

Metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutukset Suomessa

**Jari Liski, Anna Repo, Riina Känkänen, Pekka Vanhala,
Jyri Seppälä, Riina Antikainen, Juha Grönroos,
Niko Karvosenoja, Katja Lähtinen, Pekka Leskinen,
Ville-Veikko Paunu ja Juha-Pekka Tuovinen**



Metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutukset Suomessa

**Jari Liski, Anna Repo, Riina Känkänen, Pekka Vanhala
Jyri Seppälä, Riina Antikainen, Juha Grönroos,
Niko Karvosenoja, Katja Lähtinen, Pekka Leskinen,
Ville-Veikko Paunu ja Juha-Pekka Tuovinen**

Helsinki 2011

SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUS



S Y K E

SUOMEN YMPÄRISTÖ 5 | 2011
Suomen ympäristökeskus
Luontoympäristökeskus

Taitto: Pirjo Lehtovaara

Kansikuva: Erkki Oksanen/Metla

Julkaisu on saatavana vain internetistä:
www.ymparisto.fi/julkaisut

ISBN 978-952-11-3840-9 (PDF)
ISSN 1796-1637 (verkkoj.)

ALKUSANAT

Suomen ympäristökeskus (SYKE) toteutti kesä-joulukuussa 2010 tutkimuksen metsäbiomassan energiakäytön ilmasto- ja pienhiukkasvaikutuksista Suomessa. Ilmatieteen laitos täydensi tutkimusryhmän asiantuntemusta säteilypakotteen laskennassa. Tutkimus tehtiin Ympäristöministeriön toimeksiannosta ja merkittävilta osin siltä saadun rahoituksen turvin.

Tutkimusryhmä koostui Suomen ympäristökeskuksen kahden yksikön tutkijoista sekä Ilmatieteen laitoksen tutkijasta:

- Jari Liski (hankkeen vastuullinen johtaja), Anna Repo, Riina Känkänen ja Pekka Vanhala (SYKE/Luontoympäristökeskus)
- Jyri Seppälä, Riina Antikainen, Juha Grönroos, Niko Karvosenoja, Ville-Veikko Paunu, Katja Lähtinen ja Pekka Leskinen, (SYKE/Kulutuksen ja tuotannon keskus) ja Juha-Pekka Tuovinen (Ilmatieteen laitos).

Tutkimusryhmä kiittää seuraavia henkilöitä, jotka edesauttoivat tätä tutkimusta: Jaakko Ojala ja Risto Kuusisto (Ympäristöministeriö) kiinnostuksesta tätä tutkimusaihetta kohtaan, Kim Pingoud (Valtion teknillinen tutkimuslaitos VTT) ja Martin Forsius (Suomen ympäristökeskus) tutkimusraportin asiantuntijalausunnoista, Aleksi Leh-tonen (Metsäntutkimuslaitos) kansallista metsien kasvihuonekaasuinventaariota ja metsiin sovellettavia laskentasääntöjä koskevista tiedoista ja Tuomas Mattila (Suomen ympäristökeskus) polttoaineiden elinkaari päästöjä koskevasta asiantuntija-avusta.

SISÄLLYS

Alkusanat	3
1 Johdanto ja tutkimuksen tavoitteet	7
2 Menetelmät	9
2.1 Laskelmien pääpiirteet	9
2.2 Ilmastovaikutusten laskentaperiaate	11
3 Tulokset	15
3.1 Kasvihuonekaasuvaikutus metsäbiomassan energiakäytöstä.....	15
3.1.1 Biomassan lahoaminen metsässä	15
3.1.2 Metsän hiilivaje ja tuotantoketjun päästöt.....	16
3.2 Ilmastovaikutus metsäbiomassan energiakäytöstä	18
3.3 Metsäbiomassan energiakäytön kasvihuonekaasuvaikutus koko Suomen tasolla	21
3.4 Pienhiukkasvaikutus metsäbiomassan energiakäytöstä.....	24
4 Tulosten tarkastelu	27
4.1 Metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutus	27
4.2 Metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutusten huomioiminen laskentasäännöissä.....	28
4.3 Metsäbiomassan energiakäytön pienhiukkasvaikutukset	30
5 Johtopäätökset	31
Viitteet	32
Liite I. Hiilitase- ja säteilypakotelaskelmien yksityiskohtainen kuvaus	35
Kuvailulehti	41
Presentationsblad	42
Documentation page	43

1 Johdanto ja tutkimuksen tavoitteet

Metsäbiomassan käyttöä energian tuottamiseen aiotaan lisätä merkittävästi Suomessa. Hallituksen bioenergialinjausten mukaan metsäbiomassan energiakäyttömäärä nostetaan nykyisestä vuosittaisesta viidestä miljoonasta kuutiometristä 13,5 miljoonaa kuutiotaan (TEM 2010a, b).

Metsäbiomassan energiakäytön lisäämistä koskeva linjaus on tärkeä keino täyttää maakohtainen velvoite EU-direktiivissä, joka tähtää uusituvan energiankäytön lisäämiseen (Direktiivi 2009/28/EY). Direktiivin mukaan Suomi on sitoutunut nostamaan uusiutuvien energianlähteiden osuuden energian loppukulutuksesta 38 prosenttiin ja lisäämään liikenteen biopolttoaineiden osuuden 10 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä. Ottaen huomioon ennustetun energiankäytön lisääntymisen uusiutuvan energian lisäämistarve on 38 TWh (TEM 2010a). Tästä määrästä noin puolet on suunniteltu saavutettavaksi lisäämällä metsäteollisuuden sivutuotteiden ja metsien hakkuissa syntyvän tähdepuubiomassan käyttöä energian lähteenä (TEM 2008, 2010a). Metsäteollisuudessa jäteliemien ja muiden sivu- ja jätetuotteiden hyödyntäminen on jo nyt intensiivistä. Näin ollen puuperäisen energian lisääminen edellyttää metsäbiomassan käytön tehostamista (TEM 2008). Jos ainespuuksi kelpaavaa puuta ei ohjata energiantuotantoon, tämä tarkoittaa sitä, että hakkuutähteitä, kantoja ja harvennuspuita on korjattava metsistä nykyistä enemmän.

Metsäbiomassan energiakäytön taustalla ovat ilmastosyyt. Vuonna 2008 hyväksytyssä ilmasto- ja energiapaketissa Suomi on yhdessä muiden Euroopan Unionin jäsenvaltioiden kanssa sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasujen päästöjä 20 prosentilla vuoden 1990 tasosta vuoteen 2020 mennessä (Euroopan parlamentti 2008). Metsäbiomassan energiakäytön ei ole katsottu lisäävän kasvihuonekaasujen määrää ilmakehässä, koska biomassa uusiutuu ja sitoo kasvaessaan energiakäytössä vapautuneen hiilen. Biomassaa on pidetty hiilidioksidineutraalina energianlähteenä, jolla voidaan korvata fossiilisia energianlähteitä ja pienentää hiilidioksidipäästöjä ilmakehään. Bioenergian tuotantoketjuissa syntyy päästöjä mm. biomassan korjuussa, käsittelyssä ja kuljetuksessa käytettävistä koneista, mutta nämä päästöt ovat huomattavasti fossiilisten polttoaineiden käytöstä aiheutuvia päästöjä pienemmät (Forsberg 2000, Palosuo ym. 2001, Wihersaari 2005, Lattimore ym. 2009).

Metsäbiomassan energiakäytön aiheuttamiin maankäyttöön liittyviin kasvihuonekaasupäästöihin on kuitenkin alettu kiinnittää erityistä huomiota viime aikoina niin tiedeyhteisön keskuudessa (Fargione ym. 2008, Kirkinen ym. 2008, Melillo ym. 2009, Searchinger ym. 2009, Repo ym. 2010) kuin julkisessakin keskustelussa. Huolta on aiheuttanut se, että metsäbiomassan korjuu vähentää metsien hiilivarastoja ja pienentää hiilinieluja, mikä merkitsee maankäyttöön liittyvien kasvihuonekaasupäästöjen lisääntymistä (Fargione ym. 2008, Melillo ym. 2009, Searchinger ym. 2009, Zanchi ym. 2010). Näitä bioenergian hiilivaikutuksia on kuvattu esimerkiksi käsitteillä hiilivelka tai hiilivaraston muutoksesta johtuva epäsuora päästö (Palosuo ym. 2001, Searchinger ym. 2008, Searchinger ym. 2009, Melin ym. 2010, Zanchi ym. 2010).

Tällainen hiilivaje syntyy, kun metsäbiomassan energiakäyttö pienentää maaperän tai biomassan hiilivarastoa.

Metsäbiomassan lisääntyvä energiakäyttö ei nykyisten metsien kasvuennusteiden valossa uhkaa Suomen metsien hiilinielua (Sievänen ym. 2007). Laskelmien mukaan energiantuotantoa varten korjattavan puubiomassamäärän lisääminen vuoden 2007 neljästä miljoonasta kuutiosta 15 miljoonaan kuution vuoteen 2030 mennessä ei muuta Suomen metsiä hiilinieluista hiilen lähteiksi, mutta pienentää vuosittaista hiilinielua 2,2–3,1 miljoonalla hiilidioksidiekvivalenttitonnulla. Korjatusta puusta saatuun energiamäärään verrattuna hiilinielua vähentävä vaikutus on merkittävä (Repo ym. 2010).

Metsäbiomassan energiakäytön aiheuttamat ilmastovaikutukset ovat seurausta kasvihuonekaasupäästöistä, jotka johtuvat metsän hiilitaseen muutoksista ja metsäbioenergian tuotantoketjusta, sekä näiden päästöjen aiheuttamista maapallon säteilypakotteen muutoksista. Metsäbioenergian ilmastovaikutukset saadaan selville laskemalla nämä päästöt ja säteilypakotevaikutukset kattavasti.

Tämän hankkeen tavoitteena oli arvioida hallituksen linjaaman metsäbiomassan energiankäyttölisäyksen ilmastovaikutuksia Suomessa. Linjauksen mukaisesti keskityttiin tarkastelemaan ainespuuksi kelpaamattoman, ainespuuhakkuissa syntyvän tähdepuubiomassan (hakkuutähteet, harvennuspuu ja kannot) energiakäyttöä (TEM 2008, 2010a, b). Hankkeessa verrattiin erilaisten metsäbiomassan energiatuotantoketjujen ilmastovaikutuksia fossiilisten polttoaineiden aiheuttamiin ilmastovaikutuksiin sadan vuoden aikajänteellä. Ilmastovaikutusten lisäksi tässä hankkeessa arvioitiin metsäbiomassan energiakäyttölisäyksen pienhiukkasvaikutukset. Työssä kehitettiin myös menetelmä metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutusten arviointiin.

2 Menetelmät

2.1

Laskelmien pääpiirteet

Tässä hankkeessa tarkasteltiin metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutuksia sekä metsikkötasolla että koko Suomen tasolla (Taulukko 1). Metsikkötason laskelmien avulla arvioitiin ilmastovaikutusten vaihteluväli Suomessa. Näissä laskelmissa huomioitiin ilmastovaikutukset, jotka johtuivat metsän hiilitaseen muutoksista, metsäbioenergian tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöistä ja ilmakehän säteilypakotteen muutoksista näiden kasvihuonekaasuvaikutusten seurauksena. Suomen tason laskelmissa arvioitiin tähän asti toteutuneen metsäbiomassan energiakäytön vaikutus Suomen metsien hiilitaseeseen ja suunnitellun käytön lisäyksen vaikutus. Pienhiukkasvaikutukset arvioitiin korjuu- ja käyttöketjun tasolla.

Metsän hiilitasevaikutukset laskettiin Yasso07-mallilla käyttäen Suomen ympäristökeskuksen tutkijoiden kehittämää menetelmää (Luku 2.2, Repo ym. 2010). Yasso07-malli soveltui näihin laskelmiin hyvin, koska tämä malli simuloi energiaksi käytettävien metsäbiomassan ositteiden lahoamista metsässä suuren Suomen oloista peräisin olevan mittausaineiston perusteella (Tuomi ym. 2010a). Lisäksi mallin edellinen versio (Liski ym. 2005) on osa Suomen kansallista kasvihuonekaasujen inventaariojärjestelmää (YM & Tilastokeskus 2009) ja parhaillaan ollaan tekemässä vertailulaskelmia uudemman Yasso07-malliversion käyttöön siirtymiseksi. Näin olleen tämän tutkimuksen Yasso07-malliin perustuvat tulokset ovat vertailukelpoisia metsäbiomassan energiakäytöstä aiheutuviin vaikutuksiin kansallisessa kasvihuonekaasujen inventaariossa.

Metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutusten vaihteluväli Suomessa arvioitiin metsikkötason laskelmien avulla. Simuloitaviksi valittiin metsäbioenergian tuotannon tapauksia, jotka olivat todellisia ja käytännössä toteutettavia, mutta poikkesivat ilmastovaikutuksiltaan mahdollisimman paljon toisistaan. Tällä tavoin pyrittiin siihen, että laskelmat kattaisivat ilmastovaikutusten vaihteluvälin Suomessa. Simuloinnit tehtiin Etelä- ja Pohjois-Suomen ilmasto-oloihin. Energiaksi käytettävistä biomassaositteista simuloitiin oksia, energiapuuharvennusten rankapuuta ja kantoja. Puulajeista simuloitiin mäntyä, kuusta ja koivua. Metsäbioenergian tuotantoketjun päästöt arvioitiin kirjallisuustietojen avulla huomioiden ketjun eri osat ja työvaiheet.

Taulukko I. Metsäbiomassan energiakäytön ilmasto- ja pienhiukkasvaikutuksista tehdyt laskelmat tässä hankkeessa.

Laskelma	Tavoite	Tapaukset	Menetelmä
Kasvihuonekaasupäästöt metsikkötasolla	Vaihteluväli Suomessa	Etelä- vs. Pohjois-Suomi Biomassaositteet: oksat, harvennuspuu, kannot Puulajit: mänty, kuusi, koivu	Yasso07-hiilimalli Korjuu-, kuljetus- ja käyttöketjun päästöt
Säteilypakotteen muutos metsikkötasolla	Vaihteluväli Suomessa	kuten yllä	Muokattu REFUGE-säteilypakotemalli Päästöt: kuten yllä
Hiilitasevaikutukset Suomessa	Toteutuneen ja suunnitellun käytön vaikutukset Suomessa	Toteutunut metsähakkeen käyttö v. 2000–2008 Suunniteltu lisäys v. 2009-2020 Vakiotaso v. 2021–2025	Metsähakkeen käyttötilasto ja käytön lisäämissuunnitelma Suomen metsien kehitys-arvio sekä Yasso07-hiilimalli
Pienhiukkasvaikutukset korjuu- ja käyttöketjun tasolla	Vaihteluväli Suomessa	Korjuu- ja käyttöketju Etelä- ja Pohjois-Suomessa	FRES pienhiukkasten leviämismalli

Ilmakehän säteilytaseen muutokset laskettiin Ilmatieteen laitoksen tutkijoiden muokkaamalla REFUGE-mallin versiolla (Lohila ym. 2010, Monni ym. 2003). Tämä malli huomioi eri kasvihuonekaasujen viipymäajan ilmakehässä, niiden erilaisen lämmittävän vaikutuksen ja ilmakehän säteilytaseen muuttumisen muiden tekijöiden vuoksi. Kasvihuonekaasupäästöinä näissä laskelmissa käytettiin metsikkötason laskelmien tuloksia metsän hiilitaseen muutoksista ja metsäbioenergian tuotanto- ja käyttöketjun päästöistä.

Metsäbiomassan energiakäytön vaikutus Suomen metsien hiilitaseeseen arvioitiin vuosille 2000–2025. Laskelma perustui toteutuneeseen metsäbiomassan energiakäyttöön vuosina 2000–2008 (Metsätilastollinen vuosikirja 2009), suunniteltuun vuosittaisen käytön lisäämiseen nykyisestä 5 Mm³:stä 13,5 Mm³:iin vuosina 2009–2020 (TEM 2010b) ja 13,5 Mm³:n tasolla jatkuvaan käyttöön vuosina 2021–2025. Suomen metsien hiilitaseeseen kannalta tämän energiapuun korjuun vaikutus on se, että metsistä pois korjattavan biomassan sisältämä hiilimäärä poistuu taseesta sen sijaan, että biomassa jäisi metsään lahoamaan (Sievänen ym. 2007). Metsien hiilimäärä vähenee siis sillä hiilimäärällä, joka pois korjatusta biomassassa olisi, jos biomassa olisi jätetty metsään lahoamaan. Laskelmassa huomioitiin siis se, että hiiltä vapautuu biomassasta myös silloin, kun se jätetään metsään lahoamaan. Metsistä korjatun puubiomassan hiilimäärää simuloitiin tässä tutkimuksessa Yasso07-maahiilimallilla. Laskelmassa metsistä pois korjatusta biomassasta 81 % oletettiin olevan oksia ja 19 % kantoja nykyisen suhteen mukaan (Metsätilastollinen vuosikirja 2009). Oksien energiasisältönä käytettiin 8,8 PJ/Mm³ ja kantojen 8,9 PJ/Mm³ (Alakangas 2005, 1 TWh = 3,6 PJ). Energiantuotantoa varten korjattavan puubiomassan vaikutus Suomen metsien hiilitaseeseen arvioitiin vähentämällä Sieväsen ym. (2007) hiilitasearvioista kunakin vuonna se hiilimäärä, joka tässä metsistä pois korjatusta energiapuussa olisi ollut, jos puu olisi jätetty metsään lahoamaan.

Metsähakkeen korjuun, kuljetuksen ja energiakäytön vaikutuksia primääristen pienhiukkasten (PM_{2,5}) päästöihin ja väestöaltistuksiin tarkasteltiin Suomen ympäristökeskuksen alueellisella päästöskenaariomallilla (FRES). FRES-mallin päästölaskenta ja päästöjen alueellinen jakauma on esitetty julkaisussa Karvosenoja (2008). Hiukkaspäästöjen vaikutusta hiukkaspitoisuuksien vuosikeskiarvoihin ja väestöaltistukseen tarkasteltiin FRES-mallin lähde-kohde -kulkeumamatriisien avulla. Korjuun ja kuljetusten osalta käytettiin Ilmatieteen laitoksen paikallisen tason leviämismallin

UDM-FMI tulosten perusteella luotuja 1 km alueresoluution matriiseja (Ahtoniemi ym. 2010). Voimalaitosten päästöjen leviämistä arvioitiin alueellisen tason SILAM-mallituloksiin perustuvilla 10 km alueresoluution matriiseilla (Kukkonen ym. 2007)

Hiilitase- ja säteilypakotelaskelmat on kuvattu yksityiskohtaisesti Liitteessä 1.

2.2

Ilmastovaikutusten laskentaperiaate

Metsäbiomassan energiakäytön lisäämistavoitteet on Suomen linjausten mukaan tarkoitus saavuttaa lisäämällä energiantuotantoon käytettävän biomassan korjuuta - ei siis niin, että osa nykyisin korjattavasta ainespuusta ohjataan energiantuotantoon (TEM 2010a). Tässä tutkimuksessa käytetty ilmastovaikutusten laskentaperiaate muotoiltiin tämän linjauksen mukaan (Repo ym. 2010).

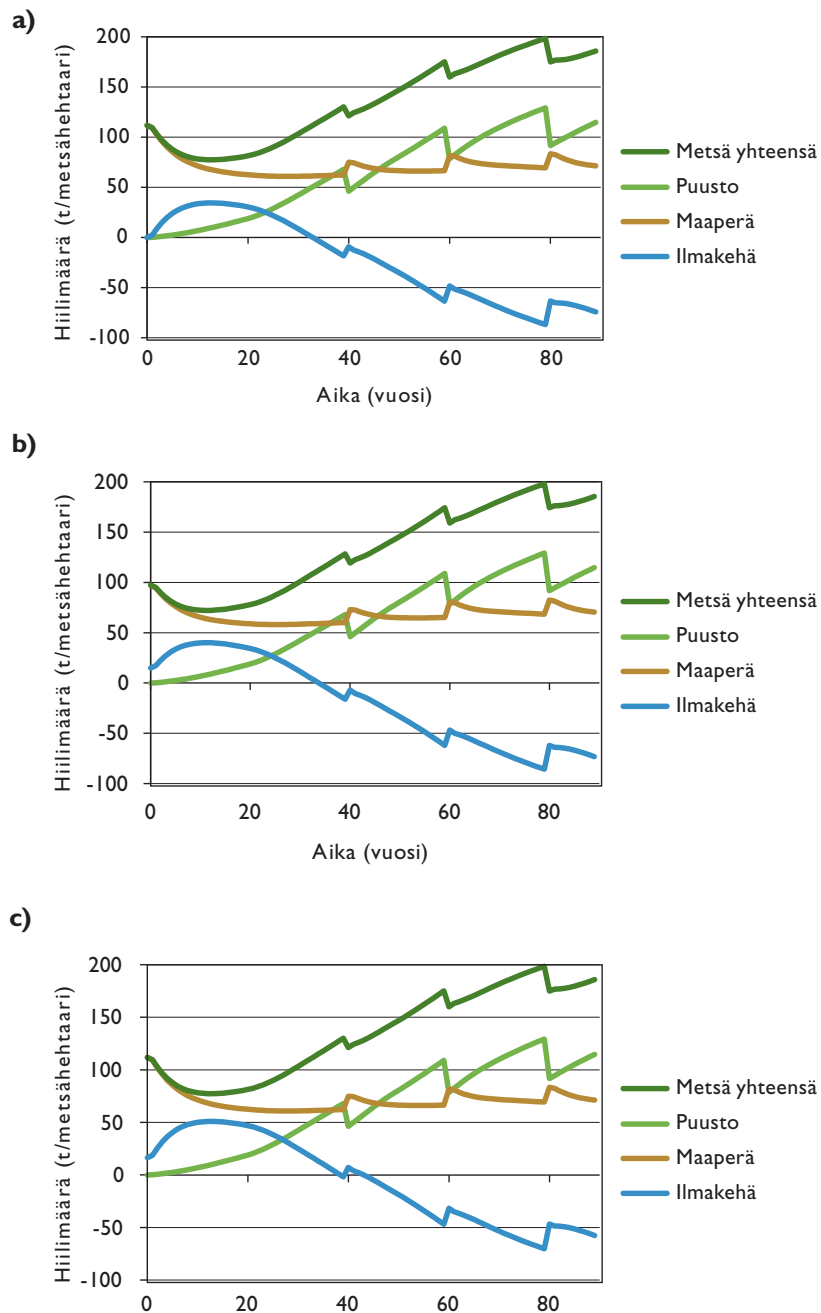
Metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutukset arvioitiin vertaamalla tapaus- ta, jossa metsästä korjataan ainespuun korjuun lisäksi biomassaa energiantuotantoa varten, tapaukseen, jossa metsästä korjataan vain ainespuuta. Tämä on ilmastovai- kutusten kannalta relevantti vertailuasetelma Suomen nykyisen metsäbioenergiaa koskevan linjauksen valossa (ks. yllä). Ainespuun korjuun lisäksi tuotetun metsä- bioenergian ilmastovaikutuksia verrattiin fossiilisten polttoaineiden aiheuttamiin ilmastovaikutuksiin. Tällä vertailuasetelmalla saadaan selville, millainen ilmasto- hyöty saavutetaan korvaamalla fossiilisia polttoaineita tällä tavoin tuotetulla met- säbioenergialla.

Tutkimuksessa käytettyä laskentaperiaatetta havainnollistetaan seuraavassa esi- merkin avulla. Esimerkki laskettiin CO2FIX-mallilla (Mäsera ym. 2003), jonka osana on Yasso07-mallin sijaan vanhempi Yasso-malliversio (Liski ym. 2005). Yasso-mallin käytön vuoksi esimerkkilaskelman tulokset eivät vastaa tarkasti tämän tutkimuksen muita laskelmia, jotka on laskettu uudemmalla Yasso07-mallilla.

Esimerkissä tarkastellaan metsähehtaaria, joka avohakataan ja ainespuu korjataan pois. Hakkuun jälkeen metsä kehittyä tavallisen talousmetsän tapaan.

Energiantuotannon näkökulmasta määritetään kolme vaihtoehtoa: 1) vertailu- vaihtoehto, jossa energiaa ei tuoteta hakkuutähteistä eikä muista polttoaineista, 2) bioenergiavaihtoehto, jossa puolet päätehakkuun tähteistä korjataan alalta pois ja käytetään energiantuotantoon, ja 3) fossiilienergiavaihtoehto, jossa hakkuutähteistä saatava energiamäärä tuotetaan kivihieillä. Bioenergian tuotannon ilmastovaikutus saadaan selville vertaamalla vertailuvaihtoehtoa ja bioenergiavaihtoehtoa toisiinsa. Kivihieilienergian ilmastovaikutus saadaan selville vertaamalla vertailuvaihtoehtoa ja fossiilienergiavaihtoehtoa toisiinsa. Ilmastovaikutus, joka seuraa kivihieilen kor- vaamisesta metsäbioenergialla, saadaan selville vertaamalla bioenergiavaihtoehtoa ja fossiilienergiavaihtoehtoa toisiinsa.

Kaikissa vaihtoehdoissa puusto kasvaa samalla tavalla, koska hakkuutähteiden korjaamisen ei oletettu vaikuttavan puuston kasvuun (Kuva 1). Puusto alkaa kehity- tyä ja sitoa hiiltä ilmakehästä itseensä avohakkuun jälkeen. Maaperän hiilivarasto pienenee avohakkuun jälkeen, kun hakkuutähteet hajoavat eikä kehittyvän puuston kariketuotos riitä vielä korvaamaan hajotuksessa vapautuvaa hiilimäärää. Näiden puuston ja maaperän hiilivarastojen muutosten seurauksena metsän hiilivarasto pienenee ja ilmakehään kertyy hiiltä. Noin 15 vuoden iässä metsän hiilivarasto alkaa kasvaa, minkä seurauksena ilmakehän hiilimäärä alkaa pienentyä. Vaihtoehdosta riippuen 30–40 vuoden kohdalla ilmakehän hiilimäärä alittaa hakkuunjälkeisen tason ja pienenee loppukiertoaajan kuluessa metsän hiilivarastojen sitoessa hiiltä itseensä.



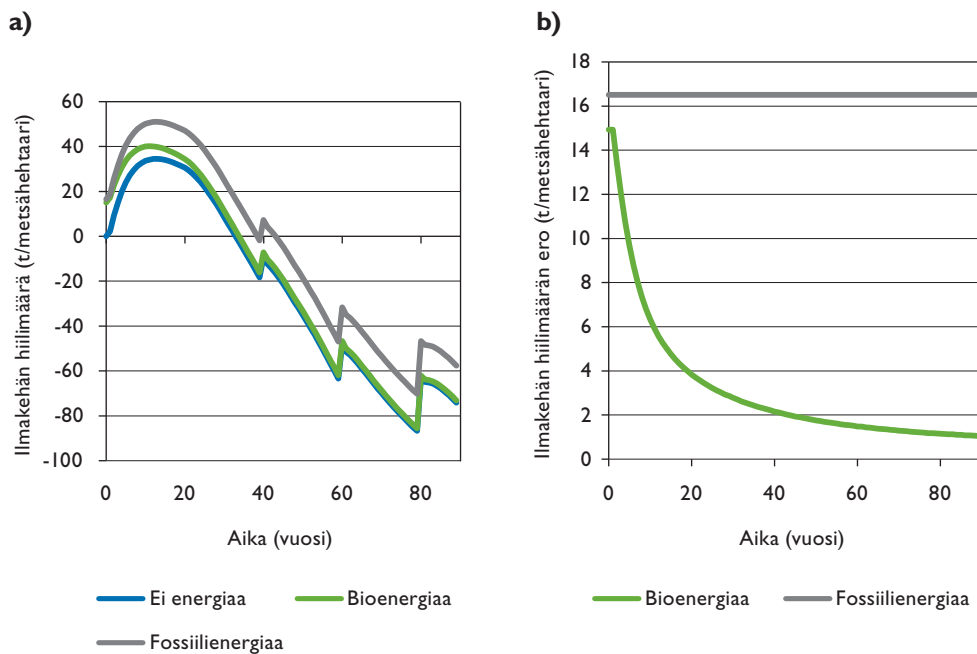
Kuva 1. Metsän hiilivarastojen (puusto ja maaperä) kehittyminen ja metsän vaikutus ilmakehän hiilimäärään avohakkuuta seuraavan 90 vuoden jakson aikana a) vertailuvaihtoehdossa, b) bioenergiavaihtoehdossa ja c) fossiilienergiavaihtoehdossa. CO2FIX-mallilla (Maserä ym. 2003) laskettu esimerkki, joka havainnollistaa tutkimuksessa käytettyä laskentatapaa. Tulos ei ole määrällisesti tarkasti vertailukelpoinen tutkimuksen muiden laskelmien kanssa käytettyjen laskentamallien erojen vuoksi.

Vaihtoehdot poikkeavat toisistaan energiantuotannon erojen vuoksi (Kuva 1). Bioenergiavaihtoehdossa ilmakehän hiilimäärä kasvaa aluksi poltettujen hakkuutähteidän hiilimäärän verran ja maaperän hiilimäärä on saman verran pienempi kahteen muuhun vaihtoehtoon verrattuna. Metsän kiertoaajan lopussa ero maaperän hiilimäärässä on enää pieni, koska hakkuutähteet ovat hajonneet metsään jätettyinäkin. Fossiilienergiavaihtoehdossa metsän hiilivarastot kehittyvät kuten vertailuvaihtoehdossakin, mutta ilmakehän hiilimäärä kasvaa aluksi poltetun kivihiilen päästöjen

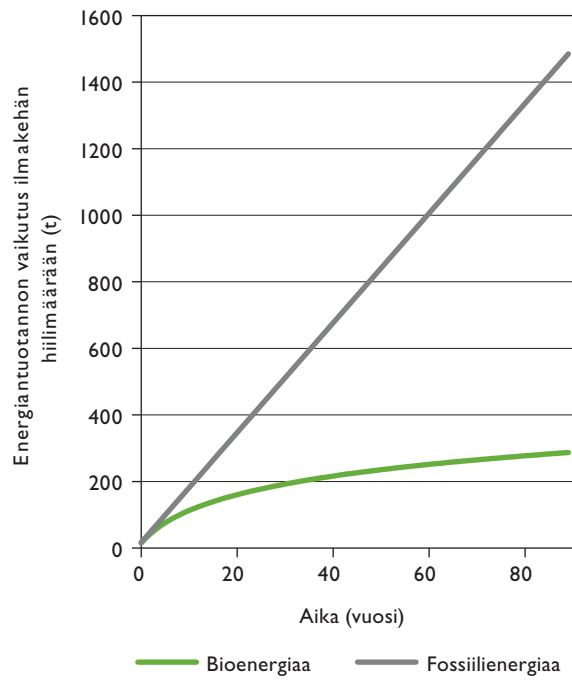
verran ja säilyy tämän verran suurempana, koska kivihiilen päästö ei vaikuta metsän hiilen sidontaan.

Vaihtoehtojen vaikutus ilmakehän hiilimäärään saadaan selville vertaamalla ilmakehän hiilimääriä eri vaihtoehdoissa (Kuva 2). Fossiilienergiavaihtoehdossa ilmakehän hiilimäärä on koko kiertoajan ajan kivihiilen päästöjen verran suurempi kuin vertailuvaihtoehdossa. Bioenergiavaihtoehdossa ilmakehän hiilimäärä on aluksi yhtä suuri kuin hakkuutähteiden poltossa vapautunut hiilimäärä ja tämän hiilimäärän verran suurempi kuin vertailuvaihtoehdossa, mutta kiertoajan kuluessa ero pienenee, koska hakkuutähteistä vapautuu hiiltä ilmakehään vertailuvaihtoehdossakin, jossa kaikki hakkuutähteet jätettiin hakkuualalle lahoamaan. Bioenergiavaihtoehdon ja vertailuvaihtoehdon välinen ero kuvaa metsäbioenergian aiheuttamaa ilmakehän hiilimäärän lisääntymistä, joka johtuu metsään sitoutuneen hiilimäärän vähenemisestä. Tämä ero on yhtä suuri kuin pois korjattujen hakkuutähteiden hiilimäärä, jos tähteet olisi jätetty hakkuualalle lahoamaan.

Jatkuvan energiantuotannon vaikutus ilmakehän hiilimäärään saadaan selville laskemalla vuosittaiset vaikutukset yhteen (Kuva 3). Tämä kuvaa tilannetta, jossa vuosi vuoden jälkeen hakataan uusi samanlainen metsähehtaari.



Kuva 2. Energiantuotannon vaihtoehtojen vaikutus ilmakehän hiilimäärään: a) ilmakehän hiilimäärä eri vaihtoehdoissa ja b) bioenergiavaihtoehdon ja fossiilienergiavaihtoehdon ero vertailuvaihtoehtoon (ei energiaa hakkuutähteistä eikä fossiilisista polttoaineista) verrattuna.



Kuva 3. Bioenergiavaihtoehdon ja fossiilienergiavaihtoehdon vaikutus ilmakehän hiilimäärään, kun energiaa tuotetaan vuosittain.

3 Tulokset

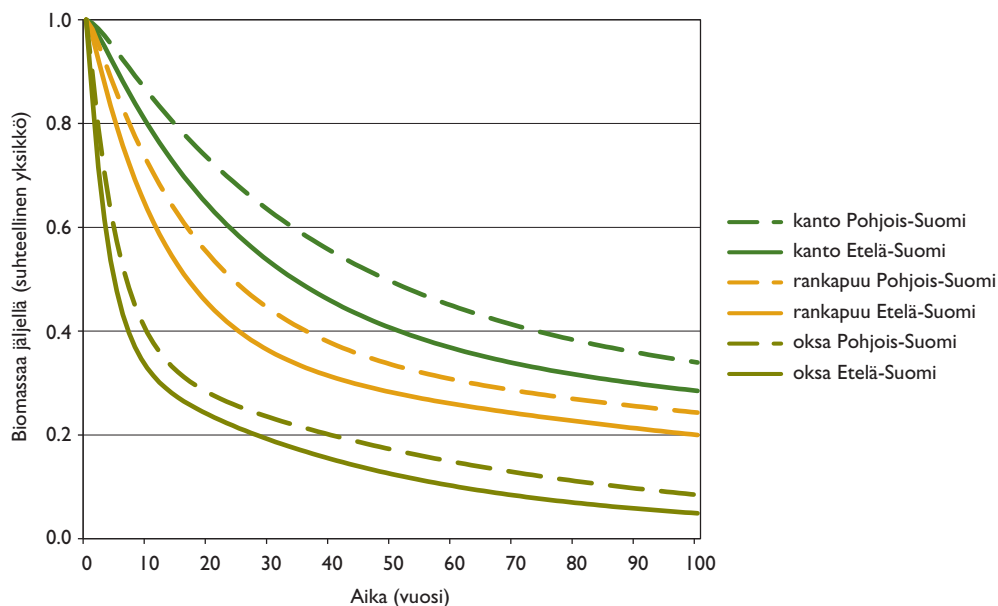
3.1

Kasvihuonekaasuvaikutus metsäbiomassan energiakäytöstä

3.1.1

Biomassan lahoaminen metsässä

Energiakäyttöön korjatun biomassan lahoaminen oli metsään jätettynä sitä hitaampaa mitä isokokoisempaa biomassaa oli (Kuva 4). Esimerkiksi 20 vuoden lahoamisen jälkeen kuusen oksista oli jäljellä 25–29 %, energiapuuharvennusten rankapuusta 47–56 % ja kannoista 66–74 %. Biomassan lahoamisvauhti hidastui ajan kuluessa. Pohjois-Suomen kylmemmässä ilmastossa biomassa lahosi jonkin verran hitaammin kuin Etelä-Suomessa. Esimerkiksi 20 vuoden lahoamisen jälkeen biomassaa oli Pohjois-Suomessa jäljellä 5–9 %-yksikköä enemmän biomassaositteesta riippuen.



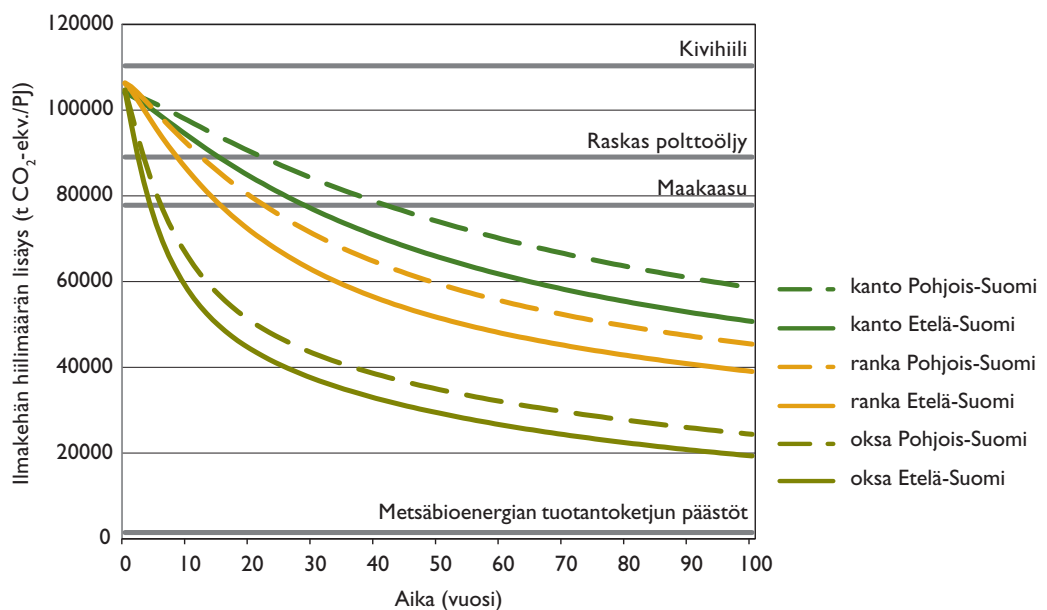
Kuva 4. Eräiden energiakäyttöön sopivien kuusen biomassaositteiden lahoaminen metsään jätettynä Etelä- ja Pohjois-Suomessa 100 vuoden aikana Yasso07-mallin mukaan. Oksien läpimittana käytettiin 2 cm, rankapuun 10 cm ja kantojen 30 cm.

Metsän hiilivaje ja tuotantoketjun päästöt

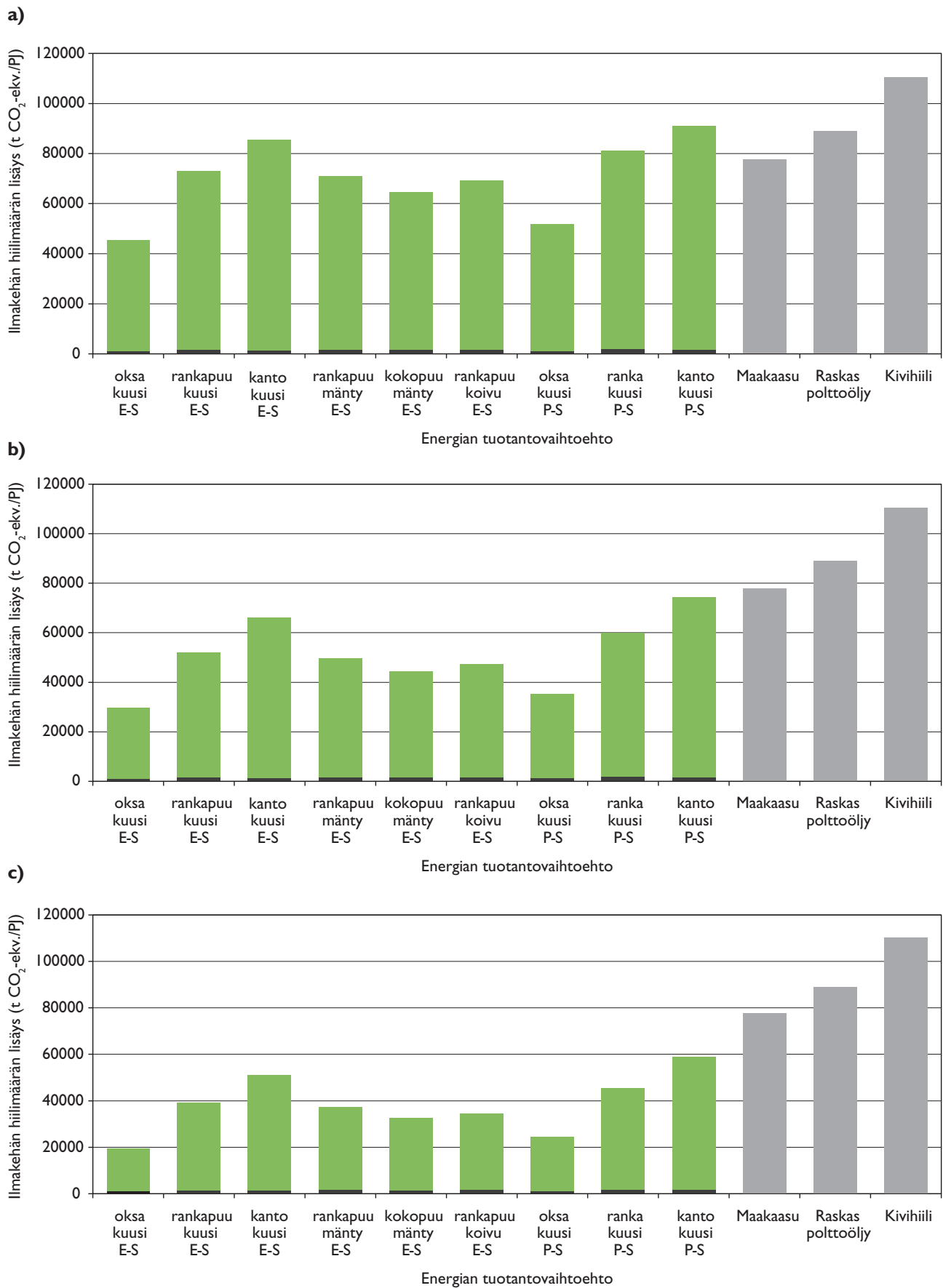
Kun biomassaa korjataan pois metsistä energiakäyttöä varten, metsään varastoitunut hiilimäärä vähenee yhtä paljon kuin poiskorjatussa biomassassa olisi hiiltä, jos se olisi jätetty lahoamaan metsään (ks. Kuva 4 ja kappale 2.2). Vuodesta toiseen jatkuvan biomassan korjuun aiheuttama metsän hiilivaje saadaan selville laskemalla yhteen vuosittaiset hiilimäärät, jotka korjatussa biomassassa olisi metsään jätettynä. Suhteuttamalla tämä metsän hiilivaje biomassasta saatuun energiamäärään voidaan laskea tuotettua bioenergiayksikköä kohti aiheutunut ilmakehän hiilimäärän lisäys, joka johtuu metsistä pois korjatun biomassan polttamisesta ja metsään sitoutuneen hiilimäärän vähenemisestä. Hiiltä sitoutuu takaisin kasvavaan metsään, mutta se ei vaikuta biomassan korjuun aiheuttamaan metsän hiilivajeeseen tai ilmakehän hiilimäärän lisääntymiseen, koska hiiltä sitoutuu metsän kasvuun riippumatta siitä korjattiinko biomassaa metsästä vai ei (ks. Luku 2.2).

Metsän hiilivajeesta johtunut ilmakehän hiilimäärän lisäys oli suurimmillaan silloin, kun vuodesta toiseen jatkuva bioenergian tuotanto aloitettiin (Kuva 5). Tällöin tämä vaikutus ilmakehän hiilimäärään oli noin 5 % pienempi kuin hiilipäästö, joka olisi aiheutunut saman energiamäärän tuottamisesta kivihiiltä polttamalla, mutta 18 % suurempi kuin raskaan polttoöljyn tai 35 % suurempi kuin maakaasun polttamisesta aiheutunut päästö. Tuotettua bioenergiayksikköä kohti laskettu metsän hiilivaje ja ilmakehän hiilimäärän lisäys pienenevät jatkettaessa bioenergian tuottamista vuodesta toiseen. Tämä johtui siitä, että aikaisemmin käsitellyillä aloilla biomassan korjuun aiheuttama hiilivaje oli pienempi kuin myöhemmin käsitellyillä aloilla (ks. Kuva 4). Kahdenkymmenen vuoden jälkeen oksabiomassasta tuotetun energian aiheuttama ilmakehän hiilimäärän lisäys oli 50–60 % pienempi kuin kivihiilen polttamisesta aiheutunut päästö. Rankapuusta tuotetun energian ero kivihiileen oli noin 30 % ja kannoista tuotetun energian noin 20 %.

Metsän hiilivaje ja siitä seurannut ilmakehän hiilimäärän lisäys vaihtelivat huomattavasti bioenergian tuotantovaihtoehtojen välillä (Kuva 6). Esimerkiksi bioenergian tuottaminen oksabiomassasta aiheutti 50–60 % pienemmän ilmakehän hiilimäärän



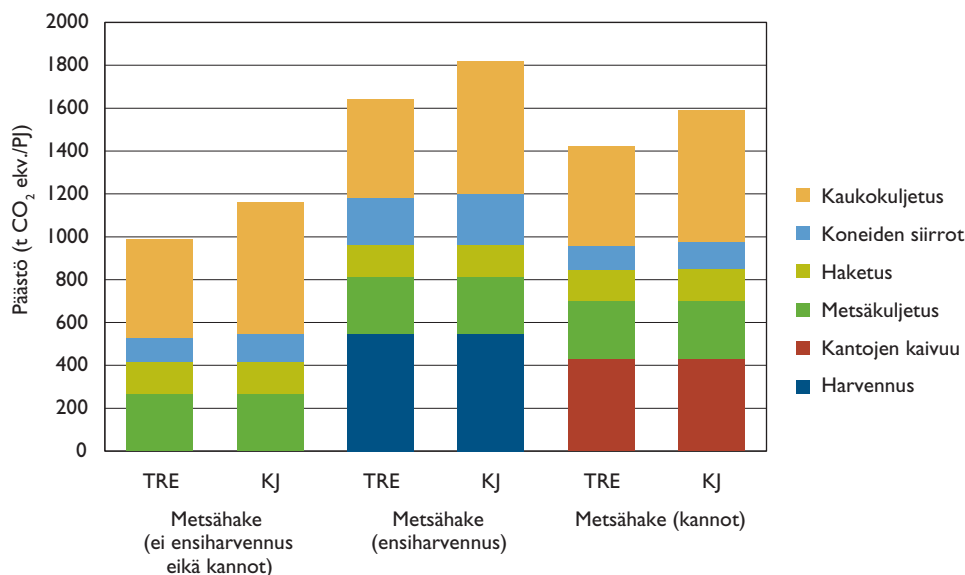
Kuva 5. Metsäbioenergian tuottamisesta aiheutunut ilmakehän hiilimäärän lisäys tuotettua energiayksikköä kohti sadan vuoden aikana energiantuotannon aloittamisen jälkeen tuotettaessa 1 PJ energiaa joka vuosi. Metsäbioenergian luvut sisältävät metsän hiilivajeen vaikutuksen ja bioenergian tuotantoketjun päästöt. Fossiilisten vertailupolttoaineiden päästöt sisältävät tuotantoketjun ja polton päästöt.



Kuva 6. Metsäbioenergian tuottamisesta aiheutunut ilmakehän hiilimäärän lisäys tuotettua energiayksikköä kohti a) 20, b) 50 ja c) 100 vuotta energiantuotannon aloittamisen jälkeen tuotettaessa 1 PJ energiaa joka vuosi (E-S Etelä-Suomi, P-S Pohjois-Suomi). Luvut sisältävät metsän hiilivajeen vaikutuksen (pylväiden vihreä osa) ja bioenergian tuotantoketjun päästöt (pylväiden tumma osa). Fossiilisten vertailupolttoaineiden päästöt sisältävät tuotantoketjun ja polton päästöt.

lisäyksen kuin bioenergian tuottaminen kantobiomassasta. Erot tuotantovaihtoehtojen välillä olivat merkittäviä verrattaessa erilaisen metsäbioenergian aiheuttamaa ilmakehän hiilimäärän lisäystä fossiilisten polttoaineiden päästöihin.

Metsäbioenergian tuotantoketjusta aiheutuneet päästöt olivat muutaman prosentin suuruiset metsän hiilivajeeseen verrattuna (ks. Kuvat 5 ja 6). Korjuu- ja kuljetusketjun päästöt koostuivat useissa työvaiheissa käytettyjen koneiden päästöistä (Kuva 7).



Kuva 7. Metsäbiomassan tuotantoketjun päästöjen jakautuminen eri vaiheisiin kohti Etelä-Suomessa (TRE) ja Pohjois-Suomessa (KJ). Päästöt on ilmoitettu energiasisältöä kohti.

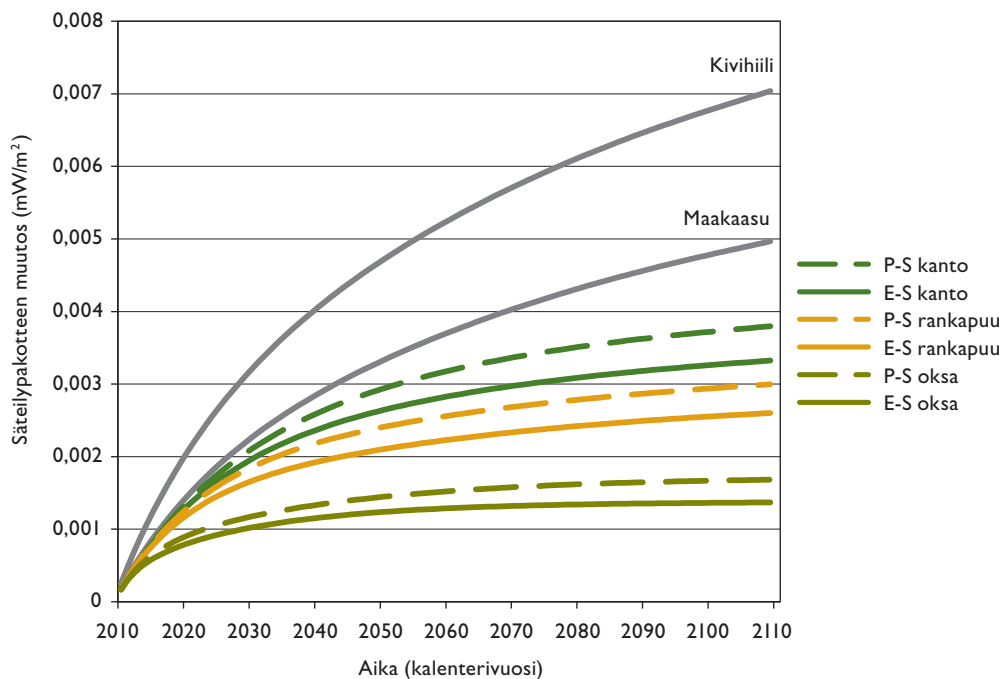
3.2

Ilmastovaikutus metsäbiomassan energiakäytöstä

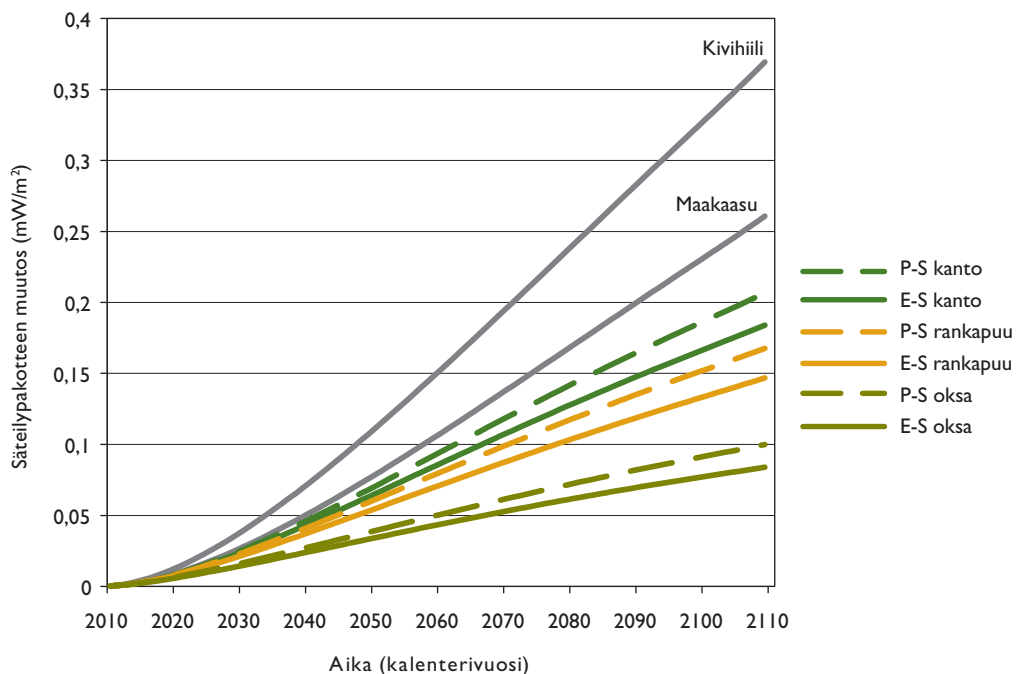
Metsäbiomassan energiakäytön aiheuttama säteilypakotevaikutus poikkesi kasvihuonekaasuvaikutuksesta jonkin verran. Ero johtui siitä, että säteilypakotevaikutus riippuu eri kasvihuonekaasujen päästöjen lisäksi niiden erilaisesta lämmittävästä vaikutuksesta ja viipymäajasta ilmakehässä sekä ilmakehän säteilypakotteen kehittymisestä muiden syiden vuoksi.

Ensimmäisessä säteilypakotevaikutusta kuvaavassa laskelmassa, jossa yksi PJ energiaa tuotettiin metsästä kerätystä biomassasta, ilmakehän kertynyt lämmittävä säteilypakotteen muutos tasaantui nopeammin kuin silloin, kun sama energiamäärä tuotettiin fossiilisia polttoaineita polttamalla (Kuva 8). Tasaantumisen johtui siitä, että myös biomassan polton vertailutilanteessa metsään jätetyn biomassan hiili vapautui ilmakehään vähitellen lahoamisen seurauksena. Kahdenkymmenen vuoden kuluttua yhden energiaerän tuottamisesta oksabiomassasta tuotetun energian aiheuttama lämmittävä vaikutus oli noin 68 % pienempi kuin kivihielestä tuotetun energian. Rankapuusta tuotetun energian ero kivihieleen oli noin 48 % ja kannoista tuotetun energian 39 %.

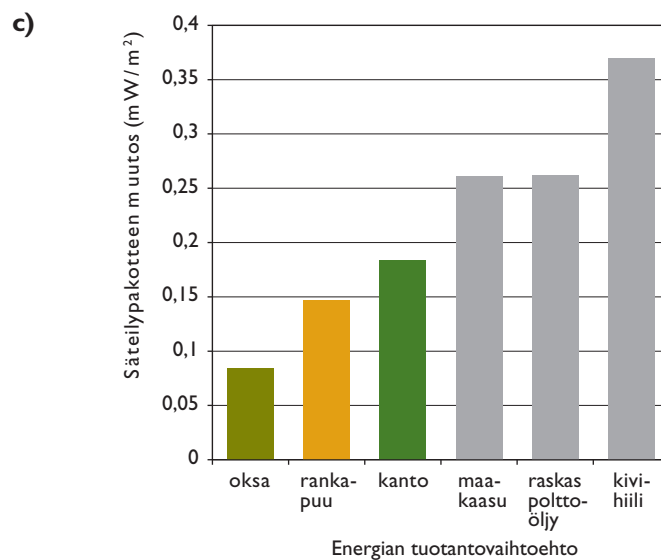
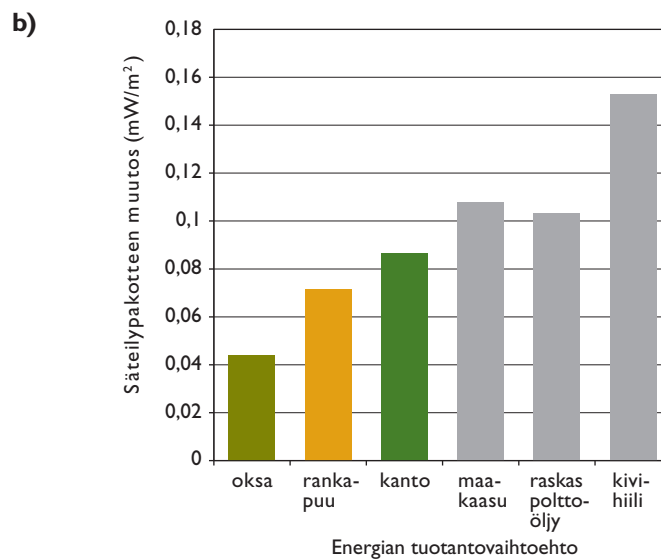
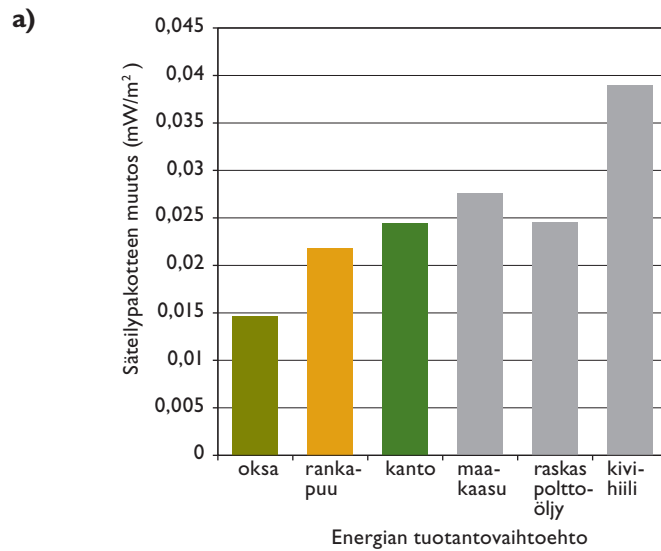
Toisessa säteilypakotevaikutusta kuvaavassa laskelmassa, jossa energiaa tuotettiin yksi PJ vuodesta toiseen, metsäbiomassan energiakäytön aiheuttama lämmittävä säteilypakotteen muutos pieneni fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna hitaammin kuin edellä kuvatussa kertatuotannon tapauksessa (Kuva 9). Eron hitaampi pieneminen



Kuva 8. Metsäbioenergian tuottamisesta ja fossiilisten polttoaineiden polttamisesta aiheutunut kertyvä lämmittävä ilmamehän säteilypakotteen muutos, kun tuotetaan 1 PJ energiaa tarkastelujakson alussa vuonna 2010 Pohjois-Suomessa (P-S) ja Etelä-Suomessa (E-S).



Kuva 9. Metsäbioenergian tuottamisesta ja fossiilisten polttoaineiden polttamisesta aiheutunut kertyvä lämmittävä ilmamehän säteilypakotteen muutos, kun tuotetaan 1 PJ energiaa jokaisena tarkastelujakson vuonna.



Kuva 10. Metsäbioenergian tuottamisesta kuusen eri biomassasoitteista Etelä-Suomessa ja fossiilisten polttoaineiden polttamisesta aiheutunut kertyvä lämmittävä ilmamehän säteilypakotteen muutos vuoteen a) 2030, b) 2060 ja c) 2110 mennessä, kun tuotetaan 1 PJ energiaa joka vuosi.

johtui siitä, että jatkuvaa energiantuotantoa varten biomassaa kerättiin aina uusilta metsäaloilta, joilla syntynyt hiilivaje ja siitä aiheutunut ilmakehän hiilidioksidin lisäys oli suuri (ks. Kuva 5). Kahdenkymmenen vuoden jälkeen oksabiomassasta tuotetun energian aiheuttama lämmittävä säteilypakotteen muutos oli 62 % pienempi kuin kivihielestä tuotetun energian. Rankapuusta tuotetun energian ero kivihieleen oli 44 % ja kannoista tuotetun energian 37 %.

Metsäbiomassan energiakäytöstä aiheutunut lämmittävä säteilypakotteen muutos vaihteli merkittävästi bioenergian tuotantovaihtoehtojen välillä käytetyn biomassaositteen mukaan (Kuva 10). Esimerkiksi kantobiomassasta tuotetun energian aiheuttama ilmasto lämmittävä vaikutus oli noin kaksinkertainen oksabiomassasta tuotetun energian vaikutukseen verrattuna. Erot bioenergian tuotantovaihtoehtojen välillä olivat merkittäviä verrattaessa bioenergian tuottamisesta aiheutunutta säteilypakotteen muutosta fossiilisten polttoaineiden polton aiheuttamiin säteilypakotteen muutoksiin.

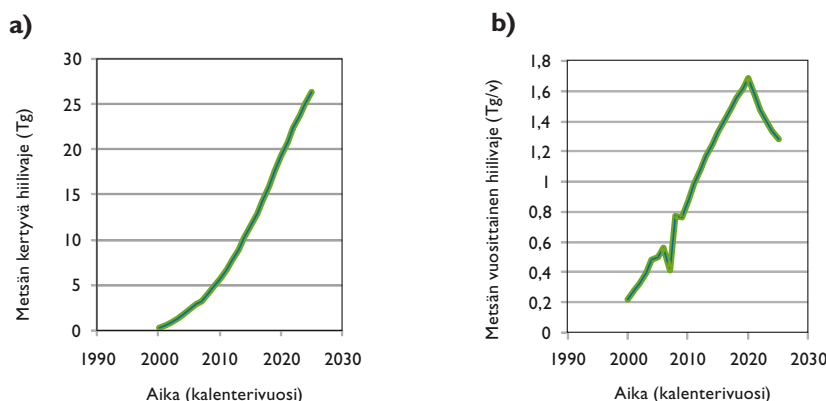
3.3

Metsäbiomassan energiakäytön kasvihuonekaasuvaikutus koko Suomen tasolla

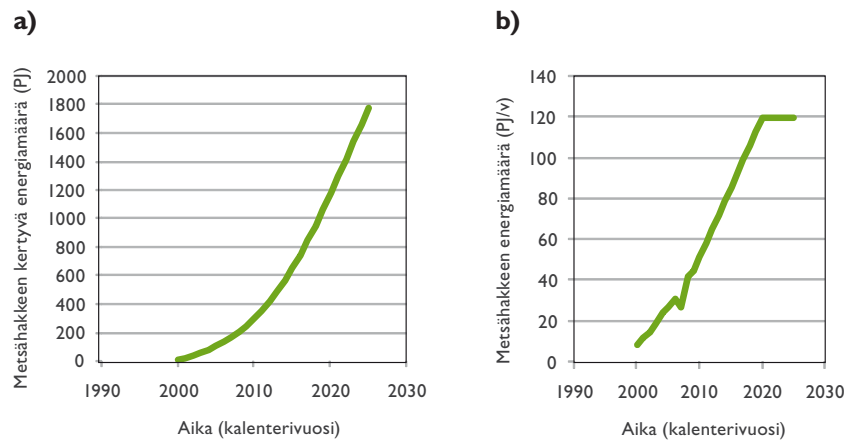
Ainespuun lisäksi metsistä energiantuotantoa varten pois korjattu biomassaa vähensi Suomen metsiin sitoutunutta hiilimäärä 26 miljoonaa tonnia vuosien 2000 ja 2025 välisenä aikana (Kuva 11a). Koska biomassaa poltettiin, ilmakehän hiilimäärä lisääntyi tämän metsien hiilimäärän vähentymisen verran metsähakkeen korjuun ja polton seurauksena. Laskelmissa käytettiin vuosina 2000–2008 toteutuneita metsähakkeen korjuumääriä ja vuosina 2009–2025 suunniteltuja määriä, joiden mukaan korjuumäärä kasvaa vuoden 2009 arvosta 5 Mm³ vuoden 2020 arvoon 13,5 Mm³.

Metsähakkeen korjuun aiheuttaman hiilivajeen muodostumisvauhti kiihtyi tarkasteltuna ajanjaksona 0,2 miljoonasta hiilitonnista vuodessa suurimmillaan 1,7 miljoonaan hiilitonniin vuodessa vuonna 2020 (Kuva 11b). Vauhdin kiihtyminen johtui metsähakkeen korjuumäärien lisääntymisestä. Vuosina 2021–2025 hiilivajeen muodostumisvauhti hidastui, koska metsähakkeen korjuumäärät tasaantuivat. Metsähakkeen korjaamisen vaikutus Suomen metsien vuosittaiseen hiilinieluun on yhtä suuri kuin tämä hiilivajeen muodostumisvauhti.

Metsistä vuosittain korjatun hakkeen sisältämä energiamäärä kasvoi korjuumäärän mukaan vuoden 2000 arvosta 8 PJ/v 2020-luvun arvoihin 120 PJ/v (Kuva 12b). Koko tarkastelujaksona vuosina 2000–2025 korjatun metsähakkeen energiasisältö oli 1800 PJ (Kuva 12a).



Kuva 11. Metsähakkeen keräämisen vähentävä vaikutus Suomen metsien hiilimäärään vuosina 2000–2025: a) kertyvä hiilivaje ja b) vuosittainen hiilivaje.



Kuva 12. Suomen metsistä kerätyn hakkeen energiamäärä vuosina 2000–2025: a) kertyvä energiamäärä ja b) vuosittainen energiamäärä.

Metsähakkeen korjuusta aiheutunut metsien hiilivaje (Kuva 11a) suhteessa metsähakkeesta kertyneeseen energiamäärään (Kuva 12a) oli aluksi, vuonna 2000, 98 000 tonnia hiilidioksidia per PJ (Kuva 13). Tämä luku pieneni tarkastelujakson aikana niin, että se oli vuonna 2025 54 000 tonnia hiilidioksidia per PJ. Luvun pieneneminen johtui siitä, että metsän hiilivaje pieneni suhteessa metsistä korjattuun hakemäärään, mikä johtui puolestaan siitä, että metsistä korjattu hake olisi lahonnut metsässäkin.

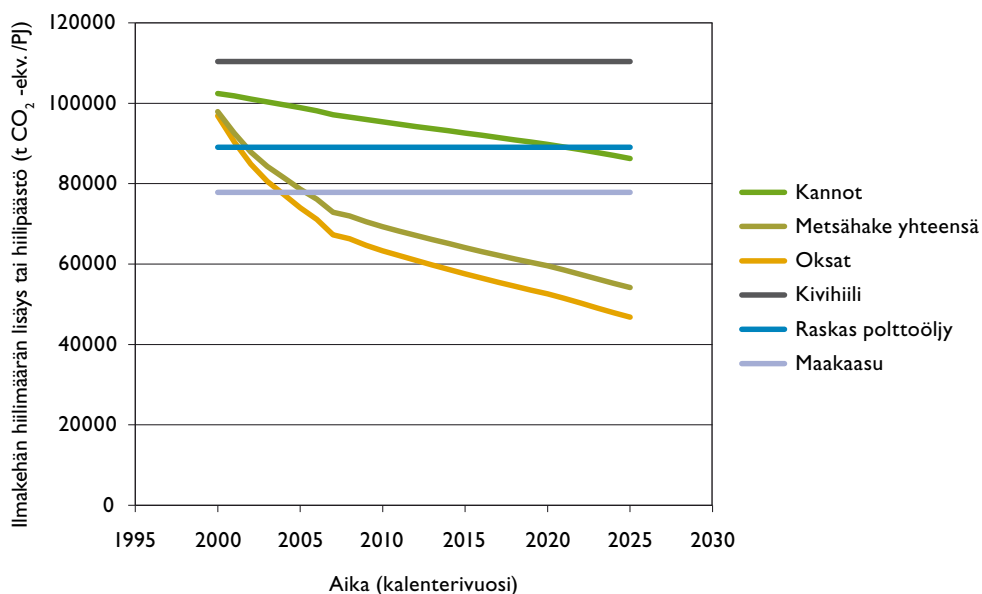
Oksien korjuusta aiheutunut metsän hiilivaje suhteutettuna hakkeen energiasältöön oli koko tarkastelujakson ajan pienempi kuin kantojen korjuusta aiheutunut hiilivaje ja se pieneni nopeammin (Kuva 13). Oksien luku laski vuoden 2000 arvosta 97 000 tonnia hiilidioksidia per PJ vuoden 2025 arvoon 47 000 tonnia hiilidioksidia per PJ. Kantojen luku pieneni vastaavasti vuoden 2000 arvosta 102 000 tonnia hiilidioksidia per PJ vuoden 2025 arvoon 86 000 tonnia hiilidioksidia per PJ.

Metsähakkeen energiakäyttö lisäsi ilmakehän kasvihuonekaasumäärää tarkastelujakson loppuun, vuoteen 2025, mennessä 50 % vähemmän kuin vastaavan energiasältöisen kivihiilimäärän polttaminen (Kuva 13). Maakaasun polttamiseen verrattuna ilmakehän kasvihuonekaasumäärä lisääntyi 30 % vähemmän. Kantojen energiakäytön ilmakehän kasvihuonekaasumäärää lisäävä vaikutus oli aluksi, vuonna 2000, 7 % pienempi kuin kivihiilen ja tarkastelujakson lopussa, vuonna 2025, 22 % pienempi. Kantojen vaikutus alitti raskaan polttoöljyn vaikutuksen noin vuonna 2020 ja tarkastelujakson lopussa se oli 2 % pienempi. Kantojen vaikutus ylitti maakaasun vaikutuksen tarkastelujakson alussa, vuonna 2000, 31 %:lla ja tarkastelujakson lopussa, vuonna 2025, 12 %:lla.

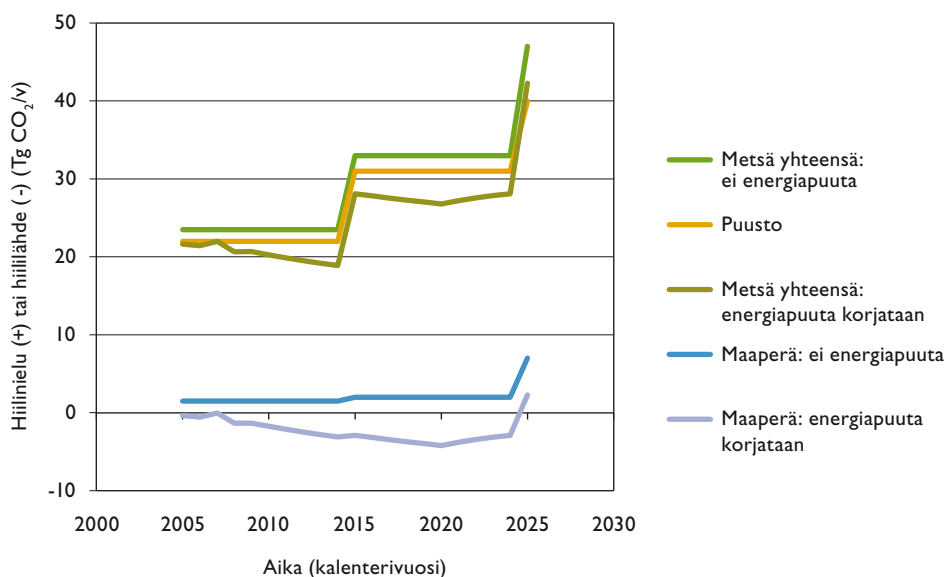
Metsähakkeen korjuu vähensi Suomen metsien hiilinielua 2–6 miljoonalla tonnilla hiilidioksidia vuosina 2005–2025 (Kuva 14). Tästä vähennyksestä huolimatta metsien puusto ja maaperä yhteenlaskettuina säilyivät selvästi hiilinieluna puuston suuren hiilinieluarvion vuoksi. Metsien maaperä sen sijaan muuttui hiilinielusta hiililähteeksi metsähakkeen korjuun vuoksi lukuun ottamatta tarkastelujakson viimeistä vuotta 2025. Tällöin alkavalla jaksolla laskelmien lähtötietoina käytettyjen sekä puuston että maaperän hiilinielujen arviot olivat suuria ja maaperä muuttui taas hiilinieluksi metsähakkeen korjuusta huolimatta.

Metsäbiomassan energiakäytön vaikutusta Suomen kasvihuonekaasupäästöihin on havainnollistettu kuvassa 15. Vuonna 2020 metsien hiilinielu on 6,2 miljoonaa hiilidioksiditonnia pienempi metsäbiomassan energiakäytön seurauksena verrattuna tilanteeseen, jossa biomassaa ei olisi korjattu energiantuotantoa varten. Vuoden 2020 hiilinieluarvioon verrattuna vähennys on noin 20 % (Kuva 14) ja vuoden 2007 arvoon verrattuna noin 25 % (Kuva 15a). Jos metsäbiomassasta saatavalla energialla korvataan kivihiilen polttamista, energiantuotannon päästöt vähenevät 10,7 miljoonaa

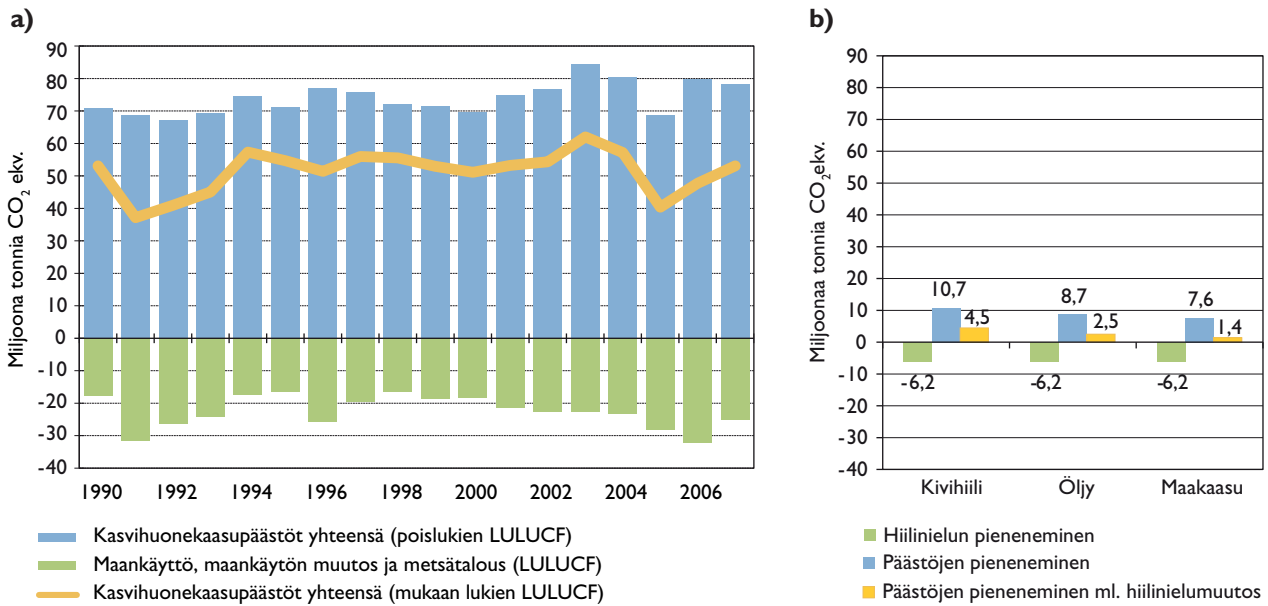
tonnia (Kuva 15b). Päästöjen ja hiilinielun vähenemisen erotuksena Suomen nettopäästöt ilmakehään vähenevät 4,5 miljoonaa tonnia. Jos metsäbioenergialla korvataan öljyä, energiantuotannon päästöt vähenevät 8,7 miljoonaa tonnia ja nettopäästöt 2,5 miljoonaa tonnia. Jos metsäbioenergialla korvataan maakaasua, energiantuotannon päästöt vähenevät 7,6 miljoonaa tonnia ja nettopäästöt 1,4 miljoonaa tonnia.



Kuva 13. Suomen metsistä kerätyn hakkeen aiheuttama ilmakehän hiilimäärän lisäys suhteutettuna hakkeen energiamäärään vuosina 2000–2025 ja fossiilisten polttoaineiden päästöt suhteutettuna energiamäärään.



Kuva 14. Metsähakkeen korjuun vaikutus Suomen metsien hiilitaseeseen vuosina 2005–2025. Puuston hiilinieluarvio ja maaperän arvio ilman hakkeen korjuuta on otettu Sieväsen ym. (2007) tutkimuksesta. Metsähakkeen korjuun vaikutus on laskettu tässä tutkimuksessa. Tämän laskelman tulos on vähennetty Sieväsen ym. (2007) maaperän hiilinieluarviosta. Portaatt kuvaajissa johtuvat 10-vuotiskausille ilmoitetuista puuston hiilinieluarvioista.



Kuva 15. a) Suomen kasvihuonekaasupäästöt ja hiilinielu v. 1990-2007 (YM ja Tilastokeskus 2009) ja b) metsäbiomassan vaikutus hiilinieluun ja päästöihin v. 2020 korvattaessa metsäbioenergialla kivihiilen, öljyn tai maakaasun polttoa. Hiilinielun pienemisestä noin 1/3 johtuu kantojen korjuusta ja 2/3 oksien.

3.4

Pienhiukkasvaikutus metsäbiomassan energiakäytöstä

Metsähakkeen poltto voimalaitoksessa (kupliva leijupetikattila, täyttää IE-direktiivin päästöraja-arvot uusille laitoksille) 1 PJ/vuosi aiheuttaa noin 3100 kg (PM_{2,5}) päästön (Taulukko 2, Kuva 16). Metsähakkeen korjuu aiheuttaa 42 kg (PM_{2,5}) pakokaasupäästöt PJ metsähaketta kohden (oletettu EU Stage IIIB/IV tason korjuukalusto, eli vuodesta 2011 eteenpäin uusilta koneilta vaadittavat päästöraajat). Vastaavasti kuljetus aiheuttaa 140 kg (PM_{2,5}) / PJ Kuru-Tampere 55 km kuljetukselle ja 150 kg (PM_{2,5}) / PJ Savukoski-Kemijärvi 95 km kuljetukselle. Kuljetuksen päästöjen arvio pitää sisällään sekä pakokaasupäästöt että ei-pakokaasuperäiset (tien, renkaiden ja jarrujen kulumisen sekä resuspensio) pienhiukaspäästöt.

Primääristen pienhiukaspäästöjen vaikutusta vuosikeskiarvopitoisuuksiin arvioitiin mallilaskelmilla korjuun ja kuljetusten (Kuva 17 a ja c) ja puun voimalaitospolton (Kuva 17 b ja d) osalta laskettuna 1 PJ / vuosi metsähakkeen käytölle. Korjuun ja kuljetuksen pitoisuusvaikutuksia arvioitiin 1 km alueresoluutiolla, ja näiden perusteella vuosikeskiarvopitoisuudet kasvoivat enimmillään alle 10 ng/m³ eli alle 0,01 µg/m³. Korkean piipun päästä tulevat voimalaitospäästöt laimenevat tehokkaasti ja leviävät laajemmalle alueelle. Voimalaitoksen aiheuttamia pitoisuuksia arvioitiin 10 km alueresoluution mallinuksilla, ja aiheutuvat pitoisuuslisät olivat maksimissaan luokkaa 1 ng/m³ vuosikeskiarvoina.

Tarkasteltujen tapausten aiheuttamien pitoisuuksien keskimääräistä väestöaltistusta koko Suomen väestön yli laskettiin, jotta pystytään arvioimaan näiden päästölähteiden väestöaltistusvaikutuksia keskenään. Väestöaltistusta kuvattiin väestöpainotetulla pitoisuudella, ts. laskennassa yhdistetään päästöistä aiheutuva hiukkas-pitoisuus ilmassa väestön sijaintitietoon (Taulukko 2, Kuva 16b). Voimalaitospolton aiheuttama väestöpainotettu pitoisuus oli 6,8*10⁻¹¹ g/m³ Tampereen tapauksessa ja 0,45*10⁻¹¹ g/m³ Kemijärvelle. Vaikka aiheutuvat pitoisuudet ovat molemmissa tapa-

uksissa samaa suuruusluokkaa, aiheuttaa päästö Tampereella yli kymmenkertaisen väestöaltistuksen johtuen suuremmasta asukastiheydestä ja täten pitoisuuksille altistuvien ihmisten määrästä.

Vastaavasti kuljetusten päästöt aiheuttavat $3,2 \cdot 10^{-11}$ g/m³ väestöpainotetun pitoisuuden Tampereen seudun tapauksessa ja $0,14 \cdot 10^{-11}$ g/m³ Kemijärvelle. Vaikka kuljetuksista aiheutuu huomattavasti alhaisemmat hiukkaspäästöt kuin voimalaitospoltosta, vain noin 1/20, kuljetusten päästöjen aiheuttama väestöaltistuslisä on kuitenkin lähes puolet voimalaitospolton aiheuttamasta. Tämä johtuu siitä että kuljetusten aiheuttamat korkeimmat pitoisuudet sijaitsevat väylien varsilla ja osittain myös kaupunkialueilla, ts. alueilla missä asukastiheydet ovat suhteellisen korkeita.

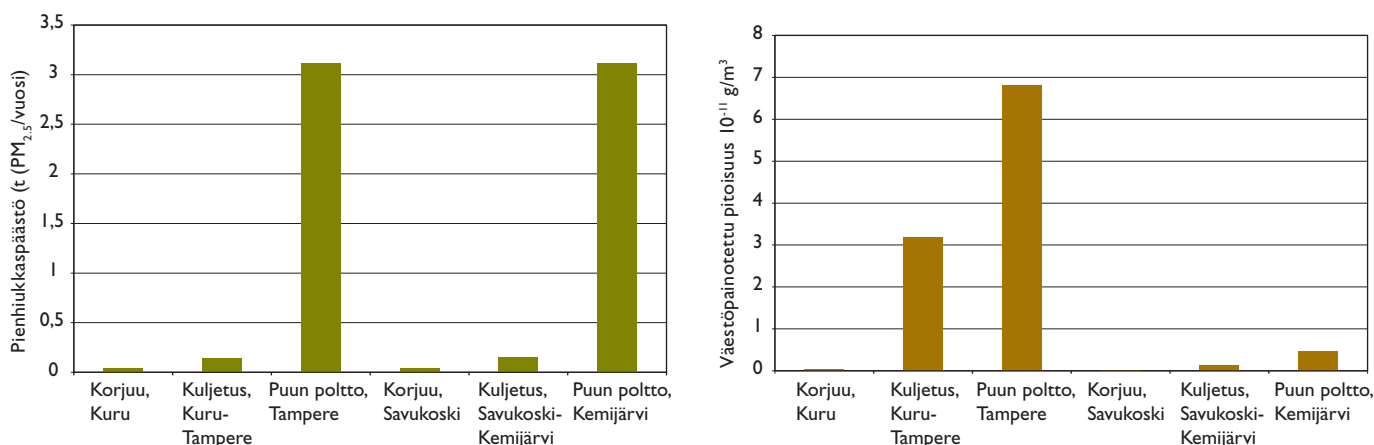
Korjuun osalta väestöaltistusvaikutukset ovat erittäin pienet molemmissa tapauksissa, $0,016-0,039 \cdot 10^{-11}$ g/m³, johtuen siitä, että päästöt tapahtuvat pääosin metsäisillä seuduilla, eivätkä leviä tehokkaasti asutuille alueille.

Taulukko 2. Metsähakkeen käytön (1 PJ/vuosi) vaikutukset pienhiukkaspäästöihin, -pitoisuuksiin ja pienhiukkasten väestöaltistukseen.

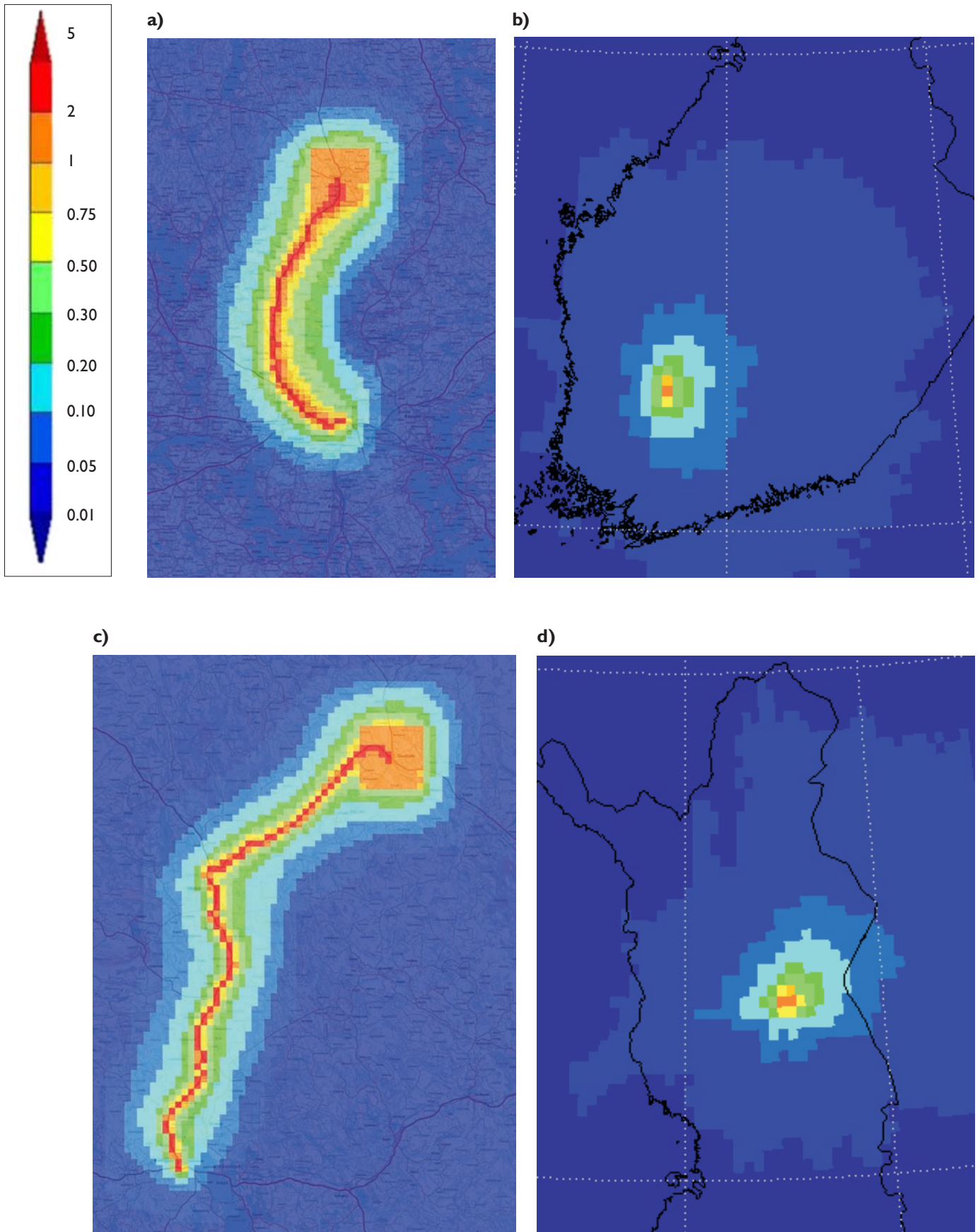
	Polttoaineen kulutus (TJ / PJ metsähaketta)	Pienhiukkaspäästö (kg(PM _{2,5}) / PJ metsähaketta)	Mallinnettu vaikutus vuosikeskiarvopitoisuuksiin, korkeimmat arvot (ng / m ³)	Väestöpainotettu pitoisuus (10 ⁻¹¹ g/m ³)
Korjuu, Kuru ¹	7,1	42	1,8	0,039
Kuljetus, Kuru-Tampere ²	6,2	140	6,8	3,2
Puun poltto, Tampere	1000	3100	1,2	6,8
Korjuu, Savukoski ¹	7,3	43	1,7	0,016
Kuljetus, Savukoski-Kemijärvi ²	8,3	150	4,0	0.14
Puun poltto, Kemijärvi	1000	3100	1,3	0,45

¹ Oletettu EU Stage IIIB/IV (2011 eteenpäin) tason korjuukalusto, päätehakkuu, ei sisällä kantojen nostoa

² Oletettu EURO IV/V (2005 eteenpäin) tason kuljetuskalusto



Kuva 16. Metsähakkeen käytön 1 PJ/vuosi aiheuttamat a) pienhiukkaspäästöt (t (PM_{2,5})/vuosi) ja b) vaikutukset mallinnettuun väestöaltistukseen (väestöpainotettu pitoisuus, 10⁻¹¹g / m³).



Kuva 17. Korjuusta ja kuljetuksista (a ja c) sekä hakkeen voimalaitospoltosta (b ja d) aiheutuvat mallinnetut pienhiukkaspitoisuudet (ng/m^3 vuosikeskiarvo).

4 Tulosten tarkastelu

4.1

Metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutus

Metsäbiomassan energiakäyttö ei ole päästötöntä, vaan se lisää kasvihuonekaasujen määrää ilmakehässä (esim. Kuva 5) ja aiheuttaa lämmittävän ilmastovaikutuksen (esim. Kuva 9). Nämä ilmakehä- ja ilmastovaikutukset johtuvat siitä, että biomassan korjaaminen pois metsästä vähentää metsiin varastoitunutta hiilimäärää ja sen polttaminen energiantuotannossa vapauttaa hiilen ilmakehään. Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen metsäbioenergialla ei siis ole yhteismitallista päästövähennysten kanssa, vaan päästöt vähenevät huomattavasti vähemmän kuin metsäbioenergialla korvattava fossiilisten polttoaineiden osuus on.

Tässä tutkimuksessa metsäbiomassan jatkuvan energiakäytön aiheuttama ilmakehän kasvihuonekaasujen lisäys vaihteli välillä 20–109 g CO₂-ekv./MJ biomassaositteesta, korjuupaikan ilmasto-oloista ja tarkasteltavasta ajanjaksosta riippuen (Kuva 5). Palosuo ym. (2001) arvioivat hakkuutähteiden, oksien ja neulasten, energiakäytön päästöiksi Etelä-Suomessa 13–18 g CO₂-ekv./MJ tuotettaessa energiaa jatkuvasti sadan vuoden ajan. Tämän tutkimuksen vastaava arvio oksille oli 20 g CO₂-ekv./MJ. Hieman suurempi arvo johtuu siitä, että tässä tutkimuksessa käytettiin uudempaa Yasso07-maahiilimallia (Tuomi ym. 2009, 2010a), jonka mukaan hakkuutähteet lahoavat jonkin verran hitaammin kuin Palosuon ym. (2001) käyttämän aikaisemman Yasso-maahiilimallin mukaan (Liski ym. 2005). Sievänen ym. (2007) laskivat, että hakkuutähteiden korjuun lisääminen 15 Mm³:iin vuoteen 2030 mennessä pienentäisi Suomen metsien vuosittaista hiilinielua 2,2–3,1 miljoonaa CO₂-ekv. tonnia. Tässä tutkimuksessa metsähakkeen korjuun lisääminen 13,5 Mm³:iin vuoteen 2020 mennessä vähensi vuosittaista hiilinielua 2–6 miljoonaa CO₂-ekv. tonnia vuosina 2005–2025 (Kuva 14). Jonkin verran suuremmat arvot johtuvat siitä, että tässä tutkimuksessa metsähakkeen korjuuta lisättiin nopeammin, hakkeen jako kantojen ja muiden hakkuutähteiden välillä saattoi olla erilainen ja tämän tutkimuksen laskelmat tehtiin uudemmalla Yasso07-mallilla. Kaiken kaikkiaan voidaan todeta, että tämän tutkimuksen tulokset ovat vertailukelpoisia aikaisempien vastaavien laskelmien kanssa.

Metsäbiomassan energiakäytön aiheuttama ilmakehän hiilimäärän lisäys on suurimmillaan tuotettua energiamäärää kohti silloin, kun biomassaa aletaan korjata metsistä ja käyttää energiantuotantoon (Kuvat 5 ja 13). Tällainen päästöjen aika-riippuvuus heikentää mahdollisuuksia vähentää energiantuotannon aiheuttamaa hiilidioksidikuormaa ilmakehään metsäbiomassan energiakäytön avulla nopeasti. Päästöjen vähenemisen hitaus on ongelmallista, jos pyritään rajoittamaan ilmaston muuttuminen siedettäväksi arvioituihin rajoihin, esimerkiksi kahden asteen lämpenemiseen, koska tällöin päästöjä pitäisi pystyä vähentämään nopeasti (IPCC 2007b).

Eri biomassaositteista tuotetulla energialla on erilainen vaikutus ilmakehän hiilidioksidimäärään (Kuvat 5, 6 ja 13). Näin ollen on mahdollista parantaa metsäbio-

energian ilmastovaikutusta käyttämällä energiantuotantoon ilmastovaikutuksiltaan parhaita ositteita. Esimerkiksi oksien käyttö lisää ilmakehän hiilidioksidimäärää 47–39 % vähemmän 20 vuoden aikana kuin kantojen käyttö (Kuva 6). Samana aikana oksien käytöllä on mahdollista vähentää ilmakehän hiilidioksidikuormaa esimerkiksi kivihiilen käyttöön verrattuna 50–60 %, kantoja käyttämällä tämä vähennys on noin 20 %.

Ilmastovaikutuksiltaan edullisen metsäbiomassan energiakäyttöä voi rajoittaa sen saatavuus - etenkin silloin, jos bioenergian tuotantotavoite on korkea. Korkean tavoitteen saavuttaminen voi edellyttää myös ilmastovaikutuksiltaan epäedullisen biomassan energiakäyttöä. Tämä voi heikentää koko metsäbioenergian tuotannon ilmastovaikutusta. Suomessa tavoitteiden mukaisen energiamäärän tuottamiseen on arvioitu tarvittavan 13,5 Mm³ puubiomassaa vuodessa (TEM 2010a,b). Nuorten metsien harvennuspuun tekniseksi korjuupotentiaaliksi on arvioitu 6,9 Mm³/v, päätehakkuiden latvusmassan 6,5 Mm³/v ja kantojen 2,5 Mm³/v (Laitila ym. 2008). Näiden lukujen mukaan ilmastovaikutuksiltaan kantoja edullisempien harvennuspuun ja latvusmassan (esim. Kuvat 5 ja 9) tekninen korjuupotentiaali riittäisi juuri ja juuri kattamaan tavoitteiden mukaisen tarpeen. Toisaalta on huomattava, että metsähaketta suunnitellaan käytettäväksi myös liikenteen biopolttoaineiden tuottamiseen (esim. Kirkinen ym. 2009), mikä lisää energiakäyttöön tarvittavan biomassan määrää.

Suurin osa ilmakehän kasvihuonekaasujen määrän lisääntymisestä metsäbiomassan energiakäytön seurauksena johtuu metsän hiilitaseen muutoksista (esim. Kuva 5). Metsäbioenergian tuotantoketjun päästöt ovat metsän hiilitaseen muutoksiin verrattuna muutamia prosentteja. Metsän hiilitaseen tärkeys on huomionarvoista useasta syystä. Ensiksi metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutuksiin voi vaikuttaa nimenomaan metsän hiilitaseen kautta, ei niinkään tuotantoketjun päästöjä muuttamalla. Toiseksi metsäbiomassan energiakäytön vaikutukset metsän hiilitaseeseen on tunnettava luotettavasti, jotta metsäbioenergian ilmastovaikutus osataan arvioida oikein. Kolmanneksi energiapuun korjuun vaikutukset metsän hiilitaseeseen on otettava huomioon laskettaessa metsäbioenergian ilmastovaikutuksia. Muussa tapauksessa arviot ilmastovaikutuksista ovat virheellisiä.

4.2

Metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutusten huomioiminen laskentasäännöissä

Ilmastopolitiikan taustalla käytettävät erilaiset laskentasäännöt huomioivat metsäbiomassan energiakäytön aiheuttamat kasvihuonekaasuvaikutukset eri tavoin (Taulukko 3). Puun polton päästöt jätetään huomioimatta kaikissa laskelmissa, koska puu luokitellaan uusiutuvaksi energialähteeksi. Sen sijaan energiantuotantoa varten metsistä korjattavan biomassan aiheuttamien metsien hiilitasemuutosten huomioimisessa on merkittäviä eroja laskentasääntöjen välillä.

Suomen vuosittaisessa kasvihuonekaasuraportissa Yhdistyneiden Kansakuntien ilmastopöytäkirjalle metsäbioenergian kasvihuonekaasuvaikutukset näkyvät täysimääräisinä. Puun korjuu energian tuottamiseksi vähentää inventaarion maaperäosaan tulevaa hiilimäärää (ks. esim. Sievänen ym. (2007) s. 335). Tällä on samanlainen maaperän hiilivarastoa ja -nielua vähentävä vaikutus kuin tämän tutkimuksen laskelmissa (Luku 3.3). Suomen käyttämää Tier 3 -tason menetelmää yksinkertaisemmissa Tier 1 ja 2 -tason menetelmissä energiaksi korjattavan puun vaikutus ei näkyisi. Tier 1 -tason menetelmät perustuvat IPCC:n oletusarvoihin eikä näiden arvojen laskennassa ole huomioitu energiapuun korjuuta. Tier 2 -tason menetelmissä ekosysteemytyppi-

Taulukko 3. Metsäbiomassan energiakäytön aiheuttamien metsän hiilitaseen muutosten huomiointi eri raportointi- ja laskentamenetelmissä.

Raportointi- tai laskentamenetelmä	Metsän hiilitaseen muutosten vaikutus
YK:n ilmastopimuksen mukainen vuosittainen kasviuonekaasujen raportointi	Täysimääräisinä
Kioton pöytäkirjan mukainen metsien hiilitaseen raportointi	Ei vaikuta, jos energiapuun korjuu ei pienennä metsien hiilinielua pienemmäksi kuin ARD-hiililähteen kompensaaation ja asetetun kynnyksarvon summa on. Tekee pakolliseksi raportoida maaperän hiilivaraston muutokset, jos energiapuun korjuu pienentää maaperän hiilinielua niin paljon, ettei ole enää mahdollista osoittaa, että metsien maaperä ei ole hiililähde.
EU:n uusiutuvan energian käytön lisäämiseen tähtäävä RES-direktiivi	Ei vaikuta tai huomioida, kun energiapuun korjuuseen ei liity maankäytön muutosta.
Elinkaarianalyysin ja hiilijalanjäljen arvioinnin menetelmä PAS 2050	Ei vaikuta tai huomioida, kun energiapuun korjuuseen ei liity maankäytön muutosta.

kohtaiset hiiliarvot perustuvat paikallisiin mittauksiin, joita ei ole välttämättä tehty bioenergian tuotantokohteissa.

Kioton pöytäkirjan edellyttämässä raportoinnissa Suomen metsien hyvitetävälle hiilinielulle on asetettu kattoluku 0,59 Mt CO₂-ekv./v, joka on hyvin pieni metsien todelliseen hiilinieluun verrattuna (Kuva 14). Puun korjuu energiantuotantoon pienentää puuston ja maaperän yhteenlaskettua hiilinielua niin vähän, ettei metsien hiilinielu muutu kynnyksarvoa pienemmäksi. Toisaalta Kioton pöytäkirjan raportoinnissa sovelletaan periaatetta, jonka mukaan hiilinieluhyvityksen saadakseen jonkin tai jotkut metsien viidestä hiilitaseen osasta saa jättää raportoimatta vain, jos on mahdollista osoittaa "läpinäkyvästi" ja "todistettavasti", että raportoimatta jätetty hiilitaseen osa ei ole hiililähde. Tämän tutkimuksen laskelmissa puun korjuu energian tuottamiseksi käänsi Suomen metsien maaperän hiilinielusta hiililähteeksi (Kuva 14). Näin ollen Suomen on ilmoitettava myös maaperän hiilivaraston muutokset Kioton pöytäkirjan mukaisessa raportoinnissaan.

Euroopan Unionin uusiutuvan energian käytön lisäämiseen tähtäävässä RES-direktiivissä on määritelty, että energiakäyttöön tuotettujen biopolttonesteiden on vähennettävä kasviuonekaasupäästöjä fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna 35 % (Direktiivi 2009/28/EY). Tämän tutkimuksen mukaan tämä vaatimus ei välttämättä täyty, jos polttonesteitä tuotetaan metsäbiomassasta (Kuvat 5 ja 13). Direktiivissä on kuitenkin määritelty erityiset säännöt päästöjen laskentaan. Sääntöjen mukaan maankäyttöön liittyvät kasviuonekaasupäästöt huomioidaan vain silloin, kun ne johtuvat maankäytön muutoksesta (Direktiivi 2009/38/EY liite V). Kun biomassaa korjataan metsistä energiantuotantoa varten, metsä säilyy metsänä, eikä hiilivaraston muutos kuulu direktiivin laskentaohjeiden piiriin. Tässä tilanteessa ohjeiden mukaan lasketut luvut aliarvioivat metsäbiomassasta tuotetun polttonesteen ilmastovaikutusta oleellisesti.

Palvelujen ja tuotteiden elinkaaren kasviuonekaasupäästöjen ja hiilijalanjäljen arviointiin tarkoitettussa standardimenetelmässä (PAS 2050) huomioidaan maankäyttöön liittyvät kasviuonekaasuvaikutukset RES-direktiivin tapaan vain silloin, kun maankäyttöluokka muuttuu. Kun tätä standardimenetelmää sovelletaan metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutusten arviointiin metsän säilyessä metsänä, suurin kasviuonekaasuvaikutuksen aiheuttaja, metsän hiilitaseen muuttuminen, jää huomioimatta. Tämän vuoksi ilmastovaikutusta aliarvioidaan.

Metsäbiomassan energiakäytön pienhiukkasvaikutukset

Tarkasteltaessa mallinnustuloksia pienhiukkaspäästöistä ja aiheutuvista väestöaltistuksista (ks. 3.4) tulee huomioda, että mallinnus koskee vain tarkasteltujen päästölähteiden primääristen hiukkaspäästöjen aiheuttamaa lisää hiukkaspitoisuuksiin. Vaikutuksia tarkasteltiin 1 PJ primäärienergiaa metsätähdehaketta kohden. Jotta vaikutusten suuruusluokasta saadaan käsitystä koko maan tasolla, seuraavassa on tarkasteltu tuloksia suuntaa-antavasti suhteutettuna uusiutuvan energian velvoitepaketin linjauksiin (TEM 2010a,b).

Uusiutuvan energian velvoitepaketissa kaavaillaan n. 68 PJ/vuosi lisäystä metsähakkeen käytölle vuoteen 2020 mennessä. Tämä vastaa reilua neljää prosenttia Suomen koko primäärienergian kulutuksesta vuonna 2020 kansallisen ilmastostrategian mukaan (Hildén ym. 2008). Pienhiukkaspäästöjä 68 PJ metsähakkeen voimalaitospoltosta syntyisi noin 210 tonnia ($PM_{2,5}$), joka vastaisi 0,8 % Suomen $PM_{2,5}$ kokonaispäästöistä vuonna 2020. Jos oletetaan että metsähakkeen poltto korvaisi vastaavasti kivihiihtä, pienhiukkaspäästöjen lisäys olisi arviolta 150 tonnia vuodessa. Maakaasun poltossa ei synny merkittäviä pienhiukkaspäästöjä, joten korvattaessa hakkeella maakaasua, päästöjen lisäys olisi 210 tonnia.

Metsähakkeen käytön lisäys lisäisi rekkakuljetuksia noin 30 miljoonaa ajoneuvo-kilometriä vuodessa. Tämä vastaa alle yhtä prosenttia raskaan liikenteen ajoneuvosuoritteesta Suomessa vuonna 2020. Kuljetusten lisääntymisestä syntyisi pienhiukkaspäästöjä noin 10 tonnia/vuosi. Päästöt ovat pääosin ei-pakokaasuperäisiä tiepölyhiukkasia; vuonna 2020 rekkojen pakokaasupäästöt ovat tiukan päästölainsäädännön ansiosta varsin alhaiset.

Metsähakkeen käytön lisäyksen vaikutukset väestöaltistukseen riippuvat voimakkaasti asukastiheyksistä alueilla missä lisäys tapahtuu. Metsähakkeen käytön 68 PJ/vuosi päästöt asukastiheyksiltään Tampereen kaltaisilla alueilla aiheuttaisivat noin 7 ng/m^3 lisäyksen väestöaltistuksessa koko Suomen väestölle laskettuna. Tämä vastaa noin 0,006 % lisäystä taustakuolleisuuteen eli noin kolmea ennen aikaista kuolemantapausta vuosittain. Väestöaltistuksesta noin kolmannes olisi kuljetusten aiheuttamaa ja kaksi kolmannesta voimalaitospäästöistä. Jos vastaava lämmitysenergia tuotettaisiin kaukolämmön sijaan talokohtaisella puulämmityksellä, vaikutukset väestöaltistukseen olisivat suuruusluokaltaan 100–800-kertaiset. Kuljetusten aiheuttama väestöaltistuslisä vastaisi noin puolta prosenttia Suomen koko raskaan liikenteen aiheuttamasta väestöaltistuksesta vuonna 2020 (Ahtoniemi ym. 2010).

Yhteenvetona voidaan sanoa, että metsähakkeen käytön lisääminen uusiutuvan energian velvoitepaketin mukaisesti ei lisää merkittävästi voimalaitosten pienhiukkaspäästöjä. Kuljetusten lisääntyminen ei lisää merkittävästi hiukkasmaisia pakokaasupäästöjä. Sen sijaan ei-pakokaasuperäiset tiepölypäästöt saattavat aiheuttaa haittaa paikallisesti. Tarkasteltujen tapausten (Tampere ja Kemijärvi) pohjalta kuljetusten väestöaltistusvaikutukset pienhiukkasille koko maan tasolla arvioitiin vähäisiksi. Kuitenkin, jos hakkeen käyttöä lisätään näitä tiheämmin asutuilla seuduilla, pienhiukkasvaikutukset ovat vastaavasti suuremmat.

5 Johtopäätökset

- Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen metsäbioenergialla ei vähennä energiantuotannon aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä ilmakehään yhtä paljon kuin energiantuotannon vähentäminen vastaavalla määrällä. Tämä johtuu siitä, että metsäbiomassan energiakäyttö ei ole päästötöntä, vaan silläkin on ilmakehän hiilimäärää lisäävä vaikutus. Metsäbioenergian päästöjen vuoksi päästöt ilmakehään vähenevät vähemmän kuin metsäbioenergialla korvattava fossiilisten polttoaineiden osuus on.
- Metsän hiilitaseen muutokset on huomioitava metsäbioenergian ilmastovaikutuksia arvioitaessa. Suurin osa metsäbiomassan energiakäytön päästöistä aiheutuu metsään varastoituneen hiilimäärän vähenemisestä; metsäbioenergian tuotantoketjun suorat päästöt ovat metsän päästöihin verrattuina pieniä.
- Metsäbioenergian käyttöön siirtymällä tai sen käyttömääriä lisäämällä ei voida vähentää energiantuotannon päästöjä erityisen nopeasti. Metsäbiomassan energiakäytön aiheuttamat päästöt ovat suurimmillaan silloin, kun metsäbioenergian tuotanto aloitetaan. Tällöin päästöt ovat fossiilisten polttoaineiden päästöjen luokkaa.
- Metsäbioenergian tuotannon aiheuttamat päästöt pienenevät tuotantoa jatkettaessa merkittävästi, jos energiaa tuotetaan biomassasta, joka lahoaisi nopeasti metsään jätettynäkin. Näin ollen metsäbioenergian tuotannon ilmastovaikutuksia voidaan parantaa oleellisesti suuntaamalla tuotantoa edullisiin biomassaositteisiin. Esimerkiksi melko nopeasti lahoavien oksien energiakäytön aiheuttamat päästöt ovat 20 vuoden jälkeen puolet hitaasti lahoavien kantojen päästöihin verrattuna.
- Metsäbioenergian ilmastovaikutukset voivat muuttua kielteisemmiksi tuotantomäärien kasvaessa. Tämä johtuu siitä, että pieniä määriä metsäbioenergiaa on mahdollista tuottaa ilmastovaikutuksiltaan edullisimmista biomassaositteista, kun taas suurien määrien tuottamiseen on välttämätöntä käyttää myös niitä ositteita, joiden käyttö aiheuttaa suuret päästöt.
- Metsäbioenergian käytön aiheuttamiin päästöihin liittyviä laskentasääntöjä olisi ilmastomuutoksen hillitsemiseksi syytä parantaa niin, että ne huomioisivat ilmastovaikutukset kattavasti. Nykyisissä säännöissä on mm. kynnsarvoihin ja systeemien rajauksiin liittyviä puutteita, joiden vuoksi sääntöjen mukaan tehdyt laskelmat eivät arvioi metsäbioenergian ilmastovaikutuksia oikein. Puutteelliset laskentasäännöt vaikeuttavat sellaisten ilmastopoliittisten päätösten tekemistä ja toimenpiteiden suunnittelua, jotka hillitsisivät ilmastomuutosta tehokkaasti.
- Metsäbioenergian tuotannon aiheuttamat pienhiukkaspäästöt ja -vaikutukset ovat varsin pienet eivätkä näin ollen muodostu esteeksi metsäbioenergian tuotannon lisäämiselle. Jos metsäbioenergian tuotantoa lisätään tiheimmin asutuilla seuduilla, yksityiskohtaisemmat pienhiukkasselvitykset voivat olla tarpeellisia.

VIITTEET

- Ahtoniemi P., Tainio M., Tuomisto J. T., Karvosenoja N., Kupiainen K., Porvari P., Karppinen A., Kangas L. & J. Kukkonen 2010. Health Risks from Nearby Sources of Fine Particulate Matter: Domestic Wood Combustion and Road Traffic (PILTTI). Pienhiukkasten lähipäästöjen terveysriskit: puun pienpolttaja ja tieliikenne (PILTTI). National Institute for Health and Welfare REPORT 3/2010. <http://www.thl.fi/thl-client/pdfs/821ba678-1430-4016-bfc8-77a40c49eb1f>.
- Alakangas, E. 2005. Properties of wood fuels used in Finland, Technical Research Centre of Finland, VTT Processes, Project report PRO2/P2030/05 (Project C5SU00800), Jyväskylä. 90s. + liitteet. 10s.
- Alam, A., Kilpeläinen, A. & Kellomäki, S. 2010. The impact of management regimes on energy wood recovery and related carbon dioxide emissions in boreal ecosystems. *European Journal of Forest Research* (käsi­kirjoitus).
- Berg, B., Ekbohm, G. & C. McClaugherty 1984. Lignin and holocellulose relations during long-term decomposition of some forest litters. Long-term decomposition in a Scots pine forest IV. *Canadian Journal of Botany*. 62: 2540–2550.
- Berg, B., & B. Wessén 1984. Changes in organic-chemical components and in growth of fungal mycelium in decomposing birch leaf litter as compared to pine needles. *Pedobiologia* 26:285–298.
- Berg, B., Booltink, H., Breymeyer, A., Ewertsson, A., Gallardo, A., Holm, B., Johansson, M.-B., Koivu­voja, S., Meentemeyer, V., Nyman, P., Olofsson, J., Pettersson, A.-S., Reurslag, A., Staaf, H., Staaf, I. & L. Uba 1991. Data on needle litter decomposition and soil climate as well as site characteristics for some coniferous forest sites. Part 2. decomposition data. Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Ecology and Environmental Research. Report 42.
- BS EN 14961–1:2010 Solid biofuels. Fuel specifications and classes. General requirements.
- Direktiivi 2009/28/EY Euroopan Parlamentin ja Neuvoston Direktiivi uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä. Euroopan unionin virallinen lehti L140/16.
- Drebs, A., A. Nordlund, P. Karlsson, J. Helminen, & P. Rissanen. 2002. Climatological statistics of Finland 1971–2000. Finnish Meteorological Institute, Helsinki.
- Ecoinvent centre 2007. Ecoinvent data v2.0, CH: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Euroopan parlamentti 2008. EU:n ilmasto- ja energiapaketti: Euroopan parlamentin istunnon­sa­an 17.12.2008 hyväksymät tekstit
- Fargione, J., J. Hill, D. Tilman, S. Polasky, & P. Hawthorne. 2008. Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science* 319:1235–1238.
- Forsberg, G. 2000. Biomass energy transport: Analysis of bioenergy transport chains using life cycle inventory method. *Biomass and Bioenergy* 19:17–30.
- Hakkila, P. 1989. Utilization of residual forest biomass. Springer-Verlag, Berlin.
- Hakkila, P. 2004. Developing technology for large-scale production of forest chips. Wood Energy Wood Energy Technology Programme 1999–2003. Technology Programme Report 6/2004 Final Report, Helsinki.
- Hildén, Karvosenoja, Koskela, Kupiainen, Laine, Rinne, Seppälä, Savolahti & Sokka 2008. Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategian ympäristöarviointi. Suomen ympäristö 50/2008, Ympäristönsuojelu, 90s. <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=307745&lan=fi>
- Holmgren, K., J. Kirkinen, & I. Savolainen. 2006. The climate impact of energy peat utilisation - comparison and sensitivity analysis of Finnish and Swedish results.
- IPCC 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC 2007a. Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Available at <http://www.ipcc.ch>.
- IPCC 2007b. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R. & L.A. Meyer, (toim.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jylänki, L. 2010. Rankahakkeen tunnuslukujen määrittäminen ja näytteenottotapojen vertailu. Tutkintotyö, Tampereen ammattikorkeakoulu, Metsätalouden koulutusohjelma. 46s.
- Karvosenoja N. 2008. Emission scenario model for regional air pollution. *Monographs of the Boreal Environment Research* 32.
- Kirkinen, J., T. Palosuo, K. Holmgren, & I. Savolainen. 2008. Greenhouse Impact Due to the Use of Combustible Fuels: Life Cycle Viewpoint and Relative Radiative Forcing Commitment. *Environmental Management* 42:458–469.
- Kirkinen, J., Sahay, A., & I. Savolainen. 2009. Greenhouse Impact of Fossil, Forest Residues and Jatropa Diesel: A Static and Dynamic Assessment. *Progress in Industrial Ecology – An International Journal* 6:185–206.
- Korhonen, K., Tomppo, E., Henttonen, H. Ihalainen, A., Tonteri, T. & T. Tuomainen 2000. Pirkanmaan metsävarat 1965–99 hakkuumahdollisuudet 1999–2028. Metsäntutkimuslaitos. Suomen Metsätieteellinen Seura. *Metsätieteen aikakauskirja* 4B:661–739.

- Kukkonen, J., Karppinen, A., Sofiev, M., Kangas, L., Karvosenoja, N., Johansson, M., Tuomisto, J., Tainio, M., Koskentalo, T., Aarnio, P., Kousa, A., Pirjola, L., & K. Kupiainen 2007. Kokonaismalli pienhiukkasten päästöjen, leviämisen ja riskin arviointiin - KOPRA. Tutkimuksia 1. Ilmatieteen laitos, Helsinki. 41 s.
- Kuusinen, M. & H. Ilvesniemi (toim.) 2008. Energiapuun korjuun ympäristövaikutukset, tutkimusraportti. Tapion ja Metlan julkaisuja , 74 s.
- Laasasenaho, J. 1982. Tarper curve and volume functions for pine, spruce and birch. *Communications Instituti Forestalis Fenniae* 108:1–74.
- Laitila, J., A. Asikainen, & P. Anttila. 2008. 1. Energiapuutarat – Teoksessa Kuusinen, M & Ilvesniemi, H. (toim.) Energiapuun korjuun ympäristövaikutukset, tutkimusraportti. Tapion ja Metlan julkaisuja , 74 s.
- Lattimore, B., C. T. Smith, B. D. Titus, I. Stupak, & G. Egnell. 2009. Environmental factors in woodfuel production: Opportunities, risks, and criteria and indicators for sustainable practices. *Biomass and Bioenergy* 33:1321–1342.
- LIPASTO/LIISA. 2009. Liikennevälineiden yksikköpäästöt. Tieliikenteen tavarakuljetukset. Saatavilla: http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavaraliikenne/tieliikenne/tavara_tie.htm Viitattu 12.10.2010.
- LIPASTO/TYKO. 2009. TYKO työkoneiden päästömalli 2008. Saatavilla: <http://lipasto.vtt.fi/tyko/malli.htm>. Viitattu 12.10.2010.
- Liski, J., H. Ilvesniemi, A. Mäkelä, & M. Starr. 1998. Model analysis of the effects of soil age, fires and harvesting on the carbon storage of boreal forest soils. *European Journal of Soil Science* 49:407–416.
- Liski, J. & C. J. Westman. 1995. Density of organic-carbon in soil at coniferous forest sites in Southern Finland. *Biogeochemistry* 29:183–197.
- Liski, J. & C. J. Westman. 1997. Carbon storage in forest soil of Finland .2. Size and regional patterns. *Biogeochemistry* 36:261–274.
- Liski, J., T. Palosuo, M. Peltoniemi, & R. Sievänen. 2005. Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecological Modelling* 189:168–182.
- Lohila, A., K. Minkkinen, J. Laine, I. Savolainen, J.-P. Tuovinen, L. Korhonen, T. Laurila, H. Tietäväinen, & A. Laaksonen. Forestation of boreal peatlands: Impacts of changing albedo and greenhouse gas fluxes on radiative forcing. *Journal of Geophysical Research*. 115. doi:10.1029/2010JG001327.
- Masera, O. R., J. F. Garza-Caligaris, M. Kanninen, T. Karjalainen, J. Liski, G. J. Nabuurs, A. Pussinen, B. H. J. de Jong, & G. M. J. Mohren. 2003. Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach. *Ecological Modelling* 164:177–199.
- Melillo, J. M., J. M. Reilly, D. W. Kicklighter, A. C. Gurgel, T. W. Cronin, S. Paltsev, B. S. Felzer, X. D. Wang, A. P. Sokolov, & C. A. Schlosser. 2009. Indirect Emissions from Biofuels: How Important? *Science* 326:1397–1399.
- Melin, Y., H. Petersson, and G. Egnell. 2010. Assessing carbon balance trade-offs between bioenergy and carbon sequestration of stumps at varying time scales and harvest intensities. *Forest Ecology and Management* 260:536–542.
- Metsätilastollinen vuosikirja 2009. Metsäntutkimuslaitos 452 s.
- YM ja Tilastokeskus. 2009. Finland's Fifth National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change. 2009. Ministry of the Environment and Statistics Finland, Helsinki. 280 p.
- Monni, S., R. Korhonen, & I. Savolainen. 2003. Radiative Forcing Due to Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions from Finland: Methods for Estimating Forcing of a Country or an Activity. *Environmental Management* 31:0401–0411.
- Mäkinen, H., J. Hynynen, J. Siitonen, & R. Sievänen. 2006a. Predicting the decomposition of scots pine, norway spruce, and birch stems in Finland. *Ecological Applications* 16:1865–1879.
- Mäkinen, T., S. Soimakallio, T. Paappanen, K. Pahkala, & H. Mikkola. 2006b. Liikenteen biopolttoainien ja peltoenergian kasvihuonekaasutaseet ja uudet liiketoimintakonseptit [Greenhouse gas balances and new business opportunities for biomass-based transportation fuels and agrobiomass in Finland]. Espoo 2006. VTT Tiedotteita . Research Notes 2357.
- Nurmi, J. 1993. Heating values of the above ground biomass of small-sized trees. *Acta Forestalia Fennica* 236.
- Nurmi, J. 1997. Heating Values of Mature Trees. *Acta Forestalia Fennica* 256:28.
- Palosuo, T., M. Wihersaari, & J. Liski. 2001. Net Greenhouse Gas Emissions Due to Energy Use of Forest Residues - Impact of Soil Carbon Balance. *EFI Proceedings no 39, Wood biomass as an energy source challenge in Europe*. European Forest Institute, Joensuu:115–130
- Palviainen, M., R. Laiho, Mäkinen, H & L. Finér 2008. Do decomposing Scots pine, Norway spruce, and silver birch stems retain nitrogen? *Canadian Journal of Forest Research* 38:3047–3055.
- PAS 2050:2008 Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services
- Repo, A., M. Tuomi, & J. Liski. 2010. Indirect carbon dioxide emissions from producing bioenergy from forest harvest residues. *GCB Bioenergy* doi:10.1111/j.1757-1707.2010.01065.x.
- Searchinger, T., R. Heimlich, R. A. Houghton, F. X. Dong, A. Elobeid, J. Fabiosa, S. Tokgoz, D. Hayes, & T. H. Yu. 2008. Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science* 319:1238–1240.
- Searchinger, T. D., S. P. Hamburg, J. Melillo, W. Chameides, P. Havlik, D. M. Kammen, G. E. Likens, R. N. Lubowski, M. Obersteiner, M. Oppenheimer, G. P. Robertson, W. H. Schlesinger, & G. D. Tilman. 2009. Fixing a Critical Climate Accounting Error. *Science* 326:527–528.

- Shine, K. P., J. Cook, E. J. Highwood, & M. M. Joshi. 2003. An alternative to radiative forcing for estimating the relative importance of climate change mechanisms. *Geophys. Res. Lett.* 30:2047.
- Sievänen, R., T. Kareinen, H. Hirvelä, & H. Ilvesniemi. 2007. Hakkuumahdollisuusarvioihin perustuvat metsien kasvihuonekaasutaseet. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2007:329 – 339.
- Tarasov, M. E. & R. A. Birdsey. 2001. Decay Rate and Potential Storage of Coarse Woody Debris in the Leningrad Region. *Ecological Bulletin* 49:137–147.
- TEM 2008. Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 6. päivänä marraskuuta 2008. 130 s.
- TEM 2010a. Työ- ja elinkeinoministeriö Tiedotteet: Energia 20.4.2010 Uusiutuvan energian velvoitepaketti vie kohti vähäpäästöistä Suomea http://www.tem.fi/?s=2471&89519_m=98836
- TEM 2010b. NREAP Uusiutuvan energian kansallinen toimintasuunnitelma eli Suomen kansallinen toimintasuunnitelma uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian edistämisestä direktiivin 2009/28/EY mukaisesti. Työ- ja elinkeinoministeriö, Energiaosasto.
- Tilastokeskus 2006. Polttoaineluokitus ja päästökertoimet 2006 3.4.2006.
- Tilastokeskus 2010. Polttoaineluokitus ja päästökertoimet 2010 1.1.2010.
- Tuomi, M., R. Laiho, A. Repo, & J. Liski. 2010a. Wood decomposition model for boreal forests. *Ecological Modelling* (painossa). Saatavissa: www.environment.fi/syke/yasso → publications.
- Tuomi, M., Rasinmäki, J., Vanhala, P., Repo, A., & Liski, J. 2010. Soil carbon model Yasso07 user-interface. (käsi kirjoitus). Saatavissa: www.environment.fi/syke/yasso → publications.
- Tuomi, M., T. Thum, H. Järvinen, S. Fronzek, B. Berg, M. Harmon, J. A. Trofymow, S. Sevanto, & J. Liski. 2009. Leaf litter decomposition—Estimates of global variability based on Yasso07 model. *Ecological Modelling* 220:3362–3371.
- Vávrová, P., T. Penttilä, & R. Laiho. 2009. Decomposition of Scots pine fine woody debris in boreal conditions: Implications for estimating carbon pools and fluxes. *Forest Ecology and Management* 257:401–412.
- Wihersaari, M. 2005. Greenhouse gas emissions from final harvest fuel chip production in Finland. *Biomass and Bioenergy* 28:435–443.
- YM & Tilastokeskus 2009. Finland's Fifth National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change. 280 s. Ympäristöministeriö ja Tilastokeskus.
- Zanchi, G., N. Pena, & N. Bird. 2010. The upfront carbon debt of bioenergy. Joanneum Research, Graz.
- Zinke, P. J., A. G. Stangenberger, W. M. Post, W. R. Emanuel, J. S. W. Olson, o. s. c. a. n. d. ORNL/TM-, O. R. 8857. Oak Ridge National Laboratory, and Tennessee. 1986. Worldwide organic soil carbon and nitrogen data. ORNL/TM- 8857. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 37831.
- Äijälä, O., M. Kuusinen, & A. Koistinen, (toim.) 2010. Hyvän metsänhoidon suositukset energiapuun korjuu ja kasvatusta. Tapio, Metsä Kustannus.

Liite I. Hiilitase- ja säteilypakotelaskelmien yksityiskohtainen kuvaus

Yasso07 maaperän hiilimalli

Energiantuotantoa varten metsistä korjattavan puun vaikutus metsän hiilitaseeseen laskettiin simuloimalla korjattavan biomassan lahoamista metsässä Yasso07-maahiilimallilla (Tuomi ym. 2009, Tuomi ym. 2010a). Laskennat tehtiin Yasso07-mallin Windows-käyttöliittymällä (Tuomi ym. 2010), www.environment.fi/syke/yasso).

Yasso07-maahiilimalli perustuu erilaisiin maaperän hiilen kiertoa kuvaaviin mittauksiin: 1) laajaan, maapallon ilmasto-olot kattavaan mittausaineistoon lehti- ja hienojuurikarikkeen hajoamisesta eri puolilla Eurooppaa sekä Pohjois- ja Keski-Amerikkaa (n=9605), 2) mittauksiin maaperän hiilivarastosta ja sen kehittymisestä Suomessa (n=86) (Liski & Westman 1995, 1998, Liski ym. 1998) ja eri puolilla maapalloa (n=4118) (Zinke ym. 1986) ja 3) mittauksiin puumaisen karikkeen, oksien ja puunrunkojen hajoamisesta Suomessa ja lähialueilla (n=2102) (Tarasov & Birdsey 2001, Mäkinen ym. 2006a, Palviainen ym. 2008, Vávrová ym. 2009). Puumaisen karikkeen hajoamismittauksissa on seurattu läpimitaltaan 0,5–60 cm oksien ja runkojen hajoamista 1–70 vuoden ajan.

Yasso07-maahiilimallissa karikkeen hajoaminen riippuu sen kemiallisesta koostumuksesta ja ilmasto-oloista (Tuomi ym. 2009). Puumaisen karikkeen hajoaminen riippuu lisäksi karikkeen läpimitasta (Tuomi ym. 2010a). Mallissa karikkeen kemiallinen koostumus kuvataan vaiheittaisen uuton osuuksina: happoon liukenevina yhdisteinä (selluloosat ym.), vesiliukoisina yhdisteinä (sokerit ym.) ja polaarittomiin liuoksiin liukenevina yhdisteinä (vahat ym.). Vaiheittaisen uuton liukenematon jäännös koostuu mm. ligniineistä.

Yasso07-malli on kehitetty käyttäen mallintavan tilastotieteen menetelmiä (Tuomi ym. 2009, Tuomi ym. 2010a). Mallin parametriarvot on määritetty Markovin ketju Monte Carlo (MCMC) -menetelmällä, joka mahdollistaa mallin parametrien jakaumien selvittämisen. Menetelmän avulla voidaan huomioida mittausten ja mallin parametrien epävarmuus ja laskea mallin antaminen arvioiden epävarmuus, joka johtuu näistä tekijöistä. Käytetyt matemaattiset menetelmät edellyttävät vain vähän oletuksia mittausten mallin ja sen parametrien luonteesta ja mahdollistavat usean mallirakenteen testaaminen samanaikaisesti (Tuomi ym. 2009, Tuomi ym. 2010a).

Yasso07-maahiilimallin arvioitiin soveltuvan tämän tutkimushankkeen laskelmiin. Mallin kehittämisessä käytetyt mittausaineistot kattavat tarkastellut tapaukset ja ilmasto-olot. Mallin on osoitettu arvioivan luottavasti useiden kasvilajien karikkeen hajoamista erilaisissa ilmasto-oloissa ympäri maailmaa (Tuomi ym. 2009) sekä kuusen, männyn ja koivun puumaisen karikkeen hajoamista borealisissa ilmasto-oloissa (Tuomi ym. 2009, Tuomi ym. 2010a). Lisäksi Yasso07-mallin on osoitettu antavan harhattomia arvioita maaperän hiilivaraston koosta eri puolilla maapalloa (Tuomi ym. 2010b). Yasso07-mallin aikaisempaa versiota Yasso-mallia (Liski ym. 2005) käytetään Suomen kansallisessa kasvihuonekaasuinventaariorissa (YM & Tilastokeskus 2009) ja parhaillaan tehdään vertailulaskelmia uudemman Yasso07-malliin käyttöön siirtymiseksi.

Metsän hiilitasevaikutukset

Erilaisen energiaksi käytettävän metsäbiomassan lahoamista metsässä simuloitiin Yasso07-mallilla sadan vuoden ajan (Liitetaulukko 1). Simuloidut puulajit, biomassat ja ilmasto-olot valittiin niin, että vastasivat nykyisiä metsäbiomassan korjuukäytäntöjä Suomessa (vrt. Kuusinen & Ilvesniemi 2008, Äijälä ym. 2010) ja kattoivat lahoamisnopeuteen vaikuttavien tekijöiden vaihteluvälin Suomessa.

Simuloinneissa tarkasteltiin pääpuulajiamme mäntyä, kuusta ja koivua, mutta kuusen simulointeja tehtiin eniten kuusen tärkeyden vuoksi. Kuusen päätehakkuiden latvusmassan, kantobiomassan sekä nuorten metsien energiapuun vuotuinen tekninen korjuupotentiaali on yli kaksinkertainen esimerkiksi männyn korjuupotentiaaliin verrattuna (Laitila ym. 2008).

Erikokoisten metsäbiomassaositteiden korjuun aiheuttamaa hiilivajetta tarkasteltiin simuloimalla kuusen oksan (läpimitta 2 cm), rankapuun (läpimitta 10 cm) ja kannon (läpimitta 30 cm) hajoamisnopeutta Etelä-Suomessa. Tarkastellut metsäbiomassaositteiden läpimitat määritettiin aiempien tutkimusten ja Pirkanmaan metsäkeskuksen metsävaratietojen perusteella (Hakkila 1989, Nurmi 1993, 1997, Korhonen 2000). Käytetty kannon läpimitta on kannon katkaisukohtaan läpimitta, joka arvioitiin hyödyntäen Pirkanmaan metsävaratietoja (Korhonen 2000) ja Laasasenahon yhtälöä (1982), jolla voidaan laskea uudistuskypsän metsän kantojen keskiläpimitta rungon keskimääräisen rinnankorkeusläpimitan perustella.

Ilmasto-oloista johtuvia eroja hiilivajeessa tarkasteltiin toistamalla simulaatiot Pohjois-Suomen ilmasto-oloissa. Eroja puulajien välillä tarkasteltiin vertaamalla kuusen, männyn ja koivun rankapuun hajoamisnopeutta Etelä-Suomessa, ja korjuutapojen välisiä eroja tarkasteltiin vertaamalla kuusen kokopuun ja rankapuun korjuuta.

Simulaatioissa käytetyt karikkeen kemiallista koostumusta kuvaavat muuttujat ja ilmastomuuttujat on esitetty taulukossa 2. Käytetyt rungon kemiallisen koostumuksen arvot ovat kirjallisuudessa perustella käytettävissä olevat arvot puun kemiallisesta koostumuksesta Yass07-mallin syöttötietojen edellyttämässä muodossa.

Liitetaulukko 1. Metsäbiomassan energiakäytön aiheuttamiin metsän hiilitasemuutoksiin vaikuttavat tässä tutkimuksessa tarkastellut muuttujat ja niiden arvot.

Muuttuja	Muuttujan arvot		
Biomassaosite	oksa (2 cm)	kanto (30 cm)	rankapuu (10 cm)
Puulaji	kuusi	mänty	koivu
Korjuutapa	kokopuu (10 cm)	rankapuu (10 cm)	
Ilmasto	Etelä-Suomi (Pirkanmaa)	Pohjois-Suomi (Savukoski)	
Aika	0-100 vuotta		

Liitetaulukko 2. Yasso07-mallisimulaatioissa käytetyt syöttötiedot. Puumaisen karikkeen kemiallinen koostumus on usean erillisen tutkimuksen keskiarvo (Hakkila 1989) ja neulaskarikkeen kemiallinen koostumus perustuu Bergin ym. (1984, 1991) sekä Bergin ja Wessenin (1984) mittauksiin. Keskihajontojen laskennassa on hyödynnetty Vávrován ym. (2009) aineistosta laskettua variaatiokerrointa. Ilmastotiedot ovat keskiarvoja vuosien 1971–2000 havainnoista Etelä-Suomessa Kurun Länsi-Aureen sääasemalla ja Pohjois-Suomessa Savukosken sääasemalla (Drebs ym. 2002). Lämpötila-amplitudi on kylmimmän ja lämpimimmän kuukauden keskilämpötilan erotus jaettuna kahdella.

Karikkeen kemiallinen koostumus	keskiarvo $\pm 2 \times$ keskihajonta (%)		
runko/oksa/kanto	Kuusi	Mänty	Koivu
happoliukoiset yhdisteet	68 \pm 8	68 \pm 8	76 \pm 10
vesiliukoiset yhdisteet	1 \pm 2	2 \pm 2	1 \pm 2
etanoliukoiset yhdisteet	1 \pm 1	1 \pm 1	0 \pm 1
Klason ligniini (liukenematon)	30 \pm 2	27 \pm 2	24 \pm 2
neulaset			
happoliukoiset yhdisteet	50 \pm 6	51 \pm 6	-
vesiliukoiset yhdisteet	9 \pm 10	13 \pm 14	-
etanoliukoiset yhdisteet	5 \pm 4	10 \pm 8	-
Klason ligniini (liukenematon)	35 \pm 2	25 \pm 2	-
Ilmasto			
	Etelä-Suomi	Pohjois-Suomi	
keskilämpötila	3,2 °C	-0,8 °C	
lämpötila-amplitudi	11,6 °C	14,15 °C	
sademäärä	681 mm	565 mm	

Puuhakkeesta saatavaa energiamäärää laskettaessa huomioitiin hakkeen käyttö-
kosteus, sillä kosteus vaikuttaa merkittävästi puuhakkeen lämpöarvoon ja energia-
sisältöön (Hakkila 2004). Kantohakkeen käyttökosteus on noin 35 painoprosenttia
ja muun metsähakkeen noin 40 painoprosenttia (Mäkinen ym. 2006b). Päästöläs-
kennoissa käytetty metsähakkeen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg) käyttökosteudessa
(Liitetaulukko 3) laskettiin BS EN 14961-1:2010 standardin mukaan kuiva-aineen
tehollisista lämpöarvoista (Alakangas 2005). Energiaksi käytettävän puun oletettiin
sisältävän 50 % hiiltä kuiva-painosta. Laskelmissa käytetyt päästöarvot on esitetty
Liitetaulukossa 4.

Liitetaulukko 3. Eri metsäbiomassasta tehdyn hakkeen tehollinen lämpöarvo käyttökosteudessa.

Tehollinen lämpöarvo käyttökosteudessa [MJ/kg], kosteus 40 paino-%, kannoilla 35 paino-%	Koivu	Kuusi	Mänty
kokopuu	10,4	-	10,8
rankapuu	10,7	10,5	10,6
oksa	10,6	10,6	10,6
kanto	11,8	11,6	11,8

Liitetaulukko 4. Laskelmissa käytetyt päästöarvot polttoaineiden poltolle ja tuotantoketjun päästöille
sekä vertailun vuoksi Tilastokeskuksen polttoaineluokituksen oletuspäästökertoimet polttoaineiden
poltton päästöille (Tilastokeskus 2006, 2010). Fossiilisten polttoaineiden luvut on otettu Ecoinvent
Centren tietokannasta (2007). Metsäbiomassan luvut on arvioitu tässä tutkimuksessa aikaisempien
tutkimusten perusteella (ks. teksti), ja lukujen vaihteluväli johtuu näissä tutkimuksissa ilmoitetuista
vaihteluväleistä. Tilastokeskuksen suurempi päästökerroin metsäbiomassan pelkälle poltolle tämän
tutkimuksen lukuihin verrattuna johtuu eri tietolähteestä ja kuvaa osaltaan vaihtelua näissä päästö-
arvoissa.

Polttoaine	Poltton ja tuotantoketjun päästöt				Tilastokeskuksen päästökerroin poltolle
	CO ₂ [g/MJ]	CH ₄ [g/MJ]	N ₂ O [g/MJ]	Kasvihuonekaasu- päästöt yhteensä [g CO ₂ ekv./MJ]	CO ₂ oletuspäästö- kerroin [g/MJ]
Metsäbiomassan poltto ja tuotanto- ketjun päästöt	103–105	3–6 × 10 ⁻⁵	3 × 10 ⁻³	104–108	110
Kivihiili	96	6 × 10 ⁻¹	6 × 10 ⁻⁵	110	95
Raskas polttoöljy	88	4 × 10 ⁻²	2 × 10 ⁻⁴	89	79
Maakaasu	68	4 × 10 ⁻¹	2 × 10 ⁻⁴	78	55

Metsäbiomassan korjuu- kuljetus- ja käsittelyketjujen päästöt

Korjuu- ja kuljetusketjun päästöt arvioitiin kirjallisuudesta saatujen lähtötietojen pe-
rusteella. Hakkuutähteiden päästöjä laskettaessa huomioitiin metsäkuljetus, haketus
välivarastossa, kaukokuljetus ja koneiden siirrot. Ensiharvennushakkeen päästöjä
laskettaessa huomioitiin lisäksi harvennus ja kantojen päästöjä laskettaessa kantojen
kaivu. Työkoneiden tehokkuus ja polttoaineen kulutus arvioitiin Alamin ym. (2010)
antamien tietojen perusteella. Työkoneiden päästökertoimet saatiin LIPASTO TYKO
tietokannasta (Lipasto/TYKO 2009).

Kuljetuskaluston oletettiin olevan EURO 5 -luokan kantavuudeltaan 40 tonnin
(kokonaismassa 60 t) varsinaisella perävaunulla varustettu yhdistelmä, joka kuljettaa
menokuorman täytenä ja paluukuorman tyhjänä. EURO 5 -luokan kaluston arvioitiin
olevan soveltavin tämän kaltaisessa tulevaisuuteen suuntautuvassa tarkastelussa. 40
tonnin kantavuuden arvioitiin (Jylänki 2010). Jylängin (2010) tekemien kuormausmit-
tausten perusteella vastaavan 125 m³ tilavuutta. Kuljetuskaluston päästökertoimet ja
polttoaineen kulutustiedot saatiin LIPASTO LIISA tietokannasta (Lipasto/LIISA 2009)

Kuljetusmatkoiksi oletettiin Tampereen alueella 70 km ja Kemijärven alueella 95 km. Molemmissa tapauksissa taajama-ajon pituuden oletettiin olevan 7,5 km.

Työkoneiden kuljetusmatkat laskettiin (Mäkinen ym. 2006b) perusteella oletamalla niiden merkitys kussakin korjuu- ja kuljetusketjussa vastaavan suuruiseksi kuin (Mäkinen ym. 2006b) tulokset osoittivat.

Säteilypakotevaikutukset

Metsäbiomassan energiakäytön aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt ja metsän hiilitaseen muutokset vaikuttavat ilmastoon muuttamalla maapallon säteilytasetta. Maapallon ja ilmakehän muodostaman järjestelmän säteilytase muodostuu siihen saapuvan ja siitä poistuvan säteilyenergian määristä. Ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuuksien nousu vähentää järjestelmästä poistuvan säteilyenergian määrää, mikä nostaa maanpinnan, merien ja alailmakehän lämpötilaa. Säteilypakote (Radiative Forcing, RF) ilmaisee, miten ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden nousu tai jokin muu tekijä muuttaa maapallon säteilytasetta. Säteilypakotteen suuruus kertoo siten, kuinka merkittävä kyseisen pakotetekijän ilmastovaikutus on. Positiivinen säteilypakote pyrkii lämmittämään ilmastoa, negatiivinen jäädyttämään (Shine ym. 2003, Holmgren ym. 2006, IPCC 2007a). Arvioitaessa ilmastovaikutuksia säteilypakotteen muutosten avulla voidaan tarkastella useita kasvihuonekaasuja samanaikaisesti ja yhteismitallisesti sekä arvioida vaikutusten ajallista kehittymistä.

Metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutukset riippuvat metsän hiilivarasto-vaikutusten lisäksi korjuu- ja käsittelyketjujen kasvihuonekaasupäästöistä ja niiden ajoittumisesta eri vuosille. Eri kasvihuonekaasuilla on erilaiset lämmitystehokkuudet ja viipymäajat ilmakehässä. Säteilypakote riippuu myös kasvihuonekaasujen taustapitoisuuksista. Eri kaasujen kokonaisilmastovaikutusta arvioitiin tässä tutkimuksessa säteilypakotelaskennan avulla. Ilmastovaikutuksen laskennassa selvitettiin metsäbioenergian tuotantoketjujen päästöt ja hiilivarastojen muutokset sekä näiden aiheuttama kasvihuonekaasupitoisuuksien nousu ja tästä johtuva säteilypakote. Tuloksena saatava säteilypakotteen muutos kertoo energiapuun korjuun ja käytön ilmastovaikutuksesta, sillä laskennassa tämän toiminnan aiheuttama kasvihuonekaasupitoisuuksien lisäys suhteutetaan ilmakehän kasvihuonekaasujen taustapitoisuuksiin.

Toiminnan päästöt → säteilypakotelaskenta → ilmastovaikutus

Metsäbioenergian ilmastovaikutuksen laskennassa siis selvitettiin, millaisen pitoisuuslisän ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuuteen metsäbioenergian käyttö aiheuttaa ja miten se muuttaa maapallon säteilytasetta. Metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutus laskettiin ottaen huomioon korjuun aiheuttama hiilivaje ja tuotantoketjun hiilidioksidi-, metaani- ja typpioksiduuli-päästöt. Metsäbioenergian nettoilmastovaikutus V laskettiin vertaamalla tilannetta, jossa harvennuspuut, hakutähteet ja kannot korjattiin ainespuun korjuun lisäksi ($V_{\text{käyttö bioenergiaksi}}$), tilanteeseen, jossa ainespuun lisäksi ei korjattu muuta metsäbiomassaa ($V_{\text{ei käyttöä bioenergiaksi}}$). Jälkimmäisessä tapauksessa näiden biomassaositteiden annettiin hajota hakkuukohteessa.

$$V = V_{\text{käyttö bioenergiaksi}} - V_{\text{ei käyttöä bioenergiaksi}}$$

Laskennan avulla vertailtiin (1) millaisen ilmastovaikutuksen yhden energiayksikön (1 PJ) tuottaminen metsäbiomassasta tai fossiilisista energialähteistä aiheuttaa seuraavan 100 vuoden aikana sekä (2) millaiset nämä ilmastovaikutukset ovat, jos energiaa tuotetaan jatkuvasti. Ensimmäisessä tapauksessa seurattiin pulssipäästön ja toisessa jatkuvan päästön aiheuttamaa kertyvää lämmittävää ilmastovaikutusta. Koska ilmastovaikutuksen arviointi säteilypakotteen muutoksen avulla ottaa huomioon

myös päästön ajankohdan, ei pulssipäästön aiheuttaman säteilypakotteen muutoksen integrointi kerro suoraan jatkuvan päästön ilmastovaikutuksesta.

Kasvihuonekaasupitoisuuksien muutoksista johtuva säteilypakotteen muutos ΔRF laskettiin REFUGE-mallin (Monni ym. 2003) muokatulla versiolla (Lohila et al. 2010). Metsäbioenergian tuotannosta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt E [kg] muutettiin kaasujen pitoisuuksiksi ilmakehässä P [ppmv] olettamalla, että pitkäikäiset kaasut sekoittuvat täydellisesti ilmakehään (massa $5,15 \times 10^{18}$ kg).

Metsäbioenergian käytöstä johtuva kasvihuonekaasujen pitoisuuslisäys ΔP kunkin ajanhetkenä laskettiin ottamalla huomioon päästön suuruus ja kaasujen viipymäaika ilmakehässä:

$$\Delta P_i(T) = k_i \int_0^T E_i(t) f_{a,i}(T-t) dt \quad (1)$$

jossa t on aika, T on tarkasteltava ajanjakso, k on päästö-pitoisuus-muunnoskerroin, f_a on elinikäifunktio, ja i viittaa kuhunkin kasvihuonekaasuun (CO_2 , CH_4 tai N_2O). Elinikäifunktio f_a kuvaa päästöstä kulloinkin ilmakehässä jäljellä olevaa osuutta (IPCC 2007a):

$$\text{CO}_2 \quad f_{a,C}(t) = a_0 + \sum_{j=1}^3 a_j e^{-t/\tau_{C,j}} \quad (2)$$

$$\text{CH}_4 \quad f_{a,M}(t) = e^{-t/\tau_M} \quad (3)$$

$$\text{N}_2\text{O} \quad f_{a,N}(t) = e^{-t/\tau_N} \quad (4)$$

jossa a_j ($j = 0, 1, 2, 3$) on painokerroin, ja $\tau_{C,j}$ ($j = 1, 2, 3$), τ_M ja τ_N ovat aikavakioita (Liitetaulukko 5).

Säteilypakotefunktiot hiilidioksidille F_C , metaanille F_M ja typpioksiduulille F_N perustuvat IPCC:n (IPCC 2001) yhtälöihin ja ottavat huomioon typpioksiduulin ja metaanin absorptiospektrien osittaisen päällekkäisyyden sekä metaanin epäsuorat säteilypakotevaikutukset, jotka johtuvat metaanin osallistumisesta ilmakehän kemiallisiin reaktioihin.

$$F_C = a \ln \left(\frac{C}{C_0} \right) \quad (5)$$

$$F_M = b \left(M^{1/2} - M_0^{1/2} \right) + c \left(M - M_0 \right) - \left[f_o(M, N_0) - f_o(M_0, N_0) \right] \quad (6)$$

$$F_N = d \left(N^{1/2} - N_0^{1/2} \right) - \left[f_o(M_0, N) - f_o(M_0, N_0) \right] \quad (7)$$

$$f_o(M, N) = e \ln \left[1 + 2,01 \times 10^{-5} (MN)^{0,75} + 5,31 \times 10^{-15} M^{2,52} N^{1,52} \right] \quad (8)$$

jossa C , M ja N ovat CO_2 , CH_4 ja N_2O -pitoisuudet, ja alaindeksi 0 osoittaa kunkin kasvihuonekaasun pitoisuutta ilmakehässä esiteollisena aikana; $a = 5,35 \text{ Wm}^{-2}$, $b = 0,0378 \text{ Wm}^{-2}$ ja $c = 1,24 \times 10^{-4} \text{ Wm}^{-2}$, $d = 0,12 \text{ Wm}^{-2}$ ja $e = 0,47 \text{ Wm}^{-2}$ ovat vakioita; f_o on korjausfunktio metaanin ja typpioksiduulin absorptiospektrin osittaiselle päällekkäisyydelle.

Tässä työssä tarkastellaan marginaalisen säteilypakotteen muutosta suhteessa vaihtelevaan taustapitoisuuteen. Hetkellisestä säteilypakotteesta lasketaan kumulatiivinen säteilypakote. Taustapitoisuudet ovat arvioita ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuuksien kehittymisestä ja seuraavat tässä työssä IPCC:n SRES A2 -skenaariota vuoteen 2050 (IPCC 2001), jonka jälkeen pitoisuuksien oletetaan pysyvät vakioina. Näin ollen esimerkiksi CO₂-päästön aiheuttama hetkellinen säteilypakotteen muutos voidaan esittää muodossa:

$$\Delta F_C = \left(\frac{\partial F_C}{\partial C} \right)_{C=C_{ref}} \Delta C \quad (9)$$

jossa C_{ref} on SRES A2 -skenaarion mukainen arvio CO₂-pitoisuuden kehittymisestä tulevaisuudessa (IPCC 2001).

Metsäbioenergiasta aiheutuva ilmastovaikutus on tarkasteltujen kolmen kasvihuonekaasun yhteisvaikutus ilmaistuna säteilypakotteena:

$$\Delta RF_{\text{metsäbioenergia}} = \Delta F_C + \Delta F_M + \Delta F_N \quad (10)$$

Liitetaulukko 5. Kasvihuonekaasujen elinikäfunktioiden f_a parametrit (IPCC 2007a).

CO ₂	α_0	0,217
	α_1	0,259
	α_2	0,338
	α_3	0,186
	$\tau_{C,1}$ (vuosi)	172,9
	$\tau_{C,2}$ (vuosi)	18,5
	$\tau_{C,3}$ (vuosi)	1,2
CH ₄	τ_M (vuosi)	12,0
N ₂ O	τ_N (vuosi)	114,0

KUVAILULEHTI

<i>Julkaisija</i>	Suomen ympäristökeskus			<i>Julkaisuaika</i> Tammikuu 2011
<i>Tekijä(t)</i>	Jari Liski, Anna Repo, Riina Känkänen, Pekka Vanhala, Jyri Seppälä, Riina Antikainen, Juha Grönroos, Niko Karvosenoja, Katja Lähtinen, Pekka Leskinen, Ville-Veikko Paunu ja Juha-Pekka Tuovinen			
<i>Julkaisun nimi</i>	Metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutukset Suomessa			
<i>Julkaisusarjan nimi ja numero</i>	Suomen ympäristö 5/2011			
<i>Julkaisun teema</i>	Ympäristönsuojelu			
<i>Julkaisun osat/ muut saman projektin tuottamat julkaisut</i>	Julkaisu on saatavana internetissä: www.ymparisto.fi/julkaisut			
<i>Tiivistelmä</i>	<p>Metsäbiomassan energiakäyttöä suunnitellaan lisäävän merkittävästi Suomessa. Tämän tutkimushankkeen tavoitteena oli arvioida hakkuutähteiden, kantojen ja harvennusten tähdepuun energiakäytön aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt ilmakehään ja näiden päästöjen aiheuttama ilmastoa lämmittävä vaikutus. Hankkeessa huomioitiin metsäbiomassan korjuu- ja käyttöketjusta sekä metsän hiilivarastojen muutoksista johtuvat kasvihuonekaasupäästöt. Lisäksi hankkeessa arvioitiin metsäbiomassan energiakäytön aiheuttamat pienhiukkasvaikutukset.</p> <p>Metsäbiomassan energiakäytön aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt ja ilmastovaikutukset arvioitiin sekä metsikkötasolla että koko Suomen tasolla. Metsikkötason tarkastelujen avulla haarukoitiin päästöjen ja ilmastovaikutusten vaihteluväli Suomessa. Koko Suomen tason laskelmien avulla arvioitiin tähän asti toteutuneen metsäbiomassan energiakäytön sekä suunnitellun käytön lisäyksen vaikutukset Suomen metsien hiilitaseeseen ja Suomen kasvihuonekaasupäästöihin. Pienhiukkasvaikutukset arvioitiin metsäbioenergian korjuu- ja käyttöketjun tasolla Etelä- ja Pohjois-Suomessa.</p> <p>Metsäbiomassan energiakäytön aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä ja ilmastovaikutuksia verrattiin fossiilisten polttoaineiden käytön päästöihin ja vaikutuksiin sadan vuoden aikana. Suomen tason laskelmissa tarkasteltiin jo toteutuneen ja suunnitellun metsäbiomassan energiakäytön lisäämisen vaikutuksia Suomen kasvihuonekaasutaseeseen ja metsien hiilinieluun vuosina 2000-2025. Tuloksista tehtiin johtopäätöksiä, jotka koskivat 1) metsäbiomassan energiakäytön tehokkuutta energiantuotannon päästöjen vähentämisessä ja ilmastomuutoksen hillinnässä, 2) metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutusten vähentämismahdollisuuksia sekä 3) metsäbiomassan energiakäytön päästöjen ja ilmastovaikutusten huomioimista ilmastopolitiikan taustalla olevissa laskentajärjestelmissä ja -säännöissä.</p>			
<i>Asiasanat</i>	bioenergia, biomassa, energiantuotanto, hiili, ilmastomuutos, metsä, pienhiukkaset			
<i>Rahoittaja/ toimeksiantaja</i>	Ympäristöministeriö			
	ISBN (nid.)	ISBN 978-952-11-3840-9 (PDF)	ISSN (pain.)	ISSN 1796-1637 (verkkoj.)
	Sivuja 43	Kieli suomi	Luottamuksellisuus julkinen	Hinta (sis. alv 8 %)
<i>Julkaisun myynti/ jakaja</i>				
<i>Julkaisun kustantaja</i>	Suomen ympäristökeskus (SYKE), PL 140, 00251 Helsinki			
<i>Painopaikka ja -aika</i>				

PRESENTATIONSBLAD

Utgivare	Finlands miljöcentral			Datum Januari 2011
Författare	Jari Liski, Anna Repo, Riina Känkänen, Pekka Vanhala, Jyri Seppälä, Riina Antikainen, Juha Grönroos, Niko Karvosenoja, Katja Lähtinen, Pekka Leskinen, Ville-Veikko Paunu och Juha-Pekka Tuovinen			
Publikationens titel	Metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutukset Suomessa (Klimat effekter av skogsbiomassans bruk för energiproduktion i Finland)			
Publikationsserie och nummer	Miljön i Finland 5/2011			
Publikationens tema	Miljövård			
Publikationens delar/ andra publikationer inom samma projekt	Publikationen finns tillgänglig endast på internet: www.ymparisto.fi/syke/publikationer			
Sammandrag	<p>Finland har för avsikt att avsevärt öka användningen av skogsbiomassa för energiproduktion. Forskningsprojektets mål var att beräkna mängden växthusgasutsläpp i atmosfären som uppstår vid användningen av avverkningsavfall, stubbar, och gallringsrester till energiproduktion. I projektet beräknades även utsläppens uppvärmande effekt på klimatet. Vid beräkningen beaktades de växthusgasutsläpp som uppstår vid skörd och användning av skogsbiomassan, förändringar i skogens kolreserver, samt effekterna av de mikropartiklar som uppstår vid användning av skogsbiomassa för energiproduktion.</p> <p>I projektet undersöktes mängden växthusgasutsläpp på nivån av enskild skog samt för hela Finlands del. Genom granskning av skogsbestånden i en enskild skog approximerades variationsintervallen för utsläpp och dess klimat effekter i Finland. Med hjälp av beräkningar på statsnivå utvärderades historiskt förverkligad energianvändning av skogsbiomassa, samt konsekvenserna av planerad användning. Effekterna av mikropartiklar uppskattades inom skogsbioenergens skörde- och användningskedja i södra och norra Finland.</p> <p>Växthusgasutsläppen och klimatpåverkan av skogsbiomassans bruk vid energiproduktion jämfördes med utsläppen och användningen av fossila bränslen under en hundra års period. Vid beräkningarna på statsnivå granskades effekterna av historisk och planerad användning av skogsbiomassa till energiproduktion för Finlands växthusgasbalans och skogarnas kolsänkor under åren 2000–2025.</p> <p>Från undersökningen drogs slutsatser gällande: 1) bruk av skogsbiomassa vid energiproduktion som en metod att minska utsläpp och bromsa klimatförändring, 2) möjligheterna att minska klimat effekterna av skogsbiomassans bruk för energiproduktion, samt 3) beaktande av utsläppen och klimat effekterna vid bruk av skogsbiomassa till energiproduktion i de grundläggande beräkningsregler och -system som ligger bakom klimatpolitiken.</p>			
Nyckelord	bioenergi, biomassa, energiproduktion, kol, klimatförändring, skog, mikropartiklar			
Finansiär/ uppdragsgivare	Miljöministeriet			
	ISBN (hft.)	ISBN 978-952-11-3840-9 (PDF)	ISSN (print)	ISSN 1796-1637 (online)
	Sidantal 43	Språk finska	Offentlighet Offentlig	Pris (inneh. moms 8 %)
Beställningar/ distribution				
Förläggare	Finlands miljöcentral, PB 140, 00251 Helsingfors			
Tryckeri/tryckningsort -år				

DOCUMENTATION PAGE

<i>Publisher</i>	Finnish Environment Institute			<i>Date</i> January 2011
<i>Author(s)</i>	Jari Liski, Anna Repo, Riina Känkänen, Pekka Vanhala, Jyri Seppälä, Riina Antikainen, Juha Grönroos, Niko Karvosenoja, Katja Lähtinen, Pekka Leskinen, Ville-Veikko Paunu and Juha-Pekka Tuovinen			
<i>Title of publication</i>	Metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutukset Suomessa (Forest bioenergy: greenhouse gas emissions and climate impacts in Finland)			
<i>Publication series and number</i>	The Finnish Environment 5/2011			
<i>Theme of publication</i>	Environmental protection			
<i>Parts of publication/ other project publications</i>	The publication is available only in the internet: www.ymparisto.fi/syke/publications			
<i>Abstract</i>	<p>Energy production from forest biomass will be increased substantially in Finland according to present climate and energy strategies. The objective of this research project was to estimate greenhouse gas emissions and consequent climate warming effects caused by producing bioenergy from forest harvest residues, stumps and residual biomass of forest thinning operations. The greenhouse gas emissions accounted for included those from the production chain of bioenergy and changes induced in the carbon stocks of forests. In addition, the effects of producing forest bioenergy on particulate matter emissions and exposure were assessed in this research project.</p> <p>The greenhouse gas emissions and climate warming effects of forest bioenergy were estimated at a forest stand scale and the national scale. The stand-scale analyses were used to assess the range of variation in the emissions and the warming effects in Finland. The national analyses were conducted to estimate the effects of forest bioenergy production, which has been carried out already and planned in the future, on the carbon balance of forests and greenhouse gas emissions in Finland. The particulate matter emissions and exposure were estimated at a scale of a bioenergy production chain in southern and northern Finland.</p> <p>The greenhouse gas emissions and the climate warming effects of forest bioenergy were compared to the emissions and the warming effects of fossil fuels over a 100 year period. The national analyses covered years from 2000 to 2025. Based on the results obtained, conclusions were drawn on 1) the efficiency of forest bioenergy in reducing greenhouse gas emissions from energy production and mitigating climate change, 2) possibilities to reduce the emissions and improve the climate effects of forest bioenergy, and 3) treating the emissions and the climate effects of forest bioenergy in various accounting rules and protocols used in climate policy.</p>			
<i>Keywords</i>	bioenergy, biomass, energy production, carbon, climate change, forest, particulate matter			
<i>Financier/ commissioner</i>	Ministry of the Environment			
	ISBN (pbk.)	ISBN 978-952-11-3840-9 (PDF)	ISSN (print)	ISSN 1796-1637 (online)
	No. of pages 43	Language Finnish	Restrictions Public	Price (incl. tax 8 %)
<i>For sale at/ distributor</i>				
<i>Financier of publication</i>	Finnish Environment Institute, P. O. Box 140, FI-00251 Helsinki, Finland			
<i>Printing place and year</i>				

Metsäbiomassan energiäkäyttöä suunnitellaan lisättävän merkittävästi Suomessa. Tässä tutkimushankkeessa arvioitiin, millaiset kasvihuonekaasupäästöt ja ilmastoa lämmittävän vaikutuksen hakkutähteiden, kantojen ja harvennushakkuiden tähdepuun energiäkäyttö aiheuttaa. Hankkeessa huomioitiin metsäbiomassan korjuu- ja käyttöketjusta sekä metsän hiilivarastojen muutoksista johtuvat kasvihuonekaasupäästöt. Lisäksi hankkeessa arvioitiin metsäbiomassan energiäkäytön aiheuttamat pienhiukkasvaikutukset.

