

# Über den Beitrag der Biomasse zur Nachhaltigkeit Der Kohlenstoffkreislauf im globalen Wandel

KARL-JOSEF DIETZ

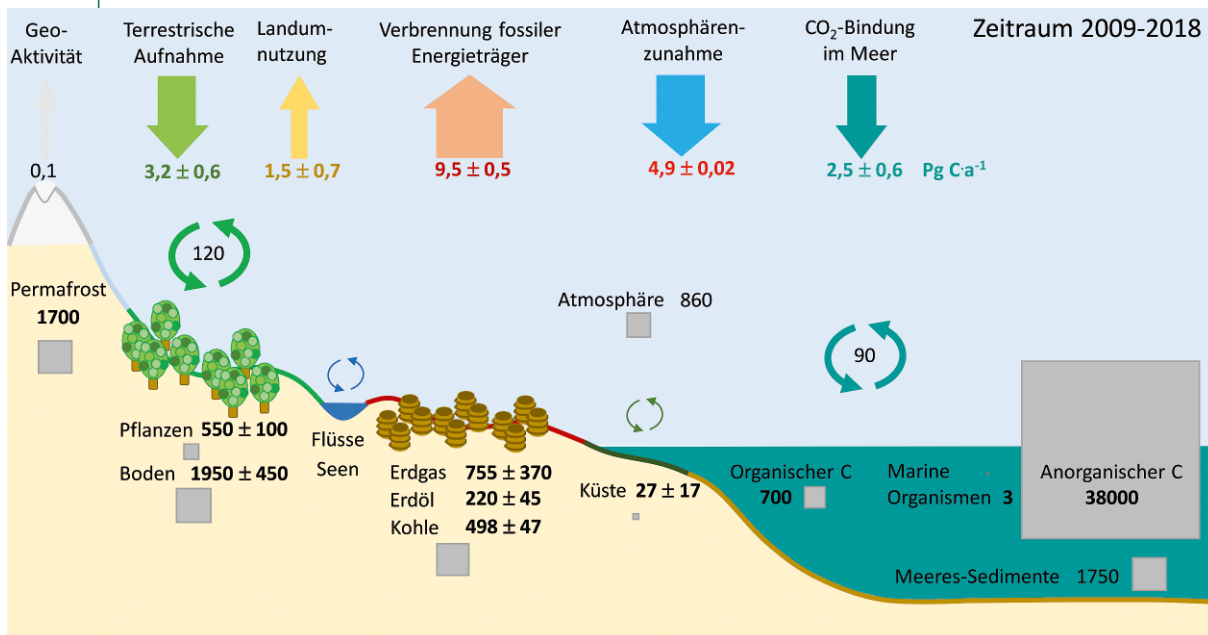


*Anthropogene Störungen des globalen Kohlenstoff-(C)-Kreislaufs führen zur Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre und gefährden natürliche Biome und etablierte land- und forstwirtschaftliche Produktionssysteme. Diese Übersicht beschreibt die dynamischen globalen C-Flüsse, die wesentlich durch die Biosphäre bestimmt werden und erörtert den Beitrag der Biomasse zur Bindung von CO<sub>2</sub>. Die Verfügbarkeit von Stickstoff und anderen Mineralien begrenzt den Biomassenzugewinn. Zudem übt der Ansatz, über Biomasse die CO<sub>2</sub>-Zunahme zu reduzieren, einen starken Druck in Richtung Umnutzung der Landflächen mit prognostizierten negativen Konsequenzen u. a. auf die Nahrungsmittelpreise aus. Im Ausgleich der Nachhaltigkeitsziele wird neben der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission die Entwicklung von nicht-biologischen negativen Emissionstechnologien wichtig werden.*

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 45 erklärt.

Der globale Kohlenstoff-(C)-Kreislauf mit all seinen natürlichen Prozessen und anthropogenen Störungen übt einen massiven Einfluss auf die Biosphäre und unser Klima aus. Die prägnanteste Folge der steigenden CO<sub>2</sub>-Konzentration ist der Anstieg der Temperatur. Diese Erkenntnis hat den Fokus derzeitiger Forschung auf die Beschreibung und Untersuchung der Folgen steigender CO<sub>2</sub>-Konzentration gelenkt, auch mit dem Ziel, die akute Dringlichkeit von Maßnahmen aufzuzeigen und zu wissenschaftlichen und nachhaltigen Lösungen beizutragen (Kasten 1). Dieser Artikel unternimmt eine aktuelle Bestandsaufnahme des globalen C-Kreislaufs, der keinesfalls isoliert betrachtet werden darf. Er ist eng mit anderen globalen Kreisläufen verflochten, insbesondere mit der Stickstoff-(N)- und Phosphor-(P)-Verfügbarkeit. Pflanzengesellschaften reagieren unterschiedlich auf die Zunahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre und unterscheiden sich hinsichtlich ihres zusätzlichen Bedarfs an N und P. Es wird herausgearbeitet, dass Biomasse und deren Degradationsprodukte zur C-Speicherung beitragen. So wird zur CO<sub>2</sub>-Erniedrigung häufig die Aufforstung als biologische Maßnahme diskutiert, die neben die notwendige Verminderung der C-Verbrennung als Energiequelle treten soll. Weitere „Negative Emissionstechnologien“ („negative emission technology“, ► NET) umfassen die Energiegewinnung aus Biomasse und CO<sub>2</sub>-Speicherung („bioenergy with carbon capture and storage“, ► BECCS) und die Entwicklung technischer Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Bindung („direct air capture“, ► DAC). Zur Vorhersage globaler Abhängigkeiten werden integrative Modelle („integrative assessment modelling“, IAM) erstellt, die die verfügbaren Daten zu mathematischen Computermodellen zusammenfassen. Sie zeigen, dass DAC-Technologien den Druck auf die Umnutzung der verfügbaren Landflächen senken werden. Sie können außerdem dazu beitragen, natürliche Biome zu schützen und die bedrohliche Gefahr, dass die Nahrungsmittelpreise um bis auf das Sechsfache insbesondere in Afrika steigen werden, abzuwenden. Der Artikel wird nicht auf andere Ansätze zur Stabilisierung landwirtschaftlicher Produktionssysteme im Zeitalter des Klimawandels wie Agroforstwirtschaft eingehen können.

ABB. 1 | DER GLOBALE KOHLENSTOFFKREISLAUF



Das Schema beschreibt die globalen C-Speicher, die jährlichen globalen C-Flüsse und die anthropogenen Störungen. Die Daten geben Mittelwerte aus der Dekade von 2009–2018. Die Größe der grauen Quadrate und die zugehörigen fettgedruckten Zahlen repräsentieren die gespeicherten C-Mengen, beispielsweise 550 Pg C in Pflanzen. Die angegebenen  $\pm$ -Werte schätzen die Spannweiten und Ungewissheiten der hierzu verfügbaren Daten und Modellergebnisse ab. Die Pfeildicke und die Zahlen beschreiben die jährlichen Veränderungen der C-Flüsse. Nach oben gerichtete Pfeile stellen  $\text{CO}_2$ -Freisetzung dar, nach unten gerichtete Pfeile die Verteilung des freigesetzten  $\text{CO}_2$  auf terrestrische Senken, das Meer und die Atmosphäre (Daten aus [1]).

### Der globale C-Kreislauf zeigt das Ausmaß der anthropogenen Störung

Der globale C-Kreislauf besteht aus den dynamischen Prozessen der  $\text{CO}_2$ -Freisetzung,  $\text{CO}_2$ -Verteilung und  $\text{CO}_2$ -Bindung, sowie aus C-Speichern. Beteiligte Systeme sind die terrestrischen Gebiete der Erde, die Ozeane und übrigen Gewässer sowie die Atmosphäre (Abbildung 1). Den größ-

ten Speicher mobilen Kohlenstoffs stellt das im Meer gelöste Carbonat, das nach Hydratisierung des gelösten  $\text{CO}_2$  und Deprotonierung der entstandenen Kohlensäure ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \rightarrow 2 \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$ ) oder durch Auflösen mineralischer Carbonate entsteht. Der Weltklimarat (IPCC, 2018) stellt die relevanten Daten zu den Treibhausgasen, vor allem  $\text{CO}_2$ , Methan ( $\text{CH}_4$ ) und

#### IN KÜRZE

- Die anthropogene  $\text{CO}_2$ -Freisetzung übersteigt momentan 5 Prozent des globalen Kohlenstoffkreislaufs. Der damit verbundene Anstieg der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre **stimuliert die Photosynthese**.
- Allerdings hängt dieser Düngeeffekt von der **ausreichenden Verfügbarkeit mineralischer Nährstoffe** ab. Modellierungen zeigen, dass unter ungünstigen Nährstoffbedingungen die biologisch festgelegte Biomasse global sogar trotz steigenden  $\text{CO}_2$ -Gehalts sinken kann.
- Die durch Aufforstung und Kultivierung von Bioenergiepflanzen herbeigeführte Landum-nutzung erhöht zudem den Druck auf die Lebensmittelpreise und interferiert mit **anderen Nachhaltigkeitszielen**.
- Vor diesem Hintergrund werden **nicht-biologische negative Emissionstechnologien** zur Erniedrigung des  $\text{CO}_2$ -Gehalts der Atmosphäre neben Verringerung der Verbrennung in der Zukunft wichtig werden.

#### NACHHALTIGKEIT BEDEUTET AUSGEGLICHENE STOFFKREISLÄUFE

Nachhaltiges Wirtschaften des Menschen bedeutet schonenden Umgang mit der Umwelt, Nutzung möglichst geschlossener Materialkreisläufe und Einsatz regenerativer Energien. Dadurch lassen sich Störungen der biologischen Prozesse auf der Erde minimieren und im besten Fall vermeiden. Das Dilemma ist, dass sich dieser Maßstab für menschliches Handeln bei steigender Bevölkerung und ausgeglichener Teilhabe aller Menschen an Wohlstand und Mobilität nicht konsequent als Primat anwenden lässt. Die 17 Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen zeigen die Notwendigkeit zu ökologischem, ökonomischem und sozialem Ausgleich. So haben die Vereinten Nationen bei der Festlegung der Ziele für nachhaltige Entwicklung („sustainable development goals“: SDG) die Beseitigung von Armut, gute Ernährung und Gesundheit an die ersten Stellen der 17 Ziele gesetzt. Allerdings ist dies nicht unbedingt eine wertende Reihung. Zudem sind die Ziele eng vernetzt. Starke Störungen des Klimas (SDG 13) beispielsweise werden zu Armut und Hungersnöten führen, wenn Trockenheit, Hitze und Erosion Böden degradieren und für die Landwirtschaft unbrauchbar machen. In diesem Kontext stellen der hohe Energiebedarf der Menschheit, die  $\text{CO}_2$ -Emission durch Verbrennung Kohlenstoff-(C)-haltiger Energieträger und der Klimawandel die zentralen, global wirksamen und offensichtlichsten Probleme nicht-nachhaltigen Wirtschaftens dar.

Distickstoffmonoxid (N<sub>2</sub>O), kontinuierlich zusammen und veröffentlicht Statusberichte als Basis für wissenschaftliche Forschung und politische Entscheidungen.

Abbildung 1 präsentiert die Mittelwerte der C-Flüsse und C-Speicher und die anthropogenen Störungen aus den Jahren 2009–2018 [1]. Bei den C-Speichern leisten der Boden, die Meeressedimente und die Permafrostgebiete ähnliche Beiträge in Höhe von 1700 bis 1950 ▶ Petagramm C. Sie speichern organisches Material in großen Mengen. In der Biomasse der Pflanzen sind mit etwa 550 Pg C wesentlich geringere Kohlenstoffmengen gebunden, wobei etwa 120 Pg C · a<sup>-1</sup> durch Abbau und Umsetzung, insbesondere auch im Boden, freigesetzt und durch Pflanzen wieder gebunden werden. Der äquivalente C-Umsatz im Meer wird auf 90 Pg C · a<sup>-1</sup> geschätzt. Schließlich ist der C-Gehalt der Atmosphäre mit etwa 860 Pg C interessant, da die Atmosphäre als Puffer für einen Teil des freigesetzten C dient. Drei Prozesse ändern das globale C-Gleichgewicht: (1) Anthropogene Störungen durch C-Verbrennung setzten zwischen 2009 und 2018 im Mittel 9,5 Pg C · a<sup>-1</sup> frei, (2) Umnutzung von Landflächen, wozu Abholzung, aber auch die Vernichtung von Mooren und der damit verbundene Verlust an C-Speicherung im Torf u. ä. gehören, führten zu 1,5 Pg C · a<sup>-1</sup> und (3) geologische Aktivitäten zu 0,1 Pg C · a<sup>-1</sup> zusätzlicher CO<sub>2</sub>-Emission. Diese freigesetzte C-Menge von 11,1 Pg C · a<sup>-1</sup> verteilt sich auf die vermehrte Biomassenproduktion der terrestrischen Vegetation (3,2 Pg C · a<sup>-1</sup>), Bindung im Meer (2,5 Pg C · a<sup>-1</sup>) und den Verbleib in der Atmosphäre (4,9 Pg C · a<sup>-1</sup>). Die Ungenauigkeit der Datenschatzung erklärt die Diskrepanz

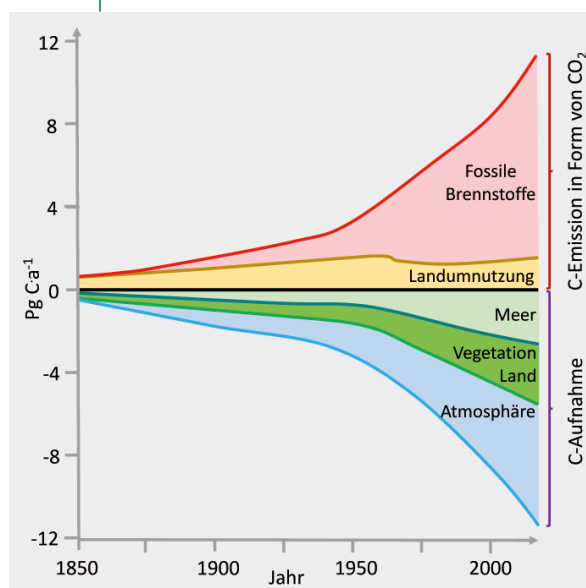
zwischen der Freisetzung und der Verteilung. Die Werte illustrieren das Ausmaß der anthropogenen Störung: Die C-Freisetzung durch Verbrennung und Landumnutzung beträgt jährlich 5,2 Prozent des terrestrischen und marinen C-Kreislaufs (210 Pg C · a<sup>-1</sup>) [1]. Die Entwicklung dieser anthropogenen Störung ist seit 1850 in besorgniserregendem Ausmaß progressiv (Abbildung 2) und führte zum breiten Konsens, dass Gegenmaßnahmen unverzüglich und umfassend ergriffen werden müssen.

### Begrenzung der terrestrischen Photosyntheseleistung durch Nährstoffe

Die biologische CO<sub>2</sub>-Fixierung erfolgt im Wesentlichen in der Photosynthese der grünen Pflanzen auf dem Land und durch Algen im Wasser, z. B. Grün-, Kiesel-, Braun- und Rotalgen, sowie Cyanobakterien. Wenn wir den möglichen Beitrag der pflanzlichen CO<sub>2</sub>-Fixierung zum C-Kreislauf abschätzen wollen, muss der Prozess der Photosynthese und die Zusammensetzung der Pflanzen betrachtet werden, da zunächst zur Photosynthese benötigte Strukturen aufgebaut werden müssen. Die Zusammensetzung aus essentiellen Nährelementen variiert dabei in recht engen Grenzen. Neben Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff, die aus aufgenommenem Wasser und CO<sub>2</sub> bereitgestellt werden, nimmt der Bedarf an Nährelementen etwa in der Reihenfolge Stickstoff (N), Kalium (K), Phosphor (P), Magnesium, Calcium und Schwefel ab. NKP-Dünger werden daher standardmäßig in der Landwirtschaft eingesetzt, um Erträge zu erhöhen. Je nach spezifischer Nährstoffverfügbarkeit im Boden werden die Dünger durch Mg, S und in manchen Fällen Ca und Mikronährelemente wie Bor und Zink ergänzt.

Eine Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft steigert die photosynthetische CO<sub>2</sub>-Fixierung von Blättern [2]. Allerdings beeinflusst die Nährstoffverfügbarkeit die Antwort der Photosynthese auf die erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration, wie sie seit Beginn der Industrialisierung beobachtet wird [3]. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre an der Mauna-Loa-Messstation auf Hawaii beispielsweise lag am 27.9.2020 bei 411,01 ppm im Vergleich zu etwa 280 ppm vor 200 Jahren. Bei Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Umgebungsluft nimmt die Photosyntheseleistung zunächst zu. Bei dauerhaftem Wachstum bei hohem CO<sub>2</sub>-Gehalt und gleichzeitig geringer N-Versorgung erfolgt eine Akklimatisierung durch Abbau der Ribulose-1,5-Bisphosphat-Carboxylase/Oxygenase (RubisCO), dem CO<sub>2</sub>-fixierenden Enzym im Calvin-Benson-Zyklus, so dass die Photosyntheserate wieder fällt. Die RubisCO repräsentiert den größten organischen N-Speicher im Blatt und katalysiert mit niedriger Rate die CO<sub>2</sub>-Fixierung. Dabei entsteht 3-Phosphoglycerat, das im Calvin-Benson-Zyklus und in den sich anschließenden Stoffwechselwegen zu Kohlenhydraten umgesetzt wird. Bei hoher N-Verfügbarkeit unterbleibt der Abbau der RubisCO und die CO<sub>2</sub>-stimulierte Photosynthese hält an. Dieser Zusammenhang ist beispielhaft für Baumwolle in Abbildung 3a gezeigt [4]. Die Pflan-

ABB. 2 | GLOBALES C-BUDGET SEIT 1850



Dargestellt sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Energieträgern und die Veränderungen aufgrund von Landumnutzung. Dem gegenüber stehen die C-Senken im Ozean, auf dem Land und die Atmosphäre, die das restliche CO<sub>2</sub> aufnimmt (Daten von [1]).

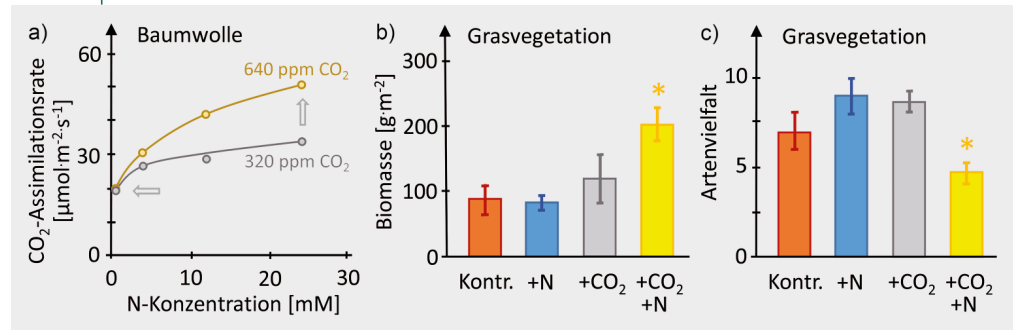
zen wurden bei steigender Nitratdüngung in Kombination mit niedriger (320 ppm CO<sub>2</sub>, der damaligen CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre) oder doppelter CO<sub>2</sub>-Konzentration (640 ppm) angezogen. Im Alter von 40 Tagen wurde unter den gleichen Bedingungen die Photosyntheserate gemessen. Während bei hohen Stickstoffkonzentrationen die Photosynthese durch die Verdoppelung der CO<sub>2</sub>-Konzentration um 50 Prozent zunahm, war bei der niedrigsten Stickstoffkonzentration keine Stimulation der Photosyntheserate in Hoch-CO<sub>2</sub> zu messen [4]. Diese Daten zeigen, wie wichtig ausreichende N-Düngung ist, um den stimulierenden Effekt der erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration auf die Photosyntheserate zu sehen.

Für die in Biomasse gespeicherte C-Menge ist die Zusammensetzung der Biomasse wichtig, denn sie beschreibt, welche weiteren Elemente pro Gramm C festgelegt werden. Wegen der herausragenden Rolle von Holz als C-Speicher ist der Blick auf seinen N-Gehalt und das C/N-Verhältnis wichtig. Der N-Gehalt in der Trockenmasse von tropischen Hölzern variiert zwischen 0,07 und 0,52 Prozent, der von Laubbäumen temperater Klimazonen zwischen 0,03 und 0,3 Prozent. Dies entspricht C:N-Werten von 350–500 für die Mehrzahl der Baumarten und 1000–1250 für Nadelbäume ([5] und Zitate darin). Bei Annahme eines durchschnittlichen N-Gehalts des Holzes von 0,2 Prozent ergibt sich ein Stickstoffgehalt von 2 g N je 1000 g C. In anderen Pflanzenorganen ist der N-Anteil höher: So finden sich in Blättern vielfach C:N-Verhältnisse von 20–30. Den 860 Pg C in der Atmosphäre steht etwa die 2000-fache N-Menge in Form gasförmigen N<sub>2</sub> gegenüber. N ist somit im hohen Maß vorhanden, aber als N<sub>2</sub> für die überwiegende Zahl der Organismen nicht verfügbar. Neben der atmosphärischen Stickstoffoxidation, die den Pflanzen Nitrat bereitstellt, ist die Reduktion des atmosphärischen N<sub>2</sub> wichtig. Nur wenige Bakterien und Cyanobakterien sind dazu in der Lage, so dass die effektive N-Verfügbarkeit an natürlichen Standorten vielfach die Biomassenbildung begrenzt. Die CO<sub>2</sub>-Bindung durch photoautotrophe Pflanzen und Bakterien hängt vom Aufbau biochemischer und zellulärer Strukturen ab. Dies ist nur bei adäquater Verfügbarkeit weiterer essentieller Nährelemente möglich, wobei hier an erster Stelle der N-Bedarf steht.

### Wirkung steigender CO<sub>2</sub>-Konzentration auf den Biomassenertrag

Die Frage ist, welchen Beitrag die Produktion und Speicherung von Biomasse zur Reduktion der klimawirksamen CO<sub>2</sub>-Erhöhung leisten kann. Wälder mit ihrem hohen

**ABB. 3 | WIRKUNG VON ERHÖHEM CO<sub>2</sub>- UND N-GEHALT AUF PFLANZEN**



Gezeigt ist die kombinatorische Wirkung von erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft und N-Düngung auf die Photosynthese von Baumwollpflanzen (a) und auf den jährlichen Biomassenzuwachs (b) sowie die Artenvielfalt („species richness“) (c) einer alpinen Grasvegetation in der Tibetischen Hochebene. a) Baumwollpflanzen wurden in Erde bei niedriger oder erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration kombiniert mit 0,6, 4, 12 oder 24 mM NO<sub>3</sub><sup>-</sup> angezogen. Die Rate der photosynthetischen CO<sub>2</sub>-Assimilation wurde im Alter von 40 Tagen in Abhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Konzentration gemessen [4]. b, c) Die natürliche CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Umgebung einer natürlichen Grasvegetation wurde um 100 ppm erhöht und die natürliche N-Verfügbarkeit von etwa  $0,6 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  um  $5 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  gesteigert. Die dargestellten Ergebnisse wurden im 5. Jahr nach Beginn des Experiments ermittelt. Methoden und Daten siehe [6]. Die kombinierte Behandlung verdoppelte den Biomassenertrag (b) und führte zu einem signifikanten Verlust an Artenvielfalt (c). Der Stern zeigt einen signifikanten Unterschied zur Kontrollgruppe.

C-Speicherpotenzial im Bestand stehen hier ebenso im Fokus wie die Anreicherung organischen Materials im Boden oder die Rekultivierung von Mooren. Bastin et al. [7] errechneten in Modellen, dass die weltweite Aufforstung einer Fläche von  $9 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ , der Fläche Europas ohne Skandinavien, möglich wäre und dauerhaft zwischen 133 bis 276 Pg C speichern könnte. Diese Studie wurde kontrovers diskutiert und schließlich korrigiert, u. a. weil eine massive Landumnutzung mit dem Verlust natürlicher Biome verbunden wäre, besiedelte Flächen übersehen worden waren und die C-Speicherung derzeitiger Vegetationsformen unterschätzt wurde (siehe Erratum zu [7] und [8]). Unstrittig ist, dass Aufforstung einen wertvollen Beitrag zur Rejustierung des globalen C-Kreislaufs leisten könnte. Allerdings müssen begrenzende Faktoren wie Wasserverfügbarkeit, Temperatur und Nährstoffe berücksichtigt werden.

Ökologische Freilandstudien, bei denen das natürliche N-Angebot erhöht wurde, liefern solide Daten zur Abschätzung des N-Effekts. Allerdings ist eine Verallgemeinerung der Befunde nicht möglich, da verschiedene Pflanzengesellschaften unterschiedlich auf eine CO<sub>2</sub>-Erhöhung und N-Zufuhr reagieren. Abbildung 3b und c zeigen exemplarisch den Biomassenzugewinn einer alpinen Graslandschaft im Tibetischen Hochland nach Zudüngung von  $5 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  oder nach Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration um 100 ppm. Erst bei Kombination beider Behandlungen wurde die Biomassenbildung um etwa den Faktor 2 stimuliert. Die Autoren sehen darin den Hinweis auf eine Co-Limitierung des Biomassengewinns durch N und CO<sub>2</sub> [6]. Eine wichtige Beobachtung war darüber hinaus, dass der Artenreichtum bei der kombinierten Gabe von CO<sub>2</sub> und N stark abnahm. Hier ist hinzuzufügen, dass erhöhter



N-Eintrag die Artenvielfalt häufig unabhängig vom CO<sub>2</sub>-Angebot reduziert. Die Autoren weisen darauf hin, dass der hier beobachtete synergistische Effekt nicht für jeden Vegetationstyp gilt und diese Art von Zusammenhängen für verschiedene Vegetationsformen erforscht werden müsse.

Die Ergebnisse belegen, dass N eine entscheidende Größe im globalen C-Kreislauf darstellt. Nitratdüngung steigert die C-Assimilation und C-Speicherung, erhöht die oberirdische Biomasse und führt zu erhöhtem Eintrag von C als Streu in den Boden [9]. Differenziert betrachtet zeigt sich unterirdisch ein anderes Bild. Im Einklang mit der Beobachtung, dass das Wurzelsystem bei hohem Nährstoffangebot meist weniger ausgeprägt ist, war der C-Eintrag durch Feinwurzeln nach erhöhter N-Gabe eher vermindert. Auch nahm die mikrobielle Atmung im Durchschnitt um 7 Prozent und die Menge an mikrobiell gebundenem C um 20 Prozent ab. Alles in allem erhöht sich nach erhöhter N-Zugabe aber die C-Speicherung im Boden insbesondere durch Erhöhung des C-Gehalts in der organischen Schicht des Bodens [9]. Eine Metaanalyse deutet an, dass der N-Effekt besonders stark in Grasvegetationen war, gefolgt von temperaten Nadelwäldern und ähnlich in temperaten Laubwäldern und tropischen Wäldern [9]. Diese verschiedenen Untersuchungen belegen die Bedeutung der Nährstoffverfügbarkeit für die Biomassenproduktion und C-Speicherung einzelner Vegetationstypen unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration.

### Modellierung der Nettoprimärproduktion bei erhöhtem CO<sub>2</sub>- und N- und P-Mangel

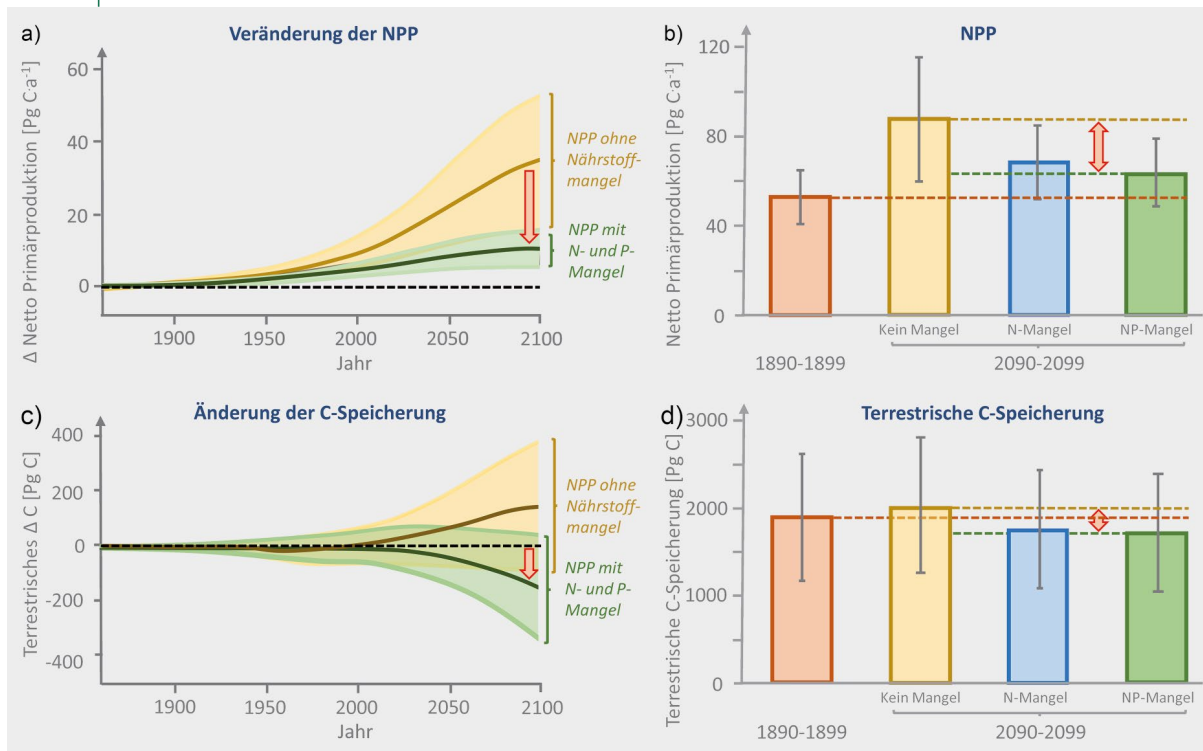
Die Kapazität und tatsächliche Leistung der biologischen CO<sub>2</sub>-Bindung auf dem Land lassen sich nur punktuell und mit großem Aufwand experimentell messen. Da die Zahl der durchgeführten Studien klein und exemplarisch ist, können diese Größen auf globaler Ebene nur in Modellen mit hoher Unsicherheit abgeschätzt werden. Zentral geht es um die Frage, ob die zunehmende CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre dazu führt, dass sich die Photosynthese und damit die biologische CO<sub>2</sub>-Fixierung und CO<sub>2</sub>-Speicherung erhöhen und einen Beitrag zur Dämpfung der Klimaeffekte leisten. Solche Modelle sind wichtig, um die Rückkopplung zwischen atmosphärischem CO<sub>2</sub>-Anstieg und globalem Kohlenstoffzyklus zu verstehen. Sie liefern Grundlagen für politische und gesellschaftliche Entscheidungen. Die Modelle unterstützen die Annahme, dass die terrestrische Biomassenproduktion durch Pflanzen eine CO<sub>2</sub>-Senke darstellt, die potenziell durch die zunehmende CO<sub>2</sub>-Konzentration stimuliert wird. Diesem CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt läuft allerdings die Begrenzung durch andere Faktoren, insbesondere die N- und P-Verfügbarkeit, entgegen (siehe oben). Dies führt dazu, dass die globale C-Speicherung im Vergleich zu den historischen und im Modell verwendeten initialen Werten von 1890–1899 sogar abnehmen könnte [10] (Abbildung 4). Modelle ohne Nährstoffbegrenzung sagen im Mittel eine Steigerung der Nettoprimär-

produktion (NPP) um 63 Prozent von  $53 \pm 27 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$  auf  $88 \pm 28 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$  durch den Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration bis zum Jahr 2100 voraus. Eine Begrenzung der N- und P-Verfügbarkeit erniedrigt den modellierten Zuwachs auf  $64 \pm 15 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$ . Im Kontext der Nachhaltigkeit ist es wichtig zu erkennen, dass trotz Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre die in der Biomasse gespeicherte C-Menge durch die Begrenzungen im N- und P-Angebot sogar abnehmen könnte (Abbildung 4). Im Mittelwert der Ergebnisse der verschiedenen Modelle würden dadurch trotz erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre knapp 8 Prozent weniger C in der Biomasse aller Biome gespeichert [10].

Die Bedeutung der mineralischen Ernährung für die Biomassenproduktion auch der Wälder geht weit über die N- und P-Verfügbarkeit hinaus [11]. In ihrer Studie mit mehr als 3100 Messungen auf 425 Messflächen in 25 europäischen Ländern an *Fagus sylvatica* (Rotbuche), *Quercus petraea* (Traubeneiche), *Quercus robur* (Stieleiche), *Abies alba* (Weißtanne), *Picea abies* (Gemeine Fichte) und *Pinus sylvestris* (Gemeine Kiefer) beobachteten diese Autoren verbreitete S-, Ca-, Mg- und K-Defizienz in europäischen Wäldern. Als eine der Ursachen wurde das beschleunigte Wachstum der Bäume aufgrund erhöhten CO<sub>2</sub>- und N-Eintrags gesehen, wodurch der Mineralstoffbedarf steigt [11] und in der Folge Mangelerscheinungen (z. B. Mg, Ca) auftreten (die sog. neuartigen Waldschäden der 80er Jahre).

### Erhöhtes N-Angebot stimuliert die Freisetzung anderer klimawirksamer Gase

Die scheinbar positive Wechselwirkung zwischen den C- und N-Kreisläufen mit Blick auf die CO<sub>2</sub>-Bindung durch gesteigerte Photosynthese könnte zu dem Schluss führen, dass weitflächige N-Düngung in natürlichen Beständen eine Lösung ist, den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre zu senken. Aus Naturschutz- und Biodiversitätsgründen und vielen weiteren Aspekten ist dieser Ansatz allerdings zu verwerfen. Denn ein erhöhter N-Eintrag wirkt sich zusätzlich negativ auf die Zusammensetzung und den Metabolismus der Rhizosphäre aus. So setzen methanogene Archaeen bei erhöhter N-Verfügbarkeit im Boden vermehrt das klimawirksame Gas Methan (CH<sub>4</sub>) und denitrifizierende sowie nitrifizierende Bakterien Stickoxide, insbesondere N<sub>2</sub>O, frei [12]. Beide Autoren führten eine Metaanalyse von über 109 Studien durch und kamen im Mittel auf eine Steigerung der CH<sub>4</sub>-Emission auf 197 Prozent und der N<sub>2</sub>O-Freisetzung auf 316 Prozent, wenn N zugeführt wurde. Gleichzeitig erniedrigte sich die CH<sub>4</sub>-Aufnahme um 38 Prozent. Die Klimawirksamkeit von CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O übertrifft die von CO<sub>2</sub> um das 23- bzw. 296-fache. Dies führt zu einer zu beachtenden Klimawirksamkeit, obwohl die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre mit 411 ppm (parts per million) die von CH<sub>4</sub> (1,9 ppm) und N<sub>2</sub>O (0,3 ppm) vielfach übersteigt. Aus diesem Grund könnten die positiven Effekte der Verringerungen an CO<sub>2</sub> durch

**ABB. 4 | EINFLUSS VON N- UND P-MANGEL AUF DIE GLOBALE NETTOPRIMÄRPRODUKTION**


**Modellierte Auswirkung von N- und P-Mangel auf die Zunahme der globalen Nettoprimärproduktion (NPP) und der C-Speicherung seit 1860 mit Projektion bis 2100 (Daten aus [10]). a, b) Die Erhöhung des atmosphärischen  $\text{CO}_2$  stimuliert die  $\text{CO}_2$ -Fixierung durch die Photosynthese, allerdings ist das Ausmaß durch Nährstoffmangel geringer als bisher angenommen. a) Dargestellt ist die Veränderung bezogen auf den Vergleichswert von 1860. Der Berechnung liegt das Modell  $\text{RCP8.5}$  zum Anstieg der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre zugrunde. b) Absolute Werte der NPP in der Dekade von 1890–1899 sind den errechneten Werten für 2090–2099 gegenübergestellt. Die Prognose vergleicht drei Modelle, denen keine Nährstofflimitierung, N- oder N/P-Begrenzung zugrunde gelegt sind. c) Die Beschränkung durch Nährstoffe hat Auswirkungen auf die in Biomasse auf dem Land gespeicherte C-Menge. Ohne Düngung nimmt nach diesem Modell die auf dem Land gespeicherte C-Menge trotz erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Luft ab. d) Einfluss der Nährstoffverfügbarkeit auf die auf dem Land in Pflanzen und im Boden gespeicherte C-Menge im Vergleich zur C-Speicherung ohne Nährstoffbegrenzung und zur C-Speicherung während der Referenzdekade von 1890–1899 [10].**

N-Düngung durch gegenläufige Effekte der N-Düngung auf die atmosphärischen  $\text{CH}_4$ - und  $\text{N}_2\text{O}$ -Gehalte zunichtegemacht werden [12].

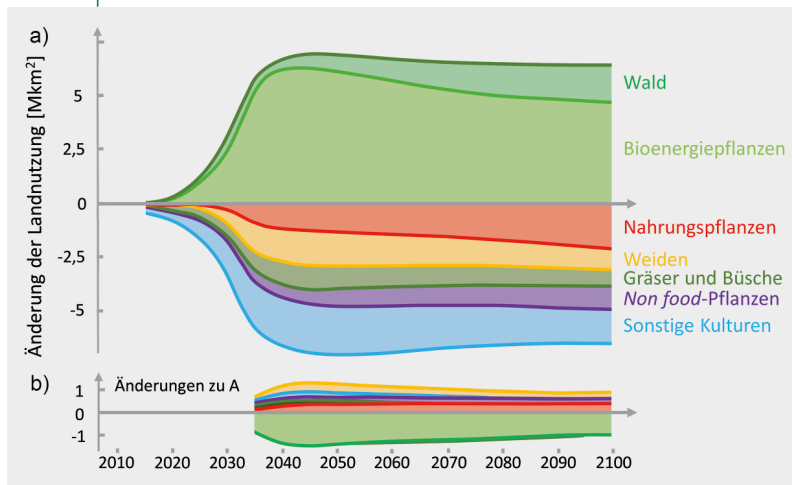
### Technische Lösungen müssen zur $\text{CO}_2$ -Bindung beitragen

Aufforstung und nachhaltige Landwirtschaft mit geringem Energieaufwand sind Beispiele, wie die Steigerung der biologischen  $\text{CO}_2$ -Fixierung durch die Photosynthese und C-Speicherung in der Biomasse einen Beitrag zur Verringerung des atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Anstiegs leisten können. Allerdings reichen diese biologischen Mechanismen nicht aus. Vorrangige Aufgabe der Landwirtschaft muss die Versorgung der weiter wachsenden Weltbevölkerung mit Nahrungsmitteln und die Überwindung des Hungers sein. Konkurrenz um Landnutzung zwischen Ernährung und Biomassenproduktion zur Speicherung oder zur Gewinnung von regenerativer Energie sollte weitgehend vermieden werden (Abbildung 5). Um das Ziel zu erreichen, den weltweiten Temperaturanstieg auf  $1,5^\circ\text{C}$  zu begren-

zen, müssen „negative Emissionstechnologien“ (NET) entwickelt und eingesetzt werden. Mitte des Jahrhunderts müsste hierzu ein Nullemissionsszenario umgesetzt werden [15]. Integrierende Bewertungsmodelle (Integrated Assessment Modelling „IAM“) werden angewendet, um den Anstieg an Klimagasen zu prognostizieren. Fuhrman et al. [13] simulierten Szenarien, wie  $\text{CO}_2$ -Freisetzung vermieden und welchen Beitrag biologische und technische  $\text{CO}_2$ -Bindung leisten können. Biologische Methoden sind die vermehrte Nutzung von Bioenergie und Aufforstung. Neben der Konkurrenz um Landfläche sind der Wasser- und Nährstoffverbrauch weitere kritische Gesichtspunkte biologischer NETs. Vor diesem Hintergrund werden technische Lösungen zur direkten  $\text{CO}_2$ -Bindung aus der Luft („direct air capture“, „DAC“) interessant und wichtig.

Beim DAC wird  $\text{CO}_2$  aus der Luft gebunden und in geeignete geologische Schichten injiziert, wo es im Gestein fixiert wird. Die entscheidenden Fragen zur Umsetzung dieser technischen Möglichkeit, die Atmosphäre zu decarbonisieren, betreffen die Kosten, den Energiebedarf

**ABB. 5 | ÄNDERUNG DER LANDNUTZUNG BIS 2100**



**Prognostizierte Änderung der weltweiten Landnutzung für das Szenario, in dem Bioenergie und Aufforstung einen wesentlichen Beitrag zur Bindung des freigesetzten CO<sub>2</sub> leisten sollen. a) Der zunehmende Flächenbedarf für die biologische CO<sub>2</sub>-Bindung führt in diesem Modell zur Verringerung der Flächen für die übrigen Nutzungstypen wie den Anbau von Nahrungspflanzen oder Weiden. Der Wert von 5–6 Mio km<sup>2</sup> entspricht etwa 10 Prozent der landwirtschaftlich genutzten Fläche der Erde [14]. b) Sofern ab 2035 preiswerte DAC-Verfahren zur direkten Bindung und Mineralisierung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre eingesetzt werden, sinkt die Umnutzung. Gezeigt ist die Differenz mit DAC.**

und die ökologischen Nebenwirkungen. Der geringere Wasser- und vernachlässigbare Landverbrauch im Vergleich zu biologischen NETs sind positive Aspekte. Fuhrman et al. [13] verglichen in Modellen die Auswirkungen der drei Decarbonisierungsmethoden BECCS (Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Bindung und -Lagerung), Aufforstung und DAC auf die Nahrungsproduktion, die Energienutzung und den Wasserverbrauch. Sofern der hohe Druck auf Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emission anhält, sehen die Autoren ab 2035 einen signifikanten Beitrag von DAC zur Decarbonisierung als wichtig an. Die Nutzung von DAC-Technologien ist nötig, um die negativen Folgen der biologischen NETs durch Konkurrenz auf die Landnutzung zu verringern. Hier sind eine absehbare Erhöhung der Nahrungsmittelpreise, die Zunahme des Düngemittel- und Wasserbedarfs und negative Effekte auf die Biodiversität zu nennen. So wird beispielsweise für afrikanische Länder eine Versechsfachung der Nahrungsmittelpreise vorhergesagt, wenn der Druck auf die Landnutzung durch Priorisierung biologischer Verfahren zur Decarbonisierung wie Aufforstung und BECCS anhält [13]. Nach diesen Modellrechnungen steigen die Nahrungsmittelpreise in allen Ländern um das 2,5- bis 4-fache, wenn keine DAC-Technologien genutzt werden.

Dieser Artikel fokussierte sich auf die Biomassenerzeugung auf dem Land. Interessante Perspektiven könnten sich durch Steigerung der photosynthetischen Biomassenproduktion in den Ozeanen ergeben. So führte die Düngung mit Eisen zu einer Phytoplanktonblüte [16]. Diese zusätzliche Biomasse bindet CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre. Allerdings bedarf es auch bei diesem Ansatz einer kriti-

schen Bewertung der ökologischen Konsequenzen, wie es in diesem Artikel für die N- und P-Düngung terrestrischer Systeme erfolgt ist. Somit bleiben als vorrangige Ziele und Maßnahmen, die anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu vermindern, die Vernichtung von Wäldern zu stoppen und Moore zu erhalten.

### Zusammenfassung

Biologische Prozesse sind die wesentlichen Triebkräfte im globalen C-Kreislauf. Das Ausmaß der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Freisetzung ist nicht tolerabel und gefährdet die Biosphäre. Die steigende CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre ist Ausdruck des Akkumulationseffekts seit Beginn der Industrialisierung und muss gestoppt werden. Die Steigerung der Photosynthese durch die erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre könnte einen größeren Beitrag zur Bindung des zusätzlichen CO<sub>2</sub> leisten, wenn nicht andere Wachstumsfaktoren, insbesondere die N- und P-Verfügbarkeit, das Wachstum begrenzen. Düngung könnte helfen, diese Limitierung zu überwinden. Allerdings würde dies die natürlichen Biome stören, die Bodenzusammensetzung ändern, vielfach zu Verlusten an Biodiversität führen und vermehrt andere klimaschädliche Gase wie CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O freisetzen. Deshalb ist ein solcher Ansatz nur sehr eingeschränkt anwendbar und keine globale Lösung. Weltweite Aufforstung kann einen wichtigen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduktion leisten. Allerdings wird die Kapazität dieser Maßnahme in manchen Modellen überschätzt. Die Konsequenzen insbesondere für die Landnutzung, den Erhalt natürlicher Biome, die Kosten für Nahrungsmittel und sozio-ökonomische Traditionen sind zu bedenken. Die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission durch weniger Verbrennung muss hohe Priorität erhalten. Daneben müssen die technische Entwicklung und ökonomische Umsetzung „negativer Emissionstechnologien“ einen Beitrag leisten. Die Entscheidungen im Kontext des Klimawandels müssen in den Gesamtrahmen weiterer Nachhaltigkeitsziele wie die Überwindung der Armut und der Zugang zu bezahlbarer und gesunder Nahrung eingebettet sein.

### Summary

#### The carbon cycle in the era of global change and the contribution of biomass to the sustainability goals

Biological processes represent the major driving forces in the global carbon (C) cycle. The extent of anthropogenic CO<sub>2</sub> release threatens our future and is not tolerable. The increase in atmospheric CO<sub>2</sub> reflects the cumulative effect of human activities over more than a century and must be stopped. The contribution of photosynthesis to the binding of excess CO<sub>2</sub> could be increased if other limitations such as limited N- and P-availability were overcome. The productivity of various types of vegetation increases upon application of fertilizers. However, N-fertilization jeopardizes natural biomes, alters the rhizosphere, decreases the biodiversity and stimulates the release of potent greenhouse gases such as CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O. Therefore, fertilization must be restricted

and fails as global solution to increase CO<sub>2</sub> binding in biomass in context of climate action. Worldwide afforestation appears a powerful action. However, its capacity to reduce CO<sub>2</sub> is sometimes overestimated. The consequences of afforestation on land use change, conservation of natural biomes, crop food prices and socio-economic traditions need to be considered. High priority must be given to the reduction of CO<sub>2</sub> emission by combustion. In addition, there is urgent need to technically develop and economically implement negative emission technologies. Decisions in context of climate actions must be placed in the framework of all sustainable development goals including no poverty and no hunger.

### Schlagworte:

Ernährung, Kohlenstoffkreislauf, Landnutzung, Negative Emissionstechnologien, Photosynthese, Stickstoffdüngung.

### Literatur

- [1] P. Friedlingstein et al., Global Carbon Budget 2019. *Earth Syst. Sci. Data*, 2019, 11, 1783–1838.
- [2] K. J. Dietz, An evaluation of light and CO<sub>2</sub> limitation of leaf photosynthesis by CO<sub>2</sub> gas-exchange analysis. *Planta*, 1986, 167, 260–263.
- [3] M. Stitt, A. Krapp, The interaction between elevated carbon dioxide and nitrogen nutrition: the physiological and molecular background. *Plant, Cell and Environment*, 1999, 22, 583–621.
- [4] S. C. Wong, Elevated atmospheric partial pressure of CO<sub>2</sub> and plant growth I. Interactions of nitrogen nutrition and photosynthetic capacity in C3 and C4 plants. *Oecologia (Berl.)*, 1979, 44, 68–74.
- [5] C. Martius, Density, humidity, and nitrogen content of dominant wood species of floodplain forests (várzea) in Amazonia. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 1992, 50, 300–303.
- [6] J. Zhu et al., Synergistic effects of nitrogen and CO<sub>2</sub> enrichment on alpine grassland biomass and community structure. *New Phytologist*, 2020, <https://doi.org/10.1111/nph.16767>.
- [7] J. F. Bastin et al., The global tree restoration potential. *Science*, 2019, 365, 76–79. Erratum: *Science*, 2020, 368 (6494): eabc8905.
- [8] E. Luedeling et al., Forest restoration: Overlooked constraints. *Science*, 2019, 366 (6463), 315.
- [9] L. Liu, T. L. Greaver, A global perspective on belowground carbon dynamics under nitrogen enrichment. *Ecology Letters*, 2010, 13, 819–828.
- [10] W. R. Wieder et al., Future productivity and carbon storage limited by terrestrial nutrient availability. *Nature GeoScience*, 2015, 8, 441–445.
- [11] M. Jonard et al., Tree mineral nutrition is deteriorating in Europe. *Global Change Biology*, 2015, 21, 418–430.
- [12] L. Liu, T. L. Greaver, A review of nitrogen enrichment effects on three biogenic GHGs: the CO<sub>2</sub> sink may be largely offset by stimulated N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emission. *Ecology Letters*, 2009, 12, 1103–1117.
- [13] J. Fuhrman et al., Food-energy-water implications of negative emission technologies in a +1.5°C future. *Nature Climate Change online first*, 2020, [doi.org/10.1038/s41558-020-0876-z](https://doi.org/10.1038/s41558-020-0876-z)
- [14] A. Jering et al., Globale Landflächen und Biomasse: nachhaltig und ressourcenschonend nutzen. *Umweltbundesamt*, 2013.
- [15] IPCC Special Report on Global Warming of 1.5 °C (eds Masson-Delmotte, V. et al.), WMO, 2018.
- [16] K. H. Coale et al., A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean. *Nature*, 1996, 383, 495–501.
- [17] <https://www.carbonbrief.org/explainer-the-high-emissions-rcp8-5-global-warming-scenario>.

### GLOSSAR

**BECCS:** Bei diesem NET-Verfahren wird Biomasse zur Energieerzeugung genutzt. Das dabei freigesetzte CO<sub>2</sub> wird wie beim DAC-Verfahren in geologische Schichten gepresst, wo es mineralisiert und dauerhaft gebunden bleibt.

**DAC:** „Direct Air Capture“ ist eine rein technische NET, bei der CO<sub>2</sub> aus der Luft gebunden und in geeignete geologische Schichten gepumpt wird. Dort setzt dann ein Mineralisierungsprozess zu Carbonaten ein, so dass das CO<sub>2</sub> dauerhaft der Atmosphäre entzogen bleibt.

**NET:** Negative Emissionstechnologien, die die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre erniedrigen.

**RCP8.5:** Globale Zukunftsszenarien zum Klimawandel basieren auf Annahmen über die zukünftige Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emission. Das „representative concentration pathways“ (RCP8.5)-Modell geht von einer Fortsetzung und Steigerung der bisherigen Emissionen an Treibgasen aus („business as usual“) [17]. Darin wird angenommen, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration bis zum Ende dieses Jahrhunderts auf 1370 ppm CO<sub>2</sub> von heute 425 ppm ansteigt. Dieses Modell ist wegen seiner drastischen Annahmen strittig. Es gibt weitere mildere Szenarien wie RCP6, RCP4,5 und RCP2.6-PD. Das zuletzt genannte RCP2.6PD-Modell sieht effiziente Maßnahmen der Menschheit zur Reduktion der Treibhausgasemissionen vor. Dadurch wird nach der maximalen Belastung („peak“) eine Abnahme („decay“) der Konzentrationen in der Atmosphäre ermöglicht. So könnte sich die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration bis zum Jahr 2100 nach einem Maximum bei 490 ppm wieder erniedrigen.

**Pg C:** Petagramm Kohlenstoff sind 10<sup>15</sup>g C oder 10<sup>9</sup> Tonnen C. Im deutschen Sprachgebrauch wird alternativ Gigatonnen C genutzt. Ein m<sup>3</sup> Holz enthält etwa 250 kg C. Dies bedeutet, dass die im Text angegebene Menge an 550 Pg C in der Vegetation ausgedrückt in Holzäquivalenten einem Holzkubus von 13 km Kantenlänge entspricht.

### Der Autor



Karl-Josef Dietz studierte Biologie an der Universität Würzburg. Dort wurde er 1985 zu dem Thema *Limitierung der Photosynthese in Blättern* promoviert. Nach einem Postdoc-Aufenthalt an der Harvard University (1985–1987) zum Erlernen molekularbiologischer Ansätze, wurde er 1990 in Würzburg habilitiert, wobei ihn die Wechselwirkung zwischen der mineralischen Ernährung und der Photosynthese und die Funktion der Vakuole, insbesondere vakuolärer Transporter, beschäftigte. Im Jahr 1997 erhielt er die Professur für Biochemie und Physiologie der Pflanzen an der Universität Bielefeld. Seitdem befasst sich seine Forschung mit Themen der abiotischen Stressanpassung von Pflanzen, dem redoxregulatorischen Signalnetzwerk der Zelle, der intrazellulären molekularen Kommunikation und der Wirkung kombinatorischer Stresses. 2011 erhielt er den Gay-Lussac-Humboldt-Preis. Er war von 2012–2019 Präsident der Deutschen Botanischen Gesellschaft und ist seit Ende 2020 Präsident des VBIO.

#### Korrespondenz:

Prof. Dr. Karl-Josef Dietz  
Biochemie und Physiologie der Pflanzen  
Universität Bielefeld  
33615 Bielefeld  
E-Mail: [karl-josef.dietz@uni-bielefeld.de](mailto:karl-josef.dietz@uni-bielefeld.de)