Anthropogene CO_2 Emissionen und ihre Speicherung im Erdsystem

Literaturübersicht zu Emissionen und Speicheränderungen im globalen Kohlenstoffkreislauf

Dr. Klaus Retzlaff und Proto

Eine wissenschaftliche Kooperation von Mensch und KI

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

Ausführlicher Übersichtsbericht auf Grundlage veröffentlichter Forschung
Version 2.0 · Rechercheabschluss 25. November 2026

Kurzfassung

Die anthropogenen CO_2-Emissionen sind seit der Industrialisierung erheblich gestiegen. Der aktuelle Global Carbon Budget 2026 beziffert die Emissionen des abgeschlossenen Jahres 2025 auf **42,8 ± 3,2 $GtCO_2$**. Im Mittel 2016–2025 ordnet er **48 % der Emissionen dem atmosphärischen Zuwachs, 27 % der Ozeansenke und 22 % der Landsenke** zu; **3 % bleiben als Bilanzdifferenz**. Diese Zahlen sind veröffentlichte Schätzungen und werden unverändert wiedergegeben. Die Ausgabe 2026 liegt am Recherchestichtag als Preprint im Begutachtungsverfahren vor. [1]

Die große Aufnahme durch Land und Ozean wird durch unterschiedliche Beleglinien gestützt: globale Budgets, Kohlenstoffmessungen im Ozeaninneren, Waldinventuren und kombinierte atmosphärische O_2- und CO_2-Messungen. Die genaue Aufteilung und ihre zeitliche Entwicklung bleiben methodenabhängig. Neuere Arbeiten berichten eine zunehmende Ozeanaufnahme, eine über mehrere Jahrzehnte nicht entsprechend zunehmende gesamte Netto-Landaufnahme sowie starke kurzfristige Landverluste während des El Niño 2023/24. [6–12]

Für die Interpretation sind jährliche Flüsse und kumulierte Bestände, fossile und gesamte anthropogene Emissionen sowie Landsenke und gesamte Netto-Landbilanz getrennt zu behandeln. Kohlenstoff wird beim Übergang in einen Speicher nicht vernichtet. Eine offen ausgewiesene Bilanzdifferenz bezeichnet keine zusätzliche, nachgewiesene Senke. Der Bericht enthält keine eigene Budgetrechnung, keine neu berechneten Anteile und keinen statistisch gepoolten Meta-Schätzwert.

1 Fragestellung und Vorgehen

Untersucht wird die reale globale Entwicklung der vom Menschen verursachten CO_2-Emissionen und ihr veröffentlichter Verbleib im Erdsystem. Der historische Rahmen reicht bis in das 19. Jahrhundert zurück; die regelmäßig beobachtete neuere Bilanz beginnt mit dem Ausbau der atmosphärischen Messungen. Der Bericht behandelt CO_2 und Kohlenstoff, nicht die Summe aller Treibhausgase in CO_2-Äquivalenten. Länderbezogene Verantwortungszuweisungen, Klimaziele und politische Maßnahmen sind kein Gegenstand der Auswertung.

Die Recherche wurde am 25. November 2026 abgeschlossen. Gesucht wurde gezielt nach den neuesten Ausgaben des Global Carbon Budget sowie nach Primärarbeiten zu Emissionsinventaren, Ozeaninventuren, Waldspeichern, atmosphärischem Sauerstoff und kurzfristiger Senkenvariabilität. Für die Prozessdarstellung wurden außerdem Primärarbeiten zur Ozeanchemie, zu CO_2-Anreicherungsexperimenten, zur Nährstoffbegrenzung und zu Brandverlusten ergänzt. Ergänzt wurden Veröffentlichungen der Messstellen NOAA und WMO sowie der Fachbericht The State of Carbon Dioxide Removal. Auswahlkriterien waren ein überprüfbarer Originalbefund, eine erkennbare Systemgrenze, ein

bestimmter Bezugszeitraum und eine nachvollziehbare Methode. Die Übersicht beansprucht keine vollständige Erfassung sämtlicher weltweit erschienener Arbeiten.

Die Auswertung ist eine **strukturierte narrative Literaturübersicht**. Eine statistische Meta-Analyse mit einem neuen gemeinsamen Schätzwert wäre wegen unterschiedlicher Zielgrößen, Zeiträume und gemeinsam verwendeter Daten nicht angemessen. Andrew dokumentiert, dass zahlreiche Emissionsdatensätze auf denselben nationalen Energieinformationen beruhen und sich vor allem in Systemgrenzen und Aufbereitung unterscheiden. Wiederholte Budgetausgaben sind außerdem revidierte Fassungen einer Datenfamilie. Ihre Übereinstimmung darf nicht als entsprechende Anzahl unabhängiger Messungen behandelt werden. [3]

Alle Zahlen, Prozentanteile, Wachstumsraten und Unsicherheiten werden aus den Originalquellen übernommen. Es werden weder Einheiten umgerechnet noch eigene Jahresmittel, Differenzen, Quotienten oder Fehlergrenzen gebildet. Die Abbildungen geben publizierte Tabellenwerte lediglich grafisch wieder. Wo die Quellen verschiedene Unsicherheitskonventionen verwenden, bleiben diese erhalten. Die Gegenüberstellung der Befunde ist eine quellenkritische Synthese; sie ersetzt keine Neuauswertung der Rohdaten.

Der neueste vollständig begutachtete Budgetartikel heißt **Global Carbon Budget 2025**, erschien jedoch am 13. Mai 2026. Der **Global Carbon Budget 2026** wurde am 10. November 2026 als noch nicht abschließend begutachteter Preprint veröffentlicht. Diese unterschiedliche Bezeichnung von Berichtsjahr und Publikationsjahr ist bei der Quellenzuordnung wesentlich. Für die konsistente historische Tabelle wird die Ausgabe 2026 verwendet; der begutachtete Vorgänger dient zur Kontrolle und Einordnung von Revisionen. [1, 2]

2 Begriffe und Grenzen der Kohlenstoffbilanz

Eine **Quelle** setzt Kohlenstoff frei, eine **Senke** nimmt ihn über einen Zeitraum netto auf, und ein **Speicher** enthält einen Bestand. Derselbe Ozean oder Wald kann Kohlenstoff aufnehmen und gleichzeitig abgeben. Für die zusätzliche Speicherung ist der Nettofluss entscheidend. Die Atmosphäre ist in der hier verwendeten Bilanz ein wachsender Speicher; ihre Zunahme ist keine Entfernung von CO_2 aus der Luft. Diese begriffliche Trennung verhindert, dass große natürliche Austauschflüsse mit der Aufnahme zusätzlicher anthropogener Emissionen verwechselt werden. [2, 13]

Das anthropogene Budget beschreibt die Veränderung eines bereits aktiven Kreislaufs gegenüber seinem vorindustriellen Zustand. Natürliche Aufnahme und Abgabe finden gleichzeitig statt. Für den atmosphärischen Speicher ist entscheidend, welcher Nettoüberschuss aus diesen gegenläufigen Flüssen verbleibt. So kann der Ozean regional CO_2 freisetzen und global zugleich zusätzlichen Kohlenstoff aufnehmen. Der GCB beschreibt ausdrücklich, dass natürliche regionale Meeresflüsse bei globaler Integration weitgehend gegeneinander aufgehen. Die Größe einzelner Bruttoflüsse sagt deshalb für sich genommen wenig darüber aus, welcher Prozess den globalen Speicherzuwachs verursacht. [1, Einleitung und §3.6.2; 2, Einleitung]

Die ausgewiesenen Senkenanteile bezeichnen entsprechend Änderungen von Beständen über festgelegte Zeiträume. Sie bilden keine dauerhafte Aufteilung eines einzelnen Emissionsjahrgangs auf voneinander abgeschlossene Behälter ab. Land, Atmosphäre und Ozean bleiben durch Austausch verbunden; die zusätzliche Kohlenstoffmenge verteilt sich über mehrere Zeitskalen. Der Modellvergleich von Joos und Kollegen liefert die begriffliche Grundlage für diese Unterscheidung. Für die historische Literaturauswertung folgt daraus, dass jährlicher Nettofluss, kumulierter Speicherzuwachs und langfristige Beständigkeit einer Speicherung jeweils eine eigene Frage beantworten. [13; 2, Einleitung]

Das Global Carbon Budget verwendet die folgende Bilanzidentität. Sie wird hier zur Erläuterung der veröffentlichten Größen wiedergegeben und nicht zu einer eigenen Rechnung eingesetzt: [1, 2]

$$E_{FOS} + E_{LUC} = G_{ATM} + S_{OCEAN} + S_{LAND} + B_{IM}$$

Größe	Bedeutung	Art der Größe	Abgrenzung
E_{FOS}	Fossile und industrielle CO_2-Emissionen	Quellfluss	Im GCB einschließlich Abzug der Zementkarbonatisierung
E_{LUC}	Emissionen aus Landnutzung und Bewirtschaftung	Nettoquellfluss	Enthält Freisetzung und landnutzungsbedingte Aufnahme
G_{ATM}	Zunahme des atmosphärischen Kohlenstoffs	Speicherzuwachs pro Zeit	Aus Konzentrationsmessungen abgeleitet
S_{OCEAN}	Zusätzliche Ozeanaufnahme	Senkenterm	Störung gegenüber dem vorindustriellen Austausch
S_{LAND}	Landaufnahme infolge von Umweltänderungen	Senkenterm	Direkte Landnutzungsflüsse werden gesondert geführt
B_{IM}	Nicht geschlossener Teil der Schätzbilanz	Bilanzdifferenz	Kein physikalischer Speicher und keine nachgewiesene Senke

S_{LAND} ist bereits eine Nettoaufnahme gegenüber Atmung, Abbau und weiteren enthaltenen Verlustprozessen. Der Begriff „Brutto-Landsenke“ wäre dafür irreführend. Weil die direkten Landnutzungswirkungen separat als E_{LUC} geführt werden, entspricht die gesamte Nettoaufnahme der Landflächen einschließlich Landnutzung der Größe $\mathbf{S_{LAND} - E_{LUC}}$. Die unterschiedlichen Darstellungen beantworten unterschiedliche Bilanzfragen. [1, 2]

Landnutzung umfasst unter anderem Rodung, Wiederbewaldung, Holzernte und Torfentwässerung. Aufforstungsbedingte Aufnahme ist daher bereits ein negativer Bestandteil von E_{LUC}. Auch Waldbrandemissionen dürfen nicht pauschal zusätzlich auf das Budget aufgeschlagen werden: Je nach Ursache sind sie in Landnutzung, Ökosystemantwort oder natürlichen Störungs- und Erholungszyklen enthalten. Die Karbonatisierung von Zement wird im verwendeten E_{FOS} bereits berücksichtigt. Eine nochmalige Anrechnung solcher Flüsse würde doppelt zählen. [2]

Einheiten: GtC bezeichnet Milliarden Tonnen Kohlenstoff; Pg C ist dieselbe Masseneinheit. $GtCO_2$ bezeichnet die Masse des gesamten Kohlendioxids. Ein Jahresfluss wird mit „pro Jahr“ angegeben, ein kumulierter Bestand ohne diesen Zusatz. Wo eine Veröffentlichung beide Einheiten angibt, werden diese beiden Literaturwerte genannt. Prozentanteile erhalten stets den Nenner und den Bezugszeitraum.

3 Historische Entwicklung der anthropogenen Emissionen

Die heutige Dominanz fossiler Emissionen entstand im Verlauf einer längeren Verschiebung. Die Einleitung des Global Carbon Budget beschreibt Entwaldung und weitere Landnutzungsänderungen als zunächst wichtigste Ursache des anthropogenen Konzentrationsanstiegs; um 1950 wurden fossile Quellen zur vorherrschenden anthropogenen Emissionsquelle. Dabei gelangen durch die Nutzung von Kohle, Erdöl und Erdgas Kohlenstoffbestände aus geologischen Lagerstätten in den aktiven Kreislauf, während Landnutzung vor allem bereits vorhandene Bestände der Vegetation und Böden verändert. Diese unterschiedliche Herkunft erklärt, weshalb beide Quellgruppen im Budget getrennt rekonstruiert werden. Das Jahr 1850 dient als Bezugsdatum der hier ausgewerteten kumulierten Bilanz; menschliche Eingriffe in den Kohlenstoffkreislauf reichen weiter zurück. [1, Einleitung; 2, Einleitung]

Auch innerhalb der neueren Entwicklung verlief das Wachstum ungleichmäßig. Der Vorabdruck 2026 beschreibt für die fossilen Emissionen eine Abschwächung der Wachstumsraten zwischen den 1960er- und 1990er-Jahren, eine erneute Beschleunigung in den 2000er-Jahren und anschließend wieder geringere Wachstumsraten. Die verlangsamte Zunahme der gesamten anthropogenen Emissionen in der

jüngsten Dekade führen die Autoren auf zwei Entwicklungen zurück: geringeres Wachstum der fossilen Quelle und einen Rückgang der Netto-Landnutzungsquelle. Deshalb muss eine Aussage über die gesamte Emissionsentwicklung beide Komponenten berücksichtigen. Ein höherer fossiler Anteil bedeutet dabei für sich genommen weder wachsende Entwaldung noch eine entsprechend kleinere absolute Kohlenstofffreisetzung aus Landnutzung. [1, §§3.1.2, 3.2.2 und 3.4; Preprint]

Die Dekadenübersicht zeigt den langfristigen Anstieg der fossilen und industriellen Emissionen. Die Landnutzungsquelle entwickelt sich anders und besitzt eine wesentlich größere relative Unsicherheit. Die Werte stammen vollständig aus einer einzigen Budgetausgabe; historische Einträge werden deshalb nicht aus unterschiedlichen Veröffentlichungsständen zusammengesetzt. [1, Tabelle 7]

Tabelle 1. Veröffentlichte Emissionen in GtC pro Jahr. Dekadenmittel beziehungsweise Jahreswert; ±1 Standardabweichung nach GCB 2026. E_{FOS} enthält bereits die Zementkarbonatisierung.

Zeitraum	Fossil und Industrie E_{FOS}	Landnutzung E_{LUC}	Anthropogen gesamt
1960–1969	3,0 ± 0,2	1,8 ± 0,7	4,9 ± 0,7
1970–1979	4,6 ± 0,2	1,7 ± 0,7	6,3 ± 0,7
1980–1989	5,4 ± 0,3	1,6 ± 0,7	7,1 ± 0,8
1990–1999	6,4 ± 0,3	1,8 ± 0,7	8,2 ± 0,8
2000–2009	7,8 ± 0,4	1,7 ± 0,7	9,5 ± 0,8
2010–2019	9,5 ± 0,5	1,6 ± 0,7	11,2 ± 0,8
2016–2025	10,0 ± 0,5	1,3 ± 0,7	11,3 ± 0,9
2025	10,5 ± 0,5	1,2 ± 0,7	11,7 ± 0,9

Quelle: [1], Tabelle 7, S. 121–122. Die Autoren runden die Werte; die angezeigten Einzelgrößen müssen deshalb nicht exakt zur angezeigten Summe addieren. Das Mittel 2016–2025 überlappt die 2010er-Jahre und ist keine zusätzliche, unabhängige Dekade.

Für 2025 nennt die Veröffentlichung neben 11,7 ± 0,9 GtC ausdrücklich **42,8 ± 3,2 $GtCO_2$**. Die Gesamtmenge der anthropogenen Emissionen wuchs 2016–2025 nach Angabe der Autoren im Mittel um **0,3 % pro Jahr**, gegenüber **1,7 % pro Jahr** in der vorangegangenen Dekade 2006–2015. Das beschreibt verlangsamtes Wachstum, nicht einen entsprechenden Rückgang der jährlichen Emissionsmenge. Die publizierte Aufteilung der Quellen beträgt für 2016–2025 **88 % fossil und industriell sowie 12 % Landnutzung**. [1, §3.4 und §3.9.1]

Für das noch laufende Jahr 2026 nennt der Vorabdruck eine **Projektion** von insgesamt 43,3 $GtCO_2$. Sie ist keine abgeschlossene Jahresbilanz und wird in der historischen Ergebnistabelle nicht als beobachteter Jahreswert geführt. Auch die Landsenkenprojektion für 2026 ist besonders zu kennzeichnen: Sie wird im Budget aus den anderen projizierten Termen als Residuum bestimmt und liefert deshalb keinen unabhängigen Nachweis einer geschlossenen Bilanz. [1, §2.6.2; 17]

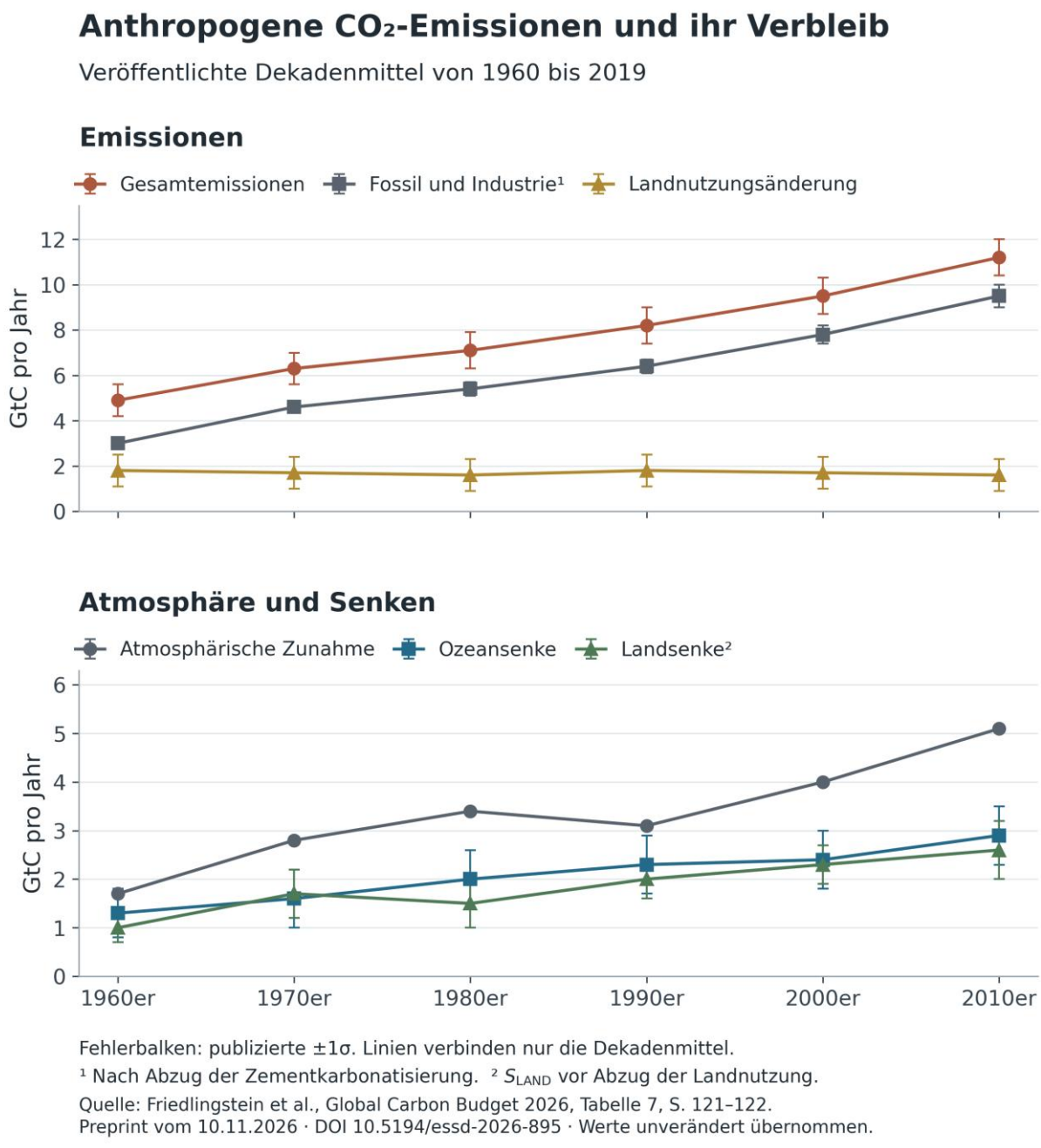

Abbildung 1. Grafische Wiedergabe der publizierten Dekadenmittel aus GCB 2026, Tabelle 7. Die sechs Dekaden sind zeitlich getrennt. Linien verbinden die veröffentlichten Werte zur Orientierung; es wird kein Trend angepasst. S_{LAND} bezeichnet die Umweltantwort bei gesondert bilanziertem E_{LUC}. Quelle [1], Preprint vom 10. November 2026.

3 1 Ermittlung fossiler und industrieller Emissionen

Die Datengrundlage bilden Angaben über Brennstoffmengen und industrielle Produktion. Der von Andrew untersuchte Referenzansatz verwendet Informationen über Förderung, Außenhandel und Lagerveränderungen; der sektorale Ansatz stützt sich auf detaillierte Verbrauchsdaten. Brennstoffspezifische Emissionsfaktoren verbinden diese Aktivitäten mit dem freigesetzten Kohlenstoff. Unterschiedliche Brennstoffqualitäten, Umrechnungen zwischen physischen Mengen und Energieeinheiten sowie die Behandlung nichtenergetischer Verwendungen beeinflussen die Ergebnisse. Diese methodischen Unterschiede erklären einen Teil der Abweichungen zwischen Emissionsinventaren, selbst wenn dieselben nationalen Ausgangsstatistiken verwendet werden. [3, §§3 und 8]

Das Global Carbon Budget kombiniert mehrere Datenbestände nach einer festgelegten Priorität. Dazu gehören nationale Berichte an die Klimarahmenkonvention, historische Reihen des CDIAC-FF und aktuelle

Energiestatistiken; industrielle Prozesse werden ergänzend berücksichtigt. Damit entsteht eine über Länder und Zeiträume harmonisierte Rekonstruktion. Eine Quellenangabe wie „energiebedingte CO_2-Emissionen“ allein genügt für einen Zahlenvergleich allerdings nicht: Industrielle Prozessfreisetzungen, internationale Schiffs- und Flugkraftstoffe sowie nichtenergetische Brennstoffverwendungen können unterschiedlich abgegrenzt sein. Erst die Prüfung der enthaltenen Aktivitäten zeigt, ob zwei Veröffentlichungen dieselbe Größe beschreiben. [2, §2.1.1; 3, §§3 und 8]

Zement veranschaulicht diese Abgrenzung besonders deutlich. Zu berücksichtigen sind sowohl der Brennstoffeinsatz für die Herstellung als auch die CO_2-Freisetzung bei der chemischen Zersetzung von Carbonaten. Fertige zementhaltige Materialien nehmen im Laufe ihrer Nutzung und weiterer Lebensphasen wiederum atmosphärisches CO_2 durch Karbonatisierung auf. Diese Aufnahme hängt auch vom Bestand älterer Produkte ab. Der im Budget ausgewiesene fossile und industrielle Term enthält den entsprechenden Abzug bereits. Die Emissionen der Herstellung und die spätere Aufnahme werden deshalb zeitlich und sachlich zugeordnet, bevor sie in die Gesamtbilanz eingehen. [1, §2.1.1; 2, §2.1.1]

3 2 Landnutzung als fortwirkende Veränderung von Speichern

Für Landnutzung reicht eine Erfassung der aktuell gerodeten Fläche nicht aus. Die Buchhaltungsmodelle verfolgen, wie sich Kohlenstoffbestände nach einer Nutzungsänderung weiterentwickeln: Vegetation wird entfernt, organisches Material zersetzt, Kohlenstoff gelangt in Holzprodukte und nachwachsende Vegetation nimmt ihn wieder auf. Ein Teil der heutigen Freisetzung oder Aufnahme geht somit auf frühere Eingriffe zurück. Die jährliche Bilanz verbindet diese zeitlich fortwirkenden Folgen mit neuen Flächenänderungen. In der Ausgabe 2026 werden dafür die Modelle BLUE, LUCE und OSCAR verwendet; Informationen über Torfbrände und Torfentwässerung kommen aus ergänzenden Datensätzen hinzu. [1, §2.2.1]

Die Modelle benötigen Annahmen über die Kohlenstoffvorräte von Vegetation und Böden. Deren Höhe beeinflusst, welche Freisetzung einer bestimmten Flächenänderung zugeordnet wird. Der begutachtete GCB 2025 erläutert als methodischen Fortschritt, dass alle drei verwendeten Buchhaltungsmodelle zeitlich veränderliche Kohlenstoffdichten berücksichtigen. Dadurch können auch Umweltänderungen, etwa die steigende CO_2-Konzentration, die geschätzten Folgen einer Landnutzungsänderung beeinflussen. Die Nettoquelle entsteht aus der gemeinsamen Betrachtung von Freisetzung und Wiederaufnahme. Ein Rückgang dieses Nettoergebnisses kann daher gleichzeitig mit fortgesetzten Rodungen und erheblichem Wiederaufwuchs auftreten. [2, §§2.2.1 und 3.2.2]

Hinzu kommt ein Unterschied der Bilanzkonventionen. Nationale Treibhausgasinventare rechnen den als bewirtschaftet definierten Flächen häufig auch Kohlenstoffflüsse zu, die durch veränderte Umweltbedingungen entstehen. Im Global Carbon Budget werden solche Antworten teilweise im gesonderten Landsenkenterm geführt. Eine nationale Landbilanz und die globale Landnutzungsquelle sind deshalb erst nach einer Übertragung auf vergleichbare Definitionen gegenüberzustellen. Die im GCB beschriebene Übersetzung zwischen diesen Ansätzen zeigt, weshalb abweichende Landwerte teilweise aus der Zuordnung derselben Prozesse entstehen. [2, §2.2.1 und §3.2.2]

4 Jährliche Verteilung auf Atmosphäre und Senken

Für die Frage nach dem Verbleib der laufenden Emissionen ist ein Mehrjahresmittel aussagekräftiger als ein einzelnes durch El Niño, Dürre oder Feuer geprägtes Jahr. Die folgende Tabelle enthält sowohl die aktuelle Dekade als auch den jüngsten abgeschlossenen Jahreswert. Die Prozentangaben gehören ausschließlich zum Dekadenmittel. [1]

Tabelle 2. Veröffentlichte Aufteilung des Budgets. Massenflüsse in GtC pro Jahr; Unsicherheiten wie in Tabelle 7 des GCB 2026.

Bilanzgröße	Mittel 2016–2025	Anteil 2016–2025	Jahr 2025
Atmosphärischer Zuwachs G_{ATM}	5,4 ± 0,02	48 %	4,4 ± 0,2
Ozeansenke S_{OCEAN}	3,0 ± 0,6	27 %	3,2 ± 0,7
Landsenke S_{LAND}	2,5 ± 0,7	22 %	3,6 ± 0,9
Bilanzdifferenz B_{IM}	0,4	3 %	0,5

Quelle: [1], Tabelle 7 und §3.9.1. Für B_{IM} wird in dieser Tabelle keine zusätzliche Unsicherheit angegeben. Die Anteile wurden direkt aus dem Ergebnistext übernommen und nicht aus den gerundeten Massen neu berechnet.

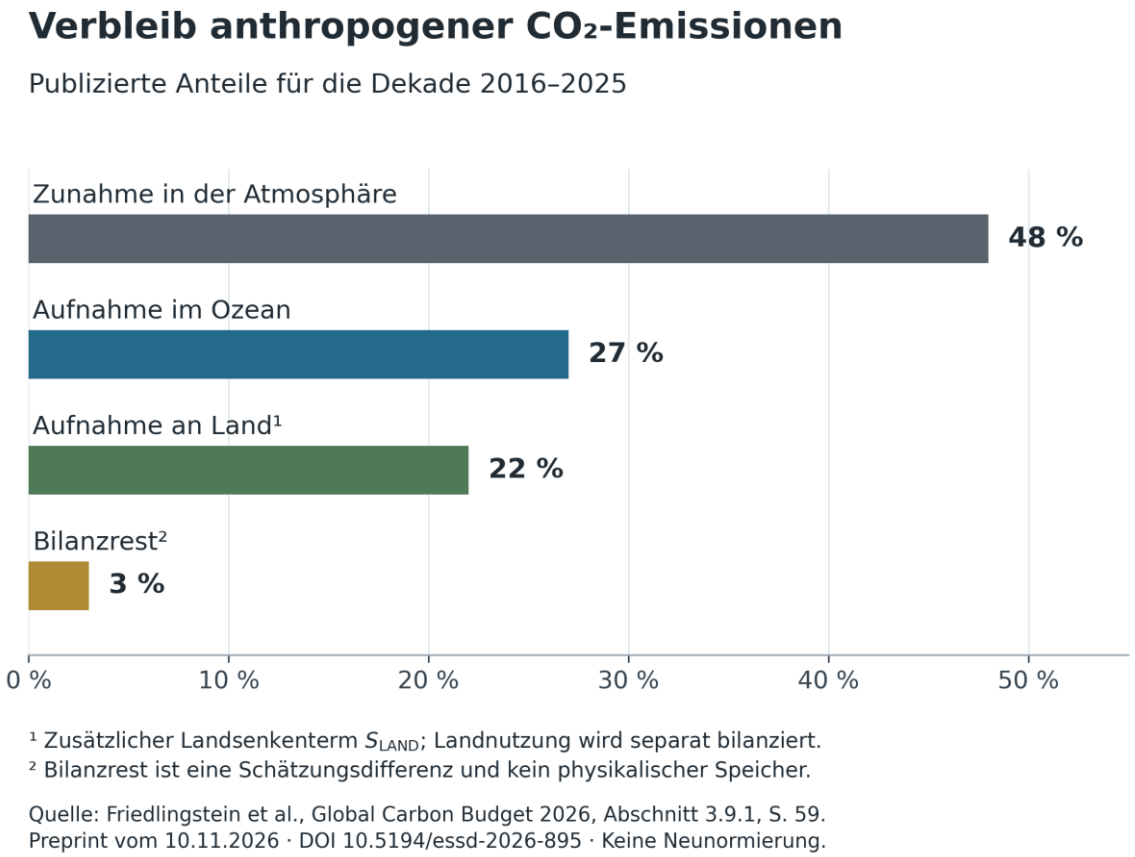

Abbildung 2. Veröffentlichte Anteile an den gesamten anthropogenen Emissionen 2016–2025. Die Bilanzdifferenz ist gesondert markiert und bezeichnet keine Aufnahme in ein weiteres Reservoir. Keine Neunormierung der Originalangaben. Quelle [1], §3.9.1.

Die institutionelle Zusammenfassung des Global Carbon Project nennt die gemeinsame Aufnahme durch Land und Ozean für diese Dekade mit **49 % der gesamten anthropogenen Emissionen**. Der atmosphärische Anteil beträgt gemäß dem Budget **48 %**; der verbleibende ausgewiesene Anteil ist die Bilanzdifferenz. Die Aussage „die andere Hälfte bleibt in der Atmosphäre“ ist daher nur eine grobe sprachliche Zusammenfassung und ersetzt die vollständige Bilanz nicht. [1, 18]

Für die gesamte Netto-Landaufnahme einschließlich Landnutzung publiziert dieselbe Ausgabe **1,2 ± 1,0 GtC pro Jahr für 2016–2025** und **2,4 ± 1,1 GtC pro Jahr für 2025**. Diese Werte sind ausdrücklich dem Text beziehungsweise Tabelle 5 entnommen; sie werden hier nicht als Differenz gerundeter Tabellenwerte berechnet. Die niedrigere Zahl gegenüber S_{LAND} entsteht durch die gesondert zu berücksichtigende Landnutzungsquelle. [1, §3.8.1.1 und Tabelle 5]

Der begutachtete Vorgänger GCB 2025 nennt für die andere Dekade **2015–2024** einen atmosphärischen Anteil von **50 %**, einen Ozeananteil von **29 %** und einen Landanteil von **21 %**, bei nahezu geschlossener Schätzbilanz. Beide Ausgaben stützen damit die Größenordnung einer umfangreichen natürlichen Aufnahme. Die Differenzen zwischen ihren Anteilen sind jedoch nicht als reine reale Veränderung innerhalb eines Jahres zu lesen: Zeitfenster, Daten und Methoden wurden aktualisiert. [2, §3.9.1]

Die veröffentlichten Luftverbleibanteile sind entsprechend historische Ergebnisse für bestimmte Zeitfenster und Emissionsdefinitionen. Sie sind keine allgemeine Konstante des Erdsystems. Eine zunehmende absolute Ozeanaufnahme und ein über einen begrenzten Zeitraum ähnlicher relativer Anteil können nebeneinander bestehen, wie Gruber et al. für ihre Bezugszeiträume berichten. NOAA dokumentiert zugleich deutliche jährliche Unterschiede des atmosphärischen Zuwachses; Morgan et al. finden unterschiedliche langfristige Entwicklungen von Land und Ozean. Diese Befunde erlauben konkrete Antworten zum bisherigen Verbleib. Sie begründen keine unveränderte Aufteilung bei anderen Emissionsverläufen oder zukünftigen Umweltbedingungen. [5, 7, 9, 13]

5 Kumulierte Emissionen und Speicherung seit 1850

Ein Jahresfluss und ein seit Beginn der Industrialisierung aufgelaufener Bestand beantworten verschiedene Fragen. Der GCB 2026 nennt für **1850–2025 insgesamt 755 ± 55 GtC**, ausdrücklich auch **2765 ± 205 $GtCO_2$**. Davon werden **510 ± 25 GtC** den fossilen und industriellen Quellen und **245 ± 50 GtC** der Landnutzung zugeordnet. Die publizierten Quellenanteile lauten **68 %** und **32 %**. [1, §3.4 und Tabelle 8]

Tabelle 3. Kumulierte Budgetterme 1850–2025. Originalwerte in GtC und direkt publizierte Anteile am gesamten anthropogenen Ausstoß.

Bilanzterm	Kumulierte Größe	Publizierter Anteil	Bedeutung
Atmosphäre	295 ± 5 GtC	39 %	Zunahme des atmosphärischen Bestands
Ozean	200 ± 55 GtC	26 %	Kumulierte zusätzliche Ozeanaufnahme
Land S_{LAND}	190 ± 40 GtC	25 %	Umweltbedingte Landaufnahme bei gesondertem E_{LUC}
Bilanzdifferenz	70 GtC	9 %	Nicht geschlossener Teil der Rekonstruktion

Quelle: [1], §3.9.1 und Tabelle 8, S. 123. Die publizierten Prozentwerte sind gerundet und summieren sich deshalb nicht exakt zu 100 %. Sie bleiben unverändert. Die in Tabelle 8 verwendeten Unsicherheiten folgen den komponentenspezifischen Verfahren der Autoren; es wird kein neues Gesamtintervall berechnet.

Der Land-Senkenterm darf nicht mit dem gesamten historischen Nettozuwachs aller Landspeicher verwechselt werden. Nach Einbezug der Landnutzungsverluste bezeichnen die Autoren die globale Landfläche über 1850–2025 im zentralen Schätzwert als **Nettoquelle von 55 ± 65 GtC**. Der Unsicherheitsbereich umfasst null. Daraus folgt keine statistisch eindeutig abgesicherte historische Nettoquelle, wohl aber die Notwendigkeit, Aufnahme und Landnutzungsverlust gemeinsam zu betrachten. [1, §3.9.1]

Die historische Bilanz ist weniger eng geschlossen als die jüngste Dekadenbilanz. Der Rest von 70 GtC ist keine Entdeckung eines unbekannten Kohlenstoffspeichers. Er bezeichnet die Diskrepanz zwischen separat geschätzten Emissionen und Speicheränderungen. Er kann aus Fehlern mehrerer Komponenten entstehen. Massenerhaltung gilt physikalisch unabhängig davon, ob die verfügbaren Rekonstruktionen sie numerisch vollständig wiedergeben. [1]

6 Aufnahmeprozesse und Beobachtungsbelege für die Speicherung

6 1 Ozeanprozesse und Messungen im Ozeaninneren

Die Aufnahme beginnt an der Meeresoberfläche. Ihre Richtung hängt vom Unterschied des CO_2-Partialdrucks beziehungsweise der thermodynamisch genaueren CO_2-Fugazität zwischen Luft und Wasser ab; Wind und Durchmischung beeinflussen den Austausch. Aufgenommenes CO_2 verteilt sich im Meerwasser auf gelöstes CO_2, Hydrogencarbonat und Carbonat. Der Speicher besteht daher überwiegend nicht aus unverändert gelösten CO_2-Molekülen. Erwärmung verändert sowohl die Gaslöslichkeit als auch die Gleichgewichte des gesamten Carbonatsystems. Bei sonst gleicher Wasserzusammensetzung erhöht sie die CO_2-Fugazität des Wassers und wirkt einer weiteren Aufnahme entgegen. Daraus folgt jedoch keine zwangsläufige globale Ausgasung: Gleichzeitig verändert der steigende atmosphärische CO_2-Gehalt die Antriebskraft des Austauschs. [2; 19, 20]

Dieser Austausch ist räumlich ungleich verteilt. Die aus Oberflächenmessungen abgeleitete Untersuchung von Takahashi et al. zeigt ausgeprägte Ausgasung im äquatorialen Pazifik, wo Auftrieb kohlenstoffreiches Wasser an die Oberfläche bringt. Andere Regionen nehmen netto CO_2 auf. Im Südlichen Ozean können sommerliche Aufnahme und winterliche Freisetzung einander teilweise ausgleichen. Die Temperatur allein erklärt deshalb weder die Richtung noch die Stärke eines regionalen Flusses. Hinzukommen Zirkulation, Wind und biologische Veränderungen des Oberflächenwassers. Ein an einer Messstation beobachteter Rückfluss widerspricht der globalen Ozeansenke nicht; er kann Teil desselben räumlichen Austauschsystems sein. [19]

Für längerfristige Speicherung muss der zusätzlich aufgenommene Kohlenstoff über die unmittelbar mit der Atmosphäre verbundene Oberflächenschicht hinaus verteilt werden. Strömungen, Mischung und die Bildung beziehungsweise Verlagerung von Wassermassen verbinden deshalb Aufnahmeorte mit Speicherregionen im Ozeaninneren. Die wiederholten Inventuren von Gruber et al. erfassen gerade diese Anreicherung und ihre regional unterschiedlichen Entwicklungen. Der biologische Transport organischen Materials in die Tiefe ist ebenfalls wichtig für die Kohlenstoffverteilung, bestand aber bereits vor der Industrialisierung. Seine gesamte natürliche Transportmenge darf nicht zur anthropogenen Ozeansenke addiert werden. Die gesuchte Größe ist die zusätzliche Speicherung gegenüber dem natürlichen Austausch. [2, 6, 7]

Sabine et al. rekonstruierten aus den globalen ozeanografischen Messkampagnen der 1990er-Jahre ein anthropogenes Ozeaninventar von **118 ± 19 Pg C für 1800–1994**. Die Messungen des gelösten anorganischen Kohlenstoffs wurden mit einem tracerbasierten Trennverfahren und räumlicher Ergänzung ausgewertet. Die häufig zitierte Aufnahme von **etwa 48 %** bezieht sich in dieser Arbeit auf **fossile und Zementemissionen**. Für den Nenner einschließlich Landnutzung nennt dieselbe Studie **28–34 %**. Diese Angaben sind keine widersprüchlichen Messungen, sondern beziehen sich auf unterschiedliche Emissionsmengen. [6]

Gruber et al. verglichen wiederholte hydrographische Messungen und fanden für **1994–2007 eine Zunahme des anthropogenen Ozeankohlenstoffs von 34 ± 4 Pg C**. Die Autoren geben selbst **2,6 ± 0,3 Pg C pro Jahr** und **31 ± 4 % der anthropogenen Emissionen** an. Tabelle 2 der Arbeit trennt dieses zusätzliche anthropogene Inventar von der Netto-Ozeansenke innerhalb ihrer Störungsbilanz von **29 ± 5 Pg C**, weil gleichzeitig natürlicher Ozeankohlenstoff verloren ging. Ein Vergleich mit einem globalen Nettofluss setzt deshalb dieselbe Definition voraus. [7]

Beide Inventurstudien stützen die reale Anreicherung von Kohlenstoff im Ozean. Ihre quantitative Attribution bleibt durch Trennverfahren, Abdeckung und Extrapolation mitbestimmt. Sie bilden eine methodisch andere Beleglinie als eine reine Restbildung aus Emissionen und atmosphärischem Anstieg; vollständig frei von Modellannahmen sind sie nicht. [6, 7]

Für den Ozean kommt eine inhaltliche Vergleichsgrenze hinzu. Grubers anthropogenes Kohlenstoffinventar und die Netto-Ozeansenke seiner Störungsbilanz sind verschiedene Zielgrößen. Letztere berücksichtigt zusätzlich Veränderungen des natürlichen Kohlenstoffs; der vorindustrielle stationäre Austausch wird bei der Ableitung berücksichtigt. Eine Abweichung zwischen Inventarzuwachs und Senkenterm muss daher keinen Messfehler anzeigen. Gerade die getrennte Ausweisung macht sichtbar, dass anthropogener Kohlenstoff zunehmen kann, während zugleich natürlicher Kohlenstoff verloren geht. Die Publikation liefert damit mehr als eine einzelne Aufnahmerate: Sie zeigt, welche Größe mit welchem Budgetterm vergleichbar ist. [7]

6 2 Atmosphärischer Sauerstoff als zusätzliche Bilanzinformation

Morgan et al. veröffentlichten am 12. November 2026 eine Auswertung von mehr als drei Jahrzehnten atmosphärischer O_2- und CO_2-Beobachtungen. Verbrennung, terrestrischer Kohlenstoffaustausch und die überwiegend chemische Ozeanaufnahme beeinflussen O_2 und CO_2 unterschiedlich. Aus ihrer gemeinsamen Entwicklung lassen sich zusätzliche Einschränkungen für die Aufteilung der Senken ableiten. Die Flüsse werden dabei aus Messungen und Bilanzannahmen erschlossen, nicht unmittelbar als globaler Oberflächenfluss gemessen. [9]

Für **1990–2019** nennt die Arbeit eine mittlere Ozeansenke von **2,8 ± 0,4 Pg C pro Jahr**, entsprechend **35 % der fossilen Emissionen**, und einen Zuwachs dieser Senke von **0,63 ± 0,19 Pg C pro Jahr je Dekade**. Die gesamte Netto-Landsenke wird mit **1,0 ± 0,5 Pg C pro Jahr**, entsprechend **13 % der fossilen Emissionen**, angegeben; ein robuster langfristiger Trend wird nicht gefunden. Diese Befunde stellen die Entwicklung einzelner Prozessmodelle infrage. Ihre Prozentwerte besitzen jedoch einen anderen Nenner als die GCB-Anteile am gesamten anthropogenen Ausstoß. [9]

Für Morgan et al. war der Primärabstract vollständig zugänglich; weitergehende Aussagen über Einzelheiten des Volltexts werden nicht abgeleitet. Die ±-Angaben werden unverändert übernommen, ohne ihnen eine im Abstract nicht genannte Konfidenzstufe zuzuweisen.

Zusätzliche Messgrößen helfen insbesondere bei der Aufteilung zwischen Land und Ozean. Die O_2-Methode ergänzt CO_2 um eine weitere physikalische Information, benötigt aber Annahmen über Austauschverhältnisse und eine Korrektur des marinen Sauerstoffaustauschs. Die im GCB beschriebene O_2-Auswertung schließt die Kohlenstoffbilanz konstruktionsbedingt. Ihre geschlossene Bilanz ist daher kein zusätzlicher Nachweis eines verschwindenden Bilanzfehlers. Auch atmosphärische Inversionen sind nicht vollständig unabhängig: Ein Teil verwendet Ozeanprodukte als Vorinformation, die zugleich in die GCB-Ozeansenke eingehen. Methodische Verschiedenheit und statistische Unabhängigkeit sind folglich getrennte Eigenschaften. [2, §§2.7–2.8]

6 3 Landbiosphäre und experimentelle CO_2 Anreicherung

Auf dem Land führt erhöhte Photosynthese zunächst zu mehr aufgenommenem Kohlenstoff. Für die spätere Speicherung ist entscheidend, wohin dieser Kohlenstoff gelangt und wie schnell er wieder freigesetzt wird. Blätter, Feinwurzeln, Wurzelausscheidungen und Holz besitzen unterschiedliche Umsatzgeschwindigkeiten. Pflanzenatmung sowie der mikrobielle Abbau abgestorbenen Materials geben einen Teil der Aufnahme wieder ab. Zusätzlich können Sterblichkeit, Holzernte und Feuer die Bilanz ändern. Die Experimente von Jiang et al. machen diese Unterscheidung besonders deutlich: Eine beobachtete Steigerung der Photosynthese führte dort nicht zu einer entsprechenden zusätzlichen Speicherung im gesamten untersuchten Ökosystem. Mehr Assimilation und mehr Speicherzuwachs sind daher verschiedene Messbefunde. [8; 22]

Die CO_2-Düngung ist experimentell nachgewiesen, ihre Wirkung auf längerlebige Speicher aber standortabhängig. Bei FACE-Experimenten wird die CO_2-Konzentration in Beständen unter Freilandbedingungen erhöht und mit Kontrollflächen verglichen. Norby et al. beobachteten in einem amerikanischen Laubwaldbestand, dass die anfangs erhöhte Produktivität im weiteren Verlauf durch

begrenzte Stickstoffverfügbarkeit eingeschränkt wurde. Der zusätzliche Kohlenstoff stand somit nicht unbegrenzt für weiteren Bestandsaufbau zur Verfügung. Die Studie verbindet die Wachstumsentwicklung mit der Stickstoffversorgung und zeigt, warum ein anfänglicher Düngungseffekt nicht als zeitlich unveränderlicher Verstärkungsfaktor fortgeschrieben werden sollte. Sie belegt eine konkrete Begrenzung an diesem Standort und keine allgemeine Wirkungslosigkeit erhöhten CO_2. [21]

Auch reife Wälder reagieren unterschiedlich. Im australischen EucFACE-Experiment an einem Eukalyptuswald erhöhte CO_2 die Kohlenstoffaufnahme durch Photosynthese, während zusätzliche respiratorische Verluste einen entsprechenden Zuwachs des Ökosystemspeichers verhinderten. Demgegenüber wiesen Norby et al. im britischen BIFoR-FACE-Experiment zusätzliche Holzproduktion in einem alten Eichenwald nach. Dort gelangte mehr Kohlenstoff in längerlebige Biomasse. Die Autoren diskutieren Unterschiede der Nährstoffversorgung, insbesondere den phosphorarmen australischen Standort, als wichtigen Kontext. Aus beiden Arbeiten zusammen ergibt sich: Das Alter eines Waldes allein reicht nicht aus, um seine Reaktion festzulegen. Ebenso wenig kann aus dem Erfolg eines Standorts eine gleich starke globale Speicherwirkung abgeleitet werden. [22, 23]

Die zusätzliche Versorgung mit Kohlenstoff kann außerdem den Nährstoffumsatz im Boden verändern. In ihrer veröffentlichten Synthese von Anreicherungsexperimenten fanden Terrer et al. einen Zusammenhang zwischen starker Biomassezunahme und abnehmendem Bodenkohlenstoff; bei schwächerer Biomassereaktion nahm der Bodenspeicher eher zu. Als Erklärung diskutieren sie, dass Pflanzen durch zusätzliche Kohlenstoffabgabe an Wurzeln und Bodenorganismen Nährstoffe erschließen und dabei der Abbau vorhandenen organischen Materials gefördert wird. Das ist ein Muster über die ausgewerteten Experimente und kein ausnahmsloses Gesetz für jeden Boden. Für die Bilanz folgt daraus, dass oberirdische Biomasse und Boden gemeinsam betrachtet werden müssen. Mehr Holz allein beweist keinen gleich großen Zuwachs des gesamten Ökosystemspeichers. [24]

Feuer kann neben lebender Biomasse auch lange gespeicherten Bodenkohlenstoff mobilisieren. Walker et al. untersuchten Brandflächen im Nordwesten Kanadas und bestimmten mit Radiokohlenstoffmessungen, ob zuvor erhalten gebliebener älterer Bodenkohlenstoff verbrannt war. Gerade auf trockenen Standorten mit erneut gebrannten jüngeren Wäldern fanden sie solche Verluste. Häufigere Feuer können damit die Voraussetzungen verändern, unter denen sich der Bodenspeicher zwischen Bränden wieder aufbaut. Die Studie belegt einen regionalen Mechanismus; sie quantifiziert keinen globalen Umschlag sämtlicher Wälder zur Quelle. Sie erklärt aber, weshalb sichtbare Wiederbegrünung nach einem Brand nicht mit vollständiger Wiederherstellung des vorherigen Kohlenstoffbestands gleichgesetzt werden darf. [25]

Auch ohne Brand sagt die Entwicklung eines einzelnen Waldtyps wenig über die globale Landbilanz aus. Die Inventursynthese von Pan et al. zeigt, dass sich regionale Zunahmen und Abnahmen überlagern. Nachwachsende Bestände, bestehende Wälder, Totholz, Böden und die berücksichtigten Holzprodukte tragen dabei unterschiedlich zur Bilanz bei. Ferner kann ein Wald mit hohem Kohlenstoffbestand nur langsam weiterwachsen, während ein jüngerer Bestand schneller aufnimmt, aber zunächst weniger enthält. Bestand und laufender Speicherzuwachs sind deshalb gemeinsam zu beurteilen. Entsprechend lässt sich aus einer Zunahme der satellitengestützt erfassten Begrünung kein sicherer globaler Nettofluss ableiten. Die Untersuchung des schwachen Landaufnahmejahres 2023 illustriert diese Grenze ausdrücklich. [8, 10]

6 4 Waldinventuren und regionale Gegenläufigkeit

Pan et al. synthetisierten bodengestützte Waldinventuren für drei Jahrzehnte. Für **2010–2019** nennen sie eine Waldaufnahme vor Anrechnung tropischer Entwaldung von **3,53 ± 0,41 Pg C pro Jahr**. Nach Einbezug der tropischen Entwaldung beträgt die globale Waldnettoaufnahme **1,39 ± 0,69 Pg C pro Jahr**. Die Autoren beziehen ihre Unsicherheitsgrenzen auf eine Wahrscheinlichkeit von **95 %**, grenzen diese Charakterisierung jedoch ausdrücklich von rein statistisch definierten Konfidenzintervallen ab. Je nach Datenlage beruhen die Grenzen auf quantitativen Verfahren oder auf Expertenurteilen. Sie dürfen daher

nicht pauschal mit den 1σ-Angaben des Global Carbon Budget gleichgesetzt oder einheitlich umgerechnet werden. [8, Tabelle 1 und Methods]

Die von Pan et al. vor Entwaldung ausgewiesene Waldaufnahme blieb global über die drei Dekaden ähnlich groß, während sich boreale, gemäßigte und tropische Wälder unterschiedlich entwickelten. Der in der Arbeit verwendete Ausdruck „gross carbon sink“ bezeichnet keine Bruttophotosynthese. Er umfasst bereits die Bilanz der erfassten Waldreservoire vor der gesondert ausgewiesenen tropischen Entwaldung. Die Ergebnisse betreffen Wälder einschließlich der berücksichtigten Holzprodukte und lassen sich nicht als zusätzliche, unabhängige Senke auf das globale Landbudget aufschlagen. [8]

Waldinventuren geben einen besonders anschaulichen Zugang zu tatsächlichen Speicheränderungen. Auch hier ist die Abdeckung entscheidend: Wälder sind ein Teil der Landfläche, und lebende Biomasse ist ein Teil ihrer Kohlenstoffspeicher. Pan et al. weisen auf schwächere Informationen zu Böden, Totholz und manchen Regionen hin; fehlende Daten werden teilweise empirisch ergänzt. Zudem sind die in ihrer Gesamtdarstellung enthaltenen Nichtwaldgrößen teilweise aus dem GCB abgeleitet. Sie dürfen nicht zusätzlich zu den Waldinventuren als unabhängige Beobachtungen desselben Gesamtlandbudgets gezählt werden. Die Studie erweitert vor allem die räumliche und speicherbezogene Prüfung der Landbilanz. [8, Methods und Extended Data Table 4]

7 Kurzfristige Schwankungen und die Jahre 2023 bis 2025

Die atmosphärische Zunahme folgt nicht in jedem einzelnen Jahr proportional den fossilen Emissionen. Die NOAA-Messreihe zeigt erhebliche Unterschiede zwischen den jüngsten Jahren. Angegeben ist der saisonbereinigte Zuwachs vom Jahresanfang zum Jahresende im globalen marinen Messprodukt; es handelt sich nicht um die Differenz zweier Jahresmittel. [5]

Jahr	Globaler CO_2-Zuwachs	Unsicherheit	Quelle und Definition
2023	2,69 ppm	±0,13 ppm	NOAA, Jahreszuwachs, 1σ
2024	3,75 ppm	±0,11 ppm	NOAA, Jahreszuwachs, 1σ
2025	2,03 ppm	±0,08 ppm	NOAA, Jahreszuwachs, 1σ

Quelle: [5], Datenstand 19. November 2026. Kleine Abweichungen zu älteren Veröffentlichungen können aus Revisionen entstehen; diese Messreihe wird nicht mit anderen Zeitdefinitionen zu einer neuen Reihe kombiniert.

Ke et al. schätzten für das Kalenderjahr **2023 eine globale Netto-Landsenke von 0,44 ± 0,21 GtC pro Jahr**. Diese Größe enthält bereits die Landnutzungswirkung und entspricht nicht dem separat geführten S_{LAND} des GCB. Die Arbeit verbindet Vegetationsmodelle, Satellitenbeobachtungen von Bränden, OCO-2-Inversionen und Ozeanemulatoren. Sie beschreibt starke regionale Verluste und eine schwache Landaufnahme, liefert aber keinen Nachweis eines unumkehrbaren globalen Zusammenbruchs aller Senken. [10]

Eine 2026 veröffentlichte Fortsetzung betrachtet **Juli 2023 bis Juni 2024** und weist in der kombinierten Schätzung eine **Netto-Landquelle von 0,34 ± 0,33 GtC pro Jahr** aus. Der vom Kalenderjahr abweichende Zeitraum ist wesentlich. Eine weitere Studie für **Juli 2024 bis Juni 2025** zeigt eine teilweise Erholung, deren Ausmaß zwischen Vegetationsmodellen und atmosphärischen Inversionen unterschiedlich ausfällt. Die Landverluste Ende 2024 und die Erholung Anfang 2025 werden von den Methoden nicht gleich stark rekonstruiert. [11, 12]

Diese Befunde sind miteinander vereinbar, wenn Zeitfenster und Bilanzdefinitionen beachtet werden. Die Studie zum Kalenderjahr 2023, die El-Niño-Periode Juli–Juni und der jüngste GCB-Jahreswert dürfen nicht zu einer scheinbaren, gleichartig gemessenen Jahresreihe zusammengefügt werden. Die Ke-Arbeiten

verwenden zudem teilweise gemeinsame Daten und Modellfamilien. Sie sind deshalb keine unabhängigen Wiederholungen, aus denen hier eine neue statistische Sicherheit abgeleitet werden könnte. [10–12]

8 Wie belastbar sind die Zahlen

8 1 Unterschiedliche Arten von Evidenz

Für die Quellenfrage besitzen Emissionsinventare einen besonderen Wert: Ihre Ausgangsinformation ist nicht der zu erklärende atmosphärische Anstieg. Eine grundsätzliche Bestätigung ergibt sich daher aus der Zusammenführung verschiedenartiger Informationen. Mehrere Inventare sind untereinander jedoch häufig eng verwandt, weil sie dieselben nationalen Statistiken verwenden. Andrew zeigt außerdem, dass abweichende Abgrenzungen eine erhebliche Rolle spielen. Die Bandbreite veröffentlichter Werte ist deshalb weder unmittelbar ein Fehlerintervall noch eine Sammlung gleichwertiger unabhängiger Wiederholungen. Bevor eine Abweichung als wissenschaftlicher Widerspruch bewertet wird, müssen erfasste Aktivitäten, Bezugsjahre und Datenversion übereinstimmen. [3]

Die atmosphärische Konzentration wird direkt an Messstationen bestimmt; das globale Mittel und seine Veränderung erfordern eine räumliche und zeitliche Auswertung. Die WMO nennt für 2025 **426,8 ± 0,2 ppm**, während das im GCB 2026 verwendete Produkt **425,6 ± 0,1 ppm** ausweist. Diese verschiedenen Produkte werden hier weder gemittelt noch zu einer einheitlichen Unsicherheit verrechnet. Stationsauswahl, Gewichtung und Zeitdefinition sind bei solchen Vergleichen zu prüfen; die konkrete Differenz wird in dieser Literaturübersicht nicht neu ausgewertet. [1, 4, 5]

Der Ozeansenkenterm kombiniert im GCB biogeochemische Modelle mit beobachtungsbasierten Oberflächen-CO_2-Produkten. Die Landsenke wird überwiegend mit dynamischen Vegetationsmodellen abgeschätzt, die Landnutzungsquelle mit Buchhaltungsmodellen und Landnutzungsdaten. Atmosphärische Inversionen, O_2-Messungen und Ozeaninventuren dienen als weitere Einschränkungen. Ein globales Budget ist deshalb eine Synthese aus Messungen, Inventaren und Modellrechnungen der zitierten Autoren. Die hohe Präzision der Konzentrationsmessung überträgt sich nicht unmittelbar auf die räumliche Zuordnung von Flüssen; diese benötigt zusätzliche Daten und Annahmen. [2, 7, 9]

Isotopenmessungen ergänzen die Quellenzuordnung. Ein abnehmendes Verhältnis von ^{13}C zu ^{12}C zeigt die Zuführung isotopisch leichteren Kohlenstoffs an; ^{13}C allein trennt fossilen Kohlenstoff und terrestrische Freisetzung jedoch nicht eindeutig. Die Literatur verbindet deshalb Isotope mit Emissionsinventaren, Sauerstoffmessungen und weiteren Informationen. Eine hier selbst angesetzte einfache Isotopenmischung wäre weder erforderlich noch ausreichend. [14, 15]

Prozessmodelle erfüllen eine andere Aufgabe: Sie ordnen die Gesamtänderung Ursachen wie CO_2-Zunahme, Klima und Landnutzung zu. Die Übereinstimmung einer modellierten Nettosenke mit dem globalen Budget beweist diese interne Zerlegung jedoch nicht. Verschiedene Beiträge können sich teilweise ausgleichen. Der GCB benennt ausdrücklich das Fehlen direkter globaler Beobachtungen des separat definierten S_{LAND} und seines CO_2-Düngungsanteils. Die neue O_2-Arbeit liefert eine zusätzliche Einschränkung langfristiger Land- und Ozeantrends; aus ihrem zugänglichen Abstract lässt sich dagegen keine vollständige Prüfung einzelner Modellprozesse ableiten. [2, §3.7; 9]

8 2 Revisionen sind keine nachträglichen realen Flüsse

Neue Budgetausgaben können auch historische Werte verändern. Bessere Landnutzungsdaten, veränderte Kohlenstoffdichten, Korrekturen der durch historischen Waldverlust verminderten Landsenke und Änderungen der Ozeanflussbewertung verändern die Rekonstruktion. Die Differenz zwischen zwei veröffentlichten kumulierten Beständen ist daher nicht automatisch der reale Fluss des neu hinzugekommenen Jahres. Für eine historische Entwicklung ist eine konsistente Datenversion nötig. [1, 2]

Der jüngste Vorabdruck enthält außerdem einzelne redaktionelle Unstimmigkeiten. Für S_{LAND} im Mittel 2016–2025 nennt die Executive Summary eine Unsicherheit von ±0,8 GtC pro Jahr, während Tabelle 7 und der Ergebnisabschnitt ±0,7 nennen. Hier wird ausdrücklich die zentrale Tabelle 7 verwendet. Bei Tabelle 8 ist die kumulierte Einheit GtC durch Überschrift und Kontext festgelegt; eine abweichende Zwischenüberschrift mit einer Jahresdimension wird nicht übernommen. Diese Punkte begrenzen die redaktionelle Reife des Preprints, ohne die getrennten Beobachtungsbelege für Kohlenstoffaufnahme aufzuheben. [1]

Für die Unsicherheit ist nicht nur die Breite eines angegebenen Intervalls maßgeblich, sondern auch dessen Entstehung. Pan et al. verwenden auf 95 % bezogene Unsicherheitsgrenzen aus quantitativen Verfahren und Expertenurteilen; ausdrücklich sind diese nicht durchweg statistisch definierte Konfidenzintervalle. Beim kumulierten Ozeanbudget nimmt der GCB zeitlich vollständig korrelierte Fehler an. Die Autoren behandeln anhaltende systematische Abweichungen also anders als unabhängiges jährliches Messrauschen. Für einen neuen gemeinsamen Fehlerbereich wären die Abhängigkeiten zwischen Daten und Verfahren erforderlich. Die vorliegende Literaturübersicht kann sie nicht aus den gedruckten ±-Werten rekonstruieren. [1, Tabelle 8; 8, Methods]

8 3 Bilanzdifferenzen und Grenzen der Attribution

Auch ein kleiner Bilanzrest muss vorsichtig interpretiert werden. Er besagt, dass die separat geschätzten Komponenten zusammenpassen; er beweist nicht, dass jede Komponente für sich richtig ist. Gegenläufige Fehler können sich aufheben. Umgekehrt identifiziert ein größerer Rest nicht seine verursachende Komponente. Die quellenkritische Folgerung lautet deshalb: Bilanzschluss und unabhängige Prüfung einzelner Speicheränderungen sind gemeinsam aussagekräftiger als jeder dieser Zugänge allein. Ein Ensemble kann hierzu mehrere plausible Darstellungen liefern, ersetzt aber nicht automatisch neue Beobachtungen. [1, §3.9.2; 3, 7]

9 Speicherbeständigkeit und gezielte CO_2 Entnahme

Im Ozean liegt der zusätzlich aufgenommene Kohlenstoff überwiegend innerhalb des gelösten anorganischen Kohlenstoffsystems vor; Durchmischung und Zirkulation verteilen ihn im Inneren. An Land befindet er sich unter anderem in lebender Biomasse, Totholz, Streu, Böden und Holzprodukten. Die verschiedenen Speicher besitzen unterschiedliche Austausch- und Verlustprozesse. Eine heutige Nettoaufnahme ist deshalb keine Garantie unveränderter zukünftiger Speicherung. Ozeaninventuren und Waldinventuren messen beziehungsweise rekonstruieren zunächst Bestände und deren Änderungen für bestimmte Zeiträume. [6–8]

Die Speicherfrage enthält außerdem eine Zeitdimension, die ein historischer Nettofluss nicht beantwortet. Der Austausch einzelner Kohlenstoffatome kann stattfinden, während die zusätzliche globale Kohlenstoffmenge fortbesteht. Der Modellvergleich von Joos et al. zeigt, dass die Reaktion auf einen Emissionspuls mehrere Zeitskalen besitzt und von Hintergrundzustand und Pulsgröße abhängt. Aus einer kurzfristigen Aufnahme oder einer kurzen Austauschzeit folgt daher keine ebenso schnelle Beseitigung der atmosphärischen Zusatzmenge. Waldinventuren dokumentieren den bisherigen Speicherzuwachs; seine künftige Erhaltung hängt zusätzlich von Wachstum, Verlusten und Störungen ab. [8, 13]

Gezielte CO_2-Entnahme durch Aufforstung oder technische Verfahren ist von der gesamten natürlichen Senkenreaktion zu unterscheiden. The State of Carbon Dioxide Removal 2026 nennt für Aufforstung und Wiederaufforstung im Mittel **2014–2023 rund 2200 $MtCO_2$ pro Jahr**, mit einer Modellspannweite von **1800–2600 $MtCO_2$ pro Jahr**. Für **neuartige CDR-Aktivitäten 2025** werden **2,04 $MtCO_2$** berichtet. Der Bericht unterscheidet dabei Entnahme aus der Atmosphäre von Transfers bereits früher gebundenen Kohlenstoffs, etwa in langlebige Holzprodukte oder holzbasierte Biokohle. Die Aktivitätszahl ist daher nicht pauschal eine zusätzliche, gleichzeitige atmosphärische Entnahme. [16]

Diese CDR-Werte werden nicht nochmals vom Global Carbon Budget abgezogen. Aufforstung ist bereits Bestandteil der Landnutzungsbilanz; andere Verfahren können Bestände zwischen Reservoiren verschieben oder zu unterschiedlichen Zeitpunkten bilanziert werden. Anlagenkapazität ist außerdem von tatsächlich realisierter Speicherung zu unterscheiden. Die Abscheidung fossilen CO_2 vor dessen Freisetzung vermeidet eine Emission; sie ist nicht automatisch eine Entnahme bereits atmosphärischen CO_2. [2, 16]

10 Gesamtbewertung der Literatur

Die Überzeugungskraft der Literatur entsteht vor allem dadurch, dass unterschiedliche Beobachtungen zusammenpassen. Nationale Energie- und Produktionsdaten erfassen menschliche Aktivitäten; atmosphärische Messungen erfassen die tatsächlich zunehmende CO_2-Konzentration; Ozean- und Waldinventuren untersuchen Veränderungen in Speichern. Die Aussage, dass beträchtliche Kohlenstoffmengen außerhalb der Atmosphäre aufgenommen wurden, hängt deshalb nicht allein von einer einzelnen Modellfamilie ab. Daraus folgt aber noch keine gleich hohe Genauigkeit jeder regionalen Zuordnung oder Prozesszerlegung. Eine zentrale Aufgabe der Synthese besteht darin, diesen Unterschied zwischen dem gut belegten Gesamtbefund und der anspruchsvolleren Aufteilung seiner Ursachen sichtbar zu halten. [3, 5–8]

Für die jüngste Dekade gibt der GCB 2026 die Anteile mit 48 % Atmosphäre, 27 % Ozean, 22 % Land und 3 % Bilanzdifferenz an. Für eine länger zurückreichende Frage sind die ausdrücklich kumulierten Angaben zu verwenden. Der Land-Senkenterm allein beschreibt nicht die gesamte Landbilanz, weil Entwaldung und weitere Landnutzungsänderungen gesondert geführt werden. [1]

Die Literatur liefert zugleich konkrete Grenzen der Genauigkeit: beträchtliche Unsicherheit der Landnutzung, Unterschiede zwischen regionalen und globalen Verfahren, starke jährliche Schwankungen sowie Revisionen der historischen Schätzungen. Die neue O_2-basierte Studie und die Waldinventuren machen deutlich, dass eine globale Aufnahme über längere Zeit mit stagnierenden oder rückläufigen Teilkomponenten vereinbar ist. Eine für alle Jahre und Speicher konstante Aufnahmequote ist aus diesen Arbeiten nicht abzuleiten. [3, 8–12]

Damit lässt sich die Ausgangsfrage quellenbasiert beantworten: Ein großer Teil der anthropogenen CO_2-Emissionen geht tatsächlich in Ozean- und Landspeicher über. Umfang, Bezugszeitraum, Nettoabgrenzung und Unsicherheit müssen jeweils genannt werden. Die Bilanzdifferenz bleibt als offene Schätzgröße sichtbar; die Dauerhaftigkeit der Speicherung ist eine zusätzliche, von der bisherigen Aufnahme zu unterscheidende Frage.

Literatur und Datennachweise

Alle Internetquellen wurden am 25. November 2026 geprüft. Die Fundstellen geben den verwendeten Veröffentlichungsstand an. DOI- und Internetadressen sind anklickbar. Zahlen in den Tabellen stammen ausschließlich aus den jeweils angegebenen Originalquellen.

[1] Friedlingstein, P. et al. (2026). Global Carbon Budget 2026. Earth System Science Data Discussions. Preprint vom 10. November 2026, am Recherchestichtag in Begutachtung. Verwendet: Einleitung, §§2.1.1, 2.2.1, 2.6.2, 2.8, 3.1.2, 3.2.2, 3.4, 3.6.2, 3.7, 3.8.1.1, 3.9.1–3.9.2 sowie Tabellen 5, 7 und 8; Tabelle 7 S.121–122, Tabelle 8 S.123.
https://doi.org/10.5194/essd-2026-895

[2] Friedlingstein, P. et al. (2026). Global Carbon Budget 2025. Earth System Science Data 18, 3211–3288. Begutachtete Fassung vom 13. Mai 2026. Verwendet: Methoden §§2.1–2.8, Senkenvergleich §3.8 und Bilanz §3.9.1.
https://doi.org/10.5194/essd-18-3211-2026

[3] Andrew, R. M. (2020). A comparison of estimates of global carbon dioxide emissions from fossil carbon sources. Earth System Science Data 12, 1437–1465. Besonders §§3, 5–6 und 8 sowie die Schlussfolgerungen zu Systemgrenzen und gemeinsamen Daten.
https://doi.org/10.5194/essd-12-1437-2020

[4] World Meteorological Organization (2026). WMO Greenhouse Gas Bulletin No.22. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2025. Veröffentlicht am 27. Oktober 2026. Globale bodennahe Konzentrationsangaben.
https://public.wmo.int/resources/publication-series/greenhouse-gas-bulletin/no-22

[5] Lan, X., Tans, P. und Thoning, K. W. (2026). Trends in globally-averaged CO_2 determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Datenversion 19. November 2026. DOI 10.15138/9N0H-ZH07. Tabelle Annual Mean Global Carbon Dioxide Growth Rates und Methodenerläuterung.
https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gl_gr.html

[6] Sabine, C. L. et al. (2004). The Oceanic Sink for Anthropogenic CO_2. Science 305, 367–371. DOI 10.1126/science.1097403. Geprüfter Volltext beim Autoreninstitut NOAA/PMEL; Inventar 1800–1994 und verschiedene Emissionsnenner.
https://www.pmel.noaa.gov/pubs/outstand/sabi2683/sabi2683.shtml

[7] Gruber, N. et al. (2019). The oceanic sink for anthropogenic CO_2 from 1994 to 2007. Science 363, 1193–1199. DOI 10.1126/science.aau5153. Geprüftes Autorenmanuskript einschließlich Tabelle 2 im NOAA-Repositorium.
https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/20129/noaa_20129_DS1.pdf

[8] Pan, Y. et al. (2024). The enduring world forest carbon sink. Nature 631, 563–569. DOI 10.1038/s41586-024-07602-x. Tabelle 1 und Methods; Auf 95 % bezogene Unsicherheitsgrenzen, teils quantitativ und teils aus Expertenurteilen; die Autoren grenzen sie ausdrücklich von rein statistischen 95%-Konfidenzintervallen ab. Die Autorenkorrektur vom 6. August 2024 (DOI 10.1038/s41586-024-07897-w) betrifft Extended Data Figs.2e/f, nicht die hier übernommenen Tabellenwerte.
https://research.fs.usda.gov/download/treesearch/67943.pdf

[9] Morgan, E. J. et al. (2026). Atmospheric O_2 reveals a strengthening ocean carbon sink and a stagnant net land sink since 1990. Science 394, 799–803. DOI 10.1126/science.aed9544. Veröffentlicht am 12. November 2026. Verifiziert wurde der vollständige Primärabstract; die quantitative Darstellung ist auf dessen Angaben beschränkt.
https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/43019429/

[10] Ke, P. et al. (2024). Low latency carbon budget analysis reveals a large decline of the land carbon sink in 2023. National Science Review 11, nwae367. Online am 22. Oktober 2024. DOI 10.1093/nsr/nwae367. Abstract, Methods und Ergebnisdarstellung.
https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11648560/

[11] Ke, P. et al. (2026). Low latency global carbon budget reveals land sink decline during 2023 to 2024 El Niño. iScience 29, 117053. Online am 10. August 2026. DOI 10.1016/j.isci.2026.117053. Bezugszeitraum Juli 2023 bis Juni 2024.
https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC13486359/

[12] Ke, P. et al. (2026). Low Latency Global Carbon Budget Reveals Late 2024 Carbon Losses and Contrasting Early 2025 Land Sink Recovery Signals. Advanced Science 13, e77369. Online am 1. September 2026. DOI 10.1002/advs.77369. Bezugszeitraum Juli 2024 bis Juni 2025.
https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC13534783/

[13] Joos, F. et al. (2013). Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics: a multi-model analysis. Atmospheric Chemistry and Physics 13, 2793–2825. Verwendet zur Unterscheidung von Austausch und Abklingen einer zusätzlichen Kohlenstoffmenge, nicht als historische Beobachtung.
https://doi.org/10.5194/acp-13-2793-2013

[14] NOAA Global Monitoring Laboratory. The Data: What ^{13}C Tells Us. Primärkommunikation der Messstelle zu isotopischen Zeitreihen, Quellenzuordnung, Austausch und Fraktionierung.
https://www.gml.noaa.gov/education/isotopes/c13tellsus.html

[15] NOAA Global Monitoring Laboratory. The Data: What ^{14}C Tells Us. Primärkommunikation der Messstelle zur Nutzung von Radiokohlenstoff für die fossile Quellenzuordnung.
https://gml.noaa.gov/education/isotopes/c14tellsus.html

[16] Smith, S. M., Grassi, G., Gupta, S., Schwingshackl, C., Harrington, K. J., Pilli, R. und Rink, A. (2026). Chapter 7: Current levels of CDR. In Edwards, M. R. et al. (Hrsg.), The State of Carbon Dioxide Removal, 3rd Edition. Kapitel-DOI 10.17605/OSF.IO/VH7U6. Verwendet: Key insights und §7.6; Aufforstung 2014–2023, neuartige CDR-Aktivität 2025.
https://www.stateofcdr.org/asset/SoCDR-Ed3_Chapter-7_Final.pdf

[17] ICOS Carbon Portal (2026). Fossil CO_2 emissions decrease in 2026 according to the Global Carbon Budget. Institutionelle Veröffentlichung zum GCB 2026. Verwendet ausschließlich für ausdrücklich veröffentlichte Zusammenfassungen und CO_2-Masseneinheiten; keine zusätzliche unabhängige Budgetstudie.
https://www.icos-cp.eu/index.php/news-and-events/news/fossil-co2-emissions-decrease-2026-according-global-carbon-budget

[18] Global Carbon Project (2026). Briefing on key messages from the Global Carbon Budget 2026. Veröffentlicht am 10. November 2026. S.1 nennt die gemeinsame Aufnahme durch Land und Ozean von 49 Prozent ausdrücklich. Institutionelle Zusammenfassung derselben Budgetfamilie, keine unabhängige Studie.
https://cger.nies.go.jp/gcp/pdf/20261110/Key%20Messages%20Global%20Carbon%20Budget%202026.pdf

[19] Takahashi, T. et al. (2009). Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO_2, and net sea–air CO_2 flux over the global oceans. Deep-Sea Research Part II 56, 554–577. Verwendet zur regionalen und saisonalen Prozessdarstellung; keine Übernahme alter Flusszahlen als heutige Werte.
https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.009

[20] Humphreys, M. P. (2024). Temperature effect on seawater fCO_2 revisited: theoretical basis, uncertainty analysis and implications for parameterising carbonic acid equilibrium constants. Ocean Science 20, 1325–1350. Einleitung und thermodynamische Erläuterung; keine eigene Anwendung der Gleichungen.
https://doi.org/10.5194/os-20-1325-2024

[21] Norby, R. J., Warren, J. M., Iversen, C. M., Medlyn, B. E. und McMurtrie, R. E. (2010). CO_2 enhancement of forest productivity constrained by limited nitrogen availability. Proceedings of the National Academy of Sciences 107, 19368–19373. FACE-Experiment zur Stickstoffbegrenzung der Produktivitätsantwort.
https://doi.org/10.1073/pnas.1006463107

[22] Jiang, M. et al. (2020). The fate of carbon in a mature forest under carbon dioxide enrichment. Nature 580, 227–231. EucFACE-Experiment; Photosynthese und Ökosystemspeicherung getrennt ausgewertet.
https://doi.org/10.1038/s41586-020-2128-9

[23] Norby, R. J. et al. (2024). Enhanced woody biomass production in a mature temperate forest under elevated CO_2. Nature Climate Change 14, 983–988. BIFoR-FACE; Holzproduktion und Kohlenstoffallokation. Verlagsfassung und Autoreninstituts-Repositorium geprüft.
https://doi.org/10.1038/s41558-024-02090-3

[24] Terrer, C. et al. (2021). A trade-off between plant and soil carbon storage under elevated CO_2. Nature 591, 599–603. Publizierte Synthese von CO_2-Anreicherungsexperimenten; ausschließlich qualitative Übernahme der Ergebnisse, keine neue Meta-Rechnung.
https://doi.org/10.1038/s41586-021-03306-8

[25] Walker, X. J. et al. (2019). Increasing wildfires threaten historic carbon sink of boreal forest soils. Nature 572, 520–523. Regionaler Befund aus den Northwest Territories in Kanada; Radiokohlenstoffanalyse älterer Bodenkohlenstoffverluste.
https://doi.org/10.1038/s41586-019-1474-y