

Ilmastonmuutoksen hillinnän dynamiikka – onko bioenergia ilmastoneutraalia?

Esimerkkinä metsäenergia

Systeemiteoria ennen ja nyt – systeemit muuttuvassa
maailmassa, Hotel Gullvivan 13.-14.5.2013

Kim Pingoud

Sisällys

- Hiilen globaali kierto, nielujen merkitys
- Biomassan ja fossiilisten ero, suljettu kierto
- Substituutio, bioenergia suhteessa fossiiliseen
- Fossiilisen hiilen korvauskerroin DF
- Metsän 'hiilivelka'
- Lämmitysvaikutus, hiilidioksidin dynamiikka ilmakehässä
- Esimerkkejä
 - Hakkuutähteet
 - Suomen bioenergiaskenaarioita
- Johtopäätöksiä

Taustaa: globaali hiilen kierto

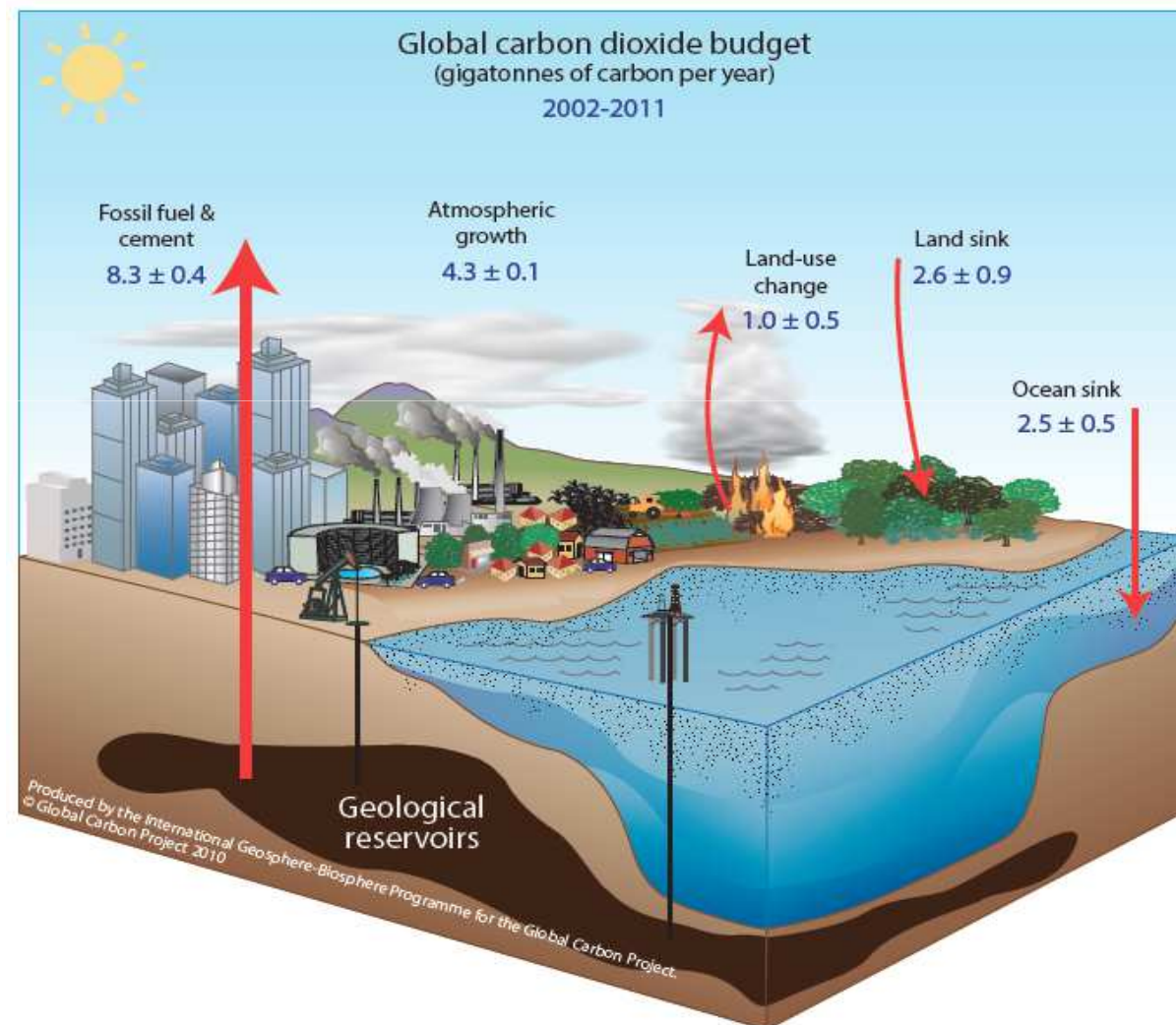
Anthropogenic Perturbation of the Global Carbon Cycle

16.5.2013

4



Perturbation of the global carbon cycle caused by anthropogenic activities, averaged globally for the decade 2002–2011 (PgC/yr)



Source: [Le Quéré et al. 2012](#); [Global Carbon Project 2012](#)

Fate of Anthropogenic CO₂ Emissions (2002-2011 average)

16.5.2013

5



8.3 ± 0.4 PgC/yr 90%



1.0 ± 0.5 PgC/yr 10%

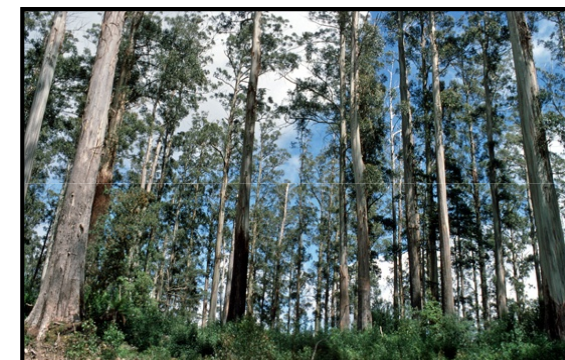


+

4.3 ± 0.1 PgC/yr
46%



2.6 ± 0.8 PgC/yr
28%



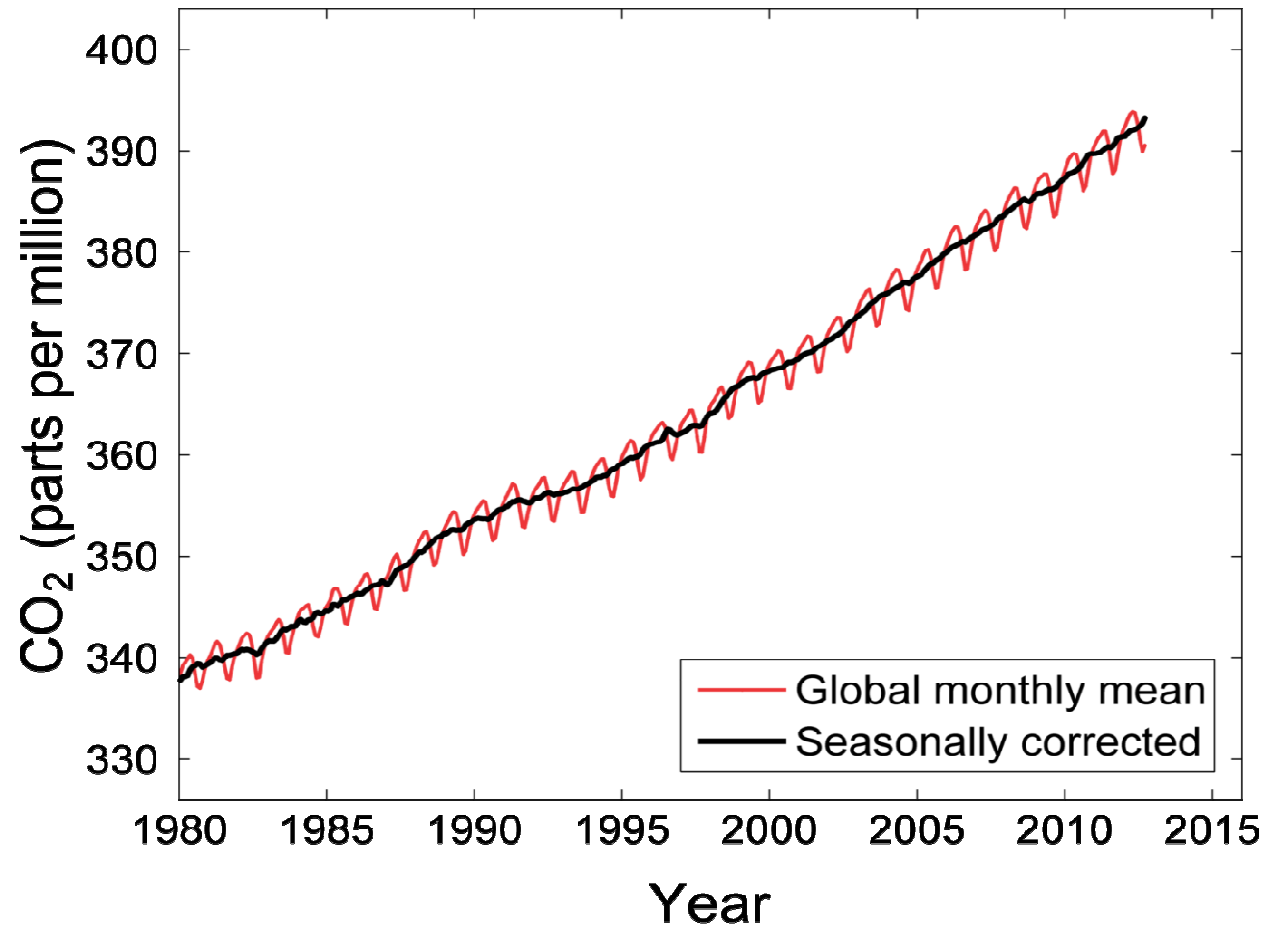
Calculated as the residual
of all other flux components

2.5 ± 0.5 PgC/yr
26%



The pre-industrial (1750) atmospheric concentration was 278ppm

This has increased to 390ppm in 2011, a 40% increase



Viitteet:

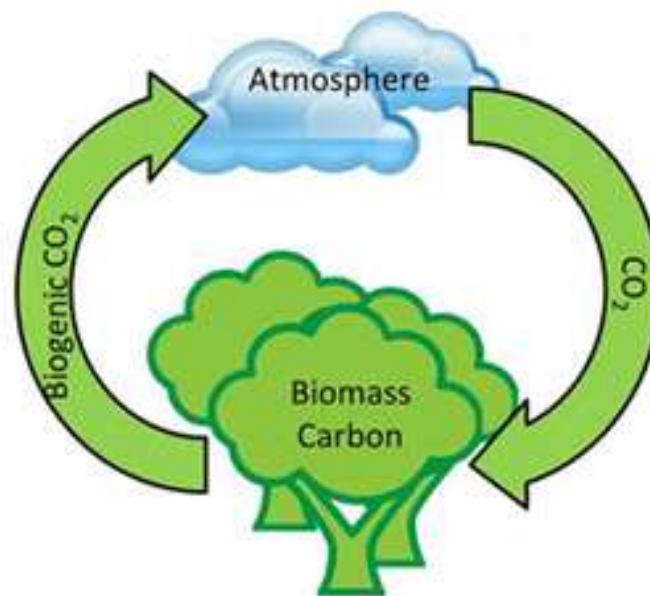
Global Carbon Project (2012) More information, data sources and data files at www.globalcarbonproject.org

C. Le Quéré, R. Andres, T. Boden, T. Conway, R. Houghton, J. House, G. Marland, G. Peters, G. van der Werf, A. Ahlström, R. Andrew, L. Bopp, J. Canadell, P. Ciais, S. Doney, C. Enright, P. Friedlingstein, C. Huntingford, A. Jain, C. Jourdain, E. Kato, R. Keeling, K. Klein Goldewijk, S. Levis, P. Levy, M. Lomas, B. Poulter, M. Raupach, J. Schwinger, S. Sitch, B. Stocker, N. Viovy, S. Zaehle and N. Zeng (2012), "The Global Carbon Budget 1959–2011", Earth System Science Data Discussions (in review), <http://www.earth-syst-sci-data-discuss.net/5/1107/2012/>, DOI:10.5194/essdd-5-1107-2012

"Seasonally corrected" is a moving average of seven adjacent seasonal cycles

Source: [NOAA/ESRL](http://noaa.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/); [Global Carbon Project 2012](http://www.globalcarbonproject.org)

Bioenergian hiilineutraalius



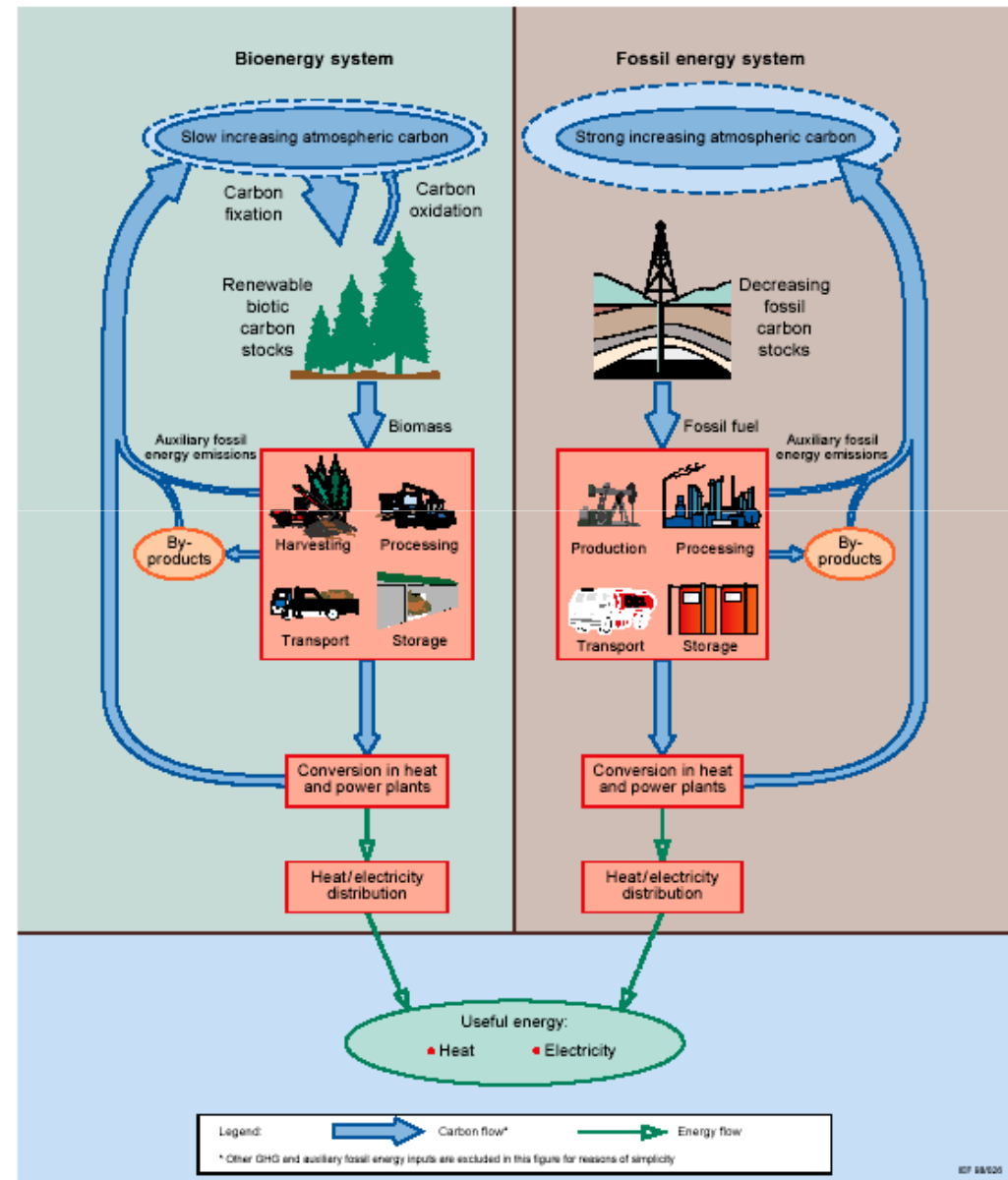
Biogenic carbon is part of a relatively rapid natural cycle that impacts atmospheric CO₂ only if the cycle is out of balance.



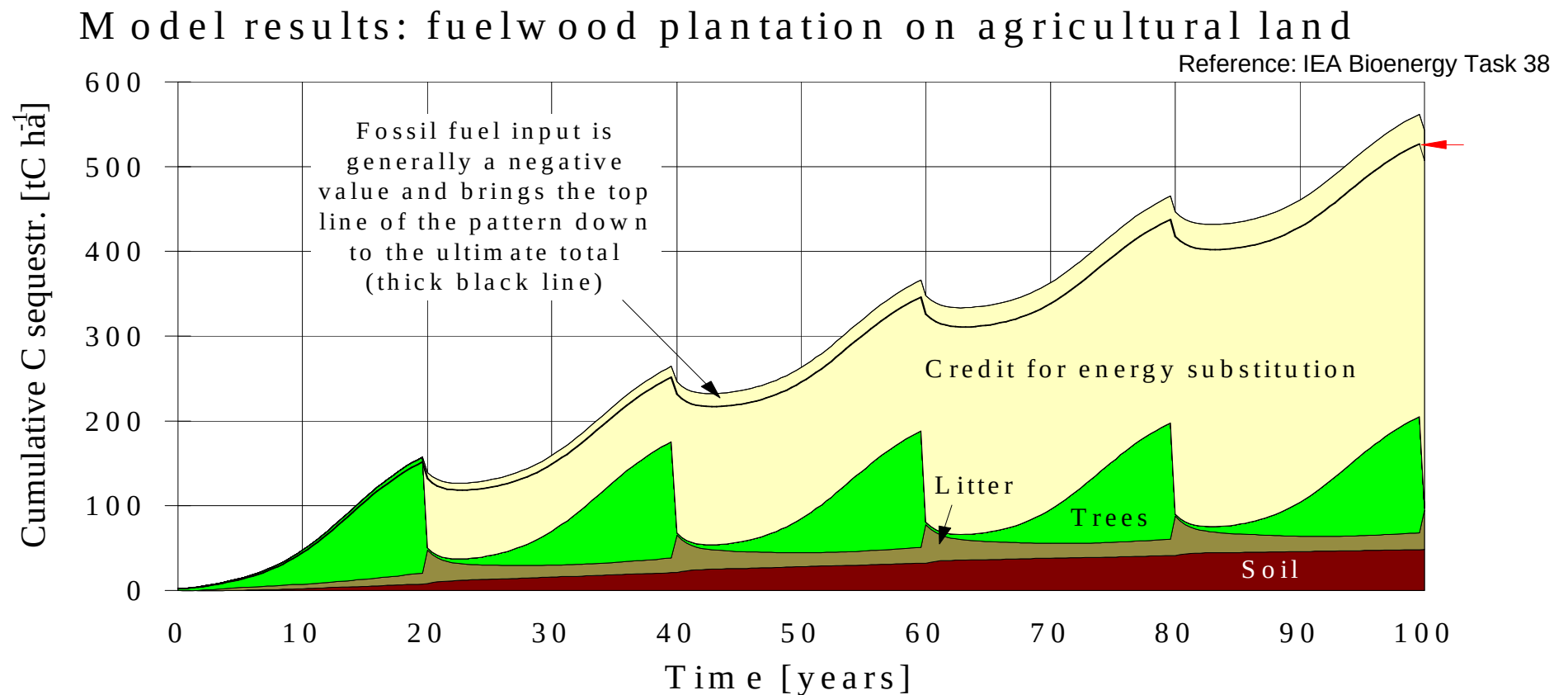
Fossil fuel combustion transfers geologic carbon into the atmosphere. It is a one-way process.

Bioenergia- vs. fossiilinen energiajärjestelmä

- Kestävä bioenergiajärjestelmä muodostaa suljetun hiilen kierron, jossa ilmakehään päästetty hiili sidotaan uudelleen biomassaan.
- Bioenergiaketju aiheuttaa myös jonkin verran fossiilisia hiilipäästöjä.
- Bioenergiajärjestelmän päästöhyödyt suhteessa funktionaalisesti ekvivalenttiin fossiiliseen järjestelmään:
 - Biomassan dynamiikka
 - Substituution tehokkuus (displacement factor DF)



Geneerinen esimerkki: lyhytkiertoisen energiapuuviljelmän hiilitase suhteessa fossiiliseen energiajärjestelmään



- Bioenergian käytöllä vältetään hiilen päästöjä geologisista varastoista = **”Credit for energy substitution”**
- Kumulatiiviset päästönvähennykset suhteessa fossiilisiin polttoaineisiin

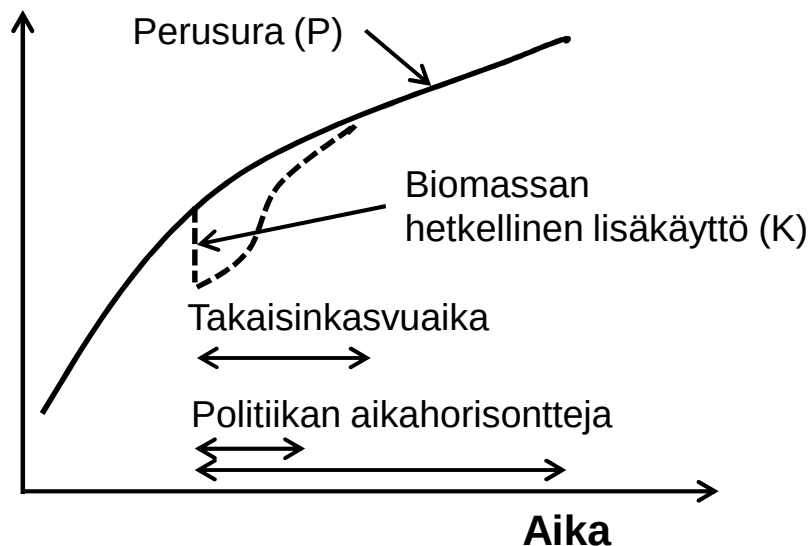
Energiasubstituutio, fossiilisiin päästöjen korvauskerroin

- Voidaan kuvata korvauskertoimen (displacement factor DF) avulla: missä suhteessa fossiilisen polttoaineen hiilipäästöjä voidaan korvata biogeenisellä hiilellä.
- Bioenergian suuremman päästökertoimen (kohti tuotettua energiayksikköä) takia $DF < 1$.
- Markkinavaikutukset pienentävät vielä käytännössä toteutuvaa korvauskerrointa.

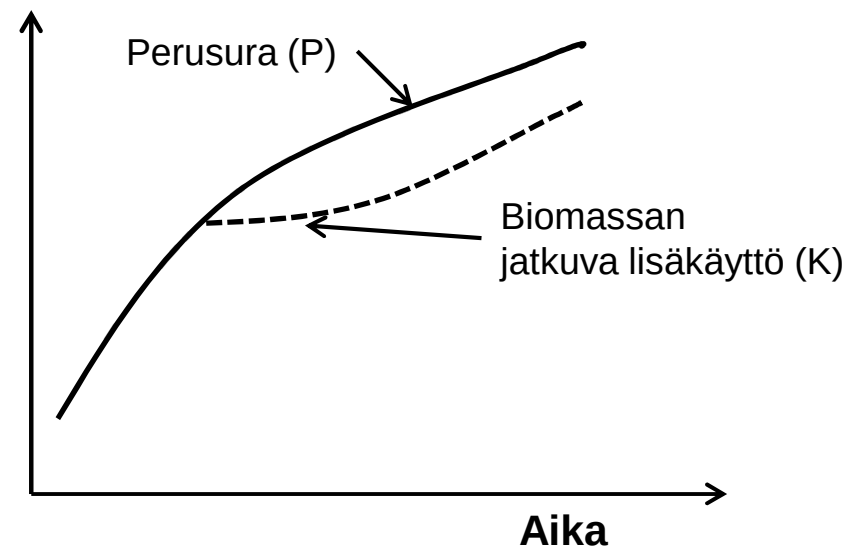
Ongelma ilmastopolitiikalle?: Metsien 'hiilivelka'

- Hidaskiertoisien metsäbiomassan käytön lisääminen aiheuttaa aina 'hiilivelan' suhteessa perusuraan ja lisäpitoisuuden ilmakehässä.
- Bioenergian substituutiovaikutus huomioidenkin päästöt ilmakehään voivat kasvaa suhteessa fossiiliseen vaihtoehtoon.
- Tämä tulee ottaa huomioon, kun tarkastellaan ilmastomuutoksen hillintäkeinoja. Huomioitava biomassakenaarioiden epävarmuudet!

Metsien hiilivarasto



Metsien hiilivarasto



Lämmitysvaikutuksen aiheuttaja suhteessa perusuraan: hiilivelka = $P(t) - K(t)$

Hiilivelan lämmitysvaikutuksen arviointi

IPCC:n käyttämä pulssivastemalli hiilidioksidin poistumiselle ilmakehästä:

The decay of the CO₂ pulse in the atmosphere with time t is given* by

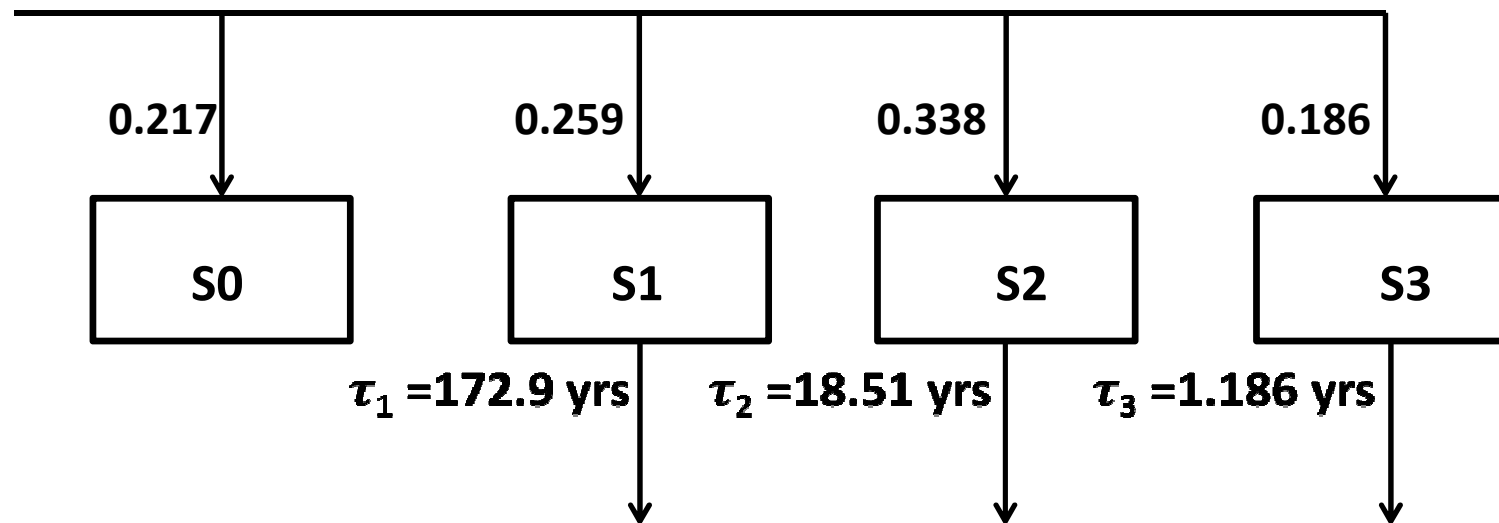
$$a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i \cdot e^{-t/\tau_i}$$

where $a_0 = 0.217$, $a_1 = 0.259$, $a_2 = 0.338$, $a_3 = 0.186$, $\tau_1 = 172.9$ years, $\tau_2 = 18.51$ years, and $\tau_3 = 1.186$ years.

*The CO₂ response function is estimated based on the revised version of the Bern Carbon cycle model (Bern2.5CC; Joos et al. 2001) using a background CO₂ concentration value of 378 ppm. This approximation is used in IPCC Fourth Assessment Report (AR4), Climate Change 2007: The Physical Science Basis, p. 213.

IPCC:n pulssivastemalli voidaan esittää laatikkomallina, jossa kokonaisvarasto $S=S_0+S_1+S_2+S_3$ on päästön aiheuttama lisäkonsentraatio ilmakehässä:

C emission



First-order decay, time constants τ_1 , τ_2 and τ_3

Additional concentration in the atmosphere $S = S_0 + S_1 + S_2 + S_3$

Säteilypakotteen RF oletetaan riippuvan logaritmisesti CO₂-konsentraatiosta ilmakehässä

CO₂:n taustapitoisuudeksi vuonna 1850 on oletettu 278 ppm_{CO2}. Kasvihuonekaasujen pitoisuuden on oletettu kehittyvän siten, että 2°C pitoisuuksien stabilointitavoite 450 ppm_{eq} saavutetaan vuonna 2100 ja että CO₂:n pitoisuus olisi tällöin 415 ppm_{CO2}.

$$RF(CO_2) = 5.35 \text{ W m}^{-2} \left(\ln \frac{CO_2(t)}{CO_2(t_0)} \right)$$

Säteilypakotelisän ΔRF integraali, kum.säteilypakote, kuvaa päästöpulssin lämmitysvaikutusta

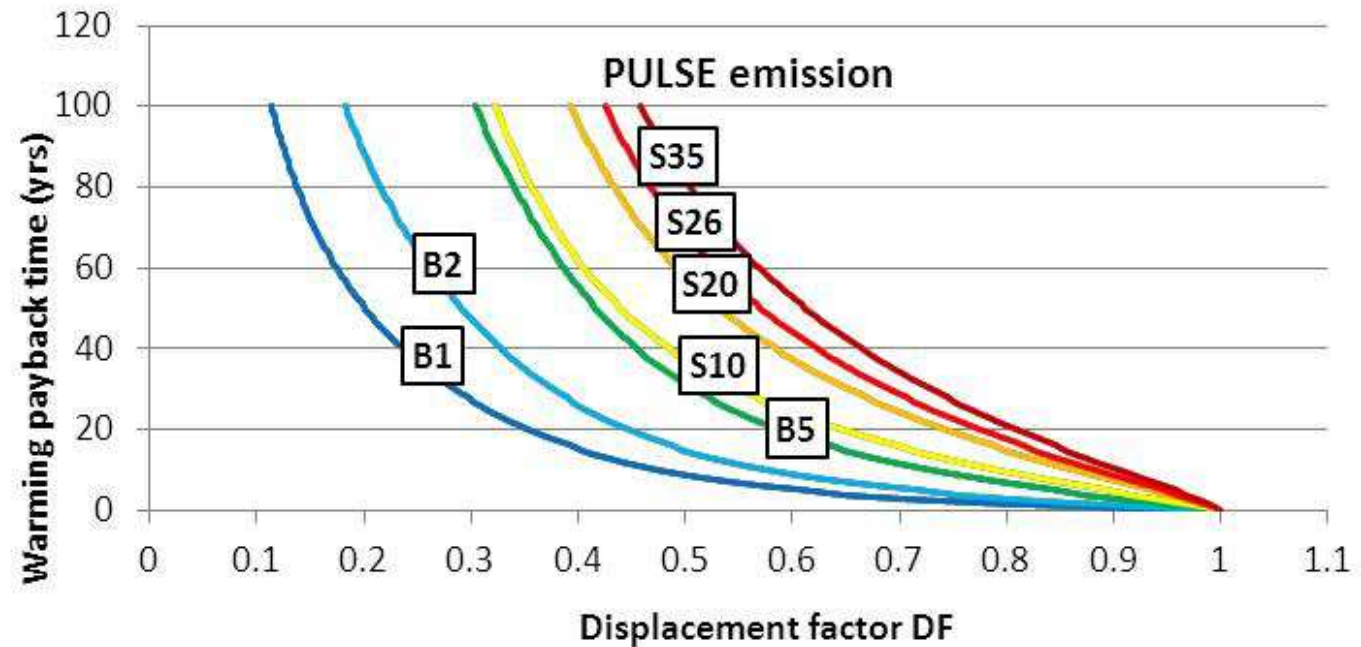
Esimerkki 1: Hakkuutähteiden energiakäyttö

- Dynaaminen hiilivelka: Hakkutähteiden käyttö bioenergiaksi aiheuttaa välittömän hiilipäästön ja hiilivelan suhteessa siihen, että tähteet jätetään lahoamaan.
- Hiilivelasta aiheutuu lämmitysvaikutus, toisaalta fossiilisten polttoaineiden syrjäyttämisestä viilennysvaikutus.
- Pingoud et al. (2012)* -artikkelissa käytetty Repo et al.(2010)* esittämiä lukuja hakkuutähteiden hajoamiselle.
- Lahoamisnopeus riippuu hakkuutähteiden merkitsevästä halkaisijasta: tarkastellaan oksia (1 cm, 2 cm, 5 cm) and kantoja (10 cm, 20 cm, 26 cm and 35 cm).

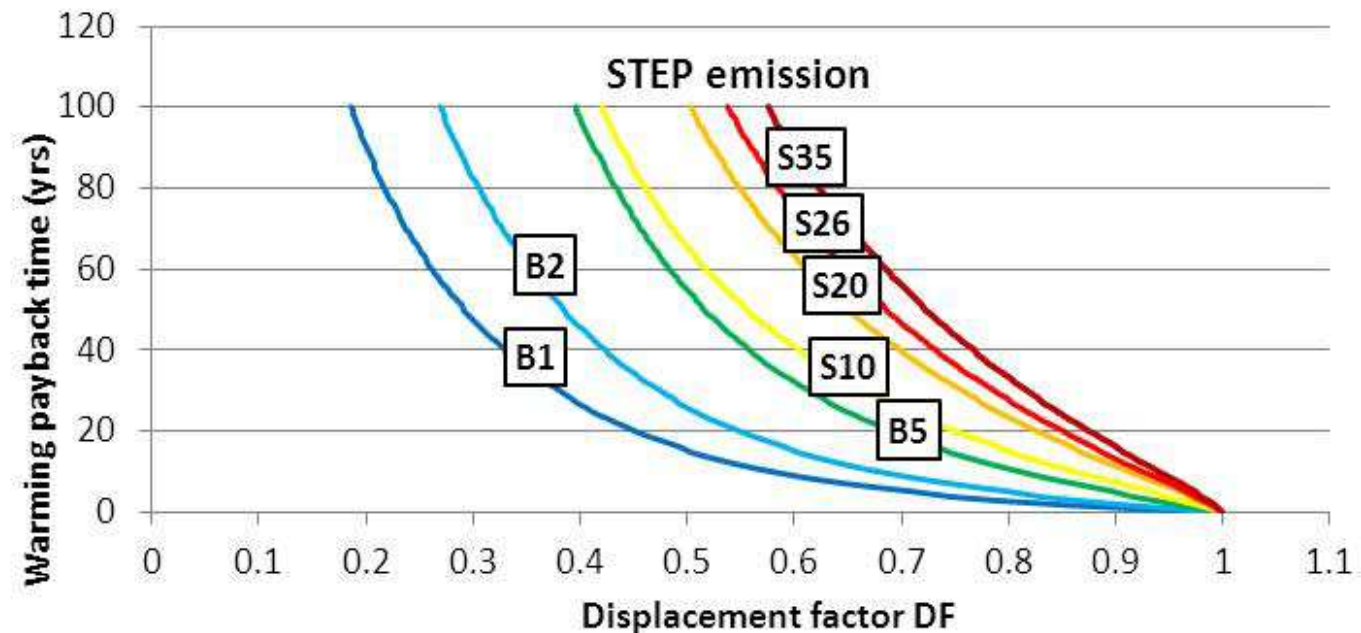
*Pingoud, K.; Ekholm, T.; Savolainen, I. 2012. Global warming potential factors and warming payback time as climate indicators of forest biomass use. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 17: 369–386. Springer. doi-link: 10.1007/s11027-011-9331-9

**Repo A, Tuomi M, Liski J (2010) Indirect carbon dioxide emissions from producing bioenergy from forest harvest residues. GCB Bioenergy. DOI: 10.1111/j.1757-1707.2010.01065.x

- Lämmitysvaikutuksen takaisinmaksuaika korvauskertoimen DF funktiona oksa- ja kantobiomassan hetkelliselle käytölle



- Lämmitysvaikutuksen takaisinmaksuaika korvauskertoimen DF funktiona oksa- ja kantobiomassan jatkuvalle käytölle



GWP_{bio}-kertoimet:

Yleistys metsän dynaamisen hiilivelan tapaukseen (1)

Fossiilisen hiilen pulssi ilmakehään (irreversiibeli, ei virtaa takaisin tektonisiin varastoihin); kum.lämmitysvaikutus:

$$AGWP_{fos}(T) = \int_0^T RF(S_{fos}(t)) dt \quad (1)$$

missä RF on hetkellinen säteilypakote ja S on pulssin aiheuttama pitoisuuden lisäys ilmakehässä; pitoisuuden dynamiikka voidaan laskea esim. IPCC:n impulssivastemallilla.

Samansuuruisen biogeenisen hiilen pulssi ilmakehään, esim. hakkuut (reversiibeli, palautuu takaisin samalle pinta-alalle, mikäli metsänhoito kestävä); kum.lämmitysvaikutus:

$$AGWP_{bio}(T) = \int_0^T RF(S_{bio}(t)) dt \quad (2)$$

Huom: myös muut geofysikaaliset tekijät kuin kh-kaasut (esim.albedo) voitaisiin integroida AGWP:hen.

GWP_{bio}-kertoimet:

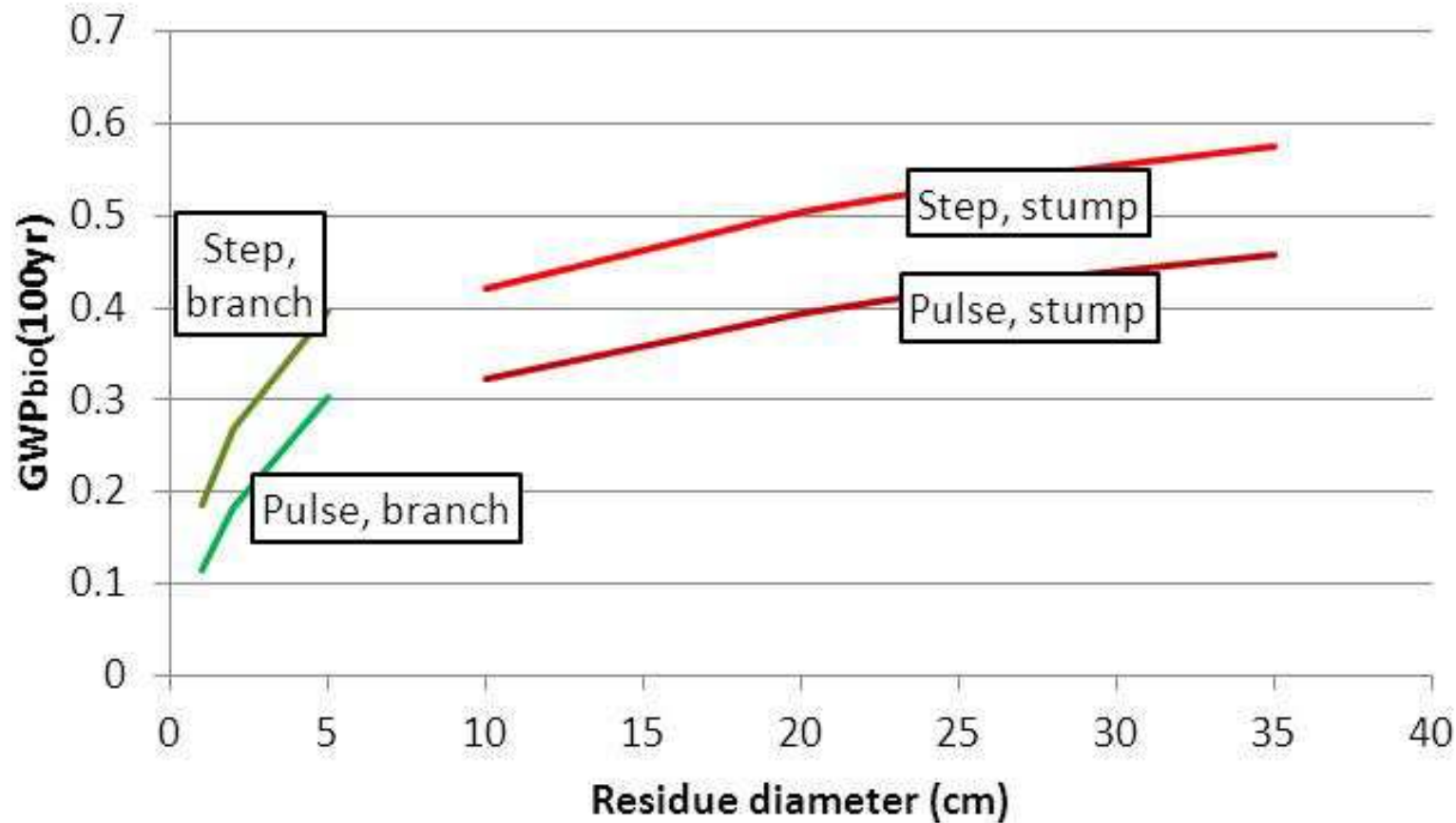
Yleistys metsän dynaamisen hiilivelan tapaukseen (2)

Biogeenisen C pulssin (sisältäen hiilivelan takaisinmaksun) kum.lämmitysvaikutus suhteessa samansuuruiseen fossiiliseen C pulssiin (ei paluuvirtaa geologisiin varastoihin) (Cherubini et al. 2011):

$$GWP_{bio}(T) = \frac{AGWP_{bio}(T)}{AGWP_{fos}(T)} \quad (4)$$

GWP_{bio} laaduton indeksi, integrointiaikajänteen **T** funktio.

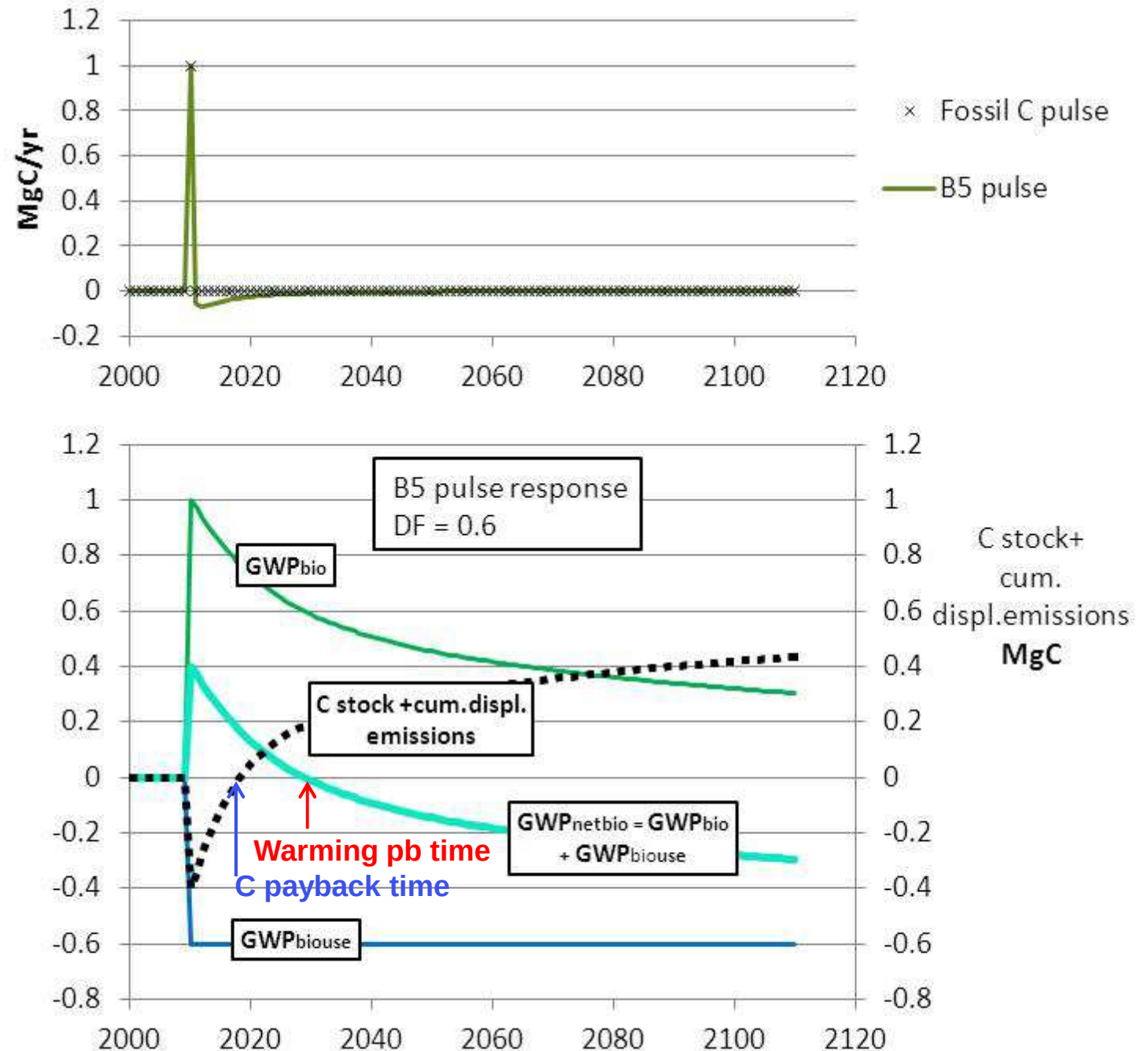
Sen avulla voidaan biogeenisen pulssin hetkellä 0 aiheuttama tilapäinen hiilivelka muuttaa ekvivalentiksi fossiiliseksi C pulssiksi hetkellä 0, jonka ilmastovaikutus aikavälillä **T** on sama.



Hiilivelan GWP_{bio} (100 yrs) -kerroin hakkuutähteille niiden tehollisen halkaisijan funktiona.

Esimerkki:

- Päästötase 5 cm oksien (1 MgC) korjuusta alkuhetkellä 2010 ("pulssi-käyttö") sekä 1 MgC fossiilinen pulssi alkuhetkellä
- GWP-tekijät ajan funktiona sekä biomassan kumulatiivinen C tase ja korvatut päästöt
- Substituutiokerroin $DF = 0.6$



Esimerkki 2: Suomen bioenergiaskenaariot (Risto Sievänen ym.)

Viite: MELA-laskelmat:

Risto Sievänen, Aleksi Lehtonen, Paavo Ojanen ja Olli Salminen: Luku 4.3 Metsien hiilitaseet, ss. 197- 204 raportissa:

Antti Asikainen, Hannu Ilvesniemi, Risto Sievänen, Elina Vapaavuori ja Timo Muhonen (toim.) 2012: Bioenergia, ilmastonmuutos ja Suomen metsät. Metlan työraportteja 240, 211s.

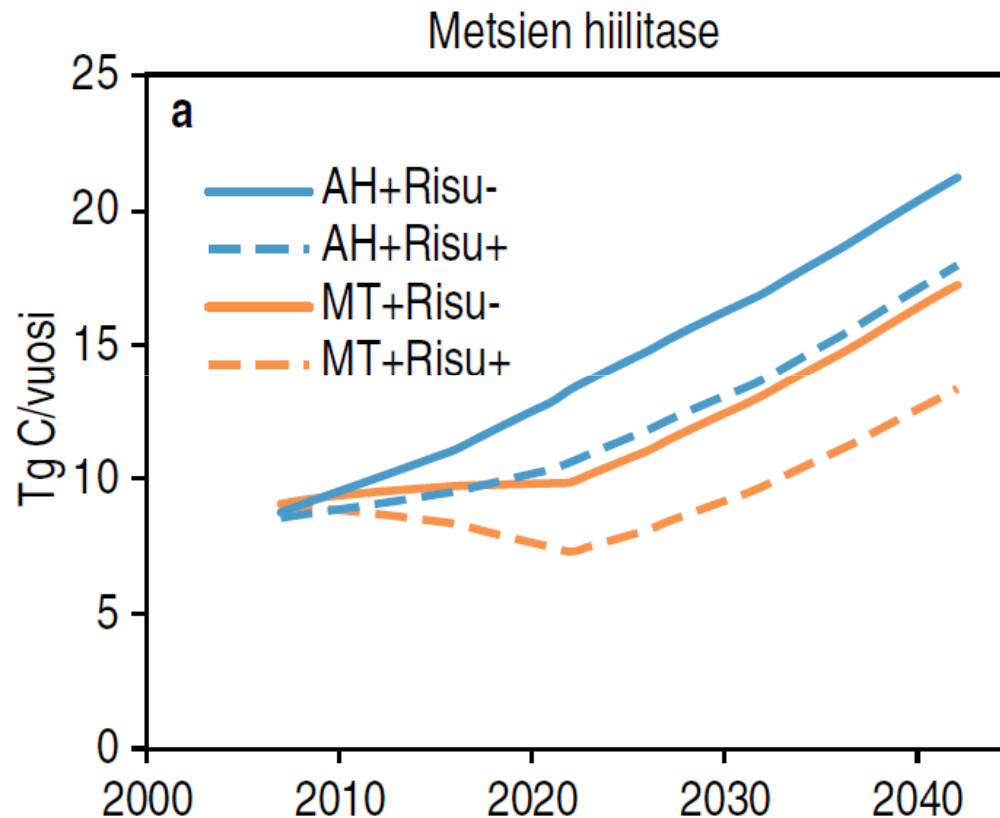
<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp240.htm>

Metlan skenaarioiden taustaoletukset: Risupaketti+ ja Risupaketti-

	Vuotuinen käyttö milj. m ³ (2020-)	
Käyttömuoto	Risupaketti+	Risupaketti-
Metsähake ja käyttö polttolaitoksissa	20,0	12,5
Pientalojen polttopuu	5,5	5,5
Yhteensä	25,5	18,0
Skenaarioiden erotus 7,5 milj.m³/v $\approx$ 1,5 TgC/v (2020-)		

Tarkastellaan 1,5 TgC/v perturbaation (=biomassan lisäkorjuu energiaksi) vaikutusta Suomen metsien hiilitaseeseen.

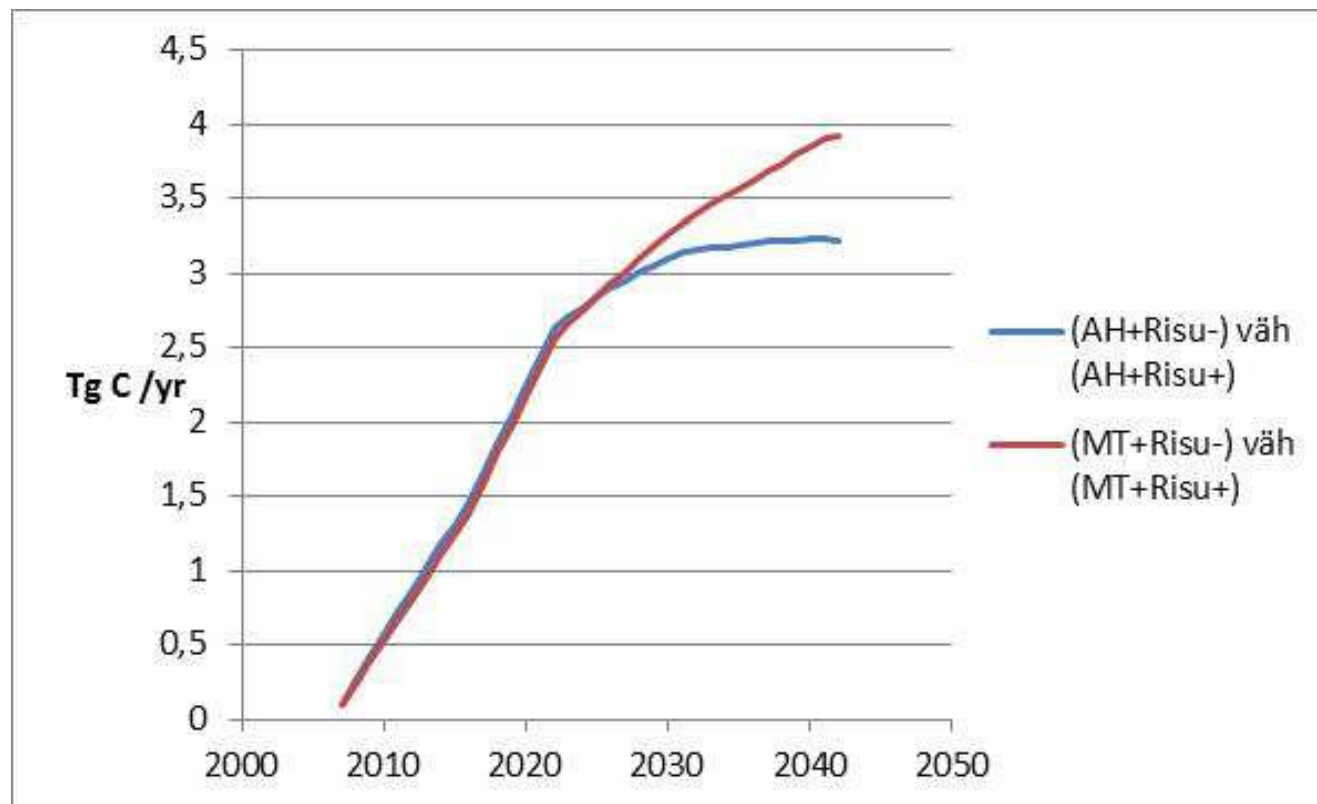
Hiilivelka = (Risu-) – (Risu+)



HUOM: Suomen metsien biomassa kasvaa **riippumatta skenaariorista** (eli metsät säilyvät hiilen nieluna).

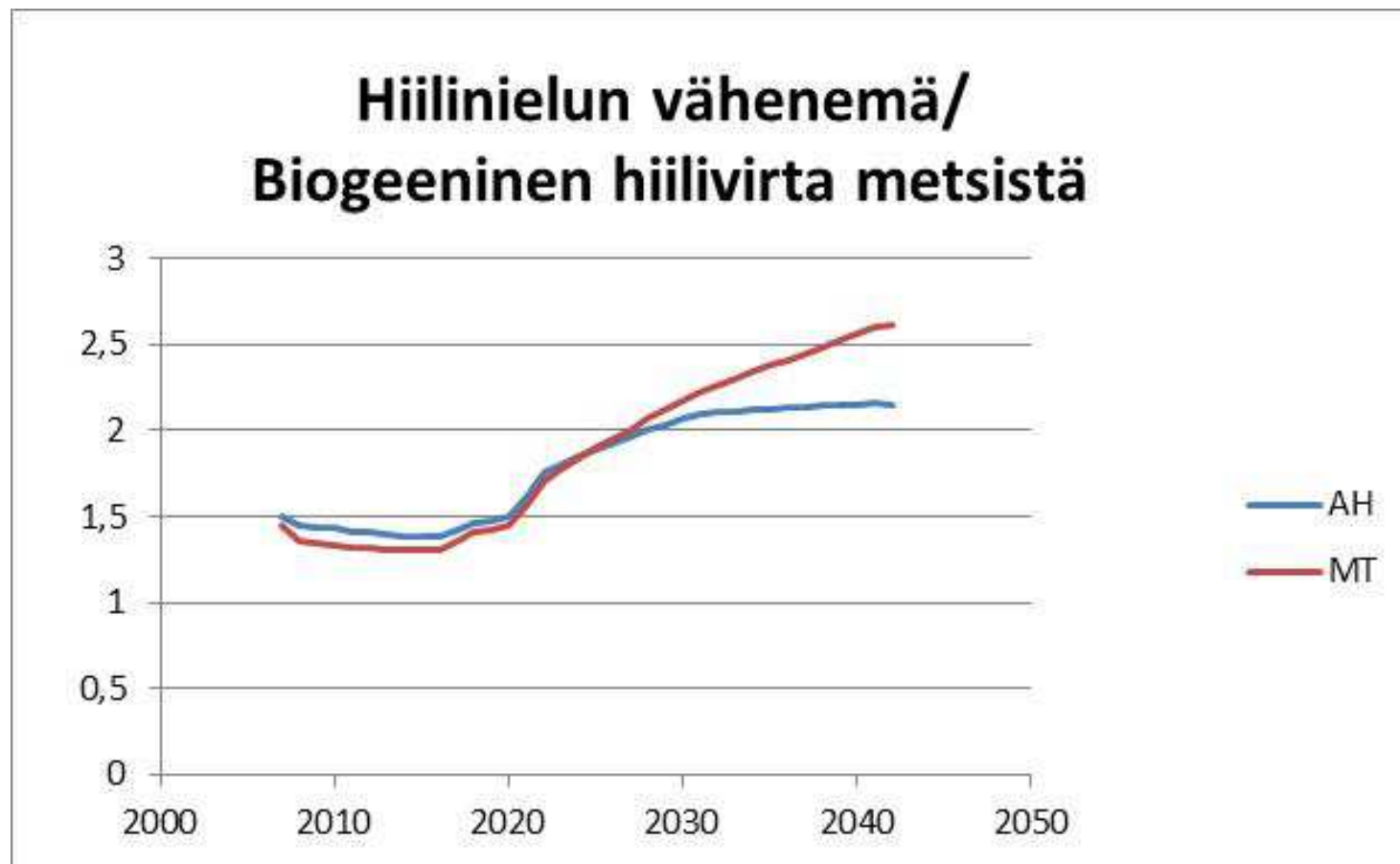
Kuva 4.3.3 a). Metsien (= kaikki varastot yhteensä) hiilivarastojen muutokset skenaarioissa, joissa puun teollisuuskäyttö oli Alhaisen (AH) tai Maltillisen (MT) skenaarion mukainen ja energiapuun käyttö oli joko runsasta (Risu+, katkoviivat) tai vähäisempää (Risu-, yhtenäiset viivat). Positiiviset arvot tarkoittavat nielua. (emt. s. 201)

TOISAALTA: Hiilinielu pienenee, kun bioenergian käyttöä lisätään (7,5 Mm³ /v eli 1,5 TgC/v vuoteen 2020 mennessä):

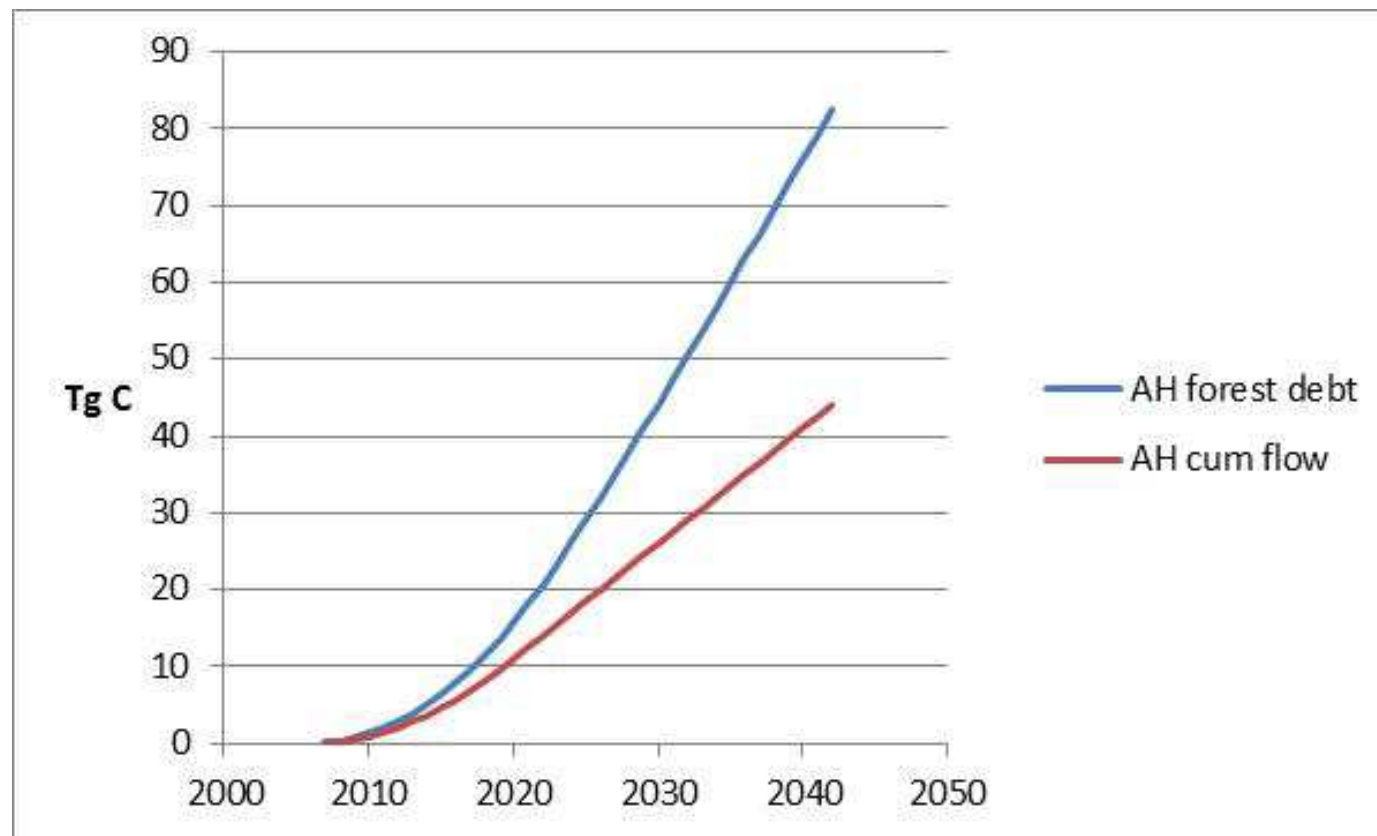


Hiilinielun pieneneminen perturbaation seurauksena.

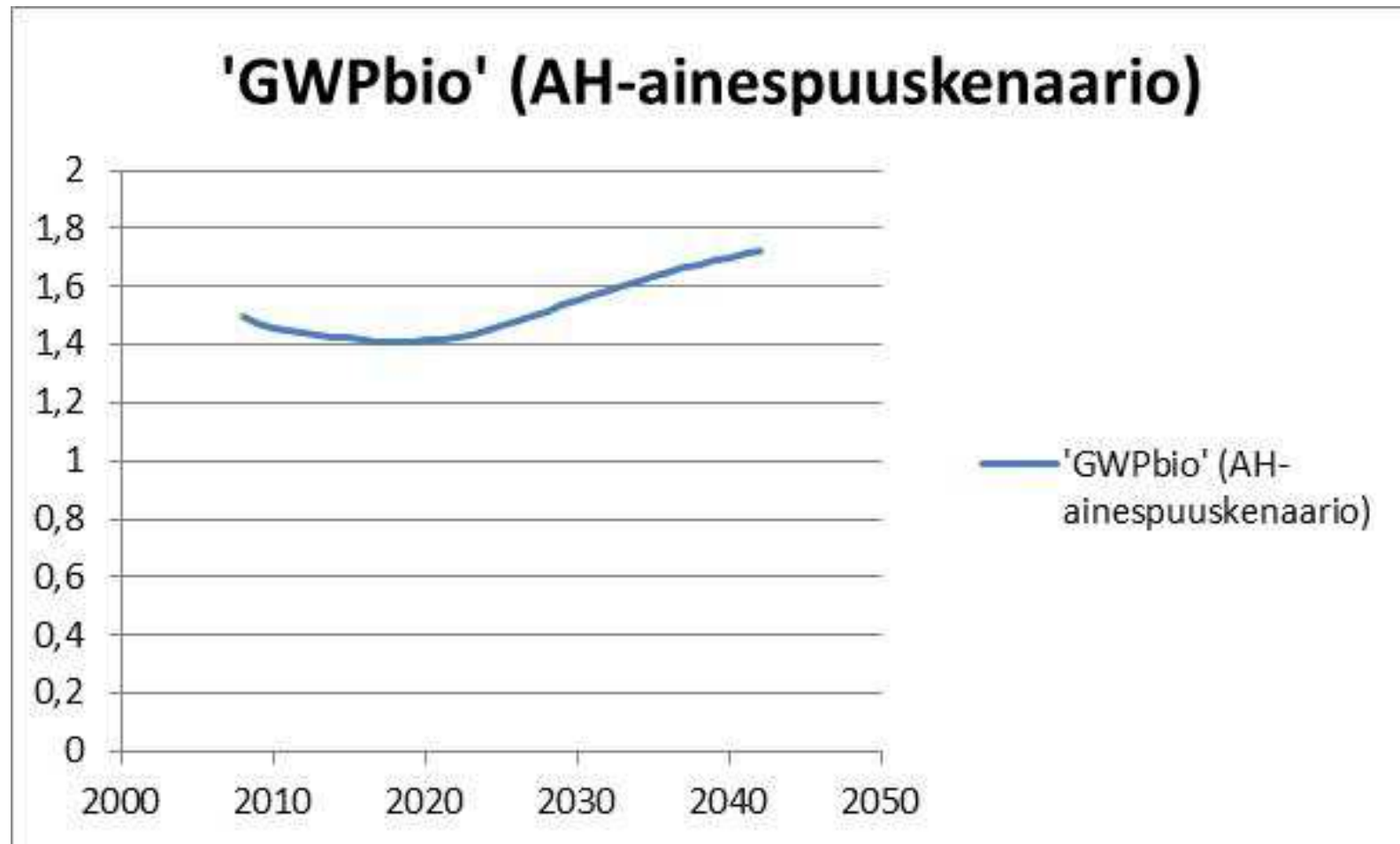
Metsien hiilinielu pienenee paljon enemmän kuin mitä energiapuun korjuussa saadaan talteen →
Vaikka fossiilisten polttoaineiden korvauskerroin DF olisi =1 ei bioenergian käytöllä saavuteta päästönvähennyksiä ko. aikavälillä!



**Kumulatiivinen hiilivelka Risu+:sta verrattuna Risu:-een
(AH-skenaario)
sekä vastaava kumulatiivinen energiapuun lisäkertymä
biogeenisenä hiilenä**



**GWP_{bio}: Metsien hiilivielan kum.säteilypakote
jaettuna
fossiilisten päästöjen (1,5 TgC/v vuodesta 2020-)
kum. säteilypakotteella**



Johtopäätöksiä

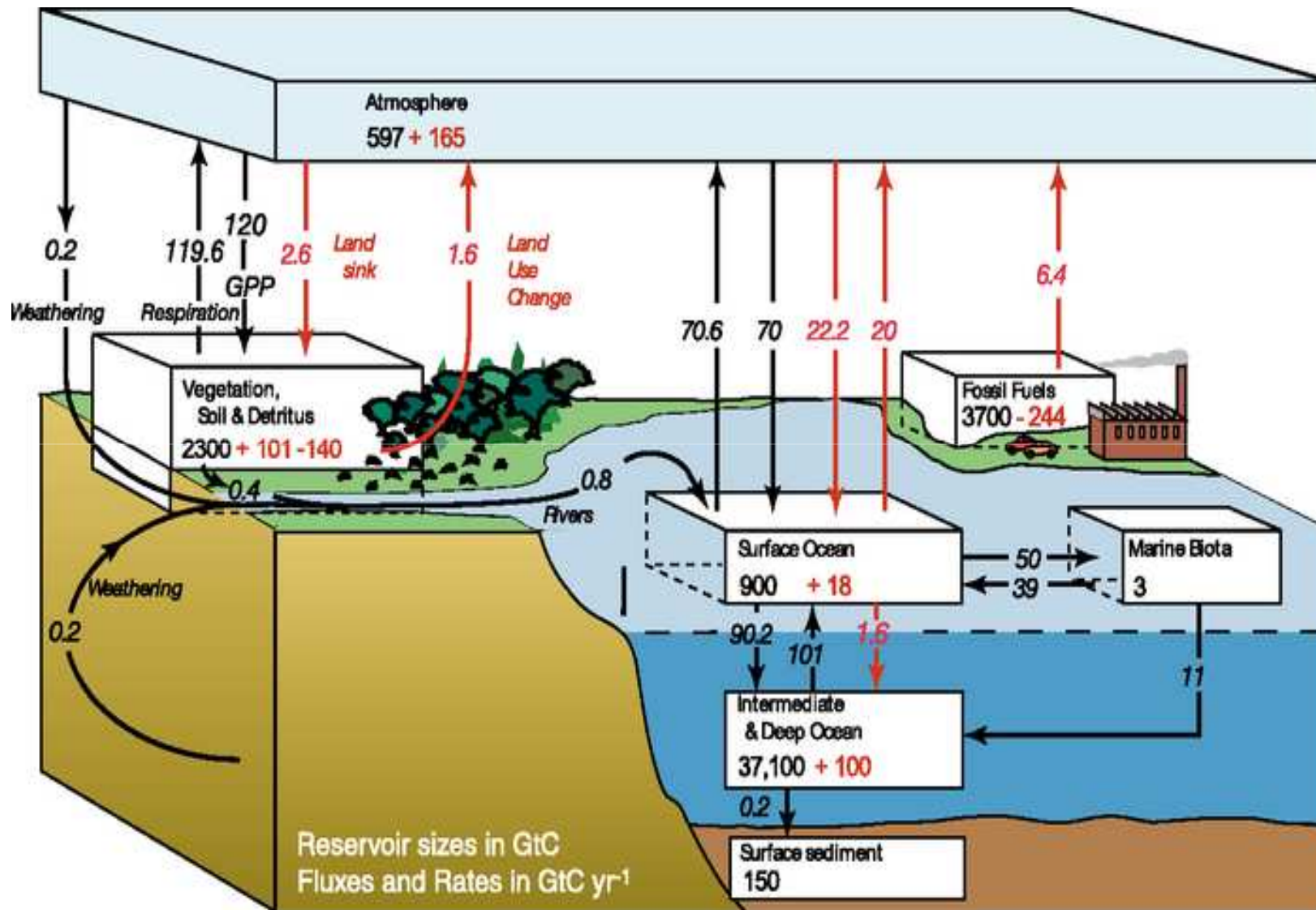
- Hidaskiertoisen metsäbiomassan energiakäyttö ei vähennä ilmakehän CO₂-pitoisuutta lyhyellä aikavälillä.
- Bioenergialla saavutettu fossiilisten CO₂-päästöjen korvaamistehokkuus vaikuttaa olennaisesti ilmastohyötyihin.
- Nielujen hyväksikäyttö ja metsien jättäminen käyttämättä jättäminen voi olla järkevää ilmastopolitiikkaa lyhyellä aikavälillä.
- Toisaalta ei liene järkevää museoida talousmetsiä ja ajaa niitä tilaan, jossa menetetään tärkeä uusiutuvan energian ja materiaalien lähde.
- Pitkällä aikavälillä substituution, fossiilisten päästöjen korvaamisen, ilmastohyödyt ovat aina suurempia kuin nielujen.

Ylimääräisiä kalvoja

TAUSTAA: Globaali hiilenkierto Gt C (päästöt Gt C/vuosi, 1990-luku)

16.5.2013

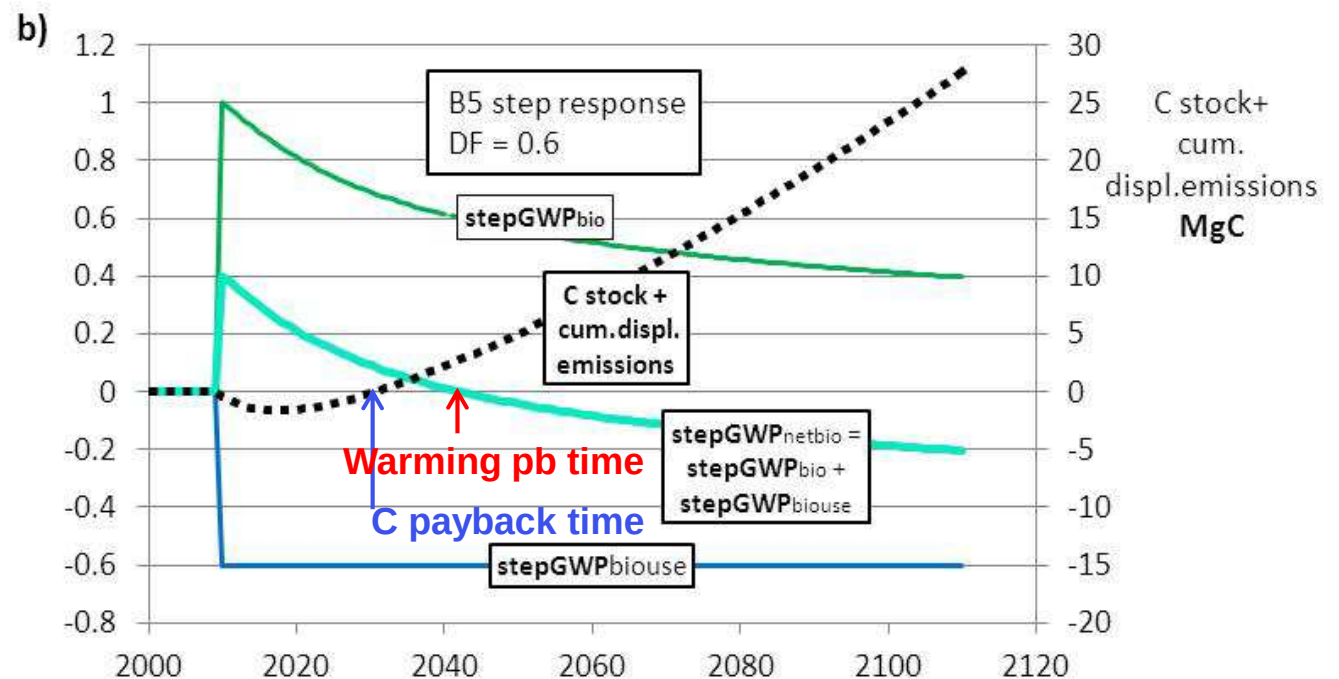
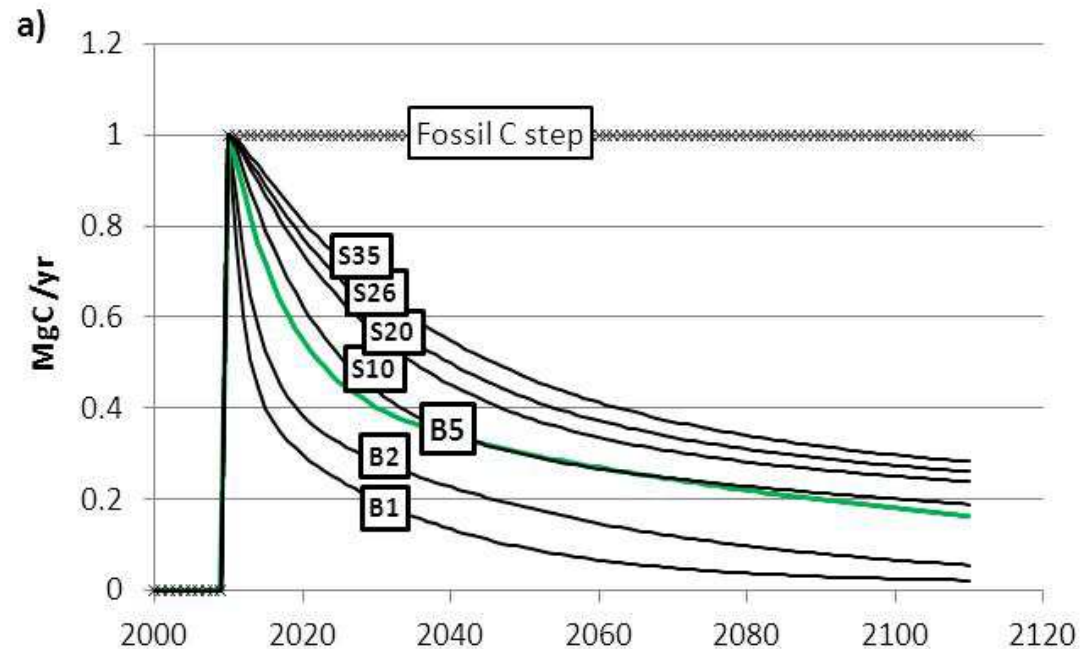
33



The global carbon cycle for the 1990s (IPCC 2007, p. 515, Figure 7.3). Current primary demand for **bioenergy, 46 EJ**, corresponds to a flux of approximately **1.4 GtC yr⁻¹** to the atmosphere, which is around 1% of global GPP. (Assumption: emission factor of biomass = 110 gCO₂/MJ)

Example 2:

- Emission from **step use** (1 MgC/yr) of **branches and stumps** vs fossil C step at 2010
- stepGWP factors (generalisation of the GWP concept) and cumulative C balance of biomass debt and displaced emissions of **bioenergy from 5 cm brances**
- Displacement factor $DF = 0.6$



GWP_{bio}-kertoimet:

Yleistys kuvaamaan puunkäyttöketjun vaikutuksia (1)

Samanlainen integraali kuin edellä on esitettävissä puun käyttöketjun lämmitys-/viilentäville vaikutuksille suhteessa fossiilisiin funktionaalisesti samanlaisiin vaihtoehtoihin (substituutio) (Pingoud et al. 2012):

$$AGWP_{biouse}(T) = \int_0^T \left(RF \left(S_{displ}(t) \right) + RF \left(S_{seq}(t) \right) \right) dt \quad (3)$$

missä S_{displ} ja S_{seq} ovat syrjäytettyjen fossiilisten C-päästöjen ja puutuotteisiin sitoutuneen biogeenisen C:n aiheuttamat muutokset ilmakehän pitoisuudessa.

GWP_{bio}-kertoimet: **Yleistys kuvaamaan puunkäyttöketjun vaikutuksia (2)**

GWP indeksi voidaan periaatteessa yleistää kuvaamaan koko puun käyttöketjua (seurausvaikutuksellisessa LCA:ssa):

$$GWP_{netbio}(T) = \frac{AGWP_{bio}(T) + AGWP_{biouse}(T)}{AGWP_{fos}(T)} \quad (5)$$

$$= GWP_{bio}(T) + GWP_{biouse}(T) \quad (6)$$

missä **GWP_{netbio}** on metsäbiomassan korjuun ja käytön nettoilmastovaikutuksen GWP ja **GWP_{biouse}** puun käyttöketjun suhteessa fossiilisiin vaihtoehtoihin.

GWP_{bio}-kertoimet: **Yleistys kuvaamaan puunkäyttökettun vaikutuksia (3)**

Jos biomassaa käytetään vain bioenergiana (ei tilapäistä puutuotteiden varastoa), pätee:

$$GWP_{biouse}(T) = -DF \quad (7)$$

missä DF (displacement factor) on fossiilisten hiilipäästöjen substituutiokerroin (Schlamadinger ja Marland, 1996 and 1997).

Marland G, Schlamadinger B (1997) Forests for carbon sequestration or fossil fuel substitution? A sensitivity analysis. Biomass and Bioenergy 13(6): 389-397.

Schlamadinger, B and, Marland, G (1996) The role of forest and bioenergy strategies in the global carbon cycle. Biomass and Bioenergy 10(5/6):275-300.