä taustaraporttia, jotka on julkaistu omina itsellisinä osina tässä julkaisussa.

Ensimmäinen taustaraportti (osa 1) kokoaa asiantuntijakyselyn tulokset metsien hyödyntämisen ilmastovaikutuksista. Ilmastopaneeli lähestyi suomalaisia metsäalan tutkijoita kyselyn avulla ja järjesti

erikseen tutkijoiden kesken huhtikuussa 2015 työpajan. Yhteenvedossa on tuotu myös esiin tutkijoiden näkemykset tärkeimmistä tutkimusaihealueista.

Toinen taustaraportti (osa 2) vetää yhteen nykytietämyksen siitä, mitä metsämallit kertovat Suomen hiilinielujen ja -varastojen tulevasta kehityksestä. Suomen metsien ilmastovaikutus kulminoituu metsien hiilinielujen kehittymiseen. Raportissa paneudutaan metsien hiilitaseen kehitystä kuvaavien valtakunnan tason mallien ominaisuuksiin, eroihin, niiden tulosten taustalla oleviin oletuksiin ja tuloksiin. Lopuksi raportissa tuodaan monipuolisesti esiin mallien epävarmuudet ja arvioidaan mitkä tekijät määräävät Suomen metsien hiilinielun kehityksen lähitulevaisuudessa.

Ilmastopaneelin metsiä koskeva selvitystyö paneutui tässä vaiheessa vain ilmastokysymyksiin, eikä metsien käytön muita hyöty- tai haittavaikutuksia käsitellä loppuraportissa. Suomen metsien hyödyntäminen perustuu siitä saataviin hyötyihin, minkä takia ilmastopaneelin kolmas taustatyö (osa 3) täydentää ilmastopaneelin loppuraporttia tuomalla esiin miksi ja miten yhteiskuntatieteet ja erityisesti taloustiede ovat hyödyksi arvioitaessa metsien käyttöä ilmastomuutoksen hillinnässä.

Viitteet

IPCC 2014. Working Group III – Mitigation of Climate Change. IPCC.

Olivier, J.G.J., Janssens-Maenhout, G., Muntean, M., Peters, J.A.H.W 2015. Trends in global CO2 emissions: 2015 Report. Background study. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. The Hague.

Seppälä, J., Kanninen, M., Vesala, T., Uusivuori, J., Kalliokoski, T., Lintunen, J., Saikku, L., Repo, A., Korhonen, R. Metsien hyödyntämisen ilmastovaikutukset ja hiilinielujen kehittyminen. Ilmastopaneelin raportti 3/2015.

Työ- ja elinkeinoministeriö 2013. Kansallinen energia- ja ilmastostrategia.. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 20. päivänä maaliskuuta 2013 eduskunnalle. VNS 2/2013 vp. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja, Energia ja ilmasto 8/2013.

Van Vuuren, D.P., Stehfest, E., Den Elzen, M.G.J., Deetman, S., Hof, A., Isaac, M., Klein Goldewijk, K., Kram T., Mendoza Beltran, A., Oostenrijk, R. 2011. RCP2.6: Exploring the possibility to keep global mean temperature change below 2°C. Climatic Change.

OSA 1: ASiantuntijakysely metsien hyödyntämisen ilmastovaikutuksista – Kyselyasetelma ja vastausten yhteenveto

Laura Saikku

Suomen ympäristökeskus

1. JOHDANTO

Suomen ilmastopaneelin tarkoituksen oli tässä selvityksessä koota metsäalan suomalaisten tutkijoiden näkemykset siitä, millaisella metsien hyödyntämisellä saavutetaan toisaalta suurin ilmastohyöty ja toisaalta mihin tasoon metsien hyödyntämistason tulisi asettua ottaen huomioon luonnontieteelliset, sosiaaliset ja teknis-taloudelliset näkökohdat sekä tulevat ilmastovelvoitteet.

Selvityksessä ilmastopaneeli kysyi metsien käytön lisäämisen ilmasto- ja muita näkökohtia. Tämän jälkeen kysyttiin sopivaa hiilinielujen vertailutasoa vuoden 2020 jälkeen. Kolmantena kysymyksenä oli kysymys koskien kansainvälisten ilmastosopimusten puun energiakäytön CO₂-päästöjen pelisäännöstöä päästövähennysten tavoitteiden näkökulmasta. Viimeisenä pyydettiin mainitsemaan aiheeseen liittyviä tärkeimpiä tutkimustarpeita. Selvitys lähetettiin 36 metsäalan asiantuntijalle. Selvitykseen vastasi 1.12.2014-16.1.2015 välisenä aikana 24 metsäalan asiantuntijaa.

2. METSIEN KÄYTÖN LISÄÄMINEN/VÄHENTÄMINEN JA KEINOT

Ensimmäisenä kysymyksenä oli metsien käytön lisääminen ja sen keinot:

1. Pitäisikö metsien käyttöä lisätä Suomessa?: a) ilmastosyistä, b) muista syistä, c) ei, pitäisi vähentää ilmastosyistä, d) ei, pitäisi vähentää muista syistä, e) en osaa sanoa.

Jos olet lisäämisen kannalla, niin pitäisikö se tehdä: a) kasvattamalla hakkuumääriä b) tehostamalla hakkuutähteiden korjuuta c) tehostamalla kantojen korjuuta d) muilla keinoilla, millä?

Vastauksista ryhmiteltiin perusteet metsien käytön lisäämiseen 1) ilmastosyistä 2) muista syistä, sekä 3) perusteet vastata EOS. Vastauksista poimittiin ja ryhmiteltiin vielä erikseen 4) argumentteja metsien käytön ilmastomuutosta kiihdyttävälle vaikutuksille. Lisäksi eriteltiin vastauksissa esiin tulleita 5) keinoja lisätä (tai vähentää) metsien käyttöä ilmasto- tai muista syistä.

2.1 Metsien käyttöä pitää lisätä ilmastosyistä

Vastanneista kolmasosa katsoi, että metsien käyttöä tulee lisätä ilmastosyistä, lähinnä muiden syiden ohella. Perusteena oli metsien kokonaisnielu sekä metsien kasvun lisääminen metsänhoidollisilla toimenpiteillä. Myös puun käytön tuomat korvaushyödyt mainittiin. Aikajänne tuotiin myös esiin.

Nielu

Suomen metsien kasvun todettiin olevan kiihtymässä. Toisaalta myös hakkuuta on tehty samanaikaisesti. Todettiin, että metsien kasvu sallisi nykyistä korkeammat vuotuiset hakkuut (Metsätalastollinen vuosikirja). Yhdessä vastauksessa huomautettiin, että tarkastelu biomassajakeen aiheuttamista marginaalisista muutoksista hiilipäästöihin (välitön poltto vs. biomassan jättäminen hajoamaan maastoon), ei kerro hiilivarastojen kehitymisestä Suomen tasolla.

"Suomen metsät ovat hieno esimerkki siitä, että investoimalla metsien hoitoon, metsien kasvua ja puustopääomaa on voitu kasvattaa samalla kun metsien puustoa on käytetty jopa jonkin verran kiihtyvällä tahdilla."

"Metsien kasvu Suomessa on kiihtymässä siten, että se saavuttaa 140 Mm³ tason n. 2040 tienoilla."

Kasvu metsänhoidolla

Metsien hyödyntämisen perusteluissa tuotiin esiin näkökohta, jonka mukaan metsänuudistamisella ja metsänhoitotoimenpiteillä saadaan aikaiseksi metsien kasvua. Metsien hoidon lisäksi tiheys mainittiin yhdeksi tärkeäksi ilmastonäkökohdaksi (Pohjola ja Valsta 2007). Näin voidaan myös laajentaa luonnonsuojelua.

"Metsien hoitoa tehostamalla (onnistunut metsänuudistaminen, oikea puulaji oikealla kasvupaikalla, oikea-aikaiset harvennukset ja lannoittaminen, sopiva kiertoaika) voidaan lisätä metsien kasvua ja hiilensitomiskykyä samalla kun voidaan lisätä myös metsien hyödyntämistä kestävästi puupohjaisiin tuotteisiin ja energiaksi. Mikäli ei huomioida metsänkasvatuksen aikana energiapuuhun sitoutunutta hiiltä tarkastelussa tulee helposti tehtyä johtopäätös että puu ei ole hiilineutraalimpi vaihtoehto kuin esim. kivihiili (Pyörälä ym. 2014)."

Hakkuiden vähentämisen ja hiilivaraston suhteesta nostettiin esimerkki Kanadasta, jossa talousmetsien hiilinielu on muuttunut hiilen lähteeksi vaikka hakkuita on vähennetty (Stinson 2011, Anon 2007, Natural resources Canada 2012, Karlsson ja Tamminen 2013)".

"Maissa, joissa metsien hakkuit ovat kasvaneet ja niihin on myös investoitu (esimerkiksi Kiina, Etelä-Korea, EU-maat), metsien kasvu on kiihtynyt ja metsien biomassavarat ovat kasvaneet voimakkaasti. Siksi metsien tarkoituksenmukainen käyttö näyttää johtavan suurempaan hiilensidontaan ja hiilivaroihin kuin säästö tai jopa hiilimuseointi.

Vastauksissa mainittiin kuitenkin lisäksi, että puun energiasisältö on alhaisempi kuin fossiililla polttoaineilla, esimerkiksi kivihiilen verrattuna puuta tulee polttaa lähes kaksinkertainen määrä saman energiamäärän tuottamiseksi.

Korvaushyödyt, aikajänne

Metsien käytön lisäämistä perusteltiin myös korvaushyödyillä, puu korvaa fossiilisia materiaaleja ja energiaa. Lisäksi mainittiin aikajänne merkitys, hiilensidontapotentiali ja se, että mahdolliset korvaushyödyt riippuvat tarkasteluajasta ja paikaista.

"Biotalous on merkittävin tuotannonlisäykseen perustuva keino päästä eroon fossiilisista polttoaineista."

"Metsien hakkuita ja hakkuiden intensiteettiä lisäämällä voidaan korvata fossiilisia materiaaleja ja energiaa puupohjaisilla materiaaleilla (esim. puurakentaminen) ja energialla mikä on hiilineutraalimpi vaihtoehto kuin fossiilisten materiaalien käyttö kun huomioidaan myös metsänkasvatuksessa puustoon sitoutunut hiili tarkastelussa (Kilpeläinen ym. 2015)."

"Käytön lisäämistä tulisi katsoa yhdessä metsien hiilensitomispotentiaalain kanssa erilaisilla aikajänneillä. Hyvin suunnitellut ja oikea-aikaiset metsänhoitotoimenpiteet tuottavat myös taloudellisesti parhaan tuloksen biomassan tuotannossa ja sen käytössä "

2.2 Metsien käyttöä pitää lisätä muista syistä

Lähes puolet vastaajista totesi, että metsien käyttöä tulee lisätä muista syistä joko ilmastosyiden ohella, tai pelkästään muista syistä. Näissä vastauksessa tuotiin esille useita perusteluja. EOS-vastauksissa tuotiin esille perusteluita metsien käyttämiseen ylipäättään muista syistä.

Talous ja työllisyys, omavaraisuus

Puu nähtiin vastauksissa tärkeänä biotalouden raaka-aineena sekä materiaali- että energiakäytössä. Myös työpaikat sekä energiaomavaraisuus mainittiin. Vastausten mukaan taloudellinen hyöty tulisi maksimoida suhteessa ympäristöhaittoihin. Metsien käyttö nähtiin taloudellisesti järkevänä siitä näkökulmasta, että talousmetsiin on jo investoitu metsänhoidon myötä. Vastauksissa mainittiin myös, että olisi taloudellisesti kannattavaa erottaa talousmetsät ja suojelualueet omikseen. Toisaalta metsien käyttö nähtiin taloudellisesti kannattavana siitä näkökulmasta, että metsissä on aina riski menettää puuraaka-aine metsätuhoissa.

”Jos puulle on kysyntää, on taloudellisesti ja kansantaloudellisesti järkevää käyttää puun tuotannon alan metsiä puuntuotantoon. Ilmastonmuutos myös lisää riskejä siihen, ettei yksittäisen metsänomistajan puuvaranto säily taloudellisesti hyödynnettävänä. Parempi hoitaa ja suorittaa uudistushakkuut, kuin jättää tuholaisille, myrskyille ja metsäpaloille. Kannatan myös sitä, että metsäomistajat hoitaisivat metsänsä. Hoidon sivutuotteena syntyvä harvennuspuu voidaan käyttää metsäteollisuuden tai energian tuotannon raaka-aineeksi, riippuen alueellisesta kysynnästä.”

”Talousmetsinä kasvatettujen metsien käyttö puuntuotantoon on kansantaloudellisesti ja yksityistaloudellisesti järkevää (metsiin on investoitu uudistamisen ja taimikonhoidon myötä paljon ja toimien myötä metsien luontoarvot eivät yleensä ole vanhojen metsien veroisia). Mm. luonto- ja virkistysarvoja omaavien metsien käyttö tulee suunnitella ja optimoida yhteiskunnan kokonaisuuden huomioiden ja yksityistä omistusoikeutta kunnioittaen (tulonmenetykset kompensoiden jos yhteiskunnan kokonaisedun mukainen käsittely johtaisi tulon menetyksiin). Kun hoidettuja talousmetsäkäytössä olevia metsiä hyödynnetään tehokkaasti on varaa jättää arvokkaammat kohteet rauhaan.”

”Metsää tulisi hyödyntää niin, että siitä saadaan mahdollisimman suuri taloudellinen hyöty mahdollisimman pienellä ympäristöllisellä haitalla. Hiilidioksidin vapautuminen hyödynnetyistä metsästä on ympäristöhaitta ja metsäenergiasta saatu hyöty ei ole kovin suuri verrattuna metsän raaka-ainekäyttöön.”

Uusiutuvuus

Tärkeänä näkökohtana metsien käytön lisäämisessä nähtiin metsien/puubiomassan uusiutuvuus sekä metsien tärkeys Suomelle luonnonvararesurssina.

”Metsät ovat tärkeä uusiutuva luonnonvara Suomessa. Niitä kannattaa hyödyntää, mutta harkiten.”

”Mielestäni metsät ovat Suomessa sen verran merkittävä luonnonvararesurssi, että niitä on syytä hyödyntää mahdollisimman hyvin, monipuolisesti ja siten, että käyttö hyödyttää koko yhteiskuntaa. Tämä sisältää ajatuksen, että käyttö huomioi pitkäaikaisvaikutukset, sekä suojelulliset näkökulmat.”

Nielu

Nielu nähtiin perusteena kasvattaa hakkuumääriä myös muista kuin ilmastosyistä.

”Voi muista syistä. Perustelu on, että kaikkien ennusteiden (mm. Sievänen ym. 2014) mukaan metsät kestävät hyvin hakkuumäärien lisäämisen ja silti puuvaranto ja hiilivarastot kasvavat.”

"hakkuumäärät ovat selvästi metsien kasvua vähäisempiä, ei metsien käyttöä ole syytä ainakaan vähentää Suomessa"

Materiaalikorvaushyödyt

Materiaalikorvaushyödyt nähtiin perusteena lisätä puun käyttöä muista kuin ilmastosyistä.

"Jos laskelmissa huomioidaan myös puutuotteiden käytöstä aiheutuneet vältetyt emissiot niin hakkutasot välillä 40-100 milj. m³/v antavat suurin piirtein saman kokonaisvaikutuksen. Vain selvästi metsien kasvun ylittävät hakkuut johtavat pienempään viilentävään vaikutukseen. Laskelmien perusteella metsiä siis voitaisiin käyttää nykyistä intensiivisemmin, mutta niiden suora energiakäyttö ei ole ilmaston kannalta paras vaihtoehto vaan ennemminkin tulisi pyrkiä kehittämään puutuotteita korvaamaan muita tuotteita, joiden valmistus kuluttaa paljon fossiilisia polttoaineita. (Nikinmaa ym., lähetetty arvioitavaksi Science-lehteen)"

Lisäksi todettiin suojelun tärkeys:

"Lisäksi suojelua pitäisi lisätä ehkä 10 % metsäpinta-alan tasolle uhanalaisten lajien määrän vähentämiseksi."

Ja toisaalta mainittiin kulutuksen vähentäminen:

"Tuotannon lisääminen on silti vasta toiseksi tärkeintä. Vielä tärkeämpää on energian kulutuksen suitsiminen"

2.3 En osaa sanoa

Kolmasosa kyselyyn vastanneista vastasi "ei osaa sanoa" kysymykseen metsien käyttötason nostamisesta. Perusteina oli se, ettei ole olemassa kokonaisvaltaista tarkastelua metsien käytön ilmastovaikutuksesta, ja että kysymys riippuu siitä mitä päätöksentekijät arvottavat. Mainittiin myös, että aikajänne vaikuttaa siihen kannattaako metsiä käyttää vai ei. Parissa vastauksessa todettiin myös ,että taso on sopiva tai vaihtelee metsäkohtaisesti.

Ei ole tietoa

Monissa vastauksissa tuotiin esiin, että kokonaisvaltainen tarkastelu metsien käytön ilmastovaikutuksista puuttuu. Eri tekijöihin liittyy myös paljon epävarmuuksia. Ilmastovaikutuksiin liittyviä tekijöitä mainittiin useita: Metsien käytön ilmastovaikutukset riippuvat tarkastelun aikajänteestä, metsien hiilivaraston muutoksesta, maanpinta- ja pilvialbedon muutoksista, aerosolihiukkasten päästöistä, valitusta ilmastoindikaattorista (esim. GWP, GTP), puun käyttöketjusta ja siinä syntyvistä tuotteista ja päästöistä sekä viime kädessä markkinoiden reaktioista muuttuneeseen puuperäisten tuotteiden tarjontaan (esim. Soimakallio 2014).

Varsinkin korvaushyötyihin nähtiin liittyvän epävarmuutta.

"Jotta korkeampi käyttötaso ja pienempi hiilinielu olisivat ilmaston kannalta hyödyllisiä, on metsistä korjatulla biomassalla pystyttävä korvaamaan ilmaston kannalta haitallisempia raaka-aineita tehokkaasti."

"Puun käytöstä materiaalina voidaan saada korvaushyötyjä, mutta tämä on epävarmaa, koska tulevaisuuden teknologiat ovat epävarmoja."

"Esim. puun käytön lisääminen rakentamisessa ja huonekalujen valmistuksessa voi hyvinkin olla ilmastoa viilentävää, vaikka metsän hiilivarasto pienenee."

Metsien käytön taso riippuu päätöksenteosta

Vastauksissa tuotiin esiin päätöksentekijöiden näkökulma: tutkija ei voi sanoa pitäisikö metsien käyttöä lisätä. Ei ole olemassa tutkimuksia, joissa olisi määritetty juuri optimaalinen Suomen metsien käyttö taso. Taso riippuu metsien käytön tavoitteista ja siitä miten eri ilmastovaikutuksiin liittyviä tekijöitä painotetaan.

"Olisi perustellumpaa kysyä kasvaako metsien puuraaka-aineen käyttö kun yhteen sovitetaan normaali puuntuotanto, hakkuutähteiden käyttö bioenergiaksi ja metsien käyttö hiilen sidontaan. (Salo ja Tahvonen 2003)"

"Mielekkäämpää kuin asettaa makrotason tavoitteita metsien käyttöasteelle, on pyrkiä ohjaamaan metsien ja biomassan käyttöä siten, että niiden puuntuotannolliset hyödyt ja ilmastovaikutukset tulevat huomioituiksi optimaalisesti. Optimaalisten ohjauskeinojen käyttöönotto johtaa metsien hyödyntämisen uudelleenoptimointiin. Sen seurauksena käyttö voi lisääntyä tai vähentyä."

Taso sopivaa, vaihtelee metsäkohtaisesti

Kolme vastaajaa oli sillä kannalla, että metsien käytön taso on nykyisellään sopivalla tasolla.

"Samanaikaisesti kasvatamme puuston nettonielua ja kuitenkin tarjoamme teollisuudelle uusiutuvan luonnonvaran käyttöön esim. muovin ja betonin sijaan"

"Joitakin metsiä tulisi käyttää enemmän, toisia vähemmän. Jos hiilen sidontaa pidetään keskeisenä tekijänä, vanhojen metsien hakkuista tulisi pidättäytyä sillä ne ovat 'pysyviä' hiilivarastoja, ja sitovat myös edelleen tehokkaasti hiiltä (esim. Luysaert ym. 2008)."

"Taloudelliset syyt voivat puoltaa metsien käytön lisäämistä (biotalousodotukset). Metsien ikärakenne ja odotettavissa olevan kasvu vaikuttavat siihen miten metsien käyttöä voi lisätä – tärkeä ottaa huomioon kun käytön lisäämistä arvioidaan. Metsiä ei tulisi hakata enempää kuin mitä sinne sitoutuu."

Aikajänne vaikuttaa

Niissä vastauksissa, joissa metsien sopivaan käyttötasoon ei otettu kantaa, tuotiin esille myös aikajänne. Mainittiin, että metsien käyttö aiheuttaa lyhyellä aikavälillä hiilivaraston pienentymisen kymmeniksi tai jopa sadoiksi vuosiksi, tilanteesta riippuen (esim. Asikainen ym. 2012, Kallio ym. 2013, Sievänen ym. 2014, Repo ym. 2012). Pitkän aikavälin vaikutus voi olla positiivinen tai negatiivinen.

"Jos ilmastomuutoksen hillintää tarkastellaan pelkästään esim. 50 vuoden aikajänteellä, saattaisi olla järkevää (unohtaen myös kaikki muut taloudelliset intressit) käyttää metsiä pelkästään hiilen nieluna (ja tietysti lisätä metsänistutuksia ja metsäpinta-alaa mikäli mahdollista). Pitkällä aikavälillä olisi kuitenkin järkevää (ilmastonmuutoksen hillintä ei lopu vuoteen 2050 tai 2100!), että metsät voisivat toimia kestäväenä, jatkuvana uusiutuvan biomassan ja bioenergian lähteenä." -- Eli pitkän aikavälin tavoitteiden kannalta metsiä kannattanee sekä hoitaa että käyttää, vaikka päästöt olisivat hieman suuremmat."

"Hakkuiden jälkeen tuotetaan maasta ja lahoavasta karikkeesta hiilidioksidipulssi joka aiheuttaa sen että hakattu metsä on ensimmäisten vuosien aikana selvästi hiilen lähde (Pumpanen 2003)"

2.4 Metsien ilmastovaikutus kasvaa metsien käytön myötä

Vain kaksi vastanneista vastasi suoraan, että metsien käyttöä pitäisi vähentää ilmastosyistä. Monissa EOS-vastauksissa tuotiin kuitenkin esille puun käytön ilmastovaikutukset ilmastomuutoksen hillinnän näkökulmasta. Vastauksissa tuotiin esille, että metsien viilentävä vaikutus on sitä suurempi, mitä pienemmät ovat hakkuut.

Hakkuut pienentävät hiilivarastoa pitkään

Vastauksissa todettiin, että puun korjuu pienentää väistämättä metsien hiilivarastoa lyhyellä aikavälillä, kymmeniksi tai jopa sadoiksi vuosiksi, tilanteesta riippuen (esim. Asikainen ym. 2012, Kallio ym. 2013, Sievänen ym. 2014, Repo ym. 2012). Metsätalouden piirissä olevissa metsissä on todennäköisesti vähemmän hiiltä kuin luonnontilaisissa metsissä, joita ei ole ihmisen toiminnalla muokattu (Schulze ym. 2012, Houghton 2012). Suomen metsävarat olivat 1800-luvun alussa samaa suuruusluokkaa tai korkeammat kuin nykyään (Myllyntaus ja Mattila 2002). Borealisissa metsissä suurin osa hiilestä on maaperässä (Liski ym. 2006). Boreaalisten metsien palautuessa luonnontilaansa, metsien hiilivarasto kasvaa mahdollisesti vielä pitkään, vaikka puiden kasvu on pysähtynyt, maaperän hiilivaraston kasvaessa. Ei-hiilivaikutukset lisäävät metsien viilentävää vaikutusta n. 30% pelkän hiilinieluvaiikutuksen ohella, johtuen aerosolien viilentävästä vaikutuksesta ja simulointien mukaan vaikutus on vahvistumassa ilmaston lämpenemisen myötä. (Nikinmaa ym., lähetetty arvioitavaksi Science-lehteen). Todettiin myös, että metsien kiertoajat ovat pitkiä ja hakkuutähteiden hajoaminen hidasta (riippuen tähdeosiosta: oksat vs. kannot). Nettopäästöjen vähentämisen kannalta pieniläpimittaisten tähteiden energiakäyttö on luonnollisesti parempi vaihtoehto”.

”Lyhyellä aikavälillä hakkuumäärien vähentäminen borealisissa metsissä vähentää nettopäästöjä ja hakkuumäärien lisääminen vuorostaan vaikuttaa epäedullisesti nettopäästöihin vaikka mukaan laskettaisiin puubiomassan käytöstä seuraava fossiilisten polttoaineiden korvautuminen.

”Hiilidioksidin vapautuminen hyödynnetystä metsästä on ympäristöhaitta ja metsäenergiasta saatu hyöty ei ole kovin suuri verrattuna metsän raaka-ainekäyttöön.”

Albedo ja aerosolit

Hiilitaseen kehittymisen lisäksi metsät vaikuttavat ilmastoon albedon ja puiden aerosolipäästöjen kautta. Muutamassa vastauksessa tuotiin esiin näiden tekijöiden monimutkaiset vaikutusmekanismit ilmastonmuutokseen liittyen. Pinta-albedo (Bright ym. 2011), ja pilvialbedo (Spracklen ym. 2008, Kulmala ym. 2004) voivat vaikuttaa eri suuntiin. Metsätyypeistä lehtimetsissä albedon viilentävä vaikutus on suurin (esim. Kuusinen 2014), mutta Ilmakehän pienhiukkastuotanto ja metsien ilmastoa viilentävä vaikutus aerosolien kautta on tehokkainta vanhoissa havumetsissä (esim. Street ym. 1997, Kellomäki ym. 2001). Myös mustan hiilen päästöjen (Kupiainen ja Klimont 2007) tulisi sisällyttää analyysiin.

Korvausvaikutukset epävarmoja ja todennäköisesti pieniä

Vastauksissa mainittiin myös puun polton tehottomuus ja substituution epävarmuus.

”Teoriassa puun energiakäytössä substituutiokerroin on tyypillisesti korkeintaan 1 ja usein alle sen, koska fossiilisten polttoaineiden (erityisesti raakaöljypohjaisten tuotteiden ja maakaasun) päästöintensivisyys energiayksikköä kohden on usein pienempi kuin pelkästään puun poltossa syntyvät CO₂-päästöt energiayksikköä kohden. Suurimmat teoreettiset päästövähennyshyödyt saadaan todennäköisesti puun kaskadikäytöllä, jossa maksimaalinen määrä puuta käytetään ensin materiaalina ja sitten elinkaaren loppuvaiheessa energiaksi, jolloin voidaan saada korvaushyötyjä jokaisessa lopputuotevaiheessa. Puumateriaaleille esitetyt substituutiokertoimet vaihtelevat huomattavasti.”

”Käytännössä substituutiokerroin voi ilman riittävän kunnianhimoista ja kattavaa ilmastopäätöstä kuitenkin jäädä merkittävästi teoreettista pienemmäksi, sillä osa tietyllä alueella tai sektorilla korvautuvasta energiasta saattaa lisätä energiankulutusta toisaalla (Smith ym. 2014).”

Millä keinoin lisättävä puun käyttöä

Kyselyssä kysyttiin, millä keinoin mahdollinen metsien käytön lisääminen tulisi toteuttaa. Vastauksissa tuotiin esille mm. puun eri ositteiden ilmastonäkökohtia, hakkuutähteillä todettiin olevan ilmastoon pienin vaikutus. Hakkuutähteiden ja kantojen käyttöön liittyen mainittiin kuitenkin muita negatiivisia ympäristövaikutuksia, mm. ravinnanäkökohdat ja ekosysteemi- ja biodiversiteettivaikutuksia. Lisäksi mainittiin eri puulajisuhteiden merkitys ja metsäteollisuuden tuotepaletin optimointi.

Puun eri ositteet- ilmastonäkökohdat

Vastauksissa mainittiin, että nopeasti hajoavien hakkuutähteiden käyttö (oksat, latvukset) aiheuttaa pienimmän hiilivajeen metsämaahan, eli pienimmän CO₂-päästön metsän hyödyntämisestä (Repo ym. 2011). Todettiin kuitenkin, että hakkuutähteidenkin korjaaminen ja polttaminenkin aiheuttaa maan hiilivaraston pienenemisen verrattuna tilanteeseen ilman korjuuta. Lisäksi mainittiin, että metsien kasvun parantaminen lannoittamalla voisi olla sekä ilmaston kannalta että metsistä saatavien tulojen kannalta hyvä ratkaisu.

"Kantojen nostoa ja muuta järeän puutavaran polttoa ei voi perustella ilmastonmuutoksen hillitsemisellä, paitsi pitkällä, satojen vuosien ajanjaksolla."

"Poikkeuksena yleisestä tilanteesta metsätaloudesta luopuminen voisi olla ilmaston ja vesistöjen kannalta hyvä vaihtoehto rehevillä ruoho- ja mustikkaturvekangastason metsäojitusalueilla. Näillä turpeen hajoamisen CO₂-päästö voi olla samaa luokkaa kuin puustoon sitoutuvan hiilen määrä. Lisäksi näillä paikoilla on hyvin maatumeneen turpeen takia suuri vaara pilata alapuoliset vesistöt metsää uudistettaessa (maan muokkaus ja ojien kunnostus)". (Ojanen, P. dissertation)

Puun eri ositteet - ravinne ja ekosysteeminäkökohdat; puulajisuhteet

Vastauksissa nostettiin esiin hakkuutähteiden ja kantojen käyttöön liittyvä haitalliset ekosysteemi-vaikutukset, mm. ravinteiden hävikki ja biodiversiteettivaikutukset (Nordén ym. 2013, Peltoniemi ym. 2013).

Toisaalta parissa vastauksessa mainittiin, että runsaspuustoisilla alueilla hakkuutähteiden korjuu ja joissain paikoin myös kantojen nosto mahdollistaa paremman maanmuokkauksen ja viljelyn. Kantojen mainittiin myös kestävät varastointia paremmin kuin muut metsäenergiajakeet.

"Ravinteiden hävikin estämiseksi hakkuutähteet tulisi kuivattaa palstalla niin, että neulaset varisevat kohteelle. Kantojen korjuumenetelmiä tulee kehittää edelleen niin, että nosto ei riko suurta osaa maan pintakerroksesta."

Parissa vastauksessa mainittiin tärkeänä myös metsätuhoilta suojautuminen, esim. metsien monipuolisen rakenteen ja lajiston avulla. Myös metsien ikärakenteen ohjaaminen mainittiin yhdessä vastauksessa.

Metsäteollisuuden tuotepaletti

Kolmessa vastauksessa mainittiin metsäteollisuuden tuotepaletin suuntaaminen ilmastotehokkaampaan suuntaan.

"Paras olisi varmaankin jos metsien yhteiskunnallinen hyöty toteutettaisiin vahvemmin muiden kuin biomassaan perustuvien volyymituotteiden kautta. Tällöin metsien keskiarvotiheyttä voitaisiin myös kasvattaa, joka tarkoittaa suurempaa määrää CO₂:ta sitoutuneena biomassaan ja maaperään."

"Suora energiakäyttö ei ole ilmaston kannalta paras vaihtoehto vaan ennemminkin tulisi pyrkiä kehittämään puutuotteita korvaamaan muita tuotteita, joiden valmistus kuluttaa paljon fossiilisia polttoaineita."

Muu ympäristönsuojelu

Vastauksissa tuli myös ilmi luonnon monimuotoisuuden säilyttäminen, vesistöjen pilaantumisen estäminen, ja virkistyskäytön ylläpito osana metsätaloutta.

3. METSIEN HIILINIELUT JA KANSAINVÄLISET PÄÄSTÖVÄHENNYKSET

11 vastaajaa oli sitä mieltä, että Durbanissa sovittu Suomea koskeva pelisäännöstö ja hiilinielujen vertailutaso Suomelle tulisi muuttaa. Perusteluina pelisäännösten muutokselle oli joko metsien käytön ilmastovaikutuksen huomioiminen tai metsien nettohiilinielun korvaaminen. Kahden vastauksen mukaan pelisäännöstö pitäisi säilyttää ennallaan, muut vastaajat jättivät kohdan tyhjäksi tai vastasivat kohtaan EOS.

3.1 Ei pitäisi muuttaa

Pelisääntöjen pitäminen ennallaan mahdollistaa sen, että metsiä voi käyttää melko vapaasti, mutta ei liikaa.

”Muutaman lähivuosisikymmenen ajan voidaan tietysti jatkaa vaatimusta, että metsien pitää olla merkittävä hiilinielu, varsinkin kun tämänhetkinen vertailutaso on sen verran alhainen, ettei kohtuullinen puun käytön lisäys ole ongelma. Ehkä se pitää pahimmat biomassan käytön ylilyönnit aisoissa, kun ei voida ihan huoletta hakata kaikkea kasvua.”

”Nykyinen Durbanin sopimus antaa Suomen metsien käytölle sopivasti liikkumavaraa. Toisaalta jos metsiä hakattaisiin ns. kestävien hakkuiden mukaan, Durbanin nielutavoitetta ei saavuteta, joten se aidosti muodostaa mahdollisuuden, että metsien lisäkäytöstä tulee kustannuksia.”

3.2 Pelisäännöstöä tulisi muuttaa

Ilmastovaikutus perusteena

Päästölaskennan tulisi usean vastauksen mukaan olla lähempänä luonnontieteellisiä faktoja, eli korjuussa metsästä poisviety hiili näkyisi hiilivarastoa pienentävänä tekijänä ja vastaavasti nielun kasvattaminen varastoa suurentavana tekijänä. Kokonaishiililaskentaan perustuva laskentatapa kannustaisi hiiliresurssien tehokkaaseen käyttöön kaikilla tasoilla. Lisäksi mainittiin, että muihinkin kuin hiileen liittyvät näkökohdat tulisi huomioida.

”Kioton pöytäkirjan toista velvoitekautta koskevat säännöt ovat monimutkaiset – kannatan yksikertaisempia sääntöjä (maaluokkakohtaista laskentaa).”

”Aiheutuneet päästöt ja nielut tulisi huomioida (A) kokonaisuudessaan joko päästöinä tai päästövähennyksinä, ja (B) oikeana ajankohtana. Kunkin maan päästöille tulisi asettaa yksi yhteinen katto päästölähteestä riippumatta (ts. fossiiliset päästöt ja maankäytön päästöt). Kaikki maat (muutkin kuin Annex I) tulisi saada mukaan sopimukseen. Maiden tulisi voida vapaasti käydä keskenään kauppaa päästokiintiöillään tai sopia muista niihin liittyvistä keskinäisistä järjestelyistä.”

”Varastojen purkautumisesta ilmakehään tulisi vastaavasti olla sanktioita. Velvoitteiden tulisi ehkä kuitenkin koskea vain valtion tasoa, koska pienemmissä yksiköissä päästö- ja nieluarvioiden suhteellinen epätarkkuus on suuri.”

"Metsänomistajille tulee asettaa ohjauskeino, joka kannustaa hiilensidontaan ja metsien hiilivarastojen ylläpitoon. Ohjauskeinon tulee olla konsistentti mahdollisten metsäenergian ohjauskeinojen kanssa."

Nettonielu/positiivisen nielun korvaaminen

Muutamassa vastauksessa todettiin, että säännöstöä pitäisi muuttaa niin, että metsien kasvussa sitoma hiili huomioitaisiin, tai että metsien hoidon ja kasvukyvyn parantamisessa aikanaan potentiaalisesti sitoutunut hiili huomioitaisiin. Todettiin myös, että puuvaraston muutosta ei pitäisi sisällyttää ollenkaan päästökauppaan.

3.3 Ei osaa sanoa

Vertailutaso sinänsä on poliittinen taakanjakokysymys eikä lainkaan muuta kannustetta nielun ylläpitämiseen. Sen sijaan nykyinen nielujen kattoarvo ei kannusta lisäämään nielua sen jälkeen kun kattoarvo on ylitetty.

4. PUUN ENERGIÄKÄYTÖN CO₂-PÄÄSTÖJEN PELISÄÄNNÖSTÖ KANSAINVÄLISSÄ ILMASTOSOPIMUKSISSA

4.1 Tulee säilyttää nykyisenä

Vastanneista neljä totesi, että puulle ei pidä kehittää erillistä päästökerrointa energiasektorille vaan on pitäydyttävä IPCC:n nykyiseen metodologiaan, jossa päästöt raportoidaan LULUCF/AFOLU-sektorilla. Perusteena oli, että näin puun polton päästöjä ei tule raportoitua kahteen kertaan. Raportointilogiikkaa ei ole tässä mielessä mitään syytä muuttaa. (Pingoud ym. 2010). Nähtiin myös, että maankäyttösektorin päästöjen raportoinnin lopettaminen olisi huono vaihtoehto. Lisäksi nähtiin, että LULUCF pitäisi olla laskelmissa täydellisesti mukana. Puun käytön ohella vastaavasti myös muuta maankäyttöä esim. maatalousmaan osalta pitäisi verrata maksimaaliseen hiilensidontaan.

"En varsinaisesti kannata muutosta, vaikka puun käytöstä seuraa hakkuukiertoa seuraava vuosikymmeniä pitkä hiilivelka. Puun hiilineutraalisuuden poistaminen vaatisi LULUCF:n täyden mukaanoton laskelmiin, joka ongelmallista metsäteollisuuden kannalta."

Parannukset käytäntöön nähtiin kuitenkin mahdollisina. Todettiin, että on erilaisia tapoja tehdä raportointi päätöksentekijöille ymmärrettävämmäksi ja läpinäkyvämmäksi ja näitä tulisi kehittää. Yhdessä vastauksessa todettiin, että mikäli jatkossa kaikki LULUCF-sektorin päästöt ja nielut huomioidaan täysimääräisesti, ja hiilinieluille asetetaan tukiainen ja hiilipäästöille vero, tulee myös bioenergian kohtelua muuttaa. Tässä tapauksessa bioenergian päästöt tulee huomioida täysimittaisina.

Eräässä vastauksessa päästöttömänä käsittely nähtiin eri tavoin ja sen tarkoittavan sitä, että puun energiakäyttöä suositaan: "Puubiomassan käyttöä kannattanee suosia nimenomaan fossiilisen substituutiovaikutuksen takia, joten käsittelemällä sitä päästöttömänä voi olla hyvä keskiarvoratkaisu, vaikka se ei sitä lyhyellä aikavälillä olisikaan. Erityisesti jos se edesauttaa metsien istutusta alueille joilla sitä ei ennen ollut. Toisaalta esimerkiksi luonnontilaisista metsistä saatavaa bioenergiaa ei välttämättä kannattaisikaan pitää päästöttömänä."

Kaksi vastaajaa katsoi, että puulle ei pidä asettaa minkäänlaista päästökerrointa:

"Lähtökohtaisesti pelisääntöjen tulee olla sellaiset, että ne huomioivat biomassojen käytön hiilineutraalisuuden täysimääräisesti. Tämä voitaneen saavuttaa, kun laskennat tehdään alueellisesti ja ajallisesti suurien alueiden ja riittävän pitkien jaksojen yli."

4.2. Tulee muuttaa

Useassa vastauksessa todettiin, että puun polton ilmastovaikutukset tulisi huomioida kokonaisvaltaisesti ja täysimääräisinä. (ml. albedo ja aerosolit):

”päästöttömyysoletus antaa harhaanjohtavan kuvan puun polton ilmastovaikutuksesta. Tämä on merkittävää, jos puun poltolla pyritään ilmastomuutoksen hillintään.”

Joissain vastauksissa toivottiin myös uusia ja erilaisia lähestymistapoja laskentasääntöihin ja velvoitteisiin, tai täydennyksiä nykyisiin käytäntöihin.

5. TÄRKEIMMÄT TUTKIMUSTARPEET

5.1 Kokonaisvaltaiset metsien käytön ilmastovaikutukset

Yksi keskeisimpiä kyselyssä tunnistettuja tutkimustarpeita oli parempi, kattavampi, kokonaisvaltainen ja objektiivinen kuvaus metsien käytön ilmastovaikutuksista, eri käyttötasolla ja erilaisin maankäyttö- ja hyödyntämistavoin. Tarkasteluissa pitäisi huomioida eri aikajänteet, ja erilaiset metsäteollisuuden tuotteet. Lisäksi pitäisi huomioida erilaisten systeemirajauksien vaikutukset tulosten tulkinnassa. Kokonaisvaikutuksiin liittyen puun rooli hiilivarastoina ja fossiilis-intensiivisten tuotteiden ja energian korvaajana nähtiin tärkeänä tutkimuskysymyksenä. Lisäksi mainittiin metsien käytön vaikutus yhteiskunnan muuhun toimintaan ja sitä kautta kenties edelleen ilmastoon. Kokonaisvaltaisen tarkastelun mallien kehittäminen mainittiin myös. Tutkimuksellisenä haasteena mainittiin metsien käytön monimuotoisuus.

5.2 Luonnontieteellisten perusteiden tutkimus

Yksittäisiä luonnontieteellisiä kysymyksiä liittyen metsien käytön ilmastovaikutukseen mainittiin liittyen useita, liittyen pääasiassa hiukkaspäästöihin, albedoon, ja maaperään:

- Metsän hyödyntämistapojen/metsänhoidon vaikutus hiukkaspäästöihin ja albedoon, puulajikohtaisesti.
- Puulajien todellinen sopeutuminen muuttuvaan ilmastoon (ekofysiologinen tutkimus ja matemaattisen mallinnus)
- Maaperän ja puiden välinen dynamiikka, metsien käytön vaikutus maaperän hiilivaraston kokoon ja varaston kertymisnopeuteen
- Maaperästä veden mukana lähtevä hiilen kulkeutuminen
- Sademäärissä, sateiden jaksottumisessa eri vuodenaikoihin ja ilman (maan) lämpötilassa odotettavissa olevien muutosten vaikutus puuston ja maaperän sitoman hiilen määrään
- CO₂-lannoituksen vaikutus metsiin ja miten se linkittyy veden ja typen kiertoon,
- Puuston ja pintakasvillisuuden tuotos maan alla: juuriston tuotos ja kiertoaika, juurieritteiden ja mykorritsojen kautta maahan tuleva hiili, ojitettujen soiden hienojuurten kiertonopeus
- Kantojen hajoamisnopeus orgaanisilla mailla
- Ojitettujen turvemaiden päästöt – mitä niistä tiedämme ja mitä voimme niille tehdä (realistisesti ei akateemisesti)
- Hakkuutähteiden korjaamisen vaikutus typen tulevaan sitoutumiseen
- Lajiston monimuotoisuus ja leviämistutkimus, jne.

5.3 Metsien käytön yhteiskunnallinen optimointi

Tärkeänä tutkimuskysymyksenä nähtiin metsien käytön/metsien hoidon kokonaisvaltainen optimointi Suomessa ja alueellisesti, eri ympäristö- ja yhteiskunnalliset näkökulmat huomioiden. Näkökulmista mainittiin bioenergia ja puuntuotanto, hiilitaseet, lyhyen ja pitkän aikavälin ilmastotavoitteet, talous ja kansantaloudelliset tavoitteet, ekosysteemipalvelut, biodiversiteetti ja virkistysarvot.

Yhtenä tutkimuskysymyksenä mainittiin vertailu aktiivisen puuston kasvatuksen ja toisaalta ilmaston muutoksen ehkäisyä varten optimoidun metsäjärjestelmän välillä, taloudellisesti ja yhteiskunnallisesti. Erityisenä optimointikysymyksenä mainittiin lajien elinympäristövaatimusten tutkimus ja habitaattimallien laatiminen sekä liittäminen metsämalleihin, jotta metsän käytön lajistovaikutuksia voidaan ennustaa. Lisäksi mainittiin puutuotteiden käytön aiheuttamien vältettyjen emissioihin liittyvät taloudelliset kysymykset.

5.4 Ohjaukset ja politiikka

Tutkimustarpeita tunnistettiin liittyen metsätalouden ja ilmastopolitiikan ohjaukseen, joilla voidaan edelleen vaikuttaa toimijoihin. Esitettiin, että tulisi tarkastella miten metsätaloustoimenpiteet ja näiden toteuttamiseksi käytettävät ohjaukset vaikuttavat metsien hiilitaseeseen. Optimaalisten ohjauksien lisäksi katsottiin, että tulisi arvioida numeerisesti osittain optimaalisten tai second best politiikkavaihtoehtojen vaikutuksia. Esitettiin, että ohjauksien vuorovaikutusta tulisi tarkastella olemassa olevien ohjauksien ja muun sääntelyn kanssa yhdessä (esim. aiemmat metsänhoitosuosittelut kannustivat pidempiin kiertoaikoihin kuin olisi ollut taloudellisesti kannattavaa toimien hiilensidontaa lisäävästi).

Yhtenä kysymyksenä nostettiin esiin kansainvälisten ilmastopöytäkirjojen kannustinvaikutukset ja niiden yhteensopivuus kansallisen tason ohjauksien kanssa. Kansainvälisen ilmastopöytäkirjan tulisi edistää, eikä ehkäistä metsien tehokasta käyttöä ilmastonmuutoksen torjunnassa. On siis tärkeää ymmärtää, kuinka erilaiset (poliittisin perustein) ehdotetut käytännöt vaikuttavat mahdollisuuksiin harjoittaa mahdollisimman tehokasta ilmastopolitiikkaa. Mainittiin myös metsien ja maankäytön hiilivarastojen kehitykseen liittyvään epävarmuuteen varautuminen metsiin kohdistuvassa ilmastopolitiikassa kansallisella/kansainvälisellä tasolla.

5.5 Globaalit näkökohdat

Vastauksissa mainituista tutkimusaiheista muutamassa oli mukana myös globaali näkökohta. Ilmastopolitiikassa tulisi tunnistaa maapallon eri alueiden vastakkaisetkin asetelmat metsien roolissa ilmastonmuutoksen torjunnassa ja tuottaa synteesiä globaalille tasolle. Myös globaali työnjako nostettiin esiin, tuotantoa siirrettäisiin sinne, missä sähköä on saatavissa mahdollisimman pienillä ympäristövaikutuksilla.

Jotta metsiä voidaan käyttää osana tehokasta kansainvälistä ilmastopolitiikkaa, päästöt ja nielut täytyy voida todentaa. Tähän tarvittaisiin tarkempaa globaalia LULUCF-sektorin (Land Use and Land Use Change) hiilidataa (ml. metsien ja maaperän hiilivarastojen muutokset).

5.6 Metsien kasvun lisääminen metsänhoidolla

Vastauksissa tuli esille tutkimuksellisia näkökohtia myös liittyen metsien kasvuun. Tutkimusta tarvittaisiin metsien hiilensidontapotentiaalin ja metsäbiomassan tuotantopotentiaalin lisäämismahdollisuuksista metsänhoidon keinoin. Esitettiin, että tärkeää olisi tutkia metsänhoidon merkitystä metsien kasvulle ja hiilensidonnalle, erityisesti muuttuvassa ilmastossa.

5.7 Muut

Lisäksi tuotiin esille muutamia yksittäisiä tutkimusaiheita, liittyen mm. taloudellisiin tarkasteluihin, ilmastopolitiikkaan, metsän kasvatukseen ja metsään liittyvien palveluiden kehittämiseen,

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Asiantuntijakyselyn mukaan suomalaisessa tiedeyhteisössä vallitsee erilaisia käsityksiä metsien käytön ilmastovaikutuksista. Kolmasosa vastanneista katsoi, että metsien käyttöä tulee lisätä ilmastosyistä. Noin puolet katsoi, että sopivaan käyttötasoon ei voida ottaa kantaa, ja näistä monet toivat esiin, että käytön lisäämistä ei voida perustella ainakaan lyhyen aikavälin ilmastohyödyillä. Lähes puolet vastaajista totesi että metsien käyttöä tulee lisätä muista kuin ilmastosyistä, ilmastosyiden ohella, tai pelkästään muista syistä.

Perusteena lisätä metsien käyttöä ilmastosyistä oli muun muassa metsien kokonaisnielu. Metsien kokonaisnielu ei kuitenkaan vastaa suoraan kysytyyn kysymykseen metsän käytön ilmastovaikutuksesta, vaan kertoo metsien vaikutuksesta kansalliseen hiilitaseeseen ylipäätään. Lisäksi metsien käytön lisäämistä perusteltiin sillä, että esimerkiksi Kanadassa pienet hakkuut eivät ole korreloineet suuren nielun kanssa (esim. Stinson 2011). Lisäksi mainittiin metsien kasvun lisääminen metsänhoidollisilla toimenpiteillä. Tähän perusteluun ei kuitenkaan annettu tukea tieteellisestä kirjallisuudesta. Myös puun käytön tuomat korvaushyödyt mainittiin (Kilpeläinen ym. 2015). Puun käytön tuomista korvaushyödyistä mainittiin lähteenä Kilpeläinen ym. 2015, tässä artikkelissa korvaushyödyt ovat kuitenkin melko maltilliset.

Ilmastosyiden ohella, tai pelkästään muista syistä, metsien käytön lisäämistä perusteltiin kyselyssä taloudella, työllisyydellä ja omavaraisuudella, sekä uusiutuvuudella ja metsien suurella nielulla (mm. Sievänen ym. 2014). Muina syinä mainittiin myös materiaalikorvaushyödyt (Nikinmaa ym., lähetetty arvioitavaksi Science-lehteen).

Osa vastaajista koki, että metsien sopivaan käyttötasoon on vaikea ottaa kantaa: ei ole tarpeeksi tietoa, eri tekijöihin liittyy paljon epävarmuuksia (esim. Soimakallio 2014), ja toisaalta käyttötaso riippuu päätöksentekijöiden arvostuksista. Todettiin myös että käyttötaso riippuu aikajänteestä: metsien käyttö aiheuttaa lyhyellä aikavälillä hiilivaraston pienentymisen. Pitkän aikavälin vaikutus voi olla positiivinen tai negatiivinen (esim. Asikainen ym. 2012, Kallio ym. 2013, Sievänen ym. 2014, Repo ym. 2012).

Monessa vastauksessa tuotiin esiin, että käytön lisäämistä ei voida perustella lyhyen aikavälin ilmastohyödyillä (esim. Asikainen ym. 2012, Kallio ym. 2013, Sievänen ym. 2014, Repo ym. 2012). Puun käytön lisääminen ei ole nopea päästövähennyskeino: suuremmat hakkuut huonompi ilmaston kannalta kuin pienemmät (ml. hiili, albedo, aerosolit), hakkuut pienentävät hiilivarastoa pitkään. Vanhatkin metsät jatkavat hiilen sidontaa, ja toisaalta edes hakkuutähteet eivät ole nollapäästöisiä. Lisäksi korvaavuushyödyt eivät todennäköisesti ole tarpeeksi suuria, jotta saataisiin merkittäviä vähennyksiä (esim. Smith ym. 2014). Perustelujen tueksi viitattiin useaan tutkimukseen. Myös korvausvaikutusten riittävyteen ilmastomuutoksen hillinnässä otettiin kantaa perusteluineen.

Kyselyssä kysyttiin, millä keinoin mahdollinen metsien käytön lisääminen tulisi toteuttaa. Hakkuutähteillä todettiin olevan ilmastoon pienin vaikutus, (Repo ym. 2011), mutta toisaalta näihin mainittiin liittyvät muita ekosysteemivaikutuksia. (Nordén ym. 2013, Peltoniemi ym. 2013). Näiden tueksi tarjottiin viitteitä kirjallisuudesta. Muitakin keinoja mainittiin, mutta vastaukset olivat vailla tieteellistä tukea - muina keinoina mainittiin eri puulajisuhteiden merkitys ja metsäteollisuuden tuotepaletin optimointi. Konkreettisina toimenpiteinä mainittiin mm. lannoitus, tuhoihin varautuminen, maaperän hiilivaraston kasvattaminen, sekä ikäluokkajakauman ohjaaminen.

Puolet vastaajista jätti ottamatta kantaa kysymykseen Durbanissa sovitun hiilinielun vertailutason sopivuudesta Suomelle. Suurin osa vastanneista oli kuitenkin sitä mieltä, että Durbanissa sovittu Suomea koskeva pelisäännöstö ja hiilinielujen vertailutaso Suomelle tulisi muuttaa seuraavalla sopimuskaudella vuoden 2020 jälkeen kansainvälisissä ilmastopöytäkirjoissa. Perusteluina pelisäännösten muutokselle oli joko metsien käytön ilmastovaikutuksen huomioiminen tai päinvastoin metsien nettonielun korvaaminen. Vastauksien tukena ei käytetty tieteellistä kirjallisuutta.

Kansainvälisissä ilmastopöytäkirjoissa puun energiakäytön CO₂-päästöjen raportointikäytäntöä tulisi osan vastaajien mukaan säilyttää nykyisenä, perusteena että LULUCF-sektorin varastonmuutokset raportoidaan jo LULUCF-sektorilla (Pingoud ym. 2010). Useimmissa vastauksissa tuotiin puolestaan esiin, että päästötömsysoletus antaa harhaanjohtavan kuvan puun polton ilmastovaikutuksesta ja raportointikäytäntöä tulisi sen vuoksi muuttaa. Tähän ei kuitenkaan ollut kenelläkään vastaajalla tukea tieteellisestä kirjallisuudesta.

Tutkimustarpeista nostettiin esiin kokonaisvaltaiset metsien käytön ilmastovaikutukset, erilaisten luonnontieteellisten perusteiden tutkimus, ml. aerosolit, albedo, maaperän hiilivarasto, metsien käytön yhteiskunnallinen optimointi, ohjauskeinot ja politiikka, globaalit näkökohdat, kansainvälinen ilmastopolitiikka, sekä metsien kasvun lisääminen metsänhoidolla.

KIRJALLISUUTTA

Anon. 2007. Is Canda's forest a carbon sink or source. Natural Resources Canada.

Asikainen, A., Ilvesniemi, H., Sievänen, R., Vapaavuori, E., Muhonen, T. (toim.). 2012. Bioenergia, ilmastonmuutos ja Suomen metsät. Metlan työraportteja 240. 211 s. <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp240.htm>.

BettS, R. A. 2000. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo, *Nature*, 408, 187–190.

Bright, R. M., Strømman, A. H., Peters, G. P. 2011. Radiative forcing impacts of boreal forest biofuels: a scenario study for Norway in light of albedo. *Environmental science & technology*, 45(17), 7570-7580.

Cherubini et al. 2014. Linearity between temperature peak and bioenergy CO₂ emission rates. *Nature Climate Change*, Vol. 4, Nov 2014.

Houghton R.A. in Lal et al. 2012. Recarbonization of the Biosphere. Chapter 4. *Historic Changes in Terrestrial Carbon Storage*. Springer. 559 p.

IPCC FAQ 2014. Frequently Asked Questions. Q2-10. Do the IPCC Guidelines consider biomass used for energy to be carbon neutral? <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/faq/faq.html>

IPCC 2014. Working Group III – Mitigation of Climate Change. IPCC.

Kallio, A.M.I., Salminen, O., Sievänen, R. 2013. Sequester or substitute-Consequences of increased production of wood based energy on the carbon balance in Finland. *Journal of Forest Economics*, 19, 402-415.

Karlsson, K., Tamminen, P. 2013. Long-term effects of stump harvesting on soil properties and tree growth in Scots pine and Norway spruce stands. *Scandinavian Journal of Forest Research* 28(6): 550-558

Kellomäki et al. 2001. Impact of global warming on the tree species composition of boreal forests in Finland and effects on emissions of isoprenoids. *Global Change Biology* 7, 531-544

Kilpeläinen, A., Torssonon, P., Strandman, H., Kellomäki, S., Asikainen A., Peltola, H. 2015. Net climate impacts of forest biomass production and utilization in managed boreal forests. *Global Change Biology Bioenergy*. *Global Change Biology Bioenergy*, available in www-pages

Kirkinen, J., Palosuo, T., Holmgren, K., Savolainen, I. 2008. Greenhouse impact due to the use of combustible fuels – Life cycle viewpoint and Relative Radiative Forcing Commitment. *Environmental Management* 42:458-469.

Kulmala, M., Suni, T. Lehtinen, K. E. J., Dal Maso, M., Boy, M., Reissell, A., Rannik, Ü., Aalto, P., Keronen, P., Hakola, H. Bäck, J., Hoffmann, T. Vesala, T., Hari, P. 2004. A new feedback mechanism linking forests, aerosols, and climate. *Atmospheric Chemistry and Physics* 4, 557-562.

Kulmala et al. 2014. CO₂ induced terrestrial climate feedback mechanism: From carbon sink to aerosol source and back. *Boreal Env. Res.* 19 (suppl. B): 122–131.

Kupiainen, K., Klimont, Z. 2007. Primary emissions of fine carbonaceous particles in Europe. *Atmospheric environment* 41(10), 2156-2170.

Kuusinen N. 2014. Boreal forest albedo and its spatial and temporal variation. *Dissertationes Forestales* 179.

Liski, J., Lehtonen, A., Palosuo, T., Peltoniemi, M., Eggers, T., Muukkonen, P., & Mäkipää, R. 2006. Carbon accumulation in Finland's forests 1922–2004—an estimate obtained by combination of forest inventory data with modelling of biomass, litter and soil. *Annals of Forest Science*, 63(7), 687-697.

Mantau, U. 2012. Wood flows in Europe (EU27). Project report. Celle 2012, 24 pp.

Metla 2009. <http://www.metla.fi/tiedotteet/2009/2009-04-16-ilmastonmuutos-metsat.htm>

Myllyntaus, T., Mattila, T. 2002. Decline or increase? The standing timber stock in Finland, 1800–1997. *Ecological Economics*, 4(12), 271-288.

Lintunen, J., Uusivuori, J. 2014. On The Economics of Forest Carbon: Renewable and Carbon Neutral But Not Emission Free. In Series:Carraro,C.(ed.) *Climate Change and Sustainable Development*. FEEM Working Paper 2014.013:

Lohika, A., Minkkinen, K., Laine, J., Savolainen, I., Tuovinen, J.-P., Korhonen, L., Laurila, T., Tietäväinen, H., Laaksonen, A. 2010. Forestation of boreal peatlands – impacts of changing albedo and greenhouse gas fluxes on radiative forcing.. *J. Geophys. Res.*, 115, G04011, doi:10.1029/2010JG001327.

Luyssaert et al. 2008. Old-growth forests as carbon sinks. *Nature* 455, 213-215.

Pingoud, K., Cowie, A., Bird, N., Gustavsson, L., Rüter, S., Sathre, R., Soimakallio, S., Türk, A., Woess-Gallasch S. 2010. Bioenergy: Counting on Incentives. *Letter. Science* 5, 1199-1200.

Pingolud, K., Ekholm, T., Savolainen, I. 2012. Global Warming Potential (GWP) factors and warming payback time as climate indicators of forest biomass use. *Mitigation and Adaptation of Strategies for Global Change* 17: 369–386. Springer. doi-link: 10.1007/s11027-011-9331-9.

Pingoud, K., Savolainen, I., Seppälä, J., Kanninen, M., Kilpeläinen, A. Metsien käytön ja metsäbioenergian ilmastovaikutukset. Suomen ilmastopaneeli. Raportti 2/2013.

Pohjola, J., Valsta, L. 2007. Carbon credits and management of Scots pine and Norway spruce stands in Finland. *Forest Policy and Economics* 9: 789–798.

Pumpanen J. 2003. CO₂ efflux from boreal forest soil before and after clear-cutting and site preparation. University of Helsinki Department of Forest Ecology Publications 30.

Pyörälä, P., Peltola, H., Strandman, H., Kilpeläinen, A., Asikainen, A., Jylhä, K., Kellomäki, S. 2014. Effects of management on economic profitability of forest biomass production and carbon neutrality of bioenergy use in Norway spruce stands under the changing climate. *Bioenergy Research* 7(1): 279-294

Sathre, R., O'Connor, J. 2010. Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science & Policy* 13, 104-114.

Savolainen, I., Hillebrand, K., Nousiainen, I., Sinisalo, J. 1994: Greenhouse impacts of the use of peat and wood for energy. Espoo, Finland. VTT Research Notes 1559. 65p.+app.

Schulze, E. D., Körner, C., Law, B. E., Haberl, H., & Luysaert, S. 2012. Large scale bioenergy from additional harvest of forest biomass is neither sustainable nor greenhouse gas neutral. *GCB Bioenergy*, 4(6), 611-616.

Sievänen, R., Salminen, O., Lehtonen, A., Ojanen, P., Liski, J., Ruosteenoja, K., Tuomi, M. 2014. Carbon stock changes of forest land in Finland under different levels of wood use and climate change. *Annals of Forest Science* 71:255–265

Smith, P., Bustamante, M., Ahammad, H. et al. 2014. Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, et al), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Soimakallio, S. 2014. Toward a More Comprehensive Greenhouse Gas Emissions Assessment of Biofuels: The Case of Forest-Based Fischer-Tropsch diesel Production in Finland. *Environmental Science & Technology* 48, 3031–3038.

Spracklen, D. V., Bonn, B., Carslaw, K. S. 2008. Boreal forests, aerosols and the impacts on clouds and climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 366 (1885), 4613-4626.

Stinson et al. 2011. An inventory-based analysis of Canada's managed forest carbon dynamics, 1990 to 2008 *Global Change Biology* 17: 2227-2244

Street et al. 1997. Effect of habitat and age on variations in volatile organic compound (VOC) emissions from *Quercus ilex* and *Pinus pinea*. *Atmospheric Environment* 31, 89-100

Repo, A., Tuomi, M., Liski, J. 2011. Indirect carbon dioxide emissions from producing bioenergy from forest harvest residues. *GCB Bioenergy*: 107-115.

Repo, A., Känkänen, R., Tuovinen, J., Antikainen, R., Tuomi, M., Vanhala, P., Liski, J. 2012. Forest bioenergy climate impact can be improved by allocating forest residue removal. *GCB Bioenergy*, 4, 202-212.

The state of Canada's forests 2012. Natural Resources Canada 2013. 50 p.

Vanhala, P., Repo, A., Liski, J. 2013. Forest bioenergy at the cost of carbon sequestration?. *Current Opinion in Environmental Sustainability*: 41-46.

OSA 2: MITÄ METSÄMALLIT KERTOVAT SUOMEN METSIEN HIILINIELUN TULEVASTA KEHITYKSESTÄ?

Tuomo Kalliokoski¹ ja Anna Repo²

¹Helsingin yliopisto

²Suomen ympäristökeskus

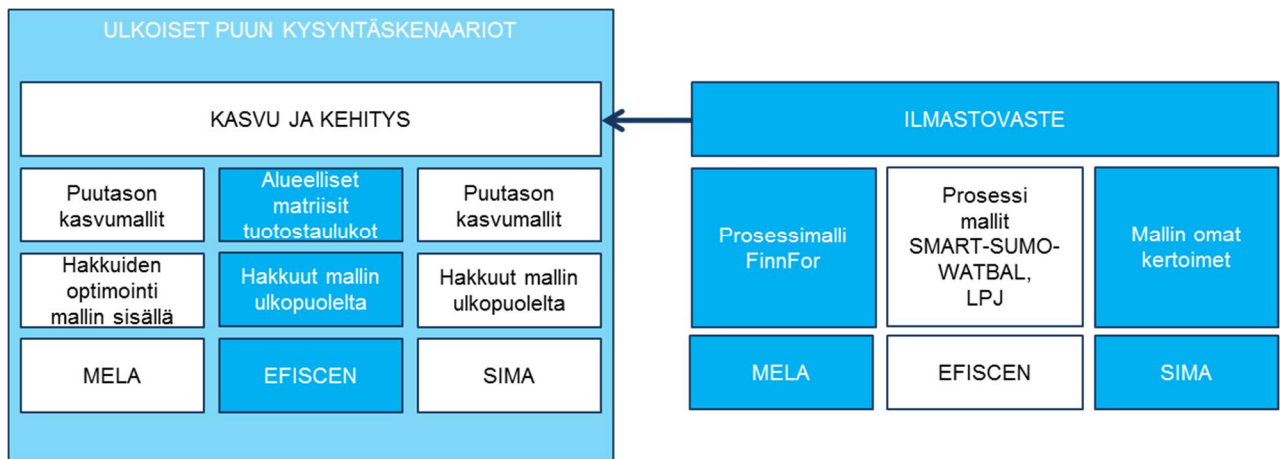
TIIVISTELMÄ

Hiilinielun muutos ja siihen vaikuttavat tekijät seuraavien vuosikymmenten aikana

- Kirjallisuuskatsauksessa käytiin läpi tutkimuksia, joissa kuvataan Suomen metsien hiilinielun ja -varaston muutoksia seuraavien vuosikymmenten aikana sekä ilmastomuutoksen ja metsien käsittelyn vaikutusta tähän.
- Katsauksessa keskityttiin MELA, EFISCEN ja SIMA malleilla tehtyihin tutkimuksiin. Lisäksi mukana oli muutama yksittäinen muilla malleilla tehty tutkimus.
- Eri malleilla saadut tulokset metsien hiilinielun tulevasta kehityksestä poikkeavat paljon toisistaan (5 – 25 Tg C a⁻¹). Vaihtelu riippuu enemmän metsien käsittely- ja ilmastomuutosskenaariosta kuin käytetystä ennustemallista. Tutkimusten perusteella Suomen metsien hiilinielu kasvaa lähivuosikymmeninä, jos hakkuut pidetään nykytasolla ja häiriöt metsissä eivät lisäänty. Hiilinielun kasvu on seurausta erityisesti vallitsevasta ikäluokkarakenteesta sekä ilmastomuutoksen aiheuttamasta metsien lisäkasvusta. Uusimpien tutkimusten valossa on mahdollista, että mallit yliarvioivat ilmastomuutoksen aikaansaamaa metsien kasvun kiihtymistä.
- Metsiin kohdistuvien häiriöiden ennustetaan lisääntyvän ilmastomuutoksen seurauksena. Lisääntyvät häiriöt voivat kumota ilmastomuutoksen kasvua lisäävän vaikutuksen. Yhdessä kiihtyvän hajotustoiminnan kanssa tämä voi johtaa nykyistä pienempään hiilinieluun. Ilmastomuutoksen vaikutusta metsien kehitykseen sekä metsissä esiintyviin häiriöihin samanaikaisesti mallintavia tutkimuksia ei Suomessa ole juurikaan tehty.
- Metsien käsittely vaikuttaa voimakkaasti hiilinielun suuruuteen. Voimakas hakkuiden lisääminen pienentää metsien hiilinielua nykyisestä ja erityisesti metsäbioenergian käytön lisäämisen nettovaikutus voi jäädä ilmaston kannalta haitalliseksi.
- Metsien käsittelyn biofysikaalisista vaikutuksista ilmastoon (albedo- ja aerosolivaikutus) on vasta alustavia tutkimustuloksia. Niiden perusteella näyttää siltä, ettei pelkän hiilivaikutuksen huomioinen johda ilmaston kannalta parhaaseen mahdolliseen metsien käsittelyyn.

1. JOHDANTO – MALLIEN TYPOLOGIAA JA KESKEISIÄ ELEMENTTEJÄ

Tässä kirjallisuuskatsauksessa käytiin läpi pääasiassa MELA, EFISCEN ja SIMA malleja (Kuva 1) sekä niillä tehtyjen hiilitasemallinnusten keskeisiä tuloksia. Lisäksi mukana oli muutamia muilla malleilla tehtyjä yksittäisiä tutkimuksia. Lyhyet kuvaukset malleista on esitetty alla. Taulukkoon 1 on kerätty mallien keskeisiä rakenteita kartoittavia kysymyksiä ja niiden vastauksia. Laajempi taulukko on liitteenä (Liite 1). Mallitutkimusten päätulokset -osion vastaukset on saatu kirjallisuudesta, tutkimuksissa käytetyistä aineistoista sekä tutkimusten tekijöiden kanssa käydyistä keskusteluista. Katsauksessa esitellään lyhyesti myös soiden ojituksen ilmastovaikutuksia. Lopuksi käydään läpi tutkimuksiin sisältyviä epävarmuuksia.



Kuva 1. Mallien typologia ja keskeisiä piirteitä. MELA = MEtsäLAskelma, EFISCEN = European Forest Information Scenario Model, SIMA = gap-type forest simulation model.

2. METSIEN KASVUA KUVAAVAT MALLIT

2.2 MELA

MELA on metsämalli, jossa metsien tulevan kehityksen arviointi perustuu yksittäisten puiden empiirisiin kasvufunktioihin ja metsänkäsittelyvaihtoehtojen optimointiin. Myös puiden luontainen synty ja kuolleisuus on kuvattu mallissa puutason empiirisillä funktioilla. Mallin ennustama puiden kasvu nykyilmastossa on skaalattu vastaamaan jakson 1999-2008 havaittua kasvua. Muutos kasvunopeudessa ilmastonmuutoksen vaikutuksesta on mallissa implementoitu funktion kautta, joka huomioi muutokset keskilämpötilassa ja ilman CO₂ pitoisuudessa. Ennustettu kasvumuutos perustuu FinnFor mallilla tehtyihin mallinnuksiin (Matala ym. 2003, 2005). Alueellisissa MELA laskelmissa lähtötietoina käytetään yleensä valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) metsävaratietoja. MELA ei ole ns. taloudellinen tasapainomalli, eikä näin sisällä eksplisiittisiä puun kysyntä- tai tarjontaskenaarioita, vaan ne voidaan asettaa mallin rajoitefunktioiksi. Rajoitefunktioiden ohjaamalla aluetason optimoinnilla voidaan laskea puun kysynnän toteuttavien hakkuiden optimaalinen rakenne tavoitefunktion suhteen.

Redsven, V., Hirvelä, H., Härkönen, K., Salminen, O., Siitonen, M. 2011. MELA2009 Reference Manual (2nd edition). The Finnish Forest Research Institute. 664 p. ISBN 978-951-40-2283-3

2.2 EFISCEN

"The European Forest Information SCENario model", EFISCEN on aluetason metsämalli. Mallilla voidaan tuottaa ennusteita metsävarojen kehityksestä tietyllä alueella tai aina koko Euroopan laajuisesti. EFISCEN:ssä alueen metsien pinta-ala on jaettu matriisiin, jonka ruudut perustuvat ikä- ja tilavuusjakaumiin. Metsän vuotuinen kasvu on suhteutettu mallissa puuston tilavuuteen. Kasvufunktion kertoimet sekä ikä- ja tilavuusjakaumat perustuvat joko kansallisiin inventointitietoihin tai tuotostaulukoihin. Muutokset metsien kasvunopeudessa voidaan implementoida olettamalla suhteellisia muutoksia kasvufunktioiden tuottamassa kasvussa. Myös ilmastonmuutoksen aiheuttama kasvunvaste implementoidaan suhteellisen kasvunmuutoksen kautta. Matriisin kunkin ruudun metsäalaa päivitetään iän ja tilavuuden osalta simuloinnin aikana. Pinta-alaosuuksien muuttuminen matriisin ruutujen välillä simuloinnin aikana kuvaa erilaisia luontaisia prosesseja, kuten kasvua, kuolleisuutta ja metsien vanhenemista. Lisäksi metsien käyttö ja hoito vaikuttaa pinta-alaosuuksien muutokseen matriisin ruutujen välillä. Metsien käyttö- ja hoitokokonaisuus muodostuu harvennukset ja minimipäätehakkuuian määrittävästä osasta sekä puun kysyntäskenaarioista.

Schelhaas MJ, Eggers J, Lindner M ym. (2007) Model documentation for the European Forest Information Scenario model (EFISCEN 3.1.3). Alterra-rapport 1559/EFI Technical Report 26, Alterra, Wageningen, 118 pp.

2.3 SIMA

SIMA on typen ja hiilen kiertoon perustuva metsäekosysteemimalli, jossa lämpötila sekä valon, typen ja veden saatavuus vaikuttavat puuston ja pintakasvillisuuden kasvuun ja kehitykseen. SIMA-malli on "gap type" -malli, jossa puuston syntymä, kasvu ja kuolema kuvataan satunnaisina tapahtumina. Puiden kuollessa metsään syntyy aukko, jossa metsä uudistuu ja kasvaa. Yleisesti "gap type" -malleilla voidaan kuvata puupopulaatioiden vastetta häiriöön ja puuyksilöiden välisiä vuorovaikutussuhteita, esimerkiksi kilpailua. SIMA-malli yhdistää kasvu- ja tuotostaulukot ja ympäristöolosuhteita kuvaavat mallit. Esimerkiksi puiden kasvua kuvataan potentiaalisella kasvulla, jota ympäristötekijät rajoittavat. Ympäristötekijöistä malli huomioi lämpötilan, sademäärän, maaperän kosteuden, sekä typen ja valon saatavuuden. Lämpötila rajoittaa lajien maantieteellistä levinneisyyttä ja kasvua. Puustolle ja aluskasvillisuudelle saatavilla olevan typen määrä riippuu mineralisoituneen ja karikkeen hajotuksessa sitoutuneen typen määrästä. Malliin sisältyy vaihtoehtoisina prosesseina myös metsäpalon, sekä hyönteis- ja myrskytuhojen mahdollisuudet. Mallissa on mukana myös pakkasvauriot. Mallilla voidaan tutkia eri puulajien kasvua ja tuotosta ja näiden keskinäisiä vuorovaikutussuhteita muuttuvassa ympäristössä. Mallilla voidaan myös tutkia metsänhoitotoimien, kuten harvennusten ja lannoituksen, vaikutusta metsäekosysteemiin.

Kellomäki S, Väisänen H, Hänninen H, Kolström T, Lauhanen R, Mattila U, Pajari BI (1992) SIMA: a model for forest succession based on the carbon and nitrogen cycles with application to silvicultural management of the forest ecosystem. Silva Carelica, 22, 1-85.

Kolström M (1998) Ecological simulation model for studying diversity of stand structure in boreal forests. Ecological Modelling, 111, 17-36

Taulukko 1. Viiden tutkimuksen mallilaskelmien keskeisiä oletuksia. Laajempi taulukko liitteessä 1.

Tutkimus	1	2	3	4	5
Käytetty malli	MELA	MELA	EFISCEN	EFISCEN	SIMA
Emissioskenaario	A1B	A1B	A2	A1FI, A2, B1, B2	A2
Puun kysyntäskenaariot mallinnettu erikseen	Ei	Kyllä	Ei	Kyllä	Ei
Mihin vuoteen asti ennusteet on laskettu?	2042	2035	2100	2100	2099
Ilmastonmuutoksen vaikutuksessa metsiin mukana:					
CO2	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Ilman lämpötila	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Sadanta	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Ilmankosteus	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei
Maaveden määrä	Ei	Ei	Ei	Ei	Kyllä
Maaperän ravinteet	Ei	Ei	Ei	Ei	Kyllä
Typillaskeuma	Ei	Ei	Kyllä	Ei	Ei
Metsien ilmastovasteessa vain puusto mukana?	Ei	Ei	Ei	Kyllä	Ei
Ilmastovasteessa maaperä mukana?	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei	Kyllä
Ilmastovasteessa puutuotteet mukana?	Ei	Kyllä	Ei	Ei	Ei
Ilmastovasteessa puutuotteiden korvausvaikutus mukana?	Ei	Kyllä	Ei	Ei	Ei
Ilmastovasteessa albedo mukana?	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei
Ilmastovasteessa aerosolit mukana?	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei
Onko mallinnettu häiriöitä?	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei

1 = Sievänen ym. 2014

2 = Kallio ym. 2013

3 = Pussinen ym. 2009

4 = Eggers ym. 2008

5 = Kellomäki ym. 2008.

2.4 FinnFor – Puuston kasvun ilmastovastemalli

FinnFor on prosessipohjainen metsän kasvumalli, jossa puun kasvu on kuvattu yksityiskohtaisilla, pääasiassa fysikaalisesti perustelluilla prosesseilla (Kellomäki ym. 1993, Kellomäki ja Strandman 1997). Mallin eri osien käyttäytymistä on tutkittu ja validoitu lukuisissa eri tutkimuksissa (mm. Venäläinen ym. 2001, Medlyn ym. 2002, Kellomäki ja Wang 2000a, Wang ym. 2004, Komarov ym. 2003). Mallia on myös käytetty isossa määrässä tutkimuksia, joissa on pyritty selvittämään metsänhoidon ja ilmastomuutoksen vaikutusta sekä yksittäisen metsikön että koko Suomen metsien kasvuun ja kehitykseen (mm. Briceño-Elizondo ym. 2006, Kellomäki ym. 2008, Ge ym. 2010, 2013, 2014).

Mallissa puun rungon tilavuuskasvu on kuvattu päivätason nettofotosynteesin (yhteyttämisen ja omavaraisen hengityksen erotus) avulla. Yksittäisen lehden fotosynteesi lasketaan Farquharin fotosynteesimallin mukaisesti (Farquhar ym. 1980). Fotosynteesinopeuteen vaikuttavat säteilyvoimakkuus, lämpötila, ilmankosteus, ilman CO₂ pitoisuus, sekä maaveden saatavuus. Maaveden saatavuus riippuu sadannan ja haihdunnan välisestä suhteesta. Kokonaishaihdunta koostuu puiden ilmarakojen kautta tapahtuvasta haihdunnasta (transpiraatio) sekä latvusten ja maan pinnalta tapahtuvasta haihdunnasta (evaporaatio). Fotosynteesin biokemialliset prosessit riippuvat lehtien

typpipitoisuudesta. Lehtien typpipitoisuuden oletetaan vaihtelevan latvuksen sisällä. Lehden fotosynteesi skaalataan puun latvukselle huomioimalla valo- ja varjolehtien osuus sekä niitä vastaavat ilmarakojohtavuudet. Lisäksi mallissa on huomioitu puiden vuosirytmifenologia.

Puun ilmarakojen kautta tapahtuva haihdunta mallinnetaan "big leaf" -menetelmällä, perustuen Penman-Monteithin haihduntamalliin (Beven 1979), jossa haihdunta kumuloidaan yksittäisen lehden veden johtavuudesta. Yksittäisen lehden johtavuus on jaettu valossa ja varjossa kasvavia lehtiä kuvaaviin osuuksiin. Haihduntapaine (vapour pressure deficit, VPD) ja lämpötila oletetaan samaksi latvuksen sisällä. Lehden rajakerrosjohtavuus riippuu tuulen nopeudesta. Skaalaus lehden tasolta koko puun tasolle tehdään integroimalla valo- ja varjolehtien osuudet sekä niitä vastaavat ilmarakojohtavuudet. Ilmarakojohtavuuden oletetaan riippuvan säteilystä, haihduntapaineesta, ilman CO₂ pitoisuudesta ja lämpötilasta, sekä maaperän kosteudesta ja lämpötilasta. Penman-Monteith lähestymistapaa käytetään myös latvusten pinnalta tapahtuvan haihdunnan kuvaamiseen, kun taas maan pinnalta tapahtuvan haihdunnan kuvaamisessa käytetään iterointia, joka yhdistää sekä kokeellisesti, että fysikaalisesti perusteltuja lähestymistapoja. Lehtialan oletetaan jakautuvan tasaisesti yksittäisen puun sisällä ja metsikössä puut ovat jakautuneet Poisson -jakauman mukaisesti.

Maaveden varaston kuvaamiseksi maaperä on jaettu yhteen orgaaniseen ja useampaan mineraalimaan kerrokseen. Maaveden määrä puiden juuristokerroksessa lasketaan maaperän volumetrinen vesipitoisuutena. Maaveden virtauksen oletetaan seuraavan Darcyn lakia. Maavesi vaikuttaa puiden kasvuun maaveden suhteellisen saatavuuden kautta, minkä vaikutus realisoidaan lehtien ilmarakojohtavuuden kautta. Mallissa käytetään maaveden saatavuudelle kynnsarvoa, jonka jälkeen lehtien ilmarat sulkeutuvat.

Maaperän orgaanisen aineksen kehitys riippuu mallissa karikkeen määrästä ja puiden kuolleisuudesta. Karikkeen hajoaminen kuvataan kolmessa peräkkäisessä vaiheessa, joissa karikkeesta muodostuu humusta ja karikkeeseen varastoitunut tyyppi vapautuu. Puiden typenotto lasketaan eri ositteiden (lehdet, oksat, runko, juuret) typen tarpeesta.

2.5 Muita puuston ja metsien kasvu kuvaavia malleja

Kuusen ja männyn kasvua mallintava metsikkötason hiilitasemalli, PipeQual, kuvaa puun hiilensidontaa yksityiskohtaisten fysikaalisten prosessien avulla (Mäkelä 1997, 2002, Mäkelä ja Mäkinen 2003). Mallissa metsikkö on jaettu kokoluokkiin, joiden kasvu on kuvattu kokoluokan keskipuun ja puiden lukumäärän avulla. Puun sitoma hiili jaetaan mallissa lehtiin, oksiin, runkoon ja juuriin puun rakennetta kuvaavien sääntöjen avulla, jotka on johdettu sekä fysikaalisten prosessien, että empiiristen havaintojen pohjalta. Mallia on käytetty sekä metsän kasvuprosessien tutkimiseen (Kantola ym. 2007), metsänhoidon taloudellisiin laskelmiin (Hyytiäinen ym. 2004, Niinimäki ym. 2012) että ilmastonmuutoksen vaikutusten tarkastelemiseen (Mäkipää ym. 2015).

Prosessipohjainen EFIMOD malli (Komarov ym. 2003) on kehitetty kuvaamaan boreaalisten ja temperaattisten metsien kasvua ja kehitystä. Mallissa on kuvattu kuusen, männyn ja rauduskoivun kasvu, minkä vuoksi myös sekametsien mallintaminen on mahdollista. EFIMOD sisältää metsikön tilajärjestyksen kuvauksen, minkä seurauksena yksittäisen puun kasvuun vaikuttavat sen asema metsikössä sekä asemasta seuraavat valaistus-, vesi- ja ravinneolosuhteet. Mallissa huomioidaan myös typpilaskeuma sekä typen otto ja huuhtoutuminen. Mallin modulaarinen rakenne mahdollistaa eri osamallien yhdistämisen toimivaksi kokonaisuudeksi. Esimerkiksi maaperädynamiikka ja puiden juuristokilpailu on kuvattu erillisillä osamalleilla. Mallia on käytetty ilmastonmuutoksen vaikutusten kuvaamiseen sekä Euroopassa (mm. Shanin ym. 2013) että Kanadassa (mm. Shaw ym. 2006).

MONSU simulointiohjelmisto on kehitetty monitavoitteisen metsäsuunnittelun käyttöön. MONSU metsikön kehitys määritetään empiiristen mallien avulla, jotka kuvaavat yksittäisten puiden läpimitan ja pituuden kasvua, kuolleisuutta, sekä uusien puiden syntymistä pienimpään kokoluokkaan (Pukkala ym. 2009). Ilmastomuutoksen vaikutus puiden kasvuun ja kehitykseen on tuotu myös MONSU ohjelmistoon FinnFor mallin ennusteista (Pukkala ja Kellomäki 2012). Ohjelmistoa on käytetty erityisesti eri-ikäisrakenteisten metsien kasvun ja kehityksen mallintamiseen ja sovellettu sekä metsänhoidon että ilmastomuutoksen vaikutusten mallintamiseen (mm. Pukkala 2011, Pukkala ja Kellomäki 2012, 2013, Pukkala 2014).

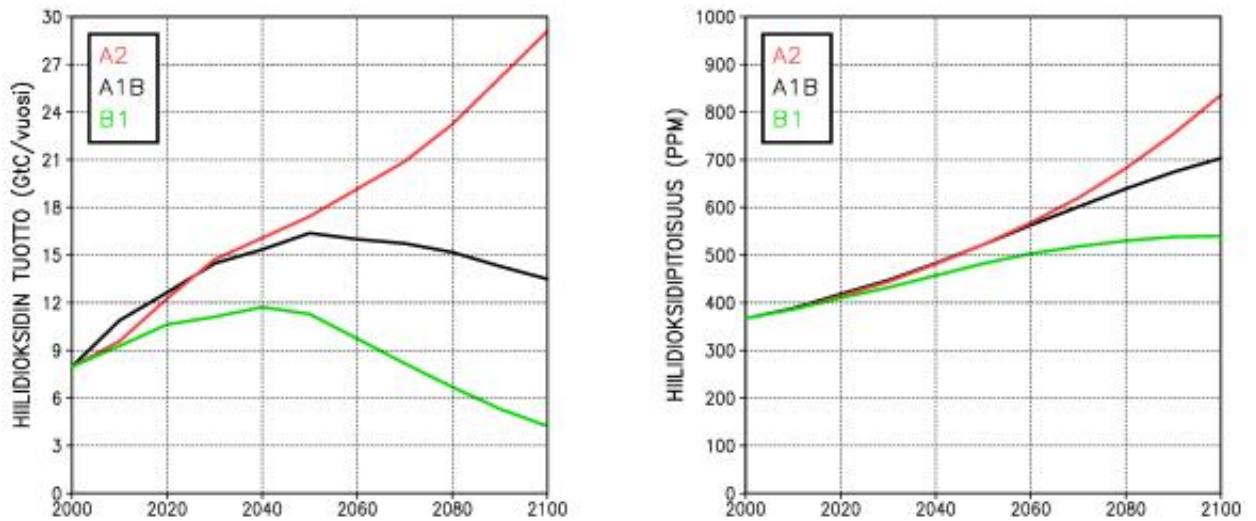
3. ILMASTONMUUTOSSKENAARIOT

Kirjallisuuskatsauksessa mukana olleissa tutkimuksissa ilmastomuutoksen aikaansaamien muutosten pohjana olivat pääasiasiassa IPCC:n SRES-kasvihuonekaasuskenaariot. (Nakicenovic ym. 2001, 'Special Report on Emission Scenarios'). SRES-skenaariot voidaan jakaa kahteen ryhmään: kulutusyhteiskuntaskenaariot (A-skenaariot) ja kestävään kehitykseen tähtäävät skenaariot (B-skenaariot). Ilmastomallien malliajoissa on eniten käytetty näistä skenaarioista kolmea:

- A2-skenaario edustaa pessimististä tulevaisuudennäkymää. Sen kuvaamassa maailmassa teollisuus- ja kehitysmaitten tulo- ja kehityserot säilyvät suurina. Tällöin väestönkasvu jatkuu kehitysmaissa nopeana ja maapallon väkiluku kasvaa räjähdysmäisesti. Siirtyminen fossiilisista polttoaineista päästöttömiin energianlähteisiin on hidasta.
- B1-skenaario taas on varsin optimistinen. Siinä oletetaan teollisuus- ja kehitysmaitten hyvinvointierojen tasaantuvan, mikä saa väestönkasvun talttumaan kehitysmaissakin. Kestävä kehitys on arvossaan, ja ympäristölle ystävällisen teknologian kehittäminen ja käyttöönotto on nopeaa.
- A1B-skenaario edustaa näitten kahden ääripään välimuotoa.

Päästöissä on suuret erot eri skenaarioiden välillä.

Kuvissa 2 on esitetty arvioita hiilidioksidin päästöistä ja pitoisuuksista kolmen SRES-skenaarion perusteella. A2-skenaarion toteutuessa CO₂ -päästöt suurin piirtein kolminkertaistuvat tämän vuosisadan aikana, ja ovat selvässä kasvussa vielä vuoden 2100 tienoillakin. Kahdessa muussa skenaariossa päästömäärät kääntyvät laskuun vuosisadan puoliväliä lähestyittäessä. B1-skenaariossa pudotus on voimakkaampaa. Tämän skenaarion toteutuessa hiilidioksidin päästöt olisivat vuosisadan lopussa enää puolet vuoden 2000 määristä.



Kuva 2. Ihmiskunnan tuottamien hiilidioksidipäästöjen (vasen kuva) ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden (oikea kuva) arvioitu muuttuminen kolmen SRES-skenaarion mukaan. Yksikkö GtC on gigatonnia eli miljardia tonnia hiileksi laskettuna. Yksikkö ppm on tilavuuden miljoonasosa. (Ilmasto-opas.fi)

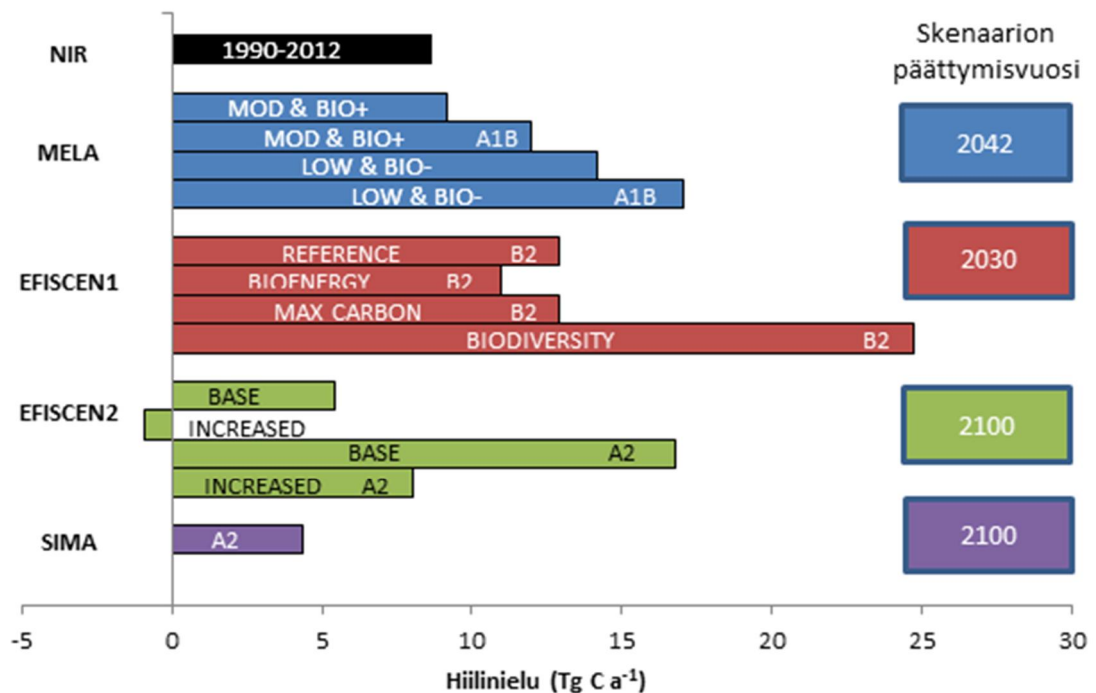
4. TUTKIMUSTEN PÄÄTULOKSET

4.1 Ilmastonmuutoksen ja metsän käsittelyn vaikutus puiden kasvuun ja metsien hiilivarastoon

Ilmastonmuutoksen vaikutuksesta Suomen metsien kasvu kiihtyy. Tätä tulosta voidaan pitää kohtuullisen todennäköisenä, koska kvalitatiivisesti samanlainen tulos on saatu erilaisilla malleilla ja erilaisilla ilmastopakotteilla. (Ge ym. 2013, Kalliokoski ym. 2015, Kellomäki ym. 2008, Mäkipää ym. 2015, Reyer ym. 2014, Shanin ym. 2013, Wamelink ym. 2009). Kasvun lisääntyminen vaihtelee välillä 5-75%. Laaja vaihteluväli osoittaa kasvun muutoksen suuruuden riippuvan voimakkaasti mallin oletuksista; erityisesti siitä, mitä ympäristötekijöitä mallinnuksessa on huomioitu. Puiden lisääntynyt kasvu tarkoittaa metsikkötasolla puuston suurempaa hiilensidontaa (suurempaa hiilinielua) ja näin ollen mahdollisuutta metsikön hiilivaraston kasvattamiseen (Eggers ym. 2008, Kellomäki ym. 2008, Mäkipää ym. 2015, Pussinen ym. 2009, Sievänen ym. 2014, Verkerk ym. 2014). Hiilivaraston muutokseen vaikuttavat suoran kasvunmuutoksen lisäksi erityisesti implementoidut hakkuuskenaariot (Eggers ym. 2008, Kallio ym. 2013, Sievänen ym. 2014, Verkerk ym. 2014). Läpikäydyissä Suomen metsien hiilivaraston muutoksia mallintavissa tutkimuksissa ei ole huomioitu mahdollisia muutoksia metsissä esiintyvissä häiriöissä.

Suomen puuston hiilivarasto oli noin 780 Tg C vuonna 2004 (Liski ym. 2006) ja viime vuosikymmeninä metsien hiilinielu on vaihdellut 5 - 10 Tg C a⁻¹ välillä (NIR 2012). Eri malleilla saadut tulokset metsien hiilinielun tulevasta kehityksestä poikkeavat kohtuullisen paljon toisistaan (Kuva 3). MELA mallilla tehdyn tutkimuksen mukaan metsien hiilinielun vaihteluväli vuonna 2042 olisi 13-29 Tg C a⁻¹ (Sievänen ym. 2014). Pienin hiilinielu on laskennassa saatu yhdistämällä nykyinen ilmasto, lähellä nykytasoa olevat ainespuuhakkuut (56.6 milj. m³ a⁻¹) sekä 25.5 milj.m³:in käyttö energiapuuksi (Suomen energia- ja ilmastostrategian mukainen metsähake 13.5 milj.m³ a⁻¹, 6.5 milj.m³ a⁻¹ biopolttolaitoksiin ja 5.5 milj.m³ a⁻¹

kotitalouskäyttöön). Suurin hiilinielu on muuttuneen ilmaston (SRES A1B, 19 ilmastomallin keskiarvo), matalien ainespuuhakkuiden ($43.9 \text{ milj.m}^3 \text{ a}^{-1}$), sekä 18 milj.m^3 :in energiapuukäytön yhdistelmä (nykytasoa hieman pienempi energiapuunkorjuu $6.5 \text{ milj.m}^3 \text{ a}^{-1}$, $6.0 \text{ milj.m}^3 \text{ a}^{-1}$ biopolttolaitoksiin ja $5.5 \text{ milj.m}^3 \text{ a}^{-1}$ kotitalouskäyttöön). Myös toisessa MELA tutkimuksessa (Kallio ym. 2013) metsien hiilinielu kasvoi nykyisestä jokaisessa skenaariossa, mutta ilmastomuutos ei voimistanut hiilinielua verrattaessa tuloksia skenaarioihin, joissa käytettiin nykyilmastoa.



Kuva 3. Eri mallien ennustama Suomen metsien keskimääräinen hiilinielu kunkin tutkimuksen tarkastelujakson aikana. Skenaarioissa, joissa on huomioitu ilmastomuutoksen vaikutus, on merkitty tutkimuksessa käytetty IPCC:n emissioskenaario (A1B, B2, tai A2). Kuvan nuolet kuvaavat kunkin tutkimuksen tarkastelujakson päättymisvuotta.

NIR = Kansallinen kasvihuonekaasuinventaario (National Greenhouse Gas Inventory Report).

MELA = Sievänen ym. 2014;

LOW & BIO- = alhaiset ainespuuhakkuut ja nykytasoa hieman pienempi energiapuunkorjuu

MOD & BIO+ = nykytasoa ainespuuhakkuut, sekä Ilmasto- ja energiastrategian mukainen energiapuunkorjuu

EFISCEN1 = Verkerk & Schelhaas 2012, EFSOSII;

Reference = Nykyisen kaltainen metsänhoito ja hakkuut.

Bioenergy = Ilmasto- ja energiastrategian bionenergiatavoitteet täyttävät hakkuut.

Max carbon = Biomassaan sidotun hiilen maksimointi, ilman että vuotuiset ainespuuhakkuut pienenevät nykyisestä.

Biodiversity = Biodiversiteetin merkittävä lisäys tavoitteena. Hakkuutähteitä ei korjata lainkaan, pitemmät kiertoajat, sekä enemmän sekametsiä. Lisäksi metsien pinta-ala kasvaa.

EFISCEN2 = Pussinen ym. 2009;

EFISCEN1 = SRES A2, nykytasoa aines- ja energiapuuhakkuut

Base = nykyilmasto, nykytasoa aines- ja energiapuuhakkuut

Increased = SRES A2, hakkuut 100% nykytasoa suuremmat

SIMA = Kellomäki ym. 2008; Nykyisen kaltainen metsänhoito, hakkuut lisääntyvät kasvavien hakkuumahdollisuuksien mukaisesti

EFISCEN mallilla tehdyt tutkimukset ovat kaikki Euroopan laajuisia. Yhden tutkimuksen Suomea koskeva aineisto oli erikseen saatavilla (The European Forest..., EFSOSII). Muissa tutkimuksissa Suomen tulokset esitellään osana Pohjois-Eurooppaa. EFSOSII tulokset (Kuva 3, EFISCEN1) ovat pääpiirteissään linjassa.

MELA tutkimusten kanssa, Suomen metsien hiilinielu olisi kasvamassa lähivuosikymmenten aikana, vaikka tutkimuksessa käytettiin lievempää ilmastomuutoskenaariota (SRESB2) kuin MELA tutkimuksissa. Biodiversiteettiskenaariossa (SRESB2, alhaiset hakkuut, lisää suojelumetsiä) saadaan kuitenkin kaikista tutkimuksista selvästi suurin keskimääräinen hiilinielu, n. 25 Tg C a⁻¹. Suhteellisesti pienin hiilinielu, n. 11 Tg C a⁻¹, saadaan energiapuuskenaariossa. Biodiversiteettiskenaarion alkutilanteessa metsien hiilivarasto on pienempi kuin muissa skenaarioissa, mikä osaltaan selittää hiilinielun voimakasta kasvua.

Pussinen ym. (2009) tutkimuksessa esitetään metsien hiilivaraston muutos vuosisadan loppuun mennessä Suomen, Ruotsin ja Norjan keskiarvotuloksena. Tätä keskiarvotulosta käyttäen, pitämällä hakkuut nykytasolla, sekä huomioiden ilmastomuutoksen (SRESA2, yksi ilmastomalli) kasvua lisäävää vaikutus, saadaan Suomen metsien keskimääräiseksi hiilinieluksi n. 17 Tg C a⁻¹ kuluvalla vuosisadalla. Jos ilmastomuutosta ei huomioida ja hakkuuta lisätään 100% nykyisestä, muuttuvat Suomen metsät hiilen nieluista lähteiksi (Kuva 3, EFISCEN2).

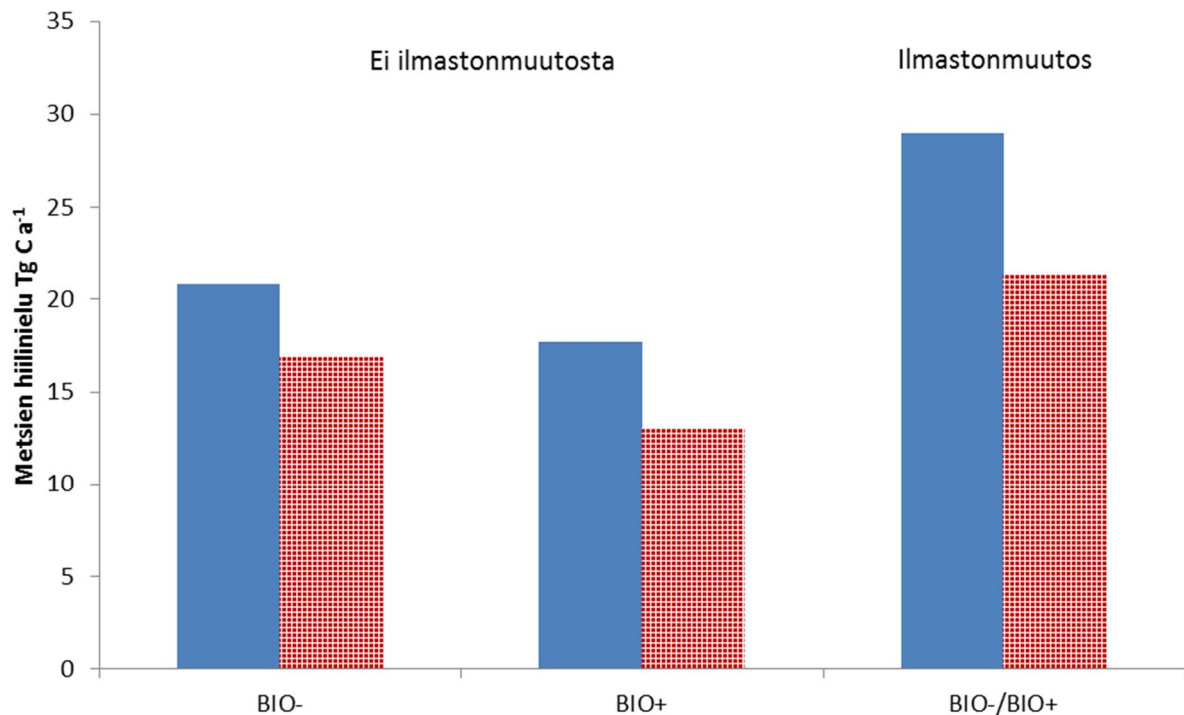
Kattavasti eri ilmasto- ja puunkypsyntäskenaarioita esittelevän EFISCEN tutkimuksen (Eggers ym. 2008) tulosten mukaan Euroopan tasolla kiihtynyt metsien kasvu voimistaa hiilensidontaa ja suurin hiilinielu saadaan vuoteen 2080 asti skenaariossa, jossa on pienimmät hakkuut (SRESB1). Metsien kasvu tasaantuu vuosisadan jälkimmäisellä puoliskolla kasvun alentuessa metsien tihentymisen seurauksena. Suomessa metsien kasvu lisääntyy 10-40% vuosisadan loppuun mennessä. Verkerk ym. (2014) tutkimuksessa Suomen metsien hiilen sidonnan todetaan kasvavan vuodesta 2010 vuoteen 2030, vaikka muualla Euroopassa hiilinielu samalla ajanjaksolla pienenee. Tässä tutkimuksessa ilmastomuutoksen (SRESB2) implementoinnissa ei huomioitu ilmakehän kasvavan hiilidioksidikonsentraation (CO₂, ppm) lannoitusvaikutusta puiden kasvuun.

Myös SIMA mallilla tehtyjen tutkimusten (Kellomäki ym. 2005, 2008) mukaan Suomen metsien hiilivarasto kasvaa kuluvan vuosisadan aikana. Muista tutkimuksista poiketen Suomen metsien keskimääräinen hiilinielu olisi kuitenkin pienempi, n. 5 Tg C a⁻¹ (Kuva 3, SIMA), kuin jakson 1990 – 2012 raportoitu keskimääräinen hiilinielu. Tämä tulos on saatu käyttämällä tutkimuksissa (Kellomäki ym. 2005, 2008) raportoituja keskiarvolukuja (76 Mg C ha⁻¹ nykytilanne, 89 Mg C ha⁻¹ 2050 ja 96 Mg C ha⁻¹ 2100). Näissä tutkimuksissa käytössä olivat FINADAPT skenaariot (Carter ym. 2005) ja niistä SRESA2 emissioskenaariolle lasketut ilmastomuutosprojektiot. Tutkimuksissa hakkuut kasvoivat hakkuupotentiaalin kasvun mukaisesti. Voimakas hakkuiden lisääntyminen siis selittää isolta osalta matalahkoa hiilinielua. Lisäksi näiden tulosten keskeinen sanoma on, että metsien kasvu kiihtyy erityisesti Pohjois-Suomessa, kun sen sijaan osassa Etelä-Suomea erityisesti kuusen kasvun ennustetaan heikentyvän ilmastomuutoksen seurauksena lisääntyneen haihdutuksen ja kuivuuskausien seurauksena. Laadullisesti samanlaisia tuloksia on saatu myös muissa SIMA mallinnustutkimuksissa (esim. Alam ym. 2008).

4.2 Ilmastonmuutoksen ja metsien käsittelyn suhteellinen vaikutus

Ilmastonmuutoksen ja metsien käsittelyn suhteellinen vaikutus on erilainen eri tutkimuksissa (kuva 4). Tämä johtuu siitä, että tutkimuksissa käytetyt ilmastoprojektit ja metsien käsittelyskenaariot eroavat toisistaan. Minkä verran mallien väliset erot sinänsä vaikuttavat tulosten välisiin eroihin, on tarkastelussa olleen kirjallisuuden perusteella mahdotonta sanoa. Tutkimuksessa käytettyjen mallien keskeisiä oletuksia on kerätty liitteenä olevaan taulukkoon (LIITE 1).

Katsauksessa mukana olevista tutkimuksista Eggers ym. (2008) käsittelee kattavimmin eri ilmasto- ja puunkysyntäskenaarioita. Vaikka eri ilmastoskenaarioissa oli huomattavia eroja vaikutuksessa metsien kasvuun, niin puun kysynnällä oli suurempi vaikutus metsävarantojen kehitykseen. Euroopan tasolla puun kysyntää ei pystytty tyydyttämään A1 ja A2 skenaarioissa vuosisadan jälkimmäisellä puoliskolla, eli puun kysynnän kasvu oli suurempaa kuin metsien lisääntynyt kasvu. Toisin kuin tutkimuksen muissa skenaarioissa metsäala ei laajentunut näissä kahdessa skenaariossa. Kirjoittajat toteavat tämän tuloksen koskevan erityisesti Suomea ja Ruotsia, joissa hakkuut olisivat kirjoittajien mukaan jo nyt lähellä suurinta kestäväää hakkuutasoa.



Kuva 4. Metsien käsittelyn ja ilmastonmuutoksen suhteellinen vaikutus Suomen metsien hiilinieluun Sievänen ym. (2014) tutkimuksen mukaan. Vuoden 2042 hiilinielu eri metsien käsittelyllä, sekä ilman ilmastonmuutosta ja ilmastonmuutos huomioiden. Yhtenäiset pylvääät LOW skenaario (alhaiset ainespuuhakkuut ja nykytasoa hieman pienempi energiapuunkorjuu) ja rasteroidut pylvääät MOD skenaario (nykytason ainespuuhakkuut, sekä Ilmasto- ja energiastrategian mukainen energiapuunkorjuu).

4.3 Metsähakkeen energiakäytön lisäämisen vaikutukset hiilinieluun

Metsäbiomassan energiankäytöllä voidaan korvata fossiilisia polttoaineita ja pienentää näin fossiilisen hiilen päästöjä ilmakehään. Toisaalta lisääntyvä biomassan korjuu pienentää metsien hiilivarastoa ja nielua. Kotimaisissa tutkimuksissa on arvioitu energia- ja ilmastostrategiassa määriteltyjen keinojen vaikutusta Suomen metsien hiilivarastojen kehittymiseen. Mallitustulokset osoittavat, että metsien hiilivarastot kasvavat verrattuna nykytilaan, vaikka metsähakkeen käyttöä lisätään energia- ja ilmastopoliittisen strategian linjauksen mukaisesti (Sievänen ym. 2007, Liski ym. 2011, Kallio ym. 2013, Sievänen ym. 2014). Huolimatta lisääntyvästä metsähakkeen käytöstä metsät pysyvät hiilinieluinä. Metsien hiilinielu ja -varasto ovat kuitenkin pienempiä kuin vertailutilanteessa, jossa metsähakkeen käyttöä ei lisätä. Sievänen ym. (2007) ovat arvioineet metsähakkeen käytön lisäämisen 4 miljoonasta kuutiosta 15 miljoonaan kuutioon vuoteen 2030 mennessä pienentävän metsien vuosittaista hiilinielua 0.75-0.85 Tg C a⁻¹. Liski ym. (2011) ovat laskeneet vuosittaisen metsähakkeen korjuun lisäämiseen 13,5 miljoonaan kuutioon vuoteen 2020 mennessä vähentävän vuosittaista hiilinielua 0.55-1.6 Tg C a⁻¹. Tämän tutkimukset suuremmat arvot johtuvat siitä, että metsähakkeen vuosittaista korjuumäärää on lisätty nopeammin kuin Sievänen ym. (2007) tutkimuksessa sekä uudemmassa maaperähiilen malliversiosta. Kallio ym. (2013) ovat arvioineet ilmasto- ja energiastrategian mukaisen linjauksen pienentävän metsien hiilinielua vuosittain väillä 2020-2030 keskimäärin 2.1 ja 3.6 Tg C a⁻¹, jos arviossa on mukana myös suunniteltujen biojalostamoiden tarvitsema raaka-aine. Sievänen ym. (2014) ovat arvioineet metsähakkeen käytön lisäämisen 13,5 miljoonan pienentävä metsien hiilinielua 2.3-2.7 Tg C a⁻¹ vuoden 2025 jälkeen. Metsien hiilivarastot ja -nielut pienenevät eniten tutkimuksissa, joissa energiaksi ohjautuu runkopuuta. Kallion (2013) tutkimuksessa päätehakkuilta kerättävät hakkuutähteet ja kannot eivät riitä kattamaan biomassatarvetta vaan energiaa tuotetaan myös nuorten metsien harvennuksista korjattavasta runkopuusta. Myös Sieväsen ym. (2014) tutkimuksessa suurin osa, 2.0 Tg C a⁻¹, hiilivaraston pienenemistä johtuu puuston hiilivaraston pienenemisestä.

4.4 Metsähakkeen energiakäytön päästöt

Arviot metsähakkeen energiakäytön päästöistä tuotettua energiayksikköä kohti vaihtelevat suomalaisissa tutkimuksissa välillä 10-194 g CO₂ ekv. MJ⁻¹ (Palosuo ym. 2001, Kilpeläinen ym. 2011, Repo ym. 2012, Kallio ym. 2013, Sievänen ym. 2014, Jäppinen ym. 2014, Mäkipää ym. 2014). Tutkimuksissa päästöt muodostuvat tuotantoketjun päästöistä ja hiilivaraston pienenemisestä johtuvista päästöistä. Vertailun vuoksi Tilastokeskuksen polttoaineluokituksen mukainen päästökerroin kivihillelle on 93 g CO₂ MJ⁻¹ ja maakaasulle 55 g CO₂ MJ⁻¹ (Tilastokeskus 2015). Tuotantoketjun päästöt muodostuvat mm. biomassan korjuusta, haketuksista ja kuljetuksesta. Suomalaisissa tutkimuksissa tuotantoketjun päästöjen on arvioitu vaihteleva välillä 1-6 g CO₂ ekv. MJ⁻¹ (Palosuo ym. 2001, Mälkki & Virtanen 2003, Wihersaari 2005b, Kilpeläinen ym. 2011, Repo ym. 2012, Jäppinen ym. 2014). Metsähakkeen energiakäytön päästöt johtuvat pääosin metsien hiilivarastojen pienenemisestä (Palosuo ym. 2001, Kilpeläinen ym. 2011, Repo ym. 2012, Jäppinen ym. 2014). Suuri vaihteluväli päästöarvioissa riippuu siitä, miten hiilivarastomuutokset on huomioitu laskelmissa.

Hiilivarastojen pienenemisestä johtuvien päästöjen suuruusluokkaan vaikuttavat korjattava biomassa, korjuu-alan maantieteellinen sijainti ja laskelmissa tarkasteltu aikajakso. Suurimmat päästöt muodostuvat, kun kasvavaa puustoa ohjataan energiaksi. Pienimmät päästöt muodostuvat, kun energiaksi korjataan hakkuutähteitä, jotka metsään jätettyinäkin hajoaisivat nopeasti. Kasvavan puuston energiakäytön päästöt ovat suuremmat, koska lisähakkuut pienentävä biomassan ja maaperän hiilivarastoa ja hakkuutähteiden korjuun lisääminen pienentää lähinnä maaperän hiilivarastoa (Sievänen ym. 2014). Kallion ym. (2013) kansallisessa tarkastelussa metsähakkeen ja kuitupuun energiakäytön lisääminen 9,4 miljoonalla kuutiolla pienensi Suomen metsien hiilinielua 13.1 miljoonaa CO₂ tonnia. Jos oletetaan, että kuutiosta saadaan 7200 MJ (2 MWh) energiaa, metsäbiomassan

energiakäytön aiheuttama ilmakehän kasvihuonekaasujen lisäys on 194 g CO₂ MJ⁻¹. Kilpeläinen ym. (2011) ovat arvioineet metsähakkeen päästöiksi Etelä-Suomessa 48 g CO₂ MJ⁻¹ ja Pohjois-Suomessa 55 g CO₂ MJ⁻¹. Myös Revon (2012) tutkimuksessa Pohjois-Suomesta kerättyjen hakkuutähteiden päästöt olivat suuremmat kuin Etelä-Suomesta kerättyjen hakkuutähteiden päästöt. Tämä johtuu siitä, että hakkuutähteiden hajoaminen on pohjoisen viileämmässä ilmastossa hitaampaa, jolloin metsään jätettyinä hakkuutähteet muodostaisivat osan metsän hiilivarastoa pidempää kuin Etelä-Suomessa. Kilpeläisen ym. (2011) tutkimuksessa on tarkasteltu nettohiihenvaihtoa 80 vuoden kiertojen yli. Tutkimuksessa metsähake koostuu nuorten metsien pienpuusta ja hakkuutähteistä. Repo ym. (2012) ovat puolestaan tarkastelleet päästöjen ajoittumista ja erilaisten biomassaositteiden kuten kantojen, oksien ja pienpuun päästöjen eroja. Revon (2012) tutkimuksessa hakkuutähteiden energiakäytön päästöt vaihtelivat välillä 21-105 g CO₂ ekv. MJ⁻¹. Päästöt ovat suurimmillaan kun hakkuutähteiden energiakäyttö aloitetaan tai sitä lisätään, mutta päästöt pienenevät ajan myötä, koska hakkuutähteet hajoaisivat vapauttaen hiilidioksidia myös metsään jätettynä. Kun oksien energiakäyttöä oli jatkettu 20 vuotta, päästöt olivat 47 g CO₂ ekv. MJ⁻¹ ja sadan vuoden jälkeen 21 g CO₂ ekv. MJ⁻¹. Päästöjen suuruus riippuu hakkuutähteiden hajoamisnopeudesta. Näin ollen nopeasti hajoavien oksien energiakäyttö aiheuttaa noin puolet pienemmät päästöt kuin hitaasti hajoavien kantojen energiakäyttö (Repo ym. 2012). Metsähakkeen energiakäytön keskimääräiset päästöt kiertojen yli laskettuna ovat samaa suuruusluokkaa Revon ym. (2012), Kilpeläisen ym. (2011) ja Mäkipään ym. (2014) tutkimuksissa, vaikka tutkimuksissa on käytetty eri malleja. Jäppisen ym. (2014) tutkimuksessa hakkuutähteiden, kantojen ja pieniläpimittaisen energiapuun päästöt vaihtelevat välillä 10-40 g CO₂ ekv. MJ⁻¹ ollen suurimmat, kun Pohjois-Suomen hitaasti hajoavia kantoja korjataan energiaksi. Jäppisen hiilivarastojen pienenemisestä johtuvat päästöt perustuvat Repo ym. (2012) arvioihin. Jäppisen tutkimuksessa laskelmat kuitenkin koskevat metsähakkeen kertapolttua sadan vuoden aikajaksolla.

Metsähakkeen varastoinnin päästöt ovat huonosti tunnettu mutta mahdollisesti merkittävä epävarmuustekijä päästöarvioissa. Jäppisen ym. (2014) tutkimuksessa metsähakkeen energiakäytön elinkaaren aikaiset päästöt vaihtelivat välillä 9-80 g CO₂ ekv. MJ⁻¹, jos laskelmissa huomioitiin hiilivarastomuutokset sekä varastoinnin aikaiset päästöt. Wihersaari (2005a) on arvioinut varastoinnin lisäävän metsähakkeen energiakäytön päästöjä 16-40 g CO₂ ekv. MJ⁻¹.

Ilmastonmuutos voi vaikuttaa energiaksi käytettävän metsäbiomassan määriin. Energiapuun määrä voi lisääntyä muuttuvassa ilmastossa metsien kasvun kiihtyessä (Alam ym. 2010). Samassa tutkimuksessa kuitenkin todetaan, että metsien ikärakenteella voi kuitenkin olla suurempi vaikutus tulevaisuuden energiapuumääriin kuin muuttuvalla ilmastolla. Mäkipää ym. (2014) tutkimuksessa energiaksi korjattavan hakkuutähteen määrä pysyi muuttuvassa ilmastossa samana tai jopa väheni verrattuna nykyilmastoon mutta määrä oli korjattavissa nykyistä lyhempien kiertoaikojen sisällä.

Muuttuva ilmasto vaikuttaa myös metsähakkeen päästöarvioihin. Ilmaston lämpeneminen voi kiihdyttää maaperän hajotustoimintaa (esim. Brovkin ym. 2012). Näin ollen hakkuutähteet hajoaisivat metsään jätettyinä nopeammin kuin nykyilmastossa. Tämä puolestaan tarkoittaisi, että hakkuutähteen korjuusta johtuva hiilivaje ja tämän hakkuutähteen energiakäytön päästöt voisivat olla pienemmät kuin nykyilmastossa (Repo ym. 2015a). Mäkipään ym. (2014) tutkimuksessa hajotustoiminta kiihtyi ilmaston muuttuessa mutta myös karikesyöte lisääntyi. Näin ollen hakkuutähteen korjuun vaikutus maaperän hiilivarastoon oli tutkimuksessa hyvin samanlainen nykyisessä ilmastossa ja muuttavassa ilmastossa. Kilpeläinen ym. (2011) ovat arvioineet Etelä-Suomesta kerättävän energiapuun päästöjen kasvavan ilmaston muuttuessa. Pohjois-Suomessa päästöt pienenevät. Tätä selitetään sillä, että pohjoisessa kuusen kasvu voimistuu jopa 23% verrattuna nykyilmastoon, jolloin tämä kasvu on suurempi kuin ilmaston lämpenemisestä johtuva maaperän hajotustoiminnan kiihtyminen. Tutkimuksessa samaa ilmiötä ei tapahdu Etelä-Suomessa, koska siellä kuusen kasvu vähenee mallitustuloksissa verrattuna nykytilaan (Kilpeläinen ym. 2011). Ilmastonmuutos vaikuttaa maaperän hiilivarastoihin usealla tavalla eikä muuttuvan ilmaston vaikutusta maaperän hiilivarastoihin vielä tunneta. Ilmastonmuutos voi

vaikuttaa esimerkiksi karikesyötteen määrään, eroosioherkkyyteen ja orgaanisen aineen hajotusnopeuteen. (Schils ym. 2008).

Metsänhoidon muutoksilla on mahdollista pienentää energiapuun korjuusta metsiin syntyvää hiilivajetta ja näin myös pienentää metsähakkeen energiakäytön päästöjä. Hakkuutähteen korjuun suuntaaminen nopeasti hajoaviin ositteisiin, neulasten jättäminen metsiin, metsälannoitus, metsien kiertoajan pidentäminen ja metsien tiheämpi kasvatus ovat suomalaisissa tutkimuksissa esitettyjä keinoja metsähakkeen energiakäytön päästöjen pienentämiseksi (Alam ym. 2010, Routa 2011, Routa ym. 2011a, Routa ym. 2011b, Routa ym. 2012a, Routa ym. 2012b, Mäkipää ym. 2014, Pyörälä ym. 2014, Repo ym. 2015b).

4.5 Ojitettujen soiden hiilitase

Osassa tutkimuksia metsitetyt suot olivat mukana puuston ja maaperän hiilivarantojen kehittymisen arvioissa (esim. Kallio ym. 2013, Sievänen ym. 2014).

Tutkimusten perusteella yksittäisen metsäojitetun suon maaperä voi olla joko hiilen nielu, tai lähde (Lohila ym. 2007, 2010, Minkkinen 1999, Ojanen 2014, Simola ym. 2012). Suon ravinteisuustaso ennen ojitusta näyttäisi usein selittävän, kerryttääkö, vai menettääkö suo maaperästään ojituksen jälkeen hiiltä. Kohtuullisen suurella varmuudella voidaan todeta, että rehevät suot menettävät hiiltä maaperästä ojituksen jälkeen, kun taas karut voivat sitä edelleen kerryttää maaperäänsä (Lohila ym. 2010, Minkkinen 1999, Ojanen 2014). Myös metsitettyjen turvepeltojen maaperän on havaittu olevan hiilen lähteitä (Lohila ym. 2007, Meyer ym. 2013). Näitä havaintoja tukevat myös maatalousmailta käytettävissä oleva tieto: tehokas ojitus ja riittävä ravinteiden saatavuus johtavat turvekerroksen hajoamiseen (Lohila ym. 2004, Maljanen ym. 2001, 2004, Nykänen ym. 1995).

Suomen ojitettujen soiden kokonaishiilitaseen näkökulmasta olennaista on, että puuston lisääntynyt kasvu näyttäisi tällä hetkellä, kun puustot ovat nuoria ja kasvuisia, ja hakkuut kasvua vähäisempiä, riittävän korvaamaan maasta mahdollisesti menetettävän hiilen (Ojanen ym. 2014, Tilastokeskus 2014). Suomen tasolla metsäojitetut suot (maaperä + puusto) lienevät tällä hetkellä pikemminkin siis CO₂:n nielu kuin lähde (Ojanen ym. 2014). Kun huomioidaan ojituksen seurauksena huomattavasti vähenevät metaanipäästöt, oltaneen muutaman vuosikymmenen aikaskaalassa ilmastoa viilentävällä puolella. Pitkällä aikavälillä (sadoista tuhansiin vuosiin) ojitetut suot voivat pysyä nieluina vain, jos maaperä on nielu, mikä ei ole todennäköistä (Ojanen ym. 2014). Ojitusalueet ovat nuoria: nykytilanteesta ei voi päätellä että turvekerros säilyisi loputtomiin, jos ojituksen ylläpitoa jatketaan. Hakkuissa puustoon kertynyt hiili poistuu ekosysteemistä ja palautuu hiljalleen ilmakehään. Samalla hakkuut aiheuttavat myös useiden vuosien jakson, jolloin hiilen sidonta maahan karikkeen kautta on lähes pysähdyksissä. Tämän vuoksi on hyvin mahdollista, että pitkällä aikavälillä aktiivisessa metsätalouskäytössä olevat ojitetut suot ovat väistämättä hiilen lähteitä.

Kaikkien käsiteltyjen tutkimusten menetelmiin sisältyy huomattavia epävarmuuksia (mm. metsätalousmielessä epäonnistuneet soiden ojitukset, otosten maantieteellinen edustavuus, menetelmälliset epävarmuudet.). Epävarmuus Suomen metsäojitettujen soiden maaperän hiilitaseessa on luokkaa $\pm 2.7 \text{ Tg C a}^{-1}$ (Ojanen ym. 2014). Näin ollen tarkkoja lukuja ojitettujen soiden hiilitaseelle on vaikea antaa. Skenaariomallinnuksen avulla suometsien hiilivarastojen ja kasvihuonekaasutaseen kehittymistä useiden kiertoaikojen yli tarkastelevat suomalaistutkimukset puuttuvat toistaiseksi. Tällaisten tutkimusten avulla voitaisiin selvittää esim. millä aikavälillä suon ennallistamisella saataisiin alhaisempi säteilypakote kuin metsätaloutta jatkamalla.

4.6 Metsien muut ilmastovaikutukset

Suomen metsien ilmastovaikutusta tutkivat mallitustutkimukset ovat keskittyneet pääasiassa hiileen, mutta tämä ei kerro koko totuutta metsien ja ilmakehän vuorovaikutuksesta. Metsät tuottavat haihtuvia hiiliyhdisteitä (VOC), jotka vaikuttavat aerosolien, eli ilman pienhiukkasten, muodostumiseen (Kulmala ym. 2004). Aerosolit vähentävät maapallon pinnan lämpösäteilyä sekä vaikuttamalla pilvien muodostumiseen, että suoraan heijastamalla saapuvaa säteilyä takaisin avaruuteen. Toisaalta metsät lisäävät maapallon pinnan lämpösäteilyä sitomalla itseensä suuremman osan saapuvasta säteilystä kuin aukeat alueet, nk. albedovaikutus (Betts 2000, Unger 2014). Metsien käsittelyn ja kaikkien eri ilmastoagenttien kokonaisvaikutusta mallintavia tutkimuksia ei ole toistaiseksi julkaistu.

Tarkastuksessa olevan tutkimuksen (Nikinmaa ym.) perusteella metsien viilentävä vaikutus kasvaa kun kasvupaikan rehevyys lisääntyy. Karummilla kasvupaikoilla nykyilmastossa havumetsien aerosoli- ja albedovaikutus lähes kumoavat toisensa. Nettovaikutus kiertojen yli on siis lähes sama kuin mikä metsään, maaperään ja puutuotteisiin sitoutuneella hiilidioksidilla yksinään. Ravinteikkaimmilla kasvupaikoilla myös havupuiden viilentävä aerosolivaikutus kasvaa, mutta erityisesti lehtipuumetsiköillä on nykyilmastossa suurempi vaikutus aerosolien muodostumiseen ja toisaalta niiden albedovaikutus on lähempänä aukeaa niittyä kuin havupuilla. Lehtipuiden suora nettoilmastovaikutus on siis tämän tutkimuksen tulosten perusteella enemmän viilentävä kuin havupuiden tapauksessa, vaikka erityisesti kuusimetsiin sitoutuu kiertojen aikana enemmän hiilidioksidia kuin lehtimetsiin. Albedon ja aerosolien nettovaikutuksen ero havu- ja lehtipuumetsiköiden välillä tulee mallinnustulosten mukaan ilmastonmuutoksen seurauksena kasvamaan entisestään. Tulevassa ilmastossa on mahdollista, että lehtimetsien aikaansaama viilentävä aerosolivaikutus jopa ylittää hiilidioksidivaikutuksen metsikkötasolla.

5. EPÄVARMUUKSISTA

5.1 Epävarmuus metsien käyttöskenaarioissa

Oman epävarmuutensa tarkasteltuihin tutkimuksiin tuovat erilaiset hakkuuskenaariot, jotka vaikuttavat voimakkaasti metsien tulevaan kehitykseen. Osassa tutkimuksia hakkuuskenaariot perustuivat eksplisiittisiin puun kysyntäskenaarioihin, jotka oli tuotettu erilaisilla talousmalleilla (mm. SF-GTM, EFI-GTM, GLOBIOM), kun taas toisissa tutkimuksissa hakkuuskenaariot olivat tutkimusten tekijöiden määrittämiä.

5.2 Epävarmuus kasvun muutoksen ennusteissa

Suomen metsien kasvuvasteen kannalta olennaisimmat muutoksessa olevat ympäristökijät ovat ilman hiilidioksidikonsentraatio (CO_2 , ppm), lämpenemisen seurauksena tapahtuva termisen kasvukauden piteneminen ja haihduntapaineen (VPD) kasvu, maaperän hajotustoiminnan muutoksesta aiheutuvat ravinteiden saatavuuden muutokset sekä sadannan muutoksista johtuva metsien vesitalouden muutos. Ekosysteemitason laskelmissa emissioskenaarion ja ilmastomallin valinnalla on suuri merkitys. Ilmakehän CO_2 pitoisuuden nousu kuluvan vuosisadan jälkimmäisellä puoliskolla on hyvin erilainen eri emissioskenaarioissa (IPCC 2013, Nakicenovic ym. 2001) ja lisäksi eri ilmastomallien projektiot.

lämpötilan, sadannan ym. ilmastollisten tunnusten muutoksesta samankin emissioskenaarion sisällä poikkeavat paljon toisistaan (Jylhä ym. 2009, Ruosteenoja ym. 2011, Räisänen 2007, Karppanen 2006).

Hiilidioksidin puiden kasvua lisäävä, lyhytaikainen lannoitusvaikutus on monessa tutkimuksessa todennettu asia (Curtis ja Wang 1998, Huang ym. 2007, Kellomäki ja Wang 2000b, Riikonen ja Vapaavuori 2005). Pitemmän aikavälin ekosysteemitason vaste sisältää kuitenkin yhä suurta epävarmuutta, koska puiden on havaittu pitkäkestoisissa maastokokeissa (FACE) mukautuvan korkeampiin CO₂ konsentraatioihin (Ainsworth ja Long 2005, Ainsworth ja Rogers 2007, Norby ja Zak 2011). Jos voimakasta mukautumista tapahtuu, voi CO₂ lannoituksen vaikutuksesta syntyvä kasvunlisäys jäädä huomattavasti mallien nykyisellään antamia tuloksia alhaisemmaksi. Jos CO₂ konsentraation lannoitusvaikutusta ei huomioida mallinnuksessa, voidaan saada jopa kasvun pienenemistä (Peters ym. 2013, Reyer ym. 2014). Toisaalta uudessa tutkimuksessa on havaittu, että CO₂:n lannoitusvaikutus voi olla suurempikin, jos solutason diffuusio huomioidaan laskennassa (Sun ym. 2014).

Ennustetun lämpötilan nousun kasvua lisäävä vaikutus on kohtuullisen yhtenäinen eri mallinuksissa. Lämpötilavasteen kohdalla suurimmat epävarmuudet liittyvät puiden veden haihdutukseen sekä maaperäprosesseihin. Riittääkö kasvanut vedenkäytön tehokkuus (hiilenvaihtosuhte paranee) kompensoimaan voimakkaamman haihduntapaineen (Huang ym. 2007, Medlyn ym. 2011). Tämä siis liittyy edellä esitettyyn puiden pitkän aikavälin CO₂ mukautumisen epävarmuuteen. Tuoreessa ruotsalaistutkimuksessa (Hasper ym. 2015) metsien haihdunnan havaittiin lisääntyneen maisematasolla lisääntyneen biomassan vuoksi. Lisäksi erillisessä koejärjestelyssä havaittiin, ettei kasvanut ilman CO₂ pitoisuus lisännyt kuusen vedenkäytön tehokkuutta.

Maaperän lämpenemisen seurauksena oletetaan hajotustoiminnan nopeutuvan, mikä puolestaan vapauttaa ravinteita aikaisempaa nopeammin/enemmän puiden käyttöön (Kellomäki ym. 2005, Brovkin ym. 2012). Suomen tapauksessa ilmastonmuutoksen merkittävin vaikutus metsien kasvun kannalta voikin olla muutos maaperän tyyppien saatavuudessa, koska tyyppi on minimitekijänä lukuun ottamatta kaikkein rehevimpiä kasvupaikkoja (Linder ym. 1992). Tässä tapahtuvia muutoksia ilmastonmuutoksen seurauksena on huomioitu vain harvassa mallinnuksessa. Näiden harvojen tutkimusten tulos on, että lisääntynyt tyyppien saatavuus kiihdyttää entisestään puiden kasvua, mutta kasvun jakautuminen puun eri osien välillä voi myös muuttua, jolloin runkokuun kasvu ei lisäännä suhteessa yhtä paljon kuin kokonaiskasvu (Mäkelä ym. 2014, Valentine ja Mäkelä 2012, Wamelink ym. 2009).

Puiden vesitalous muuttuu sekä tehostuneen vedenkäytön (kts. yllä), että sadannan muutosten seurauksena (Jylhä ym. 2009). FinnFor prosessimallilla tehtyjen laskentojen mukaan Etelä-Suomen kuusikot voisivat tulevaisuudessa kärsiä aiempaa enemmän kuivuudesta (Kellomäki ym. 2005, 2008, Ge ym. 2013). Tutkimusten mukaan tähän johtaa lisääntynyt haihdunta, sekä kuivuusjaksojen lisääntyminen. Haihdunnan lisääntymistä näissä tutkimuksissa selittää osaltaan oletus vakioisesta absoluutisesta ilmankosteudesta, mikä lämpötilan noustessa johtaa haihduntapaineen (VPD) voimakkaaseen kasvuun. Toisella mallilla tehdyssä tutkimuksessa kuivuuden merkitys puiden kasvulle ei lisääntynyt tulevassa ilmastossa puiden vedenkäytön tehostumisen ja lisääntyneen sadannan seurauksena (Kalliokoski ym. 2015). Yksittäiselle maalle, kuten Suomelle, tehdyt ilmastonmuutosprojektiot sisältävät erityisesti sadannan osalta huomattavia epävarmuuksia, mikä näkyy eri ilmastomallien hyvin erilaisissa ennusteissa. Muutokset sadannan jakautumisessa kasvukauden sisällä, eli kesäsateiden jaksoittaisuuden muutokset ovat kaikkein epävarmimmalla pohjalla. Edelleenkin ei tiedetä pitenevätkö, vai lyhenevätkö kesän poutajakset. On mahdollista, että kesäisin vuorottelevat rankkasateet ja kuivuusjakset, mutta eri mallien antamat ennusteet ovat tässä suhteessa hyvin ristiriitaisia (Jylhä ym. 2009, Rummukainen 2013).

5.3 Epävarmuus hiilivaraston muutoksissa

Suomen metsien hiilinielun kehityksestä esitettyjen ennusteiden arviointi eri tutkimusten välillä on hankalaa, koska tutkimuksissa on eri hiiliositteet mukana. Tämän kirjallisuuskatsauksen Kuvan 3 metsien keskimääräiset hiilinielut on tuotettu tutkimusten ilmoittamista hiilivarastojen muutoksista, lukuun ottamatta Sievänen ym. 2014, joka raportoi myös hiilinielun aikakehityksen. Tutkimusten yhteismitallistamiseksi tämän raportin tarpeisiin tätä voimakasta yksinkertaistusta voidaan pitää perusteltuna.

Koko maan tasolla puuston hiilinielun muutos riippuu voimakkaasti metsien ikäluokkarakenteesta ja tarkastelusta ajanjaksosta. Nykyinen ikäluokkarakenne on metsien käsittelyhistorian tulosta. Historiasta johtuen Suomen metsien nykyinen rakenne (paljon nuoria nopeasti kasvavia metsiä) johtaa mallituksissa tulokseen, jossa puuston hiilinielu säilyy useita vuosikymmeniä voimakkaana, vaikka metsien hakkuita

vähennettäisiinkin nykyisistä (Sievänen ym. 2014). Toisin päin tarkasteltuna tämä tarkoittaa, että hakkuita lisäämällä pienennetään puuston hiilivarastoa ja metsien hiilinielua, ilman että metsien ikäluokkajakautaman muutos juurikaan tehostaisi suhteellista hiilen sitoutumista jäävään puustoon.

Hiilivaraston muutoksen epävarmuutta lisää mahdollinen ilmastonmuutoksen aikaansaama kiertonopeuksien kasvu sekä maanpäällisten ositteiden, että juuriston osalta. Kiertonopeuden lisääntymisen seurauksena voi hiilivaraston muutos jäädä pienemmäksi kuin tässä tarkastelussa olleissa tutkimuksissa ennustetaan. Hiilivaraston muutoksia laskettaessa useimmissa tutkimuksissa puun eri ositteiden biomassa oli johdettu muuntokertoimien avulla ("biomass expansion factor", BEF) avulla. Näiden kertoimien arvot vaihtelevat riippuen lähteestä ja tuovat näin ollen yhden vaihtelunlähteen tutkimusten välille lisää.

Kirjallisuuskatsauksessa mukana olleissa tutkimuksissa maaperä oli mukana useammassa. Maaperän hiilivaraston tuleva kehitys on lisääntyneen karikesyötteen ja nopeutuneen hajotustoiminnan summa. Lisääntynyt karikesyöte on seurausta puuston lisääntyneestä kasvusta. Lisääntynyt karikesyöte kasvattaa maaperän hiilivarastoa. Kuten yllä todettiin, maaperän hajotustoiminta nopeutunee maaperän kohonneen lämpötilan vuoksi (Arneht ym. 2010). Malliennusteiden mukaan maaperän lisääntynyt hajotustoiminta pienentää maaperän hiilivarastoa enemmän kuin lisääntynyt karikesyöte kasvattaa (mm. Mäkipää ym. 2015, Sievänen ym. 2014, Kallio ym. 2013, Shanin ym. 2013). Nettovaikutus on siis ilmaston kannalta negatiivinen. Karikesyötteen kasvu ja hajotustoiminnan nopeutumisen muutos on kuitenkin erilaista, minkä seurauksena maaperä voi olla vuosisadan ensimmäisellä puoliskolla hiilen lähde javuosisadan jälkimmäisellä puoliskolla hiilen nielu. Maaperän mallinnuksessa käytettyjä Yasso, Yasso07- ja ROMUL-maamalleja verranneessa tutkimuksessa todetaan, että ROMUL ennustaa pienempää maaperän hiilivarastoa pitkällä aikavälillä kuin toiset mallit, mutta vuotuiset varaston vaihtelut ovat samaa suuruusluokkaa eri malleissa. Vuotuinen sadanta näytti vaikuttavan eniten mallien ennusteiden väliseen eroon (Rantakari ym. 2012). SIMAssa on oma maaperää kuvaava malli, joka poikkeaa selvästi muista malleista.

Tässä katsauksessa esitetyt tulokset eivät ota juurikaan kantaa puulajisuhteiden muutoksiin ilmastonmuutoksen seurauksena. Shanin ym. (2013) saivat EFIMOD-mallilla tulokseksi, että tulevassa ilmastossa kuusi-koivu sekametsissä kuusi syrjäytti aina koivun riippumatta ilmastoskenaariosta. Sen sijaan mänty kasvatti osuuttaan kuusi-mänty sekametsissä. Syytä on nostaa esiin myös tutkimus, jossa johtopäätös oli, että kasvun muutosten ollessa epävarmoja, on metsikössä optimaalista kasvattaa useita eri puulajeja yhtä aikaa (Pukkala ja Kellomäki 2012).

5.4 Epävarmuus metsissä esiintyvistä häiriöistä muuttuneessa ilmastossa

Ilmastonmuutoksen seurauksena on mahdollista, että sekä abioottisten että bioottisten häiriöiden esiintyminen muuttuu Suomessa. Tuulituho- ja metsäpalariskien, sekä sieni-, hyönteis- ja eläintuho-riskien arvioidaan kasvavan (Gregow ym. 2011, Kilpeläinen ym. 2010a, Peltola ym. 2010, Vanhanen ym. 2007), kun taas lumituho-riskin ennustetaan pienevän ilmastonmuutoksen myötä (Gregow ym. 2011, Kilpeläinen ym. 2010b). Kokonaisuutena metsätuhoilla on arvioitu olevan muuttuneessa ilmastossa mahdollisesti.

nykyistä suurempi merkitys metsien hiilinieluun ja metsien nettoilmastovaikutuksiin (Seidl ym. 2014), mutta laskelmia muuttuneiden tuharegimien vaikutuksesta esimerkiksi metsien hiilinieluun ei ole Suomen osalta tähän mennessä esitetty. Lisäksi ongelmana on, että metsätuho-riskejä muuttuneessa ilmastossa Suomessa on mallinnettu vain muutamalla mallilla (FinnFor, SIMA) ja käyttäen vain yhtä ilmastonmuutoskkenaariota (SRES A2, FINADAPT).

Tuuliolosuhteiden ei odoteta muuttuvan Suomessa merkittävästi ilmastonmuutoksen seurauksena. Keskimääräiset tuulivoimakkuudet kasvanevat vain joitakin prosentteja vuosisadan loppuun mennessä (Gregow ym. 2011). Tuulituhojen lisääntynyt riski selittyykin lumettoman ja roudattoman ajan pitenemisenä, minkä seurauksena talvimyrskyjen vaikutus tuulituhoihin tulee kasvamaan. Puulajisuhteiden muutokset vaikuttavat myös tuulituhoriikkiin, koska varttuneissa metsissä kuusi on alttein tuulituholle, kun taas nuoremmissa ikävaiheissa mänty ja koivu kärsivät kuusta herkemmin tuulivaurioita (Peltola ym. 2010).

Ilmaston lämmitessä voi Suomessa metsäpaloille otolliset ilmasto-olosuhteet lisääntyä noin 20 % vuoteen 2100 mennessä (Kilpeläinen ym. 2010a). Etelä- ja Pohjois-Suomen välillä on mallituksen mukaan kuitenkin huomattava ero, kun metsäpalovaroituspäivien ennustetaan kasvavan Etelä-Suomessa nykyisestä 60-100 päivästä 96-160 päivään a^{-1} vuosisadan loppuun mennessä. Pohjois-Suomessa vastaava muutos olisi vain 30 päivästä 36 päivään a^{-1} . Tutkimuksessa muutosta eniten selittävä tekijä on sadantaa selvästi voimakkaammin kasvanut haihdunta, minkä seurauksena maaveden määrä vähenee jopa 30%. Näin voimakas kuivuuden lisääntyminen poikkeaa muista tutkimuksista (mm. Kalliokoski ym. 2015, Ge ym. 2013, Kellomäki ym. 2010). Metsien hiilitaseen tai ilmastovaikutusten näkökulmasta metsäpalot ovat tällä hetkellä merkityksettömiä, koska vaikka metsäpaloja esiintyy keskimäärin n. 900 metsäpaloa a^{-1} , niin metsäpaloalue on silti alle 1000 ha a^{-1} . Tulevassakin ilmastossa tehokas metsäpalojen torjunta todennäköisesti pitää metsäpalot Suomessa marginaalisessa roolissa metsien ilmastovaikutusten näkökulmasta.

Lumituho-riskin (riskipäivien lukumäärä, lumenkertymä $> 20 \text{ kg m}^{-2}$) oletetaan vähenevän Suomessa 11 % vuoteen 2020 mennessä, 23 % vuoteen 2050 mennessä ja 56 % vuoteen 2100 mennessä, koska suuren osan talvisateista ennustetaan tulevan vetenä tämän vuosisadan lopussa (Gregow ym. 2011, Kilpeläinen ym. 2010b). Lumituholle altis metsäpinta-ala väheni ilmastonmuutoksen seurauksena kahdesta prosentista yhteen prosenttiin vuosisadan loppuun mennessä (Kilpeläinen ym. 2010b, 1% Suomen metsäalasta on n. 200000 ha).

Arviot sieni- ja hyönteistuhojen lisääntymisestä ilmastonmuutoksen seurauksena perustuvat pääasiassa yksittäisten metsäpatogeenien ja tuhohyönteisten tunnettuun biologiaan. Tämän perusteella pystytään arvioimaan esimerkiksi lämpenemisen ja sateisuuden muutosten vaikutuksia metsätuholajien esiintymiseen. Juurikäävän (*Heterobasidion parviporum*) aktiivisuuden ja ilman lämpötilan välillä on havaittu selkeä yhteys ja lämpenemisen seurauksena juurikäävän aiheuttamien

metsätuhojen ennustetaan Etelä-Suomessa jopa ylittävän ilmastonmuutoksen aikaansaaman lisäkasvun (Muller ym. 2014).

Kirjanpainajalla (*Ips typographus*) ennustetaan tulevassa ilmastossa olevan kaksi sukupolvea kasvukauden aikana, minkä seurauksena metsätuhot voivat lisääntyvät erityisesti Etelä-Suomen kuusikoissa (Pouttu ja Annala 2010, Neuvonen ym. 1999). Vanhanen ym. (2007) mallinsivat ilmastonmuutoksen vaikutusta lehti- ja havununnan esiintymisalueisiin useilla eri ilmastoskenaarioilla. Nunnat ovat Pohjois-Amerikassa yksi pahimpia metsätuhoja aiheuttavia hyönteisiä. Tulosten mukaan ilmastonmuutos siirsi nunnien levinneisyysalueen pohjoisreunaa 500-700 km pohjoisemmaksi, minkä seurauksena nunnat voivat aiheuttaa tulevassa ilmastossa metsätuhoja Etelä-Suomessa.

6. JOHTOPÄÄTÖS

Tämän kirjallisuuskatsauksen perusteella on perusteltua todeta, että lähivuosikymmeninä metsien rakenne ja talouden kehitys vaikuttavat enemmän Suomen metsien kehitykseen kuin käynnissä oleva ympäristönmuutos.

KIRJALLISUUS

Ainsworth, E.A., Long, S.P. 2005. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*, 165, 351 – 372.

Ainsworth, E.A., Rogers, A. 2007. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. *Plant, Cell & Environment*, 30, 258 – 270

Alam, A., Kilpeläinen, A., Kellomäki, S. 2008. Impacts of thinning on growth, timber production and carbon stocks in Finland under changing climate. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 23, 501-512.

Arneth, A., Harrison, S.P., Zaehle, S., Tsigaridis, K., Menon, S., Bartlein, P.J., Feichter, J., Korhola, A., Kulmala, M., O'Donnell, D., Schurgers, G., Sorvari, S., Vesala, T. 2010. Terrestrial biogeochemical feedbacks in the climate system. *Nature Geoscience* 3, 525 – 532.

Betts, R.A. 2000. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. *Nature*, 408, 187 – 190.

Beven, K. 1979. A sensitivity analysis of the Penman–Monteith actual evapotranspiration estimates. *Journal of Hydrology* 44: 169–190.

Briceño-Elizondo, E., Garcia-Gonzalo, J., Peltola, H., Matala, J., Kellomäki, S. 2006. Sensitivity of growth of Scots pine, Norway spruce and silver birch to climate change and forest management in boreal conditions. *Forest Ecology and Management* 232, 152–167.

Brovkin, V., van Bodegom, P.M., Kleinen, T., Wirth, C., Cornwell, W.K., Cornelissen, J.H.C., Kattge, J. 2012. Plant-driven variation in decomposition rates improves projections of global litter stock distribution. *Biogeosciences*, 9, 565-576.

Curtis, P.S., Wang, X. 1998. A Meta-Analysis of Elevated CO₂ Effects on Woody Plant Mass, Form, and Physiology. *Oecologia* 113: 299–313.

Eggers, J., Lindner, M., Zudin, S., Zaehle, S., Liski, J. 2008. Impact of changing wood demand, climate and land use on European forest resources and carbon stocks during the 21st century. *Global Change Biology*, 14, 2288 – 2303.

Farquhar, G.D., Caemmerer, S., Berry, J. 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* 149:78–90.

Ge, Z.M., Zhou, X., Kellomäki, S., Wang, K.Y., Peltola, H., Väisänen, H., Strandman, H. 2010. Effects of changing climate on water and nitrogen availability with implications on the productivity of Norway spruce stands in southern Finland. *Ecol Model* 221:1731–1743.

Ge, Z.M., Kellomäki, S., Peltola, H., Zhou, X., Väisänen, H., Strandman, H. 2013. Impacts of climate change on primary production and carbon sequestration of boreal Norway spruce forests: Finland as a model. *Climatic Change*, 118, 259 – 273.

Ge, Z.M., Kellomäki, S., Zhou, X., Peltola, H. 2014. The role of climatic variability in controlling carbon and water budgets in a boreal Scots pine forest during ten growing seasons. *Boreal Environment Research* 19: 181 – 194.

Hasper, T.B., Wallin, G., Lamba, S., Hall, M., Jaramillo, F., Laudon, H., Linder, S., Medhurst, J.L., Råntfors, M., Sigurdsson, B.D., Uddling, J. 2015. Water use by Swedish boreal forests in a changing climate. *Functional Ecology*. DOI: 10.1111/1365-2435.12546

Huang, J.-G., Bergeron, Y., Denneler, B., Berninger, F., Tardif, J. 2007. Response of Forest Trees to Increased Atmospheric CO₂. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 26:265–283.

Hyytiäinen, K., Hari, P., Kokkila, T., Mäkelä, A., Tahvonen, O., Taipale, J. 2004. Connecting a process-based forest growth model to stand-level economic optimization. *Can. J. Forest Res.* 34 (10), 2060–2073.

IPCC, 2013: *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, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.

Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Ruokolainen, L., Saku, S., Seitola, T. 2009. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. Raportteja 4, Ilmatieteen laitos.

Jäppinen, E., Korpinen, O.-J., Laitila, J., Ranta, T. 2014. Greenhouse gas emissions of forest bioenergy supply and utilization in Finland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 369-382.

Kallio, A.M.I., Salminen, O., Sievänen, R. 2013. Sequester or substitute – Consequences of increased production of wood based energy on the carbon balance in Finland. *Journal of Forest Economics*, 19, 402 – 415.

Kalliokoski, T., Mäkelä, A., Fronzek, S., Minunno, F., Peltomäki, M. 2015. Sensitivity of gross primary production of boreal forests to climate change scenario uncertainties and tree water use efficiency. *Käsikirjoitus*.

Karppanen, J. 2006. Climate change in Northern Europe based on AR4 climate models: Comparison and analysis. *Pro gradu, Meteorologia*, 60 s.

Kellomäki, S., Väisänen, H., Hänninen, H., Kolström, T., Lauhanen, R., Mattila, U., Pajari, B.I. 1992. SIMA: a model for forest succession based on the carbon and nitrogen cycles with application to silvicultural management of the forest ecosystem. *Silva Carelica*, 22, 1-85.

Kellomäki, S., Väisänen, H., Strandman, H. 1993. FinnFor: a model for calculating the response of boreal forest ecosystem to climatic change. University of Joensuu. Faculty of forestry. *Research Notes* 6:1–121.

Kellomäki, S., Väisänen, H. 1997. Model computations on the effect of rising temperature on soil moisture and water availability in forest ecosystems dominated by scots pine in the boreal zone in Finland. *Climate Change* 32:423–445.

Kellomäki, S., Wang, K.Y. 2000a. Short-term environmental controls on carbon dioxide flux in a boreal coniferous forest: model computation compared with measurements by eddy covariance. *Ecological Modelling*, 128, 63 – 88.

Kellomäki, S., Wang, K.Y. 2000b. Modelling and measuring transpiration from Scots Pine with increased temperature and carbon dioxide enrichment. *Annals of Botany*, 85, 263 – 278.

Kellomäki, S., Strandman, H., Nuutinen, T., Peltola, H., Korhonen, K., Väisänen, H. 2005. Adaptation of forest ecosystems, forests and forestry to climate change .Finadapt working paper 4. Finnish Environment Institute.

Kellomäki, S., Peltola, H., Nuutinen, T., Korhonen, K.T., 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: Biological Sciences*, 363, 2341-2351.

Kilpeläinen, A., Alam, A., Strandman, H., Kellomäki, S. 2011. Life cycle assessment tool for estimating net CO₂ exchange of forest production. *GCB Bioenergy*, 3, 461-471.

Kolström, M. 1998. Ecological simulation model for studying diversity of stand structure in boreal forests. *Ecological Modelling*, 111, 17-36.

Komarov, A.S., Chertov, O.G., Zudin, S.L., Nadporozhskaya, M.A., Mikhailov, A.V., Bykhovets, S.S. et al., 2003. EFIMOD 2 – the system of simulation models of forest growth and elements cycles in forest ecosystems. *Ecological Modelling* 170, 373–392.

Kulmala, M., Suni, T., Lehtinen, K.E.J., Dal Maso, M., Boy, M., Reissell, A., Rannik, Ü., Aalto, P., Keronen, P., Hakola, H., Bäck, J., Hoffman, T., Vesala, T., Hari, P. 2004. A new feedback mechanism linking forests, aerosols, and climate. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4, 557 – 562.

Linder, S., Flower-Ellis, J.G.K. 1992. Environmental and physiological constraints to forest yield. Teoksessa: Teller A, Mathy P, Jeffers JNR (toim.) Responses of forest ecosystems to environmental changes, Elsevier, London, pp 149 – 164.

Liski, J., Lehtonen, A., Palosuo, T., Peltoniemi, M., Eggers, T., Muukkonen, P., Mäkipää, R. 2006. Carbon accumulation in Finland's forests 1922-2004 – an estimate obtained by combination of forest inventory data with modelling of biomass, litter and soil. *Annals of Forest Science*, 63, 687 – 697.

Liski, J., Repo, A., Känkänen, R., ym. 2011. Metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutukset Suomessa. *Suomen Ympäristö* 5/2011 43 p, Helsinki.

Lohila, A., Aurela, M., Tuovinen, J.-P., Laurila, T. 2004. Annual CO₂ exchange of a peat field growing spring barley or perennial forage grass. *Journal of Geophysical Research* 109, D18116, doi:10.1029/2004JD004715.

Lohila, A., Laurila, T., Aro, L., Aurela, M., Tuovinen, J.-P., Laine, J., Kolari, P., Minkkinen, K. 2007. Carbon dioxide exchange above a 30-year-old Scots pine plantation established on organic-soil cropland. *Boreal Environment Research* 12: 141–157.

Lohila, A., Minkkinen, K., Laine, J., Savolainen, I., Tuovinen, J.-P., Korhonen, L., ... Laaksonen, A. 2010. Forestation of boreal peatlands: Impacts of changing albedo and greenhouse gas fluxes on radiative forcing. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* (2005–2012), 115(G4).

Maljanen, M., Martikainen, P.J., Walden, J., Silvola, J. 2008. CO₂ exchange in an organic field growing barley or grass in eastern Finland. *Global Change Biology* 7:679-692.

Maljanen, M., Komulainen, V.-M., Hytönen, J., Martikainen, P.J., Laine, J. 2004. Carbon dioxide, nitrous oxide and methane dynamics in boreal organic agricultural soils with different soil characteristics. *Soil Biology & Biochemistry* 36:1801–1808.

Matala, J., Hynynen, J., Miina, J., Ojansuu, R., Peltola, H., Sievänen, R., Väisänen, H., Kellomäki, S. 2003. Comparison of a physiological model and a statistical model for prediction of growth and yield in boreal forests. *Ecological Modelling*, 161, 95–116.

Matala, J., Ojansuu, R., Peltola, H., Sievänen, R., Kellomäki, S. 2005. Introducing effects of temperature and CO₂ elevation on tree growth into a statistical growth and yield model. *Ecological Modelling*, 181, 173 – 190.

Medlyn, B.E., Dreyer, E., Ellsworth, D., Forstreuter, M., Harley, P.C., Kirschbaum, M.U.F., Le Roux, X., Montpied, P., Stassenmeyer, J., Walcroft, A., Wang, K., Loustau, D. 2002. Temperature response of parameters of a biochemically based model of photosynthesis. II. A review of experimental data. *Plant, Cell and Environment* 25, 1167–1179.

Medlyn, B.E., Duursma, R.A., Zeppel, M.J.B. 2011. Forest productivity under climate change: a checklist for evaluating model studies. *WIREs Climate Change* 2, 332 – 355.

Meyer, A., Tarvainen, L., Noursratpour, A., Björk, R.G., Ernfors, M., Grelle, A., Kasimir Klemetsson, Å., Lindroth, A., Rantfors, M., Rütting, T., Wallin, G., Weslien, P., Klemetsson, L. 2013. A fertile peatland forest does not constitute a major greenhouse gas sink. *Biogeosciences* 10:7739–7758.

Minkkinen, K. 1999. Effect of forestry drainage on the carbon balance and radiative forcing of peatlands in Finland. Academic dissertation, University of Helsinki, Department of Forest Ecology, Faculty of Agriculture and Forestry. <http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/maa/mekol/vk/minkkinen/>

Mäkelä, A., Kalliokoski, T., Peltoniemi, M. 2014. Future forest production under optimal C:N balance. Poster, AGU, San Francisco 15- 19.12.2014.

Mäkipää, R., Linkosalo, T., Komarov, A., Mäkelä, A. 2014. Mitigation of climate change with biomass harvesting in Norway spruce stands: are harvesting practices carbon neutral? *Canadian Journal of Forest Research*, 45, 217-225.

Mälkki, H., Virtanen, Y. 2003. Selected emissions and efficiencies of energy systems based on logging and sawmill residues. *Biomass and Bioenergy*, 24, 321-327.

Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., 25 others 2000. Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge; New York. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.php?idp=0>

Neuvonen, S., Niemelä, P., Virtanen, T. 1999. Climatic change and insect outbreaks in boreal forests: the role of winter temperatures. *Ecological Bulletins* 47:63–67.

Nikinmaa, E. ym. 2015. A wide radiative forcing assessment shows sustained climate cooling of managed boreal forests. Lähetetty tarkastettavaksi Science lehteen.

Niinimäki, S., Tahvonen, O., Mäkelä, A. 2012. Applying a process-based model in Norway spruce management. *Forest Ecology and Management*, 265, 102 – 115.

Norby, R.J., Zak, D.R. 2011. Ecological lessons from free-air CO₂ enrichment (FACE) experiments. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 42, 181 – 203.

Nykänen, H., Alm, J., Lang, K., Silvola, J., Martikainen, P.J. 1995. Emissions of CH₄, N₂O and CO₂ from a Virgin Fen and a Fen Drained for Grassland in Finland. *Journal of Biogeography* 22: 351-357.

Ojanen, P. 2014. Estimation of greenhouse gas balance for forestry-drained peatlands. *Dissertationes Forestales* 176. 26 p.

Ojanen, P., Lehtonen, A., Heikkinen, J., Penttilä, T., Minkkinen, K. 2014. Soil CO₂ balance and its uncertainty in forestry-drained peatlands in Finland. *Forest Ecology and Management* 325, 60 – 73.

Palosuo, T., Wihersaari, M., Liski, J. 2001. Net greenhouse gas emissions due to energy use of forest residues - impact of soil carbon balance. In: Pelkonen, P., Hakkila, P., Karjalainen, T. Schlamadinger, B. (eds.) *EFI Proceedings no 39, Wood biomass as an energy source challenge in Europe.*, pp. 115-130. European Forest Institute, Joensuu.

Peters, E.B., Wythers, K.R., Zhang, S., Bradford, J.B., Reich, P.B. 2013. Potential climate change impacts on temperate forest ecosystem processes. *Canadian Journal of Forest Research*, 43, 939 – 950.

Pukkala, T., Lähde, E., Laiho, O. 2009. Growth and yield models for uneven-sized forest stands in Finland. *Forest Ecology and Management*, 258, 207 – 216.

Pukkala, T., Lähde, E., Laiho, O. 2011. Using optimization for fitting individual-tree growth models for uneven-aged stands. *European Journal of Forest Research*, 130, 829 – 839.

Pukkala, T., Kellomäki, S. 2012. Anticipatory vs adaptive optimization of stand management when tree growth and timber prices are stochastic. *Forestry*, 85, 463 – 472.

Pukkala, T. 2014. Does biofuel harvesting and continuous cover management increase carbon sequestration. *Forest Policy and Economics*, 43, 41 – 50.

Pussinen, A., Nabuurs, G.J., Wieggers, H.J.J., Reinds, G.J., Wamelink, G.W.W., Kros, J., Mol-Dijkstram, J.P., de Vries, W. 2009. Modelling long-term impacts of environmental change on mid- and high-latitude European forests and options for adaptive forest management. *Forest Ecology and Management*, 258, 1806 – 1813.

Pyörälä, P., Peltola, H., Strandman, H., Kilpeläinen, A., Asikainen, A., Jylhä, K., Kellomäki, S. 2014. Effects of management on economic profitability of forest biomass production and carbon neutrality of bioenergy use in Norway spruce stands under the changing climate. *BioEnergy Research*, 7, 279-294.

Redsven, V., Hirvelä, H., Härkönen, K., Salminen, O., Siitonen, M. 2011. *MELA2009 Reference Manual (2nd edition)*. The Finnish Forest Research Institute. 664 p. ISBN 978-951-40-2283-3.

Repo, A., Böttcher, H., Kindermann, G., Liski, J. 2015a. Sustainability of forest bioenergy in Europe: land-use-related carbon dioxide emissions of forest harvest residues. *GCB Bioenergy*, 4, 877-887.

Repo, A., Känkänen, R., Tuovinen, J.-P., Antikainen, R., Tuomi, M., Vanhala, P., Liski, J. 2012. Forest bioenergy climate impact can be improved by allocating forest residue removal. *GCB Bioenergy*, 4, 202-212.

Repo, A., Tuovinen, J.-P., Liski, J. 2015b. Can we produce carbon and climate neutral forest bioenergy? *Global Change Biology Bioenergy*, 2, 253-262.

Reyer, C., Lasch-Born, P., Suckow, F., Gutsch, M., Murawski, A., Pilz, T. 2014. Projections of regional changes in forest net primary productivity for different tree species in Europe driven by climate change and carbon dioxide. *Annals of Forest Science*, 71, 211 – 225.

Riikonen, J., Vapaavuori, E. 2005. Ilmasto muuttuu – mukautuvatko metsät, Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 944, 128 s.

Routa, J. 2011. Effects of forest management on sustainability of integrated timber and energy wood production—scenario analysis based on ecosystem model simulations. *Dissertationes Forestales 123*, School of Science, University of Joensuu, Joensuu, 31 pp.

Routa, J., Kellomäki, S., Kilpeläinen, A., Peltola, H., Strandman, H. 2011a. Effects of forest management on the carbon dioxide emissions of wood energy in integrated production of timber and energy biomass. *GCB Bioenergy*, 3, 483-497.

Routa, J., Kellomäki, S., Peltola, H. 2012a. Impacts of Intensive Management and Landscape Structure on Timber and Energy Wood Production and net CO₂ Emissions from Energy Wood Use of Norway Spruce. *BioEnergy Research*, 5, 106-123.

Routa, J., Kellomäki, S., Peltola, H., Asikainen, A. 2011b. Impacts of thinning and fertilization on timber and energy wood production in Norway spruce and Scots pine: scenario analyses based on ecosystem model simulations. *Forestry*, 84, 159-175.

Routa, J., Kellomäki, S., Strandman, H. 2012b. Effects of Forest Management on Total Biomass Production and CO₂ Emissions from use of Energy Biomass of Norway Spruce and Scots Pine. *BioEnergy Research*, 5, 733-747.

Rummukainen, M. 2013. Climate change: changing means and changing extremes. *Climatic Change* 121, 3 – 13.

Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Pirinen, P. 2011. Projected changes in thermal seasons and the growing season in Finland. *International Journal of Climatology*, 31, 1437 – 1487.

Räisänen, J. 2007. How reliable are climate models. *Tellus*, 59A, 2 – 29.

Schelhaas, M.J., Eggers, J., Lindner, M. et. al.. 2007. Model documentation for the European Forest Information Scenario model (EFISCEN 3.1.3). *Alterra-rapport 1559/EFI Technical Report 26*, Alterra, Wageningen, 118 pp.

Schils, R., Kuikman, P., Liski, J., ym. 2008. Review of existing information on the interrelations between soil and climate change. Final report 16 December 2008. CLIMSOIL. Contract number 0307/2007/486157/SER/B1|port - 2008 - 048

Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Rammer, W., Verkerk, P.J. 2014. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change* 4:806–810.

Shanin, V., Komarov, A., Khoraskina, Y., Bykhovets, S., Linkosalo, T., Mäkipää, R. 2013. Carbon turnover in mixed stands: Modelling possible shifts under climate change. *Ecological Modelling*, 251, 232 – 245.

Shaw, C., Chertov, O., Komarov, A., Bhatti, J., Nadporozskaya, M., Apps, M., Bykhovets, S., Mikhailov, A. 2006. Application of the forest ecosystem model EFIMOD 2 to jack pine along the Boreal Forest Transect Case Study. *Canadian Journal of Soil Science*, 86, 171 – 185.

Sievänen, R., Kareinen, T., Hirvelä, H., Ilvesniemi, H. 2007. Hakkuumahdollisuusarvioihin perustuvat metsien kasviuonekaasutaseet. *Metsätieteen aikakauskirja*, 4/2007, 329-339

Sievänen, R., Salminen, O., Lehtonen, A., Ojanen, P., Liski, J., Ruosteenoja, K., Tuomi, M. 2014. Carbon stock changes of forest land in Finland under different levels of wood use and climate change. *Annals of Forest Science*, 71, 255 – 265.

Simola, H., Pitkänen, A., Turunen, J. 2012. Carbon loss in drained forestry peatlands in Finland, estimated by re-sampling peatlands surveyed in the 1980s. *European Journal of Soil Science* 63:798–807.

Sun, Y., Lianhong, G., Dickinson, R.E., Norby, R.J., Pallardy, S.G., Hoffman, F.M. 2014. Impact of mesophyll diffusion on estimated global land CO₂ fertilization. *PNAS*, 111, 15774 – 15779.

Tilastokeskus 2015. Polttoaineluokitus. http://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html

Unger, N. 2014. Human land-use-driven reduction of forest volatiles cools global climate. *Nature Climate Change*, 4, 907 – 910.

UNECE and FAO 2011. The European Forest Sector Outlook Study II 2010-2030. United Nations, New York and Geneva, 2011 (abbreviated to EFSOS II).

Valentine, H.T., Mäkelä, A. 2012. Modeling forest stand dynamics from optimal balances of carbon and nitrogen. *New Phytologist* 194: 961–971.

Wamelink, G.W.W., Wieggers, H.J.J., Reinds, G.J., Kros, J., Mol-Dijkstra, J.P., van Oijen, M., de Vries, W. 2009. Modelling impacts of changes in carbon dioxide concentration, climate and nitrogen deposition on carbon sequestration by European forests and forest soils. *Forest Ecology and Management*, 258, 1794 – 1805.

Wang, K.Y., Kellomäki, S., Zha, T.S., Peltola, H. 2004. Component carbon fluxes and their contribution to ecosystem carbon exchange in a pine forest: an assessment based on eddy covariance measurements and an integrated model. *Tree Physiology*, 24, 19 – 34.

Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Heikinheimo, M., Kellomäki, S., Peltola, H., Strandman, H., Väisänen, H. 2001. Impact of climate change on soil frost under snow cover in a forested landscape. *Climate Research*, 17, 63–72.

Verkerk, P.J., Mavsar, R., Giergiczny, M., Lindner, M., Edwards, D., Schelhaas, M.J. 2014. Assessing impacts of intensified biomass production and biodiversity protection on ecosystem services provided by European forests. *Ecosystem Services*, 9, 155 – 165.

Verkerk, H., Schelhaas, M.J. (in press) European forest resource development - A contribution to EFSOS II. Geneva Timber and Forest Discussion paper, ECE/TIM/DP/61. Geneva: UNECE.

Wihersaari, M. 2005a. Evaluation of greenhouse gas emission risks from storage of wood residue. *Biomass Bioenerg.*, 28, 444-453.

Wihersaari, M.(2005b. Greenhouse gas emissions from final harvest fuel chip production in Finland. *Biomass and Bioenergy*, 28, 435-443.

LIITE 1. MALLINNUSTUTKIMUSTEN LÄPIKÄYMISEEN KÄYTETYT KYSYMYKSET, SEKÄ VASTAUKSET KYSYMYKSIIN KUSTAKIN TUTKIMUKSESTA.

- 1 **Artikkeli**
- 2 Käytetyn mallin/käytettyjen mallien nimet
- 3 **Mallin filosofinen tausta**
- 4 Tilastollinen malli
- 5 Prosessipohjainen malli
- 6 Mallin tyyppi, tai keskeinen rakenne
- 7 **Mallin vaikutusluokka**
- 8 Onko kyseessä maa/alueen malli
- 9 Onko kyseessä metsikkötason malli
- 10 Onko kyseessä puutason malli
- 11 Mallin vaikutustaso, jos malli ei kuulu mihinkään yllä olevista luokista
- 12 **Ilmastomuutososio**
- 13 Onko mallia käytetty ilmastomuutoksen vaikutusten arviointiin
- 14 Jos mallia on käytetty ilmastomuutoksen vaikutusten arviointiin, mitä emissioskenaarioita mallinnustyössä on käytetty
- 15 Kuinka montaa eri emissioskenaariota mallinnustyössä on käytetty (esim. SRESA2, A1B, B1 -> yhteensä 3)
- 16 Kuinka monen eri ilmastomallin antamia ilmastomuutosennusteita mallinnustyössä on käytetty
- 17 **Ilmastovasteet**
- 18 Ympäristömuuttajat, jotka vaikuttavat mallin antamiin ennusteisiin joko mallissa itsessään, tai ilmastovasteen kuvaamiseen käytetyissä malleissa
- 19 a Ilman CO₂ pitoisuus
- 20 b Säteily määrä
- 21 c Ilman lämpötila
- 22 d Sadanta
- 23 e Ilmankosteus/Haihduntapaine (VPD)
- 24 f Maan lämpötila
- 25 g Maaveden määrä/joku muu maavesimuuttaja
- 26 Maaperän ravinteet
- 27 Vaikuttaako nouseva hiilidioksidipitoisuus ilmarakodysiin
- 28 Sisältääkö malli fotosynteesin downregulaatiota
- 29 Sisältääkö malli lämpötilaklimaatiota
- 30 Onko mallissa CO₂ ja lämpötilan välistä interaktiota
- 31 Maan vesipitoisuus
- 32 Lakastumispiste
- 33 Vaikuttaako typpilaskeuma mallin ennusteisiin
- 34 **Metsän käsittelyn ilmastovaikutus/hiilinielun muutos**
- 35 Onko metsien ilmastovasteen laskennassa metsien käsittely mukana
- 36 Onko metsien ilmastovasteen laskennassa maaperä mukana
- 37 Onko metsien ilmastovasteen laskennassa puutuotteet mukana
- 38 Onko metsien ilmastovasteen laskennassa puutuotteiden substituutiovaikutus mukana
- 39 Onko ilmastovasteen laskennassa albedon vaikutus mukana
- 40 Onko ilmastovasteen laskennassa aerosolien vaikutus mukana
- 41 Onko tuhoja mukana mallinnuksessa, tai muuten huomioitu laskennassa
- 42 **Metsän käsittelyskenaariot**
- 43 Puun kysyntä/tarjontaskenaariot
- 44 Kuinka monta erilaista metsien käsittelyskenaariota tutkimuksessa on mukana
- 45 Onko mallinnettu energiapuun vaikutusta

- 33 Mitkä hiiliositteet laskennassa mukana
Ennustemallin antama tulos
- 34 Mille aikavälille ennusteet on laskettu
- 35 Mille alueelle ennusteet on laskettu
- 36 Päätulos

OSA 3: TALOUSTIETEELLISEN MALLINNUKSEN ROOLI METSIIN JA METSIEN KÄYTTÖÖN KOHDISTUVIEN ILMASTONMUUTOKSEN HILLINTÄTOIMIEN ARVIOINNISSA

Jussi Lintunen ja Jussi Uusivuori

Luonnonvarakeskus (Luke)

TIIVISTELMÄ

Taloustieteen roolista

- Raportissa tarkastellaan kysymyksiä miksi ja miten yhteiskuntatieteet ja erityisesti taloustiede ovat hyödyksi arvioitaessa metsien käyttöä ilmastonmuutoksen hillinnässä.
- Taloustieteen avulla voidaan ennustemalleissa kuvata talouden toimijoiden käyttäytymistä. Käyttäytymisen mallinnus voi vaihdella yksinkertaisista hakkuiden allokaatiosäännöistä monimutkaisiin dynaamisiin optimointitehtäviin.
- Taloustieteellinen mallinnus tuo johdonmukaisen menetelmän arvioida sekä hillintätoimien yhteiskunnallisia kustannuksia että niiden tuottamia ilmastohyötyjä. Siten, jos ilmastovaikutukset ja yhteiskunnalliset rakenteet tunnettaisiin tarkasti, kustannus-hyöty-analyysin avulla voitaisiin hillintätoimet järjestää niiden käyttöönoton kannattavuuden mukaan.
- Taloustieteellinen mallinnus osoittaa, että hiilen ilmastovaikutukset huomioitaessa on yhteiskunnallisesti kannattavaa sitoa hiiltä metsiin esim. kiertoaikoja pidentämällä. Jos puun käyttö on taloudellisesti kannattavaa, kun käytön ilmastovaikutukset huomioidaan, tulee sitä näillä tavoilla käyttää. Hiilinielujen kasvattamisen ja puun käytön optimaalinen suhde riippuu monista tekijöistä ja on lopulta empiirinen kysymys.

1. JOHDANTO

Luonnontieteellinen tutkimus antaa tietoa siitä, mitkä tekijät ajavat globaalia ilmastomuutosta ja kuinka voimakkaasti. Tähän tietoon perustuen voidaan arvioida ihmiskunnan toimien, esim. kivihiilen polton, metsikön avohakkuun tai puuperäisen bioenergian, vaikutus ilmastoon. Ilmastomuutosta voidaan hillitä vähentämällä haitallisia toimia. Siten luonnontieteellisen tiedon avulla voidaan arvioida kunkin ilmastomuutosta hillitsevän toimen voimakkuus.

Kannattavien hillintätoimien löytämiseen tarvitaan luonnontieteiden lisäksi yhteiskuntatieteitä. Vallitseva yhteiskunta asettaa nimittäin hillintätoimien käyttöönotolle rajoitteita. Hillintätoimet vaativat toimijoilta käyttäytymismuutoksia, josta seuraa heille kustannuksia: metsänomistajien puunmyyntitulojen nykyarvo laskee ja yhtiöiden voitot pienenevät. Lisäksi markkinataloudessa esimerkiksi sähköntuotannon alentuminen johtaa sähkönhinnan nousuun ja siten kustannusten nousuun ja tuotantomahdollisuuksien menetyksiin sähköä käyttävillä talouden sektoreilla. Näitä markkinavaikutuksia voidaan pienentää substituutiolla, jolloin esim. kivihiilellä tuotettua sähköä korvataan tuulivoimaloiden tuottamalla sähköllä. Siirtymällä kalliimpiin mutta ilmastoystävällisempiin tuotantotapoihin voidaan markkinavaikutuksia vähentää.

Hillintätoimista aiheutuu siis yhteiskunnallisia kustannuksia. Toimien ilmastovaikutukset ja niiden käyttöönottoon liittyvät kustannukset vaihtelevat suuresti. Kustannus-hyöty-ajattelun mukaisesti hillintätoimet tulisi aloittaa toimista, joiden kustannus suhteessa hyötyyn on pienin (tai käänntäen: hyöty suhteessa kustannukseen suurin). Käytännössä osa hillintätoimista on liian kalliita, jotta ne olisivat relevantteja ilmastopoliittisen keskustelun kannalta. Esimerkiksi metsien hakkuiden lopettaminen lisäisi merkittävästi hiilen sitoutumista metsiin erityisesti lyhyellä aikavälillä, mutta kustannukset niin metsänomistajille kuin jalostavalle teollisuudellekin olisivat huomattavat.

Tuotantopäätökset, kuten polttoainevalinnat tai metsänhakkuupäätökset toteutuvat markkinoilla ilman, että niiden kokonaisvaikutukset yhteiskunnalliseen hyvinvointiin tulevat huomioituiksi. Ilmastomuutoksen kärsijöinä ovat koko ihmiskunta ja erityisesti tulevat sukupolvet. Tällaisia muihin toimijoihin kohdistuvia vaikutuksia kutsutaan taloustieteessä ulkoisvaikutuksiksi. Lähtökohtaisesti toimijat eivät ota näitä ulkoisvaikutuksia toimissaan – ainakaan täysimääräisesti – huomioon. On yhteiskunnan tehtävä talouden sääntelyä käyttäen ohjata taludentoimijat muuttamaan toimintaansa (esim. Baumol ja Oates 1971). Siten hillintätoimien käynnistämiseksi eivät esim. valtiotason päästötavoitteet vielä lisää päästövähennystoimien määrää, vaan toimijoiden käyttäytymisen on muututtava. Jotta hillintätoimiin tartutaan, tarvitaan poliittisia ohjauskeinoja, kuten veroja ja tukia, jotka luovat toimijoille kannustimet muuttaa käyttäytymistään.

Taloustieteellä ja erityisesti luonnonvara- ja ympäristötaloustieteellä on merkittävä rooli, kun huomioidaan ilmastomuutoksen hillintätoimien käyttöönottoon kohdistuvia rajoitteita. Taloustieteellinen mallinnus pyrkii muodostamaan kuvan yhteiskunnan rakenteista, joita on pyrittävä muuttamaan, jotta hillintätoimia saadaan valjastettua käyttöön. Taloustieteen menetelmin voidaan hillintätoimien yhteiskunnallisia kustannuksia suhteuttaa niistä saataviin yhteiskunnallisiin ilmastohyötyihin ja siten arvioida, missä järjestyksessä ja missä määrin kukin hillintätoimi kannattaa ottaa käyttöön. Tällainen kustannus-hyötyanalyysi mahdollistaa niiden poliittisten ohjauskeinojen määrittämiseen, joiden avulla päästään asetettuihin ilmastomuutoksen hillintätavoitteisiin yhteiskunnallisesti edullisimmilla toimilla.

Vaikka ilmastomuutoksen hillinnässä onnistuttaisiinkin, niin ilmaston muutosta ei voida kokonaan estää. Siten metsätaloudenkin on sopeuduttava muuttuvan ilmaston vaatimuksiin, mm. mietittäessä puulajivalintoja uudistusaloilla. Näillä sopeutumistoimilla voidaan vähentää ilmastomuutoksen aiheuttamia yhteiskunnallisia kustannuksia. Sopeutumistoimiin ei kuitenkaan pääsääntöisesti kytkeydy

ulkoisvaikutuksia, vaan hyödyt koituvat kokonaan päätöksentekijälle. Siten ympäristötaloustieteen näkökulmasta sopeutumiseen kannustamisessa ei pääsääntöisesti tarvita taloudellista sääntelyä.

2. TALOUSTIETEELLISEN OSION ROOLI ENNUSTEMALLEISSA

Yhteiskunnan ja erityisesti talouden rakenteet asettavat rajoitteita hillintätoimien käyttöönotolle. Taloudellisilla toimijoilla on omat tavoitteensa, joihin he päätöksillään pyrkivät. Lisäksi toimijoita rajoittavat erilaiset teknologiset tekijät. Metsien ilmastovaikutusten kannalta ratkaisevia ovat toteutettavat hakkuut. Näin on erityisesti lyhyellä aikavälillä, kun muut metsänhoitotoimet eivät vielä ehdi merkittävästi vaikuttaa metsien rakenteeseen. Hakkuukertymän suuruus, mutta myös hakkuiden kohdentuminen pääte- ja harvennushakkuina eri puulajeihin ja ikäluokkiin vaikuttaa puuston tilavuuden ja keskitilavuuden kehitykseen. Siten tarkasteltaessa metsien hiilinielun ja yleisemmin ilmastovaikutuksen aikakehitystä, on taloustieteellisen malliosion rooli kohdistaa hakkuut metsävarantoon ja usein myös määrittää toteutuva hakkuukertymä.

Hakkuukertymän määrittelyssä voidaan käyttää eritasoisia mallinnustapoja. Ilmastovaikutusta tarkasteltaessa voidaan tyytyä ennalta määrättyihin hakkuuskenaarioihin, jolloin taloustieteen rooli jää hakkuiden kohdistamiseen metsävarantoon. Taloustieteellisessä lähestymistavassa hakkuukertymä määräytyy kysynnän ja tarjonnan tasapainona. Tällöin hakkuukertymän aikakehitystä määrää mallinnustavan tarkkuudesta riippuen joko puun tai puutuotteiden kysyntäskenaariot. Karkeimmillaan puun kysyntä mallinnetaan tilastollisia trendiestimaatteja käyttäen. Kuvaamalla mallissa metsä- ja energiasektoreiden toiminta yksityiskohtaisemmin saadaan parempi käsitys eri kysyntätasoilla toteutuvista hakkuutasoista ja hakkuiden kohdentumisesta. Tällöin hakkuut voidaan perustaa puun jalostuskapasiteetin sekä puutuotteiden ja -energian kysynnän kehitykseen. Sektorimallinnuksen avulla huomioidaan puuta käyttävän teollisuuden tavoitteet (esim. kustannusten minimointi tai voittojen maksimointi).

Sektorimallinnuksessa roolin saavat mallista määräytyvä puun hinta ja puun korjuu- ja jalostuskustannukset. Näin mallinnus huomioi puuraaka-aineen hinnat suhteessa vaihtoehtoihin raaka-aineisiin, kuten betoniin, teräkseen, voimalaitos- ja liikennepolttoaineisiin. Suhteelliset hinnat, joissa tuet ja verot on huomioitu, määräävät puun käytön fossiilisten polttoaineiden ja muiden ei-uusiutuvien raaka-aineiden korvaajana, eli ns. substituutiomahdollisuudet tulevat johdonmukaisesti mallinnetuiksi. Tuotantoteknologiat kuvaavat panossubstituution rajat ja hinnat määrittävät toteutuneet panoskäytöt. Tällaisessa mallissa puu ei siis korvaa muita panoksia ennalta määrättyssä vakiosuhteessa, vaan malli ratkaisee toteutuvan substituution tapauskohtaisesti. Suhteelliset hinnat voivat johtaa siihen, että lupaavia substituutiokohteita ei hyödynnetä niiden kalleuden vuoksi. Lisäksi teknis-taloudelliset rajoitteet voivat johtaa siihen, että substituutiota voidaan harjoittaa vain rajallisesti: esim. olemassa oleviin kivihillivoimaloihin ei voi syöttää suuria määriä puuhaketta sellaisenaan, vaan puupolttoainetta on jalostettava tai vaihtoehtoisesti on investoitava puuta paremmin hyödyntäviin voimalaitostyyppeihin.

Hakkuiden kohdentamisessa metsiin tarvitaan metsänomistajien käyttäytymisen mallintamista. Peukalosäännön, jossa hakkuut kohdistetaan vanhimpiin metsiin, voidaan ajatella perustuvan karkeaan taloudelliseen mallinnukseen, missä arvokasvun nopeus määrää hakattavat metsiköt. Toisaalta hakkuut voidaan kohdentaa metsiin käyttäen maanarvon maksimointiin perustuvia sääntöjä. Molemmissa tapauksissa hakkuusääntö perustuu vain puunmyyntituloihin ja siten metsänomistajien mahdolliset ei-puuntuotannolliset arvot, kuten virkistyskäyttöhyödyt, jäävät huomioimatta. Tämä johtanee virhearvioihin, sillä vanhat metsät, jotka näillä säännöillä hakattaisiin ensin, voivat kuulua ei-puuntuotannollisia arvoja korostaville metsänomistajille. Tällöin hakkuiden kohdentaminen täytyisi mallintaa huolellisemmin huomioimalla nämä ei-puuntuotannolliset arvot (Hartman 1976).

3. KUSTANNUS-HYÖTYANALYYSI JA OHJAUSKEINOT

Lähtökohtana taloudellisessa mallinnuksessa on yleensä resurssiniukkuuden aiheuttama resurssien tehokas allokaatio ja toimijoiden rationaalinen käyttäytyminen tavoitteisiinsa nähden. Siten ilman ilmastopolitiikkaa toimijat maksimoivat tavoitefunktioitaan vallitsevilla hinnoilla ja resurssit ovat toimijoiden omasta näkökulmasta tehokkaassa käytössä. Jos toimintaan liittyy ulkoisvaikutuksia, yhteiskunnan näkökulmasta toiminta ei ole tehokasta. Käytettäessä veroja ja tukia ohjauksena toimijoiden tavoitefunktiot muuttuvat ja samalla myös käyttäytyminen. Ohjaukskeinot oikein asettaen toimijat voidaan ohjata toivottuun käyttäytymiseen. Kun ohjaukskeinon avulla toiminta kannustetaan poikkeamaan lähtötilanteesta, ohjataan toimijat pois aiemmasta optimistaan, mikä alentaa heidän tavoitefunktioiden arvoa. Nämä menetykset ovat politiikkatoimien aiheuttamia yhteiskunnallisia kustannuksia.

Alhaisen kustannuksen päästövähennystoimi on esimerkiksi kivihiilen korvaaminen maakaasulla jo olemassa olevalla voimalaitoskapasiteetilla. Kustannukset nousevat, kun tarvitaan investointeja uuteen tuotantokapasiteettiin, etenkin jos lisätty kapasiteetti on uutta teknologiaa, jonka valmistusta ja käyttöä vielä harjoitellaan. Energiasektori on erinomainen kohde päästövähennystoimille, koska tarjolla on monenlaisia vähäpäästöisiä tuotantomuotoja, mutta myös päästöiltään erilaisia polttoaineita ja voimalaitostekniikoita. Siten sektorilla voidaan melko joustavasti valita kustannusten kasvun ja tuotannon vähentämisen väliltä. Sen sijaan esimerkiksi metsäteollisuudessa teknologioita on tarjolla vähemmän ja hakkuiden alenemaa seuraa tyypillisesti metsäsektorin tuotannon alenema. Sekä energian hinnannoususta että tuotannon alenemasta eri sektoreilla seuraa kerrannaisvaikutuksia muille sektoreilla, jotka osaltaan kerryttävät yhteiskunnallisia kustannuksia.

Jotta kustannuksia oltaisiin valmiita kärsimään, pitää päästövähennystoimista koitua hyötyä. Taloustieteellisissä kustannus-hyöty-malleissa nämä hyödyt ovat hillintätoimin aikaansaatuja vähenemiä yhteiskunnan kärsimissä ilmastomuutoshaitoissa. Jos malli on talouden ja ilmastomallin osalta riittävän kattava, voidaan sen avulla laskea arvioita ilmastomuutoksen haitoista (esim. Nordhaus 1993, Golosov ym. 2014). Mallit arvottavat ilmastohaittojen yhteiskunnallisen kustannuksen esimerkiksi hiilen hinnan avulla, joka kuvastaa CO₂-päästöjen yhteiskunnallista rajahaittaa.

Ilmastoekonomisen kirjallisuuden on yksimielinen siitä, että ilmastomuutoksen haittojen arviointi on hyvin vaativaa. Siksi tutkimuksesta saadut tulokset ovat epävarmoja (esim. Tol 2011). Ilmastopolitiikan vaikutuksia tutkittaessa ilmastohaittojen suuruuden arviointi voidaan irrottaa erilliseksi kysymykseksi. Suuruuden arvioinnin sijaan rajahaittojen arvo voidaan kiinnittää määrättylle tasolle tai aikauralle, jolloin tutkimus pyrkii löytämään kustannustehokkaan tavan hillitä ilmastomuutosta annetuilla rajahaitan arvoilla. Tällaisella lähestymistavalla voidaan arvioida myös metsien roolia ilmastomuutoksen hillinnässä: erityisesti eri puun-käyttömuotojen ja hiilinielujen ja muiden metsän ilmastovaikutusten keskinäisiä painotuksia. Tällaiset arviot huomioivat tuotantoprosessien eri vaiheiden kustannukset, käytettävissä olevat teknologiat, investointikustannukset, metsäresurssien ominaisuudet sekä toimijoiden preferenssit.

Mallinnus kertoo siis, miten ilmastomuutosta tulisi hillitä, jos ilmastohaitat ovat oletetun suuruiset. Koska ilmastohaittoja on vaikea arvioida, laskelmat suoritetaan tyypillisesti erisuuruisilla ilmastohaitoilla. Vaikka mallit ovat yksinkertaistuksia todellisuudesta, niiden avulla saadaan käsitys tarvittavasta ilmastopolitiikasta ja toimien käyttöönottojärjestyksestä. Taloustieteellinen mallinnus antaa usein yksinkertaistetun kuvan toimijoiden käyttäytymisestä. Siten toimijoiden reaktiot reaali maailmaan asetettuun ilmastopolitiikkaan eivät välttämättä täsmällisesti seuraa mallinnustuloksia. Vaikka taloustieteellisen analyysin avulla saadaan ennusteita politiikan vaikutuksia, se on täsmällisempi

kuvaamaan tarvittavia päästövähennyksiin ja hiilinielujen kasvattamiseen kannustavia poliittisia ohjauskeinoja.

4. METSÄT JA ILMASTONMUUTOKSEN HILLINTÄ

Kustannus-hyöty-analyysiä on hyödynnetty metsien ja ilmastohaittojen tarkastelussa, mutta tutkimukset ovat lähinnä koskeneet hiilen aiheuttamia ilmastovaikutuksia. Metsikkötason tarkasteluissa metsänomistajaa tuetaan hiilen sitomiseen, mutta verotetaan vapauttamisesta hakkuun hetkellä (esim. van Kooten ym. 1995). Poliitiikan seurauksena tasaikäisrakenteisessa metsässä kiertoaika pitenee ja puustoon keskimäärin sitoutunut hiilen määrä kasvaa (esim. van Kooten ym. 1995 ja Pohjola & Valsta 2007). Kun tasaikäisrakenteisen metsän tapauksessa hiilen lisäksi huomioidaan metsänkäsittelyn vaikutus albedoon, rotaatiot lyhenevät verrattuna tapaukseen, jossa huomioidaan vain hiili (esim. Thompson ym. 2009). Metsikkötason tarkastelut osoittavat siis, että ilmastomuutoksen hillinnässä metsiin pyritään sitomaan lisää hiiltä, mikä tarkoittaa painetta alentaa hakkuita, kunnes kiertoajat saavuttavat halutun tason.

Kun mallissa huomioidaan myös puun kysyntä, seuraa hakkuuhalukkuuden alentumisesta puun hinnan nousu, joka pyrkii ylläpitämään hakkuita (Cunha-e-Sá ym. 2013). Markkinavaikutusten vuoksi rotaatioiden piteneminen hidastuu ja siten hiilivarannon kasvu kestää pidempään kuin mitä rotaatiot pitenevät. Lopulta hiilivarannon kasvu päättyy, kun metsät saavuttavat uuden tasapainotilan. Hiilikorvausten myötä metsämaan arvo kasvaa ja mallituloksissa tämä näkyy metsäalan kasvuna (Cunha-e-Sá ym. 2013). Cunha-e-Sá ym. (2013) mallissa ei kuitenkaan ole huomioitu maataloussektorin maanarvomuutoksia ilmastopoliitiikan seurauksena. Heidän malli ei myöskään huomioi ilmastopoliitiikan vaikutuksia puunkäyttösektorilla, joten substituuiohyötyjä ei ole eksplisiittisesti mallinnettu.

Tahvonen (1995) huomioi myös puunkäyttösektorin ja siten mahdolliset substituuiohyödyt. Mallitarkastelu keskittyy kuitenkin näiden sijaan puunkäyttöä ohjaavan ilmastopoliitiikan määrittämiseen. Lintunen ja Uusivuori (2014) ratkaisevat kustannus-hyöty-analyysimallin, jossa sekä ainespuun että hakkuutähteiden käyttö on mallinnettu eksplisiittisesti, kun hiilen kiertoon liittyvät ilmastovaikutukset on huomioitu. Mallitulosten mukaan metsien käyttöä tulisi ensin vähentää ja antaa nielun voimistua. Kun kiertoajat ovat kasvaneet uudelle tasapainotasolle, nielu heikkenee ja kasvanut puuston tilavuus mahdollistaa puun alkutilannetta suuremman käytön kulutushyödykkeiden valmistuksessa. Tulokset osoittavat myös, että hakkuutähteitä ja ainespuutakin voidaan käyttää fossiilisia polttoaineita korvaavina energialähteinä, jos se ilmastovaikutukset huomioituna on taloudellisesti kannattavaa.

Edellä kuvatuissa sektoritason malleissa talous on kuvattu yksinkertaistetusti ja ne huomioivat vain hiileen liittyvät ilmastovaikutukset. Siten vastaus kysymykseen, miten metsiä pitäisi käyttää ilmastomuutoksen hillinnässä, on vielä vailla täsmällistä vastausta. Sen sijaan kustannus-hyöty-mallinnuksen sivutuotteena voidaan metsänhoidolle ja puun käytölle johtaa ohjauskeinot, jotka tuottavat kustannustehokkaan tason metsien ilmastovasteelle tietyn ilmastohaitan vallitessa (hiilen tapauksessa Tahvonen 1995 ja Lintunen & Uusivuori 2014). Nämä ohjauskeinot ovat yllättävänkin riippumattomia mallissa tehdyistä oletuksista ja tarkastelluista teknologioista. Niiden sijasta ohjauskeinojen muodollinen esitys kumpuaa toiminnan ilmastovasteen luonnontieteellisistä perusteista. Siten vaikka ennusteet metsien käyttöurille voivat vaihdella oletusten ja käytettävissä olevan datan mukaan, ohjauskeinot ovat vakaat: hiilikorvauksia maksetaan sidotun hiilen ja veroja hakkuissa vapautuvan hiilen mukaisesti. Taloustieteen pohjalta voidaankin sanoa, että kysymys ”missä suhteessa pitäisi ilmastomuutoksen hillinnässä hyödyntää puun käyttöä ja hiilinieluja?” on ongelmallinen, sillä se vaatisi niin kuluttajien, tuottajien kuin metsänomistajien preferenssien sekä tuotantoteknologioiden täydellisen tuntemuksen. Sen sijaan kysymys ”miten metsien hoitoa ja puun käyttöä tulisi ohjata veroilla ja tuilla,

jotta hillintätoimet olisivat kustannustehokkaita?” on huomattavasti helpompi kysymys: Kun kattava ja oikein asetettu ohjaus on otettu käyttöön, puun ja metsien käyttö asettuu verojen ja tukien määräämälle tasolle toimijoiden saamien kannustimien ohjaamana. Tämän jälkeen hiilinielujen ja substituution suhde on empiirinen kysymys.

KIRJALLISUUS

- Baumol, W. J., Oates, W. E. 1971. The use of standards and prices for protection of the environment. *The Swedish Journal of Economics*, 42-54.
- Cunha-e-Sá, M. A., Renato R., & Clara C.-D.. Natural carbon capture and storage (NCCS) 2013. Forests, land use and carbon accounting. *Resource and Energy Economics* 35(2):148-170.
- Jaffe, A. B., Newell, R. G., & Stavins, R. N. 2005. A tale of two market failures: Technology and environmental policy. *Ecological Economics*, 54(2), 164-174.
- Golosov, M., Hassler, J., Krusell, P., & Tsyvinski, A. 2014. Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium. *Econometrica*, 82(1), 41-88.
- Hartman, R. 1976. The harvesting decision when a standing forest has value. *Economic inquiry*, 14(1), 52-58.
- Kahneman, D. 2003. Maps of bounded rationality: Psychology for behavioral economics. *American economic review*, 1449-1475.
- van Kooten, G. C., Binkley, C. S., & Delcourt, G. 1995. Effect of carbon taxes and subsidies on optimal forest rotation age and supply of carbon services. *American Journal of Agricultural Economics*, 77(2), 365-374.
- Lintunen, J., & Uusivuori, J. 2014. On The Economics of Forest Carbon: Renewable and Carbon Neutral But Not Emission Free. *Nota di Lavoro* 13.2014, Milano, Italia: Fondazione Eni Enrico Mattei.
- Nordhaus, W. D. 1993. Rolling the 'DICE': an optimal transition path for controlling greenhouse gases. *Resource and Energy Economics*, 15(1), 27-50.
- Pohjola, J., & Valsta, L. 2007. Carbon credits and management of Scots pine and Norway spruce stands in Finland. *Forest Policy and Economics*, 9(7), 789-798.
- Simon, H. A. 1955. A behavioral model of rational choice. *The quarterly journal of economics*, 99-118.
- Tahvonen, O. 1995. Net national emissions, CO₂ taxation and the role of forestry. *Resource and energy economics*, 17(4), 307-315.
- Thompson, M. P., Adams, D., & Sessions, J. 2009. Radiative forcing and the optimal rotation age. *Ecological Economics*, 68(10), 2713-2720.
- Tol, R. S. 2011. The social cost of carbon. *Annual Review of Resource Economics*, 3(1), 419-443.