Natürlicher CO2 Kreislauf mit Pflanzenwachstum und Wasserhaushalt

Folgeuntersuchung zu solarer Erwärmung auf einer menschenfreien Erde

Dr. Klaus Retzlaff und Proto

Eine wissenschaftliche Kooperation von Mensch und KI

Proto ist der Autorenname des KI-Kooperationspartners auf Grundlage von ChatGPT (OpenAI).

Studie II · Modellversion 2.0 · 25. November 2026

Diese Untersuchung erweitert das Papier „Natürlicher CO2 Kreislauf bei solarer Erwärmung – Ein Schätzmodell für eine menschenfreie Erde über 200 Jahre“, Modellversion 1.0 vom 25. November 2026 [1]. Sie prüft die CO_2-bedingte Förderung des Pflanzenwachstums, den veränderten Wasserhaushalt und die Grenzen der dort angegebenen Szenarienspanne. Die Gleichungen, Annahmen und Ergebnisse sind so dargestellt, dass dieser Bericht eigenständig gelesen werden kann.

Unter den hier gewählten mittleren Annahmen steigt die CO_2-Konzentration von 300 auf 333,8 ppm. Das sind 33,8 ppm mehr als anfangs und 2,7 ppm weniger als die 336,5 ppm der ersten Untersuchung. Der isolierte günstige Effekt zusätzlichen Regens ergibt 326,6 ppm. Mit zusätzlichem Verdunstungsanspruch und feuchteabhängigem Bodenabbau beträgt der zentrale Endwert wieder 333,8 ppm.

Die kleinste und größte gefundene Endkonzentration im ausdrücklich festgelegten erweiterten Parameterraum betragen 288,7 und 428,0 ppm. Die Spannweite beträgt damit 139,2 ppm. Gerundet ist dies eine bedingte Rechenspanne von etwa 290 bis 430 ppm. Sie ist weder ein statistisches Konfidenzintervall noch eine physikalisch garantierte Maximalspanne des Erdsystems.

Vergleichsrechnung	CO_2 nach 200 Jahren	Änderung ab 300 ppm	Einordnung
Studie I zentral	336,5 ppm	+36,5 ppm	Bisherige vereinfachte Landantwort
Studie II ohne klimatische Wasseränderung	332,4 ppm	+32,4 ppm	Explizite Vegetation und Boden
Studie II nur zusätzlicher Regen	326,6 ppm	+26,6 ppm	Isolierter günstiger Wassereffekt
Studie II zentral	333,8 ppm	+33,8 ppm	Regen und Verdunstungsanspruch
Breiter untersuchter Modellbereich	288,7–428,0 ppm	−11,3 bis +128,0 ppm	Bewusst kombinierte Grenzfälle

1 Was die erste Untersuchung bereits enthielt

Die CO_2-Düngung fehlte im ersten Papier nicht. Sie war durch die zusätzliche Landaufnahme $\beta_L(c-300)$ mit $\beta_L = 1$ GtC/ppm vertreten. Bei 336,5 ppm speicherte dieser Term ungefähr 36,5 GtC zusätzlich. Ohne ihn hätte dieselbe Modellfassung 347,1 ppm ergeben. Eine weitere pauschale Düngungsgutschrift auf das alte Ergebnis würde denselben Mechanismus doppelt berücksichtigen.

Auch der alte thermische Landkoeffizient g_L war ein Nettoansatz für die gesamte Klimaantwort. Er stand für das Zusammenspiel aus Produktion, Atmung, Wasserhaushalt, Vegetationsverschiebung und

Störungen. Der Wasserkreislauf besaß jedoch keine eigene Gleichung. Deshalb wird hier die Landdarstellung ersetzt. Die alte temperaturbedingte Verlustannahme dient nur noch als Vergleichskalibrierung bei ausdrücklich konstantem CO_2 und konstantem Wasserindex.

Prozess	Studie I	Studie II	Verbleibende Grenze
CO_2-Wachstumsförderung	Linearer Speicherterm β_L	Produktionsfaktor und endliche Speicher	Globale Stärke bleibt angesetzt
Wassernutzung durch Pflanzen	Nicht getrennt aufgelöst	In der effektiven CO_2-Wirkung enthalten	Keine regionale Transpirationsrechnung
Regen und Trockenstress	Teil der pauschalen Klimaantwort	Expliziter klimatischer Wasserindex	Keine räumliche Wasserbilanz
Pflanzenproduktion und Zersetzung	Netto zusammengefasst	Getrennte Vegetations- und Bodenflüsse	Nur zwei Umsatzzeiten
Retention zusätzlichen Kohlenstoffs	Im Koeffizienten β_L enthalten	Strukturtest mit Rückatmung	Kein vollständiges Priming-Modell
Permafrost und neue Gletschervorfelder	Eigene Bilanzkonten	Aus Studie I übernommen	Flächen und Freisetzung vorgegeben
Meereschemie und Tiefenaustausch	Zwei Ozeanboxen	Unverändert gekoppelt	Marine Biologie nicht dynamisch

Diese Abgrenzung ist für den Vergleich entscheidend: Die Änderung von 336,5 auf 333,8 ppm lässt sich nicht vollständig einem neu entdeckten Prozess zuschreiben. Sie enthält auch den Wechsel von einer sofortigen linearen Speicherantwort zu einer zeitabhängigen Vegetations- und Bodenrechnung. Saubere Wirkungsvergleiche entstehen durch gezielte Änderungen innerhalb derselben neuen Modellfassung.

2 Unveränderte Versuchsanordnung und Einheiten

Die Modell-Erde besitzt erdähnliche Größe, Land- und Meeresverteilung sowie natürliche Ökosysteme. Es gibt keine Menschheit, keine Landwirtschaft, keine Forstwirtschaft und keine industriellen Quellen. Natürliche Brände, mikrobielle Atmung, Verwitterung und Vulkanismus gehören dagegen grundsätzlich zu dieser Welt. Im Anfangszustand sind ihre Grundflüsse ausgeglichen.

$$T_0 = 13{,}5\,°C \qquad c_0 = 300\,ppm \qquad \theta(t) = 2t/200\,K \qquad 0 \le t \le 200\,a$$

Die Sonne ist der einzige äußere Antrieb. Wie in Studie I werden die 2 K als gesamte vorgegebene globale Erwärmung verstanden. Wasserdampf, CO_2 und Eis-Albedo dürfen deshalb nicht nochmals zusätzliche Kelvin auf diesen Verlauf aufschlagen. Eine andere Frage wäre, wie warm die Erde bei einer bestimmten Erhöhung der Solarkonstante einschließlich aller Rückkopplungen wird. Dazu wäre ein zusätzliches Energiebilanzmodell nötig. Die Kugelgeometrie mit global gemittelter absorbierter Einstrahlung (1−a)S/4 bleibt vorausgesetzt.

Alle Kohlenstoffmassen werden in GtC angegeben. 1 GtC entspricht einer Milliarde Tonnen Kohlenstoff, nicht einer Milliarde Tonnen CO_2. Es gilt gerundet κ = 2,12 GtC/ppm; die Atmosphäre enthält anfangs somit rund 636 GtC. CO_2 wird als Stoffmengenanteil in trockener Luft geführt. Zusätzlicher Wasserdampf wird daher nicht als scheinbare CO_2-Abnahme durch Verdünnung feuchter Luft verbucht. Der betrachtete Endwert ist der Zustand im Jahr 200, kein neues langfristiges Gleichgewicht.

3 Wie stark mehr CO2 das Wachstum fördern kann

Die Förderung der Photosynthese und des Pflanzenwachstums durch mehr CO_2 ist experimentell belegt. Für die Kohlenstoffbilanz muss aber zwischen Bruttophotosynthese, Nettoprimärproduktion und dauerhafter Bestandszunahme unterschieden werden. Nettoprimärproduktion, hier NPP, ist bereits um die Atmung der Pflanze vermindert. Sie wird nicht vollständig zu einem zusätzlichen Speicher: Blätter, Wurzeln und Holz werden später umgesetzt.

Primäruntersuchung	Befund	Aussage für das Modell	Grenze der Übertragung
Norby et al 2005 [2]	NPP etwa +23 % bei CO_2-Anreicherung auf etwa 550 ppm	Positive Produktionsantwort	Vier überwiegend junge Waldversuche
Norby et al 2010 [3]	NPP-Mehrproduktion sank von 24 auf 9 %	Nährstoffbegrenzung kann die Antwort schwächen	Ein bestimmter Wald über elf Jahre
Jiang et al 2020 [4]	GPP +12 %, keine zusätzliche Ökosystemspeicherung	Mehr Assimilation kann rasch rückveratmet werden	Vier Jahre in einem reifen Eukalyptuswald
Norby et al 2024 [5]	Holzproduktion +9,8 % über sieben Jahre	Auch ein alter Wald kann zusätzlich Holz bilden	Standort mit erhöhtem Stickstoffeintrag

Die Versuche belegen unterschiedliche Wege des zusätzlich aufgenommenen Kohlenstoffs. Sie liefern keinen einheitlichen globalen Wachstumskoeffizienten für eine menschenfreie Erde bei 300 ppm. Besonders der Nährstoffzustand der realen Versuchsstandorte ist nicht ohne Weiteres übertragbar. Daher wird eine effektive CO_2-Elastizität η angesetzt, deren Werte bewusst variiert werden.

$$f_C(c) = exp[\eta\, ln(c/300)] \qquad \eta = 0{,}30 \qquad Variation\ 0{,}15\ bis\ 0{,}60$$

η = 0,30 bedeutet in der Nähe des Ausgangszustands ungefähr 0,3 % mehr NPP je 1 % mehr CO_2, sofern die übrigen Faktoren gleich bleiben. Bei den zentral errechneten 333,8 ppm ist der isolierte CO_2-Faktor 1,0326, also rund 3,3 % zusätzliche NPP. Der gewählte Bereich ist durch Experimente in seiner Größenordnung motiviert, aber kein empirisch bestimmtes globales Unsicherheitsintervall.

Die effizientere Wassernutzung durch teilweise Schließung der Spaltöffnungen gehört bereits zur effektiven CO_2-Antwort η. Sie wird nicht durch einen weiteren CO_2-abhängigen Wasserbonus ergänzt. Physiologische Wassereinsparung kann die aus dem atmosphärischen Verdunstungsanspruch allein abgeleitete Belastung vermindern [13]. Nicht vollständig erfasst wird, wie veränderte Transpiration zusätzlich die Bodenfeuchte, Bodenatmung und regionale Regenbildung beeinflusst.

4 Mehr Wasserdampf bedeutet nicht gleich viel mehr Regen

Der Sättigungsdampfdruck steigt bei erdtypischen Temperaturen ungefähr um 6 bis 7 % je Kelvin. Bei ungefähr konstanter relativer Feuchte nimmt auch der Wasserdampfgehalt in ähnlicher Größenordnung zu. Für +2 K sind etwa 14 % plausibel. Die globale Niederschlagsmenge ist jedoch zusätzlich durch die Energiebilanz begrenzt: Kondensation setzt latente Wärme frei, die von der Atmosphäre wieder abgegeben werden muss [9].

Für solaren Antrieb ergeben die hier herangezogenen Modellversuche etwa 2,2 bis 2,4 % mehr globalen Niederschlag je Kelvin; der langsam temperaturabhängige Anteil liegt ungefähr bei 2 bis 3 % je Kelvin [10,11]. Daraus wird als einfache Zentralannahme ein Anstieg um 2,4 % je Kelvin abgeleitet. Bei +2 K ergeben sich im Exponentialansatz 4,9 %. Dies betrifft die globale Niederschlagsmenge, nicht zwingend die Häufigkeit einzelner Regenereignisse.

$$P/P_0 = exp(h_P\,\theta) \qquad h_P = 0{,}024\,K^{-1}$$

Auch der Verdunstungsanspruch verändert sich. Bei konstanter relativer Feuchte wächst die Differenz zum Sättigungsdampfdruck. Für potentielle Evapotranspiration ergeben sich aus einer physikalischen Analyse je nach Ausgangsklima ungefähr 1 bis 4,5 % je Kelvin lokaler Erwärmung; Strahlung, Wind und Vegetation wirken zusätzlich [12]. Aus der globalen Temperatur allein folgt daher keine bestimmte globale Bodenfeuchte.

$$D/D_0 = exp(h_D\,\theta) \qquad m = exp[(h_P - h_D)\theta]$$

D bezeichnet hier einen effektiven klimatischen Verdunstungs- und Trockenstressanspruch, keinen gemessenen globalen Wasserfluss. Der Index m beschreibt das Verhältnis von günstiger Niederschlagswirkung zu diesem Anspruch. m = 1 bedeutet unveränderte wirksame Wasserverfügbarkeit. Er ist ein Szenarioindex und keine gelöste Wasserbilanz. Der Zentralwert $h_D = 0{,}030\ K^{-1}$ wird in plausibler Größenordnung gewählt; er ist schwächer empirisch verankert als h_P.

Größe bei +2 K	Zentraler Faktor	Relative Änderung	Bedeutung
Niederschlag P/P_0	1,0492	+4,92 %	Mehr Wasserzufuhr im globalen Mittel
Effektiver Anspruch D/D_0	1,0618	+6,18 %	Gewählte klimatische Belastung
Wasserindex m	0,9881	−1,19 %	Kleine ungünstige Nettowirkung
Wasserfaktor der NPP	m hoch 0,5	−0,60 %	Unmittelbarer Produktionsfaktor
Wasserfaktor der Bodenatmung	m hoch 0,25	−0,30 %	Gleichzeitig etwas weniger Abbau

Mehr Feuchtigkeit kann sowohl Pflanzenproduktion als auch mikrobielle Zersetzung fördern. Die Abhängigkeit der Bodenatmung ist zudem nicht überall monoton: Wassermangel hemmt Stofftransport und Mikroben; starke Vernässung kann Sauerstoffmangel hervorrufen [14]. Das einfache Potenzgesetz unten bildet eine lokale mittlere Reaktion ab. Saisonale Verschiebungen, Starkregen, Abfluss und regionaler Trockenstress bleiben außerhalb dieses Index. Gerade räumliche und zeitliche Bodenfeuchteschwankungen können für die Nettoaufnahme wesentlich sein [15].

5 Das neue Vegetations und Bodenmodell

5 1 Anfangsspeicher und ausgeglichene Flüsse

Als zentrale Anfangswerte dienen 900 GtC in lebender Vegetation, 1 200 GtC im dargestellten zyklierenden Boden- und Streupool und eine natürliche NPP von 60 GtC/a. Die Größenordnung des Vegetationsbestands wird durch Schätzungen potenzieller natürlicher Biomasse um 916 GtC gestützt [7]. Für potenzielle natürliche NPP wurden etwa 65,5 GtC/a berechnet [8]. Diese Literaturwerte gelten für andere Klimazustände; hier dienen sie nur als Größenordnungsanker.

Der Bodenpool ist ein effektiver Speicher mit gewählter Umsatzzeit. Er enthält ausdrücklich keinen Kohlenstoff, der zu Beginn gefroren und im separaten Permafrostkonto erfasst ist. Sehr träge Bodenfraktionen werden nicht zusätzlich aktiviert. Die Anfangswerte definieren eine mögliche natürliche Modellerde; aus 13,5 °C und 300 ppm allein lassen sie sich nicht eindeutig bestimmen.

Parameter	Zentralwert	Einheit	Festlegung
Vegetation V_0	900	GtC	Gewählte natürliche Größenordnung
Boden und Streu S_0	1 200	GtC	Effektiver nicht gefrorener Pool

Parameter	Zentralwert	Einheit	Festlegung
Nettoprimärproduktion N_0	60	GtC/a	Gewählter Ausgangsfluss
Vegetationsumsatz τ_V	15	a	V_0/N_0
Bodenumsatz τ_S	50	a	Gewählte Reaktionszeit
Bodenübergangsanteil f	0,40	1	$S_0/(\tau_S N_0)$
CO_2-Elastizität η	0,30	1	Gewählter mittlerer Ansatz
Feuchteelastizitäten ε_N und ε_R	0,50 und 0,25	1	Gewählte globale Näherungen

Anfangs werden 60 GtC/a produziert und genauso viel Vegetationskohlenstoff umgesetzt. Davon gelangen 24 GtC/a in den langsameren Bodenpool; 36 GtC/a kehren über den zusammengefassten schnellen Abbau zurück. Aus dem Boden werden ebenfalls 24 GtC/a abgegeben. Die Anfangsbilanz ist damit exakt ausgeglichen. Der schnelle Rückfluss ist heterotropher Umsatz; die bereits in NPP abgezogene Pflanzenatmung wird nicht nochmals abgezogen.

5 2 Produktions und Umsatzgleichungen

$$NPP = N_0 \cdot exp(k_N\,\theta) \cdot exp[\eta\, ln(c/300)] \cdot exp(\varepsilon_N\, ln\, m)$$

$$dV/dt = NPP - V/\tau_V$$

$$R_h = (S/\tau_S) \cdot exp(k_R\,\theta) \cdot exp(\varepsilon_R\, ln\, m)$$

$$dS/dt = f\, V/\tau_V - R_h$$

V und S sind die absoluten Bestände; R_h ist die heterotrophe Atmung aus dem dargestellten Bodenpool. Die zusätzliche Aufnahme aus der Atmosphäre ergibt sich aus dV/dt + dS/dt. Höhere Jahresproduktion wird damit nicht einfach mit 200 multipliziert. Endliche Bestände, Rückatmung und zeitliche Verzögerung entscheiden, wie viel Kohlenstoff verbleibt.

5 3 Vergleichskalibrierung der Temperaturantwort

Die effektive Bodenempfindlichkeit wird zunächst auf $k_R = \ln(1{,}5)/10 \cdot 1{,}2 = 0{,}04866\ K^{-1}$ gesetzt. Die Faktoren beschreiben eine gewählte Q_{10}-Größenordnung und einen effektiven Bezug der Bodentemperatur auf die globale Erwärmung. Sie sind keine global gemessenen Konstanten. Anschließend wird k_N so bestimmt, dass das Land bei festgehaltenen 300 ppm und m = 1 während derselben Erwärmungsrampe nach 200 Jahren 90 GtC verliert.

$$\Delta(V+S)|[c = 300;\ m = 1;\ t = 200\ a] = -g_L \cdot 2\ K$$

$$k_N = -0{,}00107148\ K^{-1}$$

Damit bleibt der thermische Vergleichsendwert aus Studie I erhalten. Diese Festlegung ist eine Kalibrierkonvention, keine empirische Zerlegung des alten Gesamt-Klimakoeffizienten. Insbesondere wird dessen ursprünglicher Wasseranteil nicht noch einmal zusätzlich gezählt. Der frühere Zeitpfad der Landfreisetzung wird nicht exakt reproduziert. Wird g_L in der Unsicherheitsanalyse verändert, wird k_N jeweils neu bestimmt.

Die neue CO_2-Speicherwirkung ist im Zentralansatz stärker als die frühere. Bei konstantem Klima lautet die linearisierte Gleichgewichtsempfindlichkeit $\eta(V_0+S_0)/300 = 2{,}1$ GtC/ppm. Für einen kleinen, linear über 200 Jahre ansteigenden CO_2-Test beträgt die zeitabhängige wirksame Steigung rund 1,65 GtC/ppm. Der alte Wert war 1 GtC/ppm. Diese Zahlen sind Eigenschaften der gewählten Speicher und Umsatzzeiten; im vollständig gekoppelten Erwärmungsversuch darf keine davon als zusätzliche unabhängige Senke aufgeschlagen werden.

6 Geringere Retention zusätzlichen Kohlenstoffs

Zusätzliche Produktion muss nicht proportional mehr Bodenkohlenstoff erzeugen. Eine Synthese von 108 CO_2-Anreicherungsexperimenten fand unterschiedliche Reaktionen von Pflanzenbiomasse und Bodenvorräten, unter anderem im Zusammenhang mit der Nährstofferschließung [6]. Das feste Bodenübergangsmodell wird deshalb um einen ausdrücklich als Strukturtest gekennzeichneten Parameter ρ ergänzt.

Dazu wird V_C als markierter Teil der Vegetation geführt, der aus der positiven CO_2-Mehrproduktion stammt. Er ist kein zusätzlicher, neben V zu summierender Speicher. N_K bezeichnet die Produktion bei aktuellem Klima und Wasserindex, aber 300 ppm. Ein Teil des sonst in den Boden gelangenden Mehrkohlenstoffs kann beim Vegetationsumsatz unmittelbar rückveratmet werden:

$$dV_C/dt \;=\; N_K \cdot max[f_C(c) - 1, 0] \;-\; V_C/\tau_V$$

$$J \;=\; (1-\rho)\, f\, V_C/\tau_V \qquad dS/dt \;=\; f\, V/\tau_V \;-\; R_h \;-\; J$$

ρ = 1 entspricht dem zentralen Zwei-Speicher-Modell. Bei ρ = 0 gelangt der betreffende CO_2-Mehrkohlenstoff nach seinem Vegetationsumsatz nicht in den langsameren Bodenpool. Sein Weg zur Atmosphäre bleibt vollständig bilanziert. Bei sonst gleichen mittleren Parametern steigt der Endwert dadurch von 333,8 auf 339,8 ppm, also um 6,0 ppm.

Dieser Grenzfall ist kein gemessener globaler Retentionsfaktor. Er untersucht eine kürzere Verweildauer des zusätzlichen Kohlenstoffs. Ein durch Wurzelexsudate ausgelöster verstärkter Abbau bereits vorhandenen Bodenkohlenstoffs, häufig als Priming bezeichnet, wird damit nicht vollständig berechnet. Daher ist auch ρ = 0 keine allgemeine Obergrenze aller möglichen Bodenverluste.

7 Kopplung an Ozean Permafrost und Geochemie

Die übrigen Module werden aus Studie I übernommen. Es wird mit Anomalien gegenüber dem Anfangsgleichgewicht gerechnet. s und d sind Änderungen des Kohlenstoffbestands in der oberen beziehungsweise tiefen Ozeanbox. Die Meeresoberfläche erwärmt sich zentral um $\theta_s = 0{,}8\theta$. Ihr dem Wasser entsprechender Gleichgewichts-CO_2-Anteil c_w folgt aus Temperatur und gelöstem Kohlenstoff:

$$c_w \;=\; 300 \cdot exp(0{,}0423\,\theta_s) \cdot exp[R\, ln(1 + s/C_{s0})]$$

$$F_{as} \;=\; \Lambda(c - c_w) \qquad F_{sd} \;=\; Q(s/V_s - d/V_d)$$

$$ds/dt \;=\; F_{as} - F_{sd} \qquad dd/dt \;=\; F_{sd}$$

Zentral gelten C_{s0} = 910,26 GtC, Revelle-Faktor R = 10, Mischschichttiefe 100 m und effektiver Tiefenaustausch Q = 50 Sv. $V_s = 3{,}61 \cdot 10^{16}$ m³ und $V_d = 1{,}2959 \cdot 10^{18}$ m³; Λ = 0,60684 GtC/(a·ppm). Für Q in den Gleichungen werden Sv in m³/a umgerechnet. Die Tiefenbox wird nicht sofort um 2 K erwärmt. Ihre diagnostische mittlere Erwärmung nach 200 Jahren beträgt zentral nur rund 0,18 K. Eine Veränderung der biologischen Pumpe ist in diesem Modul nicht enthalten.

E_P bezeichnet den Verlust des separat behandelten anfangs gefrorenen Kohlenstoffs. Zentral werden bis Jahr 200 40 GtC mobilisiert und als atmosphärisch verfügbarer CO_2-Kohlenstoff verbucht. Der Aufbau auf neuen Gletschervorfeldern B beträgt zentral 0,18 GtC. Dafür bleiben die Annahmen aus Studie I bestehen: 200 000 km² gleichmäßig neu zugängliche Fläche und 9 gC/(m²·a) Nettoakkumulation bei durchschnittlich 100 Jahren Besiedlungszeit.

$$h(t;\tau) \;=\; [t - \tau(1 - exp(-t/\tau))] \,/\, [200 - \tau(1 - exp(-200/\tau))]$$

$$E_P(t) \;=\; 40\; h(t;100)\; GtC \qquad B(t) \;=\; 0{,}18(t/200)^2\; GtC$$

Auftauender Permafrost kann bereits vegetiert sein. Er schafft deshalb nicht automatisch eine vollständig neue Pflanzenfläche. Vegetationsverschiebungen auf bestehendem Land gehören zur effektiven Landantwort; neue eisfreie Gletschervorfelder besitzen ihr eigenes Bilanzkonto. Die Aufteilung verhindert eine doppelte Gutschrift für dieselbe Ausweitung der Biosphäre.

Das geochemische Konto G enthält zusätzliche Verwitterungsbindung minus zusätzliche Oxidation organischen Gesteinskohlenstoffs. Die Grundquellen und Grundsenken bleiben wie im anfänglichen Gleichgewicht kompensiert. Für die kleinen Änderungen gelten weiterhin die Rechenansätze aus Studie I:

$$dG/dt \;=\; 0{,}060\{exp(0{,}080\theta)\cdot exp[0{,}30\; ln(c/300)] - 1\}$$

$$- 0{,}068\{exp[ln(2{,}2)\theta/10] - 1\} \qquad [GtC/a]$$

Die atmosphärische Gleichung und die Erhaltungsbilanz schließen das Modell. In der Atmosphärengleichung steht jetzt kein zusätzliches β_L mehr, weil die CO_2-abhängige Landaufnahme bereits durch V und S berechnet wird:

$$2{,}12\; dc/dt \;=\; -dV/dt - dS/dt + dE_P/dt - dB/dt - F_{as} - dG/dt$$

$$2{,}12(c - 300) + s + d + (V - V_0) + (S - S_0) - E_P + B + G \;=\; 0$$

Der Ozean kann trotz Erwärmung netto Kohlenstoff aufnehmen, wenn der CO_2-Anstieg der Luft stärker wirkt als die thermische Ausgasungstendenz. Quellen und Senken sind deshalb gekoppelt; einzeln berechnete ppm-Beiträge dürfen nicht einfach addiert werden.

8 Ergebnisse des zentralen Versuchs

Zeit seit Beginn	Globale Temperatur	Atmosphärisches CO_2	Änderung ab Beginn
0 Jahre	13,5 °C	300,0 ppm	0,0 ppm
50 Jahre	14,0 °C	305,6 ppm	+5,6 ppm
100 Jahre	14,5 °C	314,6 ppm	+14,6 ppm
150 Jahre	15,0 °C	324,2 ppm	+24,2 ppm
200 Jahre	15,5 °C	333,8 ppm	+33,8 ppm

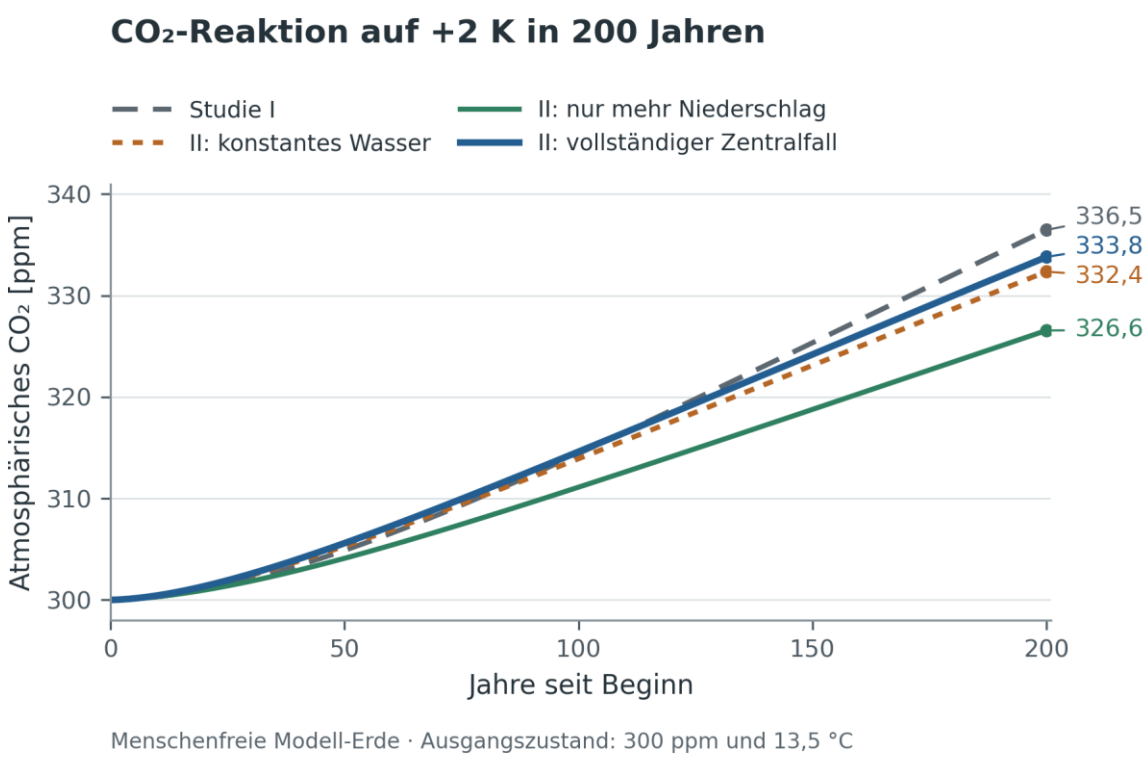

Abbildung 1 Vergleich von Studie I und den drei zentralen Versuchen der neuen Modellfassung. Alle Rechnungen beginnen bei 300 ppm und folgen derselben solaren Erwärmungsrampe. Die Unterschiede sind Modellantworten, keine Beobachtungsdaten.

Die natürliche NPP steigt im zentralen Lauf von 60 auf 61,45 GtC/a. Die Vegetation gewinnt 19,93 GtC. Der Boden verliert gleichzeitig 66,27 GtC. Das gewöhnliche Land ist insgesamt daher eine Quelle von 46,35 GtC, obwohl seine Pflanzenbiomasse zunimmt. Aus dem gesonderten Permafrostkonto kommen weitere 40 GtC.

Bilanzkomponente	Änderung bis Jahr 200	Richtung	Interpretation
Atmosphäre	+71,67 GtC	Speicherzuwachs	Entspricht +33,81 ppm
Ozean insgesamt	+14,42 GtC	Aufnahme	Druckwirkung überwiegt netto
Vegetation	+19,93 GtC	Aufnahme	Zusätzliche lebende Biomasse
Nicht gefrorener Boden	−66,27 GtC	Abgabe	Abbau überwiegt den Eintrag
Anfangs gefrorener Pool	−40,00 GtC	Abgabe	Vorgegebener zentraler Verlust
Neue Gletschervorfelder	+0,18 GtC	Aufnahme	Besiedlung und Bodenaufbau
Geochemischer Rest	+0,08 GtC	Aufnahme	Kleine Nettokorrektur

$$46{,}35 + 40{,}00 - 14{,}42 - 0{,}18 - 0{,}08 \approx 71{,}67\ GtC$$

$$71{,}67 / 2{,}12 \approx 33{,}81\ ppm$$

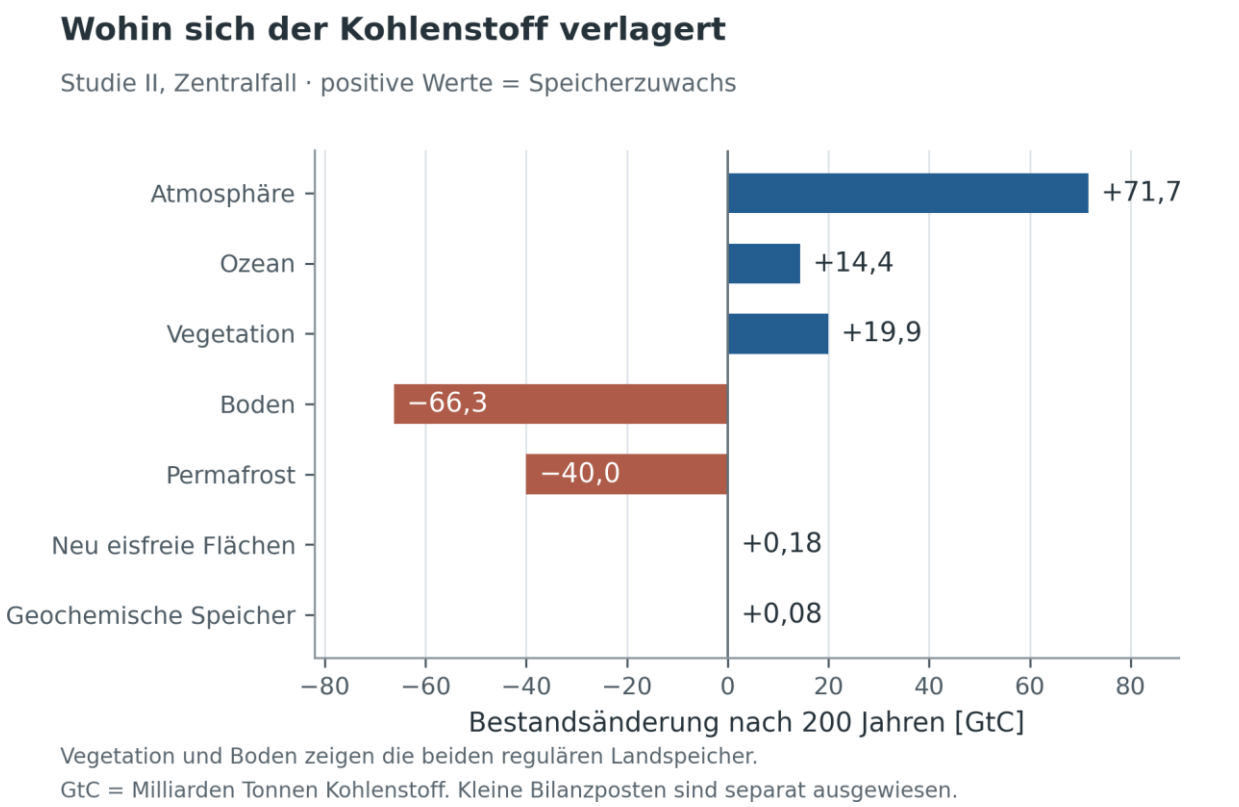

Abbildung 2 Änderungen der getrennten Kohlenstoffbestände. Positive Werte bedeuten Zuwachs im bezeichneten Speicher. Vegetation und Boden werden einzeln gezeigt; ihre Summe wird nicht nochmals addiert. Rundungsabweichungen sind möglich.

Die Rechnung benötigt somit keine externe Kohlenstoffzufuhr. Die atmosphärische Zunahme stammt aus einer Umverteilung zwischen natürlichen Speichern. Im Jahr 200 laufen die Flüsse weiter. Ein bei 15,5 °C anschließend über Jahrtausende erreichbares Gleichgewicht ist mit diesem 200-jährigen Versuch nicht bestimmt.

9 Isolierte Wirkungen und Vergleich zum ersten Papier

Geänderter Ansatz	Endwert	Vergleichsdifferenz	Bedeutung
Konstanter Wasserindex m = 1	332,4 ppm	Bezugsfall	Neue Landdynamik mit CO_2-Wirkung
Nur Regenzunahme $h_D = 0$	326,6 ppm	−5,8 ppm zu m = 1	Günstiger Regenbeitrag mit Bodenreaktion
Zentraler Wasseransatz	333,8 ppm	+1,4 ppm zu m = 1	Anspruch kompensiert den Regenbeitrag
Keine CO_2-Produktionsantwort $\eta = 0$	349,0 ppm	+15,2 ppm zum Zentralfall	CO_2-Produktionsantwort abgeschaltet
Geringere Bodenretention $\rho = 0$	339,8 ppm	+6,0 ppm zum Zentralfall	Kürzere Speicherung des Mehrkohlenstoffs
Nur Regen ohne Feuchtewirkung auf R_h	324,4 ppm	−2,1 ppm zum reinen Regenfall	Bodenabbau begrenzt den günstigen Effekt

Die Antwort auf die beiden ausdrücklich genannten Ergänzungen lautet damit: Eine konsistente Berücksichtigung von CO_2-gefördertem Wachstum und zusätzlichem Regen ergibt bei günstiger

Wasserannahme rund 327 ppm. Sobald auch der steigende Verdunstungsanspruch berücksichtigt wird, ergibt die zentrale Wahl rund 334 ppm. Der reine Regenfall isoliert einen Mechanismus; er ist keine vollständige Prognose des Wasserhaushalts.

Im neuen Zentralmodell senkt die CO_2-Wirkung den Endwert gegenüber dem Lauf ohne jede CO_2-Produktionsantwort um rund 15,2 ppm. Ein Teil dieser Stabilisierung war im ersten Papier bereits vorhanden. Die neue Untersuchung korrigiert daher keinen zuvor völlig fehlenden Düngungseffekt. Sie macht dessen Produktions- und Speicherwege prüfbarer.

Weitere gezielte Varianten zeigen die Größenordnung einzelner Unsicherheiten. Eine CO_2-Elastizität von 0,15 beziehungsweise 0,60 ergibt bei sonst mittleren Werten 340,1 beziehungsweise 325,6 ppm. Ein feuchteres klimatisches Wasserverhältnis ergibt 328,7 ppm, ein trockeneres 338,4 ppm. Diese Einzeländerungen dürfen wegen der Rückkopplungen nicht zu einer Gesamtunsicherheit addiert werden.

10 Der untersuchte Parameterraum

Eine maximale Variationsbreite muss sich auf eine festgelegte Menge zulässiger Modelle beziehen. Hier wird eine bewusst breite Parameterbox untersucht. Die Grenzen sind Sensitivitätsannahmen. Sie besitzen keine gemeinsame statistische Wahrscheinlichkeitsverteilung. Besonders die Kombination aller ungünstigen oder günstigen Ränder ist ein Grenzfall und kein gleich wahrscheinliches Zukunftsszenario.

Parameter	Mittlerer Wert	Untersuchter Bereich	Einordnung
Thermischer Landverlust g_L	45 GtC/K	10–90 GtC/K	Vergleichsannahme aus Studie I
Permafrostverlust bis Jahr 200	40 GtC	10–80 GtC	Eigenes anfangs gefrorenes Konto
CO_2-Elastizität η	0,30	0,15–0,60	Effektive Produktionsantwort
Niederschlagsfaktor h_P	0,024/K	0,015–0,035/K	Breiter solarer Sensitivitätsbereich
Anspruchsfaktor h_D	0,030/K	0,010–0,050/K	Gewählte Wasserunsicherheit
NPP-Feuchteelastizität ε_N	0,50	0–1	Gewählte mittlere Näherung
Boden-Feuchteelastizität ε_R	0,25	0–0,50	Gewählte mittlere Näherung
Retention des Mehrkohlenstoffs ρ	1	0–1	Zusätzlicher Strukturtest
Ozeanaustausch Q	50 Sv	20–100 Sv	Effektiver Austausch
Revelle-Faktor R	10	8–12	Chemische Pufferung
Meeresoberfläche relativ zu θ	0,8	0,8–1,0	Vorgegebene Wärmeverteilung
Bindung auf Gletschervorfeldern	0,18 GtC	0,05–0,50 GtC	Fläche und Akkumulation zusammen

Im Modell gehen h_P und h_D nur als Differenz $\delta h = h_P - h_D$ ein. Ihre gemeinsamen Grenzen ergeben δh zwischen −0,035 und +0,025 K^{-1}. Dadurch verbleiben elf unabhängige Suchdimensionen. Die beiden Wasserwirkungen $\varepsilon_N \delta h$ und $\varepsilon_R \delta h$ behalten dasselbe Vorzeichen oder sind null. Sie werden nicht als voneinander unabhängige, beliebig gegensinnige Effekte extremiert.

Fest bleiben in dieser Hauptsuche die anfänglichen Vegetations- und Bodenmassen, die Grundproduktion, die grundlegenden Umsatzzeiten, die Form der Bodenatmung, die Permafrost-Zeitform und die geochemischen Ansätze. Nicht jede Unsicherheit der realen Modell-Erde ist damit bereits abgedeckt. Ein

globaler Wasserindex ersetzt insbesondere keine Landkarte von Böden, Pflanzen, Niederschlag und Temperatur.

10 1 Suchverfahren und gefundene Extremwerte

Untersucht wurden sämtliche 2 048 Eckkombinationen der Parameterbox und 8 192 zusätzlich verteilte Innenpunkte. An jeweils sechs günstigen Startpunkten für Minimum und Maximum folgten adaptive eindimensionale Gitterprüfungen. Die beiden gefundenen Endfälle wurden anschließend mit genauerer direkter Integration nachgerechnet. Die Innenpunkte dienen der Suche; ihnen werden keine Wahrscheinlichkeiten zugewiesen.

Kennzahl	Kleinster gefundener Wert	Zentraler Lauf	Größter gefundener Wert
CO_2 im Jahr 200	288,7 ppm	333,8 ppm	428,0 ppm
Änderung ab 300 ppm	−11,3 ppm	+33,8 ppm	+128,0 ppm
Abstand zum Zentralwert	−45,1 ppm	0,0 ppm	+94,2 ppm
Thermischer Landparameter g_L	10 GtC/K	45 GtC/K	90 GtC/K
Permafrostverlust	10 GtC	40 GtC	80 GtC
Wasserindex am Ende	1,0513	0,9881	0,9324
Reguläres Land netto	+54,83 GtC	−46,35 GtC	−243,45 GtC

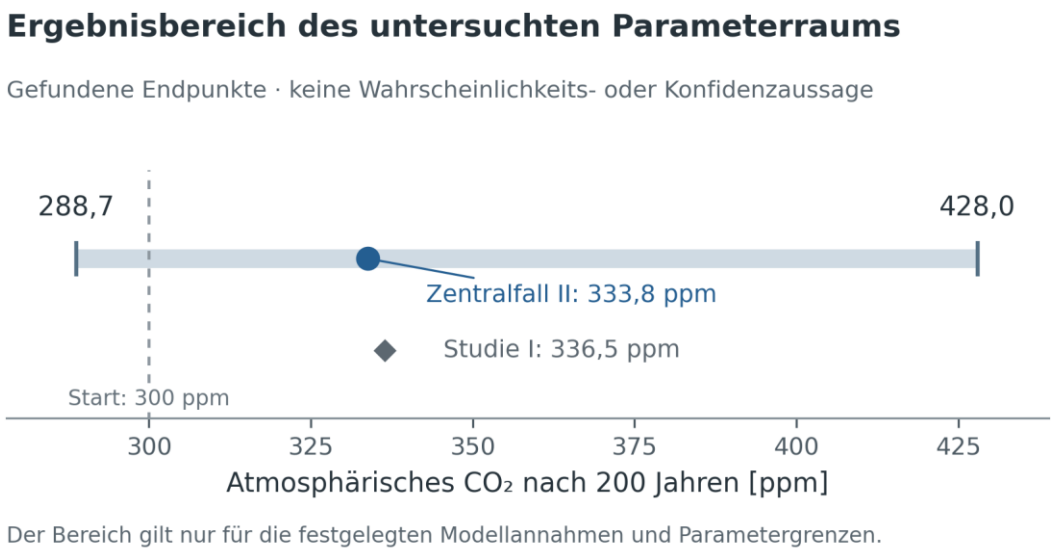

Abbildung 3 Kleinste und größte gefundene Endkonzentration innerhalb der ausgewiesenen Parameterbox einschließlich Retentionstest. Das Intervall ist eine bedingte Modellspanne und kein Konfidenzintervall.

Der untere Endfall kombiniert geringe thermische Verluste, wenig Permafrostfreisetzung und eine starke günstige Wirkung verbesserter Wasserverfügbarkeit auf die Produktion. Trotz Erwärmung gewinnt das reguläre Land dann netto Kohlenstoff; der CO_2-Anteil sinkt geringfügig. Der obere Fall kombiniert starke Verluste, stärkeren Trockenstress, schwächere CO_2-Reaktion und geringe Retention zusätzlichen Kohlenstoffs im Boden.

An beiden Rändern ist η = 0,15. Das ist kein Widerspruch: Oberhalb von 300 ppm dämpft eine stärkere CO_2-Wirkung den Anstieg. Unterhalb von 300 ppm vermindert sie die Produktion stärker und dämpft

dadurch den Rückgang. Eine starke CO_2-Rückkopplung stabilisiert somit in beiden Richtungen. Am unteren Rand ist ρ praktisch wirkungslos, weil kaum positive CO_2-Mehrproduktion entsteht.

Wird die Bodenretention auf den zentralen Wert ρ = 1 beschränkt, lag der größte gefundene Endwert bei 416,0 ppm. Die zusätzliche Retentionsvariation erweitert die obere Rechenspanne auf 428,0 ppm. Auch dieser Wert ist keine bewiesene globale Optimallösung und keine physikalische Obergrenze. Größere Modellräume können größere Spannweiten erzeugen.

10 2 Was als maximale Unsicherheit angegeben werden kann

Für das hier definierte Modell kann man als breit angesetzte Variationsspanne rund 139 ppm angeben, entsprechend etwa 289 bis 428 ppm im Jahr 200. Fachlich angemessen ist die gerundete Angabe „etwa 290 bis 430 ppm innerhalb der untersuchten Annahmen“. Aus 13,5 °C, 300 ppm und +2 K allein lässt sich dagegen keine absolute maximale CO_2-Spanne ableiten. Dafür fehlen unter anderem eindeutige Anfangsvorräte, regionale Klimaänderungen und Grenzen für die ausgelassenen Prozesse.

Auch ein symmetrisches „334 ± 70 ppm“ wäre irreführend: Die gefundenen Abstände sind asymmetrisch, und keine Wahrscheinlichkeiten wurden bestimmt. Die frühere Spanne war ebenfalls eine Szenarienspanne. Die Erweiterung bedeutet, dass mehr Annahmen geprüft wurden; sie ist keine neue Messung einer Naturkonstante.

11 Weitere möglicherweise wichtige Prozesse

Die folgenden Lücken sind nach ihrer Bedeutung für die Vereinfachungen dieses Modells geordnet. Eine gesicherte Rangfolge ihrer globalen ppm-Beiträge lässt sich daraus nicht ableiten. Sie begrenzen, wie vollständig die angegebene Rechenspanne ist.

Prozessgruppe	Mögliche Wirkung	Derzeitige Behandlung	Für eine Erweiterung nötig
Stickstoff und Phosphor	Wachstum begrenzen oder nach Mineralisierung fördern	In η und k_N pauschal	Nährstoffvorräte und Rückflüsse
Priming und Bodenstabilisierung	Alten Kohlenstoff mobilisieren oder neu binden	Nur Retention des Mehrkohlenstoffs variiert	Minerale, Mikroben und Substratklassen
Regionale Dürren und Saisonalität	Produktion, Mortalität und Abbau unterschiedlich verändern	Ein globaler Wasserindex	Räumliche Wasserbilanz und Extremereignisse
Natürliche Brände und Mortalität	Episodische Freisetzung und verzögerte Regeneration	Nur Hintergrundumsatz	Zündung, Brennstoff und Erholung
Marine Biologie und Schichtung	Export, Nährstoffe und Remineralisierung verändern	Physikalischer Austausch Q	Biologische Ozeanmodule
Abruptes Tauen und Feuchtgebiete	CO_2- und CH_4-Freisetzung, Wiederbewuchs	Vorgegebener Permafrostverlust	Thermokarst und hydrologische Zustände
Zusätzliches Solarlicht und Wolken	Photosynthese und diffuse Strahlung verändern	Kein eigener Lichtterm	Strahlungs- und Vegetationsmodell
Küsten Flüsse Torf Sedimente	Bestände verlagern, binden oder zersetzen	Keine getrennten Speicher	Erweiterte Stoff- und Flächenbilanz

Natürliche Feuer können auch ohne Menschen auftreten. Die Bedeutung von Blitzzündungen für große boreale Brandjahre ist untersucht [17]. Ein zusätzlicher Brandterm müsste die Änderung gegenüber dem ausgeglichenen Anfangsregime darstellen. Die gesamte natürliche Bruttofreisetzung erneut auf die Bilanz

aufzuschlagen wäre falsch. Analog müssen nach einem Ereignis Regeneration und gegebenenfalls langlebige pyrogene Kohlenstoffreste bilanziert werden.

Im Ozean beeinflussen Schichtung, Nährstoffversorgung und Licht die biologische Produktion; ihre Reaktion ist regional verschieden [16]. Ein veränderter Austauschparameter erfasst diese Prozesse nur teilweise. Weniger Durchmischung bestimmt deshalb allein weder Vorzeichen noch Betrag der zusätzlichen atmosphärischen CO_2-Wirkung. Die Emissionspfade und Flusszahlen anderer Modellstudien werden nicht in diese menschenfreie Rechnung übernommen.

Abruptes Permafrosttauen kann den Wasserhaushalt durch Bodensenkung, Seenbildung und Entwässerung verändern; erneute Vegetation kann gleichzeitig Kohlenstoff binden [18]. Die einfache Freisetzungskurve bildet diese räumliche Entwicklung nicht ab. Ein eigener Methanpool würde zudem Kohlenstoff zunächst als CH_4 speichern und erst später teilweise als CO_2 freigeben. Seine zusätzliche Strahlungswirkung darf beim hier fest vorgegebenen Gesamt-Temperaturpfad nicht als weitere Erwärmung ergänzt werden.

Bei Flüssen und Küsten muss zwischen Transport und Nettoquellen unterschieden werden. Kohlenstoff, der vom Boden ins Meer gelangt, ist nicht schon deshalb atmosphärisches CO_2. Mehr Regen kann auch chemische Verwitterung verstärken, doch der hier kleine geochemische Rest ist keine vollständige Fluss-Ozean-Sedimentrechnung. Für all diese fehlenden Prozesse wird kein pauschaler zusätzlicher ppm-Aufschlag erfunden.

12 Prüfung Nachrechenbarkeit und Schlussfolgerung

Das Modell wurde numerisch integriert und auf geschlossene Kohlenstoffbilanz geprüft. Ohne Erwärmung bleiben alle Änderungen null und die Konzentration bei 300 ppm. In den gezielten Vergleichsläufen liegt der Bilanzrest unter 10^{-12} GtC. Eine feinere Integration verändert den zentralen Endwert um weniger als 10^{-8} ppm. Die genau nachintegrierten Extremfälle stimmen mit der schnellen Ensembleberechnung besser als 10^{-6} ppm überein. Diese Genauigkeit betrifft die Rechnung, nicht die naturwissenschaftliche Unsicherheit der Parameter.

Zusätzliche Kontrollläufe ändern die Bodenumsatzzeit auf 30 beziehungsweise 100 Jahre und bringen Anfangsgleichgewicht und thermischen Vergleichsverlust erneut in Übereinstimmung. Die Endwerte betragen 332,9 und 335,6 ppm. Dabei ändern sich auch der Übergangsanteil f und der kalibrierte Produktionskoeffizient. Die kleinen Differenzen beweisen daher nicht, dass Bodenumsatzzeiten generell unwichtig wären. Ein gesonderter Fall mit klimabedingtem Nettoaufbau des Landes, $g_L = -45$ GtC/K, ergibt 298,5 ppm und liegt außerhalb der positiven g_L-Hauptbox.

Das beigefügte Rechenpaket enthält den vollständigen Python-Code, die Parameter, jährliche Zeitreihen, die Ergebnisse der Suche und die Abbildungen. Alle Modellannahmen sind von experimentellen Befunden getrennt. Die im Bericht verwendeten Zehntel ppm machen die Vergleiche nachvollziehbar; als zentrale Grobschätzung ist rund 334 ppm die angemessene Aussage.

Die Untersuchung bestätigt die dämpfende Wirkung zusätzlicher CO_2-Verfügbarkeit auf den Anstieg der Konzentration. Sie zeigt zugleich, warum zusätzlicher Regen allein die Nettoaufnahme nicht festlegt: Produktion, Verdunstungsanspruch, Bodenabbau und Verweildauer reagieren gemeinsam. Der zentrale Anstieg bleibt mit rund 34 ppm von derselben Größenordnung wie im ersten Papier. Innerhalb breit kombinierter, ausdrücklich begrenzter Modellannahmen reicht die gefundene Antwort jedoch von einem kleinen Rückgang bis zu einem Anstieg um rund 128 ppm. Eine absolute maximale Unsicherheit des natürlichen Erdsystems ist mit diesem einfachen globalen Modell nicht bestimmt.

Quellen und Bezugspapier

[1] Studie I (2026). Natürlicher CO2 Kreislauf bei solarer Erwärmung. Ein Schätzmodell für eine menschenfreie Erde über 200 Jahre. Modellversion 1.0, Arbeitsbericht vom 25. November 2026, 10 Seiten. Begleitdateien: Natuerlicher_CO2_Kreislauf_Schaetzmodell.pdf und CO2_Schaetzmodell_Code_und_Daten.zip.

[2] Norby RJ et al (2005). Forest response to elevated CO_2 is conserved across a broad range of productivity. PNAS 102, 18052–18056.
https://doi.org/10.1073/pnas.0509478102

[3] Norby RJ et al (2010). CO_2 enhancement of forest productivity constrained by limited nitrogen availability. PNAS 107, 19368–19373.
https://doi.org/10.1073/pnas.1006463107

[4] Jiang M et al (2020). The fate of carbon in a mature forest under carbon dioxide enrichment. Nature 580, 227–231.
https://doi.org/10.1038/s41586-020-2128-9

[5] Norby RJ et al (2024). Enhanced woody biomass production in a mature temperate forest under elevated CO_2. Nature Climate Change 14, 983–988.
https://doi.org/10.1038/s41558-024-02090-3

[6] Terrer C et al (2021). A trade-off between plant and soil carbon storage under elevated CO_2. Nature 591, 599–603.
https://doi.org/10.1038/s41586-021-03306-8

[7] Erb KH et al (2018). Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. Nature 553, 73–76.
https://doi.org/10.1038/nature25138

[8] Haberl H et al (2007). Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. PNAS 104, 12942–12947.
https://doi.org/10.1073/pnas.0704243104

[9] Held IM und Soden BJ (2006). Robust Responses of the Hydrological Cycle to Global Warming. Journal of Climate 19, 5686–5699.
https://doi.org/10.1175/JCLI3990.1

[10] Bala G, Duffy PB und Taylor KE (2008). Impact of geoengineering schemes on the global hydrological cycle. PNAS 105, 7664–7669.
https://doi.org/10.1073/pnas.0711648105

[11] Andrews T et al (2010). Precipitation, radiative forcing and global temperature change. Geophysical Research Letters 37, L14701.
https://doi.org/10.1029/2010GL043991

[12] Scheff J und Frierson DMW (2014). Scaling Potential Evapotranspiration with Greenhouse Warming. Journal of Climate 27, 1539–1558.
https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00233.1

[13] Swann ALS et al (2016). Plant responses to increasing CO_2 reduce estimates of climate impacts on drought severity. PNAS 113, 10019–10024.
https://doi.org/10.1073/pnas.1604581113

[14] Ghezzehei TA et al (2019). On the role of soil water retention characteristic on aerobic microbial respiration. Biogeosciences 16, 1187–1209.
https://doi.org/10.5194/bg-16-1187-2019

[15] Green JK et al (2019). Large influence of soil moisture on long-term terrestrial carbon uptake. Nature 565, 476–479.
https://doi.org/10.1038/s41586-018-0848-x

[16] Kwiatkowski L et al (2020). Twenty-first century ocean warming, acidification, deoxygenation, and upper-ocean nutrient and primary production decline from CMIP6 model projections. Biogeosciences 17, 3439–3470.
https://doi.org/10.5194/bg-17-3439-2020

[17] Veraverbeke S et al (2017). Lightning as a major driver of recent large fire years in North American boreal forests. Nature Climate Change 7, 529–534.
https://doi.org/10.1038/nclimate3329

[18] Turetsky MR et al (2020). Carbon release through abrupt permafrost thaw. Nature Geoscience 13, 138–143.
https://doi.org/10.1038/s41561-019-0526-0

Die Fachliteratur begründet die dargestellten Mechanismen und einzelne Größenordnungen. Die numerischen Modellparameter und ihre gemeinsamen Randkombinationen sind eigene, offengelegte Rechenannahmen. Ergebnisse anderer Emissionsszenarien werden nicht als zusätzliche Quellen dieser Modell-Erde übernommen. Literaturprüfung abgeschlossen am 25. November 2026.