

## 4.4 Treibhausgas effekte von Landnutzung

JULIA PONGRATZ, JULIA E.M.S. NABEL & WOLFGANG OBERMEIER

*Drei Viertel der eisfreien Landoberfläche stehen unter forst- und landwirtschaftlicher Nutzung. Auf etwa einem Viertel hat Landnutzung die Landbedeckung verändert. Auf weiteren zwei Vierteln ist die ursprüngliche Landbedeckung zwar beibehalten, aber bewirtschaftet, was ähnlich starke Effekte zum Beispiel auf die globale Biomasse hat wie Landbedeckungsänderungen. Auch wenn der Wiederbewuchs von natürlicher Vegetation nach Holzernte oder der Aufgabe landwirtschaftlicher Flächen CO<sub>2</sub> aufnimmt und speichert, überwiegen historisch gesehen deutlich die Flüsse in die Atmosphäre, so dass sich Netto-Emissionen aus der Landnutzung ergeben. Diese werden aktuell (Durchschnitt über das letzte Jahrzehnt) auf 6 Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr geschätzt. Betrachtet man auch Methan- und Lachgasemissionen, so trägt Landnutzung etwa 25% zu den jährlichen anthropogenen Treibhausgasemissionen bei. Auch 5 Jahre nach dem Paris-Abkommen zeigen Landnutzungsemissionen keine deutlichen Anzeichen eines Rückgangs, obwohl es für die meisten Szenarien zur Einhaltung der Pariser Ziele grundlegend ist mittels Landnutzungsveränderungen die Kohlenstoffaufnahme großskalig zu erhöhen um sogenannte negative Emissionen zu erzeugen.*

**Greenhouse gas effects of land use:** *Three quarters of the ice-free land surface are under agricultural and forestry use. On about one quarter, land use has changed the land cover. On another two-quarters, the original land cover is retained but managed, which has similarly strong effects as land cover change for example on global biomass. Although regrowth of natural vegetation after wood harvest or abandonment of agricultural land absorbs and stores CO<sub>2</sub>, historically the fluxes to the atmosphere clearly dominate, resulting in net emissions from land use. These are currently estimated (average over the last decade) at 6 Gt CO<sub>2</sub> per year. If methane and nitrous oxide emissions are also considered, land use contributes about 25% of annual anthropogenic greenhouse gas emissions. Even 5 years after the Paris Agreement, land use emissions show no clear signs of decline, although for most scenarios to meet the Paris targets it is fundamental to increase carbon uptake on a large scale through land use change to generate so-called negative emissions.*

**Efecto invernadero por el uso de la tierra:** *Tres cuartas partes de la superficie de la tierra sin hielo están bajo uso forestal y agrícola. El uso del suelo ha cambiado la cobertura de la tierra en alrededor de una cuarta parte. En otras dos cuartas partes, la cobertura terrestre original se ha conservado, pero gestionada, lo que tiene efectos igualmente fuertes sobre la biomasa global; por ejemplo, en los cambios de la cobertura terrestre. Incluso si el rebrote de vegetación natural después de la extracción de madera o el abandono de tierras agrícolas absorbe y almacena CO<sub>2</sub>, históricamente los flujos a la atmósfera predominan claramente, de modo que las emisiones netas son el resultado del uso de la tierra. Estos se estiman actualmente (promedio durante la última década) en 6 Gt CO<sub>2</sub> por año. Si también se tienen en cuenta las emisiones de metano y óxido nítrico, el uso de la tierra contribuye alrededor del 25% a las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero. Incluso 5 años después del Acuerdo de París, las emisiones de uso del suelo no muestran signos claros de disminución, aunque es fundamental para la mayoría de los escenarios cumplir con los objetivos de París de aumentar la absorción de carbono a gran escala mediante cambios de uso del suelo para generar las llamadas emisiones negativas.*

### Landbedeckung, Landnutzung und Landmanagement

Die Landbedeckung ist definiert als die Summe aller Eigenschaften der Bodenoberfläche an einem bestimmten Ort (z.B. biophysikalisch, morphologisch, topografisch) und wird in der Regel durch die Vegetations- und Bodenmerkmale an diesem Ort beschrieben (s. Abb. 4.4-1 und PONGRATZ et al. 2014 für Details). Die Landbedeckung wird häufig in allgemeine Klassen eingeteilt (z.B. Wald, Grünland), die wiederum in detailliertere Klassen unterteilt werden können (z.B. Laubwald, Nadelwald, Mischwald). Die Landnutzung bezieht sich auf die Funktionen, die der Mensch einem bestimmten Ort zuweist, und auf die Art und Weise, wie der Mensch deshalb das Land bewirtschaftet. Auch die Landnutzung wird in der Regel in allgemeine Klassen eingeteilt (z.B. Forstwirtschaft, Beweidung, Ackerbau). Land-

management (oder Landbewirtschaftung) bezieht sich auf die Landnutzungspraktiken, die innerhalb dieser breiteren Landnutzungsklassen stattfinden (z.B. Säen, Düngen, Jäten, Pflügen, Bewässern, Ernten, Durchforsten, Kahlschlag). Landnutzungsänderungen im Laufe der Zeit beziehen sich dann entweder auf (a) Umwandlungen zwischen den allgemeineren Landnutzungsklassen (z.B. Weidenwirtschaft in Ackerbau) oder (b) Änderungen des Landmanagement innerhalb dieser Klassen (z.B. Intensivierung der Landwirtschaft).

Derzeit stehen etwa drei Viertel der eisfreien Landoberfläche unter Landnutzung – Tendenz steigend, wenn man von einem Anstieg und höheren Konsum der Weltbevölkerung ausgeht, also mehr Nahrungsmittel und vegetationsbasierte Rohstoffe produziert werden müssen. Gleichzeitig sehen viele nationale Klimaschutzgesetze bereits den Einsatz von landbasierten

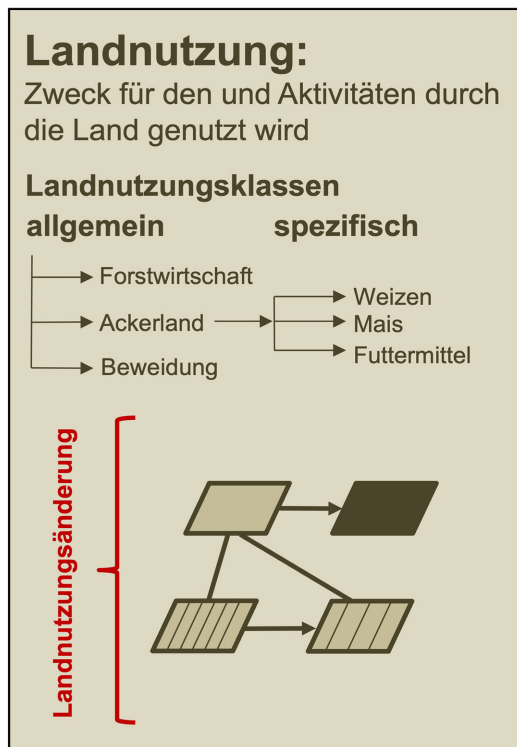
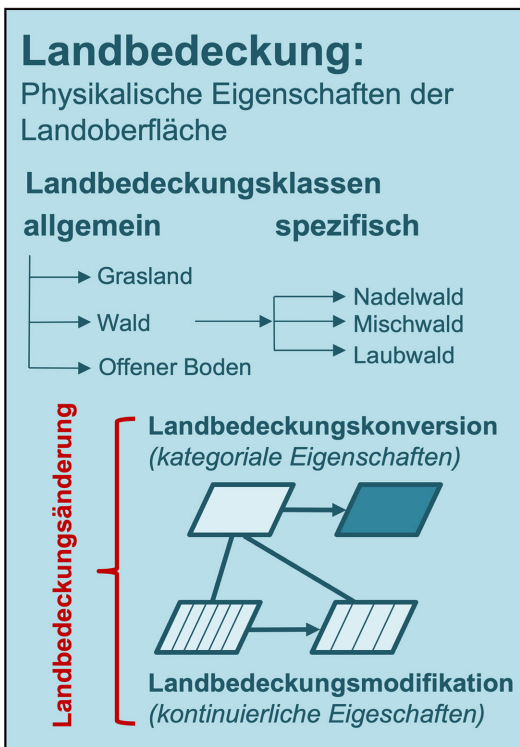
Negativemissionstechnologien vor, wie Aufforstung und Biomasseplantagen für Bioenergie mit Abscheidung des Kohlenstoffdioxids (CO<sub>2</sub>) (s. Kap. 7.1, 7.3, 7.9 & 7.11). Auch dies wird zu einer Ausweitung genutzter Flächen und Veränderungen des Landmanagements führen (POPP et al. 2018). *Abb. 4.4-2* zeigt das derzeitige Ausmaß von Landnutzung: Gänzlich unberührte Gebiete finden sich vorrangig in unproduktiven kalten oder heißen Wüsten oder kleineren Regionen im Inneren der Regenwälder. Im restlichen Gebiet, auf etwa 31 Millionen km<sup>2</sup>, hat der Mensch oftmals die Landbedeckung geändert, 15 Millionen davon mittels Rodung von Wäldern für Ackerbau und Weidewirtschaft (LUYSSAERT et al. 2014). Dazu kommen weitere 65 Millionen km<sup>2</sup>, deren Klasse der Landbedeckung zwar unverändert blieb, die aber dennoch unter verschieden intensiver Bewirtschaftung stehen. So sind zum Beispiel 28 Millionen km<sup>2</sup> der noch existierenden Wälder durch selektiven Holzeinschlag, Entnahme von Feuerholz u.a. genutzt, nur 9 Millionen km<sup>2</sup> Wald kann man noch als unberührt bezeichnen (LUYSSAERT et al. 2014).

Eine Erkenntnis erst der letzten Jahre ist, dass unterschiedliches Landmanagement für das Klima ähnlich bedeutend ist wie Landbedeckungsänderungen – aber, wie oben gezeigt, doppelt so viel Fläche betrifft.

So ist der Verlust der Biomasse weltweit etwa hälftig auf Landmanagement und hälftig auf Landbedeckungsänderungen zurückzuführen (ERB et al. 2018 und *Abb. 4.4-3*). Neueste Studien für den Amazonas-Regenwald zeigen sogar, dass Degradierung von Wäldern dort weit stärker voranschreitet als Rodung (MATRICARDI et al. 2020) und im letzten Jahrzehnt zu deutlich mehr Biomasseverlust geführt hat (QIN et al. 2021). Auch für die biogeophysikalischen Mechanismen (also Einfluss etwa auf Energie- und Wasserflüsse, s. Kap. 4.1 und 7.11) wurden ähnlich große Veränderungen durch Landmanagement wie durch Landbedeckungsänderungen nachgewiesen (LUYSSAERT et al. 2014). So kann Landmanagement beispielsweise lokale Temperaturen um mehrere Grad ändern – durch Abholzung (s. Kap. 7.11) ebenso wie durch die vermeintlich subtileren Änderungen im Landmanagement wie etwa Bewässerung oder Änderung von Laub- zu Nadelwald (BRIGHT et al. 2017).

### Das globale anthropogene Kohlenstoffbudget

Der Kohlenstoffkreislauf der Erde ist ein geschlossenes System, in dem Kohlenstoff zwischen den Reservoiren der terrestrischen Biosphäre, dem Ozean und der Atmo-



*Abb. 4.4-1: Definition von Landbedeckung, Landnutzung und Landnutzungsänderung (verändert nach PONGRATZ et al. 2014).*

sphäre zirkuliert. Anthropogene Kohlenstoffemissionen, zum Beispiel durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen, aber auch durch Entwaldung und andere Landnutzungsaktivitäten verändern die Kohlenstoffflüsse zwischen den Reservoirs. Die Aufstellung des globalen Kohlenstoffbudgets beinhaltet eine Quantifizierung der fossilen und Landnutzungsemissionen in einem Jahr oder längerem Zeitraum, die dadurch verursachten Kompensationsflüssen in die terrestrische Biosphäre (»natürliche terrestrische Senke«) und in den Ozean, und die sich daraus ergebende Veränderung in der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration.

Das *Global Carbon Project* erstellt jedes Jahr ein globales Kohlenstoffbudget (Abb. 4.4-4) unter Nutzung unterschiedlicher Methoden und Datenquellen und quantifiziert neben den natürlichen Senken in der terrestrischen Biosphäre, Ozean und Atmosphäre die fossilen und Landnutzungs-CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die beiden Emissionsterme werden sehr unterschiedlich quantifiziert: Fossile Kohlenstoffemissionen können relativ präzise aus Energienutzungsdaten abgeleitet werden (FRIEDLINGSTEIN et al. 2020). Schätzungen von Landnutzungsemissionen hingegen sind nur mit der Hilfe von Simulationsmodellen zu quantifizieren, insb-

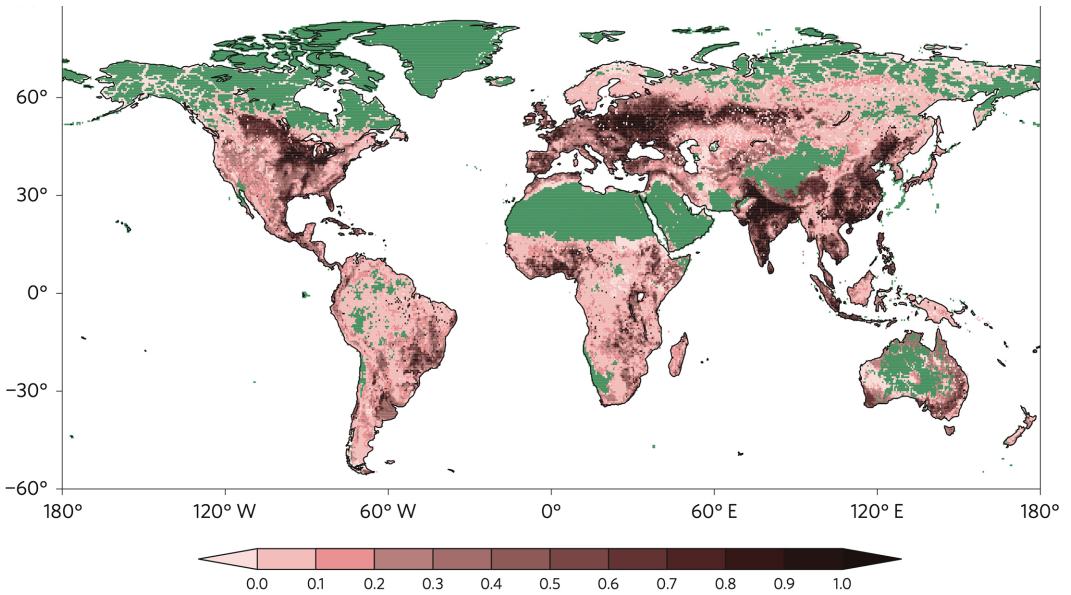


Abb. 4.4-2: Von Landnutzung unberührte Gebiete sind grün dargestellt. Die Farbskala stellt den Anteil jeder Gitterzelle dar, bei dem die ursprüngliche Pflanzendecke umgewandelt wurde. Dunkle Farben zeigen Regionen an, in denen der größte Teil der ursprünglichen Pflanzendecke umgewandelt wurde. Die hellen Farben zeigen Gebiete an, in denen die Landbedeckung nur geringfügig verändert wurde, die aber dennoch in irgendeiner Form vom Menschen genutzt werden (LUYSSAERT et al. 2014).

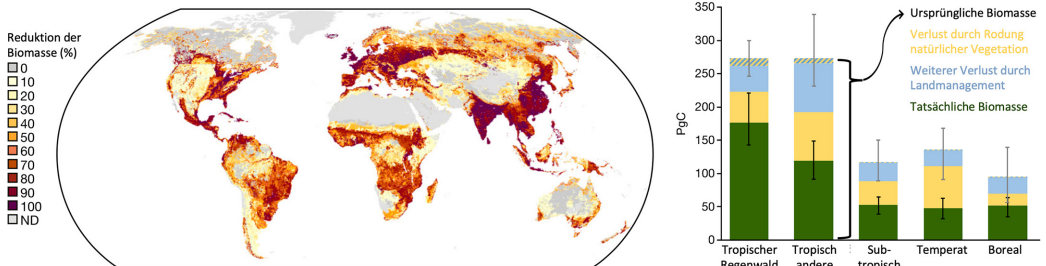
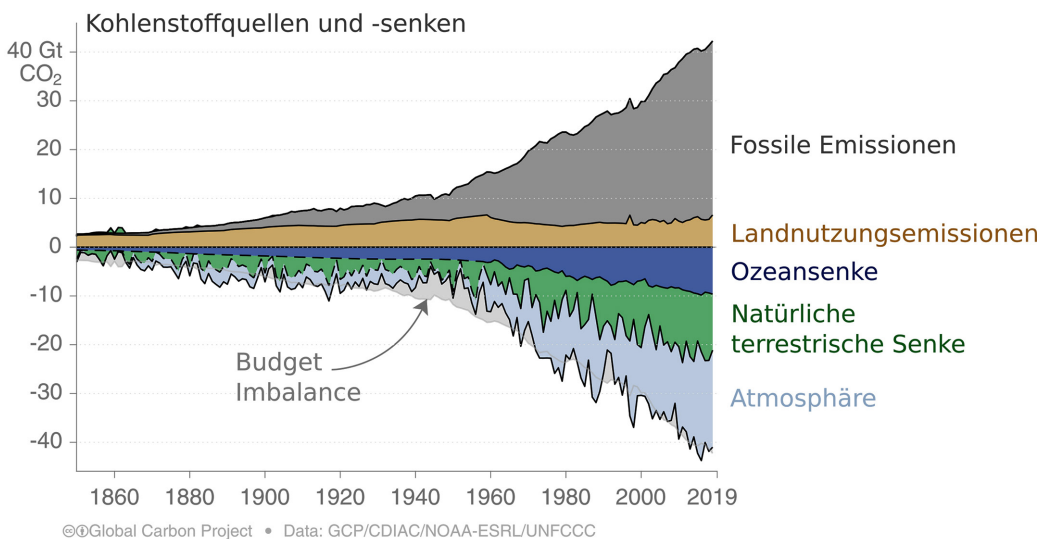


Abb. 4.4-3: Veränderungen der Vegetationsbiomasse durch Landmanagement und Landbedeckungsänderungen, verursacht durch den Menschen. Die Zahlen wurden aus einer Kombination von mehreren Fernerkundungs- und Inventurdatensätzen abgeleitet. Global ist etwa die Hälfte der Biomasse durch den Menschen vernichtet worden – die Hälfte davon durch Landmanagement. Abbildung verändert nach ERB et al. 2018.

sonders, da sie nicht direkt messbar sind und sehr eng mit natürlichen Prozessen innerhalb der terrestrischen Biosphäre verweben sind. Die berechneten globalen Emissionen entsprechen nur ungefähr der berechneten Veränderung in den drei Kohlenstoffreservoirs, so dass ein Ungleichgewicht (die sogenannte *Budget Imbalance*) entsteht, welche sich in Daten- und Modellunsicherheiten, Schätzfehlern, sowie kleineren vernachlässigten Termen begründet (FRIEDLINGSTEIN et al. 2020). Jährlich im Mittel über 2010 bis 2019 ergaben die fossilen Emissionen 34 ( $\pm 1$  Standardabweichung: 33-36) Gt CO<sub>2</sub>, Landnutzungsemissionen 6 (3-8) Gt CO<sub>2</sub>, die natürliche terrestrische Senke 13 (9-16) Gt CO<sub>2</sub>, die Ozeansenke 9 (7-11) Gt CO<sub>2</sub> und der atmosphärische CO<sub>2</sub>-Anstieg 19 Gt CO<sub>2</sub>, mit einer *Budget Imbalance* von -0,2 Gt CO<sub>2</sub>.

Betrachtet man den zeitlichen Verlauf der jährlichen Änderungen in den Emissionen (Abb. 4.4-4), so wird deutlich, dass die Landnutzungsemissionen seit 1850 annähernd konstant geblieben sind, während die fossilen Kohlenstoffemissionen diese seit 1950 übertreffen, stark anstiegen und erst 2019 eine Stagnation im Wachstum erfuhren (FRIEDLINGSTEIN et al. 2020). Die natürliche terrestrische Senke und der Ozean fungieren derzeit als Senke für gut die Hälfte unserer Emissionen, wirken also der globalen Erwärmung substantiell entgegen. Die Effizienz dieser Senken fällt allerdings in Zukunftsszenarien mit höheren menschengemachten Emissionen deutlich geringer aus als in solchen mit niedrigeren kumulativen Emissionen (IPCC 2021).

Wichtig zu verstehen ist, dass die Landnutzungsemissionen einen Netto-Fluss bestehend aus einer Vielzahl von Komponentenflüssen darstellen, die teilweise tatsächliche Emissionen in die Atmosphäre darstellen, teilweise aber auch Aufnahme von CO<sub>2</sub> auf dem Land (oft auch »Negativemissionen« genannt). Emissionen stammen v.a. aus Abholzung von Wäldern und der Umwandlung anderer natürlicher Vegetation für Ackerland und Grünland, Holzernte durch den Zerfall von totem Pflanzenmaterial und Holzprodukten sowie Degradierung von natürlicher Vegetation durch Beweidung. CO<sub>2</sub>-Aufnahme entsteht vor allem, wenn landwirtschaftliche Flächen aufgegeben werden oder Wald nach Holzernte nachwächst (FRIEDLINGSTEIN et al. 2020). Der Begriff der »natürlichen Senken«, der im Rahmen des Klimaschutzes oft gebraucht wird, bezieht sich auf diese letzteren Landnutzungsprozesse, die zu CO<sub>2</sub>-Aufnahmen führen. Er ist nicht mit der zuvor beschriebenen natürlichen terrestrischen Senke zu verwechseln, die nicht direkt auf menschlichen Einfluss durch Landnutzungsmaßnahmen zurückzuführen ist (sondern nur auf indirekten menschlichen Einfluss etwa über den anthropogen verursachten CO<sub>2</sub>-Anstieg in der Atmosphäre). Allerdings ist diese Unterscheidung in den von den Ländern vorgelegten Berichten zu ihren Netto-Emissionen aus dem land- und forstwirtschaftlichen Bereich nicht klar: Hier wird die natürliche terrestrische Senke den Landnutzungsemissionen (bzw. -aufnahmen) zugeschrieben, wenn sie auf genutztem Land auftreten. Die Folge ist, dass Teile der natürlichen CO<sub>2</sub>-Aufnahme



**Abb. 4.4-4:** Das globale Kohlenstoffbudget, das die durch menschliche Aktivitäten verursachten Quellen und Senken von CO<sub>2</sub> für den Zeitraum 1850-2019 quantifiziert (FRIEDLINGSTEIN et al. 2020). Für eine Umrechnung von Gt CO<sub>2</sub> in Gt Kohlenstoff (C) ist durch 3,664 zu teilen (verwendet und angepasst mit Genehmigung des Global Carbon Project unter der Creative Commons Attribution 4.0 International Lizenz).



von Wäldern dem land- und forstwirtschaftlichen Bereich zugerechnet werden, wenn der Wald als bewirtschaftet gilt. Die in klimapolitischen Verhandlungen verwendeten Landnutzungsemissionen sind damit im globalen Schnitt kleiner (bzw. CO<sub>2</sub>-Aufnahmen im land- und forstwirtschaftlichen Bereich größer) als die naturwissenschaftliche Definition des anthropogenen Budgets dies angibt (GRASSI et al. 2018).

Neben den CO<sub>2</sub>-Flüssen aus Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft sind auch die landwirtschaftlichen Emissionen von Lachgas und Methan dem Landnutzungssektor zuzurechnen. Emissionen etwa aus dem Betrieb landwirtschaftlicher Maschinen hingegen werden anderen Sektoren (z.B. Transport) zugerechnet (LAMB et al. 2021).

## Wie groß sind die Emissionen aus Landnutzung?

### Aktuelle Trends der Emissionen durch Landnutzung

Trotz stetig wachsender Weltbevölkerung sowie veränderter Ernährungsgewohnheiten blieben die Treibhausgasemissionen aus Landnutzung und -management während der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts weitgehend konstant (Abb. 4.4-4 & -5). Die Emissionen der drei wichtigsten Treibhausgase CO<sub>2</sub>, Methan (CH<sub>4</sub>) und Distickstoffdioxid (N<sub>2</sub>O) summierten sich in dieser Zeit auf jährlich ~11 Gt CO<sub>2</sub>-Äquivalente (nicht-CO<sub>2</sub>-Treibhausgase können in »CO<sub>2</sub>-Äquivalente« umgerechnet miteinander und mit CO<sub>2</sub> verglichen werden, hier unter Annahme eines 100-jährigen Potenzials zur Erwärmung der bodennahen Luftschichten relativ zu CO<sub>2</sub> mit Faktor 34 für CH<sub>4</sub> und 298 für N<sub>2</sub>O wie im IPCC 5. Sachstandsbericht angenommen; HONG et al. 2021). Ein wesentlicher Faktor für die Konstanz in den Emissionen ist die fortwährende Intensivierung der Landwirtschaft (s. Kap. 1.3 & 6.7), die durch eine effizientere Produktion sowie erhöhte Pro-Kopf-Produktivität weniger Land pro Einheit landwirtschaftlicher Produkte nötig macht (um 70% reduziert von 1961 bis 2017; HONG et al. 2021). Auch wenn weiterhin (kohlenstoffreiche) Waldflächen für Acker- und Weideland gerodet wurden (s. Kap. 4.1), nahm der Anteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Landnutzungsveränderungen bis 2001 ab, während der Anteil der Emissionen aus Landwirtschaft (CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O) von ~32% auf ~45% anwuchs (Abb. 4.4-5c) (HONG et al. 2021). Dieser Trend drehte sich im Jahr 2001. Seitdem steigen die Landnutzungsemissionen wieder deutlich an, um ~2,4 Gt CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahrzehnt (HONG et al. 2021). Ursächlich sind zunehmende Rodungsaktivitäten, überwiegend für die Produktion von Getreide

und vermehrt Ölpflanzen, besonders in oftmals unberührten, kohlenstoffreichen tropischen Wäldern in Lateinamerika, Südostasien und Subsahara-Afrika (Abb. 4.4-5a, b; s. Kap. 1.3) (HONG et al. 2021).

### Wichtigste Landnutzungsformen und Produktgruppen

Allein die Landnutzungsveränderungen hin zu Ackerland (besonders zu Anbau in industriellem Maßstab) sowie die enterische Fermentation (s. Kap. 1.3) verursachen ~95% der globalen Netto-Emissionen aus Landnutzung von 1961 bis 2017 (HONG et al. 2021). Die größten Produktgruppen Getreide und Rindfleisch repräsentieren ~71% der globalen Netto-Emissionen aus Landnutzung von 1961-2017 (vgl. Abb. 4.4-5b) (HONG et al. 2021). Der starke Anstieg in den Emissionen durch Landnutzungsveränderungen ab dem Jahre 2001 resultiert überwiegend aus der verstärkten Umwandlung von Wald zu Ackerland, besonders für die Produktgruppe der Ölpflanzen — deren Anteil an den globalen Netto-Emissionen stetig zunahm und heute etwa dem von Rindfleisch entspricht (vgl. Abb. 4.4-5b) (HONG et al. 2021). Bemerkenswert ist das große Missverhältnis von landwirtschaftlicher Produktivität zu assoziierten Emissionen für Rindfleisch und andere Sorten von rotem Fleisch, welche nur ein Prozent der weltweiten Kalorien zur Verfügung stellen und zugleich ~25% aller Landnutzungsemissionen verursachen (HONG et al. 2021). Auch veränderte Ernährungsgewohnheiten sind deshalb ein wichtiger Aspekt bei Anstrengungen zur Reduktion der Netto-Emissionen im Landnutzungssektor, die neben Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Entnahme (s. Kap. 7.11) zum Einsatz kommen können.

### CO<sub>2</sub>

Den überwiegenden Anteil der durch Landnutzung verursachten Treibhausgasemissionen stellt das Gas CO<sub>2</sub>, welches vor allem aus Entwaldung für landwirtschaftliche Nutzung, Ernte von Holz, Entwässerung von Feuchtgebieten und Biomassenverbrennung resultiert (s. Kap. 1.3 und 4.1 sowie Abschnitt 2 oben). Die Landnutzungsemissionen machten etwa 19% der gesamten menschengemachten CO<sub>2</sub>-Emissionen von 1959 bis 2019 aus (FRIEDLINGSTEIN et al. 2020). Wie oben dargestellt, hat in den vergangenen Jahrzehnten besonders die Entwaldung in tropischen Regionen zugenommen, vor allem für den Anbau von Getreide oder Ölpflanzen. So führten besonders hohe Entwaldungsraten in Brasilien (SILVA JUNIOR et al. 2021) und sehr hohe Feuerraten in Indonesien 2019 zu erhöhten Landnutzungsemissionen von 7 (4-9) Gt CO<sub>2</sub> (FRIEDLINGSTEIN et al. 2020). Dagegen stehen Landnutzungs- und Landbedeckungsänderungen wie (Wieder-)Aufforstung und Rückgewinnung von aufgegebenen landwirtschaftlichen Flächen.

So haben beispielsweise großflächige Aufforstungsprogramme sowie Programme zum Schutz von Wäldern in China maßgeblich zu einer »Begrünung« (»greening«) der Landoberfläche geführt (CHEN et al. 2019). Solche Maßnahmen können zu einer vermehrten Speicherung von CO<sub>2</sub> in der Vegetation führen und somit die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration reduzieren (mit einem großen Potenzial den Klimawandel abzumildern; s. Kap. 7.11). Die Stärke dieses CO<sub>2</sub>-Speicherpotentials hängt allerdings stark von weiteren Einflüssen ab (beispielsweise senken Dürren und Hitzeperioden in der Regel die Biomassenproduktivität, wohingegen höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen stimulierend wirken können), gleichzeitig muss das Potenzial solcher Maßnahmen zur Klimawandelmitigation auch die biogeophysikalischen Effekte berücksichtigen (s. Kap. 4.1 & 7.11).

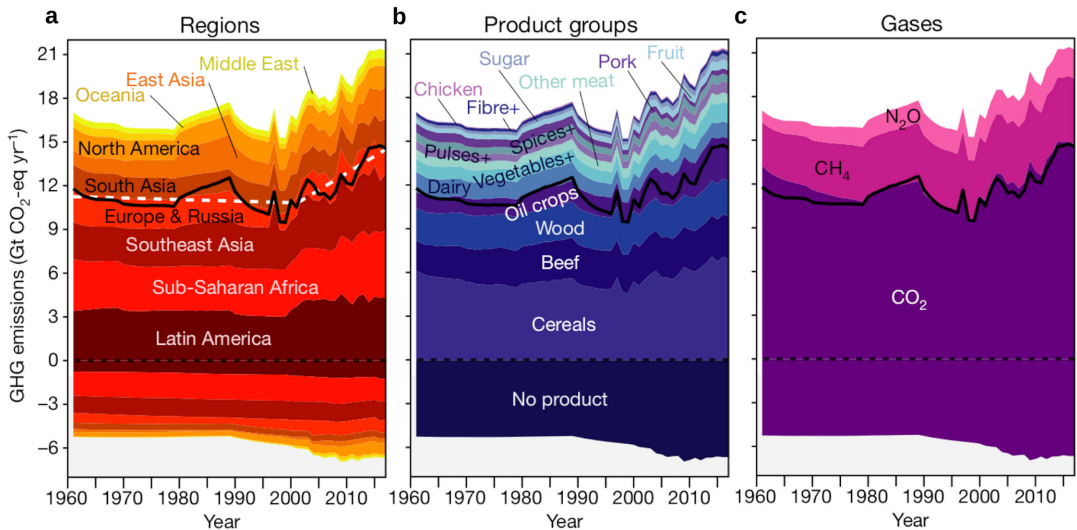
### CH<sub>4</sub>

Die CH<sub>4</sub>-Emissionen aus Land- und Abfallwirtschaft (ohne die Flüsse aus bewirtschafteten Feuchtgebieten, Gewässern und schmelzendem Permafrost) stiegen in den vergangenen Jahrzehnten an und stellen ~56% aller menschlichen CH<sub>4</sub>-Emissionen im Zeitraum 2008-2017 (SAUNOIS et al. 2020). Hierbei ist der mit Abstand größte Verursacher die Viehzucht (~66%; JIA et al. 2019; s. Kap. 1.3 & 4.1), besonders von Rindern in intensiven Landwirtschaftssystemen der wohlhabenden Länder und Schwellenländern, mit jährlich ~111 Tg CH<sub>4</sub> Emissionen (~3,7 Gt CO<sub>2</sub>-Äquivalente; SAUNOIS et al. 2020). Mit deutlich geringeren Emissionen folgt der

Reisanbau mit jährlich ~30 Tg CH<sub>4</sub> (~1 Gt CO<sub>2</sub>-Äquivalente), überwiegend resultierend aus periodischen Flutungen von Reisfeldern sowie Düngemiteleinsetz in Asien (SAUNOIS et al. 2020; s. Kap. 1.3 & 4.1). Seit den 1970er Jahren gingen die CH<sub>4</sub>-Emissionen durch Reisanbau in Asien infolge von Änderungen in den Anbauflächen und Management zurück (JANSSENS-MAENHOUT et al. 2019; SAUNOIS et al. 2020). Die Verbrennung von landwirtschaftlichen Rückständen auf dem Feld ist nur eine geringfügige Quelle von CH<sub>4</sub> (SAUNOIS et al. 2020).

### N<sub>2</sub>O

Vom Menschen verursachte N<sub>2</sub>O-Emissionen stammen zu etwa zwei Dritteln aus der Landwirtschaft (JANSSENS-MAENHOUT et al. 2019) und haben in den vergangenen vier Jahrzehnten global um ~30%, auf jährlich ~7,3 Tg N im Mittel von 2007-2016, zugenommen (siehe auch Kap. 1.3 & 4.1) (TIAN et al. 2020). Dies beruhte überwiegend auf einer intensivierten, nicht nachhaltigen Düngemittelanwendung sowie zunehmenden Exkrementen in der Viehzucht. Allein die Emissionen auf Weideland, die etwa die Hälfte der landwirtschaftlichen N<sub>2</sub>O-Emissionen ausmachen, sind seit 1960 um ~80% gestiegen (DANGAL et al. 2019). Die Zunahme war besonders ausgeprägt in den Schwellenländern Brasilien, China und Indien und beschleunigt sich seit 2009 (THOMPSON et al. 2019). Eine weitere Flächenausdehnung und Intensivierung der Landwirtschaft ohne eine verbesserte Düngemittelanwendung (s. Kap. 4.1) wird die N<sub>2</sub>O-Emissionen in Zukunft weiter erhöhen.



**Abb. 4.4-5:** Emissionen durch Landnutzung von 1961 bis 2017 (in Treibhausgaspotenzialen) angegeben für (a) Weltregionen, (b) Produktgruppen und (c) emittiertem Treibhausgas (verändert nach HONG et al. 2021). Negative Emissionen entstehen durch Regenerierung natürlicher Vegetation nach Aufgabe landwirtschaftlicher Flächen. Die dicke schwarze Linie zeigt die Netto-Emissionen.

### Bedeutung von Landnutzungsemissionen in Zukunft

Aktuell machen die Emissionen aus Landnutzung nur etwa 25% der jährlichen, anthropogen verursachten Treibhausgasemissionen aus (s. *Abb. 4.4-4*; HONG et al. 2021). Allerdings werden die Landnutzungsemissionen in Zukunft wieder eine deutlich größere Rolle spielen, sofern die Ziele des Paris-Abkommens eingehalten werden sollen (<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>). Auf der einen Seite, da der fast vollständigen Reduktion der Emissionen aus Landnutzung schwer vermeidbare Landnutzungsemissionen entgegenstehen, beispielsweise Düngemittelsatz und Nassreisanaubau, welche unvermeidlich mit N<sub>2</sub>O- und CH<sub>4</sub>-Emissionen einhergehen. Auf der anderen Seite, da generell die Notwendigkeit besteht, mittels Landnutzungsveränderungen Kohlenstoff zu binden, zum Beispiel durch Aufforstung und schnell wachsende Biomassenplantagen, um negative Emissionen zu erzeugen (s. Kap. 4.1, 7.1, 7.3, 7.9 & 7.11), denn die meisten Szenarien, die mit den Zielen des Paris-Abkommens vereinbar sind, rechnen mit großskaligen negativen Landnutzungsemissionen (POPP et al. 2018).

### Literatur

BRIGHT, R., E. DAVIN, T. O'HALLORAN, J. PONGRATZ et al. (2017): Local temperature response to land cover and management change driven by non-radiative processes. *Nature Climate Change* 7.

CHEN, C., T. PARK, X. WANG, S. PIAO et al. (2019): China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability* 2.

DANGAL, S.R.S., H. TIAN, R. XU, J. CHANG et al. (2019): Global Nitrous Oxide Emissions from Pasturelands and Rangelands: Magnitude, Spatiotemporal Patterns, and Attribution. *Global Biogeochemical Cycles* 33.

ERB, K.H., T. KASTNER, C. PLUTZAR, A.L. BAIS-MOLEMAN et al. (2018): Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. *Nature* 553.

FRIEDLINGSTEIN, P., M. O'SULLIVAN, M. W. JONES, R. M. ANDREW et al. (2020): Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data* 12.

GRASSI, G., J. HOUSE, W. A. KURZ, A. CESCATTI et al. (2018): Reconciling global-model estimates and country reporting of anthropogenic forest CO<sub>2</sub> sinks. *Nature Climate Change* 8.

HONG, C., J. A. BURNEY, J. PONGRATZ, J. E. M. S. NABEL et al. (2021): Global and regional drivers of land-use emissions in 1961-2017. *Nature* 589.

IPCC (2021): Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [MASSON-DELMOTTE, V., P. ZHAI, A. PIRANI, S. L. CONNORS et al. (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

JANSSENS-MAENHOUT G., M. CRIPPA, D. GUIZZARDI, M. MUNTEAN et al. (2019): EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the three major greenhouse gas emissions for the period 1970–2012. *Earth System Science Data* 11.

JIA, G., E. SHEVLIJKOVA, P. ARTAXO, N. DE NOBLET-DUCOUDRÉ et al. (2019): Land–climate interactions. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*, 2.3.

LAMB, W., T. WIEDMANN, J. PONGRATZ, R. ANDREW et al. (2021): A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018. *Environmental Research Letters* 16.

LUYSSAERT, S., M. JAMMET, P. C. STOY, S. ESTEL et al. (2014): Land management and land-cover change have impacts of similar magnitude on surface temperature. *Nature Climate Change* 4.

MATRICARDI, E. A. T., D. L. SKOLE, O. D. COSTA, M. A. PEDLOWSKI et al. (2020): Long-term forest degradation surpasses deforestation in the Brazilian Amazon. *Science* 11.

PONGRATZ, J., C. H. REICK, R. A. HOUGHTON & J. I. HOUSE (2014): Terminology as a key uncertainty in net land use and land cover change carbon flux estimates. *Earth System Dynamics* 5.

POPP, A., K. CALVIN, S. FUJIMORI, P. HAVELI et al. (2018): Land-use futures in the shared socio-economic pathway. *Global Environmental Change* 42.

QIN, Y., X. XIAO, J. P. WIGNERON, P. CIAIS et al. (2021): Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon. *Nature Climate Change* 11.

ROE, S., C. STRECK, M. OBERSTEINER, S. FRANK et al. (2019): Contribution of the land sector to a 1.5°C world. *Nature Climate Change* 9.

SAUNOIS, M., A. R. STAVERT, B. POULTER, P. BOUSQUET et al. (2020): The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth System Science Data* 12.

SILVA JUNIOR, C. H. L., A. C. M. PESSÔA, N. S. CARVALHO, J. B. C. REIS et al. (2021): The Brazilian Amazon deforestation rate in 2020 is the greatest of the decade. *Nature Ecology and Evolution* 5.

THOMPSON, R. L., L. LASSALETTA, P. K. PATRA, C. WILSON et al. (2019): Acceleration of global N<sub>2</sub>O emissions seen from two decades of atmospheric inversion. *Nature Climate Change* 9.

TIAN, H., R. XU, J. G. CANADELL, R. L. THOMPSON et al. (2020): A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature* 586.

### Kontakt:

Prof. Dr. Julia Pongratz  
 Dr. Wolfgang Obermeier  
 Ludwig-Maximilians-Universität München  
 Dr. Julia E. M. S. Nabel  
 Max-Planck-Institut für Meteorologie  
[julia.pongratz@geographie.uni-muenchen.de](mailto:julia.pongratz@geographie.uni-muenchen.de)

PONGRATZ, J., J. E. M. S. NABEL & W. OBERMEIER (2021): Treibhausgasereffekte von Landnutzung. In: LOZÁN J. L., S.-W. BRECKLE, H. GRAßL & D. KASANG (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung*. S. 190-196. *Wissenschaftliche Auswertungen in Kooperation mit GEO, Hamburg*. [www.warnsignal-klima.de](http://www.warnsignal-klima.de). DOI:10.25592/warnsignal.klima.boden-landnutzung.26