

Fossiles im Blut

von Hans-Peter Schmidt^{1*} und Nikolas Hagemann^{1,2,3}

Artikel Information

veröffentlicht am 21. Januar 2024

¹ Ithaka Institute for Carbon Strategies, Ancienne Eglise 9, CH-1974 Arbaz, Switzerland

² Ithaka Institute Germany, Altmutter Weg 21, 63773 Goldbach, Germany

³ Agroscope, Reckenholzstrasse 191, 8046 Zürich, Switzerland

* Korrespondierender Autor: schmidt@ithaka-institut.org

Zitierweise:

Schmidt HP, Hagemann N, Fossiles im Blut, Ithaka-Journal 2024, Arbaz, Switzerland, ISSN 1663-0521, pp. 450-454, www.ithaka-journal.net

Durch die Verbrennung von Erdöl, Erdgas und Kohle ist der CO₂-Gehalt der Atmosphäre in den letzten Jahrzehnten um gut 30% und in den Meeren um gut 20% gestiegen. Da zwischen Atmosphäre, Biosphäre, Meer und Boden der Kohlenstoff in beständigem Austausch steht, hat sich der ursprünglich fossile, in die Atmosphäre emittierte Kohlenstoff über die verschiedenen Reservoirs verteilt. Pflanzen sind rasende Kohlenstoff-Recycler, sie nehmen beständig CO₂ auf und geben es mit einiger Verzögerung wieder an die Atmosphäre ab. Es dauert so kaum 10 Jahre, bis die gesamte Menge an CO₂ der Atmosphäre einmal vollständig von der Biosphäre aufgenommen und wieder abgegeben wird. Auch die Meere nehmen beständig CO₂ aus der Atmosphäre auf und geben es gut durchmischt wieder zurück. Aufgrund dieser vielfältigen Durchmischungsvorgänge lässt sich berechnen, dass in sämtlichen Pflanzen der Biosphäre mindestens 10% des Kohlenstoffs ursprünglich aus fossilen Quellen stammt. Über 10% des Kohlenstoffs in unserem Blut, in unseren Zellen und in unserem Atem stammen also aus ehemaligen Öl- Gas- oder Kohlevorkommen, die durch Schornsteine und über Autoabgase den Weg in den biologischen Kohlestoffkreislauf gefunden haben. Je bewusster wir uns darüber werden, wie wir die Welt verändert haben und in welcher Lage wir uns befinden, desto sinnvoller werden womöglich auch die Entscheidungen, wie die Probleme, in die wir uns verrannt haben, doch noch zu lösen sind.

Anteil fossiler Kohlenstoffe in der Atmosphäre

Im Jahr 1750, also zur Zeit der beginnenden Industrialisierung betrug der CO₂-Gehalt der Atmosphäre 280 ppm. Seither wurden durch menschliche Aktivitäten rund 1'800 Gt CO₂ aus der Verbrennung von fossilen Kohlenstoffen sowie bei der Zementherstellung emittiert (IPCC, 2022; Knutti & Rogelj, 2015). Zum Ende des Jahres 2023 betrug

die CO₂-Konzentration 420 ppm. Aufgrund der anthropogenen Emissionen hat sich der CO₂-Gehalt der Atmosphäre folglich um $(100\% - 280 \text{ ppm} / 420 \text{ ppm} =) 33\%$ erhöht.

Die Atmosphäre hat eine Masse von $5,15 \cdot 10^{15} \text{ t}$ (5,15 Quadrillionen Tonnen = 5,15 Pt). Der Anteil an zusätzlich in der Atmosphäre aufgenommenen Kohlenstoff entspricht somit:

$$M_{\text{CO}_2\text{add}} = \frac{420 \text{ ppm} - 280 \text{ ppm}}{1.000.000} * 5.15 * 10^{15} \text{ t CO}_2 = 721 * 10^9 \text{ t CO}_2 = 721 \text{ GtCO}_2$$

CO₂ wird in der Atmosphäre nicht abgebaut, sondern kann nur durch Aufnahme in andere Kohlenstoff-Reservoirs (Biosphäre, Boden und Meere) wieder entfernt werden. Von den emittierten 1'800 Gt fossilen CO₂ sind folglich mindestens 1080 GtCO_{2e} bereits auf andere natürliche C-Reservoirs übergegangen.

Durch Entwaldung, Trockenlegung von Feuchtgebieten und Überbauung und ähnlichen Landnutzungsänderungen wurden zwar ebenfalls sehr hohe biogene CO₂-Emissionen von (760 ± 220 GtCO₂) verursacht (IPCC, 2022), dennoch ist der C-Gehalt der Biosphäre und der Humusgehalt der Böden im globalen Durchschnitt in den letzten 250 Jahren in etwa gleich geblieben (Reichle, 2023). Dies lässt sich durch höhere Biomasseproduktivität des landwirtschaftlichen Sektors sowie die düngende Wirkung höherer CO₂-Gehalte und der Stickstoff-Depositionen in natürlichen Systemen erklären. Die Menge der in der Anthroposphäre eingebauten biogenen Kohlenstoffe (gebaute Umwelt und hier vor allem das Baumaterial Holz) hat sich in den letzten Jahrhunderten stark erhöht (Elhacham et al., 2020; Sandak, 2023), sind im Vergleich zu den globalen Kohlenstoffströmen jedoch noch vernachlässigbar. Es ist also davon auszugehen, dass von den rund 1800 GtCO₂, die aufgrund von fossilen Emissionen den Kohlenstoffgehalt im kleinen Kohlenstoffkreislauf (Atmosphäre, Biosphäre, Anthroposphäre, Boden und Meere) erhöht haben, zu 40% (720 GtCO₂) in Atmos- und Biosphäre und zu 60% in den Ozeanen zu finden ist.

Der Kohlenstoff und seine Kreisläufe

Der Kohlenstoffkreislauf ist ein Phänomen, das sich gut mit Alltagsbeobachtungen nachvollziehen lässt: Pflanzen bestehen zu rund 50% aus Kohlenstoff. Wachsen sie im Garten heran, entziehen sie den dafür benötigten Kohlenstoff als CO₂ aus der Atmosphäre. Wenn wir dann das Gartengemüse essen, verdauen und veratmen wir die Kohlenstoffverbindungen. Ein Teil des verdauten Kohlenstoffs wird in die Zellen eingebaut, ein anderer Teil wird ausgeschieden. Der größte Teil aber wird über den Atem als CO₂ ausgestoßen. Es sind immerhin rund 1 kg CO₂, die ein durchschnittlicher Mensch pro Tag ausatmet. Die nicht für die Nahrung verwendeten Pflanzenteile kommen auf den Komposthaufen, wo sie von verschiedenen Organismen zerkleinert und verdaut werden, auch hier gelangt wieder CO₂ in die Atmosphäre. Ein Teil verbleibt als Kompost, der wieder ins Beet eingearbeitet wird. Ebenso wie die in der Erde verbliebenen Wurzeln verweilt dieser Kohlenstoff etwas länger im Boden, doch nach einigen Jahren werden auch diese Moleküle von Mikroorganismen abgebaut, und

der Kohlenstoff kehrt als CO₂ zurück in die Atmosphäre. Ein kleiner Teil des im Boden gebundenen Kohlenstoffs wird mit dem Grund- und Oberflächenwasser ausgewaschen und gelangt ins Meer, von wo es erst sehr viel später wieder in die Atmosphäre ausgestoßen wird.

Mit diesem Bild vor Augen wird rasch klar: Wenn wir fossilen Kohlenstoff verbrennen, geht dieser nicht einfach nur in die Atmosphäre, sondern verteilt sich von dort innerhalb von Jahrzehnten in die verschiedenen Bereiche des kleinen Kohlenstoffkreislaufs zwischen der Atmosphäre, der Biosphäre, der Pedosphäre (dem Boden) und der Hydrosphäre, d.h. den Süßwassern und den Ozeanen.

Ein sehr kleiner Anteil des Kohlenstoffs dringt über die Verkohlung durch Wald- und Steppenbrände, die Silikat-Verwitterung und weitere geodynamische Prozesse bereits in den großen, die Lithosphäre einschließenden Kohlenstoffkreislauf ein und wird somit wieder Teil der Geologie, aus der die fossilen Rohstoffe entnommen worden waren. Doch dieser Pfad kann für unsere Betrachtung vernachlässigt werden, da er in dem aus geologischer Sicht sehr kurzen Zeitraum von 250 Jahren kaum eine Rolle spielt.

Die Verteilung fossilen CO₂ im kleinen Kohlenstoff-Kreislauf

Entsprechend der Reflux-Funktion (Jeltsch-Thömmes & Joos, 2019) geschieht der Konzentrationsausgleich der Atmosphäre in den ersten Jahrhunderten vor allem mit der Biosphäre und den Ozeanen.

Die Ozeane haben bisher insgesamt eine Menge von 1080 Gt CO_{2e} zusätzlich aufgenommen und speichern heute insgesamt rund 3000 Gt CO_{2e} (Gruber et al., 2019). Die Biosphäre enthält rund 2000 Gt CO_{2e} in Form von organischem Kohlenstoff in Pflanzen, Algen, Tieren und Mikroorganismen (Bar-On et al., 2018). Die organischen Bodenschicht (0 – 2 m Bodentiefe), auch Pedosphäre genannt, enthält zudem rund 8800 Gt CO_{2e} in Form von Humus, abgestorbenen Pflanzenteilen, Knochen etc. (Batjes, 1996; Beillouin et al., 2023). Die Biosphäre steht durch die Photosynthese und der damit verbundenen pflanzlichen Entnahme von CO₂ aus der Luft im direkten Austausch mit der Atmosphäre. Folglich nehmen Pflanzen auch Kohlenstoff aus der Atmosphäre auf, der ursprünglich als Erdöl, Kohle oder Gas aus geologischen Lagerstätten gefördert und verbrannt wurde. Chemisch sind fossiles und nicht-fossiles CO₂ identisch, für die Pflanze macht dies keinen Unterschied. Auch wissenschaftlich kann für ein einzelnes Kohlenstoffatom nicht bestimmt werden, ob es

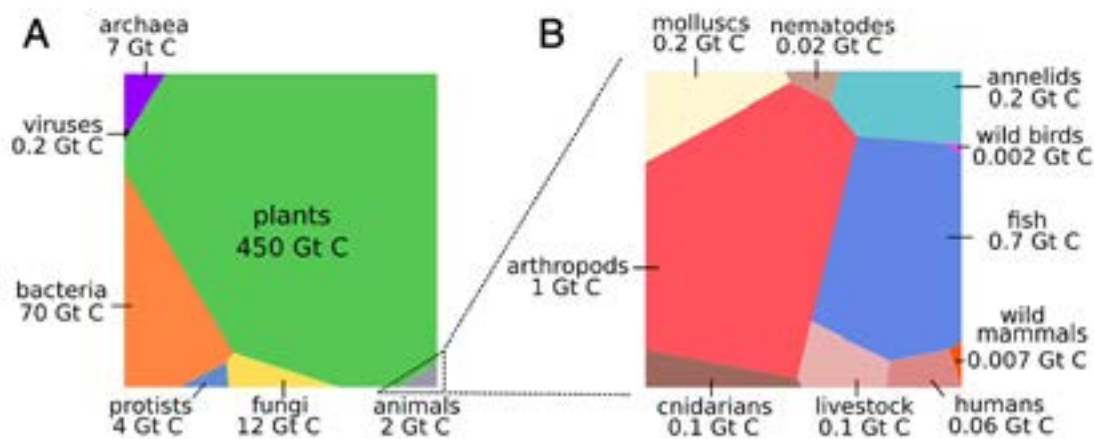


Abb. 1: Grafische Darstellung der globalen Verteilung des Kohlenstoffs in der Biomasse in den wichtigsten taxonomischen Gruppen; A, wobei die Fläche jeder Zelle proportional zur globalen Biomasse der jeweiligen Taxa ist; B, Kohlenstoff in der Biomasse verschiedener Tiertaxa, wobei der Beitrag von Reptilien und Amphibien zur gesamten tierischen Biomasse vernachlässigbar ist (Bar-On et al., 2018).

ohnehin schon Teil des kleinen Kohlenstoffkreislaufs zwischen Bio- und Atmosphäre war oder fossilen Ursprungs ist. Größere, zusammenhängende Einheiten an fossilem Kohlenstoff (z.B. Benzin, Plastik im Abfall oder im Abgas eines Kohlekraftwerks) lassen sich durch Isotopenbestimmung von biogenem Kohlenstoff (z.B. Holz oder Stroh) unterscheiden, nicht aber wenn die CO₂-Moleküle zuvor in der Atmosphäre durchmischt wurden.

Weltweit nehmen Pflanzen und Algen pro Jahr zwischen 380 und 475 Gt CO₂e aus der Atmosphäre auf (Madani et al., 2020), was als Gros Primary Productivity (GPP) bezeichnet wird. Einen wesentlichen Teil dieses Kohlenstoffs geben die Pflanzen durch ihre Atmung praktisch unmittelbar wieder an die Atmosphäre ab. Das eigentliche Wachstum von Biomasse, das man als Net Primary Productivity (NPP) bezeichnet, akkumuliert rund 205 Gt CO₂e pro Jahr (Ito, 2011; Reichle, 2023). Da der weltweit in der Biomasse gespeicherte Kohlenstoff insgesamt rund 2000 GtCO₂e beträgt, folgt aus der jährlichen NPP von 205 GtCO₂e eine durchschnittliche Umlaufzeit des Kohlenstoffs in der Biosphäre von $(2000 \text{ GtCO}_2\text{e} / 205 \text{ GtCO}_2\text{e} \cdot \text{a}^{-1}) = 9,8$ Jahre. Der Kohlenstoff der Biosphäre von 2000 Gt CO₂e wird also im Schnitt alle 10 Jahre einmal erneuert – dieser Zeitraum ist das Mittel über alle Arten von Biomasse, von der 1000-jährigen Eiche bis hin zur kurzlebigen Blume auf der Almweide. In dieser Zeit wird das gesamte CO₂ der Atmosphäre (2160 GtCO₂e) knapp einmal komplett aufgenommen und wieder abgegeben (Green & Byrne, 2004). Konservativ gerundet tauscht die globale Pflanzenwelt also aller gut zehn Jahre einmal das gesamte CO₂ der Atmosphäre aus. Der kleine C-Kreislauf zwischen Atmosphäre

und Biosphäre funktioniert quasi als CO₂-Mischmaschine.

Aufgrund des etwa 10-jährigen C-Umlaufs zwischen Biosphäre und Ozean kann davon ausgegangen werden, dass sich über die letzten 50 Jahre die Konzentration ursprünglich fossilen Kohlenstoffs in der Atmosphäre und in der Biosphäre einander angeglichen haben. In älteren Bäumen, deren Kohlenstoff teils schon vor vielen Jahren, als die fossile CO₂-Konzentration in der Umwelt niedriger war, aus der Atmosphäre aufgenommen wurde, ist die durchschnittliche Konzentration etwas niedriger, dafür entspricht sie bei einjährigen Pflanzen bereits der diesjährigen, also historisch höchsten fossilen CO₂-Konzentration der Atmosphäre.

Anteil fossilen Kohlenstoffs in unserer Umwelt

Mit Atmosphäre (2200 Gt), Biosphäre (2000 Gt), Pedosphäre (8800 Gt) und den Ozeanen (3000 Gt) umgeben uns rund 16'000 Gt CO₂e. Davon sind 1800 GtCO₂e fossilen Ursprungs, was gut 10% des gesamten Kohlenstoffs im kleinen C-Kreislauf betrifft. Für die Biomasse haben wir dargelegt, dass die Durchmischung rund 10 Jahre dauert. Im Boden verläuft die Durchmischung mit Kohlenstoff aus der Biosphäre etwas langsamer, aber insofern die mittlere Verweildauer von organischem Bodenkohlenstoff rund 50 Jahre beträgt (Schmidt et al., 2011), ist von einer vollständigen Durchmischung der Kohlenstoffe zwischen Atmosphäre, Biosphäre und Pedosphäre in gut 60 Jahren auszugehen, wobei es große Unterschiede zwischen tropischem Regenwald und einem subarktischen Feuchtgebiet gibt, da

es in warmen Klimaten signifikant schnellere Umsatzraten auf allen Stufen gibt.. Die Ozeane haben in den letzten 100 Jahren rund 60% des zusätzlich in den kleinen Kreislauf gelangten CO₂ aufgenommen, wobei sich das CO₂ ebenfalls durchmischt hat. Man kann folglich sicher davon ausgehen, dass sich der ursprünglich fossile Kohlenstoff längst so im gesamten kleinen C-Kreislauf vermischt hat und dass global im Schnitt 10% des Kohlenstoffs fossiler Herkunft ist.

Insofern der Austausch zwischen Atmosphäre und Biosphäre der schnellere ist und durch die unverminderten Emissionen aus fossilen Energieträgern die Konzentration der Atmosphäre am höchsten ist, ist auch die Konzentration ursprünglich fossilen CO₂ in der Biosphäre deutlich höher als 10%. Um wieviel höher als 10% die Konzentration tatsächlich ist, lässt sich nur sehr ungenau ermitteln, da die Umlauf- und Durchmischungszeiten der anderen Pools in diesen enormen Dimensionen mit so großen lokalen Unterschieden nur schwierig zu bestimmen sind. Es mit Sicherheit keine Überschätzung zu sagen, dass der Anteil fossilen Kohlenstoffs in Biosphäre und Atmosphäre derzeit über 20% beträgt.

Da Tiere und Menschen sich hauptsächlich aus dem schnellsten Biomasse-Pool (einjährige Pflanzen und Früchte) ernähren, ist die fossile C-Konzentration in den tierischen und menschlichen Zellen nahezu gleich mit der Konzentration fossilen CO₂ in der Atmosphäre. Der fossile C-Anteil in Tieren und Menschen, in ihrem Blut und ihrer Atmung liegt demnach ebenfalls bei weit über 10%. Um aber zu veranschaulichen, was dies psychologisch und für die C-Senken Ökonomie bedeutet, können wir zunächst auch von dem sehr konservativ ermittelten Mindestwert von 10% ausgehen.

Da der durchschnittliche menschliche Körper aus etwa 12 kg Kohlenstoff besteht und mindestens 10% fossiler Herkunft ist, enthält jeder Mensch ca. 1,2 kg Kohlenstoff, der ursprünglich als Braunkohle, Erdöl oder Erdgas tief unter der Erde lagerte, für unseren Lebenskomfort verbrannt, durch Schornsteine in die Atmosphäre emittiert, dann von Pflanzen wieder aufgenommen wurde und schließlich über die Nahrung den Weg in unsere Zellen fand. Wir atmen pro Tag ca. 1 kg CO₂ aus, wobei das C des CO₂ aus der Nahrung stammt, also ursprünglich von Pflanzen, welche das C wiederum aus der Atmosphäre aufgenommen hatten. Im Laufe von 80 Jahren wird ein Mensch rund ($365 \text{ d} * 1 \text{ kg CO}_2/\text{d} * 80 \text{ a} * 10\% =$) 3 Tonnen ursprünglich fossilen CO₂ durch seine Lunge in die Atmosphäre ausstoßen. Im Krematorium kommen noch 4,5 kg ursprünglich fossilen CO₂ als Treibhausgas dazu.

Strauchschnitt, Stroh, Gemüse und sogar die Gülle und der Klärschlamm weisen im Schnitt mindestens ein Zehntel ihres Kohlenstoffs als ursprünglich fossilen Kohlenstoff auf. Wird diese Biomasse pyrolysiert, ist im Grunde ein Zehntel der Pflanzenkohle-basierten C-Senke fossiler Herkunft und ein Zehntel der verbrannten Pyrolysegase, die wieder als Treibhausgas in die Atmosphäre emittiert werden, sind ebenfalls fossiler Herkunft.

Müllverbrennung und die Regulierung von Emissionen

Um die Emissionen bestimmter Industriezweige Schritt für Schritt zu senken, hat die EU bereits 2005 einen Emissionshandel eingeführt (EU emission trading system = EU-ETS), der nach dem Prinzip „cap & trade“ (Obergrenze und Handel) konzipiert wurde: Kraftwerke, Kokereien, Raffinerien und weitere Industriebetriebe müssen am Ende des Jahres nachweisen, dass sie für jede emittierte Tonne CO_{2e} (CO₂ aus fossilen Brennstoffen, aber auch andere Treibhausgase) auch ein Emissionszertifikat, quasi Verschmutzungsrecht, besitzen. Diese werden nach komplexen Verteilungsschlüsseln den einzelnen Betrieben zugewiesen. Emittieren sie weniger, können überschüssige Zertifikate an Firmen verkaufen, die zusätzliche Emissionen abdecken müssen.

Ab 2028 sollen in der EU auch Müllverbrennungsanlagen in den EU-Emissionshandel einbezogen werden. Da es im Müll, auch nach jeder technisch möglichen Sortierung von Wertstoffen, sowohl fossilen Kohlenstoff (z.B. Plastik, Polystyrol, Gummi) als auch biologischen Kohlenstoff (z.B. Essensreste, Holz, Papier) gibt, müssen komplizierte und dementsprechend teure Abgasanalysen durchgeführt werden, um anhand der isotopischen Markierung des CO₂ im Abgas berechnen zu können, welcher Anteil am verbrannten Müll aus fossilen Rohstoffen und welcher aus Biomasse hergestellt worden war. Zementwerke, die sekundäre Brennstoffe wie Altholz oder andere Reststoffe verbrennen, müssen bereits seit einigen Jahren auf gleiche oder ähnliche Weise die Anteile biogenen und fossilen Kohlenstoffs analysieren und unterscheiden. Für den fossilen Anteil müssen EU-Emissionszertifikate vorgelegt werden; der Anteil aus Biomasse hingegen gilt als klimaneutral. Dass auch ein wesentlicher Teil der Biomasse aus ursprünglich fossilem Kohlenstoff besteht, lässt sich mit der Isotopenmethode nicht mehr feststellen. Und was der Staat nicht kennt, kann er auch nicht besteuern.

Nun fragt sich allerdings, ob es überhaupt Sinn macht, zwischen fossilen und nicht fossilen CO₂-Emissionen zu unterscheiden. Trägt nicht jede Form von emittiertem

CO₂ zum Klimawandel bei? Warum soll Biomasse, Papier, Pappbecher, Lebensmittel und Ledertaschen steuer- und abgabefrei verfeuert werden oder verrotten, während für Plastiktüten, Styropor und Autorreifen Gebühren anfallen? Warum machen wir die Sache am Schornstein der Müllverbrennung fest und nicht dort, wo die Kohle aus der Erdgeschichte gezerzt und geologische Senken zerstört werden?

Jede Pflanzenkohle enthält mehr als 10% ursprünglich fossilen Kohlenstoffs. Da verlangt auch niemand, dass dieser von der C-Senken abgerechnet wird. Und bei Climeworks hat auch noch niemand einen Teil seines Geldes zurückgefordert, weil mehr als 10% des aus der Atmosphäre entzogenen CO₂ fossiler Herkunft war. Nur bei der Müllentsorgung wird ein Unterschied gemacht.

Wäre es nicht besser, den Steuer- oder Verbotshelb schon dort anzusetzen, wo fossiler Kohlenstoff aus den geologischen Lagerstätten gefördert wird? Die geologische C-Senke wird in dem Moment zerstört, wo Erdöl, Erdgas und

Kohle aus dem geologisch sicheren Lager geholt und in den kleinen C-Kreislauf zwischen Anthroposphäre (den von Menschen gemachten Dingen), Atmosphäre, Biosphäre und Weltmeeren eingespeist werden – sei es direkt als CO₂ aus dem Kraftwerk oder als temporärer C-Senke in Form eines Wasserrohrs oder eines Kaffeebechers aus Plastik.

Es muss die Zerstörung geologischer C-Senken beendet und zudem durch Kohlenstoffrecycling an den Abgastürmen die CO₂-Emissionen egal ob aus Biomassen oder fossilen Treibstoffen signifikant reduziert werden. Sind die fossilen Lagerstätten erst einmal ausgebeutet, macht es keinen Sinn mehr, zwischen fossilem und „biologischen“ Kohlenstoff zu unterscheiden. Klimarettung bedeutet, (1) zu verhindern, dass Treibhausgase egal welcher Provenienz die Atmosphäre erreichen und (2) CO₂ effizient aus der Atmosphäre zu entfernen und in neuen C-Senken Materialien (C-Thinx) anzuwenden und zu speichern.

Literaturnachweis

Bar-On, Y. M., Phillips, R., & Milo, R. (2018). The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(25), 6506–6511.

Batjes, N. H. (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 47(2), 151–163.

Beillouin, D., Corbeels, M., Demenois, J., Berre, D., Boyer, A., Fallot, A., Feder, F., & Cardinael, R. (2023). A global meta-analysis of soil organic carbon in the Anthropocene. *Nature Communications* 2023 14:1, 14(1), 1–10.

Elhacham, E., Ben-Uri, L., Grozovski, J., Bar-On, Y. M., & Milo, R. (2020). Global human-made mass exceeds all living biomass. *Nature* 2020 588:7838, 588(7838), 442–444.

Green, C., & Byrne, K. A. (2004). Biomass: Impact on Carbon Cycle and Greenhouse Gas Emissions. *Encyclopedia of Energy*, 223–236.

Gruber, N., Clement, D., Carter, B. R., Feely, R. A., van Heuven, S., Hoppema, M., Ishii, M., Key, R. M., Kozyr, A., Lauvset, S. K., Monaco, C. Lo, Mathis, J. T., Murata, A., Olsen, A., Perez, F. F., Sabine, C. L., Tanhua, T., & Wanninkhof, R. (2019). The oceanic sink for anthropogenic CO₂ from 1994 to 2007. *Science*, 363(6432), 1193–1199.

IPCC. (2022). IPCC sixth assessment report (AR6) - Working group III contribution. In UNEP: Vol. III. https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_FinalDraft_FullReport.pdf

Ito, A. (2011). A historical meta-analysis of global terrestrial net primary productivity: are estimates converging? *Global Change Biology*, 17(10), 3161–3175.

Jeltsch-Thömmes, A., & Joos, F. (2019). The response to pulse-like perturbations in atmospheric carbon and carbon isotopes. September, 1–36.

Knutti, R., & Rogelj, J. (2015). The legacy of our CO₂ emissions: a clash of scientific facts, politics and ethics. *Climatic Change*, 133(3), 361–373.

Madani, N., Parazoo, N. C., Kimball, J. S., Ballantyne, A. P., Reichle, R. H., Maneta, M., Saatchi, S., Palmer, P. I., Liu, Z., & Tagesson, T. (2020). Recent Amplified Global Gross Primary Productivity Due to Temperature Increase Is Offset by Reduced Productivity Due to Water Constraints. *AGU Advances*, 1(4), e2020AV000180.

Reichle, D. E. (2023). *The Global Carbon Cycle and Climate Change: Scaling Ecological Energetics* (Elsevier). Candice Janko.

Sandak, A. (2023). Engineered living materials for sustainable and resilient architecture. *Nature Reviews Materials*, 8(6), 357–359.

Schmidt, M. W. I., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D. A. C., Nannipieri, P., Rasse, D. P., Weiner, S., & Trumbore, S. E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478(7367), 49–56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>