

Ilmastopaneeli

METSIEN HYÖDYNTÄMISEN ILMASTOVAIKUTUKSET JA
HIILINIELUJEN KEHITTYMINEN

JYRI SEPPÄLÄ¹, MARKKU KANNINEN², TIMO VESALA², JUSSI UUSIVUORI³, TUOMO KALLIOKOSKI², JUSSI LINTUNEN³, LAURA SAIKKU¹, RIITTA KORHONEN², ANNA REPO¹

¹ Suomen ympäristökeskus SYKE

² Helsingin yliopisto, HY

³ Luonnonvarakeskus, Luke

TIIVISTELMÄ.....	4
1. JOHDANTO.....	6
2. METSIEN HIILITASE JA HIILINIELUJEN KEHITTYMINEN	7
2.1 Käsitteistä ja laskentaperiaatteista	7
2.2 Hiilinielujen kehitys ja nykytila Suomessa ja maailmalla	8
2.3 Hiilinielujen tuleva kehitys.....	12
3. AIKAJÄNTEET JA TARKASTELUTASOT.....	13
3.1 Ilmastopolitiikka ja ilmastonmuutos	13
3.2 Metsiin kohdistuvat toimenpiteet	16
4. METSIEN KÄYTÖN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖJEN ILMASTOVAIKUTUKSET	19
4.1 Metsien hiilitaseen muutokset ja ilmastovaikutukset	19
4.2 Puutuotteiden ja metsäenergian ilmastovaikutukset	23
4.3 Aikahorisontti ja puun käytön ilmastovaikutukset.....	29
5. ILMASTONEUTRAALISUUS JA -VAIKUTUKSET	31
6. METSIEN KÄYTÖN ILMASTOVAIKUTUKSET KANSAINVÄLISISSÄ SOPIMUKSISSA	32
6.1 Lähtötilanne	32
6.2 Nykyiset pelisäännöt.....	33
6.3 Näkemyksiä pelisääntömuutoksiin ja niiden vaikutuksista Suomelle	33
7. TUTKIMUSTARPEET	34
8. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	35
KIRJALLISUUS.....	38

TIIVISTELMÄ

Suomen metsät sitovat hiilidioksidia ilmakehästä enemmän kuin sitä vapauttavat, ja toimivat siten hiilinieluna ja viilentävät ilmastoa. Tehtyjen tutkimusten ja skenaarioajojen valossa näyttää vahvasti siltä, että Suomen metsät säilyvät huomattavina hiilinieluinä seuraavien lähivuosisikymmenten aikana.

Mallitarkastelut osoittavat, että puun käytön lisääminen pienentää Suomessa metsien hiilinielua ja metsien hiilivarastoa vähintään vuosikymmeniksi eteenpäin verrattuna tilanteeseen, jossa käyttöä ei lisätä.

Säilyttämällä puun käyttö nykyisellä tasolla Suomessa saavutettaisiin mahdollisesti vielä keskipitkällä aikavälillä (50–100 vuotta) suurempia ilmastohyötyjä kuin ottamalla lisää puuta nykyisen kaltaiseen käyttöön. Pitkällä aikavälillä puun käytön ilmastohyödyt ovat kuitenkin fossiilisiin polttoaineisiin nähden selvät, mikäli metsämaan kasvuolosuhteet eivät heikkene tulevaisuudessa.

Ilmastonmuutoksen hillintä vaatii lyhyellä aikavälillä (10–30 vuotta) kasvihuonekaasupäästöjen nopeaa rajoittamista, jotta maapallon keskilämpötila ei nouse yli vaarallisena pidetyn kahden asteen. Tätä taustaa vasten puun käytön voimakas lisääminen siten, että käyttöön otettavan biomassan hiili vapautuu lyhyellä aikavälillä hiilidioksidina ilmakehään, on arveluttavaa. Lukuun ottamatta puun käyttöä rakennustuotteissa metsästä otetun puun hiili vapautuu nykyisin enimmäkseen nopeasti ilmakehään.

Tällä hetkellä tutkimukset eivät anna vielä selkeää kuvaa siitä kuinka metsän käytön lyhyen ja keskipitkän aikavälin hiilidioksidipäästölisäykset ilmakehään ja pitkällä aikavälillä saavutettavat ilmastohyödyt asettuvat toisiinsa nähden ilmastonmuutoksen hillinnän kannalta.

Nykytilanteessa metsien ainespuun käyttöä voidaan perustella parhaiten ilmastosyistä, jos metsäteollisuuden tuotteilla pystytään korvaamaan elinkaarivaikutuksiltaan suuripäästöisiä tuotteita (esim. teräs ja sementti) ja niiden hiilisisältö pystytään pitämään pitkään käytössä. Vasta tuotteen hylkäysvaiheessa puun hiilisisältö ohjattaisiin energiantuotantoon. Tällöin voisi olla mahdollista saavuttaa ilmastohyötyjä jo lyhyellä aikavälillä. Puun energiakäytön lisääminen tuottaa nopeammin ilmastohyötyjä, jos energiakäyttöön ohjataan nopeasti hajoavia hakkuutähteitä ja ainespuuta pienempiä harvennuspuita runkokuun sijaan. Joutomaiden ja maatalouskäytön ulkopuolelle jääneiden peltojen metsittäminen aiheuttaa välittömästi ilmastohyötyjä.

Yhteiskunnan pyrkimys vähähiilisyteen ja teknologian kehitys uusine tuotteineen muuttaa puutuotteiden ja metsäenergioiden korvaushyötyjä vaihtoehtoisin tuotteisiin ja energioihin nähden tulevaisuudessa. Metsäenergian ilmastohyödyt ovat vaikeammin saavutettavissa tulevaisuuden vähähiilisessä maailmassa. Toisaalta uusien puutuotteiden (esim. nanosellu) käytöllä voidaan saavuttaa tulevaisuudessa huomattavia ilmastokorvaushyötyjä esimerkiksi teräksen korvaamisessa.

Jos metsien käytön ja hiilinielujen käsittely- ja raportointikäytäntö jatkuu tulevissa ilmastopimuksissa nykyisen kaltaisena, mallitarkastelut osoittavat yhtenäisesti, että suunniteltu Suomen metsien ilmasto- ja energiastrategian mukainen metsähakkeen lisäkäyttö ei vaaranna poliittisten ilmastotavoitteidemme toteutumista ainakaan lyhyellä aikavälillä. Mallitarkasteluihin liittyy kuitenkin puutteita, jotka näkyvät hiilinielujen kehittymisennusteiden epävarmuuden kasvuna mentäessä kauemmaksi nykyhetkestä.

Ilmastopaneeli

Tutkimusten perusteella näyttää siltä, ettei pelkän hiilen ilmastovaikutuksen huomioiminen takaa ilmaston kannalta parasta mahdollista metsien käsittelyä ja käyttöä. Tällä hetkellä on kuitenkin vielä ennen aikaista sanoa kuinka metsämme albedo- ja aerosolivaikutukset kokonaisuudessaan vaikuttavat ilmastoon. Nämä ja puun polton pienhiukkaset ja mustan hiilen päästöt kuitenkin pitää ottaa huomioon kun puhutaan metsien ja niiden käytön ilmastovaikutuksista.

Nykyisen ilmastopimuksen pelisäännöstö ei juuri kannusta metsien hiilinielujen kasvattamiseen. Tältä osin järjestelmän palkitsevuutta tulisi kehittää, mutta se ei saa johtaa fossiilisten polttoaineiden päästövähennyshalukkuuden pienenemiseen.

1. JOHDANTO

Metsäbiomassasta valmistettujen tuotteiden ja energian ilmastovaikutusten arvioinnin perustana on ollut pitkään ajatus, että sama hiilidioksidimäärä, joka vapautuu biomassan käytöstä, sitoutuu aikanaan uuteen kasvimassaan. Kun metsämaata ei tuhota ja puun käytöstä vapautunut hiilidioksidi sitoutuu uuteen biomassaan, puun käytön ilmastovaikutus on katsottu nollassa. Tätä metsäraaka-aineen hiilineutraalisuuden peukalosääntöä on noudatettu pitkään kansainvälisesti puun käytön ilmastovaikutusten arvioinneissa, joissa ilmastovaikutusten tarkastelun aikajänne on ollut käytännössä 100 vuotta.

Ajatus, että puun käytöllä ei ole ilmastovaikutuksia, on kuitenkin viime aikoina kyseenalaistettu monissa tieteellisissä julkaisuissa. Keskusteluun on tuotu näkemys, ettei puun käyttöä pidä lisätä ilmastosyistä. Lisäksi on esitetty ajatus, että eri puujakeille (kannot, oksat jne.) tulisi määritellä erilaiset kasvihuonekaasupäästökertoimet. Toisaalta on myös esitetty, että puun käytön vähentäminen Suomen tapaisessa maassa johtaa lyhyellä tähtäyksellä hiilinielun kasvuun, mutta pitkällä aikavälillä suurempi ilmastohyöty saavutetaan metsien intensiivisellä hyödyntämisellä ja hoidolla, koska muuten hiilinielu heikkenisi. Metsästä saatavilla puutuotteilla pystytään korvaamaan tuotteita, jotka muuten aiheuttavat suurempia kasvihuonekaasupäästöjä.

Eri maiden puuston ja metsämaan hiilitasetta seurataan tapahtuneiden päästöjen ja nielujen osalta ilmastopaneelin (UNFCCC) yhteydessä sovitun inventaariolaskennan mukaisesti. Laskentamenetelmä on kehitetty IPCC:n puitteissa, mutta ilmastopaneelin ja Kioton pöytäkirjan osapuolet ovat päättäneet menetelmän soveltamisen laajuudesta ja siihen liittyvistä velvoitteista. Ilmastovaikutusten kannalta on olennaista kuinka eri maiden metsänielu kehittyi kokonaisuudessaan pitkällä aikavälillä. Durbanin ilmastokokouksessa päätettiin, että Kioton toisen velvoitekauden ratifioineelle osapuolelle on määritelty erikseen sovittu maakohtainen metsien nielujen vertailutaso. Sovituissa pelisäännöissä nielun kasvattamisesta vertailutasosta ei kuitenkaan juurikaan palkita ilmastovelvoitteiden tavoittelussa, mikä ei kannusta nielujen kasvattamiseen. Tämä on puolestaan ristiriidassa sen kanssa, että nielujen kasvattamisella saavutettaisiin ilmastohyötyjä.

Edellä esitetty epäselvä tilanne näkyy myös kansainvälisessä ilmastokeskustelussa. Tämä voi johtaa tilanteeseen, jossa metsäbiomassan käyttöä ja ylipäättänsä maakäyttösektorin toimia koskevia ilmastovaikutusten laskentasääntöjä muutetaan kansainvälisissä päästöinventaariorissa ja hiilinielujen vertailutasot tai ylipäättänsä hiilinielujen pelisäännöt määritellään ilmastopaneelissa uudestaan. Pahimmillaan muutokset voivat perustua puutteellisiin näkökohtiin. Asian tärkeyden takia Suomen ilmastopaneeli katsoi tarpeelliseksi myös antaa tähän keskusteluun oman panoksensa.

Työn päätavoitteiksi muotoutui koota tiedeyhteisön käsitykset seuraaviin kysymyksiin:

- millaisella metsien hyödyntämisellä saavutetaan suurin ilmastohyöty ottamalla huomioon metsien hiilinielun kehittyminen sekä metsätuotteiden ja -energian kautta saavutettava päästövähennys.
- miten metsien käytön ilmastovaikutusten käsittelyä tulisi muuttaa kansainvälisissä ilmastopaneelissa

Työn tarkoituksena on ollut tunnistaa tiedeyhteisön keskuudessa vallitsevat konsensusalueet ja käsityserot perusteluineen. Läpikäynnin perusteella on muodostettu suositukset keskeisimmistä viesteistä päättäjille ja suunnitelma jatkohankkeen edellyttämille tarkasteluille. Tarkastelusta on rajattu metsien käytön muut kuin ilmastovaikutukset pois.

Työtä varten ilmastopaneeli lähetti 36 suomalaiselle tutkijalle kyselyn, johon saatiin 24 vastausta. Asiantuntijakyselyn tulokset metsien hyödyntämisen ilmastovaikutuksista on esitetty erillisessä raportissa

(Saikku 2015). Vastanneille tutkijoille järjestettiin myös työseminaari. Lisäksi työtä varten tehtiin kirjallisuuskatsaukset seuraavista aiheista: Mitä metsämallit kertovat Suomen metsien hiilinielujen tulevasta kehityksestä? (Kalliokoski ja Repo 2015) ja Taloustiede, ilmastonmuutos ja metsät (Lintunen ja Uusivuori 2015). Asiantuntijakyselyn, seminaarin ja kirjallisuuskatsauksien tuloksia on hyödynnetty tämän raportin laadinnassa ja kirjallisuuskatsaukset on erikseen julkaistu Suomen ilmastopaneelin raportissa (4/2015). Aiemmin ilmastopaneeli on laatinut aiheesta raportin (Pingoud ym. 2013), jota tämä raportti merkittävästi täydentää uusien laajojen tarkastelujen pohjalta.

2. METSIEN HIILITASE JA HIILINIELUJEN KEHITYMINEN

2.1 Käsitteistä ja laskentaperiaatteista

Ilmastopaneelin (UNFCCC) inventaariolaskennan pelisääntöjen mukaisesti metsien hiilivarastojen muutosta puuston biomassassa, kuolleessa puussa ja maaperässä seurataan nykyisin vuosittain Suomessa ja muissa sopimuksen allekirjoittaneissa maissa. Sama koskee Kioton pöytäkirjan toisen velvoitekauden mukaista ”maankäyttö, maankäytön muutos ja metsätalous (LULUCF)” -sektorin raportointia. Metsien päästöillä tarkoitetaan sopimuksissa joko maaperästä tai kasvillisuudesta vapautuvia kasvihuonekaasuja. Hiilidioksidi (CO₂) on tärkein yksittäinen kasvihuonekaasu LULUCF -sektorilla. Tämän lisäksi raportoidaan metsämaiden metaani- (CH₄) ja typpidioksidi- (eli typpioksiduuli tai ilokaasu; N₂O) päästöt.

Suomen kasvihuonekaasupäästöinventaariossa metsien päästöjen ja nielujen laskennan perustana ovat puuston biomassan sekä maaperän ja kuolleen puuaineksen hiilitaseiden vuotuiset muutosarviot. Puuston biomassan hiilitaseen laskenta Suomessa perustuu sekä Valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) aineistoihin että poistumatilastoihin. Puuston poistuma koostuu hakkuukertymästä (= metsäteollisuuden käyttämä ja vientiin menevä markkinapuu sekä pientalokiinteistöjen ja vuokra- eli rahtisahauksen käyttämä puu), metsään hakkuissa jäävistä runkopuun osista (metsähukkapuu) ja luontaisesti kuolleista runkopuun osista (luonnonpoistuma). Poistumatilastot perustuvat metsäteollisuuden ilmoituksiin puunkäytöstä, polttopuunkäyttökyselyyn ja arvioon luonnonpoistumasta. Puuston hiilitase lasketaan siten että puuston vuotuisesta kasvusta vähennetään vuotuinen kokonaispoistuma (hakkuut ja luonnonpoistuma) ja siten saatu nettokasvu on muunnettu hiilidioksidiksi. Laskennassa puuston poistuma käsitellään siis välittömänä päästönä ilmakehään (Lehtonen 2009).

Nykyisin hakkuissa korjatun puutuotteisiin päätyvän puuston hiilivarasto otetaan erikseen inventaariolaskennassa huomioon. Puun hiili varastoituu puutuotteiden elinkaaren ajaksi ja tämän jälkeen tuotteiden sisältämä hiili vapautuu ilmakehään, joko palamisen tai lahoamisen seurauksena. Kioton sopimuksen mukaisessa laskennassa otetaan huomioon kunkin vuoden puutuotteista vapautuvan ja puutuotteiden sitoman hiilen nettovaikutus hiilidioksidina. Mukana on myös aikaisempina vuosina tuotettujen tuotteiden hiilen vapautuminen ja hiilivarasto.

Kasvihuoneinventaariossa maaperän hiilitaseen arvioinnissa erotellaan mineraalimaat ja orgaaniset maat. Metsien mineraalimaiden hiilivaraston muutos ennustetaan Yasso-maamallilla. Orgaanisten maiden hiilivarastomuutosten arvioinnissa käytetään kokeellista seurantatietoa, kariketuantokertoimia ja biomassamallinnusta. Nykyisin laskennassa ovat mukana myös hakkuutähteiden vaikutukset maaperän hiilitasemuutoksissa. Metsämaan hiilitaseen arvioinnissa on myös mukana maankäyttömuutosten ja metsäpalojen vaikutukset. Laskentasäännöt on esitetty kasvihuonekaasupäästön maaraportissa (Tilastokeskus 2015a).

Metsien *kasvihuonekaasutaseella* tarkoitetaan kasvihuonekaasuinventaarion metsäosion nettotulosta, joka kuvaa metsästä vapautuneiden kasvihuonekaasupäästöjen ja hiilen sidonnan erotusta vuoden

aikana hiilidioksidiekvivalenttilukuna ilmaistuna. Negatiivinen nettotulos merkitsee sitä, että vuositasolla metsien vaikutus on ilmastoa viilentävä. Kasvihuonekaasuinventaarion laskelmassa ovat mukana maaperästä vapautuvat CO₂-, CH₄- ja N₂O- päästöt. Typpioksiduulipäästöjä syntyy orgaanisen maan hajoamisen seurauksena ja lannoituksesta. Metaania vapautuu veden kyllästämiltä turvemailta. Raportoinnin piirissä ovat vain ihmisen toiminnan, kuten metsätalouden, aiheuttamat päästöt ja hiilivirrat. Luonnontilaisiksi katsottujen soiden hiilen sidontaa sekä metaani- ja dityppioksidipäästöjä ei oteta huomioon.

Ilmaston kannalta on olennaista metsiin ja maaperään varastoitunut hiilimäärä ja sen kehittyminen. Metsät voivat toimia hiilinieluna tai lähteenä mikäli ne sitovat tai vapauttavat hiilidioksidia tai metaania. Metsien toimiessa hiilinieluna hiilen varasto kasvaa. Hiililähteet ovat prosesseja ja aktiviteetteja, jotka aiheuttavat hiilidioksidi- tai metaanipäästöjä. Hiilinielut ovat prosesseja, aktiviteetteja tai mekanismeja, jotka poistavat niitä (United Nations 1992).

Kasvihuonekaasuinventaarion kuvaava hiilen sidonnan ja vapautumisen vuosittaisen hiilen *vuon* (flux) eli vaihdon (exchange), joka kertoo myös sen kuinka metsän *hiilivarasto* muuttuu. Positiivinen vuo pienentää hiilivarastoa ja negatiivinen kasvattaa. Hiilivarasto muodostuu puuston biomassasta, kuolleesta puusta ja maaperän sisältämästä hiilestä. Biogeokemiallisia kiertoja tutkiva tiedeyhteisö käyttää käsitteitä NEE (net ecosystem exchange eli nettoekosysteemivaihto) ja NBE (net biome exchange eli nettobiomivaihto). *NEE* viittaa metsän ja ilmakehän väliseen CO₂:n vuohon, joka muodostuu kasvusta ja maaperän lahoamisesta ja *NBE* kuvaa kokonaisvaihtoa, joka ottaa huomioon myös korjuun ja luonnolliset hiiltä poistavat häiriöt ($NBE = NEE + \text{korjuu} + \text{häiriöt}$). Häiriöitä ovat erityisesti metsäpalot.

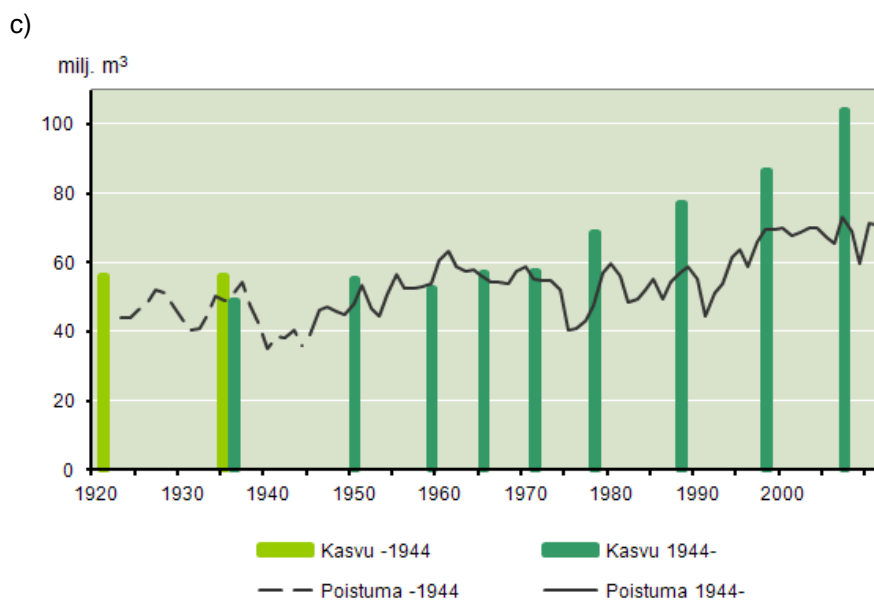
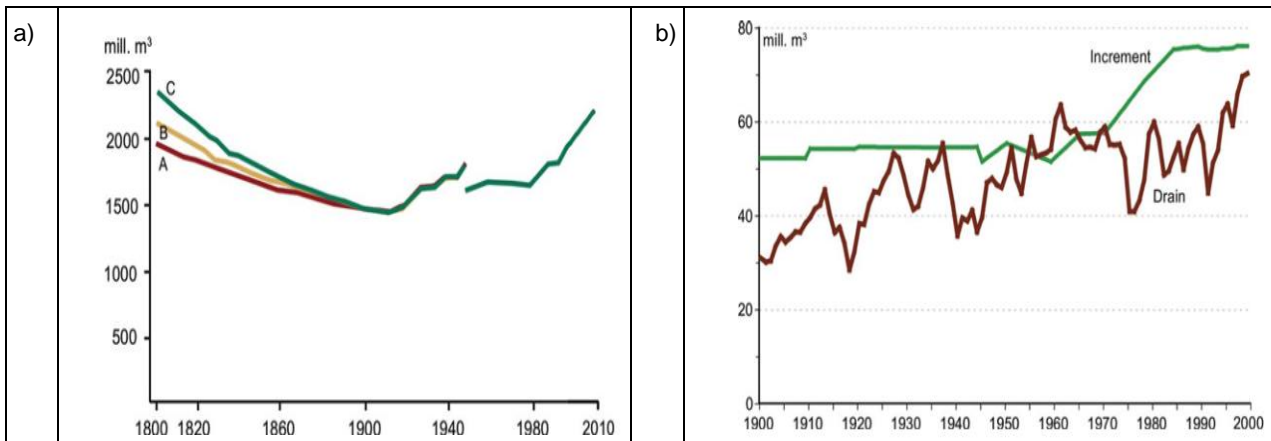
2.2 Hiilinielujen kehitys ja nykytila Suomessa ja maailmalla

Suomessa metsiä on hyödynnetty ihmiskäyttöön pitkään. Jo esiteollisella ajalla Suomessa käytettiin puuta huomattavat määrät lämmityksen, ruuanvalmistuksen, rakentamisen ja kaskeamisen tarpeisiin. Tervanpoltto ja ruukkien tarvitsema puu lisäsi metsien käyttöä, joka kiihtyi saha- ja kuiduttavan massateollisuuden kehittymisen myötä varsinkin 1870-luvulla. Yksityisen maanomistuksen vakiinnuttaminen ja metsien käyttöä rajoittava lainsäädäntö edistivät kestävämmän metsätalouden syntyä 1900-luvun alkuvuosikymmeninä.

Suomessa käynnistettiin valtakunnan metsien inventointi vuonna 1921. Siitä alkaen metsien tilaa on seurattu systemaattisesti aluksi jaksoittaisina inventointeina ja 1960-luvulta alkaen jatkuvana inventointina. Ennen vuotta 1920 tehdyt arviot Suomen metsien tilasta perustuvat yksittäisiin tutkimuksiin tai havaintoihin.

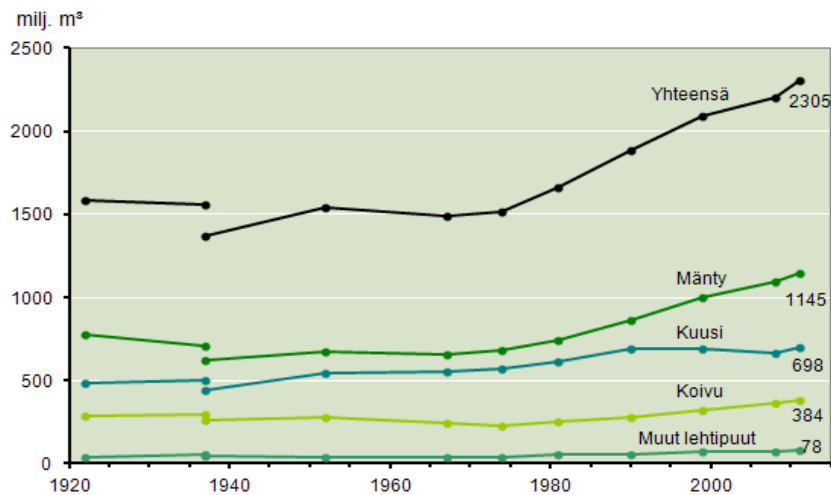
Suomen metsien puuston määrän arvioidaan pienentyneen voimakkaasti kestävämmän metsätalouden seurauksena 1800-luvulla, ja puuston määrän arvioidaan saavuttaneen miniminsä vuoden 1900 paikkeilla, minkä jälkeen puuston määrä on lisääntynyt tasaisesti (kuvat 1a ja 1b). Vielä voimakkaammin ovat lisääntyneet sekä puuston kasvu että poistuma (kuvat 1b ja 1c). Suomen metsien puuston kasvu on tällä hetkellä noin kaksi kertaa suurempi kuin se oli 1900-luvun alussa. Samalla puuston tilavuus on kasvanut 1500 miljoonasta kuutiosta 2300 miljoonaan kuution (kuva 2), vaikka metsäpinta-ala on pysynyt lähes muuttumattomana (Luke 2015). Aikavälillä 1951-2013 suurimman ja pienimmän metsäpinta-alan ero on vain n. 2%.

Ilmastopaneeli



Kuva 1. a) Suomen metsien puuston (milj. m³) kehitys vuosina 1800-2008 (Palo ja Lehto 2012). Alkuperäin arvioissa on suurta epävarmuutta (Myllyntaus ym. 1988, Metsätilastollinen vuosikirja 2010), minkä vuoksi esitetään kolme erilaista skenaariota A-C **b)** Suomen metsien puuston vuosittainen kasvu ja poistuma (milj. m³ vuosi⁻¹) valtakunnan metsien inventointien ja muiden arvioiden mukaan vuosina 1900-2000 (Palo ja Lehto 2012). **c)** Puuston kehitys ja poistuma (milj. m³) vuosina 1920-2013 (Luke 2015). Poistuma sisältää hakkuukertymän lisäksi myös metsään jäävän hakkuutähteen ja runkopuun sekä luontaisesti kuolleen runkopuun.

Metsien hiilinielun arvioinnissa ovat mukana poistuman, metsämaan muutosten ja puuston kasvun lisäksi maaperän vaikutukset hiilitasemuutoksiin. Suomen metsien hiilinielun kehityksestä on tehty tarkempia arvioita vuodesta 1990 lähtien ilmastopaneelin (UNFCCC) inventaariolaskennan sääntöjen mukaisesti (Taulukko 1). Vaikka vuosisadan alun ja 1990 välisestä ajasta ei ole olemassa metsien nettopäästöstä tarkempia arvioita, voidaan kuvan 1c perusteella sanoa Suomen metsien olleen keskimäärin hyvin pieni hiilinielu ja välillä jopa lähde vuosien 1922 – 1972 välisenä aikana. Päästötasetilannetta on myös aikanaan heikentänyt sotien jälkeinen laajamittainen soiden ojitus, joka saavutti huippunsa vuonna 1969 (Sarkkola ym. 2009). Toisaalta soiden ojitus näkyy tänä päivänä kuitenkin metsien parempana kasvuna ja soiden metaanipäästöjen vähentymisenä.



Kuva 2. Suomen puuston tilavuuden kehitys 1922–2013 (Luke 2015).

Viimeisen 40 vuoden aikana metsien vuotuinen hiilinielu on ollut selvästi suurempi kuin vuosina 1922–1972.

Suomen ja useimpien teollisuusmaiden metsien hiilinielu on kasvanut viimeisimpien vuosikymmenien aikana (UNFCCC 2015). EU:ssa viimeisen 4-5 vuosikymmenen aikana nielut ovat olleet kasvussa. Euroopassa tilanne on kuitenkin ollut aikanaan toisenlainen kun metsät on raivattu aikanaan viljelykäyttöön, pääasiassa ennen 1700-lukua. Euroopassa metsät kääntyivät hiilinieluksi useissa maissa vuosina 1830–1910 maatalouden ja metsänhoidon kehittymisen, puun tuonnin, taloudellisen kehityksen ja mm. metsittämistä ja luonnonsuojelua ajavan politiikan seurauksena (Kauppi ym. 2006). Viime vuosina EU:ssa nielujen kasvussa on tapahtunut vähenemistä, mikä on tulkittu ensimmäisenä signaalina metsien nielun kyllästymisestä (Nabuurs ym. 2013).

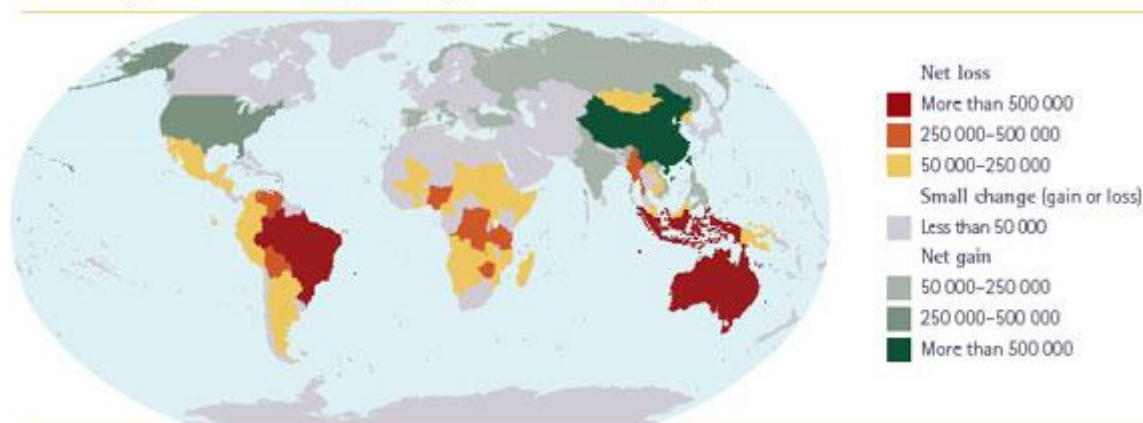
EU:n yhteenlaskettu hiilinielu on arvioitu olleen vuosina 1990–2012 keskimäärin noin 435 Mt CO₂ ekv/a. Tämä vastasi melkein 10 % EU:n kokonaispäästöstä vuonna 2010 (Nabuurs ym. 2015). Vuosina 2010–2013 Suomen metsien hiilinielu on ollut keskimäärin 34 miljoonaa tonnia CO₂ vuodessa kun maamme kasvihuonepäästöt ilman metsien hiilinielua ja muuta maankäyttösektoria ovat olleet 74–61 miljoonaa tonnia CO₂ –ekvivalenttia vuodessa (Tilastokeskus 2015a).

Yhdysvalloissa metsien raivaus peltokäyttöön ajoittui vuosille 1750–1920, jolloin metsistä aiheutuva hiilen vapautuminen ilmakehään kasvoi tasaisesti saavuttaen huippunsa noin 1920-luvulla (Miner ym. 2014). Tällöin hiilipäästön on arvioitu olleen 700 Tg C/a (=268 milj. t CO₂/a). Metsät muuttuivat kuitenkin hiilinieluksi jo noin 1955 ja nykyinen hiilitase on vakiintunut noin -200 TgC/a tasolle (Miner ym. 2015, ks. kuva 15). Myös Kiinassa metsien hiilitase on kehittynyt myönteisesti. Sen sijaan Kanadan metsät eivät toimi nykyisin hiilinieluinä vaan hiilen lähteenä ilmakehään (UNFCCC 2015). Tähän on syynä etenkin lisääntyneet hyönteistuhot, metsäpalot sekä uudistamisvelvoitteen voimaantulo vasta 1990-luvulla (Environment Canada 2015).

Taulukko 1. Suomen metsien CO₂-päästöt (positiiviset arvot) ja nielut (negatiiviset arvot) LULUCF-inventaarion mukaan (milj t CO₂ ekv) (Tilastokeskus 2015a).

	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013
Metsämaa yht.	-20,4	-19,6	-26,4	-37,8	-34,1	-32,9	-35	-26,4
Kasvibiomassa, miner.maat	-16,8	-10,7	-12,1	-23,1	-20,6	-19,3	-20,2	-12,9
Kasvibiomassa, org.maat	-11	-12,5	-15,1	-17,3	-15,5	-15,3	-15,5	-14
DOM+SOM2, miner.maat	-7,8	-9,6	-10,6	-8,2	-7,5	-7,5	-8,5	-8,4
DOM+SOM2, org.maat	12,6	10,6	8,9	8,5	7,4	7,2	7,2	6,8
Typpilannoitus	0,02	0	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01
Maastopalot ja kulotus	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Ojitetut metsämaat (CH4- ja N2O)	2,6	2,6	2,5	2,3	2,1	2,0	2,0	2,1
Puutuotteet	-4,3	-6,1	-8,2	-3,4	-3,9	-3,9	-3,4	-4,4

Net change in forest area by country, 2005–2010 (ha/year)



Kuva 3. Metsien pinta-alan nettomuutos, 2005-2010 (hehtaaria vuodessa) (FAO 2010).

Etenkin trooppiset metsät ovat toimineet viime vuosikymmeninä hiilen lähteenä (kuva 3). Hiilivarasto heikkenee pysyvästi, jos jokin toinen maankäyttö korvaa metsät. Troopikissa metsiä on hävitetty peltomaan ja karjan laiduntamisen tieltä. Metsämaan hävittäminen on edelleen merkittävä ongelma, vaikka onkin vähentynyt viime vuosina. Globaali metsäresurssien arviointi (FAO 2010) sai tulokseksi, että 2000 luvulla metsien hävitys oli vähentynyt 13 miljoonaan hehtaariin vuodessa kun se 1990 luvulla oli 16 miljoonaa hehtaaria vuodessa (kuva 3). Metsäkadon (deforestation and forest degradation) on arvioitu aiheuttavan nykyisin vähän alle 10 % ihmistoiminnan kasvihuonekaasupäästöistä (van der Werf ym. 2009, IPPC 2014).

2.3 Hiilinielujen tuleva kehitys

Suomen metsien kehityksen simulointiin on käytetty valtakunnan metsien inventointi (VMI) -aineistoa ja metsien kehitystä kuvaavia malleja (MELA, SIMA, EFISCEN). Metsäresurssimalleja ja inventointiaineistoa on myös yhdistetty puun käyttöä kuvaaviin taloudellisiin malleihin (SF-GTM, FinFEP). Tehtyjen tutkimusten ja skenaarioajojen valossa näyttää vahvasti siltä, että Suomen metsät säilyvät huomattavina hiilinieluinä seuraavien lähivuosikymmenten aikana (Ekholm ym. 2015, EFSOSII 2011, Kallio ym. 2013, Kallio ym. 2014, Kellomäki ym. 2008, Packalen ym. 2015, Sievänen ym. 2014, Verkerk ja Schelhaas 2015). Keskeinen selittävä tekijä on metsien ikäluokkarakenne, joka tulee lähivuosikymmeninä tukemaan metsien puustovolyymien kasvua. Lisäksi metsien kiihtyvää kasvua selittää joitakin vuosikymmeniä sitten tapahtunut metsäojitus, typpilaskeuma, kasvanut ilmakehän hiilidioksidipitoisuus ja osaksi kohonnut lämpötila.

Mallitarkastelujen viesti hakkuiden kasvun ja nielujen kehityksen suhteesta vaihtelevat suuresti riippuen esim. siitä, miten ilmastomuutoksen oletetaan vaikuttavan metsien kasvuun. MELA-malliin perustuva Low Carbon Finland -tarkastelu (Kallio ym. 2014) antaa viestin, että lähivuosikymmeninä Suomen metsien hiilinielu kasvaa merkittävästi, olettaen, että ilmastomuutos (SRES A1B mukainen muutos) lisää puuston kasvua huomattavasti, vaikka metsähakkeen käyttöä lisättäisiin energia- ja ilmastopoliittisen strategian linjausten mukaisesti 25 TWh:iin ja metsäteollisuuden kuitu- ja tukkipuun käyttö kasvaisi 20 %:lla. Toisaalta Ekholm ym. (2015) esittävät FinFEP-mallin skenaariolaskelmiin (Laturi ym. 2015) perustuen, että hakkuukertymän kasvaminen nykyisestä tasosta noin 15 %:lla vuoteen 2030 mennessä pitäisi metsien hiilinielun nykytasolla tai hieman pienentää sitä, kun ilmastomuutoksen kasvua lisäävä vaikutusta ei huomioida.

Metsiin kohdistuvien häiriöiden ennustetaan lisääntyvän ilmastomuutoksen seurauksena, mikä voi supistaa hiilinielua nykyisestä jo lyhyellä aikavälillä jos puunkäyttöä lisätään samalla voimakkaasti. Ilmastomuutoksen vaikutusta metsien kasvuun ja häiriöihin samanaikaisesti mallintavia tutkimuksia ei Suomessa ole juurikaan tehty. Lisäksi metsien hiilitaseen kehityksen arvioinnin suurimmat erot /epävarmuustekijät/ puutteet eri tutkimusten välillä liittyvät paitsi kysyntätekijöihin, myös kasvulosuhteiden muutosskenaarioihin (lämpötila, sadanta, typpilaskeuma, maan ravinnetase) ja näiden kasvuvasteisiin sekä maaperän hiilivaraston ympäristövasteisiin (Kalliokoski ja Repo 2015).

Metsien hakkuut vaikuttavat voimakkaasti hiilinielun suuruuteen. Mallitarkastelut osoittavat, että puun käytön lisääminen pienentää metsien hiilinielua ja metsien hiilivarastoa vähintään vuosikymmeniksi eteenpäin verrattuna tilanteeseen, jossa käyttöä ei lisätä (ks. kohta 4.1, kuva 12). Näin vaikka hiilinielu ja metsien hiilivarasto kasvaisikin.

Edellä esitetty merkitsee myös sitä, että Suomen hiilinielun kehittymisen kannalta on ollut ja on myös jatkossa olennaista tuontipuun määrä. Se on ollut vuosina 2000–2007 keskimäärin 27 % raakapuun määrästä. Viime vuosina se on ollut noin 15 % (Peltola 2014, Luke 2015).

Ilmastomuutoksen eräänä uhkakuvana on se, että metsämaan hajotustoiminta voimistuu kasvua nopeammin tulevaisuudessa ilmastomuutoksen edetessä. Tämän seurauksena metsämme voisivat muuttua tulevaisuudessa hiililähteeksi, jos globaalia kasviuonekaasupäästökäytystä ei pystytä rajoittamaan lähellekään kahden asteen tavoitteen edellyttämää tavoitepolkua (Wieder ym. 2005).

3. AIKAJÄNTEET JA TARKASTELUTASOT

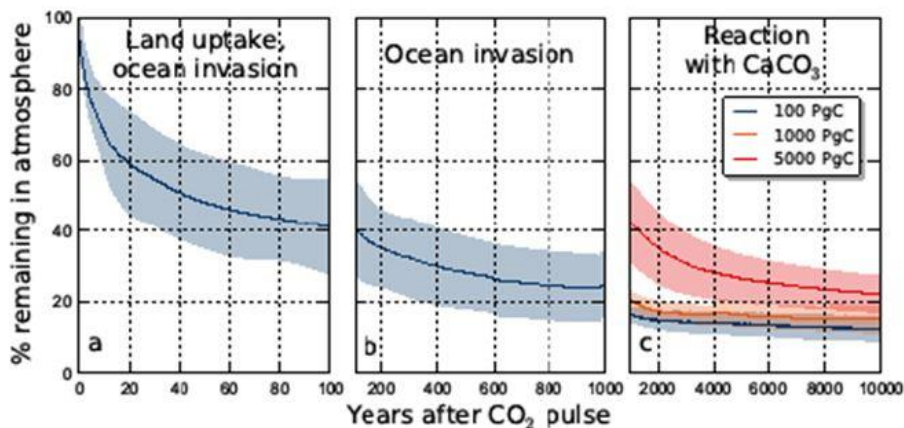
3.1 Ilmastopoliitiikka ja ilmastomuutos

Nykyisen kansainvälisen ilmastopoliitiikan lähtökohtana on rajoittaa maapallon keskilämpötilan nousu kahteen asteeseen. Tieteellisesti ei voida kuitenkaan osoittaa, että juuri kaksi astetta olisi ilmastomuutoksen hillinnän näkökulmasta selkeä kynnsarvo, jonka jälkeen ilmastomuutoksen aiheuttamat muutokset olisivat vasta vaarallisia (Victor ja Kennel 2014). Kyse on enemmän poliittisesta valinnasta tilanteessa, jossa lämpötila jatkaa joka tapauksessa kasvuaan jo aiheutettujen kasvihuonekaasupäästöjen seurauksena.

Erilaisilla kasvihuonekaasuilla on erilainen viipymä ilmakehässä (kuva 4) ja niillä on myös erilainen kyky estää auringon säteilystä peräisin olevan lämmön karkaamista takaisin avaruuteen. Kasvihuonekaasujen viipymä ilmakehässä yhdessä niiden absorptio-ominaisuuksien kanssa synnyttävät lämmittävän vaikutuksen, jota ilmaistaan suureella säteilypakote (joka ilmaistaan yksikössä W/m^2). Esimerkiksi hiilidioksidin päästöt poistuvat hitaasti ilmakehästä, mikä lisää sen aiheuttamaa säteilypakotetta suhteessa lyhytikäisiin kasvihuonekaasupäästöihin (esimerkiksi metaaniin) nähden.

Hiilidioksidipäästöt aiheuttavat nykyisin valtaosan ilmastoa lämmittävästä säteilypakotteesta, joka aiheutuu suoraan ihmistoimista (IPCC 2014). Etupäässä fossiilisten polttoaineiden kautta tapahtunut hiilidioksidipäästö on häirinnyt hiilenkiertoa luonnossa siten, että ilmakehään on alkanut kerääntyä ylimäärä hiilidioksidia esiteolliseen tilanteeseen nähden. Vastaavasti ilmakehän muidenkin kasvihuonekaasujen pitoisuudet ovat kasvaneet ilmakehässä. Kasvihuonekaasujen lämmittävä vaikutus jatkuu jopa vuosituhansia vaikka niiden ihmisperäiset päästöt saataisiin estettyä nyt.

Nykytilanteessa ilmastomuutoksen hillintä vaatii lyhyellä aikavälillä ilmakehään joutuvien kasvihuonekaasupäästöjen nopeaa rajoittamista, jotta kasvihuonekaasupäästöjen pitoisuudet ilmakehässä eivät nouse liian korkeiksi ja aiheuta yli kahden asteen lämpötilan nousua maapallolla (IPCC 2014). Tämä tilanne painottaa lähiajan päästöjen rajoittamisen tarvetta.

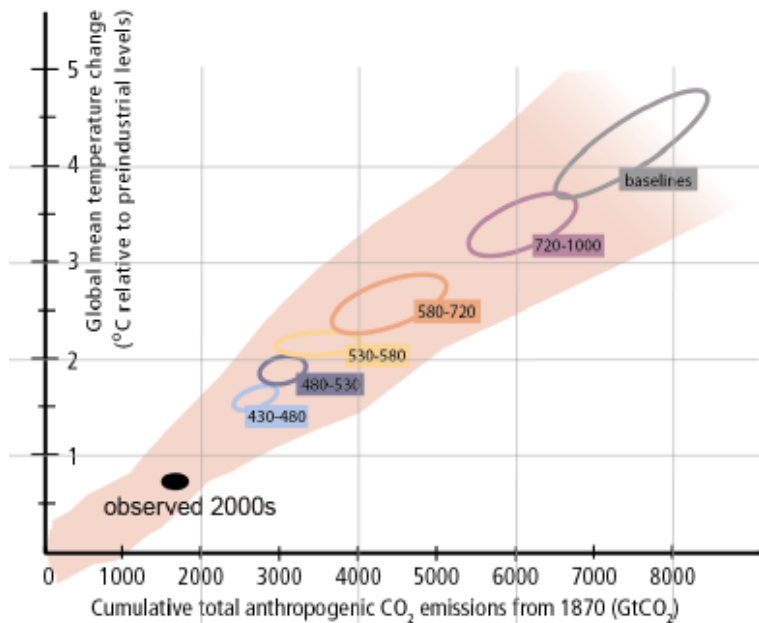


Kuva 4. a) ja b) Ajanhetkellä 0 tapahtuvan hiilidioksidipäästöpulssin (100 PgC) aiheuttaman ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden prosentuaalinen väheneminen ilmakehässä ajan suhteen. **c)** Ilmakehän hiilidioksidipitoisuuksien prosentuaalinen väheneminen 100, 1000 ja 5000 PgC:n päästöpulssien tapauksessa (IPCC 2013). Kuvat kuvaavat alkuperältään minkä tahansa (sekä fossiilisten ja biopohjaisten) hiilidioksidipäästöjen vaikutuksia ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kehittymiseen.

Ilmastopaneeli

IPCC (2014) on raportissaan ottanut huomioon, että kasvihuonekaasupäästöt tulevat ylittämään RCP 2.6 -polun esittämän päästöjen tavoiteuran. Maapallon lämpötilan pitäminen kahden asteen rajoissa on kuitenkin edelleen mahdollista, jos päästöjä vähennetään nopeammin tällaisen ylityksen jälkeen kuin mitä RCP 2.6-polku osoittaa. IPCC:n raportissa puhutaan ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden ns. overshoot-tilanteesta, jolloin ilmakehän hiilidioksidipitoisuus ylittää hetkellisesti kriittisenä pidetyn tason. Näiden "salliminen" perustuu osittain käsitykseen siitä, että lyhytaikainen päästökehitys ei ole kriittistä ilmaston lämpenemisen kannalta vaan olennaista on kumulatiivinen päästökehitys. Lisäksi tässä ajattelussa oletetaan, ettei peruuttamattomia luonnon itsensä käynnistämiä päästöprosesseja pääse tapahtumaan (vrt. ikiroudan sulaminen Schuur ym. 2015). Muun muassa Meinshausen ym. (2009) ja IPCC:n raportti (IPCC 2013) ovat painottaneet kumulatiivisen CO₂ päästön ja lämpötilan nousun voimakasta riippuvuutta (kuva 6).

IPCC:n arviointiraportin ilmastomuutoksen hillinnän strategiassa (IPCC 2014) on selvästi painotettu fossiilisten polttoaineiden päästöjen nopeaa vähentämistä. Metsäbiomassojen käytöstä vapautuneen hiilidioksidin päästökäsittelyn lähtökohtana on ollut, että ilmakehään vapautunut hiilidioksidi palautuu takaisin suhteellisen nopeasi metsän hiilenkiertoon. Metsien hyödyntämisestä vapautuvan hiilidioksidilla ei ole katsottu olevan vaikutusta ilmastomuutoksen kehittymiseen, jos metsä säilyy metsänä eikä metsämaan tuotantokyky heikkene olennaisesti puubiomassan hyödyntämisen jälkeenkin. Maailmanlaajuisissa tarkasteluissa huomattava osa biomassasta on kuitenkin melko lyhytkiertoista puuta tai maatalouden sivutuotteita tai tähteitä (IPCC 2011). Fossiilisten polttoaineiden osalta tilanne on toinen (ks. kohta 4.1). Puun hyödyntämisestä vapautunut hiilidioksidi poistuu ilmakehästä puun kiertoajan puitteissa takaisin puustoon hiilenä, ja viiveestä (hiilivelka) huolimatta tämä nähdään osana fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämisstrategiaa. Metsien ilmastomuutoksen hillinnän strategia kohdistuu metsäkadon pysäyttämiseen.



Kuva 6. Globaalin keskilämpötilan muutoksen ja vuodesta 1870 ihmistoiminnasta peräisin olevan kumulatiivisen hiilidioksidipäästön välinen yhteys (IPCC 2013). Keskilämpötilan muutos on lähes suoraan verrannollinen ajan myötä ilmakehään päästettyyn hiilidioksidin määrään.

3.2 Metsiin kohdistuvat toimenpiteet

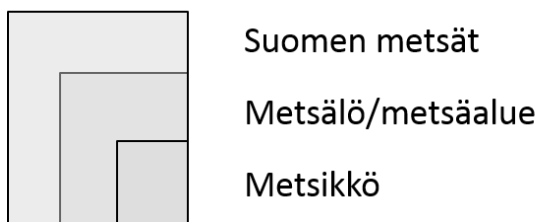
Suomen metsiin kohdistuvien toimenpiteiden vaikutukset esimerkiksi metsien hiilivaraston määrään voivat kohdistua yhteen metsikköön, yhden metsänomistajan metsälöön, laajaan metsäalueeseen tai kaikkiin Suomen metsiin (kuva 7).

Metsikkö on käytännön metsätalouden perusyksikkö. Metsänhoidon toimenpiteet ja hakkuut suunnitellaan yleensä metsiköittäin käyttäen joko tasaikäisrakennetta ja harvennus- ja uudistushakkuuta tai eri-ikäisrakennetta ja poimintahakkuuta. Suomessa metsiköitä kuvataan yleensä puulajin ja metsänhoitotavan yhdistelmällä, esim. istutuskoivikko jne.

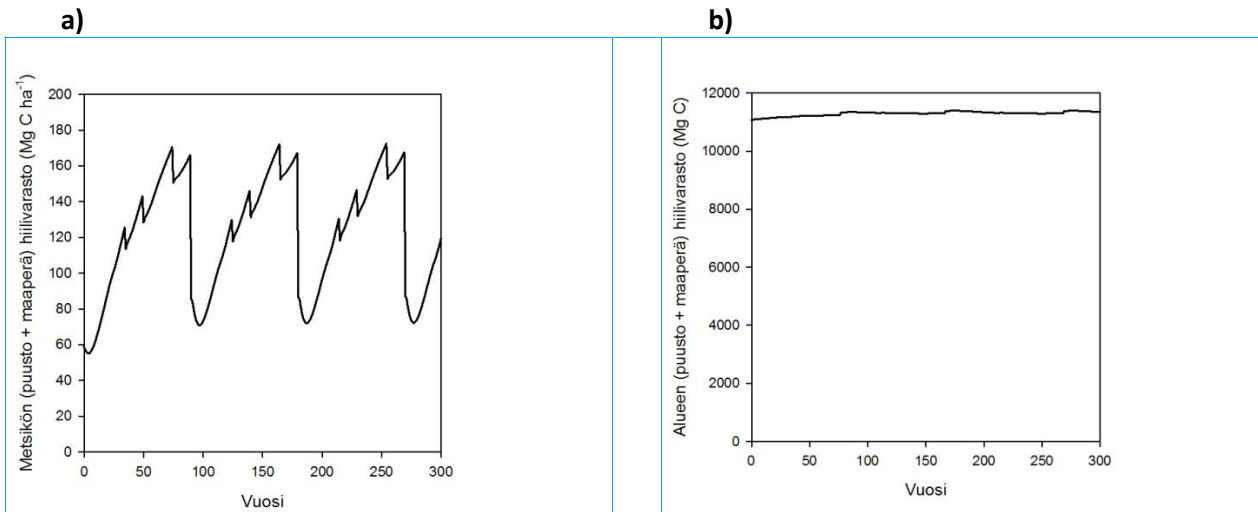
Metsälö on maanomistajan omistama metsäalue, joka koostuu yhdestä tai useammasta metsiköstä. Suomessa, metsätalouden suunnittelu on perinteisesti tehty metsälötasolla, missä maanomistajan tavoitteiden pohjalta määritellään metsätalouden toimenpiteet (hakkuut, metsänhoitotoimet, suojelu jne.) ja niiden kohdistuminen eri metsiköihin suunnittelukauden aikana.

Tarkasteltaessa metsien sisältämän hiilivaraston muutoksia saadaan hyvin erilainen kuva riippuen siitä, onko tuo tarkastelu tehty yhdessä metsikössä vai koko metsälössä (tai laajalla metsäalueella) (kuva 8). Metsikkökohtaisessa tarkastelussa metsikön hiilivaraston määrä vaihtelee suuresti säännöllisistä, suuren osaan metsikköä kohdistuvista hakkuista johtuen. Metsälö- ja aluetarkastelussa metsäalueen hiilimäärä kasvaa sitä mukaa kun uusia metsiköitä perustetaan kunnes alue on ”täynnä” eri-ikäisiä metsiköitä ja joissa vuosittaiset hakkuut eivät näy, koska ne kohdistuvat vain 1/90-osaan koko metsälöstä.

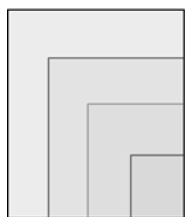
Kun tarkastellaan metsien hiilivarastojen ja nielujen ilmastovaikutuksia ilmastopolitiikan ja yhteiskunnan kannalta, tulee ottaa huomioon seuraavat toimenpiteiden mittakaavat (kuva 9): metsien käsittely (metsänomistajan toimet), Suomen metsien kehittyminen (puun käyttö, ilmastomuutoksen vaikutukset jne.), metsien yhteiskunnallinen merkitys Suomessa, ja kansainvälisen ilmastosopimuksen sekä EU:n ohjauskeinojen vaikutukset.



Kuva 7. Suomen metsiin kohdistuvien toimenpiteiden vaikutusten mittakaavat



Kuva 8. a) Metsikön puuston ja maaperän hiilivaraston (Mg C ha^{-1}) kehitys suomalaisessa männikössä, jossa kiertoaika on 90 vuotta ja jossa suoritetaan kolme harvennushakkuuta 35, 50, ja 75 vuoden iässä. **b)** Metsäalueen puuston ja maaperän hiilivaraston (Mg C ha^{-1}) kehitys alueella (metsälössä), joka koostuu 90:stä kuvassa (a) kuvatuista männiköistä, joita perustetaan yhtä suuret alat vuosittain ja hakataan kuvassa (a) esitetyllä tavalla. Simulointi on tehty CO2FIX-mallilla (Maserà ym. 2003) ja lähtöaineistona on käytetty Koivisto (1959) ja Marklund (1988).



Metsät ilmastopimuksessa, EUn ohjaus
Suomi – metsien yhteiskunnallinen merkitys
Suomen metsät – hakkuut, puun käyttö, ilmastonmuutos
Metsien käsittely – metsänomistajan toimenpiteet

Kuva 9. Metsä- ja ilmastopoliittikan mittakaavat suhteessa metsien hiilivaraston ja nielujen ilmastovaikutuksiin.

*Metsien käsittelyn mittakaavassa *) on huomattava mm. seuraavat seikat:*

- Metsien käsittelyn vaikutus metsikön hiilitaseeseen
 - Hakkuumenetelmät (uudistushakkuut, jatkuva kasvatus jne.)
 - Metsänomistajien käyttäytyminen
 - Puulajivalinnat
 - Puunkorjuu
 - Metsäenergian korjuun vaikutukset
- Metsien käsittelyn muut ilmastoon vaikuttavat tekijät (albedo, aerosolit)
- Metsien käsittelyn muut ympäristövaikutukset (luonnon monimuotoisuus, eroosio, maaperän ravinnevarat jne.)
- Häiriöt

On huomattava, että poliittinen ohjaus kohdistuu metsänhoidon päätöksentekotasolle, vaikka politiikan valinta tehdään kansallisella ja kansainvälisellä tasolla ja hiilitaseen kehityksen arviointi kansallisella tasolla.

Suomen metsien mittakaavassa on huomattava mm. seuraavat seikat:

- Puun käytön skenaariot (puun ja tuotteiden hinta jne.)
- Puun käytön tason vaikutus Suomen metsien hiilitaseeseen
- Puun käytön tason vaikutus metsien valon heijastukseen (albedo) ja ilmakehän pienhiukkasten (aerosolien) muodostukseen
- Ilmastonmuutoksen vaikutus Suomen metsien ekologiaan (kasvu, poistuma, häiriöt jne.)

Metsien yhteiskunnallisen merkityksen mittakaavassa on huomattava mm. seuraavat seikat:

- Ilmastopoliitiikka
- Metsät strategisena luonnonvarana – biotalouden tavoitteet ja haasteet
- Bioenergian käyttö ja sen vaikutukset
- Metsien hyödyntämisen potentiaali (suojelutarpeet jne.)
- Metsänomistajien puunmyynti- ja suojeluhaluus
- Työllisyyspolitiikka
- Energiapolitiikka

Kansainvälisten asioiden mittakaavassa on huomattava mm. seuraavat seikat:

- Metsät osana kansainvälistä ilmastositimusta – asettaa raamit Suomen toimille
- Metsät osana Suomen ilmastotavoitteita
- EU:n säätely (bioenergia jne.)

Metsä – ja ilmastopoliittikan keskeiset aikajänteet voidaan jakaa seuraavasti: lyhyt, keskipitkä, ja pitkä.

Lyhyt aikajänne (10–30 vuotta)

- Poliittikkatoimien aikajänne, esimerkiksi
 - Kansainväliset tavoitteet päästöistä vuoteen 2050
 - EU:n ilmastotavoitteet vuodelle 2030
- Metsien hakkuu- ja hoitotoimenpiteiden ilmastovaikutukset näkyvät (kasvihuonekaasut, albedo, aerosolit)
- Tällä aikajänteellä meillä on käytettävissä suhteellisen luotettavat arviot Suomen metsien hiilivaraston ja nielun kehittämisestä.

Keskipitkä aikajänne (50–100 vuotta)

- Puiden ja metsien ekologinen aikajänne
- Puun käytön muutosten vaikutukset näkyvät tällä aikajänteellä
- Ilmastonmuutoksen vaikutukset alkavat näkyä metsien kasvussa
- Metsien muutoksen vaikutus ilmastoon (kasvihuonekaasut, albedo, aerosolit)

Pitkä aikajänne(100+ vuotta)

- Ilmastonmuutoksen pitkäaikaisvaikutusten aikajänne - selkeät muutokset
- Monien mallien ja skenaarioiden epävarmuus on suurta tällä aikajänteellä

4. METSIEN KÄYTÖN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖJEN ILMASTOVAIKUTUKSET

4.1 Metsien hiilitaseen muutokset ja ilmastovaikutukset

Lähtökohdat

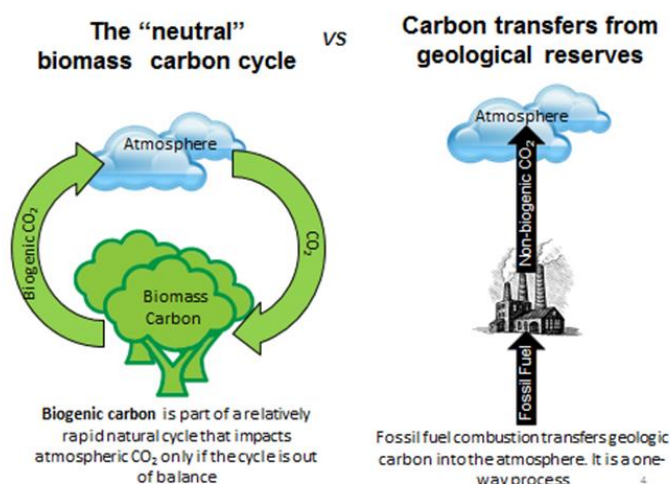
Metsien käyttöön liittyvän ilmastovaikutuskeskusteluun liitetään usein oletus metsäbiomassan hiilineutraalisuudesta, minkä on omiaan luoma mielikuvaa puun käytön myönteisistä ilmastovaikutuksista. Ongelmana on kuitenkin, että hiilineutraalisuustermiä on käytetty eri yhteyksissä hieman eri tavalla ja yleiskielessä sillä tarkoitetaan jopa sitä, ettei toiminto aiheuta ilmastovaikutuksia. Ilmastopaneeli (Seppälä ym. 2014) pyrki määrittelemään hiilineutraalisuuden siten, että määritelmä olisi linjassa kansainvälisen käytännön kanssa: ”hiilineutraalisuus on tila, jossa ihmistoiminnan aiheuttamien kasvihuonekaasujen nettopäästöt hiilidioksidiekvivalenteina ovat nolla määrättyllä ajanjaksolla”.

Edellä esitetty määritelmä sopii hyvin erilaisten yritysten, alueiden ja kaupunkien pyrkiessä hiilineutraaleiksi. Tällöin ajanjaksona on yleensä vuosi, jona aikana päästötaseen tulee olla nolla. Metsien näkökulmasta hiilineutraalisuuskäsite rajautuu käytännössä hiilenkiertoon (esim. Matthews ym. 2015) ja siihen liittyy muutenkin erityspiirteitä, minkä takia termiä on käytetty hieman eri tavoin metsien hyödyntämisen yhteydessä tarkastelukohteen laajuudesta, mukaan otettavista kasvihuonekaasuista, puutuotteiden korvaushyödyistä, vertailutilanteista ja aikajänteestä riippuen.

Yleisesti metsäbiomassasta ilmakehään vapautuneen hiilen on katsottu olevan hiilineutraalia, sillä metsäbiomassan hiili on osa suhteellisen nopeaa luonnon hiilenkiertoa. Sillä on katsottu olevan vaikutusta ilmakehän CO₂ -pitoisuuteen vain jos hiilenkierto ei enää ole tasapainossa metsämaan kanssa (esim. Lucier ja Miner 2010). Käytännössä tasapaino järkkyy jos metsämaa tuhotaan eikä kerran otettu puusto voi enää kasvaa uudestaan samalle paikalle. Vaikka ilmakehään vapautuneesta fossiilista alkuperää olevasta hiilestä sitoutuu tällä hetkellä globaalisti noin 1/4 erityisesti metsiin, eli lyhytaikaiseen hiilenkiertoon (kuva 10, fossiilisperäinen hiilidioksidipäästö tulee biosfääriin (kasvillisuus ja meret) ulkopuolelta ja kasvattaa vuosituhansien ajaksi ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta, koska biosfääriin kyky sitoa hiiltä on rajallinen.

Edellä esitetty yleisesti käytetty hiilineutraaliuden tulkinta liittyy vain metsien hiilitaseeseen ja sen muutokseen kytkeytyvään ilmastovaikutukseen. Tulkinta luo perustan sille, että metsäraaka-aine on pitkällä aikavälillä hiilineutraalia jos hakkuualue säilyy metsämaana ja sen alkuperäinen hiilivarasto puustoineen ja maaperineen palautuu lähtötilanteeseen. Metsien käsittelyn elinkaaristen kasvihuonekaasupäästöjen sekä metsien muiden ilmastovaikutusten (albedo ja aerosolit) muutoksia (ks. kohta 6) ei tällöin tämän hiilineutraaliustulkinnan yhteydessä huomioida. Metsäraaka-aineen hiilineutraalius ei siis tarkoita siitä sitä ettei metsäraaka-aineen hyödyntämisellä olisi negatiivisia tai positiivisia ilmastovaikutuksia.

Eri maiden kansallisesta näkökulmasta metsien käytön hiilitase näyttäytyy eritavalla kuin globaalisti. Maatasolla metsien kasvihuonekaasupäästötasetta pystytään arvioimaan vuositasolla kasvihuoneinventaarion metsäosion tulosten avulla (vrt. kohta 2.2). Tietyn valtion metsien hyödyntäminen ei ole edellä esitetyn tulkinnan mukaisesti hiilineutraalia, jos metsien hiilinielua ei ole, eli metsistä vapautuu enemmän hiiltä päästöinä kuin se sitoo hiiltä.



Kuva 10. Biogeneettisen ja fossiilisista hiilivarannoista vapautuvan hiilidioksidien kierron erot (Lucier ja Miner 2010).

Edellä esitetty hiilineutraalisuuden tulkinta, jonka mukaan metsistä hyödynnettävä biomassa on hiilineutraalia, jos hiilinielu pysyy samansuuruisena tai kasvaa, on saanut maailman kestäväen kehityksen yritysjärjestön tuen (WBSCD 2015). Lähtökohtana tälle tulkinnalle on siis se, että metsien hiilitaseen kehitystä seurataan jollain suuralueella, kuten valtioiden tasolla ja samalla hyväksytään jokin aikaan sidottu vertailutilanne, johon liittyen muutosta seurataan. Näin esimerkiksi Suomen metsistä hyödynnettävä biomassa on hiilineutraalia, koska metsiemme hiilinielu on suurempi kuin vuonna 1990 ja sen oletetaan jopa kasvavan lähitulevaisuudessa vaikka käyttö näyttäisi kasvavan nykyisestä jonkin verran. Koska Suomen metsät sitovat enemmän hiilidioksidia kuin päästävät, Suomen metsät kokonaisuudessaan vaikuttavat ilmastoa viilentävästi eli ilmastovaikutus on selvästi positiivinen.

Nykyinen YK:n ilmastopimus on omalta osaltaan vahvistanut hiilineutraalisuuden käsitteen kytkemistä hiilinielujen säilyttämiseen. Energiaperäisten kasviuonekaasupäästöjen vähentämistavoitteet on sidottu vuoden 1990 päästötasoon. Myös maankäyttösektorin (LULUCF) päästöinventarioiden seurantavuosi alkaa vuodesta 1990 ja nykyisen ilmastomuutosopimuksen puitteissa kehittyneiden maiden metsänielujen säilyttämisvelvoite on sidottu käytännössä samaan vuoteen.

Edellä esitetty hiilineutraalisuuden tulkinta on ollut käytännössä laajasti käytössä, mikä on luonut myös yleisen käsityksen metsien hyödyntämisen asemalle ilmastomuutoksen hillinnässä. Viimeaikainen tutkimus on kuitenkin kyseenalaistanut termin perinteisen käytön, koska se ei ota huomioon metsien hiilensidontapotentiaalia ja siihen liittyviä aikajännekymsyksiä, joilla on merkitystä arvioitaessa metsien roolia ilmastomuutoksen hillinnässä. Asiaa selvennetään seuraavissa luvuissa.

Metsien hiilitaseen kehityksen ja sen ilmastovaikutusten arvioinnista

Yksittäisen metsän käsittelytoimenpiteen vaikutus alueen hiilitaseeseen ja hiilineutraalisuuteen näyttäytyy omana kokonaisuutena ja eroaa siitä kuinka asiat näyttäytyvät valtakunnan tasolla. Metsäraaka-aineeseen pohjautuvan biomassan hiilitaseen muutosten arvioinnin lähtökohtana voidaan käyttää yksittäisen puun tai erilaisten puiden muodostavan metsikön hiilenkiertoa. Yksinkertaisimmillaan puu tai metsikkö kaadetaan siihen liittyvän kiertoaajan puitteissa. Todellisuudessa metsikön kiertoaikaan

liittyy usein harvennushakkuita Suomessa. Lisäksi metsämaan kasvuolosuhteissa tapahtuu ajan suhteen muutoksia. Nämä seikat monimutkaistavat biogeneettisen hiilen kierron käsittelyä, mutta seuraavassa hiilineutraalisuuden tarkastelua lähdetään purkamaan pelkistetyn ”puut kaadetaan – kasvavat – kaadetaan” – ajattelumallin kautta.

Metsikön hakkuiden seurauksena metsikköön syntyy hiilivelka. Kun poistuma korvaantuu uudella kasvulla, hiilineutraalisuus toteutuu metsikkötasolla tietyllä aikaviiveellä. Puun uudelleenkasvun kiertoaika vaihtelee puulajin, maantieteellisen sijainnin ja kasvuolosuhteiden perusteella suuresti. Esimerkiksi Eucalyptus- plantaasissa se on 10-11 vuotta kun se Etelä-Lapin männyllä on yli 100 vuotta. Yksinkertaisesti ajateltuna Eucalyptus-pohjainen bioenergia on hiilineutraali 10-11 vuodessa ja Etelä-Lapin mäntyyn perustuva bioenergia yli 100 vuodessa. Todellisuudessa sama määrä hiiltä voi kerääntyä lähtötilanteeseen verrattuna ennen tai jälkeen kiertoajan, koska maaperän nettohiilivarasto voi joko vähentyä tai kasvaa puiden kasvukierron aikana. Metsikön hiilitase muodostuu kasvavaan biomassaan sitoutuneen ja maaperän hiilivaraston (ml. kariketuotannon vaikutukset) muutosten kautta.

Edellä esitetty ajattelutapa lähtee yksinkertaisesti siitä, että metsän hiilineutraalisuus saavutetaan kun hakkuiden kautta synnytetty hiilivaje metsästä korvautuu lisäkasvulla. Tällöin metsikön vertailu- eli referenssitilanteeksi, johon muutosta arvioidaan, hyväksytään metsän hiilitasetilanne ennen hakkuita. Tämä ns. lähtötilanteen palautuvuuteen perustuva vertailutilanne on kuitenkin vain yksi tapa määritellä referenssitilanne.

Yleisellä tasolla metsän hakkuu- ja käyttötoimenpiteiden vaikutus metsän hiilitaseen kehittymiseen voidaan arvioida seuraavalla yhtälöllä

$$\Delta C = C_u - C_r \quad (1)$$

missä ΔC on metsän nettohiilitaseen muutos valittuun referenssitilanteeseen nähden aikajänteellä t_1-t_0 , C_u on metsän kumulatiivinen hiilikertymä puun hakkuu- ja käyttöskenaarion mukaan ja C_r on hiilikertymä referenssiskenaarion perusteella. Lähtökohtana on siis se, että alueelta poistetun metsäbiomassan (poistuman) ilmakehään vapautunut hiilimäärä vähennetään C_u taseesta. Valittu puun käyttöskenaario (esim. puolet puusta ohjautuu puurakennustuotteisiin) vaikuttaa lopputulokseen, kun puutuotteiden hiilen varastointi otetaan huomioon (esim. Kilpeläinen ym. 2013). Puutuotteissa säilynyt hiili vaikuttaa näin positiivisesti hiilivajeen korjaantumiseen metsässä. Sen sijaan polttoon menevän biomassan hiili häviää heti C_u :sta.

Metsän hiilivaje tarkoittaa sitä, että metsästä poistunut hiili on joko tuotteissa tai hiilidioksidina ilmassa. Mitä suurempi päästö on ja mitä kauemmin metsän hiilivaje näyttäytyy hiilidioksidipäästönä ilmakehässä, sitä suurempi on synnytetty säteilypakote eli negatiivinen ilmastovaikutus. Ilmastovaikutuksen suuruuteen vaikuttaa olennaisesti valittu vertailutilanne, johon metsän hiilitaseen kehitystä verrataan.

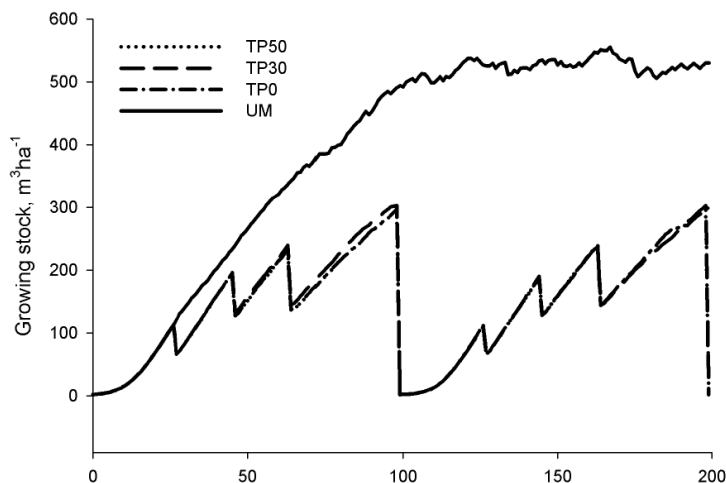
Ilmastopaneelin aikanaan määrittelemän (Seppälä ym. 2014) hiilineutraalisuuskäsitteen lähtökohtana on ihmistoiminnan vaikutuksen arviointi hiilitaseen muodostumiseen. Tämä on arvioitavissa, jos yhtälössä (1) C_r on metsän hiilitaseen kehitysura tarkasteluhetkestä t_0 ajankohtaan t_1 ilman ihmistoimia ja sitä verrataan puun hakkuu- ja käyttöskenaarioon C_u . Jos tällöin ΔC on suurempi kuin 0 tietyllä aikavälillä t_1-t_0 , niin hiilineutraalisuus toteutuu ko. aikavälillä. Tässä laskennassa suuri epävarmuuden lähde on metsän hiilitaseen laskenta ilman hakkuutoimia, koska luonnontilaisten metsien kehitysdynamiikan kuvaus on haastavaa prosessimalleilla ja yksinkertaisemmat mallit perustuvat pääasiassa käsiteltyjen metsien mittauksiin.

Se, että valitaanko vertailutilanteeksi hakkuita edeltävä tilanne vai metsän hiilitaseen kehitys ilman hakkuutoimia, vaikuttaa laskelmien lopputulokseen merkittävästi (kuva 11). Vertailutilanne, jossa

tarkasteltavaa puun käyttöä ei ole, vastaa paremmin tarpeeseen kun arvioidaan ihmisten erilaisia toimia ilmastoon jatkossa (esim. Helin ym. 2013, Soimakallio ym. 2015). Tämä on myös IPPC:n esittämä suositus (Smith ym. 2014). Ensin mainittu vertailutilanne on enemmän poliittinen valinta sille, että metsien hiilivarasto halutaan säilyttää jollakin tasolla. Tämä on ollut käytännössä myös kansainvälisen ilmastopaneelin lähtökohdaksi kehittyneille maille.

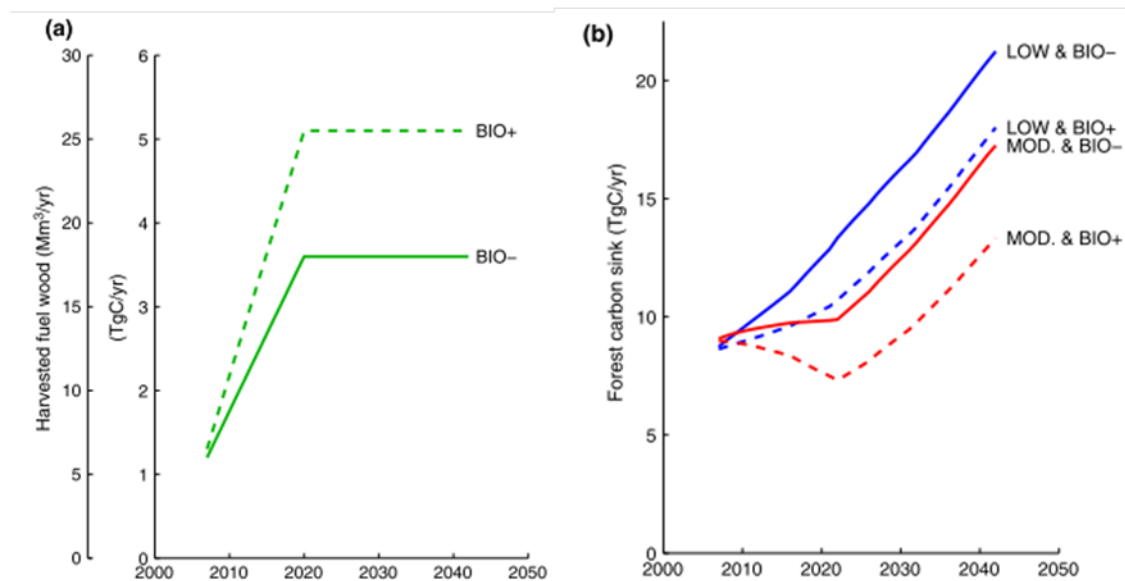
Yhtälön (1) käyttöä on lähestytty edellä metsikkötason tarkasteluilla, jotka auttavat hahmottamaan yksittäisen toimen ilmastovaikutuksia metsikkötasolla. Tilanne kuitenkin näyttäytyy erilaisena, jos tarkastelun lähtökohdaksi otetaan laaja maantieteellinen alue, jossa on hakkuukierron eri vaiheissa olevia metsikköjä (ks. kuva 8). Tällöin hiilivelkaa koko alueen tasolla ei välttämättä havaita, jos käytetään vertailutilanteena alueen hiilitasetta ennen hakkuuta (ks. kuva 8b).

Käytännössä laajojen maantieteellisten alueiden ja valtion tasolla tehtävät metsien hiilitaseen kehityksen arviointi tehdään myös yhtälöllä 1. Tällöin mielekkäänä lähtökohdaksi on arvioida metsien raaka-aineen käyttötason muutoksen vaikutusta hiilivarastoon alueella (esim. Ros ym. 2013, Matthews ym. 2015). Siinä seurataan hakkuukiertojen suhteen eri vaiheissa olevia metsikköitä ja niiden hiilivaraston muutosta metsien eri hakkuuskenaarioiden välillä. Yksittäisen hakkuutapahtuman hiilivelan seurannan sijasta katsotaan jatkuvan hakkuutoiminnan aiheuttamaan muutosta, jonka seurauksena haluttu uusi metsän hyödyntämistaso saavutetaan. Tämä on ns. vertaileva vertailutilanne (ks. seuraava kohta ja Ohrel 2012), joka on poliittisen päätöksenteon kannalta relevantti tarkastelutapa.



Kuva 11. Periaatteellinen kuva eri vertailutilanteiden valinnan vaikutuksesta metsän hiilitaseen kehitysarvioinnissa. Kuva hahmottaa metsän puuston hiilivaraston kehityksen 200 vuoden aikana kun metsässä tehdään kaksi päätehakkuuta 100 ja 200 vuoden kohdalla sekä harvennushakkuut näiden välillä (kuvan alemmat käyrät; TP50, TP30 ja TP0 kuvaavat erilaisia puun hakkuu- ja käyttöskenaariota, joiden välillä vain pieniä eroja). Ylempi viiva (UM) kuvaa SIMA-mallin simulaation miten metsän puuston hiilivarasto kehittyisi ilman hakkuuta. Ylemmän ja alempien viivojen välinen alue kertoo puuston hiilivaraston menetyksen. Jos yhtälön 1 arvioinnissa otetaan vertailutilanteeksi ajanhetki 0 ja päätehakkuuta edeltävä puuston hiilivarasto (vajaa $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) niin metsäraaka-aineen hiilineutraalisuus toteutuisi 100 vuoden aikana vaikka kaikki hakattu puu poltettaisiin ja kun metsämaan hiilitasemuutoksia ei oteta huomioon. Jos vertailutilanteeksi asetetaan metsän kehitys ilman hakkuutoimia (ylempi kuva), metsäbiomassan hiilivelaksi tulee metsämaan hiilivaraston pienenemisen ja metsästä hyötykäyttöön johdetun puumassan erotus. Metsämaan hiilitaseen muutosten mukaanotto muuttaa edellä esitettyä vertailua (ks. Kellomäki ym. 2013). Kuva on Kilpeläisen ym. (2013) julkaisusta.

Jos tavoitteena on tarkastella puunkäyttötason muutoksen ilmastovaikutuksia, yhtälössä 1 C_r voi olla esimerkiksi nykyisen metsänkäsittelysuositusten mukainen puun hakkuuskenaario käyttötarpeineen ja C_u uusi skenaario. Tämänkaltaisia tarkasteluja on tehty niin kotimaassa kuin ulkomailla (ks. luku 4.2). Muun muassa kuvan 12 käyttötason muutoksen tarkastelussa metsän lisäkäyttö näyttää johtavan ainakin lyhyellä aikavälillä pysyvään hiilinielun pienenemiseen Suomessa. Tällöin kriittinen kysymys on se, että mitä ilmastohyötyjä näiden skenaarioiden välisellä metsäbiomassapoistumalla saadaan aikaiseksi menetettyyn tai kasvatettuun metsän hiilinieluun verrattuna ko. tarkasteluvälillä. Tällöin käyttöskenaarioiden merkitys korostuu. Mitä paremmin puutuotteilla tai -energialla pystytään korvaamaan muutoin päästöjä aiheuttavaa toimintaa, sitä nopeammin käsittelyllä synnytetty biomassan ”hiilivaje” metsässä pystytään paikkaamaan.



Kuva 12. a) Metsäenergiaskenaariot BIO- ja BIO+, ja b) hiilinielun kehitys Suomen metsissä neljässä eri puun käyttöskenaariossa (Pingoud ym. 2015). BIO+ vastaa Suomen energia- ja ilmastostrategian (Työ- ja elinkeinoministeriö 2103) mukaista bioenergian linjausta. Skenaariot ja tulokset ovat peräisin julkaisuista Asikainen ym. (2012) ja Sievänen ym. (2014).

BIO - = energiapuun määrä muuttuu 7 milj. Mm³/vuosi (2007) ->18 milj. Mm³/vuosi (2020)

BIO+ = energiapuun määrä muuttuu 7 milj. Mm³/vuosi (2007) -> 25,5 milj. Mm³/vuosi (2020)

LOW = raakapuun käyttö vähenee nykyisestä noin 50 milj. Mm³/vuosi (2007)-> 43,9 milj. Mm³/vuosi (2020)

MOD = raakapuun käyttö kasvaa hieman, 50 Mm³/vuosi(2007) -> 56,6 milj. Mm³/vuosi (2020).

4.2 Puutuotteiden ja metsäenergian ilmastovaikutukset

Hakkuiden synnyttämän metsän hiilivajeen palautumisnopeus, joka muodostuu metsien kasvusta ja tuotteiden hiilen varastointiajasta, luo perustan ihmistoimenpiteiden ja biomassan hyödyntämisen ilmastovaikutusten tarkasteluille. Puutuotteiden ja metsäenergian ilmastovaikutusten arvioinnissa tulee ottaa huomioon myös niistä saadut korvaushyödyt kun niillä korvataan kasvihuonekaasupäästöiltään suurempia vaihtoehtoisia tuotteita ja energioita.

Puutuotteiden ja metsäenergian käyttö vaativat erilaisia vaiheita toteutuakseen. Näitä ovat muun muassa metsän hoitotoimenpiteet, puun korjuu, tuotteiden valmistus, jakelu ja käyttö. Kussakin vaiheessa käytetään fossiilisia polttoaineita, minkä takia puutuotteiden ja metsäenergian hiilineutraalisuustarkasteluissa nämä elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt tulee lisätä korjuu- ja käyttökenaarion C_u -päästöiksi yhtälössä 1 kun katsotaan erilaisten ratkaisujen ilmastovaikutusten paremmuutta. Vastaavasti puulla korvattavien tuotteiden elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt tulee arvioida. Vertailutilanteessa nämä kilpailevien tuotteiden päästöt lisätään referenssitilanteen päästöiksi. Puutuotteiden ja metsäenergian käytön mielekkyyttä kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä voidaan siten arvioida yhtälöllä 1. Tällöin C korvataan yhtälössä kasvihuonekaasujen ilmastovaikutuksella (KHK). Jos ΔKHK on suurempi kuin 0 ajanhetkellä t_1 , niin puutuotteiden tai metsäenergian käyttö on ilmastollisesti parempaa kilpaileviin tuotteisiin nähden.

Puutuotteiden ja metsäenergian ilmastovaikutuksien tarkastelussa pätee sama vertailutilanteen logiikka, joka esitettiin edellisessä kohdassa metsäbiomassan hiilitaseen ilmastovaikutusten yhteydessä. Metsän ja metsätuotteiden hiilidioksidipäästöjen ajallinen kehitys yhdistetään tuote- ja energiajärjestelmien kasvihuonekaasupäästöjen tarkasteluun, joka perustuu elinkaariarviointiin (LCA). Kun tarkastellaan ilmastovaikutuksia, jotka syntyvät päätöksestä, joka muuttaa puun käytön tasoa, on tarpeen tehdä seurausvaikutuksellinen LCA (ks. Matthews ym. 2015). Kokonaisuudessaan päätöksen ilmastovaikutukset koostuvat kaikista niistä tekijöistä, jotka päätöksen seurauksena muuttuvat (mm. metsän hiilivaraston ja energiajärjestelmän reagointi muuttuneeseen tilanteeseen). Seurausvaikutuksellinen analyysi on monimutkaista ja siihen sisältyy huomattavia epävarmuuksia (Zamagni ym. 2012).

Elinkaaripohjaisissa tuote- ja energiavertailussa otetaan usein hiilidioksidipäästöjen lisäksi huomioon myös eri elinkaarivaiheessa syntyvät ilokaasu (typpidioksidi)- ja metaanipäästöt sekä mahdollisesti F-kaasut. Kasvihuonekaasujen kokonaisilmastovaikutus (KHK) lasketaan tyypillisesti hiilidioksidiekvivalenttilukuna, jotka saadaan kertomalla kasvihuonekaasupäästöt niitä vastaavilla ns. GWP-potentiaalikertoimilla. Tällöin eri kaasujen lämmitysvaikutus yhteismitallisetään vastaamaan hiilidioksidipäästön lämmitysvaikutusta 100 vuoden aikana. Tämä on kuitenkin yksinkertaistus ns. säteilypakotemallien tarjoamasta laskentamahdollisuudesta, jotka pystyvät tuomaan esiin eri tuotteiden ja energioiden kokonaispäästöjen ilmastovaikutukset eri ajanhetkenä (esim. Monni ym. 2003, Holmgren ym. 2006).

Puutuotteiden ja metsäenergian käytön kautta saavutettavien positiivisten ilmastovaikutusten, *ilmastohyötyjen*, suuruus muuttuu ajan myötä sitä mukaa kun metsä sitoo takaisin ilmakehän hiilidioksidia uuteen kasvustoon. Puutuotteiden ja -energian ilmastohyötyjä saadaan vasta kun koko tuoteketjun eri vaiheessa ilmakehään vapautuneiden kasvihuonekaasupäästöjen kumulatiivinen säteilypakotemäärä on pienempi kuin vaihtoehtoisten tuotteiden ja energioiden elinkaaristen päästöjen säteilypakotemäärä.

Metsäenergia

Metsien hiilitaseen vertailutilanteesta riippumatta tehdyt energiatarvikelaskelut osoittavat, että metsiin hakkuutoimien kautta synnytetty hiilivaje on hitaasti paikattavissa vaikka metsäenergian korvaushyödyt fossiilisiin polttoaineisiin nähden otetaan huomioon. Se miten nopeasti hakkuilla synnytetty hiilivaje saadaan uudella kasvulla paikattua metsänkorjuualueella, vaikuttaa yhtenä merkittävänä tekijänä siihen, kuinka nopeasti metsäenergian ilmastohyödyt ilmenevät.

Metsäenergian hiilitaseen palautuvuutta heikentää jo lähtötilanteessa se, että puuenergiasta vapautuu enemmän hiilidioksidia synnytettyä energiaa kohti kuin mitä vapautuu fossiilisista polttoaineista.

Bioenergian päästökerroin on energiatuotannossa 109,6 g CO₂/MJ kun se hiillelle on 93,3 g CO₂/MJ, dieselöljylle 73 g CO₂/MJ ja maakaasulle 56,1 g CO₂/MJ (Tilastokeskus 2015b). Lisäksi voimalaitoksissa pystytään fossiilisille polttoaineille saavuttamaan hieman parempi hyötysuhde energiantuotannossa kuin puulle (Ros ym. 2013). Sen sijaan muiden elinkaarivaiheiden kuin polton kasvihuonekaasupäästöissä tuotettua energiaa kohti ei ole käytännössä eroa hiilen, kaasun ja puun välillä (Tilastokeskus 2015b). Alkutilannetta heikentää biomassan käyttöön liittyen myös se, että hakattu metsämaa toimii hiililähteenä vuosia ennen kuin siinä uuden biomassan kasvun sitoma hiilimäärä ylittää maaperän ja kasvijätteiden hajoamisesta vapautuvan hiilimäärän (Tuomi ym. 2011, Liski ym. 2006, Kilpeläinen ym. 2013).

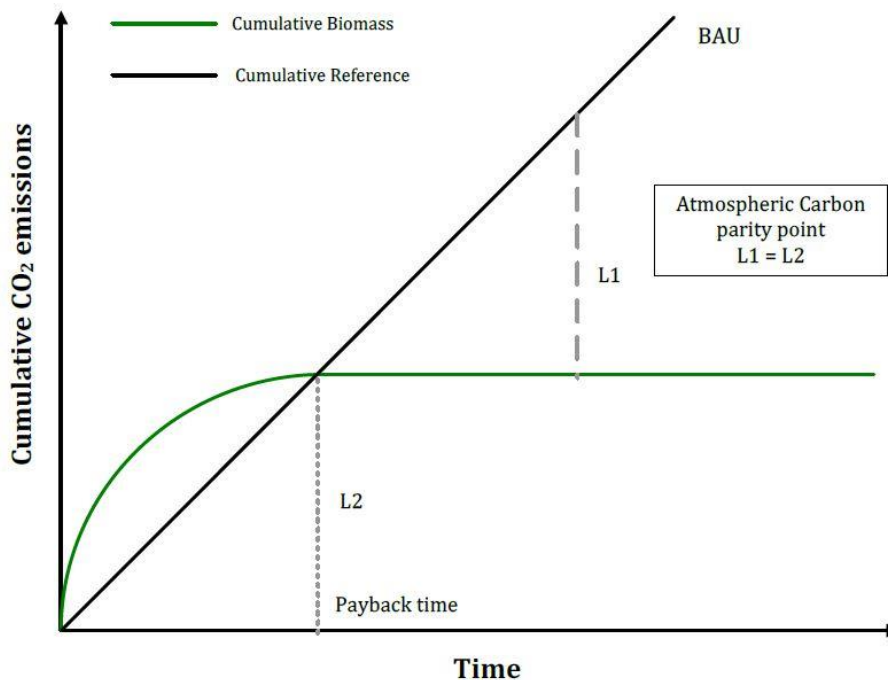
Metsäenergian ilmastovaikutusvertailussa polttoaineiden tuotannon päästöt eivät näy merkittävää roolia. Muiden elinkaarivaiheiden kuin polton merkitys suomalaisen metsäbioenergian kasvihuonekaasujen kokonaispäästöissä on vain 2-3 % esimerkiksi Revon ym. (2012) tekemän kirjallisuuskatsauksen perusteella.

Edellä esitettyjen syiden perusteella mallitarkastelut borealisessa metsävyöhykkeessä tuottavat tuloksen, jossa metsäenergian KHK-päästöjen tase CO₂-ekvivalenttina ilmaistuna on huomattavasti huonompi kuin vastaavan energiamäärän tuottaneiden öljyjen ja maakaasujen fossiilisperäisten päästöjen tase vielä pitkään. Suurimmat nettopäästöt muodostuvat, kun kasvavaa puustoa ohjataan energiaksi. Metsän hakkuu- ja käyttöskenaarion synnyttämä hiilivajeen palautuvuuteen vaikuttavat korjattava biomassa, korjuu-alan maantieteellinen sijainti ja laskelmissa tarkasteltu aikajakso.

Metsäenergian käytön kautta saavutettavien ilmastohyötyjen suuruus muuttuu ajan myötä sitä mukaa kun metsä sitoo takaisin ilmakehän hiilidioksidia uuteen kasvustoon. Tämä aika, joka tarvitaan ilmastovaikutusten bioenergian hyötyjen saamiseksi, tunnetaan kirjallisuudessa *takaisinmaksuaikana* (payback time). Tämän lisäksi metsäenergian ilmastohyötyjen arvioinnissa on käytetty ns. ilmakehän hiilien pariteettipisteen määrittämistä. Se kertoo ajanhetken, jolloin fossiilisten polttoaineiden korvaamisella on saatu yhtä paljon hiilipäästöjä vähennettyä kuin mitä bioenergian käytöstä on menetetty hiilivarastoa metsästä (kuva 13).

Käytännössä takaisinmaksuajan määrittämisessä on käytetty sekä säteilypakotelaskentaa että kumulatiivista hiilidioksidipäästölaskentaa, mikä vaikuttaa lopputuloksiin vain vähän (Holtsmark 2012a). Sen sijaan vertailutilanteen valinta ja laskentatapa – yksittäisen metsän hiilivielan palautuminen tai jatkuvan hakkuutoiminnan simulointi hiilitaseen seurannassa – vaikuttavat lopputulokseen (Holtsmark 2012a). Kun laskennalliset valinnat yhdistetään vielä hyvin erilaisiin raaka-ainepohjiin ja korvattaviin fossiilisiin polttoaineisiin, kirjallisuudesta löytyy metsäenergialle hyvin erilaisia takaisinmaksuaikoja (esim. Agostini ym. 2013, Matthews ym. 2014). Parhaimmillaan ne ovat alle kymmenen vuotta ja huonoimmillaan jopa useita satoja vuosia.

Erilaiset mallitarkastelut osoittavat yhtenäisesti, että ohjaamalla hitaasti kasvavaa puuta energiakäyttöön ei saavuteta ilmastohyötyjä lyhyellä aikavälillä vaikka puuenergialla korvataan fossiilista polttoainetta (esim. Holtsmark 2012b, Ros ym. 2013, Agostini ym. 2013). Parhaat korvaushyödyt energiantuotannossa saavutetaan korvaamalla lisähakkuiden puulla kivihiltä ja turvetta, mutta tällöinkin ilmastohyödyt realisoituvat suomalaiselle, hitaasti kasvavalle puulle (esim. kiertoaika 75–90 vuotta) vasta keskipitkällä aikavälillä jos vertailutilanteena käytetään hakkuuta edeltäneen metsän hiilitaseen palautuvuutta. Jos vertailutilanteeksi asetetaan metsien BAU-kehitys ilman lisähakkuutoimia, saavutetaan ilmastohyötyjä fossiilisiin polttoaineisiin nähden vasta hyvin pitkällä aikavälillä (Boreaalisen metsävyöhykkeen lisähakkuilla jopa 190–340 vuotta kun metsän kasvun oletetaan säilyvän nykyisen kaltaisena tulevaisuuden maailmassa, Holtsmark 2012b). Kivihiielen korvaaminen aiheutti lyhyimmän taksinmaksuajan (190 vuotta) ja liikennepolttoaineiden pisimmän takaisinmaksuajan (340 vuotta). Ross ym. (2013) ovat saaneet Holtsmarkiakin pitempiä taksinmaksuaikoja kun puulla korvataan hiilenkäyttöä. Boreaalisen metsävyöhykkeen ainespuusta tehdyn metsäenergian ilmakehän hiilen pariteettipisteen



Kuva 13. Visuaalinen kuvaus takaisinmaksuajasta (*paypack time*) ja ilmakehän hiilen pariteettipisteestä (*parity point*). Vihreä viiva: bioenergian tuotannon aiheuttama hiilivaraston väheneminen metsässä. Musta viiva: kumulatiivinen hiilidioksidipäästön väheneminen metsäenergian korvattaessa fossiilista energiaa (Agostini ym. 2013).

aikajänne on huomattavasti pitempi kuin takaisinmaksuaikojen, eikä sen määrittäminen ole edes mielekäästä tulevaisuuden ilmastollisten epävarmuustekijöiden takia.

Lisähakkuiden merkitystä metsiemme hiilivarastoihin ja nieluihin sekä tuotteiden ja metsäenergian ilmastovaikutuksiin lähestytään käytännössä siten, että mallilla arvioidaan nykykäytön ja lisäkäytön hiilivarastomuutos ajan suhteen. Muun muassa Kallion ym. (2013), Sieväsen ym. (2013) ja Pingoudin ym. (2015) selvitykset osoittavat, että ottamalla käyttöön lähivuosina puun tehostetut hyödyntämiskenaariot, jossa poistumaa metsästä lisätään ja vaikka sillä korvataan fossiilisia polttoaineita, saadaan tulokseksi, ettei ilmastohyötyjä saavuteta vielä 2050 mennessä. Esimerkiksi Pingoud ym. (2015) ovat osoittaneet, että energiapuun korjuun kasvattaminen tasosta 18 milj. m³/vuosi tasoon 25,5 milj. m³/vuosi ei ehdi tuoda ilmastohyötyjä 35 vuoden tarkastelujaksolla, vaikka lisäpuulla korvattaisiin fossiilista polttoainetta (vrt. kuva 12). Näin saadun metsäenergian päästökerroin vaihtelee noin 120 – 220 g CO₂ /MJ kohden kasvaen lähes lineaarisesti ajan suhteen. Näin vaikka hiilinielut lisääntyvät. Syynä on se, että metsissä menetetty hiilinielu on suurempi kuin metsistä korjattu puumäärä ja toisaalta puun päästöt tuotettua energiamäärää kohden ovat korkeampia kuin fossiililla polttoaineilla. Näiden tarkastelujen valossa metsäenergian lisäkäyttö ei tuota ilmastohyötyjä ainakaan lyhyellä aikajänteellä. Aikajännettä, jolla ilmastohyötyjä saavutettaisiin, ei pystytä muun muassa näiden selvitysten näkökulmasta sanomaan, sillä niissä tarkastelut päättyvät vuoteen 2050 mennessä.

Puun energiankäytön ilmastohyötyjä voidaan kuitenkin saavuttaa jo lyhyellä aikavälillä (10–30 vuotta) ohjaamalla energiatuotantoon muutoinkin luonnossa suhteellisen nopeasti hajoavia hakkuutähteitä kuten oksia ja harvennuspuuta, jotka muutoin jäisivät hajoamaan metsämaahan. Revon (2012) tutkimuksessa, joka perustui hakkuutähteiden jatkuvaan käyttöön, hakkuutähteiden energiakäytön päästökertoimet muuttuivat välillä 105–21 g CO₂-ekv MJ⁻¹ mentäessä ajassa eteenpäin. Päästöt ovat suurimmillaan kun

hakkuutähteiden energiakäyttö aloitetaan tai sitä lisätään, mutta päästöt pienenevät ajan myötä, koska hakkuutähteet hajoaisivat vapauttaen hiilidioksidia myös metsään jätettynä. Tarkastelussa hakkuutähteiden polton päästöistä vähennettiin ajan myötä hakkuujäteistä hajoava hiilidioksidimäärä, joka olisi muutoin vapautunut hakkuujätteistä metsässä. 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. Nettopäästöjen suuruus riippuu siis hakkuutähteiden hajoamisnopeudesta. Näin ollen nopeasti hajoavien oksien energiakäyttö aiheuttaa noin puolet pienemmät päästöt kuin hitaasti hajoavien kantojen energiakäyttö (Repo ym. 2012). Jäppisen ym. (2014) tutkimuksessa hakkuutähteiden, kantojen ja pieniläpimittaisen energiapuun päästöt vaihtelevat välillä 10–40 g CO₂-ekv MJ⁻¹ kun päästöjen aikajänne on 100 vuotta.

Hakkutähteiden energiakäytön päästöjä voidaan edelleen parantaa metsänhoidollisilla keinoilla (ks. Kalliokoski ja Repo 2015). Ongelmana on kuitenkin näiden jakeiden määrän rajallisuus, sillä niiden muodostuminen on kytköksissä metsäteollisuuden ainespuun ja runkopuun syntymiseen.

Ros ym. (2013) osoittivat selvityksessään, että jätetuun ja hakkuutähteiden käyttö biodieselin valmistukseen Fischer-Tropsch –tekniikalla tuottaa ilmastohyötyjä jo lyhyellä aikavälillä ja hiilipäästöjen takaisinmaksuaika vaihteli muutamasta vuodesta 45 vuoteen raaka-ainepohjasta riippuen. Kaasutuksessa takaisinmaksuaika vaihteli 11–27 vuoden aikavälillä. Lisähakkuiden perustelu liikennepolttoaineiden valmistukseen ei ole kuitenkaan perusteltua ilmastosyistä edes keskipitkällä aikavälillä ja ilmastohyötyjen saavuttaminen tapahtuu vielä pitemmällä aikavälillä kuin hiilen korvaaminen energiatuotannossa. Tähän on syynä biopolttoaineen valmistuksen energiatehottomuus fossiilisiin liikennepolttoaineiden valmistukseen verrattuna ja se, että liikennepolttoaineilla on pienemmät ominaispäästökertoimet kuin kivihieillä. Metsäbiomassan energiakäytöllä on siis huomattavat ilmastovaikutukset liikennepolttoaineissa kuin voimalaitostuotannossa, etenkin CHP-tuotannossa.

Puun kiertoajan lyhentäminen on mainittu usein keinona bioenergian ilmastokestävyyden parantamiseksi (Agostini ym. 2013, Matthews ym. 2014, Matthews ym. 2015). Käytännössä tämä edellyttää alkuperäispuustoa nopeammin kasvavien puulajien suosimista ja/tai myös oikea-aikaisten metsänhoitotoimenpiteiden käyttöä. Toimenpiteen ilmastohyödyllisyys riippuu pitkälti ”metsäpellon” alkutilanteesta, alueen luonnollisesta palautumiskyvystä ja kasvualustan kilpailevista käyttötarkoituksista. Jos kyse on joutomaiden ja maatalouskäytön ulkopuolelle jääneiden, luonnollisesti hitaasti uusiutuvien peltojen uudelleen metsityksestä, toimenpiteen ilmastohyödyt ovat ilmeiset jo lyhyellä tähtäyksellä, ellei peltomaa kilpaile muiden käyttötarpeen kanssa. Muutoin ilmastohyödyt saatetaan menettää, koska muualla raivataan metsää peltoa varten. Jos lähtökohtana on nykyisen metsämaan muuttaminen metsäpelloseksi, alkuperäisen metsämaan hiilivarastoa pienennetään pitkäksi ajaksi eteenpäin tai jopa pysyvästi (Matthews ym. 2015).

Erilaisten puupohjaisten jätteiden johtaminen energiakäyttöön on myös usein mainittu keinona saada metsäenergialle ilmastohyötyjä lyhyellä aikavälillä (esim. Miner ym. 2013, Matthews ym. 2015). Tämä pätee, jos vaihtoehtona on jättää biojäte hyödyntämättä. Tilanne on toinen, jos esimerkiksi sahanpurusta voisi tehdä vaihtoehtoisesti puutuotteita, joiden käyttöikä kohteessa olisi vuosikymmeniä (ks. seuraava kohta ”Puutuotteet”).

Matthews ym. 2015 ovat tehneet koko Euroopan tasolla bioenergian tuotantoskenaarioita, joiden perusteella bioenergian käyttö vähentää selvästi EU:n päästöjä vuoteen 2050 mennessä. Bioenergian lähteenä ovat metsäenergian lisäksi peltoenergian erilaiset muodot. Laskennasta ei kuitenkaan pysty erottamaan Suomen metsien merkitystä päästökehitykseen.

Puutuotteet

Puusta on mahdollista tehdä monenlaisia tuotteita, joiden hiilisisältö vapautuu ilmakehään erilaisten käyttö- ja kierrätysmahdollisuuksien mukaan. Suurin osa paperituotteiden hiilestä vapautuu 1–10 vuoden sisällä, kun taas rakennusmateriaalien osalta vaihtelu voi olla 20 vuodesta yli 100 vuoteen (Ros ym. 2013). Mitä kauemmin hiili pystytään pitämään tuotteissa, sitä parempi ilmastovaikutus saavutetaan lyhyellä aikavälillä koska metsän hiilivelkaa pystytään tällä tavalla vähentämään jo tarkastelujakson alkupäässä. Esimerkiksi Cherubini ym. (2012) ovat arvioineet, että esimerkiksi jo 10 vuoden hiilen varastoituminen tuotteeseen pienentää vastaavan hiilidioksidipäästön ilmastovaikutuksia 100 vuoden aikajänteellä, koska 10 vuoden aikana uusi kasvu on ehtinyt paikata metsään synnytettyä hiilivelkaa. Jos varastointia pystytään pitämään 40 vuotta, ilmastovaikutukset pienenevät 30 % 100 vuoden aikajänteellä.

Puutuotteiden pitkäikäisyyttä voidaan kasvattaa tuotesuunnittelun, uudelleenkäytön ja kaskadikäytön avulla. Kaskadikäytöllä tarkoitetaan toimintaa, jossa tuotteen puusisältö käytetään yhä uudelleen uusissa tuotteissa. Puutuotteiden hiilen varastoituminen näkyy kasvihuonekaasupäästöinventaariossa siten, että vuonna 2012 EU:ssa puutuotteisiin sitoutunut hiili vastasi noin 10 %:a EU:n hiilinielusta (Nabuurs ym. 2015). Suomessa se oli samaa luokkaa, mikä vastasi noin 5 % Suomen fossiilisista ja prosessiperäisistä kasvihuonekaasupäästöistä (Tilastokeskus 2014a)

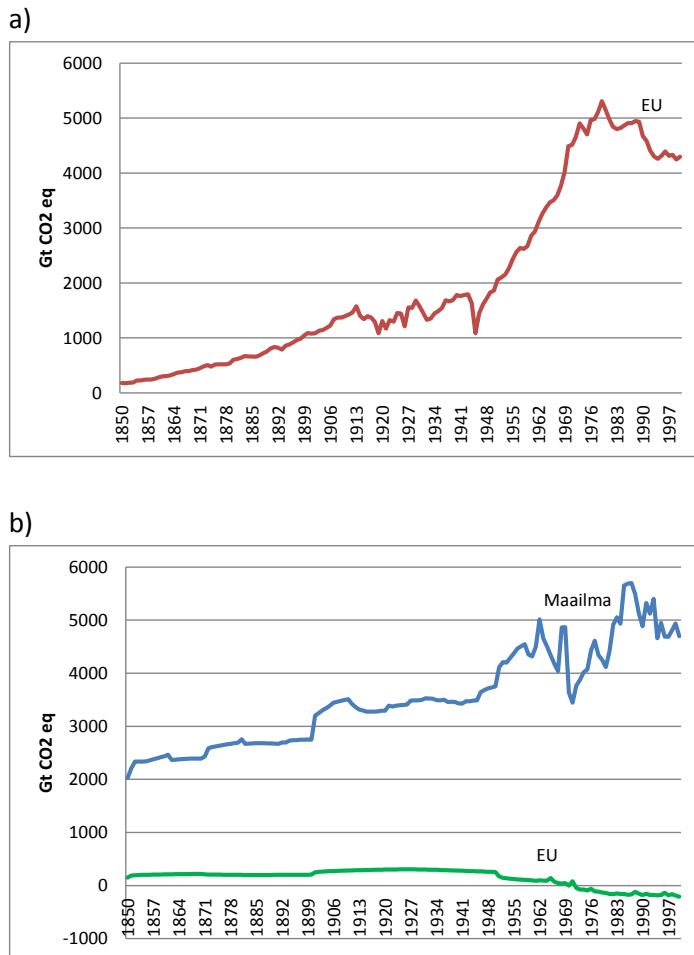
Puusta valmistetuilla tuotteilla voidaan korvata elinkaari päästöiltään huonompia tuotteita. Puutuotteiden korvausvaikutusten päästöarvioinnit on mahdollista tehdä elinkaariarvioinnin (LCA) avulla, joissa voidaan hyödyntää taloudellisia korvausvaikutuksia arvioivien mallien tuloksia. Näissä tarkasteluissa tulee ottaa huomioon myös puuenergian päästöt. Tällä hetkellä noin puolet mekaanisen metsäteollisuuden ja sellun valmistukseen käytettävästä puubiomassasta ohjautuu bioenergiakäyttöön. Vuonna 2010 mekaanisen metsäteollisuuden raakapuun käyttö oli 7,45 milj. m³ kun se selluteollisuudella oli 29,37 milj. m³ (Metsäntutkimuslaitos 2011). LCA-tarkasteluissa tämän energiatuotannon päästöt tulisi sisällyttää sellusta valmistettujen tuotteiden (esim. paperi ja kartonki) päästöiksi, mikä vaikuttaa niiden ilmastovaikutusten ajalliseen kehittymiseen ja niistä saatavien korvushyötyjen suuruuteen kilpaileviin tuotteisiin nähden. Sama koskee mekaanisen metsäteollisuuden tuotteita. Mekaaniseen metsäteollisuuteen kytkeytyvän bioenergian lähteenä on pääasiassa iäkästä runkopuuta, jonka hiilen palautuvuus takaisin metsään on hidasta (vrt. edelliset kohdat tässä luvussa). Toistaiseksi tällaisia puutuotteiden LCA-tarkasteluja, joissa otettaisiin huomioon metsäenergian hiilidioksidipäästöjen ajallinen kehittyminen, ei ole tietyvästi tehty.

Sathre ja O'Connor (2010) ovat tehneet kirjallisuusselvityksen siitä, millaisia korvaushyötyjä erilaiset tutkimukset ovat tuottaneet rakennustuotteille. Heidän yhteenvedossaan yhden puutuotteen hiilikilolla voidaan välttää keskimäärin 1–3 hiilikilon päästö vaihtoehtoisessa tuotteessa. Näiden korvaushyötykertoimien (displacement factor) keskiarvo oli 2,1. Selkeän yhteenvedon tekeminen on vaikeaa, koska eri tutkimusten arviointiperusteet eivät ole yhtenäisiä.

Tehdyt LCA-selvitykset puutteistaan huolimatta antavat kuitenkin vahvan signaalin, että etenkin sementin ja teräksen korvaaminen puutuotteilla tuottaa välittömiä ilmastohyötyjä ja näin saadaan fossiilisten polttoaineiden korvaamista paremmat ilmastohyödyt (Petersen ja Solberg 2005, Koskela ym. 2012, Lippke 2011). Sama saattaa koskea monia kemianteollisuuden tuotteita, joita uudet biojalostamot voivat mahdollisesti tarjota. Asia vaatii lisäselvitystä, sillä kokonaisvaltaisten arvioiden tekeminen on vaikeaa. Tarkasteluissa tulee ottaa huomioon muun muassa käyttökohteiden toiminnallisuuserot sekä eri materiaalien käyttöiät (esim. Koskela ym. 2012). LCA-selvitysten lisäksi korvautuvuus kysymystä tulee tutkia myös taloudellisten tasapainomallien avulla.

4.3 Aikahorisontti ja puun käytön ilmastovaikutukset

Puutuotteiden ja metsäenergian käytön ilmastohyödyt fossiilisiin polttoaineisiin nähden ilmenevät pitkällä aikavälillä. Tämä näkyy muun muassa katsomalla arvioita EU27-maiden historiallisista fossiilisten polttoaineiden käytön päästöjen (kuva 14a) ja LULUCF-päästöjen kehitystä (kuvat 14b). Vuodesta 1850–1970 EU27-maiden LULUCF-sektori on ollut päästölähde etenkin sen takia, että metsät ovat väistyneet viljelyn tarpeisiin (den Elzen ym. 2013). Nykyisin EU27-maiden maankäyttösektorin päästöt ovat kääntyneet hiilinieluksi ja niiden ennustetaan säilyvän lähitulevaisuudessa, vaikka metsäenergiaa käytetään EU:ssa yhä enemmän. Bioenergian, josta valtaosa on tehty metsäenergialla, rooli energian loppukulutuksessa on kasvanut tasaisesti EU 28 maissa vuodesta 2000 vuoteen 2010 (52,8 Mtoe -> 105,1 Mtoe) ja sen ennustetaan olevan vuonna 139 Mtoe. Vuonna 2013 EU:n käyttämästä kokonaisenergiasta runsas 6 % tuotettiin bioenergialla, josta tuonnin osuus oli alle 4 % (AEBIOM 2015). Todettakoon, että EU 28:n puuston tilavuuden on arvioitu olleen vuonna 1990 noin 19,1 miljardia kuutiota ja vuonna 2010 arvio oli 24,1 miljardia kuutiota. Fossiilisten polttoaineiden käyttö on samaan aikaan kasvattanut ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta.

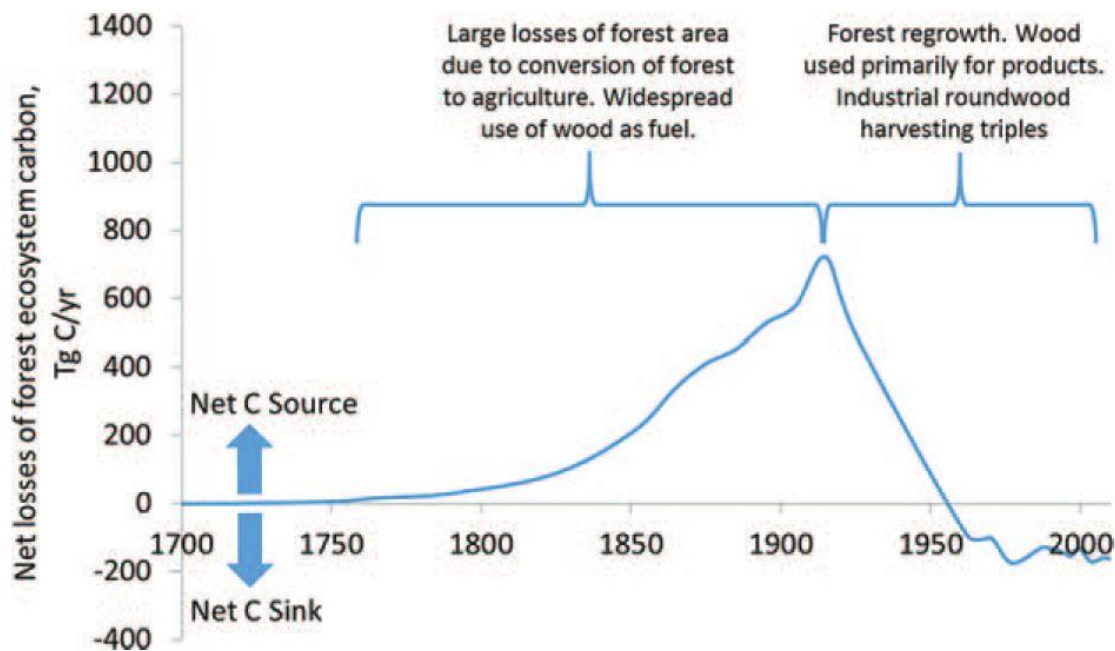


Kuva 14. a) Arvio EU27-maiden historiallisista fossiilisten polttoaineiden käytöstä aiheutuneista kasvihuonekaasupäästöistä 1850-2000. **b)** Arvio maailman ja EU27-maiden maankäyttösektorin (LULUCF) kasvihuonekaasupäästöistä 1850-2000 (den Elzen ym. 2013). a) kuvaan ei ole pystytty erottelamaan metsien ja metsämaan hiilitaseen muutosta koko LULUCF-sektorin päästökehityksestä, mutta se voi olettaa olevan UNFCCC:n maankäyttösektorin päästötietojen valossa olevan vieläkin positiivisempi kuin muun maankäyttösektorin.

EU:ssa pitkän aikavälin myönteinen metsän käytön hiilitaseen kehittymiseen on monia syitä. Toisaalta se on myös osoitus siitä, että ilmastonäkökulmasta kestäviin hakkuisiin perustuva metsien hyödyntäminen on mahdollista toteutua kun metsien hyödyntämiseen ja säilyttämiseen liittyy selvä taloudellinen intressi (vrt. Miner ym. 2014, kuva 15).

Luvussa 4.2 tuotiin esiin puun käyttöön liittyvä lyhyen ja keskipitkän aikavälin päästöongelma: metsäenergia ja useat puutuotteet aiheuttavat pitkään suurempia kasvihuonekaasupäästöjä verrattuna kilpaileviin tuotteisiin ja energioihin. Lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä suurempi ilmastohyöty voitaisiin saada jättämällä puu metsään ja kasvattamalla hiilivarastoa.

Toisaalta jos Suomessa lisätään nyt puunkäyttöä, Suomella saattaisi olla mahdollisuus käyttää hiilinieluoptiota myöhemmin kun ikäjakaumaltaan nuorentunut metsä kasvaa myöhemmin paremmin. Asian varmistaminen vaatisi erillistarkastelun. Hyvin pitkällä aikavälillä metsien hiilinielu heikkenisi niiden vanhetessa ja ilman puuston merkittävää uudistumista metsäbiomassan hajotustoiminta on samaa luokkaa kuin kasvu eli metsät menisivät tasapainotilaan eli eivät olisi suurina lähteinä eivätkä nieluina (mutta isoina hiilivarastoina) (ks. kuva 13 tilanne ennen vuotta 1750). Käytännössä luonnontilaisetkaan metsät eivät pääse kehittymään kaikilta osin vanhoiksi, koska niissäkin tapahtuu luonnollista uudistumista metsäpalojen ja myrskyvaurioiden seurauksena. Lisäksi intensiivinen (mutta määrältään kestävä) metsänhoito pystyisi tuottamaan suurempia metsäbiomassamääriä, jolla voidaan korvata pitkällä aikavälillä suurempia ilmastovaikutuksia aiheuttavia tuotteita ja energioita (esim. Matthews ym. 2015).



Kuva 15. Yhdysvaltojen metsäekosysteemien hiilitaseen kehitys 1700–2010 ja muutoksiin liittyvät keskeiset syyt (Miner ym. 2014).

Keskeinen kysymys on kuinka lyhyen ja keskipitkän aikavälin ilmastomenetysten ja pitkällä aikavälillä saavutettavat ilmastohyödyt arvotetaan toisiinsa nähden ilmastomuutoksen hillinnän kannalta? Vastauksen pohdinnassa voidaan hyödyntää myös taloustieteellistä mallinnusta, jossa eri ajanhetkillä saavutettavia ilmastohyötyjä ja -haittoja voidaan arvottaa johdonmukaisesti..

Edellä esitettyyn kysymykseen ei ole nykytietämyksen valossa yksiselitteistä vastausta. IPCC:n (2013) raportissa annetaan ymmärtää kumulatiivinen päästökahtymisen ja maapallon lämpötilan yhteydestä (ks. kuva 5). Tällöin biomassan lyhyen ja keskipitkänkin aikavälin ilmastomenetykset fossiilisiin polttoaineisiin nähden eivät kenties ole niin kriittistä ilmastolle kun pitemmällä aikavälillä uusi kasvu pystyy sitomaan ilmakehään vapautuneen hiilidioksidin takaisin kasvustoon. Hiilinieluja ja ilmakehän hiilidioksidin poistamista tarvitaan myös tulevaisuudessa (vrt. kuvat 4 ja 5). Toisaalta varovaisuusperiaatteen soveltaminen puoltaa sitä, että ilmakehän hiilidioksidipäästöjä ei pitäisi tulevina vuosikymmeninä kasvattaa vuosikymmeniksi. Tämän takia varmin tapa toimia ilmastomuutoksen hillitsemiseksi on valmistaa puusta tuotteita, joilla saavutetaan yhteiskunnassa kokonaisuudessaan mahdollisimman pienet kasvihuonekaasupäästöt jo lyhyellä aikavälillä.

Aikahorisonttiin liittyy myös yhteiskunnan pyrkimys vähähiilisyteen. Puutuotteiden ja metsäenergioiden korvaushyödyt muuttuvat ajan suhteen. Tulevaisuudessa esimerkiksi muiden uusiutuvien ja lähes päästöttömien energiatuotantotapojen seurauksena metsäenergian perustelu fossiilisten polttoaineiden pitkäaikaisten ilmastohyötyjen takia on vaikeampaa (Agostini ym. 2013). Ilmastohyötyjen saavuttaminen metsäenergian kautta on perustelua vuosisadan puolenvälin maailmassa siten, että ainakin osa metsäenergiasta tuotetaan hiilidioksidin erotus- ja varastointitekniikan (CCS) avulla (van Vuuren ym. 2011, IPCC 2104). Toisaalta uusien puutuotteiden (esim. nanosellu) voidaan saavuttaa tulevaisuudessa huomattavia ilmastohyötyjä esimerkiksi teräksen korvaamisessa.

Yhteenvedon voidaan sanoa, että metsien lisäkayttöä voidaan perustella parhaiten ilmastosyllä, jos lisäkayttöllä pystytään korvaamaan elinkaarivaikutuksiltaan suuripäästöisiä tuotteita (esim. sementti, teräs) ja puun hiilisisältö pystytään pitämään pitkään käytössä. Vasta tuotteen hylkäysvaiheessa puun hiilisisältö ohjattaisiin energiantuotantoon. Tällöin ilmastohyödyt näkyvät jo mahdollisesti lyhyellä aikavälillä tapauksesta riippuen. Soveltamalla myös samoja periaatteita voidaan myös metsien nykykäytön ilmastovaikutuksia parantaa. Asia vaatii kuitenkin perusteellisempää selvittelyä, koska laskelmiin liittyy helposti melkoisia vaikeuksia ja teknologian kehitys uusine tuotteineen muuttaa puutuotteiden korvaushyötyjä tulevaisuudessa.

5. ILMASTONEUTRAALISUUS JA -VAIKUTUKSET

Ilmastoneutraalisuus on hiilineutraalisuutta laajempi käsite, joka ottaa huomioon perinteisten kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi myös muut ihmisen ilmastoon vaikuttavat tekijät. Ilmastopaneeli määritteli (Seppälä ym. 2014) ilmastoneutraalisuuden tilaksi, jossa ihmistoimintojen aiheuttama nettovaikutus ilmastomuutokseen määrättyllä ajanjaksolla on nolla. Toisin sanoen ilmastoneutraalius tarkoittaa tilaa, jossa erilaisten säteilypakotetta aiheuttavien komponenttien (kasvihuonekaasupitoisuudet, aerosolit, albedo) yhteenlaskettu kumulatiivinen säteilypakote määrättyllä ajanjaksolla on nolla.

Ilmastoneutraalisuuden näkökulmasta puunkäyttö- ja hakkuuskenaarion ilmastovaikutus saadaan hiilineutraalisuuden tavoin yhtälöstä:

$$\Delta I = I_u - I_r \quad (2)$$

ΔI on aiheutettu kumulatiivinen nettosäteilypakotteen muutos valittuun referenssitilanteeseen nähden aikavälillä t_1-t_0 , I_u on kumulatiivinen säteilypakote puun hakkuu- ja käyttöskenaarion mukaan ja I_r on

kumulatiivinen säteilypakote referenssiskenaarion perusteella. Säteilypakotelaskelmat on mahdollista tehdä erillisillä IPCC:n suosittelemilla malleilla (ks. esim. Monni ym. 2003, Holmgren ym. 2006).

Metsän käytön päästövaikutusten hiilineutraalisuus tietyllä aikavälillä ei merkitse sitä, että käyttö olisi ilmastoneutraali samalla aikavälillä. Aerosolien ja albedon mukaanotto tarkasteluun voi heikentää ja parantaa metsien käsittelyn ilmastovaikutuksia. Metsänhoitotoimenpiteillä vaikutetaan metsämaan ominaisuuteen heijastaa auringon säteilyä (albedo). Muun muassa avohakkuut lisäävät sekä kesä- että talviaikana auringon säteilyenergian karkaamista avaruuteen eli albedo kasvaa. Keskimääräinen vaikutus vuoden yli on, että lehtimetsien ja aukean albedo on suurempi kuin havumetsän. Toisaalta metsänhoidolla vaikutetaan myös ilmastoa viilentävien aerosolien muodostumiseen aukkojen määrää, ikärakennetta ja puulajisuhteita muuttamalla. Nykytiedon mukaan rehevämpien kasvupaikkojen lehtipuumetsiköt lisäävät aerosolien muodostumista. Nykytietämyksen mukaan nämä kaikki eri tekijät huomioitaessa havupuut viilentävät ilmastoa vähemmän kuin lehtipuut, vaikka erityisesti kuusimetsiin sitoutuu kiertoajan aikana enemmän hiilidioksidia. Metsien albedo- ja aerosolitutkimukseen liittyy kuitenkin melkoisia epävarmuuksia ja tieteellinen ymmärrys asiassa kehitty tulevaisuudessa.

Puun polton ilmastovaikutuksiin ja keskusteluun sen ilmastoneutraalisuuteen liittyvät myös puun polttamisessa syntyvät pienhiukkaset ja mustan hiilen päästöt, joita syntyy huonoissa palo-olosuhteissa. Pienhiukkaset toimivat ilmastoa viilentävinä päästöinä. Mustan hiilen päästöt puolestaan vaikuttavat lumihangon albedoon ilmastoa lämmittävästi. Sekä mustan hiilen että pienhiukkasten vaikutuksiin pystytään vaikuttamaan parantamalla puun polton savukaasujen epäpuhtauksien suodatusta ja palo-olosuhteita. Puunpolton haitat voidaan minimoida keskittämällä puunpoltoa tehokkaisiin voimalaitoksiin. Pienpoltossa on rajatummalla mahdollisuudet edetä kustannustehokkaasti pienhiukkasten ja mustan hiilen päästöjen vähentämisessä. Pellettien käyttö voi parantaa tilannetta. Pienhiukkasten ja mustan hiilen ilmastonäkökulmista on valmistunut aikaisemmin ilmastopaneelin selvitys (Laaksonen ym. 2015)

6. METSIEN KÄYTÖN ILMASTOVAIKUTUKSET KANSAINVÄLISISSÄ SOPIMUKSISSA

6.1 Lähtötilanne

Metsäkato ja metsien heikkeneminen aiheuttaa noin 10 % maailman kasvihuonekaasupäästöistä. Metsien häviäminen on ongelma etenkin Brasiliassa, Indonesiassa, Malesiassa sekä kaiken kaikkiaan päiväntasaajan alueen köyhissä valtioissa. Sen sijaan rikkaissa valtioissa ja Kiinassa, jotka aiheuttavat valtaosan fossiilisista kasvihuonekaasupäästöistä, metsävarat ovat olleet keskimäärin kasvussa vuodesta 1990 lähtien.

Edellä mainittu lähtökohta ei voi sivuuttaa tulevia ilmastoneuvotteluja silmälläpitäen. Ajatus, että rikkaat maat voisivat kompensoida metsänielulla täysimääräisesti fossiilisten polttoaineiden päästöjä, ei varmasti miellytä kaikkia osapuolia.

Ajatus, että puun energiakäytölle tulisi omat päästökertoimet on epärealistinen, sillä nykyiset Durbanissa sovitut LULUCF-sektorin laskentasäännöt Kiotoon pöytäkirjan toiselle velvoitekaudelle vuodesta 2013 alkaen antavat jo riittävät teoreettiset perusteet arvioida eri maiden metsäkadon, metsäkäsittelyn ja –hyödyntämisen kasvihuonekaasujen päästövaikutukset vuositasolla. Suurin ongelma on saada tarvittava lähtötieto luotettavasti eri maista arvioiden tekemiseksi. Tässä mielessä OECD-maat, etenkin Suomi ja Ruotsi, ovat hyvin erilaisessa tilanteessa kehitysmaihin nähden.

Edellä esitetty ei tarkoita sitä, ettei nykyisiin YK:n ilmastopaneelin LULUCF-sektorin pelisääntöjä pitäisi muuttaa. Suurin osa tämän työn yhteydessä vastanneista tutkijoista olisi valmis pelisääntöjen muutokseen siten, että metsänielujen muutokset olisivat nykyistä paremmin mukana päästötavoitteissa

(Saikku 2015). Erityisen hankalaksi asetelman tekee viimeaikainen tutkimustieto siitä, että metsäbiomassan hiilen lisääntyvä vapauttaminen ilmakehään esim. energiatuotannon kautta ei välttämättä johda lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä ilmastohyötyihin. Tämä koskee myös maita, joissa metsien hiilinielut ovat kasvussa. Metsien hiilinielujen tarkempi seuranta voidaan nähdä myös keinona välttää puun energiakäytölle määrättäviä päästökertoimia.

6.2 Nykyiset pelisäännöt

Durbanissa (2011) sovittiin, että jokaisen Kioton pöytäkirjan toisen velvoitekauden ratifioineen osapuolen tulee laskea metsänhoidon toimenpiteen nielut ja päästöt käyttäen ns. vertailutasomenetelmää. Vertailutaso kuvaa metsien ennustettua, keskimääräistä nielua tai päästöä, johon velvoitekauden todellista kehitystä verrataan. Suomen metsänhoidon vuotuiseksi nieluksi on päätöksessä määritetty -19,3 milj. t CO₂-ekv (-20,5 milj. t CO₂-ekv puutuotteiden kanssa). Metsänhoidosta saatavaa nieluhyötyä rajoitetaan kattoluvulla. Durbanissa kattoluvuksi sovittiin 3,5 % vuoden 1990 kokonaispäästöistä (Suomen kokonaispäästöt n. 71 milj. t CO₂-ekv). Maa saa hyvitystä kattoluvun verran silloin, kun sen nielut ovat vertailutasoa suuremmat. Suomen vuosittainen kattoluku on seuraavalla velvoitekaudella noin 2,5 milj. t CO₂-ekv. Tämän hyödyn Suomi saa täysimääräisenä silloin, kun metsänielu on vähintään -21,8 milj. t CO₂-ekv. Kattoluku on yksipuolinen, joten nielusta mahdollisesti saatavalle rasiitelle (nielu on vertailutasoa pienempi) ei ole asetettu rajoitetta.

Durbanissa poistettiin Kioton ensimmäisellä velvoitekaudella ollut mahdollisuus metsämaan vähenemisen kompensointiin metsänhoitotoimenpiteen nielulla. Tähän liittyvät päästöt olivat Suomessa Durbanin sopimuksen allekirjoituksen aikana noin 4 milj. t CO₂-ekv / vuosi. Silloin Metsäntutkimuslaitos (Metla) arvioi, että metsää muuttuu muuhun maankäyttöön noin 20 000 ha/vuosi. Uusin tutkimus ennustaa metsäkadon noin puolet vähäisemmäksi eli 10–11 000 ha/vuosi vuoteen 2040 asti. Päästöistä n. 50 % aiheutuu metsän muuttumisesta rakennetuksi maaksi, (rakennukset, tiet, voimalinjat, yms.), 28 % maatalousmaaksi ja 10 % turvetuotantoalueiksi. Samaan aikaan metsityksen ja metsittymisen osalta muutoksen ensuteaan olevan noin 3500 ha/vuosi (Haakana ym. 2015).

Nykyisin Kioton pöytäkirjan toisella velvoitekaudella osapuolimaat voivat laskea puutuotteet (HWP) osana metsänhoidon kasvihuonekaasutasetta sekä siirtää laskennan ulkopuolelle ne alueet, joilla on tapahtunut poikkeuksellisia, ihmisestä riippumattomia luonnontuhoja (metsäpalot, hyönteis- ja loistuhot, äärimmäiset sääilmiöt jne.).

Kokonaisuudessaan nykyiset LULUCF-sektorin pelisäännöt näyttävät mahdollistavan Suomelle ilmasto- ja energiastrategian mukaisen puunkäytön lisäämisen ilman, että Suomelle annettu metsien nieluvelvoite vaarantuisi tämän vuosisadan puoleen väliin asti (kuva 12). Todettakoon, että nykyinen Durbanin sopimuksen mukainen metsien hiilinieluvelvoite on voimassa vuoteen 2020 asti.

6.3 Näkemyksiä pelisääntömuutoksiin ja niiden vaikutuksista Suomelle

Ilmastopaneeli näkee, ettei nykyinen tietopohja anna mahdollisuuksia määrittellä metsäbiomassan energiakäytölle yhtenäisin perustein uusia päästökertoimia, jotka ottaisivat huomioon maankäyttösektorin päästöt kokonaisvaltaisesti. Tämä ei ole edes tavoiteltavaa, sillä puun polton päästöt ovat mukana UNFCCC:n ns. AFOLU (= Agriculture, Forestry and Other Land Use) –sektorin päästöraportoinnissa ja Kioton pöytäkirjan mukaisessa ns. LULUCF (= Land Use, Land Use Change and Forestry) –sektorin päästöraportoinnissa. Kioton pöytäkirjan mukainen raportointi on UNFCCC:n raportointia kattavampi ja siinä on nykyisin myös puutuotteiden päästöt mukana. Puutteena Kioton pöytäkirjan laskennassa on se, ettei se ota huomioon Kioton pöytäkirjan allekirjoittaneiden maiden ulkopuolelta tulevan tuontipuun

päästövaikutuksia huomioon. Yleisesti voidaan kuitenkin sanoa, että nykyinen puun polton päästökerroin ja kansainvälisten sopimusten maankäyttösektorin laskentasäännöt antavat hyvät perusteet metsien käytön kasvihuonekaasupäästöjen arvioimiseksi kansainvälisesti. Enemmän on kyse siitä, kuinka tätä instrumenttia osataan soveltaa siten, että sen antama tieto ohjaa ilmastonmuutoksen hillintää luonnontieteelliset ja oikeudenmukaiset näkökulmat oikealla tavalla huomioiden. Kyse on myös siitä, että poliittiset ohjauskeinot eri maissa eivät vastaa kansainvälisen laskentasääntöjen periaatteita.

Kansainvälisessä sopimuskäytännössä metsien päästövaikutusten vertailuvuotena on vuosi 1990, johon myös energiaperäisten päästöjen kansainväliset vähentämistavoitteet on sidottu. Nykyisessä Kioton pöytäkirjan sopimuksessa (2013–2020) on sovittu, että metsien hiilinielut kehittyneissä maissa pyritään säilyttämään käytännössä vuoden 1990 tasolla. Tämä on poliittinen valinta, jolla ei pyritä vähentämään puun käytöstä vapautuvan hiilidioksidin määrää ilmakehässä eikä myöskään puun käyttöä kehittyneissä maissa, jos niiden metsien hyödyntämisen päästöt asettuvat Durbanissa sovittujen nieluvelvoitteiden raameihin. Tällöin metsien kasvihuonekaasupäästöt eivät lisäänty vertailutilanteeseen nähden, mutta metsien hillintäpotentiaalia ei myöskään pyritä edistämään kehittyneissä maissa.

On mahdollista, että EU:n ilmasto- ja energiapolitiikan päästötavoitteita laajennetaan maankäytön ja metsänhoidon CO₂-päästöt kattaviksi (European Council 2014). Tämä tarjoaa mahdollisuuden hyödyntää metsiä kustannustehokkaalla tavalla ilmastonmuutoksen hillintään. Merkittävää tulee olemaan myös se, miten toteutetaan rakenteellinen sektorijako maankäyttösektorin ja ei-päästökauppasektorin välillä, ja minkälaisiksi taakanjako päästövähennystavoitteissa jakaantuu maiden välillä. Mikäli maankäyttösektori ja ei-päästökauppasektori (kuten liikenne ja maatalouden metaani- sekä dityppioksidipäästöt) muodostavat yhteisen päästö-vähennyssektorin, olisi Suomessa mahdollista tavoitella metsien hiilinielulla kustannustehokkaita keinoja päästöjen vähentämiseksi. Toisaalta metsien hiilinielujen tulevaan kehitykseen sisältyy merkittävää epävarmuutta (ks. kohta 2.3).

Nykyinen järjestelmä ei kannusta lisäämään metsänieluja, vaikka tämä saattaisi olla kustannustehokas tapa tuottaa ilmastohyötyjä lyhyellä aikavälillä. Koska kattoluvut on asetettu suhteessa maiden kokonaispäästöihin, on kannustevaje erityisen selvä taloudeltaan pienissä mutta metsävaroiltaan suurissa maissa, kuten Suomessa. Järjestelmä, jossa rajoitettaisiin metsien hiilinielujen hyödynnettävyyttä siten, että rajoitettu osuus hiilinielusta olisi aina luettavissa hyväksi, kannustaisi maita kasvattamaan hiilinieluaan.

7. TUTKIMUSTARPEET

Metsien käytön ilmastovaikutusten tutkimustarpeet voidaan jakaa kahteen pääryhmään:

- a) Kokonaiskuvan muodostaminen keskeisistä kysymyksistä, mikä auttaisi ymmärtämään eri prosessien ja toimien vaikutusten suuruusluokan ja aikaskaalan
- b) Tieteellisesti erityiskysymyksiin paneutuva tutkimus aloilla, joilla tieteellinen ymmärrys on puutteellista tai vähäistä ja joiden merkitys kokonaiskuvan muodostumisen kannalta nähdään tärkeäksi.

Lähtökohtana pitäisi olla, että nämä tutkimukselliset pääryhmät olisivat nykyistä paremmin vuorovaikutuksessa toistensa kanssa. Sama koskee erilaisten tutkimusryhmien välistä vuorovaikutusta. Tavoitteena tulisi olla luonnontieteellisesti ja taloustieteellisesti pätevän mallinnukseen perustuvan kokonaiskehikon luominen, joka saa tarvittavan lähtötiedon ja mallinnusperustan erityiskysymyksiin paneutuvan tutkimusten tulosten kautta. Formaali mallinnus on tässä suhteessa välttämätöntä, koska se tarjoaa välineistön keskeisiin metsä–tuote-ilmasto-vaikutussuhteisiin liittyvien oletusten läpinäkyvään käsittelyyn.

Hankkeen alussa tehty kysely asiantuntijoille paljasti, että asiantuntijoiden näkemyksissä metsien eri roolista ilmastoasioissa on vielä eroavuutta (Saikku 2015), eikä näiden erojen kaventaminen ole helppoa edes faktapohjaisten tutkimustulosten kautta. Eroavuudet kiteytyvät jo käsitteisiin liittyviin ajatuksellisiin eroihin. Asiantuntijoiden heuristinen ongelmanratkaisun lähestymistapa perustuu helposti epäformaalin päättelyn ja intuition hyväksikäyttöön silloin kun aihealue ei ole aivan omaa ydintä.

Taloutteen ja tuotteisiin liittyvien vaikutusten mallintamisen 'lisäarvo' luonnontieteellisen mallikehikon päälle on ilmeinen lähtökohta tutkimukselle. Se tuo ilmastonmuutokseen vaikuttavien toimien kustannus- ja hyvinvointiarvioinnin perustan, mahdollistaen näin ohjauskeinojen kustannustehokkuusarvioinnin ja politiikkatoimien suunnittelun (Lintunen ja Uusivuori 2015).

Kattavien mallien kehittämiseksi tulisi perustaa Suomeen monitieteinen tutkimuskonsortio, jonka tulisi olla kiinteässä vuorovaikutuksessa muihin kansainvälisiin tutkimusryhmiin. Se määrittelisi mihin kysymyksiin mallin tulee ainakin pystyä antamaan selvennystä.

Selvityksen kautta on noussut seuraavat lähiajan keskeiset tutkimustarpeet:

- Tällä hetkellä on epäselvää minkä kokoista hiilinielua Suomi pystyy ylläpitämään pitkällä aikavälillä. Tutkimuksessa tulisi vertailla eri mallien lähtökohtia ja eroja sekä sisällyttää niihin kaikki Suomen metsänieluun keskeisesti vaikuttavat tekijät (puun käyttö ja eri tuotteiden puun käyttötarpeet, puuston ikäluokkajakauma, muuttuvat kasvu/ilmasto-olosuhteet (maahengitys ja lämpötilan nousu, tyyppi ja muut ravinteet, hiilidioksidipitoisuus, tuhot ja metsänhoitotoimenpiteet).
- Tulevaisuuden metsätalouden pitää pystyä vastaamaan ilmastonmuutoksen haasteisiin. Tutkimuksen, joka selvittäisi puun parhaat käyttökohteet ilmastonmuutoksen hillinnän näkökulmasta, tulee kattaa nykyiset ja kehitettävät tuotteet sekä metsäenergian osana energiatuotantoa.
- Metsien ja niiden käytön ilmastolliset ulkoisvaikutukset, kuten niiden mahdollistamat hiilinielut tulisi ottaa nykyistä paremmin huomioon poliittisten ohjauskeinojen suunnittelussa ja toimeenpanossa. Tämä vaatii kokonaisvaltaisen, prosesseja tarkasti kuvaavien luonnontieteellis-taloudellisen mallikehikon luomista ja hyödyntämistä.

8. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Suomessa puuston ja metsien maaperän muodostama hiilivarasto kasvaa eli metsät toimivat hiilinieluna. Hiilinielu sitoo hiilidioksidia ilmakehästä, ja näin ollen metsämme viilentävät ilmastoa. Tehtyjen tutkimusten ja skenaarioajojen valossa näyttää vahvasti siltä, että Suomen metsät säilyvät huomattavina hiilinieluinä myös lähitulevaisuudessa. Hiilinielun positiivinen tilanne on seurausta metsien ikäluokkarakenteesta, kasvua selvästi pienemmistä hakkuista ja muun muassa typpilaskeuman, kasvavan ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden ja lämpötilan kiihdyttämästä kasvusta.

Eri mallitarkastelujen tulokset hakkuiden lisäämisen ja nielujen kehityksen suhteesta vaihtelevat. Luonnonvarakeskuksen MELA-malli tarkastelujen perusteella Suomen metsien hiilinielun ennustetaan kasvavan seuraavien vuosikymmenien aikana, vaikka metsiemme käyttöä lisättäisiin nykyisestä tasosta jonkin verran. Hiilinielun kehittymisestä vuosisadan jälkipuoliskolla on vaikea ennustaa. Epävarmuutta aiheuttavat ilmastonmuutos seurauksineen ja metsien tulevaisuuden hyödyntämistä.

Metsäraaka-aineen hiilineutraalisuudella tarkoitetaan yleensä sitä, että hakkuiden kautta metsään synnytetty hiilivelka on palautunut uuden kasvun hiilensidonnan seurauksena. Metsikkötasolla hakkuiden myötä vapautuva hiili sitoutuu takaisin kasvillisuuteen käytetyn kiertoajan mukaan. Kiertoaika vaihtelee

suuresti kasvupaikasta ja puulajista riippuen. Erilaisten puun hyödyntämistapojen volyymit vaikuttavat puuston kasvun ohella siihen kuinka hiilitase kehittyä valtakunnan tasolla. Hakuut hidastavat hiilivaraston kasvua. Koska vain pieni osa Suomen metsistä käsitellään vuosittain, koko metsäalan hiilitaseessa ei näy hakkuiden aiheuttamaa hiilivajetta, vaan metsien hiilivaranto kasvaa.

Hakkuiden synnyttämän metsän hiilivelan palautumisnopeus, joka muodostuu metsien kasvusta ja tuotteiden hiilen varastointiajasta, luo perustan biomassan hyödyntämisen ilmastovaikutusten tarkasteluille. Puutuotteiden ja metsäenergian ilmastovaikutusten arvioinnissa tulee ottaa huomioon myös niistä saadut korvaushyödyt kun niillä korvataan vaihtoehtoisia tuotteita ja energioita. Vertailussa tulee ottaa huomioon tuotteiden ja energioiden elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt. Puutuotteiden ja metsäenergian ilmastovaikutukset ja niiden mahdolliset ilmastohyödyt muuttuvat ajansuhteen. Ilmastohyötyjen toteutumisen ajankohdalla tarkoitetaan ajallista taitekohtaa, jossa puutuotteiden ja metsäenergian käytön kasvihuonekaasuvaikutukset ilmaston lämpenemiseen ovat pienemmät kuin kilpailevien tuotteiden ja energioiden ilmastovaikutukset.

Puutuotteiden ja metsäenergian ilmastovaikutuksien arviointiin vaikuttavat käytettävä laskentatapa ja vertailutilanne, johon metsien hyödyntämisen aiheuttamaa hiilitasemuutosta metsässä verrataan. Eri tutkimuksissa on käytetty erilaisia laskentatapoja ja vertailutilanteita, mikä on ollut omiaan sekoittamaan johtopäätöksiä puun käytön ilmastovaikutuksista. Metsikkötason tarkastelut hahmottavat yksittäisen toimen ilmastovaikutuksia ja maakohtaiset tarkastelut antavat näkemystä metsien käyttötason muutosten ilmastovaikutuksista. Metsän hiilitaseen kehityksen vertailutilanne ilman hakkuutoimia vastaa luonnontieteellistä perustaa, kun arvioidaan ihmisten toimien vaikutusta ilmastoon. Toisaalta, kyse on enemmän poliittisesta valinnasta, jos lähtökohdaksi asetetaan metsän hiilitaseen palautuminen hakkuita edeltäneeseen tilanteeseen. Tällöin ilmastomuutoksen hillinnän toimenpiteiden tehokkuutta arvioidaan johonkin hyväksytyyn vertailutilanteeseen nähden. Tämä on ollut toistaiseksi myös kansainvälisen ilmastopöytäkirjan lähtökohdana.

Mallitarkastelut, joissa arvioidaan metsien käyttötason muutosta nykytilanteeseen verrattuna, osoittavat, että metsiemme hyödyntämisen lisääminen nykytasosta ei tuota ilmastohyötyjä lyhyellä aikavälillä (10–30 vuotta) nykyisen kaltaisella metsäteollisuuden tuotantotoiminnalla ja energiankäytöllä. Ilmastohyötyjen suuruudesta ei ole varmuutta vielä keskipitkällä aikavälilläkään (50–100 vuotta). Näin vaikka hiilinielu jatkaisi kasvua lisähakkuiden jälkeenkin. Metsien lisäkäytön ilmastohyötyjen viivästyminen johtuu ennen kaikkea siitä, että metsän hiilinielu on lisähakkuiden seurauksena pienempi kuin vertailutilanteessa, jossa metsän käyttöä ei lisätä. Hiilinielun menetys on selvästi suurempi kuin lisähakuilla talouskäyttöön ohjattu hiilimäärä.

Rakennuskäyttöä lukuun ottamatta metsästä otetun puun hiili vapautuu enimmäkseen alle 20 vuodessa. Energiakäytössä puupolttoaineen käytöstä vapautuu selvästi enemmän hiilidioksidipäästöjä tuotettua energiayksikköä kohti kuin fossiilisia polttoaineita käytettäessä. Metsien lisäkäyttö johtaa ilmakehän hiilidioksidipäästöjen kohoamiseen, jonka paikkaaminen uuden kasvun hiidensidonnalla vaatii Suomessa pitkän ajan puuston hitaasta kasvusta johtuen. Samaan aikaan ilmastomuutoksen hillintä edellyttäisi kasvihuonekaasupäästöjen merkittäviä vähennystoimia lyhyellä aikavälillä (10–30 vuotta). Metsien lisähakuut eivät tue tätä tavoitetta ja suurempi ilmastohyöty saavutettaisiin mahdollisesti vielä keskipitkällä aikavälillä pitäytymällä nykyisellä ainespuun hakkuutasolla ja kasvattamalla hiilinielua. Toisaalta intensiivinen (mutta määrältään kestävä) metsänhoito pystyisi tuottamaan suurempia metsäbiomassamääriä, jolla voidaan korvata pitkällä aikavälillä suuremman säteilypakotteen aiheuttamia tuotteita ja energioita. Tutkimukset eivät anna vielä selkeää kuvaa siitä kuinka metsän käytön lyhyen ja keskipitkän aikavälin ilmastohaitat ja pitkällä aikavälillä saavutettavat ilmastohyödyt asettuvat toisiinsa nähden ilmastomuutoksen hillinnän kannalta.

Metsien ainespuun käyttöä voidaan perustella parhaiten ilmastosyistä, jos metsäteollisuuden tuotteilla pystytään korvaamaan elinkaari vaikutuksiltaan suuripäästöisiä tuotteita ja niiden hiilisisältö pystytään pitämään pitkään käytössä. Vasta tuotteen hylkäysvaiheessa puun hiilisisältö ohjattaisiin energiantuotantoon. Tällöin olisi mahdollista saavuttaa ilmastohyötyjä jo lyhyellä aikavälillä. Puun energiakäytön lisääminen tuottaa myös ilmastohyötyjä lyhyellä aikavälillä, jos energiakäyttöön ohjataan nopeasti hajoavia hakkuutähteitä ja ainespuutta pienempiä harvennuspuita runkopuun sijaan. Niiden hyödyntämismäärät ovat kuitenkin suhteellisen pieniä. Joutomaiden ja maatalouskäytön ulkopuolelle jääneiden peltojen metsittäminen aiheuttaa välittömästi ilmastohyötyjä. Pitkällä aikavälillä fossiilisten polttoaineiden korvaaminen metsäenergialla tuottaa ilmastohyötyjä.

Yhteiskunnan pyrkimys vähähiilisyteen ja teknologian kehitys uusine tuotteineen muuttaa puutuotteiden ja metsäenergioiden korvaushyötyjä vaihtoehtoisiiin tuotteisiin ja energioihin nähden tulevaisuudessa. Metsäenergian ilmastohyödyt ovat vaikeammin saavutettavissa tulevaisuuden vähähiilisessä maailmassa. Toisaalta uusien puutuotteiden (esim. nanosellu) käytöllä voidaan saavuttaa tulevaisuudessa huomattavia ilmastokorvaushyötyjä esimerkiksi teräksen korvaamisessa.

Hiilitaseen kehittymisen lisäksi metsät vaikuttavat ilmastoon albedon (heijastuvan auringon säteilyn määrä) ja puiden aerosolivaikutusten kautta. Albedoon ja aerosolien muodostumiseen voidaan vaikuttaa puulajien valinnalla ja metsän käsittelytoimenpiteillä. Tällä hetkellä on kuitenkin vielä ennen aikaista sanoa kuinka metsämme albedo- ja aerosolivaikutukset kokonaisuudessaan vaikuttavat ilmastoon. Nämä ja puun polton pienhiukkaset ja mustan hiilen päästöt kuitenkin pitää ottaa huomioon kun puhutaan metsien ja niiden käytön ilmastovaikutuksista. Tutkimusten perusteella näyttää siltä, ettei pelkän hiilen ilmastovaikutuksen huomioiminen takaa ilmaston kannalta parasta mahdollista metsien käsittelyä ja käyttöä.

Nykyisessä ilmastopimuksessa päästövähennystoimia verrataan vuoden 1990 päästötilanteeseen ja samalla metsien hiilinielut kehittyneissä maissa pyritään säilyttämään käytännössä vuoden 1990 tasolla. Metsien käytöstä vapautuvat päästöt ja niiden vaikutukset hiilinieluun raportoidaan maankäytön sektorissa (LULUCF), joiden päästöjen osuus on vajaa 10 % maailman arvioiduista kasvihuonekaasupäästöistä. Metsäsektorin päästöt syntyvät nykyisin etenkin trooppisen alueiden metsäkadon seurauksena, jonka pysäyttäminen on kansainvälisen maankäyttösektoriin kohdistuvan ilmastomuutoksen hillintätöiden ensisijainen kohde. Tässä on edistytty viime vuosina. Jos metsien käytön ja hiilinielujen käsittely- ja raportointikäytäntö jatkuu tulevissa ilmastopimuksessa nykyisen kaltaisena, mallitarkastelut osoittavat yhtenäisesti, että Suomen metsien suunniteltu ilmasto- ja energiastrategian mukainen metsähakkeen lisäkäyttö ei vaaranna poliittisten ilmastotavoitteidemme toteutumista ainakaan lyhyellä aikavälillä. Mallitarkasteluihin liittyy kuitenkin puutteita, jotka näkyvät hiilinielujen kehittymisennusteiden epävarmuuden kasvuna mentäessä kauemmaksi nykyhetkestä.

Nykyisen ilmastopimuksen pelisäännöstö ei juuri kannusta metsien hiilinielujen kasvattamiseen. Tältä osin järjestelmän palkitsevuutta tulisi kehittää, mutta se ei saa johtaa fossiilisten polttoaineiden päästövähennyshalukkuuden pienenemiseen.

Jatkon kannalta olisi tärkeää tukea monitieteinen tutkimustoiminnan synnyttämistä metsien hyödyntämisen ilmastovaikutusten selvittämiseen. Sen tulisi tähdätä kokonaiskuvan kirkastamiseen samalla kun siihen integroitaisiin erityiskysymyksiin paneutuva tutkimus. Arviointikehikon tulisi kattaa ilmastonäkökohtien lisäksi taloudelliset ja sosiaaliset vaikutukset sekä muut ympäristönäkökohdat.

KIRJALLISUUS

AEBIOM (European biomass association) 2015. AEBIOM Statistical report 2015 – European bioenergy outlook. European biomass association, Brussels.

Agostini, A., Giuntoli, J., Boulamanti A., Marelli. L (ed.) 2013. Carbon accounting of forest bioenergy. Conclusions and recommendations from a critical literature review. JRC technical reports. Report EUR 25354 EN. JRC, Italy.

Asikainen, A., Ilvesniemi, H., Sievänen, R., Vapaavuori, E., Muhonen, T. 2012. Bioenergia, ilmastonmuutos ja Suomen metsät. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 240.

den Elzen, M.G.J., Olivier, J.G.J., Höhne, N., Janssens-Maenhout 2013. Countries' contributions to climate change: effect of accounting for all greenhouse gases, recent trends, basic needs and technological progress. *Climate Change*, vol 121, 2:397-412.

Environment Canada 2015. National inventory report 1990–2013: Greenhouse gas sources and sinks in Canada. (Based on data provided by Natural Resources Canada.) Katso myös <http://www.nrcan.gc.ca/forests/fire-insects-disturbances/shape/16552>

European Council 2014. 2030 climate and energy policy framework. EUCO 169/14. Bryssels.

Cherubini, F., Bright, R.M., Strømman, A.H. 2012. Site-specific global warming potentials of biogenic CO₂ for bioenergy: contributions from carbon fluxes and albedo dynamics. *Env. Res. Let* 7:1-11.

Ekholm, T., Honkatukia, J., Koljonen, T., Laturi, J., Lintunen, J., Pohjola, J. & Uusivuori, J. 2015. EU:n 2030 ilmasto- ja energiakehitys – arvio LULUCF-sektorin sisällyttämisen mahdollisuuksista ja ristiriidoista Suomelle. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 6/2015.

FAO 2010. Global Forest Resources Assessment. FAO Forestry Paper 163.

Haakana, M., Ollila, P., Regina, K., Riihimäki, H., Tuomainen, T. 2015. Menetelmä maankäytön kehityksen ennustamiseen - Pinta-alojen kehitys ja kasvihuonekaasupäästöt vuoteen 2040. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 51/2015. Luonnonvarakeskus, Helsinki.

Helin, T., Sokka, L., Soimakallio, S., Pingoud, K., Pajula, T. 2013. Approaches for inclusion of forest carbon cycle in life cycle assessment – A review. *Glob Chang Biol Bioenergy* 5:475–486.

Holmgren K., Kirkinen J. & Savolainen I. 2006. The climate impact of energy peat utilisation – comparison and sensitivity analysis of Finnish and Swedish results. Swedish Environmental Research Institute (IVL). IVL-report B 1681. Stockholm. 48 s. + app.

Holtmark, B. 2012a. The outcome is in the assumptions: analyzing the effects on atmospheric CO₂ levels of increased use of bioenergy from forest biomass. *GCB Bioenergy* 5(4):467-473.

Holtmark, B. 2012b. Harvesting in boreal forests and the biofuel carbon debt. *Climatic Change* 112(2): 415-428.

IPCC 2011. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P.

Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

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. Cambridge University Press, Cambridge (UK).

IPCC 2014. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge (UK).

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*.

Kallio, M., Salminen, O., Sievänen, R. 2014. Low Carbon Finland 2050 -platform: skenaariot metsäsektorille. *Metlan työraportteja* 308.

Kalliokoski, T., Repo, A. 2015. Mitä metsämallit kertovat Suomen metsien hiilinielun tulevasta kehityksestä? Osa 2 julkaisussa Seppälä, J., Vesala, T. ja Kanninen, M. (toim.): *Metsien hyödyntäminen ja ilmastomuutoksen hillintä*. Suomen ilmastopaneelin raportti 4/2015.

Monni, S., Korhonen, R., Savolainen, I. 2003: Radiative forcing due to anthropogenic greenhouse gas emissions from Finland – Methods for estimating forcing of a country or an activity. *Environmental Management* 31(3).

Nikinmaa, E., Kalliokoski, T., Minkkinen, K., Matthies B.D, Bäck, J., Gao, Y., Janasik-Honkela, N., Hukkinen, J.I., Kallio, M., Kuusinen, N., Mäkelä, A., Mogensen, D., Peltoniemi, M., Sievänen, R., Zhou, L., Zhou, P., Vanhatalo, P., Valsta, L., Welp, M., Berninger, F. 2015. A wide radiative forcing assessment shows sustained climate cooling of managed boreal forests. *Lähetetty tarkastettavaksi Science lehteen*.

Kauppi, P.E., Ausubel, J. H., Fang, J., Mather, A., Sedjo, R., Waggoner, P. E. Returning forests analyzed with the forest identity. *PNAS* 103 (46): 17574–17579, doi: 10.1073/pnas.0608343103

Kilpeläinen, A., Strandman, H., Kellomäki, S., Seppälä, J. 2013. Assessing the net atmospheric impacts of wood production and utilization. Forthcoming in the *Journal of Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*

Koivisto, P. 1959. Kasvu- ja tuottotaulukoita. Summary: Growth and yield tables. . *Communications Instituti Forestalis Fenniae* 51/8, 1-49.

Koskela, S., Korhonen, M.-R., Seppälä, J., Häkkinen, T., Vares, S. 2011. Materiaalinäkökulma rakennusten ympäristöarvioinnissa. *Suomen ympäristökeskuksen raportteja* 16.

Kellomäki, S., Kilpeläinen, A., Alam, M. 2013. Effects of Bioenergy Production on Carbon Sequestration in Forest Ecosystems. In: Kellomäki, S. Kilpeläinen, A., Alam, M. (eds.). *Forest BioEnergy Production Management, Carbon sequestration and Adaptation* . pp 125-158. Springer.

Laturi, J., Lintunen, J., Pohjola, J., Uusivuori, J. (2015). Taloustieteellinen näkökulma metsien käyttöä ohjaavaan politiikkaan: Tuloksia FinFEP-mallilla. Teoksessa Uusivuori, Hilden, Lehtonen, Rikkinen, Makkonen (toim.) 2015. Poliitikka ja luonnonvarat. Luonnonvara ja biotalouden tutkimus 20/2015.

Lippke, B., Oneil, E., Harrison, R., Skog, K., Gustavsson, L., Sathre R. 2011. Life cycle impacts of forest management and wood utilization on carbon mitigation: knows and unknowns." Carbon Management 2(3): 303-333.

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.

Laaksonen, A., Kupiainen, K., Kerminen, V.-M., Karvosenoja, N., Pietikäinen, J.-P., Savonlahti, M., Paunu, V.-V., Savolainen, I., Airaksinen, M., Järvelä, M., Kokko, K., Kulmal, M., Seppälä, Taaas, P. 2014. Musta hiili ilmastopakotteena: päästöjen ja mahdollisten päästövähennysten globaalit ja laueelliset vaikutukset. Ilmastopaneelin raportteja 3/2014.

Lehtonen, A. 2009. Suomen kasvihuonekaasuinventaario ja metsien merkitys hiilitaseelle. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2009 : 272-277.

Lucier, A., Miner, R. 2010. Biomass Carbon Neutrality in the Context of Forest-Based Fuels and Products. (www.eforester.org/fp/al_lucier.ppt)

Luke (Luonnonvarakeskus) 2015. Tilastot. <http://www.metla.fi/metinfo/tilasto>

Lintunen, J., Uusivuori, J. 2015. Taloustieteellisen mallinnuksen rooli metsiin ja metsien käyttöön kohdistuvien ilmastomuutoksen hillintätoimien arvioinnissa. Osa 3 julkaisussa Seppälä, J., Vesala, T. ja Kanninen, M. (toim.): Metsien hyödyntäminen ja ilmastomuutoksen hillintä. Suomen ilmastopaneelin raportti 4/2015.

Marklund, L.G. 1988. Biomassafunktioner för tall, gran och björk i Sverige. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogstaxering, rapport 45, 1-73.

Masera, O.R., Garza-Caligaris, J.F., Kanninen, M., Karjalainen, T., Liski, J., Nabuurs, G.J., Pussinen, A., de Jong, B.H.J., Mohren, G.M.J. 2003. Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach. *Ecological Modelling* 164, 177-199.

Matthews, R., Sokka, L., Soimakallio, S., Mortimer, N., Rix, J., Schelhaas, M.-J., Jenkins, T., Hogan, G., Mackie, E., Morris, A., Randle, T. 2014. Review of literature on biogenic carbon and life cycle assessment of forest bioenergy. Final Task 1 report, DG ENER project, 'Carbon impacts of biomass consumed in the EU'. Forest Research: Farnham

Matthews, R., Mortimer, N., Lesschen, J. P., Lindroos, T.J., Sokka, L., Morris, A., Henshall, P., Hatto, C., Mwabonje, O., Rix, J., Mackie, E., Sayce, M. 2015. Carbon impact of biomass consumed in the EU: quantitative assessment. Final project report, project: DG ENER/C1/427. Forest Research, Farnham.

Meinshausen, M., Meinshausen, N., Hare, W., Raper, S.C.B., Frieler, K., Knutti, R., Frame, D.J., Allen, M.R. 2009. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 °C. *Nature* 458, 1158–1162.

Metsätilastollinen vuosikirja 2010. (toim. E. Ylitalo) Finnish statistical yearbook of forestry. Metsäntutkimuslaitos, Vantaa.

Metsäntutkimuslaitos 2011. Metsätilastollinen vuosikirja 2011. Metsäntutkimuslaitos, Vantaa.

Miner, R. A., Abt, R.C., Bowyer, J.L., Buford, M.A., Malmshemer, R.W., O’Laughlin, Oneil, J.E.E., Sedjo, R.A., E. Skog, K.E. 2014. Forest Carbon Accounting Considerations in US Bioenergy Policy. *J. For.* 112(6):591–606.

Myllyntaus, T., Mattila, T., & Ståhl, M. 1998. Decline or increase? The volume of timber in the Finnish forests during the 19th and 20th century. XII International Economic History Congress, Session C43, Seville.

Nabuurs, G.-J., Linder, M., Verkerk, P.J., Gunia, K., Deda, P., Michalak, R., Grassi, G. 2013. First signs of carbon sink saturation in European forest biomass. *Nature Climate Change* 3, 792–796 doi:10.1038/nclimate1853.

Nabuurs, G.-J., Delacote, P., Ellison, D., Hanewinkel, M., Lindner, M., Nesbit, M., Ollikainen, M., Savaresi, A., Hetemäki, L. (ed.) 2015. A new role for forests and the forest sector in the EU post-2020 climate targets. *EFI from science policy* 2.

OECD 2012. OECD Environmental Outlook to 2050 The Consequences of Inaction: The Consequences of Inaction. Paris.

Ohrel, S. 2012. Accounting Framework for Biogenic CO₂ Emissions. Presentation at the Western Forest Economists.. June 12, 2012.

Packalen, T., Salminen, O., Hirvelä, H., Härkönen, K., Lempinen, R., Anola-Pukkila, A. 2015. Aines- ja energiapuun hakkuumahdollisuudet. Pp-esitys. Valtakunnan metsien inventoinnin (VMI 11) tulosten julkistamistilaisuus 18.3.2015.

Palo, M., Lehto, E 2012. Private or Socialistic Forestry? Forest Transition in Finland vs. Deforestation in the Tropics. Springer. 461 s.

Peltola, A. 2014. Metsäteollisuuden ulkomaankauppa, joulukuu 2013. – Metsätaloustiedote. Metsätalustollinen tietopalvelu. Metsäntutkimuslaitos

Petersen, A.K., Solberg, B. 2005. Environmental and economic impacts of substitution between wood and alternative materials: a review of microlevel analyses from Norway and Sweden“. *Forest Policy and Economics* 7(3): 249-259.

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

Pingoud, K., Ekholm, T., Soimakallio, S. and Helin, T. 2015. Carbon balance indicator for forest bioenergy scenarios. *GCB Bioenergy* (2015), doi: 10.1111/gcbb.12253.

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. *Bioenergy* 4:202-2012.

Repo, A., Ahtikoski, A., Liski, J. 2015. Cost of turning forest residue bioenergy to carbon neutral. Forest Policy and Economics. Forthcoming.

Ros, J.P.M., van Minnen, J.G., Arets, E.J.M.M. 2013. Climate effects of wood used for bioenergy. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague/Bilthoven.

Saikku, L. 2015. Asiantuntijakysely metsien hyödyntämisen ilmastovaikutuksista – kyselyasetelma ja vastusten yhteenveto. Osa 1 julkaisussa Seppälä, J., Vesala, T. ja Kanninen, M. (toim.): Metsien hyödyntäminen ja ilmastomuutoksen hillintä. Suomen ilmastopaneelin raportti 4/2015.

Sarkkola, S., Vasander, H., Korhonen, R., Korpe, L. 2009. Suoseura 60 vuotta — katsaus Suoseuran historiaan. Suo 60(3–4): 131–148.

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

Seppälä, J., Alestalo, M., Ekholm, T., Kulmala, M., Soimakallio, S. 2014. Hiilineutraalisuuden tavoittelu – mitä se on missäkin yhteydessä. Ilmastopaneelin raportti 2/2014.

Schuur, E.A.G, McGuire, A.D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J.W., Hayes, D.J., Hugelius, G., Koven, C.D., Kuhry, P., Lawrence, D.M., Natali, S.M., Olefeldt, D., Romanovsky, V.E., Schaefer, K., Turetsky, M.R., Treat, C.C., Vonk, J.E. 2015. Climate change and the permafrost carbon feedback. Nature 520, 171–179 doi:10.1038/nature14338.

Sievänen, R., Salminen, O., Lehtonen, A., Ojanen, P., Liski, J., Ruosteenoja, K., Tuomi, M. 2013. 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, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlomer S, von Stechow C, Zwickel T, Minx JC), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

Soimakallio, S., Cowie, A., Brandao, M., Finnveden, g., Ekvall, T. 2015. Attributional life cycle assessment: is a land-use baseline necessary? Int J LCA;20(10):1364-75

Tilastokeskus 2015a. Suomen kasvihuonekaasupäästöt1990–2014. Tilastokeskus, Helsinki.

Tilastokeskus 2015b. Polttoaineiden kasvihuonekaasupäästöt. www.stat.fi/static/media/uploads/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus_2015.xls).

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.

Työ- ja elinkeinoministeriö 2014. Energia- ilmastotiekartta 2050. Parlamentaarisen energy- ja ilmastokomitean mietintö 16. päivänä lokakuuta 2014. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja, Energia ja ilmasto 31/2014.

United Nations 1992. United Nations Framework Convention On Climate Change.

Metsätilastollinen vuosikirja 2010. (toim. E. Ylitalo) Finnish statistical yearbook of forestry. METLA

Zamagni, A., Guinée, J., Heijungs, R., Masoni, P., Raggi, A. 2012. Lights and shadows in consequential LCA. *Int J Life Cycle Assess* 17:904–918.

van Vuuren, D.P., Stehfest, E., den Elzen, M.G.J., van Vliet, J., Isaac, M. 2010. Exploring IMAGE model scenarios that keep greenhouse gas radiative forcing below 3 W/m² in 2100. *Energy Economics* 32: 1105–1120.

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*. doi: 10.1007/s10584-011-0152-3.

Van der Werf, G., Morton, D.C., DeFries, R.S., Olivier, J.G.J., Kasibhatla, P.S., Jackson, R.B., Collatz, G.J. and J. T. Randerson, J.T. 2009. CO₂ emissions from forest loss. *Nature Geosci.* 2, 737–738.

Victor, D.G., Kennel, C. F. 2014. Ditch the 2 °C warming goal. *Nature* 514:30-31.

WBCSD (World Business Council for Sustainable Development) 2015. Recommendations on Biomass Carbon Neutrality. WBCSD, Geneva.

Wieder, W.R., Cory C. Cleveland, C.C., Kolby, Smith, W.K., Todd-Brown, K., 2015. Future productivity and carbon storage limited by terrestrial nutrient availability *Nature Geoscience* 8: 441-445.