

■ Jaakko Hautanen



■ Paavo Ojanen

Jaakko Hautanen ja Paavo Ojanen

Eri kaasujen ja metsänhoitotöiden merkitys metsien kasvihuonekaasutaseessa: esimerkkinä Etelä- ja Keski-Pohjanmaa

Hautanen, J. & Ojanen, P. 2014. Eri kaasujen ja metsänhoitotöiden merkitys metsien kasvihuonekaasutaseessa: esimerkkinä Etelä- ja Keski-Pohjanmaa. Metsätieteen aikakauskirja 1/2014: 3–12.

Tässä työssä tutkittiin hiilidioksidin (CO_2), metaanin (CH_4) ja typpioksiduulin (N_2O) sekä maanmuokkauksen, lannoituksen ja hakkuutähteiden korjuun merkitystä metsien maaperän ja puuston tämänhetkisessä kasvihuonekaasutaseessa. Tase laskettiin Valtakunnan metsien 10. inventoinnin tulosten sekä hakkuu- ja metsänhoitotilastojen perusteella Etelä- ja Keski-Pohjanmaan metsäkeskusalueelle.

Maaperän ja puuston yhteenlaskettu kasvihuonekaasunielu oli 2600 Gg CO_2 -ekv./v. Ojitettujen soiden maaperä oli lähde 410 Gg CO_2 -ekv./v ja kivennäismaan maaperä nielu 80 Gg CO_2 -ekv./v. Kummallakin maalajilla kaikkien kolmen kaasun vaikutus taseeseen oli huomattava. Kasvavan puuston vaikutus oli kertaluokkaa suurempi, nielu 3000 Gg CO_2 /v.

Tutkitut metsänhoitotyöt kasvattivat nielua yhteensä 40 Gg CO_2 -ekv./v. Maanmuokkaus ja lannoitus synnyttivät kasvihuonekaasujen nielun: parantuneen puuston kasvun CO_2 -nielu oli moninkertainen verrattuna maaperän CO_2 - ja N_2O -päästöön. Hakkuutähteiden korjuu aiheutti päästön.

Vaikka käytetyt menetelmät olivat karkeita, johtopäätös on selvä. Maaperän taseessa kaikki kolme kaasua on otettava huomioon, tai tulos voi olla hyvin harhainen. Samoin tutkituilla metsänhoitotöillä voi olla suuri merkitys. Hakkuiden ollessa vähäisiä kasvavan puuston suuri nielu kuitenkin korvasi moninkertaisesti maaperän päästöt.

Asiasanat: hiilidioksidi, metaani, metsänhoito, typpioksiduuli

Yhteystiedot: Helsingin yliopisto, metsätieteiden laitos

Sähköposti: paavo.ojanen@helsinki.fi

Hyväksytty 3.2.2014

Saatavissa <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff14/ff141003.pdf>

I Johdanto

Metsillä on Suomen kasvihuonekaasutaseessa suuri merkitys hiilinieluna. Vuonna 2007 puuston hiilivarastoksi metsätalousmaalla arvioitiin 835 Tg C, eli 3200 kg C/ha (Metsätilastolliset vuosikirjat 2001–2010). Vuonna 1952 puuston hiilivarasto oli 540 Tg C, eli 2500 kg C/ha (Forsius ym. 1996), joten hiilivarasto on kasvanut puoleksa vuosisadassa 55 %. Viimeisimmän kansallisen kasvihuonekaasuraportin (Greenhouse Gas Emissions ... 2013) mukaan kasvavan puuston vuotuinen hiilidioksidin (CO₂) nielu on 37 Tg CO₂/v, joka vastaa yli puolta Kioton pöytäkirjan mukaisista Suomen kokonaispäästöistä.

Maaperän hiilivarasto kasvaa, jos maahan tulevan hiilen massa (karikesyöte) on suurempi kuin maaperässä tapahtuva hajotus. Hapellisissa oloissa maaperän mikrobit hajottavat maaperän hiiltä hiilidioksidiksi (CO₂); hapettomassa hajoamisessa muodostuu myös metaania (CH₄). Typpioksiduulia (N₂O) syntyy maaperässä nitraatin pelkistyessä (denitrifikaatio) tai ammoniumin hapettuessa (nitrifikaatio). Typpilaskeuma, sekä metsän käsittely, kuten avohakkuu, maanmuokkaus ja lannoitus lisäävät typpioksiduulipäästöjä (Forsius ym. 1996). Ojitetuilla soilla suon toiminta on muuttunut, turpeen hiilivarastot alkavat hajota ja runsasravinteisilla soilla hiilinielu muuttuu hiilen lähteeksi (Minkkinen ym. 2007, Ojanen ym. 2013). Metaanipäästöt vähenevät suon kuivuessa (Nykänen ym. 1998, Ojanen ym. 2010), mutta ojissa syntyy metaanipäästöjä, joiden suuruus riippuu veden virtauksesta ja vedenpinnan korkeudesta ojassa (Minkkinen ja Laine 2006).

YK:n ilmastositomuksen ja Kioton pöytäkirjan mukaisessa kansallisessa raportoinnissa on Suomen metsien kasvihuonekaasutaseeseen laskettu puuston kasvun ja poistuman aiheuttaman hiilivaraston muutoksen lisäksi maaperän hiilivaraston muutos kivennäismailla ja ojitetuilla turvemilla sekä metsänlannoituksesta johtuva typpioksiduulipäästö (Suomen kasvihuonekaasupäästöt ... 2011). Näiden lisäksi kivennäismaa on yleensä myös pieni metaanin (CH₄) nielu ja typpioksiduulin (N₂O) lähde ja ojitettu turvemaa ojitusilanteesta ja kasvupaikkatyypistä riippuen suurikin CH₄:n ja N₂O:n lähde (Forsius ym. 1996, Arnold ym. 2005, Ojanen

ym. 2010). Tämänhetkinen kansallinen raportointi ei siten anna kokonaiskuvaa metsätalousmaan kasvihuonekaasutaseesta. CH₄:n ja N₂O:n osuus maaekosysteemien taseesta voi kuitenkin olla huomattava (Schulze ym. 2009).

Kansallisen raportoinnin lisäksi laskelmia on tehty kiihtyvään tahtiin myös maakuntatasolla. Selvityksiä on tehty alueista riippuen erilaisilla tarkastelunäkökulmilla, kuten Seinäjoen kaupungin maankäytön kasvihuonevaikutuksia koskeva selvitys (Koski 2008) ja Keski-Suomessa tehty selvitys luonnon kasvihuonekaasulähteistä ja -nieluista (Lakanen 2011). Myös alueiden kokonaistaseita on selvitetty, muun muassa Pohjois-Pohjanmaalla (Pohjois-Pohjanmaan kasvihuonekaasutase 2009) ja Pohjois-Karjalassa (Lohilahti ym. 2009). Laskelmissa on otettu vaihtelevasti huomioon myös metsämaan CH₄- ja N₂O-tase.

Aluetasolla taseselvityksiä tehdään yleensä erilaisten ilmastostrategioiden laadintaa varten. Niinpä mielenkiinnon kohteena on, miten päätöihin voidaan vaikuttaa. Hakkuiden lisäksi myös metsänhoitotöillä on vaikutusta metsän kasvihuonekaasutaseeseen. Esimerkiksi maanmuokkaus ja hakkuutähteiden korjuu vaikuttavat sekä maaperän hiilivarastoon että puuston kasvuun (Mannerkoski ja Mälkönen 2000, Palosuo ym. 2001, Piirainen ym. 2009, Helmisaari ym. 2011). Lannoituksesta syntyy typpioksiduulipäästö (Good Practice Guidance ... 2003), mutta myös kasvunlisäys puustoon (Kukkola ja Moilanen 2005). Edellä mainituissa raporteissa ei kuitenkaan ole käsitelty näiden tekijöiden vaikutusta taseeseen. Lahden kaupungin metsistä on tehty erillinen hiilitaseen selvitys (Lahden kaupungin metsien ... 2011). Sen yhteydessä oli myös tarkasteltu hakkuiden optimointia hiilitaseen kannalta edullisimmaksi. Toisaalta siinä käsiteltiin vain CO₂:ta.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin CO₂:n, CH₄:n N₂O:n osuutta metsien kasvihuonekaasutaseessa Etelä- ja Keski-Pohjanmaan metsäkeskusalueella 2000-luvun ensimmäisellä vuosikymmenellä. Lisäksi arvioitiin maanmuokkauksen, lannoituksen ja hakkuutähteiden korjuun vaikutus taseeseen. Laskelman lähtötietoina käytettiin Valtakunnan metsien 10. inventoinnin (VMI) tuloksia sekä hakkuu- ja metsänhoitotilastoja. Puuston tase laskettiin samaan tapaan kuin kansallisessa raportoinnissa. Muuten käytettiin uusimpia kirjallisuudesta löytyviä tietoja.

Taulukko 1. Etelä- ja Keski-Pohjanmaan metsäkeskus-alueella tehtyjen metsänhoitotöiden pinta-alat (ha/vuosi) keskimäärin vuosina 2006–2010 sekä prosenttiosuudet metsämaasta (Metinfo tilastopalvelu 2011, Etelä-Pohjanmaan metsäkeskus 2008, Luonnonhoidon laadunarviointi 2010).

Metsänhoitotyö	Pinta-ala	% metsämaasta
Maanmuokkaus yhteensä	9248	0,70
– äestys	3570	0,27
– laikutus	777	0,06
– mätätys	4901	0,37
Hakkuutähteiden korjuu	1036	0,08
Lannoitus	1244	0,09

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Tarkasteltava alue ja ajanjakso

Kasvihuonekaasutase laskettiin Etelä- ja Keski-Pohjanmaan metsäkeskusalueelle. Sen toimialue käsittää Etelä- ja Keski-Pohjanmaan maakunnat sekä Isonkyrön, Laihian ja entisen Vähänkyrön (nykyisin osa Vaasaa) kunnat Pohjanmaan maakunnasta. Alueella on metsätalousmaata yhteensä noin 1,5 miljoonaa hehtaaria. Soiden osuus metsätalousmaasta on suuri, 46 %, josta 78 % on ojitettu metsätalouksikäyttöön (Metsätilastolliset vuosikirjat 2001–2010). Metsäkeskuksen alueella merkittävin puulaji 61 %:n osuudella kokonaistilavuudesta on mänty, jonka lisäksi kuusta on 20 %, hieskoivua 15 % ja rauduskoivua 2 % (Metsätilastolliset vuosikirjat 2001–2010).

Kivennäismaiden, metsäojitettujen soiden, turvekangastyypin ja kuivatusasteiden pinta-aloina laskentaa varten käytettiin VMI10:n tietoja, jotka on kerätty vuosina 2004–2008 (Metsävarat metsäkeskuksittain ... 2009, VMI10 ... 2009). Puuston tase laskettiin käyttäen Metsätilastollisten vuosikirjojen keskimääräisiä kasvu- ja poistumatietoja vuosilta 2000–2009 (Metsätilastolliset vuosikirjat 2001–2010). Metsänhoitotöiden vaikutusten laskennassa käytettiin metsänhoitotöiden suoritusmäärien keskiarvoja vuosilta 2006–2010 (taulukko 1, Metinfo tilastopalvelu 2011).

2.2 Kasvihuonekaasutase

Metsien kasvihuonekaasutase saatiin laskemalla yhteen puuston ja maaperän taseet. Kasvihuonekaasujen erilaiset voimakkuudet ja eliniät otettiin huomioon muuttamalla kunkin kaasun tase hiilidioksidiekvivalenteiksi kertomalla se GWP₁₀₀:lla (Global Warming Potential) (Climate Change 2007). Kokonaistase muodostui siten seuraavalla tavalla:

$$\text{KHK-tase} = \text{CO}_2\text{-tase} + 25 \times \text{CH}_4\text{-tase} + 298 \times \text{N}_2\text{O-tase} \quad (1)$$

Taseeseen kuuluivat puuston biomassan muutoksesta aiheutuva CO₂-tase sekä maaperän CO₂-, CH₄-, ja N₂O-taseet kivennäismailla ja ojitetuilla turvemilla. Ojittamattomien soiden maaperä jätettiin laskelmien ulkopuolelle, koska ojittamattomat suot ovat pääosin vähäpuustoisia soita ja avosoita, ja siten metsätalouden ulkopuolella. Ojittamattomien rämeiden ja korpjen puusto on kuitenkin laskelmissa mukana, koska hakkuutilastoja sekä kasvu- ja luonnonpoistuma-arvioita ei ole eroteltu maaluokan mukaan. Tämän vaikutus on kuitenkin pieni vähäisen puuston takia (ks. Minkkinen ja Ojanen 2013).

Maaperän hiilitase (C-tase) määriteltiin CO₂:na, CH₄:na ja veteen liunneena orgaanisena hiilenä (DOC) maaperään tulevien ja sieltä lähtevien virtojen summana:

$$\text{C-tase} = \text{CO}_2\text{-C-tase} + \text{CH}_4\text{-C-tase} + \text{DOC-tase} \quad (2)$$

DOC:en oletettiin päätyvän vesistöistä CO₂:na ilmakehään (Huotari ym. 2011), joten se laskettiin maaperän kaasutaseeseen CO₂-päästönä. Kivennäismaiden lähtötietoina olivat Yasso-mallituksesta saatu C-tase sekä CH₄-tase, joten CO₂-C-tase sisältäen DOC:en saatiin niiden erotuksena:

$$\text{CO}_2\text{-C-tase} = \text{C-tase} - \text{CH}_4\text{-tase} \quad (3)$$

Ojitetuilla turvemilla lähtötietoina olivat CO₂-tase ja CH₄-tase, joten DOC arvioitiin erikseen. CH₄-taseeseen laskettiin mukaan sekä maaperän että oijen CH₄-tase.

2.3 Taseen komponentit

2.3.1 Puusto

Puuston kokonaiskasvu ja kokonaispoistuma (sisältää hakkuu- ja luonnonpoistuman) puulajeittain saatiin Metsätilastollisesta vuosikirjasta (Metsätilastolliset vuosikirjat 2001–2010). Kasvu ja poistuma (m^3/v runkopuuta) muutettiin biomassaksi käyttäen biomassan muunnoskertoimia (Biomass Expansion Factor, BEF), jotka on estimoitu biomassayhtälöiden ja VMI10:n tietojen perusteella erikseen männylle, kuuselle ja koivulle turve- ja kivennäismaalle (Greenhouse Gas Emissions ... 2013). Biomassa muutettiin CO_2 :ksi olettaen, että biomassasta puolet on hiiltä. Puuston kasvihuonekaasutase laskettiin vähentämällä kasvusta poistuma. Puuston tase jaettiin kivennäis- ja turvemaille yksinkertaisesti pinta-alojen suhteella, koska lähtöaineistossa ei ollut tietoa hakkuiden jakautumisesta niiden välillä.

2.3.2 Kivennäismaa

Lehtosen ym. (2011) mukaan kivennäismaan hiilinielu on 30 kg C/ha/v (Metsähallitus, metsätalousmaa Etelä-Suomi). Liskin ym. (2006) mukaan hiiltä sitoutuu kivennäismaan maaperään Suomessa keskimäärin 110 kg C/ha/v . Kansallisessa raportoinnissa on laskettu Etelä-Suomen hiilen kertymäksi 200 kg C/ha/v (Greenhouse Gas Emissions ... 2013). Lehtosen ym. (2011) simuloimaa hiilitasetta käytettiin, koska se oli saatu uusimmalla maaperän hiilimallilla (Yasso07 2011). Yasson syöttötietoina on käytetty puuston, hakkuiden, luonnonpoistuman ja aluskasvillisuuden kariketuotosta sekä Ilmatieteen laitoksen sääaineistoa (Lehtonen ym. 2011).

Aiemmissa alueellisissa tarkasteluissa (Lohilahti ym. 2009, Lakanen 2011) on käytetty Forsiuksen ym. (1996) Suomen kivennäismaametsien metaaninieluarviota $1\text{--}3 \text{ kg CH}_4/\text{ha/v}$. Dutaurin ja Verchotin (2007) katsausartikkelin mukaan boreaalisten kivennäismaiden metaaninielu on keskimäärin samaa luokkaa, $1,3 \text{ kg CH}_4/\text{ha/v}$. Grunwaldin ym. (2012) kokoamien tulosten vaihteluväli on $1\text{--}10 \text{ kg CH}_4/\text{ha/v}$. Näistä kaikki yli $3 \text{ kg CH}_4/\text{ha/v}$ arvioidut nielut perustuvat kuitenkin vain kolmen kesäkuukauden (Saari ym. 1998, Maljanen ym. 2006) tai

kesäpuolivuoden (Saari ym. 2004) mittauksiin, joten vuositason arvot eivät ole kovin varmoja. Saari ym. (2009) ovat kuitenkin arvioineet ympärivuotisten mittausten perusteella avohakkuun jälkeisen kolmen vuoden keskimääräiseksi CH_4 -nieluksi $5 \text{ kg CH}_4/\text{ha/v}$, joten suuretkin metaaninielut ovat ainakin joissain tapauksissa mahdollisia. Tässä tutkimuksessa käytettiin Forsiuksen ym. (1996) keskimääräistä arvoa $2 \text{ kg CH}_4/\text{ha/v}$, jota voi pitää maltillisena kokoluokka-arviona.

Samaten N_2O -päästöarviona on aiemmissa tutkimuksissa (Lohilahti ym. 2009, Lakanen 2011) käytetty Forsiuksen ym. (1996) esittämää keskimääräistä päästöä $0,1\text{--}0,3 \text{ kg N}_2\text{O}/\text{ha/v}$, joka perustuu hakkuun jälkeiseen vuoden $1 \text{ kg N}_2\text{O}/\text{ha/v}$ päästöön ja muissa tilanteissa $0,01\text{--}0,1 \text{ kg N}_2\text{O}/\text{ha/v}$ päästöön. Ympärivuotisia mittauksia boreaalista kivennäismaametsistä on hyvin vähän, mutta ne tukevat tätä arviota: Pihlatie ym. (2007) arvioivat eteläsuomalaiselle puolukkatyyppin männikölle $0,05 \text{ kg N}_2\text{O}/\text{ha/v}$ päästön, Klemmedtsson ym. (1997) eteläruotsalaiselle kuusikolle $0,1 \text{ kg N}_2\text{O}/\text{ha/v}$ päästön ja Matson ym. (2009) kanadalaiselle banksinmännikölle niin ikään $0,1 \text{ kg N}_2\text{O}/\text{ha/v}$ päästön. Saari ym. (2009) arvioivat toiselle vuodelle avohakkuun jälkeen $0,6 \text{ kg N}_2\text{O}/\text{ha/v}$ päästön. Tässä tutkimuksessa käytettiin Forsiuksen ym. (1996) keskimääräistä arvoa $0,2 \text{ kg N}_2\text{O}/\text{ha/v}$.

2.3.3 Ojitettu turvemaa

Ojitettujen soiden maaperän hiilidioksidin ja typpioksiduulin taseet laskettiin uusimpien, 68 koealaa eri puolilla Suomea käsittävien tutkimustulosten (Ojanen ym. 2010, 2013) perusteella turvekangastyypin mukaan ja metaanin tase ojitusalueen kuivatusasteen mukaan (taulukko 2). Ojien metaanipäästö laskettiin Minkkisen ja Ojasen (2013) mukaan: ojien päästöt oletettiin samoiksi luonnontilaisten soiden metaanipäästöjen kanssa. Turvekangastyypit rinnastettiin ojitusta edeltäneisiin suotyyppeihin Laineen ja Vasanderin (2008) mukaan. Ojien pinta-alaksi laskettiin $2,5\%$ ojitetun suon pinta-alasta, kun metrin levyisiä ojia oli 40 metrin välein.

DOC-tase laskettiin myös mukaan ojitettujen soiden maaperän päästöihin. Metsäojitetuilta soilta poistuu veden mukana DOC:tä keskimäärin

Taulukko 2. Metsäojitettujen soiden päästökertoimet (Ojanen ym. 2010, 2013, Minkkinen ja Ojanen 2013). Miinusmerkkinen päästö merkitsee nielua. Ojien metaanipäästöjen laskennassa käytettiin luonnontilaisten soiden päästökertoimia. Suotyypit on luokiteltu Laineen ja Vasanderin (2008) mukaan rehevimmästä karuimpaan: ruohoturvekangas (Rhtkg), mustikkaturvekangas I ja II (Mtkg I ja II), puolukkaturvekangas I ja II (Ptkg I ja II), varputurvekangas (Vatkg), jäkäläturvekangas (Jätkg).

Kaasu	Luokittelutekijä	Päästö (g kaasu/m ² /v)
CO ₂	<i>Turvekangastyypit</i>	
	Rhtkg–Mtkg	192
	Ptkg–Jätkg	–69
	<i>DOC-tase</i>	
	Ojitetut suot	29
CH ₄	<i>Maaperä: kuivatusaste</i>	
	Ojikut ja muuttumat	1,16
	Turvekankaat	–0,28
	<i>Ojat: alkuperäinen suotyyppi</i>	
	Saranevat	24
	Avosuot, sekä sararämeet ja korvet	15
	Muut harvapuustoiset rämeet	5
	Aidot puustoiset korvet ja rämeet	2
N ₂ O	<i>Turvekangastyypit</i>	
	Rhtkg	0,185
	Mtkg I	0,116
	Mtkg II	0,167
	Ptkg I	0,028
	Ptkg II	0,071
	Vatkg	0,029
	Jätkg	0

10,5 g C/m²/v (Sallantaus 1994). Maahan tuleva orgaaninen hiili metsikkösadannassa on keskimäärin 2,5–3,5 g C/m²/v (Merilä ym. 2007). Käyttämällä metsikkösadannan minimiarvoa 2,5 g C/m²/v DOC-taseeksi ojitetuilla soilta muodostuu lähde 8 g C/m²/v (Minkkinen ja Ojanen 2013).

2.4 Metsänhoitotyöt

Maanmuokkauksen ja hakkuutähteiden korjuun osalta laskettiin maaperän hiilen hävikin aiheuttama CO₂-päästö sekä puuston kasvun muuttumisesta johtuva CO₂-taseen muutos. Lannoituksen osalta tarkasteltiin kasvun lisääntymisen aiheuttamaa CO₂-nielua sekä lannoituksesta aiheutuvaa N₂O-päästöä.

Metsänhoitotöiden seurauksena muuttuneet puuston kuutiokasvut muutettiin biomassan sisältämäksi hiileksi samoin kuin puuston tasetta laskettaessa (luku 2.3.1). Muiden metsänhoitotöiden vaikutusta ei valitettavasti pystytty arvioimaan tutkimustiedon puutteen vuoksi.

Maanmuokkauksen osalta hiilivarastona käytettiin 3,87 kg/m² 20 cm:n syvyydelle mineraalimaahan asti mitattuna (Metla Hanke 3324 2007), koska hiilivaraston muutoksena käytettiin Piiraisen ym. (2009) mittaamaa 8 %:n vähenemistä hiilivarastossa 8 vuotta maanmuokkauksen jälkeen samalta syvyydeltä mitattuna. Puuston kasvun lisäyksenä käytettiin Mannerkosken ja Mälkösen (2000) havaitsemaa 15 m³/ha eroa muokatun ja muokkaamattoman alan välillä 18 vuoden kuluttua maanmuokkauksesta.

Hakkuutähteiden korjuun aiheuttamana hiilivaraston pienenemisenä käytettiin Palosuon ym. (2001) simulointituloksen mukaista 0,2 kg C/m² 20 vuoden kuluttua hakkuusta. Hakkuutähteiden korjuun pinta-ala johdettiin avohakkuiden pinta-alasta (Hakkuut ja puuvarojen ... 2008) ja hakkuutähteiden korjuun osuudesta avohakkuualoilla, joka oli metsäkeskusalueella keskimäärin vuosina 2006–2010 15 % (Luonnonhoidon laadunarviointi 2010).

Lisäksi laskettiin havaittujen kasvutappioiden aiheuttama CO₂-päästö. Saarsalmi ym. (2010) eivät havainneet tilavuuden muutosta Itä-Suomessa kahdella koealalla (VT ja MT) 22 vuotta avohakkuusta männylle istutetulla alalla, jossa hakkuutähteet oli korjattu, verrattuna tavalliseen avohakkuuseen. Myöskään Wall ja Hytönen (2011) eivät huomanneet vaikutusta kuusen tilavuudessa Keski-Suomessa 30 vuoden aikana. Tutkimuksessa oli havaittu vaikutusta muun muassa kuusten pituuskehitykseen, mutta epätasaisten taimikoiden vuoksi ei tilavuuden muutoksen voitu päätellä johtuvan hakkuutähteiden poistosta (Wall ja Hytönen 2011).

Egnell ja Valinger (2003) sitä vastoin huomasiivat Etelä-Ruotsin männiköissä 0,8 m³/ha/v kasvun heikkenemisen kokopuukorjuun (hakkuutähteet ja ainespuu) seurauksena verrattuna tavalliseen avohakkuuseen 25 vuoden seurantajakson aikana. 22 vuodessa kasvun heikkeneminen olisi 17,6 m³/ha. Pohjoisruotsalaisessa kuusikossa Egnell (2011) arvioi mittausten perusteella kasvun heikentyneen kokopuukorjuussa niin, että kuusikko menettää 4–5 kasvukautta verrattuna tavalliseen avohakkuuseen

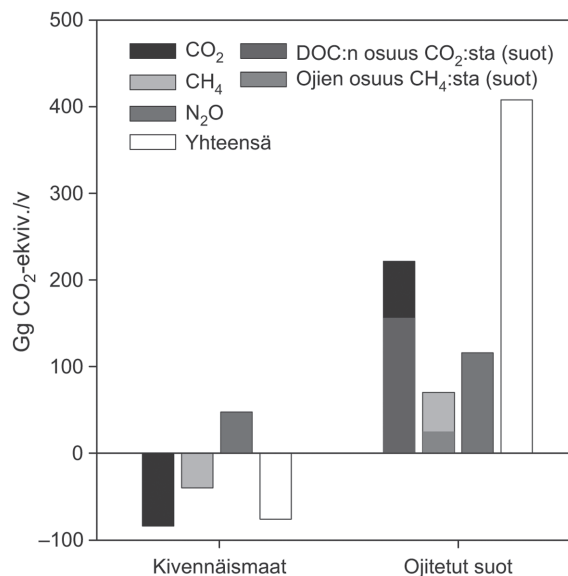
31 vuoden aikana. Etelä- ja Keski-Pohjanmaan metsäkeskusalueen kuusen keskikasvulla (Metsätilastolliset vuosikirjat 2001–2010) kasvun väheneminen olisi 22 vuodessa lähes sama (17,8 m³/ha) edeltävän tuloksen kanssa. Laskennassa käytettiin puuston kasvun vähenemisessä Egnellin ja Valingerin (2003) tutkimustulosta (kasvun väheneminen 0,8 m³/ha/v) samalla 20 vuoden ajanjaksolla, kuin maaperän hiilivaraston simulointituloksessa (Palo-suo ym. 2001). Tämä luku ei edellisen perusteella liene ainakaan aliarvio.

Lannoituksen typpioksiduulipäästöt laskettiin käytetyn typen määrän mukaan. Levitysmääränä käytettiin 150 kg N/ha (Kukkola ja Nöjd 2000). Metsäkeskusalueella lannoitettiin vuosien 2006–2010 välillä keskimäärin n. 2600 ha, joista 500 ha oli terveyslannoituksia (Metsätilastolliset vuosikirjat 2001–2010). Kaikki terveyslannoitukset ja lisäksi kasvatuslannoituksista noin 40 % olivat turvemail-la (Antti Pajula, Suomen metsäkeskus Etelä- ja Keski-Pohjanmaa 22.3.2012, suullinen tiedonanto). Turvemaan lannoituksessa ei käytetty typpeä. Lopullinen typpilannoitusala metsäkeskuksen alueella oli siten noin 1250 ha. Suomen kasviuonekaasuraportoinnissa ei ole kansallisia kertoimia typpioksiduulipäästöjen laskentaan, minkä vuoksi käytettiin IPCC:n suositusta (Good Practice Guidance ... 2003), jossa 1,25 % tyypestä muuttuu typpioksiduulin tyypeksi. CO₂-ekvivalenteiksi muutettuna typpioksiduulipäästöjä voitiin näin ollen vertailla lannoituksen lisäämään hiilen määrään puustossa. Lannoituksesta syntyneen keskimääräisen kasvunli-säyksen havaittiin olevan 15 m³/ha 10 vuodessa 150 kilon keskimääräisellä levitysmäärällä (Mälkönen 1982, Kukkola ja Moilanen 2005).

3 Tulokset

3.1 Puuston ja maaperän tase

Puustoon sitoutui hiiltä keskimäärin noin 3000 Gg CO₂/v. Merkittävin puulaji oli mänty, jonka hiilinielu oli noin 2300 Gg CO₂/v. Kuusen nielu oli hyvin lähellä nollaa (nielu 6 Gg CO₂/v), koska poistuma oli lähes yhtä suuri kuin vuotuinen kasvu. Männyllä poistuma oli alle puolet kasvusta. Toteutuneilla



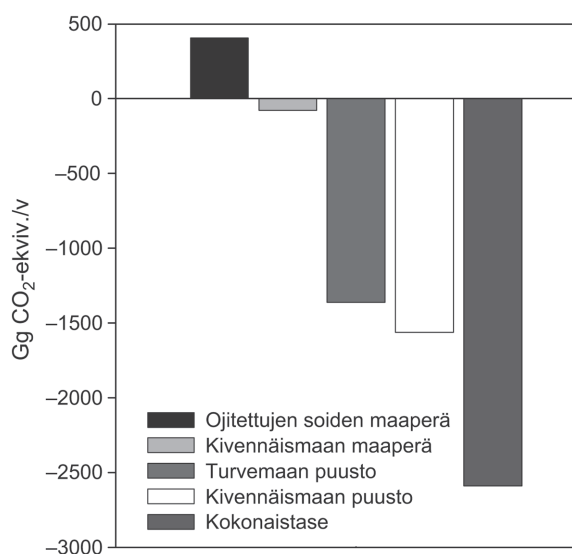
Kuva 1. Maaperän kasviuonekaasutase kivennäismaalla ja ojitetuilla soilla kasviuonekaasuittain Etelä- ja Keski-Pohjanmaan metsäkeskusalueella. Negatiiviset arvot ovat nieluja ja positiiviset lähteitä.

hakkuumäärillä puustoon sisältyvän hiilen määrä on kasvanut metsäkeskusalueella vuosittain 1,7 %.

Kivennäismaan maaperä toimi kasviuonekaasujen nieluna, sillä maaperään sitoutui 80 Gg CO₂-ekv./v (kuva 1). Yksittäisten kaasujen osalta kivennäismaa oli CO₂:n ja CH₄:n nielu, mutta N₂O:n lähde. Merkittävin yksittäinen kaasu oli CO₂, jonka nielu oli lähes kaksinkertainen verrattuna N₂O-päästöön.

Ojitettujen soiden maaperä oli kasviuonekaasujen lähde (kuva 1). Päästöt olivat 410 Gg CO₂-ekv./v, josta hiilen nettohuuhtouma oli 160 Gg CO₂-ekv./v. CH₄-taseseen vaikuttivat merkittävästi ojien CH₄-päästöt. Ojitettujen soiden CH₄-päästöistä lähes kolmannes oli peräisin ojista.

Etelä- ja Keski-Pohjanmaan metsäkeskusalueen kasviuonekaasutase oli keskimäärin nielu 2600 Gg CO₂-ekv./v, eli kasviuonekaasuja sitoutui maahan ja puustoon vuosittain 2,6 Tg CO₂-ekv./v enemmän kuin niitä vapautui ilmakehään (kuva 2).

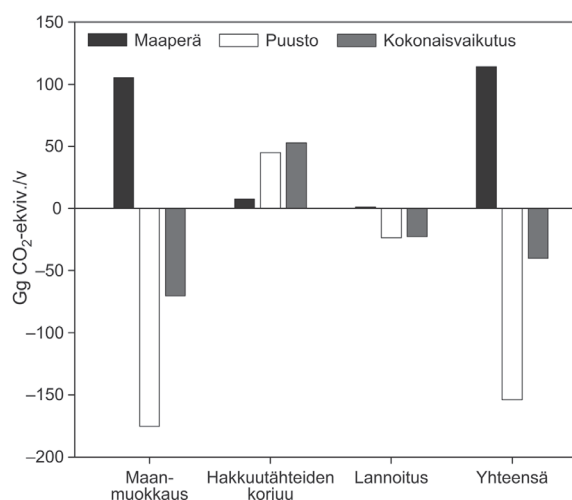


Kuva 2. Etelä- ja Keski-Pohjanmaan metsäkeskusalueen kasviuonekaasutase ojitettujen soiden ja kivennäismaan maaperässä sekä turve- ja kivennäismaan puustossa. Negatiiviset arvot ovat nieluja ja positiiviset lähteitä.

3.2 Metsänhoitotöiden vaikutus

Metsänhoitotöiden yhteenlaskettu vaikutus metsäkeskusalueella oli nielu 40 Gg CO₂-ekv./v (kuva 3). Metsänhoitotöistä maanmuokkauksen ja lannoituksen vaikutus oli kasviuonekaasupäästöjä vähentävä, kun taas hakkuutähteiden korjuu synnytti pienen päästölähteen.

Maanmuokkauksen vaikutus oli selkeä nielu, -70 Gg CO₂/v. Puuston lisääntyneen kasvun aiheuttama CO₂-nielu oli noin 1,5-kertainen verrattuna maaperän hiilen hävikin aiheuttamaan päästöön (kuva 3). Hakkuutähteiden korjuu aiheutti CO₂-päästöjä pienentämällä maaperän hiilivarastoa sekä erityisesti vähentämällä puuston kasvuun sitoutunutta hiiltä. Yhteensä aiheutuneet päästöt hakkuutähteiden korjuusta olivat 53 Gg CO₂/v (kuva 3). Lannoituksen kokonaisvaikutus oli kasviuonekaasujen nielu. Puuston parantuneen kasvun aiheuttama CO₂-nielu (24 Gg CO₂/v) oli yli 20-kertainen verrattuna lannoituksesta syntyneeseen typpioksiduulipäästöön (1 Gg CO₂-ekv./v).



Kuva 3. Metsänhoitotöiden vaikutus metsien kasviuonekaasutaseeseen Etelä- ja Keski-Pohjanmaan metsäkeskusalueella. Negatiiviset arvot ovat nieluja ja positiiviset lähteitä.

4 Tulosten tarkastelu

Tässä työssä metsien kasviuonekaasutaseen selkeyttämiseksi pyrittiin sisällyttämään mahdollisimman kattavasti eri kasviuonekaasujen nieluja ja lähteitä. Ojitetuilla soilla huuhtoutunut hiili (DOC) aiheutti maaperästä merkittävän päästön. Kivennäismaan maaperässä metaanin hajoamisesta syntynyt CO₂-päästö (4,4 Gg CO₂/v) pienensi maaperän nieluja. Kun kivennäismaan ja ojitettujen soiden kaikki tiedossa olevat päästöt otettiin huomioon, maaperän päästöt kasvoivat ja puuston merkitys kasviuonekaasunieluna korostui.

Puuston tase muodostui kasvun ja poistuman (hakkuut ja luonnonpoistuma) erotuksesta. Poistuma oli metsäkeskusalueella noin 70 % kasvusta. Kuusella poistuma oli lähes yhtä suuri kuin kasvu, männylä vain puolet. Hakkuilla vaikutettiin merkittävästi puuston kasviuonekaasutaseeseen, ja samalla kokonaisvaikutukseen. Hakkuiden ollessa suhteellisen vähäisiä puuston nielu korvasi moninkertaisesti päästöt maaperästä.

Ojitettujen soiden määrä metsäkeskusalueella oli merkittävä, noin 30 % metsätalousmaasta. Kasvi-

huonekaasutaseeseen ojitetuilla soilla oli suuri vaikutus. Niiden maaperä oli suuri kasvihuonekaasulähde, mutta toisaalta ojitusmetsien puusto oli vielä suurempi nielu. Turvemaan puusto satoi 3,5-kertaisesti kaasuja maaperän päästöön nähden.

Käsiteltyjen metsänhoitotöiden vaikutus kasvihuonekaasutaseeseen jäi metsäkeskusalueella pieneksi, koska vain hyvin pienellä osalla metsätalousmaata tehtiin metsänhoitotöitä. Maanmuokkauksen ja lannoituksen ansiosta parantuneeseen kasvuun sitoutunut hiili enemmän kuin korvasi niiden kasvihuonekaasupäästöt. Arvioiden päästöistä pitäisikin olla huomattavan virheellisiä, että maanmuokkauksesta ja lannoituksesta aiheutuisi kasvihuonekaasulähde. Hakkuutähteiden korjuu sitä vastoin aiheutti kasvihuonekaasupäästöjä sekä kasvutappion että maaperän hiilen häviämisen kautta.

Tässä työssä arvioitua metsänhoitotöiden vaikutusta ei voi suoraan summata kokonaistaseeseen: maastossa mitatut puuston kasvutiedot sisältävät myös metsänhoitotöiden vaikutuksen puuston kasvuun. Jos maaperäpäästöt, yhteensä 110 Gg CO₂-ekv./v, lisätään vastaavasti maaperän taseeseen, maaperän arvioitu lähde suurenee noin 30 %.

Tulosten perusteella voi pitää selvänä, että maaperän kaasutasetta arvioitaessa kaikki kolme kaasua on otettava huomioon. Samoin metsänhoitotöillä voi olla suuri merkitys. Yhtä selvää on myös, että tekemämme laskelma on lähinnä suuruusluokka-arvio. Tarkempien laskelmien tekemiseksi vaaditaan huomattavasti lisää tutkimustietoa metsänhoidon vaikutuksista maaperään. Etenkin kivennäismailla myös aivan perustieto muiden kasvihuonekaasujen kuin CO₂:n taseista on melko hajanaista.

Kirjallisuus

- Arnold, K. von, Hånell, B., Stendahl, J. & Klemedtsson, L. 2005. Greenhouse gas fluxes from drained organic forestland in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 20: 400–411.
- Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. IPCC. 996 s.
- Dutaur, L. & Verchot, L.V. 2007. A global inventory of the soil CH₄ sink. *Global Biogeochemical Cycles* 21: 1–9.
- Egnell, G. 2011. Is the productivity decline in Norway spruce following whole-tree harvesting in the final felling in boreal Sweden permanent or temporary? *Forest Ecology and Management* 261: 148–153.
- & Valinger, E. 2003. Survival, growth, and growth allocation of planted seedlings of Scots pine trees after different levels of biomass removal in clear-felling. *Forest Ecology and Management* 177: 65–74.
- Forsius, M., Kankaala, P., Karjalainen, T., Kellomäki, S., Laine, J., Lehtilä, A., Martikainen, P., Ojala, A., Pingoud, K., Pipatti, R., Savolainen, I. & Silvola, J. 1996. Suomen kasvihuonekaasujen päästöt ja nielu. Julkaisussa: Kuusisto, E., Kauppi, L. & Heikinheimo, P. (toim.). *Ilmastonmuutos ja Suomi. Silmu, suomalainen ilmamehänmuutosten tutkimusohjelma. Yliopistopaino.* s. 179–196.
- Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. 2003. IPCC. 632 s.
- Greenhouse Gas Emissions in Finland 1990–2011. National Inventory Report under the UNFCCC and the Kyoto Protocol. 2013. Statistics Finland. 470 s. [Verkojulkaisu]. Saatavissa: http://tilastokeskus.fi/tup/khkinv/fin_nir_20100525.pdf. [Viitattu 29.8.2013].
- Grunwald, D., Fender, A.-C., Erasmi, S. & Jungkunst, H.F. 2012. Towards improved bottom-up inventories of methane from the European land surface. *Atmospheric Environment* 51: 203–211.
- Hakkuut ja puuvarojen käyttö 2008. Etelä- ja Keski-Pohjanmaan alueellinen metsäohjelma 2006–2010. 2008. Etelä-Pohjanmaan metsäkeskus.
- Helmisaari, H.-S., Hanssen, K., Jacobson, S., Kukkola, M., Luro, J., Saarsalmi, A., Tamminen, P. & Tveite, B. 2011. Logging residue removal after thinning in Nordic boreal forests: Long-term impact on tree growth. *Forest Ecology and Management* 261: 1919–1927.
- Huotari, J., Ojala, A., Peltomaa, E., Nordbo, A., Launiainen, S., Pumpanen, J., Rasilo, T., Hari, P. & Vesala, T. 2011. Long-term direct CO₂ flux measurements over a boreal lake: Five years of eddy covariance data. *Geophysical Research Letters* 38: 1–5.
- Klemedtsson, L., Klemedtsson, Å.K., Moldan, F. & Weslien, P. 1997. Nitrous oxide emission from Swedish forest soils in relation to liming and simulated increased N-deposition. *Biology and Fertility of Soils* 25: 290–295.
- Koski, A. 2008. Maankäytön kasvihuonevaikutukset Seinäjoella. Opinnäytetyö. Jyväskylän ammattikor-

- keakoulu. 38 s.
- Kukkola, M. & Nöjd, P. 2000. Kangasmetsien lannoitusten tuottama kasvunlisäys Suomessa 1950–1998. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2000: 603–612.
- & Moilanen, M. 2005. Metsänlannoitus. Teoksessa: Hynynen, J., Valkonen, S. & Rantala, S. (toim.). *Tuotettava metsänkasvatus. Metsäkustannus*. s. 65–67.
- Lahden kaupungin metsien hiilitaseen selvittäminen. *Päikkälisillä teoilla ilmastonmuutoksen hillintään*. 2011. Indufor & Simosol Oy. 34 s.
- Laine, J. & Vasander, H. 2008. Suotyypit ja niiden tunnistaminen. 2. p. *Metsäkustannus*. 110 s.
- Lakanen, L. 2011. Luonnon kasvihuonekaasulähteiden ja -nielujen laskenta maakunnallisella tasolla. *Diplomityö*. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta, ympäristötekniikan koulutusohjelma. 87 s.
- Lehtonen, A., Puolakka, P., Ihalainen, A., Heikkinen, J. & Korhonen, K.T. 2011. Metsähallituksen hallinnoimien metsien hiilitaseet. *Metlan työraportteja* 199. 24 s.
- Liski, J., Lehtonen, A., Palosuo, T., Peltoniemi, T., Eggers, T., Muukkonen, P. & Mäkipää, R., 2006. Carbon accumulation in Finland's forests 1922–2004 – an estimate obtained by combination of forest inventory data with modelling of biomass, litter and soil. *Annals of Forest Science* 63: 687–697.
- Lohilahti, H., Hokkanen, T.J., Aho, J., Kolström, T. & Mustonen, A. (toim.). 2009. Ilmastonmuutos Pohjois-Karjalan mahdollisuutena. Ilmastonmuutoksen Pohjois-Karjala -projekti. Pohjois-Karjalan maakuntaliitto. 63 s.
- Luonnonhoidon laadun arviointi. 2010. Latvusmassan korjuukohteiden osuus yksityismetsien avohakkuualoista, % pinta-alasta. *Tapio ja Metsäkeskus*. [Verkkodokumentti]. http://www.metsavastaa.net/files/metsavastaa/Luontolaatu_mk-sten%20tulokset_2010/EP_korjuun_laajuus_2006_2010_.pdf. [Viitattu 11.11.2011].
- Maljanen, M., Jokinen, H., Saari, A., Strömmer, R. & Martikainen, P.J. 2006. Methane and nitrous oxide fluxes, and carbon dioxide production in boreal forest soil fertilized with wood ash and nitrogen. *Soil Use and Management* 22: 151–157.
- Mannerkoski, H. & Mälkönen, E. 2000. Soil preparation for forest regeneration. *Julkaisussa: Mälkönen, E., Babich, N.A., Krutov, V.I. & Markova, I.A. (toim.). Forest regeneration in the Northern parts of Europe. Proceedings of the Finnish-Russian forest regeneration seminar in Vuokatti, Finland, Sept. 28th–Oct. 2nd, 1998. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 790: 147–157.
- Matson, A., Pennock, D. & Bedard-Haughn, A. 2009. Methane and nitrous oxide emissions from mature forest stands in the boreal forest, Saskatchewan, Canada. *Forest Ecology and Management* 258: 1073–1083.
- Merilä, P., Kilponen, T. & Derome, J. 2007. Forest condition monitoring in Finland. National report 2002–2005. Working papers of the Finnish Forest Research Institute 45: 166 s.
- Metinfo tilastopalvelu. 2011. Metsäntutkimuslaitos.
- Metla Hanke 3324. Hiilen varastot ja virrat kangas- ja turvemaidella. 2007. Metla. [Verkkodokumentti]. <http://www.metla.fi/hanke/3324/hiilen-maara.htm>. [Viitattu 8.2.2012].
- Metsätilastolliset vuosikirjat 2001–2010. 2010. Metla [www-sivusto]. <http://www.metla.fi/julkaisut/metsatilastollinen/vsk/tilastovsk-sisalto.htm>. [Viitattu 22.12.2011].
- Metsävarat metsäkeskuksittain – VMI10:n ja VMI9:n tuloksia. 2009. Metinfo tilastopalvelu, Metsäntutkimuslaitos. [www-sivusto]. <http://www.metla.fi/metinfo/vmi/vmi-taulukot.htm>. [Viitattu 18.11.2011].
- Minkkinen, K. & Laine, J. 2006. Vegetation heterogeneity and ditches create spatial variability in methane fluxes from peatlands drained for forestry. *Plant and Soil* 285: 289–304.
- & Ojanen, P. 2013. Pohjois-Pohjanmaan turvemaiden kasvihuonekaasutaseet. *Metlan työraportteja* 258: 75–111.
- , Laine, J. & Penttilä, T. 2007. Kasvihuonekaasupäästöt metsäojitetuilta soilta ja niihin vaikuttavat ympäristötekijät. *Julkaisussa: Turpeen ja turvemaiden käytön kasvihuonevaikutukset Suomessa. Tutkimusohjelman loppuraportti. Maa- ja metsätalousministeriö* 11/2007: 22–26.
- Mälkönen, E. 1982. Kangasmetsien lannoitus. *Operaatio metsälannoitus 20 vuotta. – Entä tästä eteenpäin*. s. 7–15.
- Nykänen, H., Alm, J., Silvola, J., Tolonen, K. & Martikainen, P. 1998. Methane fluxes on boreal peatlands of different fertility and the effect of long-term experimental lowering of the water table on flux rates. *Global Biogeochemical Cycles* 12: 53–69.
- Ojanen, P., Minkkinen, K., Alm, J. & Penttilä, T. 2010. Soil-atmosphere CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in boreal forestry-drained peatlands. *Forest Ecology and Management* 260: 411–421.
- , Minkkinen, K. & Penttilä, T. 2013. The current greenhouse gas impact of forestry-drained peatlands. *Forest*

- Ecology and Management 289: 201–208.
- Palosuo, T., Wihersaari, M. & Liski, J. 2001. Net greenhouse gas emissions due to energy use of forest residues – Impact of soil carbon balance. Woody Biomass as an Energy Source – Challenges in Europe. European Forest Institute. EFI Proceedings 39: 115–122.
- Pihlatie, M., Pumpanen, J., Rinne, J., Ilvesniemi, H., Simojoki, A., Hari, P. & Vesala, T. 2007. Gas concentration driven fluxes of nitrous oxide and carbon dioxide in boreal forests. *Tellus* 59B: 458–469.
- Piirainen, S., Niemelä, J., Finér, L., Mannerkoski, H. & Starr, M. 2009. Maan hiili- ja typpivarastojen muutokset maanmuokkauksen jälkeen. *Pro Terra* 41: 42.
- Pohjois-Pohjanmaan kasvihuonekaasutase. 2009. Bionova Engineering, Pohjois-Pohjanmaan liitto. 70 s. [Verkkajulkaisu]. Saatavissa: http://www.bionova.fi/files/ppliitto_kasvihuonekaasutase.pdf. [Viitattu 27.3.2012].
- Saari, A., Heiskanen, J. & Martikainen, P.J. 1998. Effect of the organic horizon on methane oxidation and uptake in soil of a boreal Scots pine forest. *FEMS Microbiology Ecology* 26: 245–255.
- , Smolander, A. & Martikainen, P.J. 2004. Methane consumption in a frequently nitrogen-fertilized and limed spruce forest soil after clear-cutting. *Soil Use and Management* 20: 65–73.
- Saari, P., Saarnio, S., Kukkonen, J.V.K., Akkanen, J., Heironen, J., Saari, V. & Alm, J. 2009. DOC and N₂O dynamics in upland and peatland forest soils after clear-cutting and soil preparation. *Biogeochemistry* 94: 217–231.
- Saarsalmi, A., Tamminen, P., Kukkola, M. & Hautajärvi, R. 2010. Whole-tree harvesting at clear-felling: impact on soil chemistry, needle nutrient concentrations and growth of Scots pine. *Scandinavian Journal of Forest Research* 25(2): 148–156.
- Sallantausta, T. 1994. Response of leaching from mire ecosystems to changing climate. Julkaisussa: Kanninen, M. & Heikinheimo, P. (toim.). The Finnish Research Programme on Climate Change. Second Progress Report. Publications of the Academy of Finland 1/94: 291–296.
- Schulze, E.D., Luyssaert, S., Ciais, A., Freibauer, A., Janssens, I.A., ym. 2009. Importance of methane and nitrous oxide for Europe's terrestrial greenhouse-gas balance. *Nature Geoscience* 2: 842–850.
- Suomen kasvihuonekaasupäästöt vuosina 1990–2009. 2011. Tilastokeskus. 55 s. [Verkkajulkaisu]. Saatavissa: http://www.stat.fi/tup/khkinv/suominir_2011.pdf. [Viitattu 27.3.2012].
- Wall, A. & Hytönen, J. 2011. The long-term effects of logging residue removal on forest floor nutrient capital, foliar chemistry and growth of a Norway spruce stand. *Biomass and Bioenergy* 35: 3328–3334.
- VMI10. Liitetaulukko 5. Kasvupaikat ojittamattomilla ja ojitetuilla metsä-, kitu- ja joutomaan soilla. 2009. Metsäntutkimuslaitos.
- Yasso07. 2011. Yasso07 soil carbon model. Suomen ympäristökeskus. [www-sivusto]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=21613&lan=en>. [Viitattu 28.10.2011].

52 viitettä