

4.3 Metsien hiilitaseet

Risto Sievänen, Aleksi Lehtonen, Paavo Ojanen ja Olli Salminen

Metsien hiilivarastot ovat puissa ja muussa kasvillisuudessa sekä maaperässä. Metsät ovat hiilen nielu, jos varastot kasvavat ja niiden vähetessä hiilen lähde. Suomen metsien puustossa hiiltä on noin 820 Tg (Liski ym. 2006), kivennäismaiden maaperässä 921 Tg (Ilvesniemi ym. 2002) ja soiden turpeessa 5600 Tg (Minkkinen 1999). Puuston kasvussa hiiltä sitoutuu biomassaan ja puista tuleva karikke (kuolleet lehdet, neulaset, oksat ja juuret sekä kokonaiset kuolleet puut) kartuttaa maaperän hiilivarastoja. Puuston hiilivaraston vaihtelu on tällä hetkellä määrällisesti tärkein metsien hiilitaseeseen vaikuttava tekijä. Maaperän varastomuutokset ovat pienemmät, mutta sen sisältämät isot hiilivarastot voivat olosuhteista riippuen orgaanisen aineen hajotustoiminnan kiihtyessä aiheuttaa suuriakin päästöjä. Kivennäismaiden ja soiden maaperän hiilivarastojen kokoero johtuu karikkeen erilaisesta hajoamisnopeudesta: suon märissä, vähähappisissa oloissa kasvinosat maatuvat hyvin hitaasti kivennäismaihin verrattuna, mikä on johtanut suureen suomaiden hiilivarastoon. Aluskasvillisuudella on yleensä pieni osuus kivennäismaiden hiilenkierrossa, mutta suometsissä sen vaikutus voi olla merkittävä.

Kasvihuonekaasuraportoinnissa YK:n ilmastopöytäkirjaa varten metsien hiilivarastojen muutoksia seurataan vuosittain (www.metla.fi/ghg/index-su.htm). Viimeisen viiden vuoden aikana puuston nielu on ollut 10 Tg C /v. Kivennäismaiden maaperän noin 2 Tg C /v nielu ja ojitettujen soiden maaperän vastaavan kokoinen lähde ovat likimääräisesti kumonneet toisensa. Näin ollen metsät ovat olleet kokonaisuutena noin 10 Tg C /v nielu.

Puunkäyttö vaikuttaa metsien kasvihuonekaasutaseisiin kahdella tavalla. Ensinnäkin hakkuut vaikuttavat suoraan puuvaraston kokoon ja sen kasvuun. Toiseksi hakkuut ja hakkutähteiden korjuu energiapuuna vaikuttavat maaperään tulevaan karikesyötteeseen, joka on hiilivarastoja kasvattava tekijä. Tässä alaluvussa tarkastellaan puun käytön skenaarioiden (Alhainen, Maltillinen ja Suurin kestävä) vaikutusta metsien hiilitaseeseen. Lisäksi tarkastellaan energiapuun käytön (Risupaketti+/Risupaketti-) ja ilmastomuutoksen vaikutuksia erikseen.

4.3.1 Menetelmä

Menetelmä, jolla hiilivarastojen muutoksia arvioitiin, oli pääpiirteissään sama, jota käytetään kasvihuonekaasuinventaariorissa (Greenhouse gas emissions in Finland ... 2011). Puuston hiilivaraston muutokset lasketaan biomassafunktioiden avulla puustotiedoista. Maaperän hiilivaraston muutokset puolestaan arvioidaan puusto- ja puuston poistumatietojen avulla. Laskennassa otetaan huomioon maaperään tuleva karikesyöte, orgaanisen aineen hajotus kivennäismailla sekä ojitettujen soiden emissiokertoimet. Menetelmää on selostettu julkaisussa Sievänen ym. (2007).

Kasvihuonekaasuraportoinnissa puuston lähtötiedot saadaan Valtakunnan metsien inventoinnin mittauksista ja hakkuutilastoista. Skenaariotarkasteluamme varten lähtötiedot tulivat kuitenkin MELA-laskelmista (alaluku 4.1). MELA-laskelmat tehtiin Etelä- ja Pohjois-Suomelle (raja kulkee noin Valtimo – Kalajoki linjalla) erikseen, mikä vastaa kasvihuonekaasuinventoinnin aluejakoa. MELA-laskelmat koskivat puuntuotannossa olevia (ensisijainen tai rajoitettu) sekä suojeltuja metsä- ja kitumaita. Kokonaispinta-ala oli 20,8 milj. ha, josta kivennäismaita oli 16,1 milj. ha ja ojitettuja soita 4,7 milj. ha.

Ilmastonmuutoksen skenaariossa vuotuinen keskilämpötila, sademäärä ja ilman hiilidioksidipitoisuus muuttuivat IPCC:n skenaarion A1B mukaisesti (alaluku 4.1).

Kivennäismailla orgaanisen aineen hajoamisen arviointiin käytettiin Yasso07 -mallia (Tuomi ym. 2009, 2011). Siinä hajoamisnopeus riippuu vuoden keskilämpötilasta, kuukausittaisten lämpötilojen vaihteluvälistä sekä vuotuisesta sadannasta. Yasso07 -malli tarvitsee arvion maaperän hiilivaraston määrästä laskelman alkuarvoksi. Varaston alkuarvo otettiin kasvihuonekaasuraportoinnin mukaisista laskelmista vuodelle 2007. Alkuvarastoa lisättiin 7 %, minkä arvioitiin ottavan huomioon skenaarioiden alun kasvihuonekaasuraportointia suuremman karikesyötteen.

Ojitettujen soiden maaperän hiilivaraston vuotuinen muutos lasketaan karikesyötteen ja turpeen hajoamisen erotuksena. Hajotus arvioidaan suotyypeittäisten (viisi eri suotyyppiä) emissiokertoimien ja suotyyppien pinta-alojen avulla (Greenhouse gas emissions in Finland ... 2011). Kasvihuonekaasuraportoinnissa turpeen hajoaminen (emissiokerroin) ei riipu puuston määrästä tai ilmasto-oloista vaan ainoastaan turvekangastyypistä. Skenaariolaskelmissamme emissiokertoimien riippuvuus puuston määrästä ja ilmasto-oloista otettiin kuitenkin huomioon, jotta laskelmiin perustuvat kasvihuonekaasuarviot olisivat turvemaiden maaperän suhteen yhdenmukaiset muiden hiilivarastoarvioiden kanssa. Ojanen ym. (2010) ovat tarkastelleet emissiokertoimien riippuvuutta puuston keskitilavuudesta ja vuoden keskilämpötilasta. Tämän tutkimuksen perusteella 10 m³ keskitilavuuden lisäys nostaa emissiota 0,8 %:a ja yhden asteen lisäys keskilämpötilassa 13 %:a. Jos tilavuus tai keskilämpötila vähenevät emissiokertoimet vähenevät vastaavasti. Laskelmissamme näitä kertoimia sovellettiin siten, että skenaarioiden alussa (vuosi 2007) emissiokertoimet olivat kasvihuonekaasuraportoinnin mukaiset. Jos ojitettujen soiden keskitilavuus tai koko maan keskilämpötila muuttuivat skenaarioiden alun tilanteesta, emissiokertoimet muuttuivat edellä kuvatun mukaisesti.

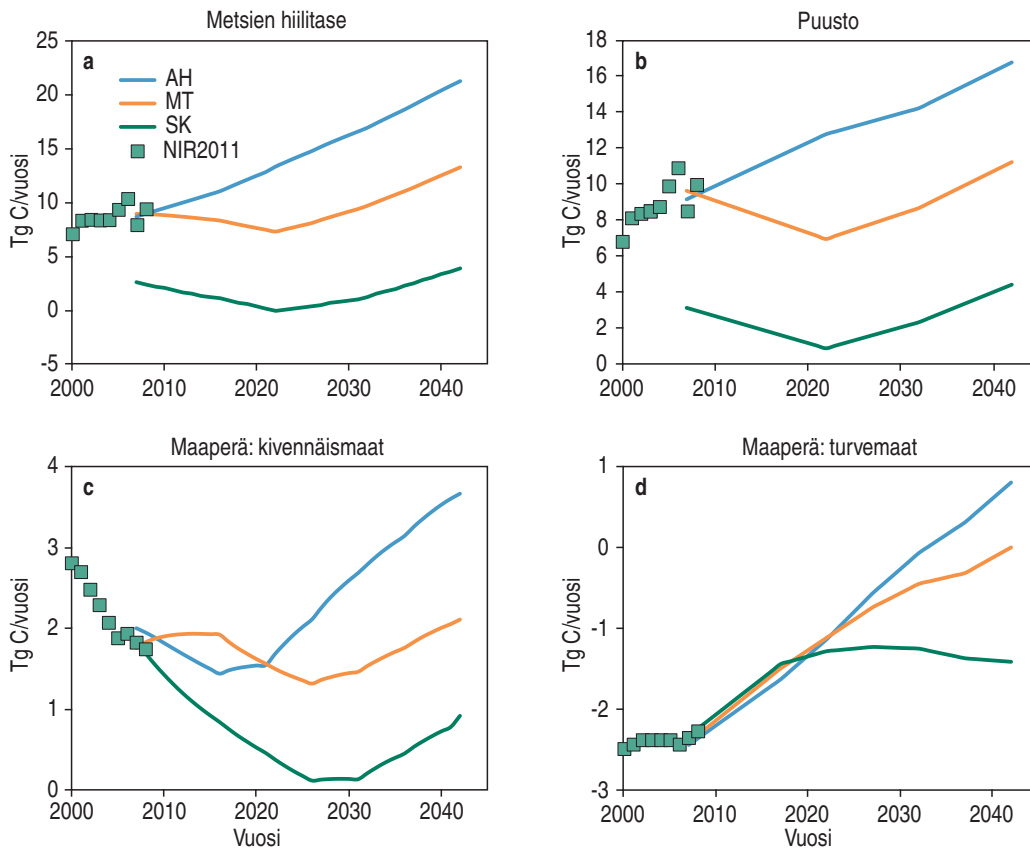
4.3.2 Puunkäyttöskenaarioiden vaikutus

Kaikissa skenaarioissa puusto on koko tarkastelujakson ajan hiilen nielu (Kuva 4.3.1b). AH ja MT skenaarioissa puuston kasvu on selvästi suurempi kuin poistuma, joten puuvarat lisääntyvät merkittävästi. Tämä näkyy puuston selkeänä nieluna (Kuva 4.3.1b). Nielu kasvaa ajan mukana, koska puuston kokonaiskasvu lisääntyy, mutta poistuma säilyy vakiotasolla (ks alaluku 4.2). SK skenaariossa puuston kasvu on vain hieman suurempi kuin poistuma ja puusto on pieni nielu (Kuva 4.3.1b).

Kivennäismaiden maaperän nielu vähenee alussa kaikissa skenaarioissa (Kuva 4.3.1c), koska maaperässä on vanhaa 1990-luvun lopun hakkuiden tuottamasta korkeasta karikemäärästä periytyvää varastoa, joka hajoaa. Tämä nielu kääntyy 10–20 vuodessa kasvuun, koska lisääntyvä puusto tuottaa yhä enemmän kariketta.

Ojitettujen soiden maaperän varastomuutokset eivät juuri eroa toisistaan skenaarioiden välillä ennen vuotta 2020 (Kuva 4.3.1d). Suot pysyvät hiilen lähteenä, lukuun ottamatta AH skenaariota, jossa ne muuttuvat skenaariojakson loppupuolella nieluksi. MT skenaariossa soiden hiililähde saavuttaa jakson lopussa nollatason. Ojitetuista soista vapautuvan hiilen määrä kuitenkin pienenee kaikissa skenaarioissa. Tämä johtuu puuston lisääntyneestä kariketuotoksesta (Kuva 4.3.2), joka kasvat-
 taa maaperän varastoa. SK skenaariossa kariketuotos on niin vähäinen vuoden 2025 jälkeen, että ojitettujen soiden maaperän lähde ei vähene.

MT skenaariossa on AH skenaariota noin 14 milj. m³ suuremmat vuotuiset hakkuut. Ne aiheuttavat selvät erot metsien hiilitaseissa (Kuva 4.3.1a). Vuotuisten nielujen ero kasvaa skenaariojakson loppua kohden ollen suurimmillaan yhteensä noin 9 Tg C (Kuva 4.3.1a), josta suurin osa, runsaat 5 Tg C, on puustossa (Kuva 4.3.1b).



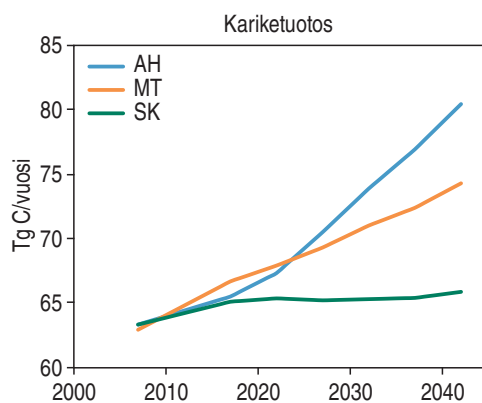
Kuva 4.3.1. Metsien (= kaikki varastot yhteensä, a), puuston (b), kivennäismaiden (c) ja ojitettujen soiden maaperän (d) hiilivarastojen muutokset eri skenaarioissa; Alhainen (sininen viiva), Maltillinen (oranssi viiva) ja Suurin kestävä (vihreä viiva) puun käyttö. Vihreät neliöt ovat kasvihuonekaasuraportoinnin vuotuiset arviot vuosina 2000–2009 vuonna 2011 tehdystä inventaariosta (Greenhouse gas emissions in Finland 2011). Positiiviset arvot tarkoittavat nielua ja negatiiviset lähdettä.

4.3.3 Kariketuotos

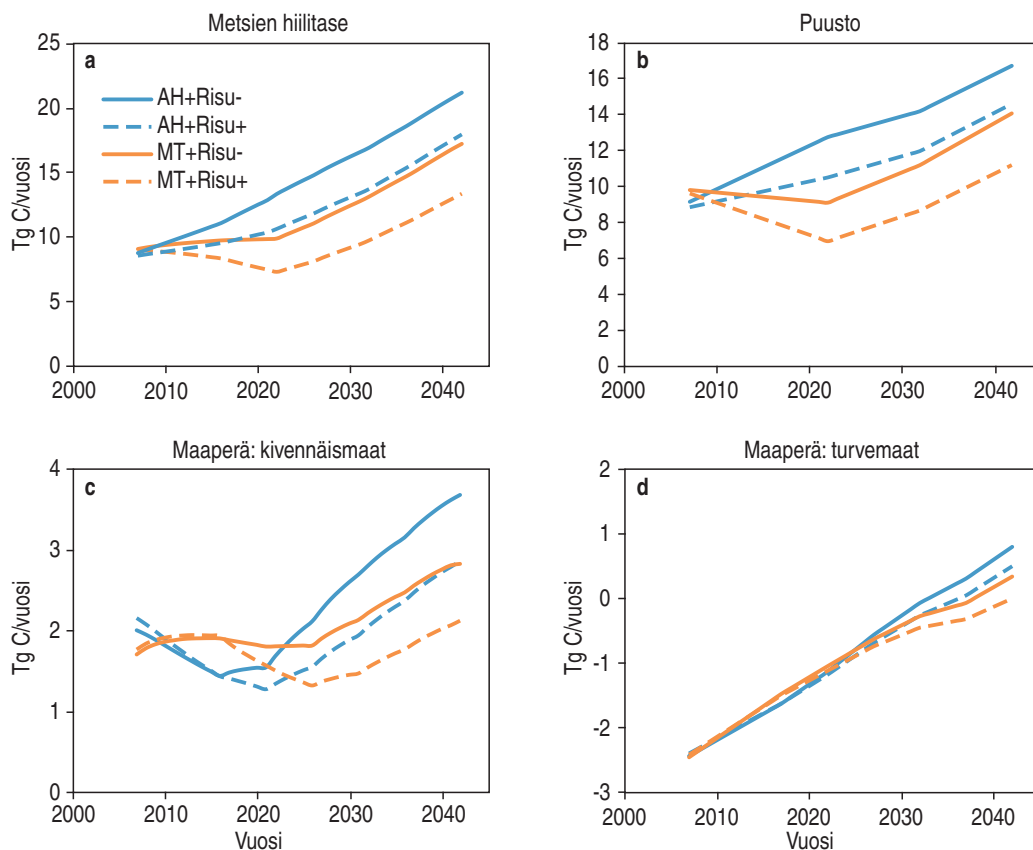
Kariketuotos, joka kasvattaa maaperän hiilivarastoja, koostuu elävästä puustosta tulevasta materiaalista (kuolleet lehdet, neulaset, oksat ja juuret tai niiden osat) sekä metsään jäävästä hakkuutähteestä (puiden latvaosat, oksat, kannot, juuret), luonnonpoistumana kuolleista puista ja aluskasvillisuuden karikkeesta (Kuva 4.3.2). Suurin kariketuotos tulee elävästä puustosta, joka on yli puolet kokonaiskarikkeesta. Tämä näkyy myös kariketuotoksen kehityksessä: skenaarioiden alussa erilaiset hakkuumäärät aiheuttavat hyvin pieniä eroja kariketuotantoon. Vasta kun puuston määrät ovat erilaiset skenaariotarkastelujakson puolivälissä, syntyy eroja myös karikkeen määrissä. Skenaariossa, jossa metsää hakataan suurimman kestävän hakkuukertymän mukaisesti, puuston määrä (Kuva 4.3.1b) eikä myöskään kariketuotos (Kuva 4.3.2) juuri kasva.

4.3.4 Energiapuun korjuun vaikutus

Energiapuun korjuu vaikuttaa metsien hiilenkiertoon kahdella tavalla: elävästä puustosta otettava energiapuu pienentää puuston määrää ja puuston nielua sekä sen kariketuotosta. Hakkuutähteistä otettu energiapuu vähentää vain kariketuotosta ja vaikuttaa näin vain maaperän varastomuutokseen. Käytetyissä skenaariovaihtoehdoissa energiapuun vuotuisen käytön ero Risupaketti+ :n ja Risupaketti- :n välillä on 8 milj. m³. Risupaketti+ vähentää puuston ja kivennäismaiden maaperän hiilinielua sekä AH että MT skenaariossa (Kuva 4.3.3). Keskimääräinen vähenemä on kummasakin tapauksessa likimain sama: vuotuinen kokonaisnielu vähenee noin 3,2 Tg C (Kuva 4.3.3a), puuston vuotuinen nielu vähenee noin 2,1 Tg C (Kuva 4.3.3b) ja kivennäismaiden maaperän vuotuinen nielu vähenee vuonna 2042 noin 0,8 Tg C (Kuva 4.3.3c). Ojitetuilla soilla energiapuun korjuun vaikutus maaperän hiilivaraston muutokseen on samansuuntainen kuin puustossa, ja se alkaa näkyä selvemmin vasta vuoden 2020 jälkeen (Kuva 4.3.3d).



Kuva 4.3.2. Vuotuinen kariketuotos Alhaisen (AH, sininen viiva), Maltillisen (MT, oranssi viiva) ja Suurimman kestävän hakkuutason (SK, vihreä viiva) skenaarioissa.



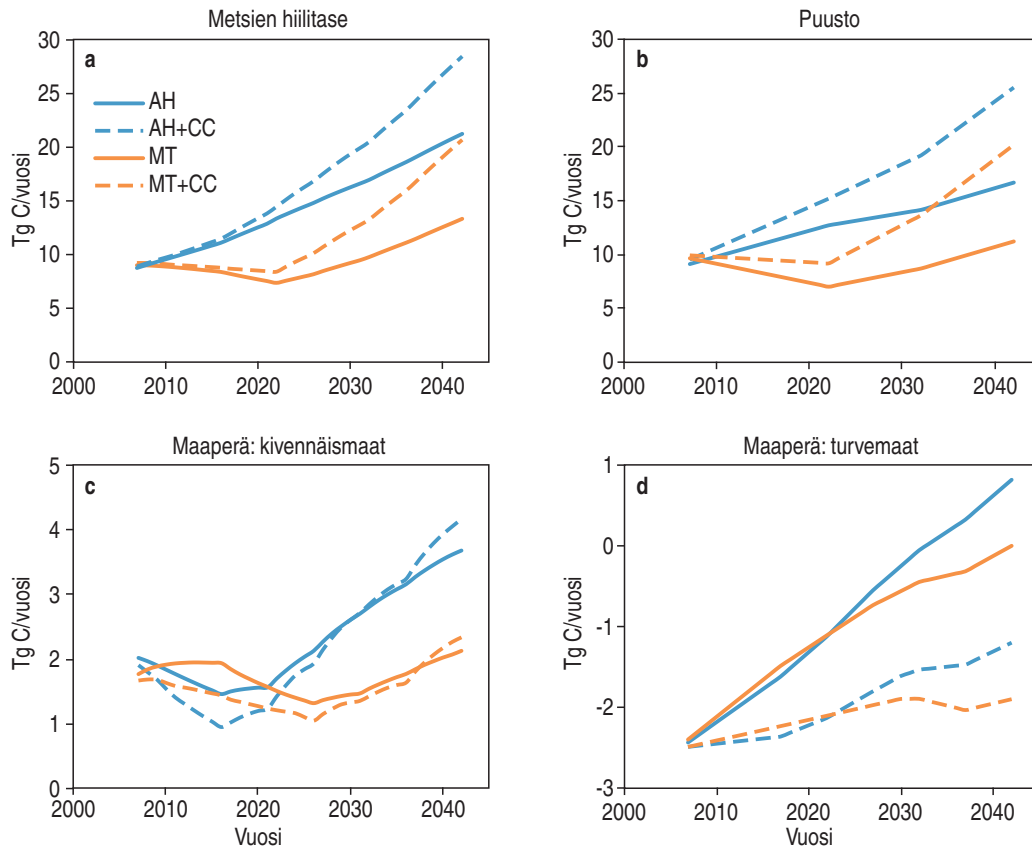
Kuva 4.3.3. Metsien (= kaikki varastot yhteensä, a), puuston (b), kivennäismaiden (c) sekä ojitettujen soiden maaperän hiilivarastojen muutokset (d) skenaarioissa, joissa puun teollisuuskäyttö oli Alhaisen (AH) tai Malttilisen (MT) skenaarion mukainen ja energiapuun käyttö oli joko runsasta (Risu+, katkoviivat) tai vähäisempää (Risu-, yhtenäiset viivat). Positiiviset arvot tarkoittavat nielua ja negatiiviset lähdeä.

4.3.5 Ilmastonmuutoksen vaikutus

Ilmastonmuutoksen mahdollista vaikutusta tarkastellaan A1B -kasvihuonekaasupäästöskenaarion pohjalta (Jylhä ym. 2009). Siinä vuoden keskilämpötila nousee noin 2 astetta vuoden 2006 tasosta ja sademäärä lisääntyy noin 6 % vuoteen 2050 mennessä (ks. Alaluku 4.1). Tutkimustulosten mukaan ilmastonmuutos lisää Suomessa puiden kasvua ja sitä kautta myös kariketuotosta. Myös karikkeen hajoaminen nopeutuu sekä kivennäis- että turvemaidella, ja sademäärän lisääntymisestä johtuen hajotustoiminta nopeutuu kivennäismailla.

AH ja MT skenaariolaskelmien mukaan ilmastonmuutos lisää tulevien vuosikymmenten aikana selvästi puuston kasvua ja hiilinielu lisääntyy voimakkaasti nykyilmastoon verrattuna (Kuva 4.3.4b). Maaperän hiilivarastot sen sijaan käyttäytyvät eri tavalla. Kivennäismailla (Kuva 4.3.4c) kohoava vuoden keskilämpötila ja sadanta lisäävät karikkeen hajotusta, mikä pienentää maaperän hiilinielua vuosina 2007–2030. Tämän jälkeen puustosta tulevan karikkeen lisääntyvä määrä kompensoi lisääntyneen hajotuksen. Skenaariojakson lopussa kivennäismaiden maaperä on hieman suurempi hiilinielu kuin ilman ilmastonmuutosta molemmissa tarkastelluissa skenaarioissa.

Ojitetuilla soilla (Kuva 4.3.4d) ilmastonmuutos lisää maaperän hiililähdettä, ja suomaa säilyy hiilen lähteenä myös molemmissa puunkäytöskenaariossa. Lähde pienenee ajan mukana, mutta erot ilman ilmastonmuutosta tehtyihin skenaarioihin ovat huomattavat. Ojitetuilla soilla lämpötilan nousu ja myöskin puuston tilavuuden lisääntyminen nopeuttavat karikkeen hajoamista, joka on suhteellisesti suurempi kuin kivennäismailla.



Kuva 4.3.4. Metsien (= kaikki varastot yhteensä, a), puuston (b), kivennäismaiden (c) sekä ojitettujen soiden (d) hiilivarastojen muutokset Alhaisen puunkäytön (AH; sininen) ja Maltillisen puunkäytön (MT; punainen) skenaarioissa (ehyet viivat) ja samoissa skenaarioissa ilmastonmuutoksen oloissa (CC, katkoviivat). Positiiviset arvot tarkoittavat nielua ja negatiiviset lähdeä.

Metsien hiilinielu (Kuva 4.3.4a) kasvaa selvästi ilmastonmuutoksen oloissa, vaikka maaperän varastomuutoksissa vaikutukset ovat päinvastaisia. Tämä johtuu siitä, että puustoon sitoutuvan hiilen määrä on selvästi suurempi kuin maaperän hiilen varastomuutokset.

4.3.6 Tulosten luotettavuudesta

Kasvihuonekaasuinventoinnin arvioiden mukaan epävarmuudet hiilen varastomuutosten estimoinnissa ovat huomattavat erityisesti maaperän osalta. Maaperän varastomuutosten virhearvion 95 % luottamusväli on likimääräisesti $\pm 1,5 \times$ (laskettu arvo). Näin ollen luottamusväliin kuuluu aina negatiivisia ja positiivisia arvoja, joten ei voida varmasti tietää, onko kyseessä nielu vai lähde. Samat epävarmuudet kertautuvat myös skenaarioihin. MELA-ohjelmistolla tehdyille laskelmille ei voida antaa luotettavuusarvioita, ne ovat vain mahdollisia puuvarojen kehityspolkuja. Niiden toteutumisen todennäköisyyksiin ei oteta kantaa.

Tämän perusteella skenaarioita hiilivarastomuutoksista on pidettävä vain suuntaa antavina. Yksittäisiin lukuarvoihin ei kannata panna liian suurta painoa. Erityisesti on huomattava, että ojitettujen soiden emissioikertoimien riippuvuus lämpötilasta ja puuston keskirunkotilavuudesta on on toteutettu keskiarvoistaen. Tästä johtuen mallissa kaikki suotyypit kaikissa osissa maata reagoivat lämpötilaan ja runkotilavuuteen samalla tavalla.

On myös huomattava, että laskelmissa oli mukana ilmastonmuutoksen vaikutus (lämpötilan ja sadannan kautta) vain puiden kasvuun sekä orgaanisen aineen hajoamiseen. Ilmastonmuutoksen myötä erilaiset riskit (esim. kuivuusjaksot, hyönteis- tai tuulituhot) voivat toteutua. Niiden ennustaminen on vaikeaa, eivätkä ne ole laskelmissa mukana.

4.3.7 Päätelmiä

Kasvihuonekaasuinventoinnin mukaan metsät kokonaisuutena, ja myös varastoittain, ojitettujen soiden maaperää lukuunottamatta, ovat tällä hetkellä hiilinielu. Puunkäyttöpohjaisissa skenaarioissa (Alhainen ja Maltillinen) nielu säilyvät ja kasvavat tarkastelujaksolla, kun ilmastonmuutoksen vaikutuksia ei ole otettu huomioon. Ojitettujen soiden maaperä on tämänhetkisen arvion mukaan lähde ja säilyy sellaisena koko skenaariojakson, joskin lähde pienenee. Se voi muuttua nieluksi, jos puuston määrä lisääntyy voimakkaasti (Alhaisen puunkäytön skenaario). Myöskin suurimman kestävän puunkäytön skenaarion laskelmissa metsät ovat hiilinielu, joskin jaksolla 2020–2030 metsien hiilitase on melkein nolla. Ottaen huomioon laskelmiin liittyvät epävarmuudet, ei voida kuitenkaan varmuudella sanoa, olisivatko metsät suurimman kestävän käytön oloissa nielu vai lähde.

Puun vuotuisen hakkuupoistuman ero Maltillisen ja Alhaisen puunkäytön skenaarioiden välillä on noin 14 milj. m³. Metsien hiilinielun ero näiden skenaarioiden välillä on suurimmillaan 9 Tg C. Myös Maltillisen puunkäytön skenaariossa metsät ovat selvä hiilinielu koko tarkastelujakson 2007–2042.

Energiapuun korjuun intensiteetti vaikuttaa metsien hiilinieluun. Vuotuisen korjuun lisäys 8 miljoonalla kuutiometrillä aiheuttaa nieluun noin 3 Tg C vähennyksen. Ojitettujen soiden maaperän varastomuutokseen energiapuun korjuulla on vähäinen vaikutus ennen vuotta 2020.

Lämpötilan kohoaminen ja lisääntyvä sadanta lisäävät puuston kasvua ja karikkeen hajotusta ilmastonmuutoksen skenaariossa. Puuston hiilinielu kasvaa ja kasvattaa metsien hiilinielua. Kivennäismaiden maaperän hiilinielu vähenee aluksi vuoteen 2030, mutta sen jälkeen ilmastonmuutoksen vaikutus on vähäinen. Skenaariolaskelman perusteella ojitettujen soiden maaperän hiilipäästöt vähenevät vain vähän ilmastonmuutoksen oloissa. Ottaen huomioon yksinkertaisen ja keskiarvoistavan tavan arvioida lämpötilan vaikutusta ojitettujen soiden hiilivarastomuutokseen, turvallinen johtopäätös lienee, että ilmastonmuutos tuskin lisää merkittävästi hiilen sidontaa ojitettujen soiden maaperään.

Kioton toisella velvoitekaudella vuodesta 2013 alkaen Suomen metsien hiilinielulle on ensimmäistä velvoitekautta tiukemmat vaatimukset. Tällä hetkellä Suomi hyötyy metsänielustaan 0,6 milj. t hiilidioksidia, mikä määrä voidaan vähentää päästöistä. Toiselle velvoitekaudelle on määritelty kansalliset vertailutasot, jotka vuotuisten metsänielujen on ylitettävä, jotta ne voidaan laskea hyväksi päästölaskennassa. Mikäli metsänielu jää alle vertailutason, alitus lisätään päästöihin. Suomelle vertailutaso on 20,1 milj. t hiilidioksidia (5,48 Tg C), mikä vastaa puuston noin 16 milj. m³:n nettokasvua. Tässä alaluvussa esitettyjen skenaarioiden valossa (Kuvat 4.3.1a, 4.3.3a ja 4.3.4a) vertailutaso ylitetään kaikissa tapauksissa paitsi SK skenaariossa. Puun käytön taso, jossa metsänielu on vertailutason suuruinen, on MT ja SK skenaarioiden välissä. Vertailutaso sallii puuvarojen käytön teollisuuden raaka-aineena ja bioenergiana, mutta vähentää pelivaraa Kioton ensimmäiseen velvoitekauteen verrattuna.

Kirjallisuus

- Greenhouse gas emissions in Finland 1990–2009 National Inventory Report under the UNFCCC and the Kyoto Protocol, 15. April 2011. [Verkkodokumentti] Tilastokeskus.
Saatavissa: http://www.stat.fi/tup/khkinv/fin_nir_20110415.pdf [Viitattu 14.12.2011]
- Kellomäki, S., Väisänen, H., 1997. Modelling the dynamics of the forest ecosystem for climate change studies in the boreal conditions. *Ecol. Modell.* 97: 121–140.
- Matala, J., Ojansuu, R., Peltola, H., Sievänen, R ja Kellomäki, S. 2005. Introducing effects of temperature and CO₂ elevation on tree growth into a statistical growth and yield model. *Ecological Modelling* 181: 173–190.
- Ojanen, P., Minkkinen, K, Alm, J. ja Penttilä, T. 2010 Soil–atmosphere CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in boreal forestry-drained peatlands. *Forest Ecology and Management* 260: 411–421
- Sievänen, R., Kareinen, T., Hirvelä, H. & Ilvesniemi, H. 2007. Hakkuumahdollisuusarvioihin perustuvat metsien kasvihuonekaasutaseet. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2007: 329–339.
- Tuomi, M., Thum, T., Järvinen, H, Fronzek, S., Berg, B., Harmon, M., Trofymow, J.A., Sevanto, S. and Liski, J. (2009). Leaf litter decomposition – Estimates of global variability based on Yasso07 -model. *Ecological Modelling* 220: 3362–3371.
- Tuomi, M., Laiho, R., Repo, A. and Liski, J. 2011a. Wood decomposition model for boreal forests. *Ecological Modelling* 222: 709–718.