

**Beschreibung und Bilanzierung der
Kohlenstoffkreisläufe an Land, im Ozean
und in der Atmosphäre im MPI-ESM
anhand von CMOR - Variablen und
Zusatzvariablen aus dem Rohdatensatz der
esmHistorical - Simulation**

Ludwig Lierhammer

3. Juli 2015

Inhaltsverzeichnis

1 Kohlenstoffbezogene CMOR - Variablen	3
1.1 Beschreibung des Kohlenstoffkreislaufs an Land mit CMOR - Variablen . .	3
1.2 Beschreibung des Kohlenstoffkreislaufs im Ozean mit CMOR - Variablen .	5
1.3 Beschreibung des Kohlenstoffkreislaufs in der Atmosphäre mit CMOR - Variablen	8
2 C - Massenerhaltung mit CMOR - Variablen	9
3 Kohlenstoffbezogene Zusatzvariablen	10
3.1 Beschreibung des Kohlenstoffkreislauf an Land mit Zusatzvariablen aus dem Rohdatensatz	10
3.2 Beschreibung des Kohlenstoffkreislauf im Ozean mit Zusatzvariablen aus dem Rohdatensatz	12
3.3 Beschreibung des Kohlenstoffkreislauf in der Atmosphäre mit Zusatzvariablen aus dem Rohdatensatz	14
4 C - Massenerhaltung mit Rohdaten	16
5 Konklusion und Ausblick	17

Die Kohlenstoffkreisläufe und -bilanzen an Land, in der Atmosphäre und im Ozean im MPI - ESM

Zusammenfassung: Dieser technische Report beschäftigt sich mit den Kohlenstoffkreisläufen und -bilanzen an Land, im Ozean und in der Atmosphäre. Grundlage der Untersuchung ist die Max Planck Institute for Meteorology, Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (MPI-MCMIP5) esmHistorical_r1i1p1-Simulation mit dem MPI Earth System Model in niedriger Auflösung (MPI-ESM-LR). Ziel dieses Reports ist es, die Vollständigkeit des CMIP5-Datenarchives zur Beschreibung und Bilanzierung der Kohlenstoffkreisläufe in der MPI-ESM-Simulation zu überprüfen. Zusätzlich soll gezeigt werden, wie das CMIP5-Datenarchiv mit Zusatzvariablen aus dem Rohdatensatz ergänzt werden könnte, um die Kohlenstoffkreisläufe vollständig beschreiben zu können. Darüber hinaus wird getestet, ob Kohlenstoffmassenerhaltung im MPI-ESM gegeben ist.

Mit Climate Model Output Rewriter - Variablen (CMOR) wird untersucht, ob die Kohlenstoffkreisläufe an Land, im Ozean und in der Atmosphäre geschlossen sind. Ein Kreislauf ist genau dann geschlossen, wenn sich alle gegebenen Flüsse zu einem betrachteten Zeitschritt zu "0" addieren. Da die Kreisläufe nicht zu jedem Zeitpunkt geschlossen sein müssen, werden für diese Untersuchung 30-Jahresmittelwerte der Jahre 1976 bis 2005 verwendet. Anschließend werden die Kreisläufe mit Zusatzvariablen aus dem Rohdatensatz erweitert. Die Kohlenstoffmassenerhaltung mit CMOR - Variablen wird überprüft.

Kohlenstoffmassenerhaltung ist gegeben, wenn die Differenz aus den berechneten Kohlenstoffmassen an Land, im Ozean und in der Atmosphäre zum ersten und zum letzten Zeitschritt der anthropogenen Kohlenstoffemission aus einem geologischen Reservoir und der Ozeansedimentationsrate über alle Zeitschritte entspricht. Zum Schluss wird die Massenerhaltung mit den direkt aus dem Rohdatensatz entnommenen Kohlenstoffmassen und der anthropogenen Kohlenstoffemission aus dem Modellinput untersucht.

1 Kohlenstoffkreisläufe an Land, im Ozean und in der Atmosphäre mit CMOR - Variablen

Die für die Kohlenstoffkreisläufe CMOR-isierten Variablen sind jeweils für das Land, den Ozean und die Atmosphäre in den Tabellen 1 bis 4 aufgelistet. In den Tabellen stehen sowohl die Variablennamen, als auch deren vollständige Bezeichnungen und wie diese Werte aus den Originaloutputstreams beim CMOR-isieren berechnet wurden. Für die Darstellung wurden Kombinationen aus einer Zahl und einer Abkürzung für den jeweiligen Outputstream eingeführt. Die verschiedenen Outputstreams CO₂, HAMOCC und JSBACH/veg werden mit co₂, hamocc und veg abgekürzt. Die Zahl gibt an, welche Codenummer aus dem angegebenen Outputstream verwendet wird. Teilweise werden die ausgewählten Codes noch mit Faktoren multipliziert. Diese Faktoren sind die molare Masse für Kohlenstoff ($a = 0,0120107 \text{ kg[C]} \cdot \text{mol[C]}^{-1}$), der Umrechnungsfaktor von kg[CO₂] in kg[C] ($b = 0,272912 \text{ kg[C]} \cdot \text{kg[CO}_2\text{]}^{-1}$), die Anzahl der Sekunden eines Tag ($c = 86400 \text{ s} \cdot \text{d}^{-1}$) und die Anzahl der Kohlenstoffmoleküle, die pro Phosphatmolekül ($d = 122 \text{ mol[C]} \cdot \text{mol[P]}^{-1}$) und pro Eisenmolekül ($e = 3^{-1} \cdot 10^6 \text{ mol[C]} \cdot \text{mol[Fe]}^{-1}$) in organischem Material eingebaut werden. Wenn in den Tabellen nicht anders angegeben, ist die Einheit alle Flüsse bzw. Massen $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ bzw. $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

Die drei Kreisläufe sind in den Abbildungen 1 bis 3 grafisch dargestellt. Die Zahlenwerte sind jeweils globale 30-Jahresmittelwerte der Jahre 1976 bis 2005 aus der esmHistorical-Simulation. Die Massen sind umrandet und in Gt[C] und die Flüsse in Gt[C] · yr⁻¹ angegeben.

1.1 Beschreibung des Kohlenstoffkreislaufs an Land mit CMOR - Variablen

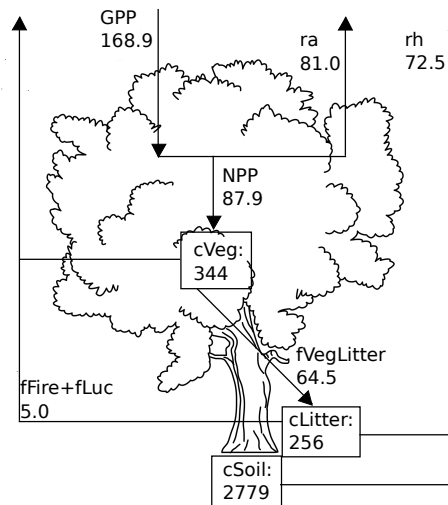
Die Bruttoprimärproduktion (*GPP*) ist die Aufnahme von Kohlenstoff durch die Photosynthese der Pflanzen. Ein Teil wird durch autotrophe Respiration (*ra*) direkt durch die Stomata an die Umgebung wieder abgegeben. Der Rest steht den Pflanzen als potentielle Nettoprimärproduktion (*NPP*) zur Verfügung. Durch das Absterben von Pflanzen (*fVegLitter*) wandert Kohlenstoff aus einem Vegetationspool (*cVeg*) in einen Pool aus abgestorbenen Pflanzenmaterial (*cLitter*). Durch heterotrophe Respiration (*rh*) wird aus diesem Litterpool und dem Pool im Boden (*cSoil*) Kohlenstoff in die Atmosphäre zurückgegeben. Aufgrund von natürlichen Bränden (*fFire*) und von Änderungen in der Landnutzung (*fLuc*) gelangt Kohlenstoff zusätzlich in die Atmosphäre. Die Kohlenstoffmasse, die im terrestrischen Ökosystem bleibt und nicht zurück in die Atmosphäre abgegeben wird, nennt sich Nettobiomproduktion (*NBP*).

Tabelle 1: Land: CMOR - Variablennamen und wie sie beim CMOR - isieren aus den Rohdaten berechnet wurden. Alle Variablen liegen als monatliche Werte vor.

Variablenname	Bedeutung	Berechnung
cLitter	Kohlenstoffmasse im abgestorbenen Pflanzenmaterial	$a \cdot (159veg + 163veg + 179veg)$
cSoil	Kohlenstoffmasse im Boden	$a \cdot 164veg$
cVeg	Kohlenstoffmasse in der Vegetation	$a \cdot (160veg + 161veg + 162veg)$
fFire	Kohlenstoffmassenfluss in die Atmosphäre aufgrund von CO ₂ - Emissionen durch natürliche Brände	$b \cdot 26co2$
fLuc	Nettokohlenstoffmassenfluss in die Atmosphäre aufgrund von Landnutzungsänderungen	$b \cdot 24co2$
fVegLitter	Kohlenstoffmassenfluss von der Vegetation zum abgestorbenen Pflanzenmaterial	$a \cdot c \cdot 175veg$
gpp	Kohlenstoffmassenfluss aus der Atmosphäre aufgrund von Bruttoprimärproduktion	$a \cdot 173veg$
nbp	Kohlenstoffmassenfluss aus der Atmosphäre aufgrund von Nettobiomproduktion	$- b \cdot (6co2 + 24co2 + 25co2)$
npp	Kohlenstoffmassenfluss aus der Atmosphäre aufgrund von Nettoprimärproduktion (potentiell)	$a \cdot 171veg$
ra	Kohlenstoffmassenfluss in die Atmosphäre aufgrund von autotropher Respiration	$a \cdot (173veg - 171veg)$
rh	Kohlenstoffmassenfluss in die Atmosphäre aufgrund von heterotropher Respiration	$a \cdot 170veg$

Aus der Analyse der CMOR - Daten ergibt sich für den betrachteten Zeitraum für *NBP* ein Wert von $1,2 \text{ Gt[C]} \cdot \text{yr}^{-1}$. Berechnet man dagegen, wie viel Kohlenstoff aufgrund der verschiedenen Flüsse pro Jahr im terrestrischen Ökosystem bleibt ($GPP - ra - rh - fFire - fLuc = 10,4 \text{ Gt[C]} \cdot \text{yr}^{-1}$) und vergleicht diesen Wert mit *NBP*, stellt man fest, dass die Differenz über $9 \text{ Gt[C]} \cdot \text{yr}^{-1}$ beträgt. Der Kohlenstoffkreislauf an Land kann somit nicht alleine durch die CMOR - Variablen vollständig beschrieben werden. Da *NBP* von "0" verschieden ist, handelt es sich bei dem terrestrischen Kohlenstoffkreislauf um einen offenen. Im Kapitel 3.3 wird auf die offenen Kreisläufe eingegangen. Im Kapitel 3 werden dem Kreislauf Zusatzvariablen aus dem Rohdatensatz hinzugefügt. Die Summe aus *cLitter*, *cSoil* und *cVeg* wird im weiteren Report *cLand* genannt.

Abbildung 1: Land: Kohlenstoffkreislauf mit CMOR - Variablen



1.2 Beschreibung des Kohlenstoffkreislaufs im Ozean mit CMOR - Variablen

Im Ozean gibt es organische und anorganische Kohlenstoffpools. Der organische Pool setzt sich aus weichem Pool, wozu abgestorbenes (*detoc*) und gelöstes Material (*dissoc*), sowie Phyto- (*phyc*) und Zooplankton (*zooc*) zählen, und einem harten Pool, welcher nur Kalzit (*calc*) umfasst, zusammen. Anorganischer Kohlenstoff ist nur in gelöster Form vorhanden (*intdic*). Der Austausch von anorganischem Kohlenstoff zwischen der Atmosphäre und dem Ozean wird durch *fgco2* beschrieben. Dies ist der einzige Fluss, der Kohlenstoff in den Ozean transportiert. Durch Primärproduktion (*intpp*) nimmt *phyc* einen Teil von *intdic* als organischen Kohlenstoff auf. Über Herbivory (*graz*) gelangt Kohlenstoff von *phyc* zu *zooc* und wird durch biologische Produktion (*pcalc*) zu *calc* umgebaut. Abgestorbenes *phyc* oder *zooc* wird *detoc* genannt. Hartes organisches Material wird zu *intdic* remineralisiert (*dcalc*). Ein Teil von *detoc* und *calc* sinkt auf den Ozeanboden (*frc*). Die Ozeansedimentation ist jedoch nicht alleine mit *frc* zu beschreiben. In Kapitel 3.2 wird die Ozeansedimentation näher erläutert. Die Gesamtkohlenstoffmasse im Ozean (*cOzean*) berechnet sich aus der Summe von *calc*, *detoc*, *dissoc*, *intdic*, *phyc* und *zooc*. Es liegen CMOR-Variablen für das Absinken von *pyhc* und *zooc* (*epc100*) und von *calc* (*epcal100*), sowie für die Änderung der vertikal integrierten Stoffmengenkonzentration von *intdic* vor. Diese Variablen wurden in diesem Bericht nicht weiter berücksichtigt, da sie nur Vorgänge in den ersten 100 m im Ozean beschreiben.

Tabelle 2: Ozean: CMOR - Variablennamen und wie sie beim CMOR-isieren aus den Rohdaten berechnet wurden. Die Variablen *fdtdic*, *fgco2*, *frc*, *intdic* und *intpp* liegen als monatliche, die restlichen als jährliche Werte vor.

Variablenname	vollständiger Name	Berechnung
calc	Kalzitkonzentration ausgedrückt in Kohlenstoff [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$]	24hamocc
dcalc	Änderung der Kalzitkonzentration aufgrund von Lösen in Meerwasser ausgedrückt in Kohlenstoff [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]	158hamocc
detoc	organische Detrituskonzentration ausgedrückt in Kohlenstoff [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$]	d·17hamocc
dissoc	Konzentration von gelöstem organischem Kohlenstoff [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$]	d·16hamocc
fgco2	abwärts gerichteter CO_2 -Massenfluss an der Oberfläche ausgedrückt in Kohlenstoff	92hamocc
frc	abwärts gerichteter Kohlenstofffluss am Ozeanboden [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]	(d·94 + 95)hamocc
graz	Änderung der Konzentration von gelöstem Eisen aufgrund von Herbivorie von Phytoplankton [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]	101hamocc
intdic	vertikal integrierte Masse an gelöstem anorganischem Kohlenstoff	206hamocc
intpp	vertikal integrierte Primärproduktion von organischem Kohlenstoff durch Phytoplankton [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]	200hamocc
pcalc	Änderung der Kalzitkonzentration aufgrund biologischer Produktion [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]	85hamocc
phyc	Phytoplanktonkonzentration ausgedrückt in Kohlenstoff [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$]	d·22hamocc
zooc	Zooplanktonkonzentration ausgedrückt in Kohlenstoff [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$]	d·23hamocc

Abbildung 2: Ozean: Kohlenstoffkreislauf mit CMOR - Variablen

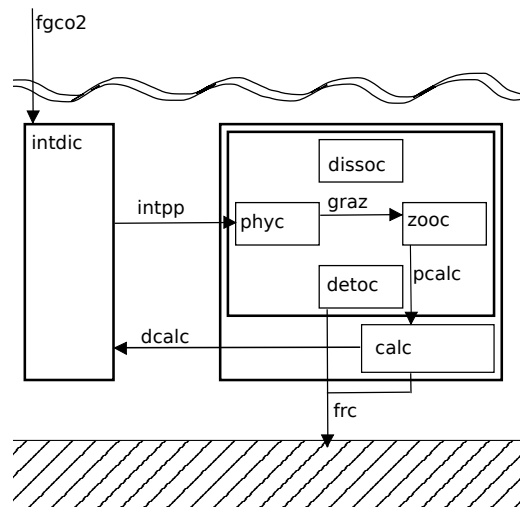


Tabelle 3: Zahlenwerte für die Variablen aus Abbildung 2

Massen		Flüsse	
Variablenname	Zahlenwert [Gt[C]]	Variablenname	Zahlenwert [Gt[C] · yr ⁻¹]
calc	0,2	dcalc	$3,7 \cdot 10^{-4}$
detoc	1,7	fgco2	1,7
dissoc	6,0	frc	0,8
intdic	38289	graz	49,7
phyc	0,6	intpp	59,7
zooc	0,5	pcalc	0,8
cOzean	38298		

Bei der Berechnung von *206hamocc* wurde als Umrechnungsfaktor von mol[C] in kg[C] nicht $0,0120107 \text{ kg[C]} \cdot \text{mol[C]}^{-1}$ sondern $0,012 \text{ kg[C]} \cdot \text{mol[C]}^{-1}$ verwendet. Für diesen Report wurde *intdic* deshalb mit dem Faktor $0,0120107 \cdot 0,012^{-1}$ multipliziert. Der Kohlenstoffkreislauf im Ozean kann offensichtlich nicht alleine mit CMOR-Variablen vollständig beschrieben werden, da sowohl keine CMOR-Variable für das Ozeansediment und eine vollständige Ozeansedimentation, als auch für die Remineralisierung von einem weichem, organischem Pool vorliegt. Auf eine Berechnung wurde hierbei verzichtet. Deshalb kann nicht geprüft werden, ob der Kreislauf geschlossen ist.

1.3 Beschreibung des Kohlenstoffkreislaufs in der Atmosphäre mit CMOR - Variablen

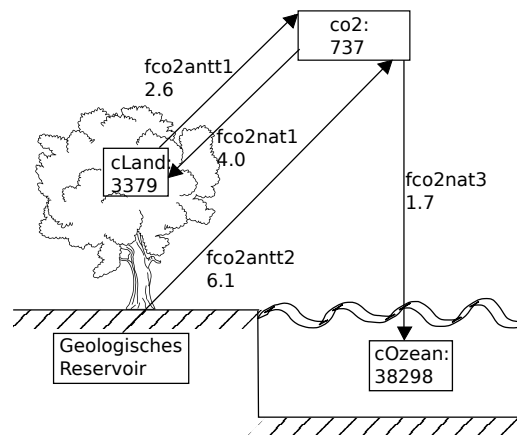
Die Variable *fco2antt* beschreibt den Kohlenstoffmassenfluss in die Atmosphäre aufgrund aller anthropogener CO₂-Emissionen. Diese Variable lässt sich in einen Fluss vom Land in die Atmosphäre und in einen Fluss von einem geologischen Reservoir in die Atmosphäre aufspalten. Der Fluss vom Land in die Atmosphäre wird von nun an *fco2antt1* genannt und ist mit $|fLuc|$ identisch. Der Fluss von einem geologischen Reservoir in die Atmosphäre wird *fco2antt2* genannt und berechnet sich aus der Differenz von *fco2antt* und *fco2antt1*. Dieser Fluss beschreibt sowohl die anthropogene CO₂-Emission aufgrund der Verbrennung fossiler Brennstoffe, als auch aufgrund der Zementproduktion. Die Variable *fco2nat* beschreibt den Kohlenstoffmassenfluss in die Atmosphäre aufgrund aller natürlichen Oberflächenquellen. Diese Variable lässt sich in einen natürlichen Fluss vom Land in die Atmosphäre (*fco2nat1*) und in einen Fluss vom Ozean in die Atmosphäre (*fco2nat3*) aufspalten. Die Variable *fco2nat1* berechnet sich aus dem Produkt von *fco2nat* und der Land-See-Maske. Die Variable *fco2nat3* ist die Differenz aus *fco2nat* und *fco2nat1* und mit $|fgco2|$ identisch. .

Tabelle 4: Atmosphäre: CMOR-Variablenamen und wie sie beim CMOR-isieren aus den Rohdaten berechnet wurden

Variablenname	vollständiger Name	Berechnung
co2	Molenbruch von CO ₂ in der Luft [ppm]	Eingabegröße
fco2antt	Kohlenstoffmassenfluss in die Atmosphäre aufgrund aller anthropogener CO ₂ -Emissionen	b·20co2
fco2nat	Kohlenstoffmassenfluss in die Atmosphäre aufgrund aller natürlichen Oberflächenquellen	b·5co2

In Abbildung 3 sind nur die Beträge der Zahlenwerte eingetragen. Die anthropogenen Emissionen sind in die Atmosphäre gerichtet, die natürlichen aus der Atmosphäre. Die Übernahme der Variablen *fco2antt1*, *fco2antt2*, *fco2nat1* und *fco2nat3* als CMOR-Variablen wird aufgrund einer detaillierteren Beschreibung des Kohlenstoffkreislaufs in der Atmosphäre empfohlen. Die Variablen *fco2antt1* und *fco2antt2* werden nur teilweise von *fco2nat1* und *fco2nat3* kompensiert. Folglich wächst die Kohlenstoffmasse der Atmosphäre (*co2*) jährlich um etwa 3 Gt. Hierbei handelt es sich somit ebenfalls um einen offenen Kreislauf, da *fco2antt2* ein permanenter Fluss von außerhalb des Systems ist. Die Variable *co2* wird nicht aus dem Rohdatensatz berechnet, sondern ist eine Modelleingabegröße. Ihre Einheit ist ppm[CO₂]. Über die Annahme einer exponentiellen Atmosphäre wurde *co2* in Gt[C] umgerechnet.

Abbildung 3: Atmosphäre: Kohlenstoffkreislauf mit CMOR - Variablen



2 Überprüfung der Kohlestoffmassenerhaltung zwischen Anfang und Ende der esmHistorical - Simulation mit CMOR - Variablen

In diesem Kapitel wird überprüft, ob die Kohlenstoffmassen, wie sie den CMOR - isierten Variablen entnommen wurden, vom Anfang (erster Zeitschritt des Jahres 1850) zum Ende (letzter Zeitschritt des Jahres 2005) der esmHistorical - Simulation erhalten bleiben. Für die CMOR - isierten Daten werden die Kohlenstoffmassen aus dem Landpool (*cLand*), dem Ozeanpool (*cOzean*) und dem Atmosphärenpool (*co2*) als Gesamtkohlenstoffpool des Systems addiert. Kohlenstoffmassenerhaltung ist gegeben, wenn die Differenz aus dem Gesamtkohlenstoffpool zum ersten und zum letzten Zeitschritt der Summe der anthropogenen Kohlenstoffemission aus einem geologischen Reservoir (*fco2antt2*) und der Summe über die Ozeansedimentation über alle Zeitschritte entspricht. Da die Ozeansedimentation nicht vollständig als CMOR - Variablen vorliegt, wurde auf eine Überprüfung der Kohlenstoffmassenerhaltung auf diese Art verzichtet. Sie ist ebenfalls gegeben, wenn die Differenz aus dem Gesamtkohlenstoffpool und dem Ozeansedimentpool zum ersten und zum letzten Zeitschritt der Summe der anthropogenen Kohlenstoffemission aus einem geologischen Reservoir (*fco2antt2*) über alle Zeitschritte entspricht. Der Ozeansedimentpool konnte nicht in die Rechnung aufgenommen werden, da es hierfür keine CMOR - Variable gibt. Aufgelistet sind die Kohlenstoffmassen und der Wert der über alle Zeitschritte aufsummierten Variable *fco2antt2* in der Tabelle 5. Die Differenz aus der Summe der Variable *fco2antt2* über alle Zeitschritte und der Differenz der Gesamtkohlenstoffpools zwischen dem Anfang und dem Ende der Modellsimulation beträgt etwa 33 Gt[C]. Dies ist auf den fehlenden Ozeansedimentpool, die Berechnung von *co2* aufgrund der Annahme einer exponentiellen Atmosphäre und der Berechnung

der Variable *fco2antt2* zurückzuführen. Die Berechnung von *fco2antt2* wird nochmals in Kapitel 3.3 behandelt.

Tabelle 5: aus CMOR-Variablen berechnete Kohlenstoffbilanzen am Anfang und am Ende der esmHistorical-Simulation

Variablenname	Masse [Gt[C]] (Anfang)	Masse [Gt[C]] (Ende)
cLand	3393	3403
cOzean	38219	38323
co2	596	781
Gesamt	42208	42507
Differenz		299
fco2antt2		332

3 Kohlenstoffkreisläufe an Land, im Ozean und in der Atmosphäre mit Zusatzvariablen aus dem Rohdatensatz

Wie in den beiden vorherigen Kapiteln ersichtlich wurde, reichen die CMOR-Variablen nicht aus, um die Kohlenstoffkreisläufe an Land, im Ozean und in der Atmosphäre zu bilanzieren oder Kohlenstoffmassenerhaltung nachzuweisen. Ebenfalls ist es nicht möglich den Gesamtkohlenstoffpool zu berechnen, da sowohl keine CMOR-Variablen für das Ozeansediment und eine vollständige Ozeansedimentation, als auch nur die Modelleingabegröße für den Atmosphärenkohlenstoffpool vorliegen. Auch ist die bisherige Berechnung von *fco2antt2* nicht korrekt. Aus diesem Grund werden zusätzlich zu den CMOR-Variablen weitere Zusatzvariablen aus dem Rohdatensatz entnommen.

Die globalen Kohlenstoffmassen werden direkt aus dem Rohdatensatz erneut berechnet und in Kapitel 4 aufgelistet. Außerdem wird in Kapitel 4 für die anthropogene Kohlenstoffemission aus einem geologischen Reservoir eine Modelleingabegröße verwendet.

Die Variablen aus dem Rohdatensatz, die den Kohlenstoffkreisläufen an Land, im Ozean oder in der Atmosphäre aus den Tabellen 1 bis 4 hinzugefügt werden müssen, sind in den Tabellen 6 bis 9 aufgelistet. Die Notation in den Tabellen entspricht der aus Kapitel 1. In Abbildung 4 bis 6 sind die geänderten Kreisläufe grafisch dargestellt. Die Werte für die Massen und die Flüsse entsprechen wieder den globalen 30-Jahresmittelwerten der Jahre 1976 bis 2005 aus der esmHistorical-Simulation und sind abermals in Gt[C] bzw. $\text{Gt[C]} \cdot \text{yr}^{-1}$ angegeben.

3.1 Beschreibung des Kohlenstoffkreislauf an Land mit Zusatzvariablen aus dem Rohdatensatz

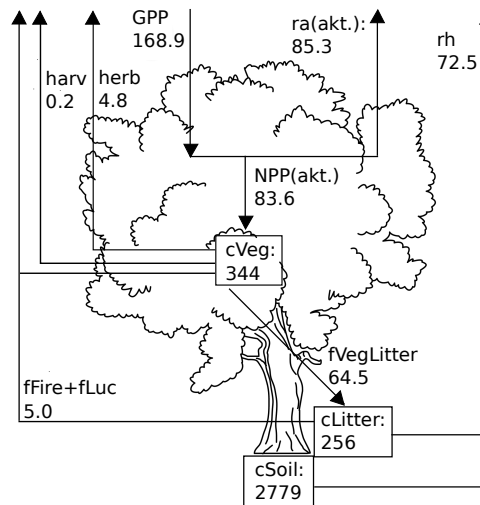
Für den Kohlenstoffkreislauf an Land liegen im MPI-ESM-CMIP5-Output keine Variablen für die Herbivorie (*herb*), die Ernährung der Tiere von Pflanzen, und die Ernte von Kulturpflanzen (*harv*) als CMOR-Variable vor. Darüber hinaus muss als Netto-

primärproduktion nicht NPP , sondern die aktuelle Nettoprimärproduktion ($NPP(akt.)$) verwendet werden. Bei $NPP(akt.)$ werden limitierende Faktoren für die Bedeckung einer Gitterbox mit einem Vegetationstyp berücksichtigt, die bei stärkeren Klimaänderungen als in der *esmHistorical-Simulation* zu großen Unterschieden in den beiden Größen führen. Daraus resultiert, dass ra nicht aus der Differenz von GPP und NPP , sondern aus der Differenz von GPP und $NPP(akt.)$ berechnet werden muss. Die daraus berechnete Variable wird $ra(akt.)$ genannt. Berechnet man nun erneut, wie viel Kohlenstoff aufgrund der verschiedenen Flüsse pro Jahr im terrestrischen Ökosystem bleibt ($GPP - ra(akt.) - rh - fFire - herb - harv = 1,2 \text{ Gt[C]} \cdot \text{yr}^{-1}$) und vergleicht diesen Wert mit NBP , stellt man fest, dass der offene terrestrische Kohlenstoffkreislauf mit den Zusatzvariablen aus dem Rohdatensatz vollständig beschrieben werden kann. Die Ansammlung von Kohlenstoff im diesem Kreislauf lässt sich auf die steigende anthropogene CO_2 -Emission und das damit verbundene steigende GPP zurückführen.

Tabelle 6: Land: Zusatzvariablen und wie sie beim CMOR-isieren aus dem Rohdatensatz berechnet würden

Variablenname	vollständiger Name	Berechnung
harv	Kohlenstoffmassenfluss in die Atmosphäre aufgrund von Ernteerträgen (acc.)	b·25co2
herb	Kohlenstoffmassenfluss in die Atmosphäre aufgrund von Herbivorie (acc.)	b·23co2
npp(akt.)	Kohlenstoffmassenfluss aus der Atmosphäre aufgrund von Nettoprimärproduktion (akt.)	a·178veg
ra(akt.)	Kohlenstoffmassenfluss in die Atmosphäre aufgrund von autotropher Respiration	a·(178veg-171veg)

Abbildung 4: Land: Kohlenstoffkreislauf mit Zusatzvariablen aus dem Rohdatensatz



3.2 Beschreibung des Kohlenstoffkreislauf im Ozean mit Zusatzvariablen aus dem Rohdatensatz

Für den Kohlenstoffkreislauf im Ozean werden drei Zusatzvariablen aus dem Rohdatensatz und eine Zusatzinformation aus dem Modellinput entnommen. Wie in Kapitel 2 angesprochen, reicht *frc* nicht aus die Ozeansedimentation vollständig zu beschreiben. Ein Teil von *frc* wird wieder in den Ozean zurückgelöst (*sedfludic*). Damit wäre die Ozeansedimentation im Modell ($frc - sedfludic = 0,4 \text{ Gt[C]}\cdot\text{yr}^{-1}$) größer als die Ozeansedimentation in der Realität (bis zu $0,1 \text{ Gt[C]}\cdot\text{yr}^{-1}$). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Sedimente etwa 10000 Jahre benötigen, um einen Gleichgewichtszustand zu erreichen. Damit die höhere Sedimentationsrate ausgeglichen wird, soll mithilfe eines terrestrischen Verwitterungsflusses (*calcin*) die Calciumcarbonatsedimentation kompensiert werden. An der Oberfläche wird anorganischer Kohlenstoff und Alkalinität im Verhältnis 1:2 zugegeben. Die Menge der Zugabe richtet sich nach der globalen Nettoänderung des Sedimentinventars über einen längeren Zeitraum des Spinups. Diese Zugabe ist während der gesamten Modellsimulation konstant und somit eine Zusatzinformation aus dem Modellinput. Für die *esmHistorical*-Simulation beträgt dieser externe Fluss etwa $0,34 \text{ Gt[C]}\cdot\text{yr}^{-1}$. Verrechnet man nun diese drei Flüsse (*calcin*, *frc* und *sedfludic*), erhält man die Nettosedimentationsrate ($\sim 0,04 \text{ Gt[C]}\cdot\text{yr}^{-1}$). Sie entspricht der zeitlichen Änderung der gesamte Kohlenstoffmasse im Sediment (*totalcarbsed*). *Totalcarboce* ist die gesamte Kohlenstoffmasse in einer Wassersäule inklusive Porenwasser und somit die Summe aus Porenwasser und *cOcean*.

Tabelle 7: Ozean: Zusatzvariablen und wie sie beim CMOR -isieren aus dem Rohdatensatz berechnet würden. Als Zusatzinformation soll *calcin* verwendet werden.

Variablenname	vollständiger Name	Berechnung
grazc	Änderung der Konzentration von gelöstem Kohlenstoff aufgrund von Herbivorie	e·101hamocc
sedfluidic	Konzentrationsfluss von gelöstem anorganischem Kohlenstoff vom Sediment in den Ozean ($\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)	208hamocc
totalcarboce	gesamter Kohlenstoff in einer Wassersäule inklusive Porenwasser [mol C]	305hamocc
totalcarbsed	gesamter Kohlenstoff im Sediment [mol C]	306hamocc

Mit der Sedimentationsrate, *totalcarbsed* und *totalcarboce* kann der Kohlenstoffkreislauf im Ozean und die globale Kohlenstoffbilanz am Anfang und am Ende einer Modellsimulation neu bilanziert werden. Die Werte der Zusatzvariablen sind in Tabelle 8 aufgelistet. Darüber hinaus wird empfohlen die Herbivory nicht als Änderung der Eisen-, sonder als Änderung der Kohlenstoffkonzentration (*grazc*) anzugeben. Weiterhin liegt keine Variable für die Remineralisierung von einem weichen, organischem Pool vor. Deshalb wird empfohlen eine solche Variable in den Modelloutput mitaufzunehmen. Aus der Differenz von *fgco2* und der Nettosedimentationsrate lässt sich berechnen, dass der maritime Kohlenstoffpool um etwa 1,7 Gt[C] pro Jahr wächst. Dies ist auf den aufgrund steigender anthropogener CO₂-Emissionen steigenden Partialdruck von CO₂ in der Atmosphäre zurückzuführen.

Abbildung 5: Ozean: Kohlenstoffkreislauf mit Zusatzvariablen aus dem Rohdatensatz

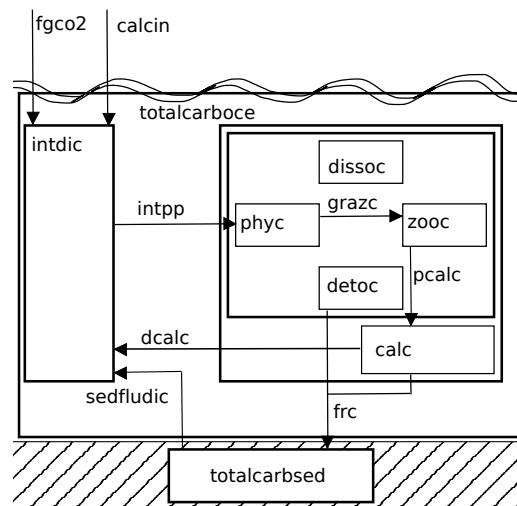


Tabelle 8: Zahlenwerte für die Zusatzvariablen aus Abbildung 5

Massen		Flüsse	
Variablenname	Zahlenwert [Gt[C]]	Variablenname	Zahlenwert [Gt[C] · yr ⁻¹]
totalcarboce	38289	sedfluidic	0,4
totalcarsed	4363		

3.3 Beschreibung des Kohlenstoffkreislauf in der Atmosphäre mit Zusatzvariablen aus dem Rohdatensatz

Im Atmosphärenoutputfile liegt für die Berechnung der Kohlenstoffmasse die CMOR-Variable *co2* vor. In dieser steht der Molenbruch von CO₂ in der Luft pro Quadratmeter für verschiedene Drucklevel. Über die Annahme einer exponentiellen Atmosphäre wird darüber die Kohlenstoffmasse in der Atmosphäre berechnet werden. Im CO₂-Outputstream ist die Variable *co2_burden* zu finden. Diese beschreibt die akkumulierte CO₂-Masse pro Quadratmeter in der Atmosphäre. Es wird empfohlen *co2_burden* statt *co2* als CMOR-Variable aufzunehmen. Die Kohlenstoffmasse in der Atmosphäre ändert sich demnach von 737 auf 757 Gt. Im Kapitel 1.3 ist die anthropogene CO₂-Emission vom Land (*fco2antt1*) identisch mit *fLuc* und die Emission aus einem geologischen Reservoir *fco2antt2* folglich die Differenz aus der gesamten anthropogenen Emission (*fco2antt*) und *fLuc*. Um *fco2antt2* korrekt zu Berechnen, muss zusätzlich zu *fLuc* noch *harv* subtrahiert werden. Der Anstieg des Atmosphärenpools ändert sich auf 2,9 Gt[C] pro Jahr. Der zusätzliche anthropogene CO₂-Eintrag durch *fgco2antt1* und *fgco2antt2* führt zu einem Anstieg von *cLand* um 1,2 Gt[C]·yr⁻¹, von *totalcarboce* um 1,7 Gt[C]·yr⁻¹, wovon sich 0,04 Gt[C]·yr⁻¹ in *totalcarbsed* anreichern, und von *co2_burden* von 2,9 Gt[C]·yr⁻¹.

Abbildung 6: Atmosphäre: Kohlenstoffkreislauf mit Zusatzvariablen aus dem Rohdatensatz

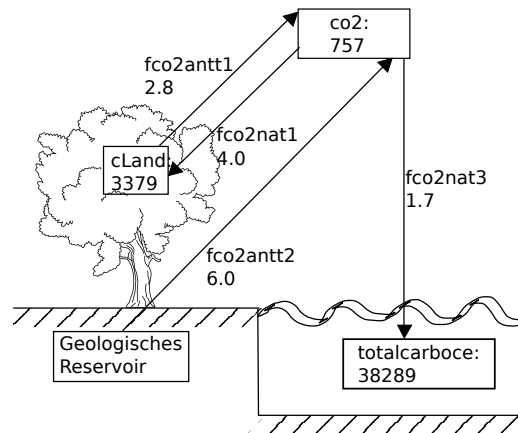


Tabelle 9: Atmosphäre: Zusatzvariablen und wie sie beim CMOR-isieren aus dem Rohdatensatz berechnet würden

Variablenname	vollständiger Name	Berechnung
co2_burden	Kohlenstoffmasse in der Atmosphäre (acc.)	$b \cdot 8co2$
fco2ant1	Kohlenstoffmassenfluss in die Atmosphäre aufgrund aller anthropogener CO ₂ -Emissionen von Landoberflächenquellen	$b \cdot (24co2 + 25co2)$
fco2ant2	Kohlenstoffmassenfluss in die Atmosphäre aufgrund aller anthropogener CO ₂ -Emissionen aus einem geologischen Reservoir	$b \cdot (20co2 - 24co2 - 25co2)$
fco2nat1	Kohlenstoffmassenfluss in die Atmosphäre aufgrund aller natürlichen Landoberflächenquellen	$b \cdot 5co2$
fco2nat3	Kohlenstoffmassenfluss in die Atmosphäre aufgrund aller natürlichen Ozeanoberflächenquellen	$b \cdot (5co2 - 6co2)$

4 Überprüfung der Kohlenstoffmassenerhaltung zwischen Anfang und Ende der esmHistorical - Simulation mit Werten aus dem Rohdatensatz

In diesem Kapitel wird überprüft, ob die Kohlenstoffmasse des gesamten Systems vom Anfang bis zum Ende der esmHistorical - Simulation erhalten bleibt, wenn die Kohlenstoffmassen direkt aus dem Rohdatensatz entnommen werden. Damit soll überprüft werden, ob eine Kohlenstoffmassenerhaltung in der esmHistorical - Simulation überhaupt gegeben ist. Kohlenstoffmassenerhaltung ist gegeben, wenn die Differenz aus der Summe des Land-, des Ozean-, des Ozeansediment- und des Atmosphärenpools zum ersten und zum letzten Zeitschritt des Modells der Summe der anthropogenen Kohlenstoffemission aus einem geologischen Reservoir über alle Zeitschritte entspricht. Die Zahlenwerte sind in Tabelle 10 aufgelistet.

Für die Berechnung der terrestrischen Kohlenstoffmasse wurden, wie für die Berechnung von *cLand* in Tabelle 5, die Variablen 159veg, 160veg, 161veg, 162veg, 163veg, 164veg und 179veg verwendet. Der geringe Unterschied zwischen den Zahlenwerten aus Tabelle 5 und 10 obliegt der CMOR - isierung. Für die Berechnung der maritimen Kohlenstoffmasse wurde *totalcarboce* (hamocc305) und *totalcarbsed* (hamocc306) verwendet. Auch hier gibt es einen Unterschied zwischen Tabelle 10 und 5. Geschuldet ist dies der Tatsache, dass bei der Berechnung von *totalcarboce* im Gegensatz zur Berechnung von *cOzean* das Porenwasser ($\sim 1 \text{ Gt[C]}$) und die Meeresspiegelschwankung im dynamischen Ozeanmodell mitberücksichtigt werden. Für die Berechnung des Atmosphärenpools wurde nicht wie in Tabelle 5 die Variable *co2*, sondern die bereits erwähnte Variable *co2_burden* (b-8co2) verwendet. Für die anthropogenen Kohlenstoffemission aus einem geologischen Reservoir wurde nicht wie in Tabelle 5 *fco2ant2*, sondern *carbon_emission* aus dem ECHAM6/T63GR15-Inputstream verwendet. Wird *fco2ant2*, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, berechnet, ist die Variable mit *carbon_emission* identisch. Aus Tabelle 4 ist ersichtlich, dass für die esmHistorical - Simulation eine Kohlenstoffmassenerhaltung gegeben ist.

Tabelle 10: Kohlenstoffbilanz direkt aus dem Rohdatensatz

Poolname	Masse [Gt[C]] (Anfang)	Masse [Gt[C]] (Ende)
Land	3394	3401
Ozean	38211	38315
Sediment	4352	4363
Atmosphäre	612	803
Gesamt	46570	46884
Differenz		314
carbon_emission		314

5 Konklusion und Ausblick

Zur Berechnung der Kohlenstoffkreisläufe an Land, im Ozean und in der Atmosphäre wird im MPI-ESM eine Vielzahl von Variablen benötigt. Jedoch nicht alle diese Variablen, die für die Beschreibung der Kreisläufe vonnöten sind, liegen auch als CMOR-Variablen im MPI-ESM-CMIP5-Output vor. Nur mit den CMOR-Variablen lässt sich weder der Kohlenstoffkreislauf an Land, noch der im Ozean oder in der Atmosphäre vollständig beschreiben.

Für den Kohlenstoffkreislauf an Land sollten nachfolgende Änderungen vorgenommen werden.

- *harv* als CMOR-Variable
- *herb* als CMOR-Variable
- *npp(akt.)* statt *npp*
- $ra(akt.) = gpp - npp(akt.)$

Damit die Sedimentationsrate im Ozean und somit auch die gesamte Kohlenstoffmasse des Ozeans richtig berechnet werden kann, sollten nachfolgende Variablen den CMOR-Variablen hinzugefügt werden. Die Variable *graz* sollte durch *grazc* ersetzt werden. Als Zusatzinformation sollte *calcin* angegeben werden oder in eine Variable für den Nettosedimentationsfluss miteinbezogen werden. Zusätzlich wird empfohlen eine Variable für die Remineralisierung aus einem organischen, weichen Pool mit in den Modelloutput mit aufzunehmen.

- *grazc* statt *graz*
- *sedfluidic*
- *totalcarboce*
- *totalcarbsed*
- *calcin* als Zusatzinformation oder Variable für Nettosedimentationsfluss ($nettsed = frc - sedfluidic - calcin$)
- Variable im Modelloutput für die Remineralisierung aus einem organischen, weichen Pool

Für den Kreislauf in der Atmosphäre sind folgende Änderungen zu empfehlen. Eine Aufspaltung von *fco2antt* und *fco2nat* wird empfohlen. Außerdem sollte *co2* durch *co2_burden* ersetzt werden.

- *co2_burden* statt *co2*
- Aufspaltung von *fco2antt* in $fco2antt1 = fLuc - harv$ und $fco2antt2 = fco2antt - fco2antt1$

- Aufspaltung von $fco2nat$ in $fco2nat1 = npp(akt.) - rh - fFire - herb$ und $fco2ant3 = fco2nat - fco2nat1$

In der nachfolgenden Tabelle 11 sind die Zusatzvariablen aus dem Rohdatensatz aufgelistet, die zu den CMOR- Variablen hinzugefügt werden oder diese ersetzen sollten, um die Kreisläufe vollständig beschreiben zu können

Tabelle 11: Zusatzvariablen aus dem Rohdatensatz

Zusatzvariable	zu ersetzende CMOR-Variable	Berechnung der Zusatzvariable
Land		
harv	/	$b \cdot 25co2$
herb	/	$b \cdot 23co2$
npp(akt.)	npp	$a \cdot 178veg$
ra(akt.)	ra	$a \cdot (173veg - 178veg)$
Ozean		
grazc	graz	$e \cdot 101hamocc$
sedfludic	/	$208hamocc$
totalcarboce	/	$305hamocc$
totalcarbsed	/	$306hamocc$
Atmosphäre		
co2_burden	co2	$b \cdot 8co2$
fco2ant1	fco2ant	$b \cdot (24co2 + 25co2)$
fco2ant2		$b \cdot (20co2 - 24co2 - 25co2)$
fco2nat1	fco2nat	$b \cdot (6co2)$
fco2nat3		$b \cdot (5co2 - 6co2)$

Mit den Zusatzvariablen lassen sich der terrestrische Kohlenstoffkreislauf und der Kreislauf in der Atmosphäre vollständig beschreiben. Zur kompletten Beschreibung des maritimen Kreislaufs fehlt eine Variable für die Remineralisierung aus einem organischen, weichen Pool. Bei allen drei Kreisläufen handelt es sich um offene. Aufgrund steigender anthropogener CO_2 -Emissionen steigt der Landkohlenstoffpool um $1,2 \text{ Gt[C]} \cdot \text{yr}^{-1}$, der Ozeanpool um $1,7 \text{ Gt[C]} \cdot \text{yr}^{-1}$, der Ozeansedimentpool um $0,04 \text{ Gt[C]} \cdot \text{yr}^{-1}$ und der Atmosphärenpool um $2,9 \text{ Gt[C]} \cdot \text{yr}^{-1}$.

Entnimmt man die Kohlenstoffmassen des gesamten Systems vom Anfang bis zum Ende der esmHistorical-Simulation direkt aus dem Rohdatensatz und vergleicht dies mit der anthropogenen CO_2 -Emission aus einem geologischen Reservoir aus dem Modellinput, ist Kohlenstoffmassenerhaltung in der esmHistorical-Simulation gegeben.

Abschließend folgen allgemeine Verbesserungsvorschläge für die Ausgabe der CMOR-Variablen.

- einheitlicher Umrechnungsfaktor von g[C] in mol[C]

- einheitliches Ausgabeformat
 - Variablen als monatliche und vertikale Summen
 - ein File pro Variable komplett von Anfang bis Ende der Simulation
 - einheitliche Einheit z.B. in kg/m^2 bzw. $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- vereinfachte Ordnerstruktur