

## Artikel

# Die vom Menschen geschaffene globale Masse übersteigt die gesamte lebende Biomasse

<https://doi.org/10.1038/s41586-020-3010-5>

Erhalten: 1. November 2019

Akzeptiert: 9. Oktober 2020

Online veröffentlicht: 9. Dezember 2020

 Nach Updates suchen

Emily Elhacham<sup>1</sup>, Liad Ben-Uri<sup>1</sup>, Jonathan Grozovskij<sup>1</sup>, Yinon M. Bar-On<sup>1</sup> & Ron Milošević<sup>1</sup>

Die Menschheit hat das Gesicht der Erde zu einer dominierenden Kraft gemacht<sup>1–9</sup>. Eine sich herauskristallisierende Frage ist, wie sich die gesamte materielle Produktion menschlicher Aktivitäten im Vergleich zur gesamten natürlichen Biomasse verhält. Hier quantifizieren wir die vom Menschen geschaffene Masse, die als „anthropogene Masse“ bezeichnet wird, und vergleichen sie mit der gesamten lebenden Biomasse auf der Erde, die derzeit etwa 1,1 Teratonnen entspricht<sup>10,11</sup>. Wir stellen fest, dass sich die Erde genau am Übergangspunkt befindet; im Jahr 2020 ( $\pm 6$ ) wird die anthropogene Masse, die sich in letzter Zeit etwa alle 20 Jahre verdoppelt hat, die gesamte globale lebende Biomasse übertreffen. Im Durchschnitt wird für jeden Menschen auf der Erde jede Woche anthropogene Masse produziert, die mehr als seinem Körpergewicht entspricht. Diese Quantifizierung des menschlichen Handelns liefert eine massenbasierte quantitative und symbolische Charakterisierung der vom Menschen verursachten Epoche des Anthropozäns.

Das Gesicht der Erde im 21. Jahrhundert wird in beispielloser Weise durch die Aktivitäten der Menschheit und die Produktion und Anhäufung von menschengemachten Objekten beeinflusst. Angesichts der Grenzen des menschlichen Erkenntnisvermögens angesichts der Unermesslichkeit des Globus und der scheinbaren Unendlichkeit der natürlichen Welt ist es wünschenswert, ein strenges und objektives Maß für das Gesamtgleichgewicht zwischen dem Belebten und dem vom Menschen Geschaffenen bereitzustellen. Trotz der fehlenden Ganzheitlichkeit des Bildes, das die Zusammensetzung der Welt sowohl hinsichtlich der biologischen als auch der vom Menschen geschaffenen Masse quantifiziert und vergleicht.

Ein typisches Beispiel ist die Biomasse unseres Planeten. Obwohl die Masse der Menschen nur etwa 0,01 % der globalen Biomasse ausmacht, hatte unsere Zivilisation bereits vor 3.000 Jahren einen erheblichen und vielfältigen Einfluss darauf<sup>9</sup>. Seit der ersten landwirtschaftlichen Revolution hat die Menschheit die Masse der Pflanzen ungefähr halbiert, von etwa zwei Teratonnen (Tt, Einheiten von 10<sup>12</sup> Tonnen; Schätzungen basieren auf der Trockenmasse) auf den aktuellen Wert<sup>10</sup> von etwa 1 Tt. Während die moderne Landwirtschaft eine zunehmende Landfläche für den Anbau von Nutzpflanzen nutzt, wird die Gesamtmasse der kultivierten Nutzpflanzen (etwa 0,01 Tt)<sup>11</sup> bei weitem durch den Verlust an Pflanzenmasse infolge von Abholzung, Forstwirtschaft und anderen Landnutzungsänderungen aufgewogen<sup>10</sup>. Diese Trends der globalen Biomasse haben den Kohlenstoffkreislauf und die menschliche Gesundheit beeinflusst<sup>12,13</sup>. Weitere menschliche Aktivitäten, darunter Viehzucht, Jagd und Überfischung, haben auch die Masse verschiedener anderer Taxa stark beeinflusst<sup>11,14,15</sup>. Eine kürzlich durchgeführte Untersuchung der verbleibenden lebenden Biomasse der Erde<sup>11</sup> hat ergeben, dass Pflanzen auf Massenbasis die überwiegende Mehrheit (etwa 90 %) ausmachen<sup>16</sup>, gefolgt von Bakterien, Pilzen, Archaeen, Protisten und Tieren.

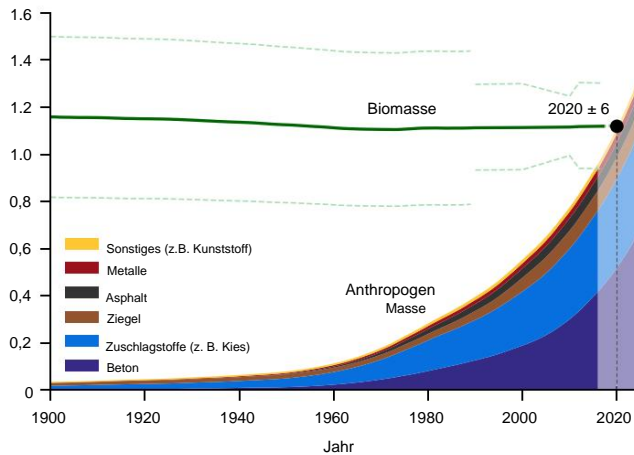
Über die Biomasse hinaus wird es angesichts der zunehmenden globalen Auswirkungen der Menschheit immer wichtiger, die Materialflüsse unseres sozioökonomischen Systems, auch als sozioökonomischer Stoffwechsel bekannt, quantitativ zu bewerten und zu überwachen<sup>17,18</sup>. Diese Quantifizierung ist das Herzstück des gesamtwirtschaftlichen Materialflussanalyse Rahmens im Bereich der industriellen Ökologie, der auf der Massenbilanzierung basiert<sup>19,20</sup>. Dieser umfassend entwickelte Rahmen ermöglicht es Forschern, die materielle Basis der Gesellschaft auf lokaler und globaler Ebene zu untersuchen. Er umfasst die Masse und Zusammensetzung der sozioökonomischen Materialbestände sowie

Input- und Output-Materialströme. Eine aktuelle Studie verwendete und erweiterte den Rahmen, um globale Werte für die vom Menschen verursachten Massenströme und Bestandsbestände<sup>21,22</sup> (Objekte, die von Menschen gebaut wurden und noch immer in Gebrauch sind: Gebäude, Straßen, Maschinen usw.) zu quantifizieren.

Diese Fortschritte bei der globalen Quantifizierung sowohl der lebenden Biomasse als auch der vom Menschen geschaffenen Masse bieten die Möglichkeit, einen integrierten Vergleich von Biomasse mit von Menschen geschaffener Masse durchzuführen, was der Hauptschwerpunkt dieses Dokuments ist. Der Vergleich von Biomasse mit von Menschen geschaffener Masse erfordert die Zusammenführung von Objekten mit unterschiedlichen Eigenschaften. Es geht also über den Vergleich von Äpfeln mit Birnen hinaus, nämlich den von Äpfeln mit Mobiltelefonen. Wir sind jedoch zu dem Schluss gekommen, dass lebende Biomasse, die die Menschheit umgibt und ernährt, ein natürlicher logischer Bezugspunkt ist, um eine quantitative Perspektive auf die von der Menschheit geschaffene Masse zu geben. Indem wir von Menschen geschaffene Masse und Biomasse im Laufe der Zeit gegenüberstellen, fügen wir der laufenden Bewertung der sich entwickelnden menschlichen Dominanz auf der Erde eine zusätzliche Dimension hinzu und liefern eine visuelle und symbolische Charakterisierung der Menschheit.

Wir schätzen die globale Biomasse und die vom Menschen geschaffene Masse seit 1900 in Teratonnen (entspricht 10<sup>18</sup> Gramm) Trockengewicht (also ohne Wasser). Biomasse stellt die globale Gesamtmasse aller lebenden Taxa dar<sup>11</sup>. Anthropogene Masse ist definiert als die Masse, die in unbelebten festen Objekten steckt, die vom Menschen geschaffen wurden (die nicht abgerissen oder außer Betrieb genommen wurden, was wir als „anthropogenen Massenabfall“ definieren). Die Masse der Menschen selbst (und ihres Viehbestands) wird natürlich als Teil der globalen Biomasse berücksichtigt. In jedem Fall ist ihr Massenbeitrag vernachlässigbar. Abbildung 1 zeigt die Veränderungen der Biomasse und der anthropogenen Masse im untersuchten Zeitraum. Es ist klar, dass die beiden deutlich unterschiedliche zeitliche Dynamiken aufweisen. In den letzten 100 Jahren hat die anthropogene Masse schnell zugenommen – sie verdoppelte sich etwa alle 20 Jahre in einer dem Mooreschen Gesetz ähnlichen Weise – im Gegensatz zur gesamten Biomasse, die sich nicht so deutlich verändert hat (beeinflusst durch ein komplexes Zusammenspiel von Entwaldung, Aufforstung und dem steigenden CO<sub>2</sub> Düngeeffekt, unter anderem). Die Ansammlung anthropogener Masse hat mittlerweile 30 Gt pro Jahr erreicht, basierend auf dem Durchschnitt der letzten 5 Jahre. Das entspricht, dass jeder Mensch auf der Erde jedes Jahr mehr anthropogene Masse produziert, als sein Körpergewicht

<sup>1</sup>Abteilung für Pflanzen- und Umweltwissenschaften, Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel. ✉E-Mail: ron.milo@weizmann.ac.il



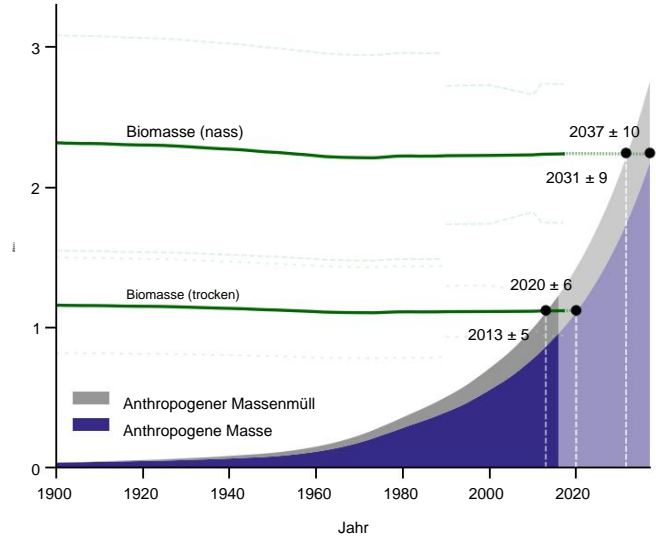
**Abb. 1 | Schätzungen der Biomasse und der anthropogenen Masse seit Beginn des 20. Jahrhunderts auf Trockenmassebasis.** Die grüne Linie zeigt das Gesamtgewicht der Biomasse (gestrichelte grüne Linien,  $\pm 1$  sd). Das Gewicht der anthropogenen Masse wird als Flächendiagramm dargestellt, wobei die Höhen der farbigen Flächen die bis zu diesem Jahr akkumulierte Masse der entsprechenden Kategorie darstellen. Die hier dargestellte anthropogene Masse ist in sechs Hauptkategorien unterteilt. Das Jahr  $2020 \pm 6$  markiert den Zeitpunkt, an dem die Biomasse durch die anthropogene Masse überschritten wird. Daten zur anthropogenen Masse seit 1900 wurden aus Ref. 22 mit einer Auflösung von einem Jahr bezogen. Der aktuelle Biomassewert basiert auf Ref. 11, der für Pflanzen auf der Schätzung von Ref. 10 basiert, die frühere, meist höhere Schätzungen aktualisiert. Die Unsicherheit des Schnittjahres wurde mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation mit 10.000 Wiederholungen ermittelt (siehe Methoden). Die Daten wurden für die Jahre 2015–2025 extrapoliert (heller Bereich; siehe Methoden). Eine detaillierte Übersicht über die Bestandsbildung für die Gruppen „Metalle“ und „Sonstige“ finden Sie in den erweiterten Datenabbildungen 4 und 5.

Woche. Infolgedessen ist die Lücke zwischen der anthropogenen Masse und der gesamten Biomasse schnell geschrumpft. Wir stellen fest, dass sich die beiden Kurven im Jahr  $2020 \pm 6$  Jahre ( $1$  SD) schneiden. Ab diesem Zeitpunkt wird die anthropogene Masse die Biomasse übertreffen.

Die anthropogene Masse wird in Untergruppen unterteilt, die von Menschenhand geschaffene Objekte darstellen<sup>22</sup> (Erweiterte Datentabelle 1): Beton, Zuschlagstoffe, Ziegel, Asphalt, Metalle und „andere“ Bestandteile (Holz für Papier und Industrie, Glas und Kunststoff). Wie in Abb. 1 dargestellt, wird die anthropogene Masse von Beton und Zuschlagstoffen (wie Kies) dominiert. Das Übergangsjahr ist mit einer Unsicherheit von  $\pm 16\%$  für die Gesamtbiomasse und  $\pm 6\%$  für die anthropogene Masse behaftet, wobei alle Unsicherheiten als  $\pm 1$  Standardabweichung angegeben werden. Die in Abb. 1 dargestellte Analyse stellt die Biomasse auf Trockengewichtsbasis dar. Um eine ergänzende Sichtweise zu bieten, zeigt Abb. 2 die Biomasse auf Nassgewichtsbasis und vergleicht sie mit der anthropogenen Masse und dem angesammelten anthropogenen Massenabfall.

Anthropogener Massenabfall ist anthropogene Masse, die abgerissen oder außer Betrieb genommen wurde (zeitlich integrierter kumulativer Feststoffabfallstrom, im Folgenden einfach „Abfall“ genannt. Nicht genutzte Masse, die durch Bergbau, Landschaftsveränderungen usw. ausgegraben wurde, ist hierin nicht enthalten). Wenn wir die Abfallkomponente einbeziehen, wird die Trockenbiomasse im Jahr  $2013 (\pm 5$  Jahre) überschritten. Auf Nassgewichtsbasis beträgt die aktuelle Biomasse etwa  $2,2$  Tt und wird voraussichtlich bis in die 2030er Jahre durch anthropogene Masse überschritten, mit  $(2031 \pm 9$  Jahre) oder ohne  $(2037 \pm 10$  Jahre) Einbeziehung des Abfalls. Eine Sensitivitätsanalyse der Auswirkung der Definition der anthropogenen Masse auf das Schnittjahr ist in den erweiterten Daten, Abb. 1, dargestellt und in Abschnitt 1 der Zusatzinformationen ausführlich beschrieben.

Abbildung 3 zeigt einige wichtige Beziehungen zwischen wichtigen vom Menschen geschaffenen und biologischen Einheiten. Die beiden dominierenden Massen Kategorien in unserer Analyse sind Gebäude und Infrastruktur (bestehend aus Beton, Zuschlagstoffen, Ziegeln und Asphalt) sowie Bäume und Sträucher (der Großteil der Pflanzenmasse und damit der gesamten Biomasse). Wir stellen fest, dass erstere in letzter Zeit letztere überlegen haben. Ebenso zeigen wir, dass die globale Masse



**Abb. 2 | Schätzungen der Biomasse (trocken und nass), der anthropogenen Masse und der anthropogenen Abfallmasse seit Beginn des 20. Jahrhunderts.** Grüne Linien zeigen das Gesamtgewicht der Biomasse ( $\pm 1$  sd). Das Gewicht der anthropogenen Masse ist als Flächendiagramm dargestellt. Die Schätzung des Nassgewichts basiert auf den in Abb. 1 dargestellten Ergebnissen und dem jeweiligen Wassergehalt der Hauptkomponenten (siehe Methoden). Das Jahr  $2013 \pm 5$  markiert den Zeitpunkt, an dem die trockene Biomasse durch die anthropogene Masse, einschließlich Abfall, überschritten wird. Die Jahre  $2037 \pm 10$  und  $2031 \pm 9$  markieren die Zeitpunkte, an denen die nasse Biomasse durch die anthropogene Masse bzw. die insgesamt produzierte anthropogene Masse überschritten wird. Die Unsicherheiten der Schnittjahre wurden mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation mit 10.000 Wiederholungen ermittelt (siehe Methoden). Die Gewichte werden für die Jahre 2015–2037 extrapoliert (heller Bereich; siehe Methoden).

des produzierten Plastiks ist größer als die Gesamtmasse aller Land- und Meerestiere zusammen.

## Diskussion

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts betrug die anthropogene Masse nur 3 % der globalen Biomasse, was einen enormen Unterschied von etwa  $1,1$  Tt auf Trockengewichtsbasis darstellt. Ungefähr 120 Jahre später, im Jahr 2020, übersteigt die anthropogene Masse die gesamte Biomasse der Welt. Wie oben gezeigt, hängt der genaue Zeitpunkt, an dem die anthropogene Masse die lebende Biomasse übersteigt, stark von den Definitionen von Biomasse und anthropogener Masse ab, beispielsweise davon, ob sie auf Nass- oder Trockengewichtsbasis definiert werden. Wir stellen jedoch fest, dass der Zeitpunkt des Übergangs unter einer Reihe von Definitionen entweder im letzten Jahrzehnt oder in den nächsten zwei liegt (Zusatzinformationen, Abschnitt 1, Erweiterte Daten, Abb. 1).

Die Analyse der Veränderungen der anthropogenen Massenzusammensetzung im untersuchten Zeitraum zeigt bestimmte Trends auf (Erweiterte Daten, Abb. 2). So ist beispielsweise der allmähliche Übergang von einer von Ziegeln dominierten Bauweise zu Beton, der Mitte der 1950er Jahre zugunsten von Beton ausfiel, ebenso deutlich wie die Einführung von Asphalt als Hauptmaterial für Straßenbeläge ab den 1960er Jahren. Die Analyse der Akkumulationsrate anthropogener Masse bietet außerdem eine materialbasierte Sicht auf den Weg der Menschheit seit Beginn des 20. Jahrhunderts, wie in Erweiterte Daten, Abb. 3, dargestellt. Veränderungen der gesamten anthropogenen Masse sind an globale Ereignisse wie Weltkriege und große Wirtschaftskrisen gebunden.

Besonders auffällig ist die kontinuierliche Zunahme der anthropogenen Masse mit Spitzenwerten von über 5 % pro Jahr in der Zeit unmittelbar nach dem Zweiten Weltkrieg. Diese Zeit, die häufig als „Große Beschleunigung“ bezeichnet wird, ist durch erhöhten Konsum und Stadtentwicklung gekennzeichnet<sup>23</sup>.

Wenn sich die gegenwärtigen Trends fortsetzen, wird die vom Menschen verursachte Masse, einschließlich Abfall, bis 2040 voraussichtlich drei Billionen Tonnen überschreiten – fast das Dreifache der Masse der Erde.

## Artikel



**Abb. 3 | Gegenüberstellung der Hauptkomponenten der globalen Biomasse und der anthropogenen Masse im Jahr 2020 (Trockengewichtsbasis).** Das Verhältnis der Kreisflächen innerhalb jedes Paares stellt das entsprechende Massenverhältnis der beiden dargestellten Massen dar. Zur optischen Verdeutlichung verwenden die beiden Paare unterschiedliche Maßstäbe. Die Kunststoffschätzung umfasst derzeit verwendeten Kunststoff und Kunststoffabfälle unter Berücksichtigung des Recyclings. Zur Infrastruktur zählt die Masse baulicher Elemente, wie zum Beispiel Straßen.

Frühere Bemühungen, wie die Quantifizierung der menschlichen Aneignung der Nettoprimärproduktion<sup>24–26</sup>, konzentrierten sich auf die Zuteilung des Produktivitätsflusses der Biosphäre zur menschlichen Nutzung. Die anthropogene Masse, deren Anhäufung in dieser Studie dokumentiert wird, entsteht nicht aus dem Biomassebestand, sondern aus der Umwandlung des um Größenordnungen höheren Bestands, der hauptsächlich aus Gesteinen und Mineralien besteht. Dabei wandelt die Menschheit oberflächennahe geologische Ablagerungen in eine sozial nützliche Form um, was weitreichende Auswirkungen auf natürliche Lebensräume, Artenvielfalt und verschiedene klimatische und biogeochemische Kreisläufe hat.

Diese Studie schließt sich den jüngsten Bemühungen an, das Ausmaß und die Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf unseren Planeten zu quantifizieren und zu bewerten<sup>9,23,27,28</sup>. Die Auswirkungen dieser Aktivitäten waren so abrupt und erheblich, dass vorgeschlagen wurde, die aktuelle geologische Epoche in Anthropozän umzubenennen<sup>29–32</sup>. Unsere Studie untermauert diesen Vorschlag streng und quantitativ. Gleichzeitig fügt sie dieser Diskussion eine weitere Dimension hinzu – eine symbolische quantitative Abgrenzung des Übergangs zu unserer Epoche.

#### Inhalt des Onlineangebotes

Alle Methoden, zusätzlichen Referenzen, Nature Research-Berichtszusammenfassungen, Quelldaten, erweiterten Daten, ergänzenden Informationen

Danksagungen, Peer-Review-Informationen, Einzelheiten zu Autorenbeiträgen und Interessenkonflikten sowie Erklärungen zur Daten- und Codeverfügbarkeit finden Sie unter <https://doi.org/10.1038/s41586-020-3010-5>

- Ramankutty, N. & Foley, J.A. Schätzung historischer Veränderungen der globalen Landbedeckung: Ackerland von 1700 bis 1992. *Glob. Biogeochem. Cycles* **13**, 997–1027 (1999).
- Krausmann, F. et al. Wachstum des globalen Materialverbrauchs, des BIP und der Bevölkerung im 20. Jahrhundert. *Ecol. Econ.* **68**, 2696–2705 (2009).
- Matthews, E. *Das Gewicht der Nationen: Materialabflüsse aus Industrieökonomien* (World Resources Inst., 2000).
- Smil, V. *Harvesting the Biosphere: Was wir der Natur entnehmen haben* (MIT Press, 2013).
- Smil, V. *Making the Modern World: Materialien und Entmaterialisierung* (John Wiley & Sons, 2013).
- Haff, P.K. Technologie als geologisches Phänomen: Auswirkungen auf das menschliche Wohlbefinden. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* **395**, 301–309 (2014).
- Zalasiewicz, J. et al. Ausmaß und Vielfalt der physischen Technosphäre: eine geologische Perspektive. *Anthropocene Rev.* **4**, 9–22 (2017).
- Zalasiewicz, J., Waters, C.N., Williams, M. & Summerhayes, C. *Das Anthropozän als Geologische Zeiteinheit: Ein Leitfaden zu wissenschaftlichen Erkenntnissen und aktuellen Debatten* (Cambridge Univ. Press, 2018).
- Stephens, L. et al. Archäologische Untersuchungen enthüllen frühe Transformation der Erde durch Landnutzung. *Science* **365**, 897–902 (2019).
- Erb, K.-H. et al. Unerwartet großer Einfluss von Forstwirtschaft und Beweidung auf die globale Vegetationsbiomasse. *Nature* **553**, 73–76 (2018).
- Bar-On, Y.M., Phillips, R. & Milo, R. Die Biomasseverteilung auf der Erde. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **115**, 6506–6511 (2018).
- Pan, Y. et al. Eine große und beständige Kohlenstoffsänke in den Wäldern der Welt. *Science* **333**, 988–993 (2011).
- Reddington, C.L. et al. Verbesserung der Luftqualität und der menschlichen Gesundheit durch Verringerung der durch Abholzung verursachten Brände in Brasilien. *Nat. Geosci.* **8**, 768–771 (2015).
- Ceballos, G. & Ehrlich, P.R. Populationsverluste bei Säugetieren und die Aussterbekrise. *Wissenschaft* **296**, 904–907 (2002).
- WWF. *Living Planet Report—2018: Höher zielen* (WWF, 2018).
- Krausmann, F. & Milo, R. Auf dem Weg zu einer quantitativen Betrachtung der globalen Allgegenwart von Biofilmen. *Nat. Schott, J., Schröder ...*
- Pauliuk, S. & Hertwich, E.G. Sozioökonomischer Stoffwechsel als Paradigma zur Untersuchung der biophysikalischen Grundlagen menschlicher Gesellschaften. *Ecol. Econ.* **119**, 83–93 (2015).
- Haberl, H. et al. Beiträge der soziometabolischen Forschung zur Nachhaltigkeitswissenschaft. *Nat. Sustainability* **2**, 173–184 (2019).
- Fischer-Kowalski, M. et al. Methodik und Indikatoren des gesamtwirtschaftlichen Materialflusses. *J. Ind. Ecol.* **15**, 855–876 (2011).
- Krausmann, F., Schandl, H., Eisenmenger, N., Giljum, S. & Jackson, T. Materialfluss Buchhaltung: Messung des globalen Materialverbrauchs für eine nachhaltige Entwicklung. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **42**, 647–675 (2017).
- Krausmann, F. et al. Globale sozioökonomische Materialbestände steigen im 20. Jahrhundert und verbrauchen die Hälfte des jährlichen Ressourcenverbrauchs. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **114**, 1880–1885 (2017).
- Krausmann, F., Lauk, C., Haas, W. & Wiedenhofer, D. Von der Ressourcengewinnung bis zu den Abflüssen von Abfällen und Emissionen: der sozioökonomische Stoffwechsel der Weltwirtschaft, 1900–2015. *Glob. Environ. Change* **52**, 131–140 (2018).
- Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O. & Ludwig, C. Die Flugbahn des Anthropozäns: die große Beschleunigung. *Anthropocene Rev.* **2**, 81–98 (2015).
- Vitousek, P.M., Ehrlich, P.R., Ehrlich, A.H. & Matson, P.A. Menschliche Aneignung der Produkte der Photosynthese. *Bioscience* **36**, 368–373 (1986).
- Haberl, H. et al. Quantifizierung und Kartierung der menschlichen Aneignung von Produktion in terrestrischen Ökosystemen der Erde. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **104**, 12942–12947 (2007).
- Haberl, H., Erb, K.-H. & Krausmann, F. Menschliche Aneignung der Nettoprimärproduktion: Muster, Trends und planetare Grenzen. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **39**, 363–391 (2014).
- Vitousek, P.M. Die menschliche Dominanz über die Ökosysteme der Erde. *Science* **277**, 494–499 (1997).
- Dirzo, R. et al. Defaunation im Anthropozän. *Science* **345**, 401–406 (2014).
- Crutzen, P.J. in *Earth System Science in the Anthropocene* (Hrsg. Ehlers, E. & Kraft, T.) 13–18 (Springer, 2006).
- Steffen, W., Crutzen, J. & McNeill, J.R. Das Anthropozän: Überwältigen die Menschen jetzt die großen Kräfte der Natur? *Ambio* **36**, 614–621 (2007).
- Lewis, S.L. & Maslin, M.A. Definition des Anthropozäns. *Nature* **519**, 171–180 (2015).
- Waters, C.N. et al. Das Anthropozän unterscheidet sich funktionell und stratigraphisch von dem Holozän. *Science* **351**, aad2622 (2016).

**Anmerkung des Herausgebers:** Springer Nature bleibt hinsichtlich der Zuständigkeitsansprüche in veröffentlichten Karten und institutionellen Zugehörigkeiten neutral.

© die Autor(en), unter exklusiver Lizenz von Springer Nature Limited 2020

## Methoden

### Anthropogene Masse Bedeutung

Unsere Definition der vom Menschen geschaffenen Masse, hier anthropogene Masse genannt, ist die Masse, die in unbelebten festen Objekten eingebettet ist, die von Menschen hergestellt wurden (und die noch nicht abgerissen oder außer Betrieb genommen wurden). Sie entsteht aus Materialflüssen aus der natürlichen Umwelt in das sozioökonomische System, die in Artefaktbeständen angesammelt werden, die auch als produziertes Kapital bezeichnet werden<sup>22</sup>. Die anthropogene Masse ist die sichtbare unbelebte Komponente der sogenannten physischen Technosphäre<sup>6,7</sup>. Da die biologischen Komponenten der physischen Technosphäre, einschließlich Ackerland (zum Beispiel Reis- und Heufelder, die Ströme in das sozioökonomische System erzeugen<sup>33</sup>) und Vieh (Teil des sozioökonomischen Systems), lebende natürliche biologische Einheiten sind, haben wir sie der Biomasse zugeordnet, obwohl sie menschlichen Zwecken dienen. Umgekehrt wurde Industrieholz, das im Bauwesen verwendet wird, der anthropogenen Masse zugeordnet, weil es in von Menschenhand geschaffenen Artefakten eingebettet ist. Ein ähnlicher Ansatz zur Erfassung von von Menschenhand geschaffener Masse wird in Kapitel 1 von Referenz vorgestellt.

<sup>5</sup>. Eine Sensitivitätsanalyse der Definition der anthropogenen Masse und ihrer Auswirkung auf das Schnittjahr finden Sie in Abschnitt 1 der Zusatzinformationen und in Abb. 1 der erweiterten Daten sowie unter <https://anthropomass.org/analysis/>.

Die anthropogene Masse wurde in sechs Untergruppen unterteilt: Beton, Zuschlagstoffe, Ziegel, Asphalt, Metalle und eine zusätzliche Gruppe anderer Komponenten, bestehend aus Holz, Glas und Kunststoff. Die Gruppe der Zuschlagstoffe umfasst den Kies und Sand, die als Unterlage für Straßen und Gebäude dienen. Die Masse der in Beton und Asphalt enthaltenen Zuschlagstoffe wird in den Kategorien Beton und Asphalt gesondert ausgewiesen<sup>21,22,34</sup>. Während für einige Materialflüsse keine Daten verfügbar sind oder geschätzt werden konnten, decken die hier vorgestellten Kategorien der anthropogenen Masse den Materialverbrauch insgesamt fast vollständig ab (mehr als 98 % in Bezug auf die Masse<sup>21</sup>). Wie bei Materialflussanalysen üblich, umfassen die aktuellen Schätzungen der Flüsse<sup>22</sup> kein abgebautes Material, das nicht für die zukünftige Nutzung vorgesehen ist (z. B. „Boden und Gestein, das während des Baus ausgegraben wurde, oder Abraum aus dem Bergbau und die ungenutzten Teile von Holzschlägen in der Forstwirtschaft“<sup>33</sup>). Sedimentbewegungen durch Baggerarbeiten wurden ebenfalls nicht in die Schätzung einbezogen<sup>35</sup>.

Zur Bewertung der anthropogenen Abfallmassen wurden die Massenströme der Altabfälle über die Zeit integriert. Aufgrund der Datenverfügbarkeit wird der Abfall erst ab 1900 berücksichtigt. Die anthropogenen Holzmassenabfälle, die aus Industrieholz und Papier<sup>21</sup> stammen, sind in der Abfallschätzung nicht berücksichtigt, da Holz relativ schnell verrotet. Weitere Abfallgruppen (die Outputströme wie Emissionen, dissipative Nutzung und Rückstände darstellen) wurden in unserer Berechnung nicht berücksichtigt, da sie keine physischen und sichtbaren Elemente darstellen und nicht Teil unserer Definition der anthropogenen Masse sind. Gemäß Ref. 22 haben wir auch kontrollierte Deponien als Teil des Outputabfallstroms behandelt. Unsere Abfallmassenschätzungen erfolgen nach Abzug der Recyclingprozesse. Die Verbrennung (d. h. die Energieerzeugung aus der Verbrennung von Abfällen) wurde nicht berücksichtigt, was zu einer geringen (ca. 2 %) Überschätzung des Abfalls führt<sup>22</sup>. Nicht mehr genutzte Infrastruktur, auch „Winterlagerbestände“ genannt (zum Beispiel verlassene Gebäude), wurde als Abfall eingestuft.

Daten zur anthropogenen Masse seit 1900 wurden aus der Referenz mit <sup>22</sup> bei einem einjähriger Auflösung gewonnen. Das Gewicht der anthropogenen Masse wurde ohne hydratisiertes Wasser gemäß den in der Materialflussanalyse definierten Standards<sup>21</sup> berücksichtigt. Der Ausgangswert der anthropogenen Masse im Jahr 1900 wurde auf etwa 35 Gt geschätzt. Dieser Wert wurde anhand von Materialflussschätzungen berechnet, die für den Zeitraum von 1820 bis 1900 erhalten wurden (wie in den Zusatzinformationen zu Referenz 21 beschrieben). Wir weisen darauf hin, dass Schätzungen aus der Zeit vor 1820 nicht berücksichtigt wurden, und gehen daher davon aus, dass der Wert der anthropogenen Masse zu diesem Zeitpunkt bei Null beginnt. Obwohl dies eindeutig eine Vereinfachung ist, ergibt die bis dahin angesammelte anthropogene Masse eine relativ kleine Masse, die für das 20. Jahrhundert und danach einen vernachlässigbaren Beitrag zum Gesamtwert leisten wird.

### Veränderung der Biomasse in den Jahren 1900–2017

Es gab bereits verschiedene Versuche, die globale Biomasse mithilfe unterschiedlicher Methoden zu quantifizieren, darunter Bestandsaufnahmen<sup>12,36</sup>, Fernerkundung<sup>37</sup> und Modellierung<sup>38,39</sup>. In unserer Schätzung versuchten wir, die durch diese verschiedenen Ansätze erzielten Schätzungen zusammenzufassen. Wir schätzten zunächst die Pflanzenbiomasse, die etwa 90 % der globalen Biomasse ausmacht<sup>11</sup>. Beachten Sie, dass Bodenkohlenstoff keine lebende Biomasse ist und daher nicht in diese Studie einbezogen wird.

**Schätzung der Pflanzenbiomasse für die Jahre 1900–2017.** Unser Pflanzenbiomassewert für 2010, etwa 0,45 Tt Kohlenstoff, basiert auf Ref. 11, die wiederum auf der Schätzung von Ref. 10 beruht, die aus dem Mittelwert von sieben Karten der globalen Pflanzenbiomasse besteht, die auf Inventaren oder Fernerkundung basieren.

Die Schätzung von etwa 0,45 Tt Kohlenstoff, die frühere, meist höhere Schätzungen aktualisiert, wurde in Ref. 10, in der verschiedene Schätzungen und Ansätze umfassend untersucht und integriert wurden, als aktueller Goldstandard bestätigt.

Um die gesamte Pflanzenbiomasse zwischen 1990 und 2017 zu schätzen, haben wir uns auf zwei Ansätze gestützt. Der erste Ansatz basiert auf drei Hauptdatenquellen, nämlich Bestandsmessungen<sup>12,36,40</sup> oder Fernerkundung<sup>37</sup>. Der zweite Ansatz ist ein Ensemble aus 15 dynamischen globalen Vegetationsmodellen. Um unsere beste Schätzung für die gesamte Pflanzenbiomasse zu erstellen, haben wir zunächst eine beste Schätzung für jeden Ansatz berechnet, indem wir den Durchschnitt aller Quellen innerhalb desselben Ansatzes genommen und dann den Durchschnitt der besten Schätzungen genommen haben, die von jedem der beiden Ansätze erstellt wurden.

Im Zeitraum 1990–2017 verwendeten wir Schätzungen der Pflanzenbiomasse zu fünf Zeitpunkten (1990, 2000, 2010, 2012 und 2017), die je nach Datenverfügbarkeit ausgewählt wurden (als Referenz verwendeten <sup>12</sup> wir haben die Schätzung von 2007 verwendet; als Referenz. <sup>37</sup> wir wir die Schätzung von 1993). Zunächst normalisierten wir die Schätzungen der verschiedenen Quellen im Verhältnis zu unserer Schätzung von 2010, je nach der Pflanzenbiomassekomponente, die jede Quelle enthält (entweder alle Pflanzen oder nur Wälder, vorausgesetzt, der Waldanteil bleibt konstant). Als Nächstes nahmen wir für jeden Zeitpunkt den Mittelwert der normalisierten Biomasseschätzungen der verschiedenen Quellen, um die Biomasseschätzung für jeden der Zeitpunkte zu erhalten, wie in der erweiterten Datenabbildung 6 dargestellt.

Unsere zweite Schätzung basierte auf dem normalisierten Mittelwert von 15 modernste dynamische globale Vegetationsmodelle (DGVMs; siehe unten). Für jeden der fünf ausgewählten Zeitpunkte wurde die erhaltene Schätzung mit der auf Inventar und Fernerkundung basierenden Schätzung gemittelt, um die in dieser Studie verwendeten Schätzungen der Pflanzenbiomasse zu ermitteln.

**Schätzung der Pflanzenbiomasse für die Jahre 1900 bis 1990.** Die Schätzungen für 1900 bis 1990 basieren auf dem jährlichen Mittelwert des Ensembles der 15 DGVMs, der gemäß unserer Schätzung für 1990 normalisiert wurde, die wie oben beschrieben berechnet wurde.

**Schätzung der nicht-pflanzlichen Biomasse.** Die Schätzung der nicht-pflanzlichen Biomasse wurde auf Grundlage einer kürzlich durchgeführten weltweiten Volkszählung<sup>11</sup> abgeleitet, wobei neue Aktualisierungen für die Biomasse der Bakterien- und Archaeenreiche<sup>16,41</sup> vorgenommen wurden. Die Aktualisierungen beinhalteten eine Verringerung der Gesamtmasse der Bakterien und Archaeen von etwa 0,08 auf etwa 0,03 Tt Kohlenstoff. Mangels besserer Informationen wurde angenommen, dass die Schätzung der nicht-pflanzlichen Biomasse während des gesamten untersuchten Zeitraums konstant bleibt. Da sie um eine Größenordnung geringer ist als die pflanzliche Biomasse, dürften fehlende zeitliche Änderungen der nicht-pflanzlichen Biomasse nur geringe quantitative Gesamteffekte auf unsere Analyse haben.

**Gesamtbiomasseschätzungen.** Als letzter Schritt wurde die nicht-pflanzliche Biomasse zur pflanzlichen Biomasse addiert. Die Summen wurden mit einem Kohlenstoffgewicht-zu-Trockengewicht-Faktor multipliziert (wie im Abschnitt „Schätzung des C-Gehalts der Biomasse“ erläutert), um die in dieser Studie vorgestellten Biomasseschätzungen zu erhalten.

Alle Schritte von den Rohdaten bis zu den Endergebnissen sind in einem Jupyter-Notebook dokumentiert, das unter [https://github.com/milo-lab/anthropogenic\\_masse/Baum/Master/Biomasseberechnung/Biomasseberechnung.ipynb](https://github.com/milo-lab/anthropogenic_masse/Baum/Master/Biomasseberechnung/Biomasseberechnung.ipynb).

## Artikel

### Dynamische globale Vegetationsmodelle

Die Ergebnisse der DGVM wurden für unsere Schätzungen der Pflanzenbiomasse während des gesamten untersuchten Zeitraums verwendet. Für die Jahre 1990–2017 wurden die Schätzungen, wie oben beschrieben, mit nicht modellbasierten Schätzungen integriert. Die Simulationsergebnisse sind Teil des TRENDY v.8-Projekts<sup>38,39</sup> und folgten demselben Protokoll, das sowohl Landnutzung als auch Umwelt (Klima, CO<sub>2</sub>) umfasste. zeitabhängige Effekte (in TRENDY als S3 bezeichnet; siehe Ref. [sites.exeter.ac.uk/trendy](https://sites.exeter.ac.uk/trendy) für weitere Details). Das hier verwendete Ensemble bestand aus den folgenden 15 Modellen: CABLE-POP42, CLASS-CTEM43, CLM5.044, DLEM45, ISAM46, JSBACH47, JULES-ES48, LPJ49, LPJ-GUESS50, LPX-Bern51, OCN52, ORCHIDEE53, ORCHIDEE-CNP54, SDGVM55 und VISIT56.

### Anthropogene Massen- und Biomasseextrapolation

#### Die Schnittzeit in Abb. 2 wurde durch Extrapolation bestimmt.

für das Nassgewicht der Biomasse. Um die zukünftige Biomasseänderung (2018–2037) abzuleiten, verwendeten wir die für 2010–2017 berechnete lineare Änderungsrate und gingen davon aus, dass sie konstant bleiben würde. Der Gesamttrend erwies sich angesichts der Unsicherheit als nahezu neutral, wie in Abschnitt 2 der Zusatzinformationen näher erläutert wird. Schätzungen der anthropogenen Masse für zukünftige Jahre (2015–2037) wurden unter einem exponentiellen Wachstumsszenario extrapoliert. Der Exponent wurde auf der Grundlage der letzten 5 Jahre abgeleitet, für die Daten verfügbar waren<sup>22</sup>, unter der vereinfachten Annahme, dass er konstant bleiben würde.

### Abschätzung des C-Gehalts in Biomasse

Als Teil der Biomasseberechnung haben wir die Biomasse auf Kohlenstoffgewichtsbasis in Trockengewichtsbasis umgerechnet, indem wir sie mit einem Umrechnungsfaktor (2,25 g/g) multipliziert haben, der aus Schätzungen des Kohlenstoffgehalts verschiedener Pflanzenkompartimente (Blätter, Stängel und Wurzeln) berechnet wurde, die nach Biom differenziert wurden<sup>57</sup>. Für jedes Biom haben wir den durchschnittlichen Kohlenstoffgehalt der Pflanzen entsprechend dem Massenanteil jedes Pflanzenkompartiments berechnet<sup>58</sup>. Anschließend wurde auf Basis des entsprechenden Massenanteils jedes Bioms der gewichtete Gesamtkohlenstoffgehalt der Pflanzen berechnet<sup>10</sup>.

Der Umrechnungsfaktor für den Gesamt-C-Gehalt der Biomasse wurde dann durch Berechnung des gewichteten Durchschnitts der pflanzlichen und nicht-pflanzlichen Faktoren abgeleitet, wobei angenommen wurde, dass die nicht-pflanzliche Biomasse 10 % der Gesamtbiomasse<sup>11</sup> ausmacht (basierend auf Referenz und Updates 16,41). Schätzungen des C-Gehalts für Bakterien, die den Hauptbeitrag zur nicht-pflanzlichen Biomasse leisten, wurden aus Referenz 59,60 entnommen. Alle Schritte von den Rohdaten bis zum Endergebnis sind in einem Jupyter-Notebook dokumentiert, das unter [https://github.com/milo-lab/anthropogenic\\_mass/tree/master/C\\_content/biomass\\_C\\_content\\_estimation](https://github.com/milo-lab/anthropogenic_mass/tree/master/C_content/biomass_C_content_estimation) verfügbar ist. [ipynb](#).

### Schätzung des Biomasse-Nassgewichts

Das Nassgewicht der Biomasse wurde mithilfe eines Umrechnungsfaktors von Nass- in Trockenmasse (Mwet/Mdry, das Verhältnis zwischen Nass- und Trockengewicht) ermittelt. Der Faktor setzt sich aus den entsprechenden Faktoren der drei Hauptbestandteile des Baums zusammen: Wurzeln, Stämme und Blätter.

Der Umrechnungsfaktor der Wurzeln wurde anhand von 30 Messungen der nassen bis trockenen Wurzelmasse von vier Baumarten berechnet<sup>61</sup>. Unsere beste Schätzung für den Umrechnungsfaktor, 2,1 g/g, war der geometrische Mittelwert aller berechneten Umrechnungsfaktoren aller Proben.

Der Umrechnungsfaktor für die Stämme wurde anhand eines Datensatzes des durchschnittlichen Feuchtigkeitsgehalts von frischem Holz ((Mwet ÷ Mdry)/Mdry) von 62 Baumarten<sup>62</sup> berechnet. Der Datensatz enthält die Feuchtigkeitswerte von Splintholz und Kernholz für jede Art. Die beste Schätzung des Feuchtigkeitswerts jeder Art basierte auf dem Mittelwert der jeweiligen Feuchtigkeitswerte von Splintholz und Kernholz (unter der Annahme eines Massenverhältnisses von 1:1 zwischen Kernholz und Splintholz). Anschließend haben wir alle Feuchtigkeitswerte in Umrechnungsfaktoren für die Nass-zu-Trockenmasse umgerechnet. Der geometrische Mittelwert der entsprechenden Faktoren aller Arten betrug 1,9 und wurde als unsere beste Schätzung verwendet.

Der Umrechnungsfaktor für Blätter wurde aus Datensätzen zum Trockenmassegehalt (Mdry/Mwet)<sup>63–68</sup> abgeleitet, die 218 Pflanzenarten umfassten und

über TryDB69. Für jede Art wurde der geometrische Mittelwert des Trockenmassegehalts berechnet. Unsere beste Schätzung des Trockenmassegehalts der Blätter war der geometrische Mittelwert aller Werte. Er betrug 0,33 g/g, und daher war der von uns verwendete Umrechnungsfaktor von Nass- in Trockenmasse  $1/0,33 = 3,0$ .

Die drei Umrechnungsfaktoren wurden dann mit der globalen Trockenmasse des entsprechenden Kompartiments multipliziert<sup>11</sup>, um die globale Nassmasse des Kompartiments zu erhalten. Diese wurden addiert, um die globale Gesamtnassmasse der Pflanzen zu erhalten. Später kombinierten wir die drei Faktoren, um einen einzigen integrierten Umrechnungsfaktor zu erhalten, indem wir die globale Nassmasse der Pflanzen durch die Trockenmasse dividierten. Dieser integrierte Faktor (2,0 g/g) wurde in dieser Studie verwendet, um die gesamte Nassmasse der Biomasse entsprechend der Trockenmasse zu ermitteln. Alle Schritte von den Rohdaten bis zum Endergebnis sind in einem Jupyter-Notebook unter [https://github.com/milo-lab/anthropogenic\\_masse/Baum/Master/Nassgewichtsberechnung/Nassgewichtsberechnung.ipynb](https://github.com/milo-lab/anthropogenic_masse/Baum/Master/Nassgewichtsberechnung/Nassgewichtsberechnung.ipynb) dokumentiert.

### Unsicherheitsabschätzung

Die Fehlerfortpflanzung wurde mithilfe des Python Uncertainties Package<sup>70</sup> durchgeführt. Der Umrechnungsfaktor von Kohlenstoff in Trockengewicht wurde anhand von Kohlenstoffgehaltsschätzungen aus verschiedenen Biomen abgeleitet (siehe Abschnitt „Schätzung des Kohlenstoffgehalts in Biomasse“). Die Gesamtunsicherheit betrug  $\pm 6\%$ . Der Umrechnungsfaktor von Nass- in Trockengewicht wurde anhand von Werten berechnet, die separat für Wurzeln, Stängel und Blätter gemessen wurden (siehe Abschnitt „Schätzung des Nassgewichts in Biomasse“). Wir kamen zu dem Ergebnis, dass die Gesamtunsicherheit des Umrechnungsfaktors von Trocken- in Nassgewicht  $\pm 15\%$  beträgt.

Die Unsicherheiten der Jahre, in denen sich die anthropogene Masse und die Biomasse überschneiden, wurden mithilfe von Monte-Carlo-Simulationen geschätzt, wobei jeder Parameter (z. B. für trockene Biomasse und Nass-zu-Trocken-Umrechnungsfaktor) gemäß seinem Unsicherheitsbereich zufällig ausgewählt wurde. Der Vorgang wurde 10.000 Mal wiederholt, wobei die resultierende Verteilung die Gesamtunsicherheit vorgab. Alle Unsicherheiten werden als  $\pm 1$  sd angegeben. Die verwendeten Unsicherheiten der anthropogenen Masse basierten auf entsprechenden Schätzungen aus Ref. 22 unter Annahme einer Normalverteilung. Die Unsicherheiten der anthropogenen Masse variieren im untersuchten Zeitraum von  $\pm 2\%$  bis  $\pm 6\%$ . Die Abfallunsicherheiten reichen von  $\pm 4\%$  im Jahr 1900 bis  $\pm 7\%$  im Jahr 2015. Alle Berechnungsschritte sind in einem Jupyter-Notebook unter [https://github.com/milo-lab/anthropogenic\\_masse/baum/master/schnittpunkt\\_jahresunsicherheit/Kreuzungsjahresunsicherheit.ipynb](https://github.com/milo-lab/anthropogenic_masse/baum/master/schnittpunkt_jahresunsicherheit/Kreuzungsjahresunsicherheit.ipynb) dokumentiert.

### anthropogene\_masse/baum/master/schnittpunkt\_jahresunsicherheit/Kreuzungsjahresunsicherheit.ipynb

Nach der Biomasseberechnung (wie im Abschnitt „Biomasseveränderung in den Jahren 1900–2017“ beschrieben) wurde eine Gesamtunsicherheit der Trockenbiomasse von  $\pm 16\%$  für die Jahre nach 1990 und  $\pm 29\%$  für frühere Jahre ( $\pm 22\%$  und  $\pm 33\%$  auf Nassgewichtsbasis) ermittelt. Die Unsicherheit wurde mithilfe des Python Uncertainties Package für die pflanzliche Komponente, Monte-Carlo-Simulationen für die nicht-pflanzliche Komponente und Propagation<sup>70</sup> ermittelt. Alle Berechnungsschritte sind in einem Jupyter-Notebook unter [https://github.com/milo-lab/anthropogenic\\_masse/tree/master/biomass\\_calculation/biomass\\_calculation.ipynb](https://github.com/milo-lab/anthropogenic_masse/tree/master/biomass_calculation/biomass_calculation.ipynb).

### Berichtszusammenfassung

Weitere Informationen zum Forschungsdesign finden Sie in der mit diesem Dokument verknüpften Zusammenfassung der Nature Research Reporting Summary.

### Datenverfügbarkeit

Alle in dieser Studie verwendeten Daten sind auf GitHub verfügbar unter [https://github.com/milo-lab/anthropogenic\\_masse](https://github.com/milo-lab/anthropogenic_masse). Daten zur anthropogenen Masse sind verfügbar unter Ref. und unter <https://boku.ac.at/wiso/sec/>

Daten-Download. Die Ergebnisse der TRENDY Dynamic Global Vegetation Models sind verfügbar unter <https://sites.exeter.ac.uk/trendy>. Die Messungen des Trockenmassegehalts der Blätter wurden über TryDB unter <https://www.try-db.org/> erhalten. Weitere in dieser Studie verwendete Datensätze sind in der veröffentlichten Literatur verfügbar (siehe Methoden und Zusatzinformationen).

## Codeverfügbarkeit

Der gesamte in dieser Studie verwendete Code ist auf GitHub unter <https://github.com/> verfügbar.

## Milo-Lab/anthropogene\_Masse.

33. Krausmann, F. et al. *Wirtschaftliche Materialflussrechnung. Einführung und Leitfaden* Version 1, Social Ecology Working Paper 151 (Alpen-Adria-Universität, 2015).
34. Miatto, A., Schandl, H., Fishman, T. & Tanikawa, H. Globale Muster und Trends für nichtmetallische Mineralien, die im Bauwesen verwendet werden. *J. Ind. Ecol.* **21**, 924–937 (2017).
35. Cooper, AH, Brown, TJ, Price, SJ, Ford, JR & Waters, CN Menschen sind die bedeutende globale geomorphologische Triebkraft des 21. Jahrhunderts. *Anthropocene Rev.* **5**, 222–229 (2018).
36. Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen. *Globale Waldressourcen Bewertung 2010: Hauptbericht* (FAO, 2010).
37. Liu, YY et al. Jüngste Umkehrung des Verlusts an globaler terrestrischer Biomasse. *Nat. Clim. Chang.* **5**, 470–474 (2015).
38. Stith, S. et al. Aktuelle Trends und Treiber regionaler Quellen und Senken von Kohlendioxid. *Biogeosciences* **12**, 653–679 (2015).
39. Friedlingstein, P. et al. Globales Kohlenstoffbudget 2019. *Earth Syst. Sci. Data* **11**, 1783–1838 (2019).
40. Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen *FAOSTAT* <http://faostat.fao.org>.
41. Magnabosco, C. et al. Die Biomasse und Biodiversität des kontinentalen Untergrunds. *Nat. In: Geosci.* **11**, 707–717 (2018).
42. Haverd, V. et al. Eine neue Version des CABLE-Landoberflächenmodells (Subversion Revision r4601) unter Einbeziehung von Landnutzungs- und Bodenbedeckungsänderungen, der Demografie der Gehölzvegetation und eines neuen, auf Optimierung basierenden Ansatzes zur pflanzlichen Koordination der Photosynthese. *Geosci. Model Dev.* **11**, 2995–3026 (2018).
43. Melton, JR & Arora, VK Konkurrenz zwischen Pflanzenfunktionstypen im Canadian Terrestrial Ecosystem Model (CTEM) v. 2.0. *Geosci. Model Dev.* **9**, 323–361 (2016).
44. Lawrence, DM et al. Das Community Land Model Version 5: Beschreibung neuer Funktionen, Benchmarking und Auswirkungen der Forcing-Unsicherheit. *J. Adv. Model. Earth Syst.* **11**, 4245–4287 (2019).
45. Tian, H. et al. Nordamerikanische terrestrische CO<sub>2</sub>-Aufnahme wird größtenteils durch CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O ausgeglichen -Emissionen: Auf dem Weg zu einer vollständigen Bilanzierung des Treibhausgasbudgets. *Clim. Change* **129**, 413–426 (2015).
46. Meiyappan, P., Jain, AK & House, JI Erhöhter Einfluss der Stickstoffbegrenzung auf CO<sub>2</sub> -Emissionen aus zukünftiger Landnutzung und Landnutzungsänderung. *Glob. Biogeochem. Cycles* **29**, 1524–1548 (2015).
47. Mauritsen, T. et al. Entwicklungen im MPI-M Erdsystemmodell Version 1.2 (MPI-ESM1.2) und seine Reaktion auf steigendes CO<sub>2</sub>. *J. Adv. Model. Earth Syst.* **11**, 998–1038 (2019).
48. Clark, DB et al. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES). Modellbeschreibung – Teil 2: Kohlenstoffflüsse und Vegetationsdynamik. *Geosci. Model Dev.* **4**, 701–722 (2011).
49. Poulter, B., Frank, DC, Hodson, EL & Zimmermann, NE Auswirkungen der Auswahl von Landbedeckungs- und Klimadaten auf das Verständnis der terrestrischen Kohlenstoffdynamik und des CO<sub>2</sub> Luftgetragene Anteile. *Biogeosciences* **8**, 2027–2036 (2011).
50. Smith, B. et al. Auswirkungen der Berücksichtigung des Stickstoffkreislaufs und der Stickstoffbeschränkungen auf die Primärproduktion in einem individuellen dynamischen Vegetationsmodell. *Biogeosciences* **11**, 2027–2054 (2014).
51. Lienert, S. & Joos, F. Eine Bayesianische Ensemble-Datenassimilation zur Einschränkung des Modells Parameter und Kohlenstoffemissionen durch Landnutzung. *Biogeosciences* **15**, 2909–2930 (2018).
52. Zaehle, S. & Friend, AD Dynamik des Kohlenstoff- und Stickstoffkreislaufs auf der O-CN-Landoberfläche Modell: 1. Modellbeschreibung, Standortbewertung und Empfindlichkeit gegenüber Parameterschätzungen. *Glob. Biogeochem. Zyklen* **24**, GB1005 (2010).
53. Krinner, G. et al. Ein dynamisches globales Vegetationsmodell für Studien des gekoppelten Atmosphäre-Biosphäre-Systems. *Glob. Biogeochem. Cycles* **19**, GB1015 (2005).
54. Goll, DS et al. Kohlenstoff-Stickstoff-Wechselwirkungen in idealisierten Simulationen mit JSBACH (Version 3.10). *Geosci. Model Dev.* **10**, 2009–2030 (2017).
55. Walker, AP et al. Der Einfluss alternativer Trait-Scaling-Hypothesen für die maximale photosynthetische Carboxylierungsrate (V<sub>max</sub>) auf die globale Bruttoprimärproduktion. *New Phytol.* **215**, 1370–1386 (2017).
56. Kato, E., Kinoshita, T., Ito, A., Kawamiya, M. & Yamagata, Y. Bewertung räumlich expliziter Emissionsszenarien von Landnutzungsänderungen und Biomasseverbrennung mithilfe eines prozessbasierten biogeochemischen Modells. *J. Land Use Sci.* **8**, 104–122 (2013).
57. Tang, Z. et al. Muster der pflanzlichen Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorkonzentration in Beziehung zur Produktivität in Chinas terrestrischen Ökosystemen. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **115**, 4033–4038 (2018).
58. Poorter, H. et al. Biomasseverteilung auf Blätter, Stängel und Wurzeln: Metaanalysen der interspezifischen Variation und Umweltkontrolle. *New Phytol.* **193**, 30–50 (2012).
59. Haldal, M., Norland, S. & Tumyr, O. Röntgenmikroanalysemethode zur Messung des Trockenmasse- und Elementgehalts einzelner Bakterien. *Appl. Environ. Microbiol.* **50**, 1251–1257 (1985).
60. von Stockar, U. & Liu, J. Ernährt sich mikrobielles Leben immer von negativer Entropie? Thermodynamische Analyse des mikrobiellen Wachstums. *Biochim. Biophys. Acta* **1412**, 191–211 (1999).
61. Guo, L., Lin, H., Fan, B., Cui, X. & Chen, J. Einfluss des Wurzelwassergehalts auf die Wurzelbiomasse Schätzung mittels Bodenradar: Erkenntnisse aus Vorwärtssimulationen und kontrollierten Feldexperimenten. *Plant Soil* **371**, 503–520 (2013).
62. Glass, SV & Zelinka, SL in *Wood Handbook: Holz als Werkstoff* Vol. 190, 4.1–4.19 (US-Landwirtschaftsministerium, 2010).
63. Loveys, BR et al. Thermische Akklimatisierung der Blatt- und Wurzelatmung: eine Untersuchung zum Vergleich von Natur aus schnell und langsam wachsenden Pflanzenarten. *Glob. Change Biol.* **9**, 895–910 (2003).
64. Sheremetev, SN *Kräuter auf dem Bodenfeuchtigkeitsgradienten (Wasserbeziehungen und die strukturell-funktionelle Organisation)* (KMK, 2005).
65. Michaletz, ST & Johnson, EA Ein Wärmeübertragungsmodell der Kronenbrandbildung bei Waldbränden. *Kann. J. For. Res.* **36**, 2839–2851 (2006).
66. Messier, J., McGill, BJ & Lechowicz, MJ Wie variieren Merkmale über ökologische Skalen hinweg? Argumente für eine merkmalsbasierte Ökologie. *Ecol. Lett.* **13**, 838–848 (2010).
67. Boucher, FC, Thuiller, W., Arnold, C., Albert, CH & Lavergne, S. Unraveling the Architektur der funktionellen Variabilität in Wildpopulationen von *Polygonum viviparum* L. *Funct. In: Ecol.* **27**, 382–391 (2013).
68. Dahlin, KM, Asner, GP & Field, CB Umwelt- und Gemeinschaftskontrollen der Pflanzenkronenchemie in einem mediterranen Ökosystem. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **110**, 6895–6900 (2013).
69. Kattge, J. et al. TRY—eine globale Datenbank von Pflanzenmerkmalen. *Glob. Change Biol.* **17**, 2905–2935 (2011).
70. Lebigot, EO Uncertainties: ein Python-Paket für Berechnungen mit Unsicherheiten. <https://pythonhosted.org/uncertainties/> (2010).
71. Wiedenhofer, D., Fishman, T., Lauk, C., Haas, W. & Krausmann, F. Integration der Materialbestandsdynamik in die gesamtwirtschaftliche Materialflussrechnung: Konzepte, Modellierung und globale Anwendung für 1900–2050. *Ecol. Econ.* **156**, 121–133 (2019).

**Danksagungen** Wir danken U. Alon, S. Dan, G. Eshel, T. Fishman, E. Gelbrieth, T. Kaufmann, T. Klein, A. Knoll, E. Noor, N. Page, R. Phillips, J. Pongratz, M. Shamir, M. Shtein, B. Smith, C. Waters, T. Wiesel, M. Williams und den Mitgliedern unseres Labors für Hilfe und Diskussionen und S. Stith und der TRENDY DGVN-Community für den Zugriff auf ihre Simulationsergebnisse. Diese Forschung wurde vom Europäischen Forschungsrat (Projekt NOVCARBFIX 646827); Beck-Canadian Center for Alternative Energy Research; Dana und Yossie Hollander; Ullmann Family Foundation; Helmsley Charitable Foundation; Larson Charitable Foundation; Wolfson Family Charitable Trust; Charles Rothschild; und Selmo Nussenbaum unterstützt. RM ist der professionelle Vorsitzende des Charles and Louise Gartner-Programms. YMB-O ist ein Azrieli Fellow.

**Autorenbeiträge** EE, LB-U. und RM haben das Manuskript verfasst. EE hat den Großteil der Recherche und Datenanalyse durchgeführt. LB-U. hat zur anthropogenen Massenanalyse und Biomasseschätzung beigetragen. YMB-O. hat zur Biomasseschätzung und zum Kohlenstoffgehalt beigetragen.

Berechnung, JG hat zur Berechnung des Wassergehalts beigetragen. EE, JG und YMB-O. haben die Unsicherheitsanalyse durchgeführt. EE, LB-U. und RM haben die Studie konzipiert. RM hat die Studie überwacht. Alle Autoren haben die Ergebnisse diskutiert und das Manuskript kommentiert.

**Interessenkonflikte** Die Autoren erklären, dass keine Interessenkonflikte vorliegen.

### Weitere Informationen

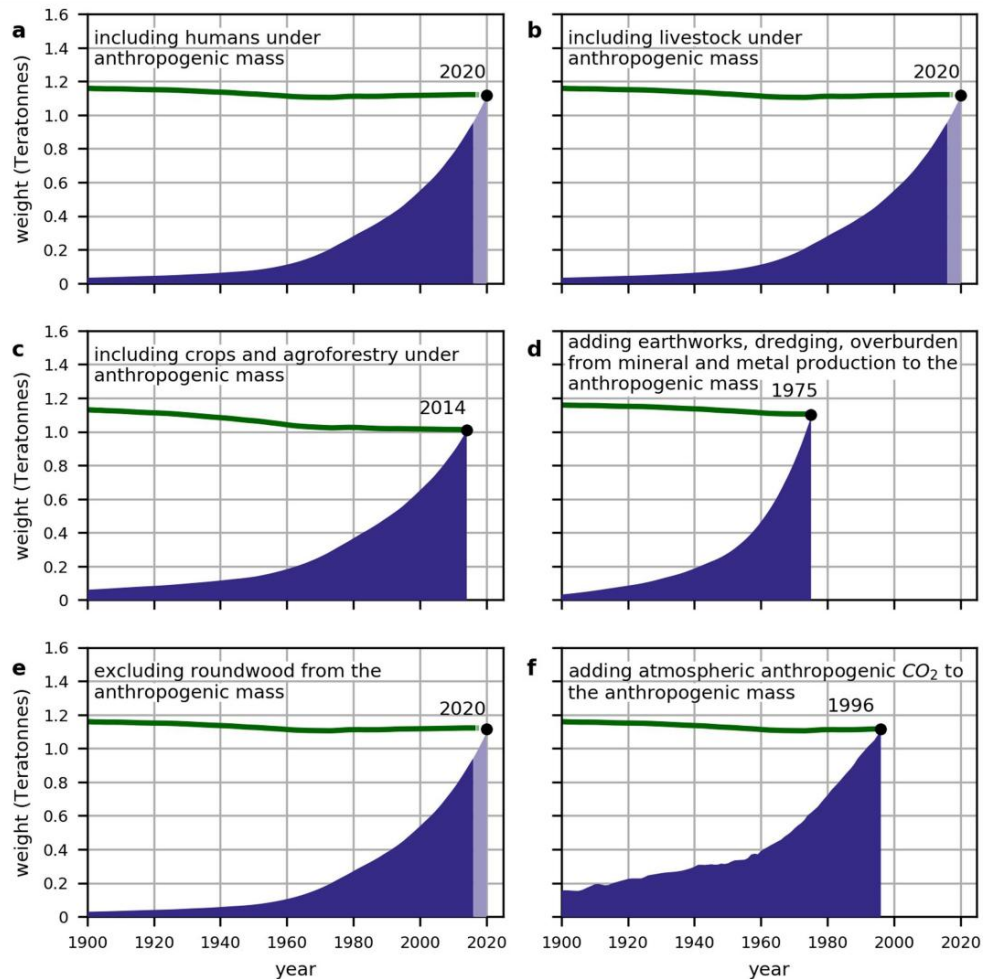
**Ergänzende Informationen** zu diesem Papier finden Sie unter <https://doi.org/10.1038/s41586-020-3010-5>.

**Korrespondenz** und **Materialanfragen** sind zu richten an RM

**Informationen zum Peer-Review:** *Nature* dankt Fridolin Krausmann, Dominik Wiedenhofer und den anderen, anonymen Gutachtern für ihren Beitrag zum Peer-Review dieser Arbeit.

**Informationen zu Nachdrucken und Genehmigungen** finden Sie unter <http://www.nature.com/reprints>.

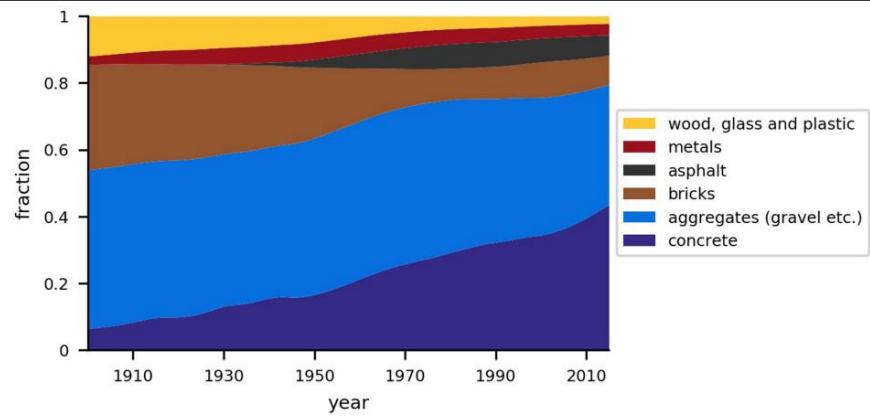
# Artikel



## Erweiterte Daten Abb. 1 | Sensitivitätsanalyse der Definition der anthropogenen

**Masse.** a–f, Die Auswirkung der Hinzufügung der folgenden Elemente zur anthropogenen Masse (dunkelviolett): a, Masse der menschlichen Bevölkerung, b, Masse des Viehbestands, c, Masse der Nutzpflanzen und Agroforstwirtschaft, d, Masse der Erdarbeiten, Baggerarbeiten und Abfälle/Abraum aus der Mineral- und Metallproduktion, f, Masse der anthropogenen atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Bestände, sowie e, Ausschluss der Masse der industriellen

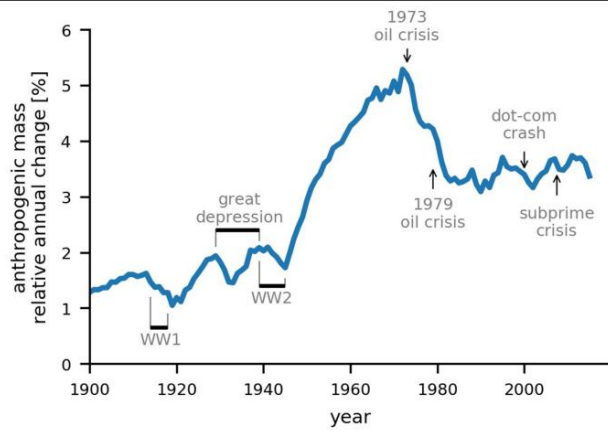
Rundholz. Das Gesamtgewicht der Biomasse wird durch die grüne Linie dargestellt. Der schwarze Punkt zeigt das Jahr der Überschneidung basierend auf der alternativen Definition der anthropogenen Masse an. Der violette Bereich und die hellgrüne gestrichelte Linie zeigen die extrapolierten Schätzungen der anthropogenen Masse bzw. Biomasse an. Eine vollständige Beschreibung der Sensitivitätsanalyse finden Sie in Abschnitt 1 der Zusatzinformationen.



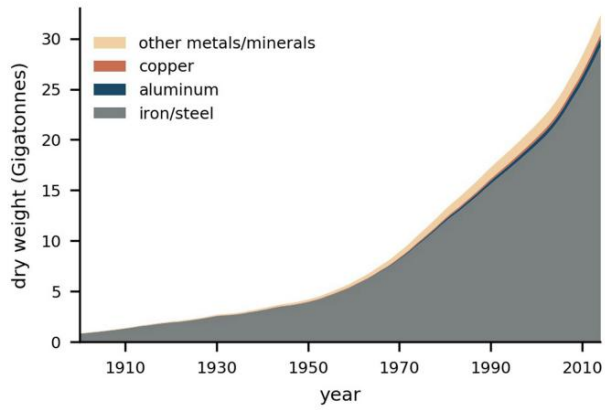
Erweiterte Daten Abb. 2 | Anthropogene Massenzusammensetzung seit dem Jahr 1900, unterteilt in Materialgruppen. Der Datensatz basiert auf Ref. 22.



## Artikel

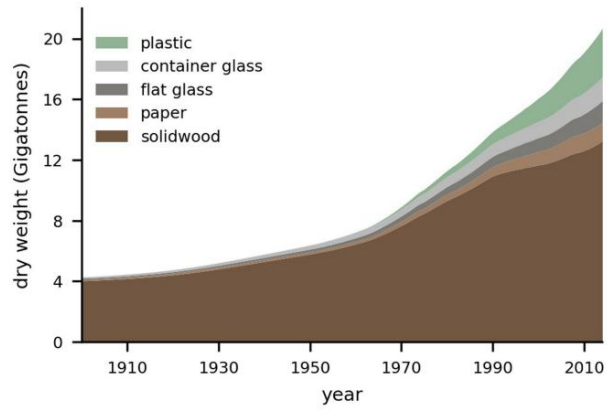


**Erweiterte Daten Abb. 3 | Relative jährliche Veränderung der anthropogenen Masse, mit Hervorhebungen bedeutender globaler Ereignisse.** Die relative jährliche Veränderung wird als Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Jahren geteilt durch den Wert der anthropogenen Masse des Vorjahres berechnet.

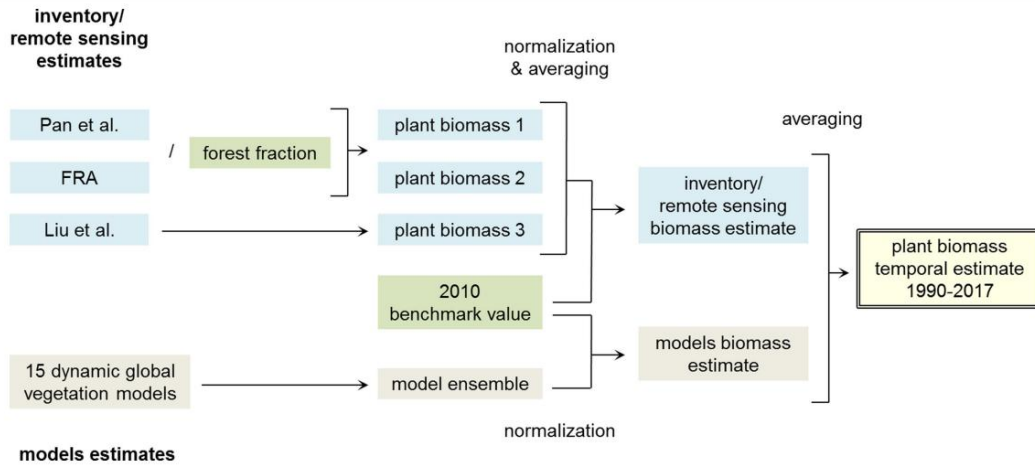


**Erweiterte Daten Abb. 4 | Schätzungen anthropogener Massenmetalle seit Beginn des 20. Jahrhunderts, unterteilt in Materialuntergruppen.** Die Daten stammen aus der umfassenden Arbeit des Instituts für Soziale Ökologie, Wien. Wir haben eine aktuelle Studie<sup>71</sup> verwendet, die im Vergleich zu der Studie, die zur Erzielung der Hauptergebnisse<sup>22</sup> verwendet wurde, einige geringfügige Aktualisierungen aufweist.

## Artikel



**Erweiterte Daten Abb. 5 | Anthropogene Massenschätzungen für (industrielles Rund-)Holz, Glas und Kunststoff seit Beginn des 20. Jahrhunderts, unterteilt in Materialuntergruppen.** Die Daten stammen aus der umfassenden Arbeit des Instituts für Soziale Ökologie, Wien. Wir haben eine aktuelle Studie<sup>71</sup> verwendet, die einige kleinere Aktualisierungen gegenüber der Studie enthält, die zur Erzielung der Hauptergebnisse<sup>22</sup> verwendet wurde.



Erweiterte Daten Abb. 6 | Berechnungsschritte bei der Schätzung der Pflanzenbiomasse für 1990–2017. Wie im Abschnitt „Methoden“ „Veränderung der Biomasse im Laufe der Jahre“ näher erläutert, 1900–2017.

# Artikel

## Erweiterte Datentabelle 1 | Die verschiedenen anthropogenen Massengruppen und ihre Massenschätzungen in ausgewählten Jahren

Anthropogenic mass group	Description	1900	1940	1980	2020
concrete	Used mostly for building and infrastructure construction. Comprises a mix of materials, including cement and aggregates (gravel and sand).	2	10	86	549
aggregates	Gravel and sand, mainly used as bedding for roads and buildings. Aggregates used for production of concrete and asphalt are accounted under those categories and not here.	17	30	135	386
bricks	Mostly composed of clay and used for constructions.	11	16	28	92
asphalt	Composed of bitumen and aggregates (gravel and sand), used mainly for road construction/pavement.	0	1	22	65
metals	Mostly iron/steel, aluminum and copper.	1	3	13	39
other	Including industrial roundwood, in the form of solidwood products and paper/paperboard, container and flat glass and plastic.	4	6	11	23

Die Massenwerte werden in Gigatonnen (Gt; 1.000 Gt = 1 Tt) angegeben. Die Schätzung für 2020 ist teilweise extrapoliert (seit 2016). Insgesamt decken die angegebenen Kategorien anthropogener Masse den Materialverbrauch nahezu vollständig ab (>98 % in Bezug auf die Masse, basierend auf Ref. 21).

## Berichtszusammenfassung

Nature Research möchte die Reproduzierbarkeit der von uns veröffentlichten Arbeiten verbessern. Dieses Formular bietet Struktur für Konsistenz und Transparenz bei der Berichterstattung. Weitere Informationen zu den Richtlinien von Nature Research finden Sie [unter Autoren und Gutachter](#) sowie [in der Checkliste für redaktionelle Richtlinien](#).

## Statistiken

Stellen Sie bei allen statistischen Analysen sicher, dass die folgenden Elemente in der Abbildungslegende, der Tabellenlegende, dem Haupttext oder dem Abschnitt „Methoden“ vorhanden sind.

n/a Bestätigt

- Die genaue Stichprobengröße ( $n$ ) für jede Versuchsgruppe/-bedingung, angegeben als diskrete Zahl und Maßeinheit
- Eine Aussage darüber, ob Messungen an unterschiedlichen Proben vorgenommen wurden oder ob dieselbe Probe wiederholt gemessen wurde
- Die verwendeten statistischen Tests UND ob sie ein- oder zweiseitig sind. *Nur gängige Tests sollten ausschließlich dem Namen nach beschrieben werden; beschreiben Sie komplexere Techniken im Abschnitt „Methoden“.*
- Eine Beschreibung aller getesteten Kovariaten
- Eine Beschreibung aller Annahmen oder Korrekturen, wie z. B. Tests auf Normalität und Anpassung für Mehrfachvergleiche
- Eine vollständige Beschreibung der statistischen Parameter, einschließlich der zentralen Tendenz (z. B. Mittelwerte) oder anderer grundlegender Schätzungen (z. B. Regressionskoeffizienten) UND Variation (z. B. Standardabweichung) oder damit verbundene Schätzungen der Unsicherheit (z. B. Konfidenzintervalle)
- Beim Testen der Nullhypothese werden die Teststatistiken (z. B.  $F$ ,  $t$ ,  $r$ ) mit den Konfidenzintervallen, Effektstärken, Freiheitsgraden und dem  $P$ -Wert angegeben. *Geben Sie die  $P$ -Werte nach Möglichkeit als exakte Werte an.*
- Für die Bayes-Analyse: Informationen zur Auswahl von Priorien und Markov-Ketten-Monte-Carlo-Einstellungen
- Bei hierarchischen und komplexen Designs: Ermittlung der geeigneten Ebene für Tests und vollständige Berichterstattung der Ergebnisse
- Schätzungen der Effektstärken (z. B. Cohens  $d$ , Pearsons  $r$ ) mit Angabe, wie sie berechnet wurden

Unsere Websammlung zur [Statistik für Biologen](#) enthält Artikel zu vielen der oben genannten Punkte.

## Software und Code

Richtlinieninformationen zur [Verfügbarkeit von Computercode](#)

Datenerfassung

Der gesamte in dieser Studie verwendete Code ist auf GitHub unter [https://github.com/milo-lab/anthropogenic\\_mass](https://github.com/milo-lab/anthropogenic_mass) verfügbar.

Datenanalyse

Der gesamte in dieser Studie verwendete Code ist auf GitHub unter [https://github.com/milo-lab/anthropogenic\\_mass](https://github.com/milo-lab/anthropogenic_mass) verfügbar.

Bei Manuskripten, in denen benutzerdefinierte Algorithmen oder Software verwendet werden, die für die Forschung von zentraler Bedeutung sind, in der veröffentlichten Literatur jedoch noch nicht beschrieben werden, muss den Herausgebern/Gutachtern die Software zur Verfügung gestellt werden. Wir empfehlen dringend, Code in einem Community-Repository (z. B. GitHub) zu hinterlegen. Weitere Informationen finden Sie in den [Nature Research-Richtlinien zum Einreichen von Code und Software](#).

## Daten

Richtlinieninformationen zur [Verfügbarkeit von Daten](#)

Alle Manuskripte müssen eine [Erklärung zur Datenverfügbarkeit](#) enthalten. Diese Erklärung sollte, sofern zutreffend, die folgenden Informationen enthalten:

- Zugangscodes, eindeutige Kennungen oder Weblinks für öffentlich verfügbare Datensätze
- Eine Liste von Abbildungen mit zugehörigen Rohdaten
- Eine Beschreibung etwaiger Einschränkungen der Datenverfügbarkeit

Alle in dieser Studie verwendeten Daten sind auf GitHub verfügbar, unter [https://github.com/milo-lab/anthropogenic\\_mass](https://github.com/milo-lab/anthropogenic_mass). Daten zur anthropogenen Masse sind verfügbar unter Ref. 22 und unter: <https://boku.ac.at/wiso/sec/data-download>. Ausgaben von TRENDY Dynamic Global Vegetation Models sind verfügbar unter: <https://sites.exeter.ac.uk/trendy>. Messungen des Trockenmassegehalts der Blätter wurden über TryDB erhalten, unter: <https://www.try-db.org/>. Andere in dieser Studie verwendete Datensätze sind in der veröffentlichten Literatur verfügbar, wie im Abschnitt „Methoden“ und in den Zusatzinformationen beschrieben.

## Feldspezifisches Reporting

Wählen Sie unten bitte diejenige aus, die am besten zu Ihrer Forschung passt. Wenn Sie sich nicht sicher sind, lesen Sie die entsprechenden Abschnitte, bevor Sie Ihre Auswahl treffen.

Biowissenschaften  Verhaltens- und Sozialwissenschaften  Ökologische, evolutionäre und Umweltwissenschaften

Eine Referenzkopie des Dokuments mit allen Abschnitten finden Sie unter [nature.com/documents/nr-reporting-summary-flat.pdf](https://www.nature.com/documents/nr-reporting-summary-flat.pdf)

## Studiendesign für Ökologie, Evolution und Umweltwissenschaften

Alle Studien müssen diese Punkte offenlegen, auch wenn die Offenlegung negativ ist.

Studienbeschreibung	Quantitativer Vergleich der globalen lebenden Biomasse und der vom Menschen geschaffenen Masse seit Beginn des 20. Jahrhunderts.
Forschungsbeispiel	Vom Menschen erzeugte Massendaten, unterteilt in Materialuntergruppen und Daten zur lebenden Biomasse.
Stichprobenstrategie	Es wurden alle relevanten Daten verwendet. Es wurden keine statistischen Methoden eingesetzt, um die Stichprobengröße vorab zu bestimmen.
Datenerfassung	Die Daten basierten auf vorhandenen Datensätzen und wurden von den Autoren online gesammelt.
Zeitlicher und räumlicher Maßstab	Globale Daten seit 1900, im Einklang mit dem Zeitraum und dem globalen Umfang der Studie.
Datenausschlüsse	Es wurden keine Daten von den Analysen ausgeschlossen.
Reproduzierbarkeit	Dies ist keine experimentelle Studie, daher wurde keine experimentelle Replikation durchgeführt. Die Analyse ist reproduzierbar, wenn der Code bereitgestellt, das alle Schritte von den Rohdaten bis zu den Endergebnissen umfasst.
Randomisierung	Alle lebenden Organismen wurden in einer Gruppe zusammengefasst, alle vom Menschen geschaffenen Massen wurden in einer anderen Gruppe zusammengefasst.
Blending	Nicht relevant, da diese Studie nicht experimentell ist.
War für die Studie Feldarbeit erforderlich?	<input type="checkbox"/> Ja <input checked="" type="checkbox"/> NEIN

## Berichterstattung für bestimmte Materialien, Systeme und Methoden

Wir benötigen von den Autoren Informationen zu bestimmten Materialarten, experimentellen Systemen und Methoden, die in vielen Studien verwendet wurden. Geben Sie hier an, ob jedes aufgeführte Material, System oder jede aufgeführte Methode für Ihre Studie relevant ist. Wenn Sie nicht sicher sind, ob ein Listenelement auf Ihre Forschung zutrifft, lesen Sie den entsprechenden Abschnitt, bevor Sie eine Antwort auswählen.

### Materialien und experimentelle Systeme

n/a	An der Studie beteiligt
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Antikörper
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Eukaryotische Zelllinien
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Paläontologie
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Tiere und andere Organismen
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Teilnehmer an menschlichen Studien
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Klinische Daten

### Methoden

n/a	An der Studie beteiligt
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ChIP-Sequenz
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Durchflusszytometrie
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> MRT-basierte Neurobildgebung