



WBGU

WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG
GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN

materialien

**Tim Beringer, Wolfgang Lucht:
Simulation nachhaltiger Bioenergiepotentiale**

**Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten
"Welt im Wandel: Zukunftsfähige Bioenergie und
nachhaltige Landnutzung"**

Berlin 2008

Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten
"Welt im Wandel: Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung"
Berlin: WBGU
ISBN 978-3-9396191-21-9
Verfügbar als Volltext im Internet unter http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008.html

Autoren: Tim Beringer, Wolfgang Lucht
Titel: Simulation nachhaltiger Bioenergiepotentiale
Potsdam, Berlin 2008
Veröffentlicht als Volltext im Internet unter http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008_ex01.pdf

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
Geschäftsstelle
Reichpietschufer 60–62, 8. OG.
10785 Berlin

Telefon	(030) 263948 0
Fax	(030) 263948 50
E-Mail	wbgu@wbgu.de
Internet	http://www.wbgu.de

Alle WBGU-Gutachten können von der Internetwebsite <http://www.wbgu.de> in deutscher und englischer Sprache herunter geladen werden.

„Simulation nachhaltiger Biomassepotentiale“

Externe Expertise zum WBGU Hauptgutachten

„Bioenergie und nachhaltige Landnutzung“

Autoren:
Tim Beringer
Wolfgang Lucht

Climate & Environment
Consulting Potsdam
GmbH

2008

Kontakt:
tim.beringer@pik-potsdam.de

Inhalt

Einführung.....	2
Das dynamische globale Vegetationsmodell LPJmL.....	2
Landverfügbarkeit.....	4
Szenarien.....	4
Allgemeingültige Regeln.....	5
Literaturverzeichnis.....	6
Anhang.....	7

Einführung

Ziel dieser Expertise ist eine globalskalige Abschätzung nachhaltig verfügbarer Biomassepotentiale für das Jahr 2050. Grundlage der Simulationen ist ein dynamisches Vegetationsmodell, welches Erträge spezieller Biomasseplantagen mit schnell wachsenden Bäumen und Gräsern unter verschiedenen Klimaszenarien berechnet. Unter der Vorgabe einer nachhaltigen Landnutzung wurden vier Szenarien der zukünftigen Landnutzung definiert, die unterschiedliche Vorgaben für Nahrungsmittelsicherheit, Natur- und Klimaschutz integrieren. Diese Faktoren sind entscheidend für die Menge an Land, die für den Biomasseanbau zur Verfügung steht und damit auch für die zu erwartenden Bioenergiepotentiale.

Das dynamische globale Vegetationsmodell LPJmL

Grundlage der vorliegenden Simulationen des globalen Biomassepotentials bildet das dynamische globale Vegetationsmodell LPJmL, welches maßgeblich am Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK) entwickelt und betrieben wird. Es gehört zu den weltweit führenden Modellen dieser Art (Bondeau et al. 2007; D Gerten et al. 2004; S. Sitch et al. 2003). Auf der Basis von prozessorientierten Darstellungen der wichtigsten biogeochemischen, biophysikalischen und biogeographischen Mechanismen ist LPJmL in der Lage die großräumige Verteilung der unterschiedlichen Vegetationstypen zu simulieren. Daraus ergeben sich eine Reihe von Parametern, wie die pflanzliche Produktivität sowie der Austausch von Kohlenstoff und Wasser zwischen Pflanzen, Böden und Atmosphäre.

Die aktuelle Version des Modells bildet sowohl natürliche, als auch menschlich überprägte und genutzte Ökosysteme ab, um den aktuellen Zustand und die mögliche zukünftige Entwicklung der irdischen Landoberfläche erfassen zu können (Bondeau et al. 2007). Dabei wird die natürliche pflanzliche Artenvielfalt in 9 sogenannte pflanzenfunktionale Typen (PFTs) zusammengefasst, die sich in Wuchsform, Phänologie und bioklimatischer Limitierung ähneln. Dementsprechend sind auch die landwirtschaftlichen Nutzpflanzen in Form von 13 sogenannten „crop functional types“ (CFTs) in dem Modell implementiert. Angetrieben wird das Modell mit monatlichen Daten von Temperatur, Niederschlag, Bewölkung und atmosphärischem CO₂, deren räumliche Auflösung auch die Auflösung der Simulationen bestimmt (Haxeltine & Prentice 1996; S. Sitch et al. 2003).

LPJmL wurde sehr umfangreich validiert mit unterschiedlichen Beobachtungsdaten, u.a. der Nettoprimärproduktion (Cramer et al. 1999), Vegetationsaktivität (W. Lucht et al. 2002), atmosphärischer CO₂ Variabilität (Bondeau et al. 2007; Cramer et al. 2004; Erbrecht & W. Lucht 2006; Peylin et al. 2005; S. Sitch et al. 2003), Abfluss und Bodenfeuchte (Wagner et al. 2003).

Für die Darstellung des modernen Biomasseanbaus mit Zellulosepflanzen wurde LPJmL für diese Studie um einen hochproduktiven Grastyp (wie z.B. Miscanthus) und zwei schnell wachsende Baumtypen, einen tropischen und einen außertropischen (wie z.B. Pappel und Eucalyptus), erweitert. Für die Baumtypen wird der Anbau in Kurzumtriebsplantagen mit einer Rotationszeit von 8 Jahren angenommen (Lemus & Lal 2005).

Im Unterschied zu den meisten landwirtschaftlichen Nutzpflanzen mit C4 Photosynthesemechanismus, wie Mais oder Zuckerrohr, sind die für den Biomasseanbau genutzten Grasarten in der Lage, auch bei niedrigeren Umgebungstemperaturen eine hohe Photosyntheseleistung aufrechtzuerhalten (Naidu et al. 2003; Naidu & Long 2004). In den Simulationen werden Gräser jährlich nach dem Ende der Vegetationsperiode abgeerntet.

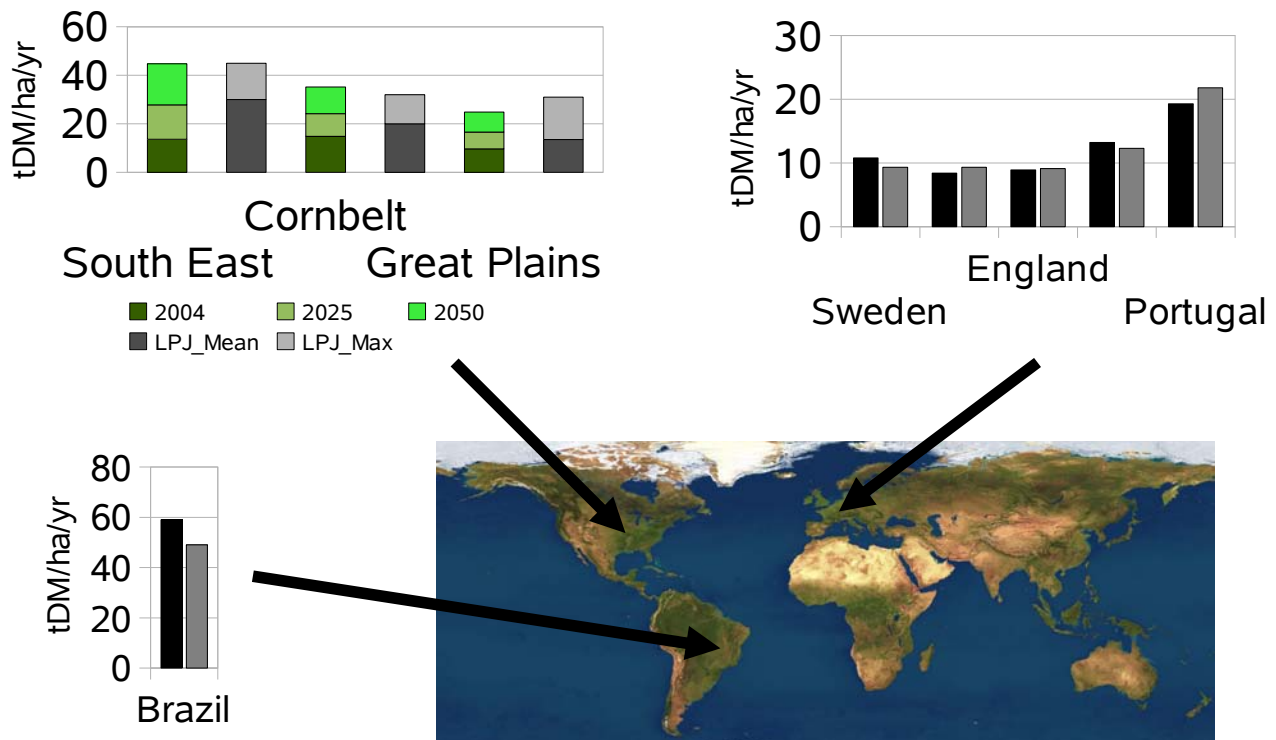


Abbildung 1: Vergleich von beobachteter bzw. vorhergesagter und simulierten Biomasseerträgen in verschiedenen Weltregionen. Die Modellergebnisse sind in den Balkendiagrammen grau dargestellt.

Alle Flächen für den Biomasseanbau können bei ausreichender Wasserverfügbarkeit auch bewässert werden. Effiziente Bewässerungstechnologien gehören zu effektivsten verfügbaren Methoden, um die Produktivität der Biomassepflanzen insbesondere in solchen Gebieten signifikant zu erhöhen, wo innerhalb der Vegetationsperiode nicht genügend Niederschlag

fällt. Bewässerung birgt aber auch verschiedene Risiken für Böden und Wasserspeicher, wie z.B. Versalzung, Nährstoffverluste und Grundwasserabsenkung (Gerbens-Leenes, Hoekstra & Van der Meer 2008). Um der Vorgabe einer ökologisch nachhaltigen Landnutzung gerecht zu werden, darf in der vorliegenden Studie nur erneuerbares Wasser aus Niederschlägen für die Bewässerung verwendet werden. Fossiles Grundwasser oder Wasserressourcen aus großräumigen Flussumleitungen werden nicht genutzt. Die Verfügbarkeit von sogenanntem blauen Wasser in Flüssen und Seen wird jeweils für ein gesamtes Einzugsgebiet bestimmt. LPJmL verwendet dafür ein Flussnetzmodell (Rost et al. 2008). Der Bedarf der Landwirtschaft für die Nahrungsmittelproduktion sowie die Versorgung der natürlichen Ökosysteme haben Priorität (Smakhtin, Revenga & Döll 2004) vor den Biomasseplantagen.

Für die Abschätzung der globalen Biomassepotentiale im Jahr 2050 wurde LPJmL mit insgesamt 15 Klimaszenarien von 5 aktuellen Klimamodellen (ECHAM5, HadCM3, CM2.1, ECHO-G, CCSM3.0) und 3 Emissionsszenarien (A1B, A2, B1) angetrieben, die alle für den 4. Sachstandsbericht des IPCC (2007) berechnet wurden.

Landverfügbarkeit

Neben den zu erwartenden Ertragssteigerungen durch Zucht und Agrartechnologien wird hauptsächlich die Verfügbarkeit von Land für den gezielten Anbau von Biomasse entscheidend sein für das globale Bioenergiepotential in den kommenden Jahrzehnten. Im Hinblick auf eine nachhaltige Landnutzung sind zunehmende Flächenkonkurrenzen vor allem durch eine expandierende Landwirtschaft für die Nahrungsmittelsproduktion, einen mehr oder weniger intensiven Schutz von Biodiversität und unberührten Ökosystemen sowie einen ambitionierten Klimaschutz zu erwarten.

Vor diesem Hintergrund wurden in enger Diskussion mit dem WBGU insgesamt vier Szenarien definiert, die unterschiedliche Annahmen über die zukünftige Entwicklung der globalen Landnutzung integrieren und die sich aus jeweils zwei Varianten der Faktoren Landwirtschaft und Naturschutz ergeben.

Alle Szenarien wurden sowohl mit als auch ohne Bewässerung gerechnet.

Szenarien

Für die Ausweisung von Flächen mit großem ökologischen Wert wurden verschiedene räumliche Datensätze kombiniert, die Gebiete hoher Biodiversität (Biodiversity Hotspots, Endemic Bird Areas, Centers of Plant Diversity, Global 2000) oder das Vorkommen einzigartiger Ökosysteme zeigen (High-Biodiversity Wilderness Areas, Frontier Forests, Last of the Wild). Dabei wurde eine hohe räumliche Übereinstimmung der verschiedenen Datensätze als Indikator dafür verwendet, wie schützenswert ein bestimmtes Gebiet ist. Tabelle 1 zeigt den Anteil geschützter Flächen innerhalb einer Gitterzelle in Abhängigkeit der räumlichen Übereinstimmung.

Szenario	Räumliche Übereinstimmung der Datensätze Ökosysteme				Biodiversität			
	1	2	3	0	1	2	3	4
B1	100%	100%	100%	10%	20%	30%	50%	80%
B2	0%	100%	100%	0%	0%	0%	50%	100%

Tabelle 1: Anteil geschützter Flächen für den Schutz von Biodiversität und Natur in den Szenarien.

Eine genaue Beschreibung der verschiedenen Datensätze ist im Hauptgutachten zu finden.

Um die möglichen Entwicklungspfade der Landwirtschaft für die Nahrungsmittelproduktion zu berücksichtigen wurden ebenfalls zwei

Im ersten Fall (E1) wird entsprechend einem Szenario der FAO (2003) davon ausgegangen, dass die landwirtschaftliche Fläche bis zur Mitte dieses Jahrhunderts um 120 Mha expandiert. Im zweiten Fall (E2) wird unter der Annahme von andauerndem, großem technischen Fortschritt im Agrarsektor davon ausgegangen, dass der Nahrungsmittelbedarf allein durch eine Intensivierung der bestehenden Flächen gedeckt werden kann.

Die Kombination der Varianten für Ernährung und Naturschutz in den vier Szenarien zeigt Tabelle 2.

Szenario	Landwirtschaft	Naturschutz
1	Expansion (E1)	Umfangreiche Schutzmassnahmen (B1)
2	Expansion (E1)	Mittlere Schutzmassnahmen (B2)
3	Nur Intensivierung (E2)	Umfangreiche Schutzmassnahmen (B1)
4	Nur Intensivierung (E2)	Mittlere Schutzmassnahmen (B2)

Tabelle 2: Zusammensetzung der vier Szenarien.

Allgemeingültige Regeln

In allen Szenarien sind bestimmte Flächen ganz von jeglicher menschlichen Nutzung in der Zukunft ausgenommen:

- höchst degradierte Flächen (GLASOD Kategorie IV), auf Flächen mit starken Degradationserscheinungen (GLASOD Kategorie III) wird angenommen, dass nur 30% des maximal erreichbaren Ertrages erzielt werden
- Feuchtgebiete als wichtige Habitate und Kohlenstoffspeicher
- Ökosysteme mit einer großen Menge an gespeichertem Kohlenstoff in der Vegetation und den Böden,
- Ökosysteme in denen der Verlust von Kohlenstoff aus Vegetation und Böden in Folge eines Landnutzungswandels nicht innerhalb von 10 Jahren durch die abgeerntete Biomasse kompensiert werden kann („Kohlenstoffschuld“, siehe z.B. Searchinger et al. (2008))

Literaturverzeichnis

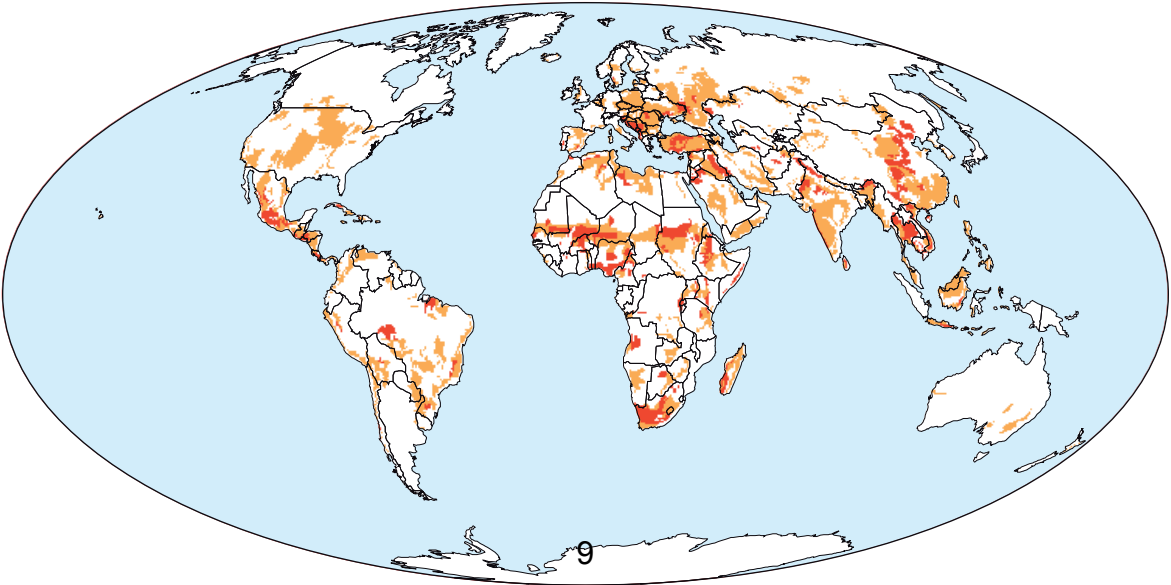
- Bondeau, A. et al., 2007. Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. *Global Change Biology*, 13, 1-28.
- Bruinsma, J. ed., 2003. *World Agriculture: Towards 2015/30, an FAO Perspective*, London: Earthscan and Rome: FAO.
- Cramer, W. et al., 2004. Tropical forests and the global carbon cycle: impacts of atmospheric carbon dioxide, climate change and rate of deforestation. *Philosophical Transactions of the Royal Society London B*, 359, 331-343.
- Cramer, W. et al., 1999. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. *Global Change Biology*, 5, 1-15.
- Erbrecht, T. & Lucht, W., 2006. Impacts of large-scale climatic disturbances on the terrestrial carbon cycle. *Carbon Balance and Management*, 1, 1-7.
- Gerbens-Leenes, P., Hoekstra, A. & Van der Meer, T., 2008. *Water Footprint of Bio-Energy and other Primary Energy Carriers*, Delft, Netherlands: UNESCO-IHE Institute for Water Education.
- Gerten, D. et al., 2004. Terrestrial vegetation and water balance - hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model. *Journal of Hydrology*, 286, 249-270.
- Haxeltine, A. & Prentice, I.C., 1996. BIOME3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types. *Global Biogeochemical Cycles*, 10(4), 693-709.
- Lemus, R. & Lal, R., 2005. Bioenergy Crops and Carbon Sequestration. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24, 1-21.
- Lucht, W. et al., 2002. Climate Control of the High-Latitude Vegetation Greening Trend and Pinatubo Effect. *Science*, 296, 1687-1689.
- Naidu, S.L. & Long, S.P., 2004. Potential mechanisms of low-temperature tolerance of C4 photosynthesis in *Miscanthus x giganteus*: an in vivo analysis. *Planta*, 220, 145-155.

- Naidu, S.L. et al., 2003. Cold Tolerance of C4 photosynthesis in *Miscanthus x giganteus*: Adaptation in Amounts and Sequence of C4 Photosynthetic Enzymes. *Plant Physiology*, 132, 1688-1697.
- Peylin, P. et al., 2005. Multiple constraints on regional CO_2 flux variations over land and oceans. *Global Biogeochemical Cycles*, 19, B1011.
- Rost, S. et al., 2008. Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system. , 44, W09405.
- Searchinger, T. et al., 2008. Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change. *Science*, 319, 1238-1240.
- Sitch, S. et al., 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 9, 161-185.
- Smakhtin, V., Revenga, C. & Döll, P., 2004. A Pilot Global Assessment of Environmental Water Requirements and Scarcity. *Water International*, 29(3), 307-317.
- Wagner, W. et al., 2003. Evaluation of the agreement between the first global remotely sensed soil moisture data with model and precipitation data. *Journal of Geophysical Research*, 108, 1-10.

Anhang

- Verteilung degradierteter Flächen nach GLASOD (A1)
- Szenario E2: Aktuelle Verteilung landwirtschaftlicher Flächen (A2)
- Szenario E1: Zusätzlich für die Nahrungsmittelproduktion genutzte Flächen, insgesamt 120 Mha (A3)
- Aktuelle Schutzgebiete (A4)
- Szenario B1: Zum Schutz von Biodiversität und Natur nicht für die Biomasseproduktion nutzbare Flächen (A5)
- Szenario B2: Zum Schutz von Biodiversität und Natur nicht für die Biomasseproduktion nutzbare Flächen (A6)
- Globale Verteilung von Feuchtgebieten (A7)

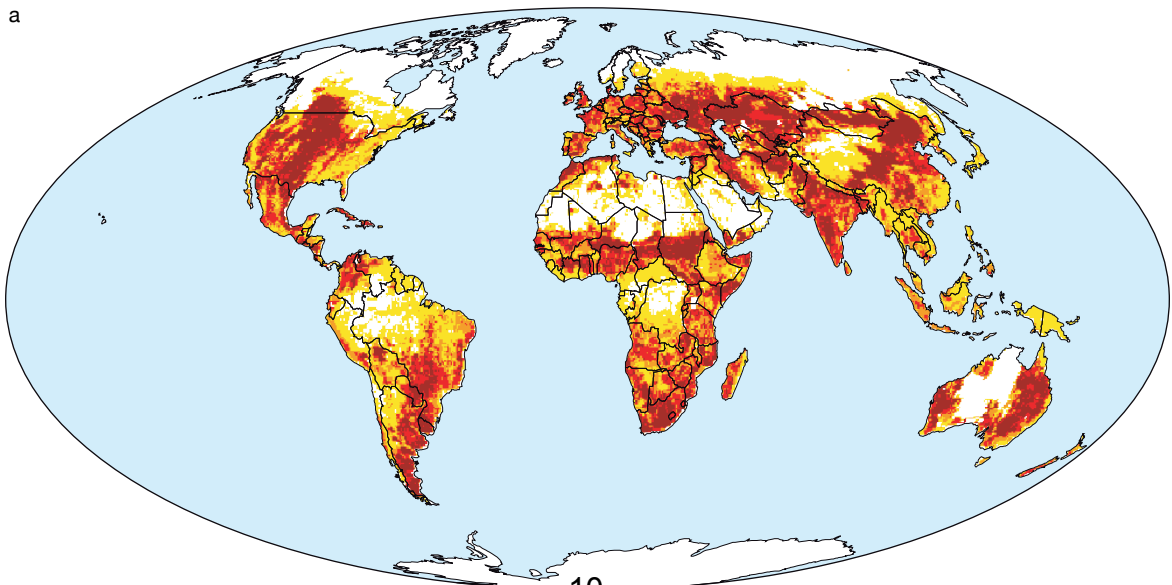
- Flächen, die aufgrund ungünstiger Kohlenstoffbilanzen nicht für den Biomasseanbau genutzt werden sollten, Kompensationszeitraum 5 Jahre (A8)
- Flächen, die aufgrund ungünstiger Kohlenstoffbilanzen nicht für den Biomasseanbau genutzt werden sollten, Kompensationszeitraum 10 Jahre (A9)
- Szenario 1: Bioenergiepotentiale auf den verfügbaren Anbauflächen, ohne Bewässerung (A10)
- Szenario 1: Bioenergiepotentiale auf den verfügbaren Anbauflächen, mit Bewässerung (A11)
- Szenario 2: Bioenergiepotentiale auf den verfügbaren Anbauflächen, ohne Bewässerung (A12)
- Szenario 2: Bioenergiepotentiale auf den verfügbaren Anbauflächen, mit Bewässerung (A13)
- Szenario 3: Bioenergiepotentiale auf den verfügbaren Anbauflächen, ohne Bewässerung (A14)
- Szenario 3: Bioenergiepotentiale auf den verfügbaren Anbauflächen, mit Bewässerung (A15)
- Szenario 4: Bioenergiepotentiale auf den verfügbaren Anbauflächen, ohne Bewässerung (A16)
- Szenario 4: Bioenergiepotentiale auf den verfügbaren Anbauflächen, mit Bewässerung (A17)
- Simulierte Biomasseerträge der Gräser, Szenario 1, ohne Bewässerung (A18)
- Simulierte Biomasseerträge der Gräser, Szenario 1, mit Bewässerung (A19)
- Simulierte Biomasseerträge der Bäume, Szenario 1, ohne Bewässerung (A20)
- Simulierte Biomasseerträge der Bäume, Szenario 1, mit Bewässerung (A21)
- Simulierte Biomasseerträge der Gräser, Szenario 4, ohne Bewässerung (A22)
- Simulierte Biomasseerträge der Gräser, Szenario 4, mit Bewässerung (A23)
- Simulierte Biomasseerträge der Bäume, Szenario 4, ohne Bewässerung (A24)
- Simulierte Biomasseerträge der Bäume, Szenario 4, mit Bewässerung (A25)



GLASOD Kategorien

■ Kategorie 3 ■ Kategorie 4

a

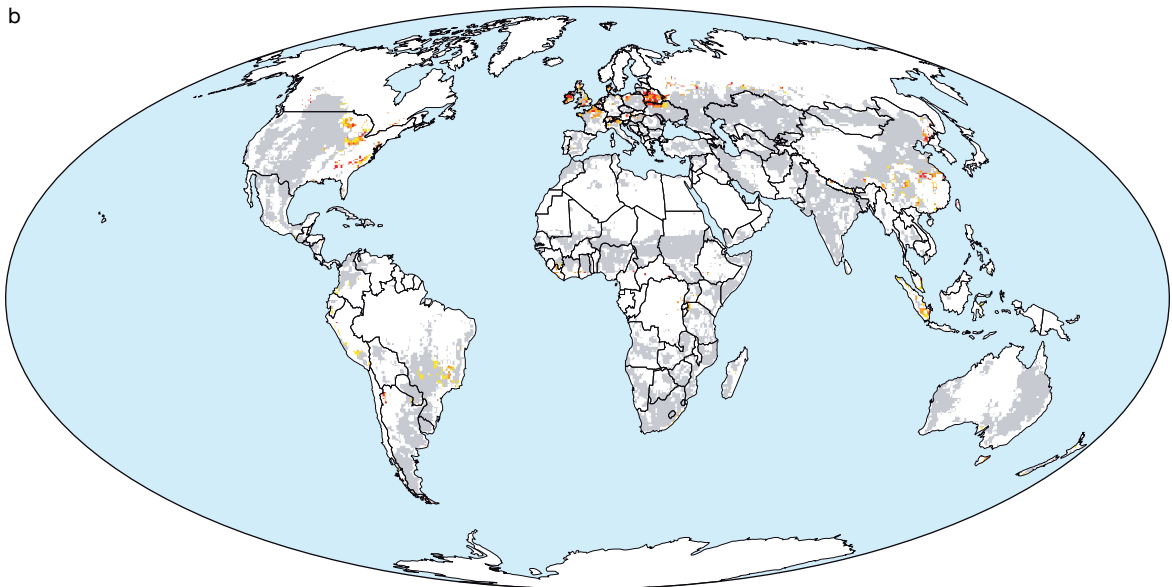


10

Landwirtschaftliche Flächen



0 25 50 75 100 Anteil in Gitterzelle [%]



Zusätzliche landwirtschaftliche Flächen in Szenario A (120 ¹¹Mib. ha)

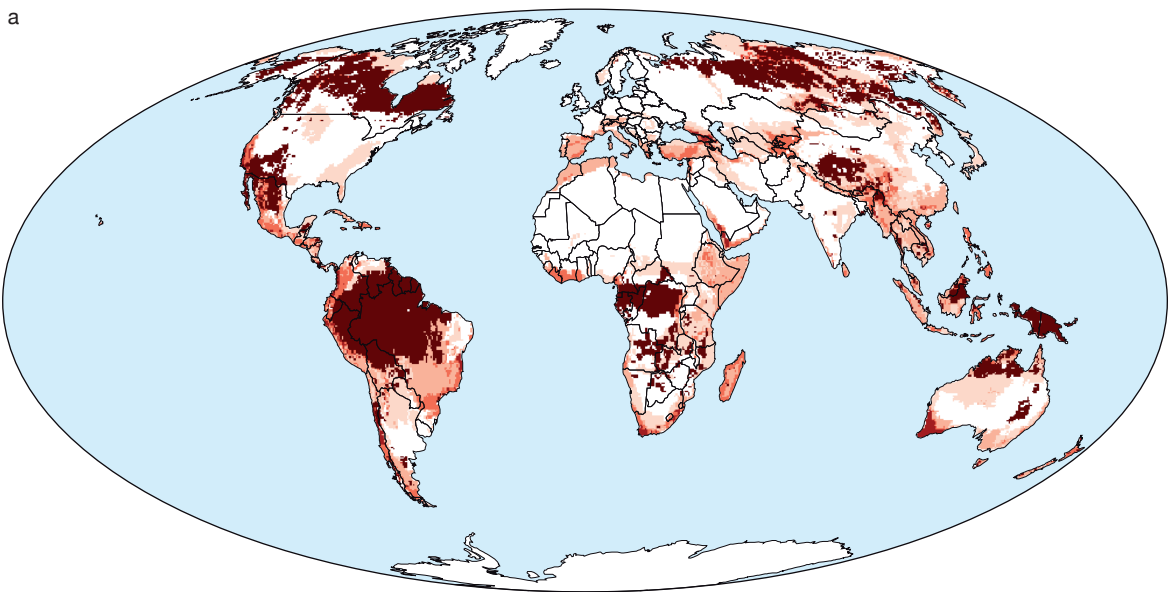


0 25 50 75 100 Anteil in Gitterzelle [%]



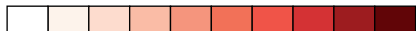
■ Naturschutzgebiete

a



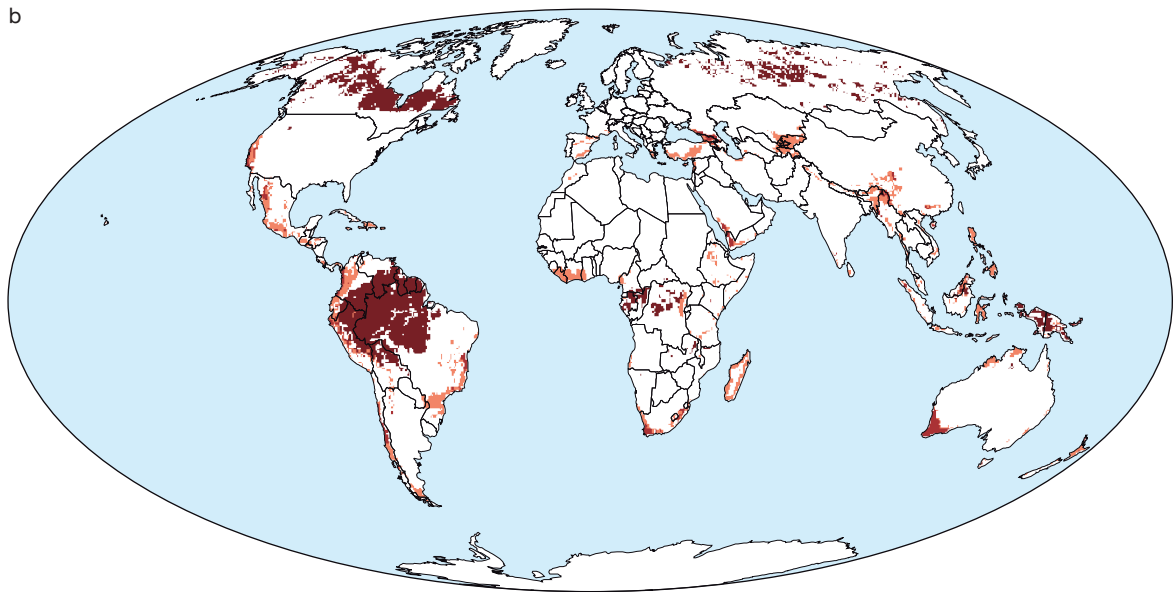
Ausschlusskriterium Biodiversität für Szenario A

13



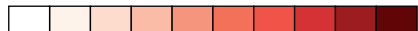
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 Anteil Ausschluß in den Gitterzellen [%]

b

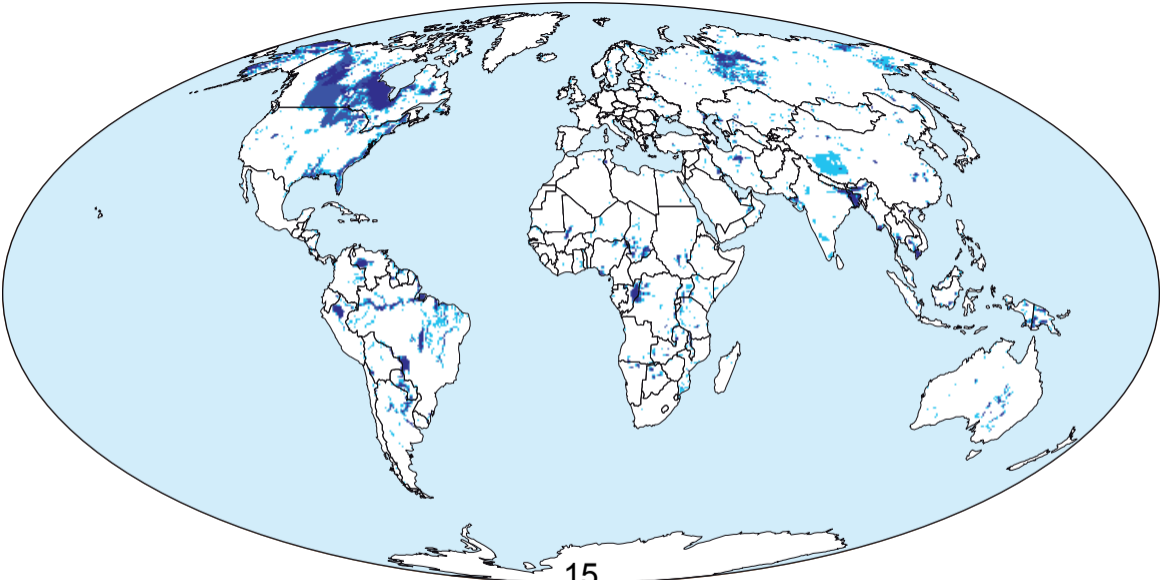


Ausschlusskriterium Biodiversität für Szenario B

14



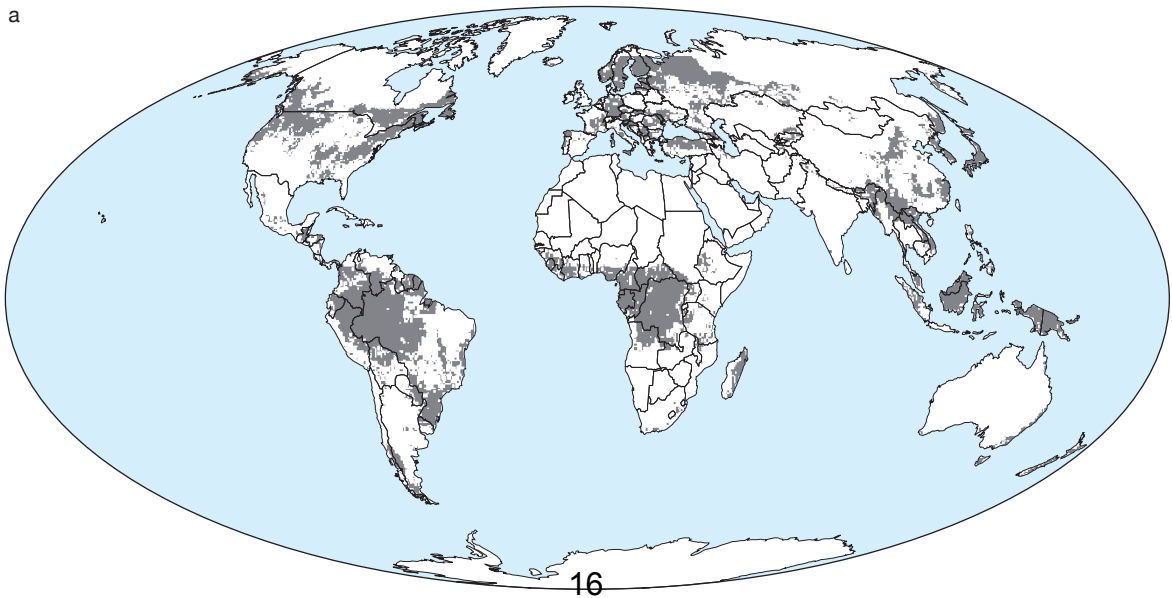
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 Anteil Ausschluss in den Gitterzellen [%]



Feuchtgebiete



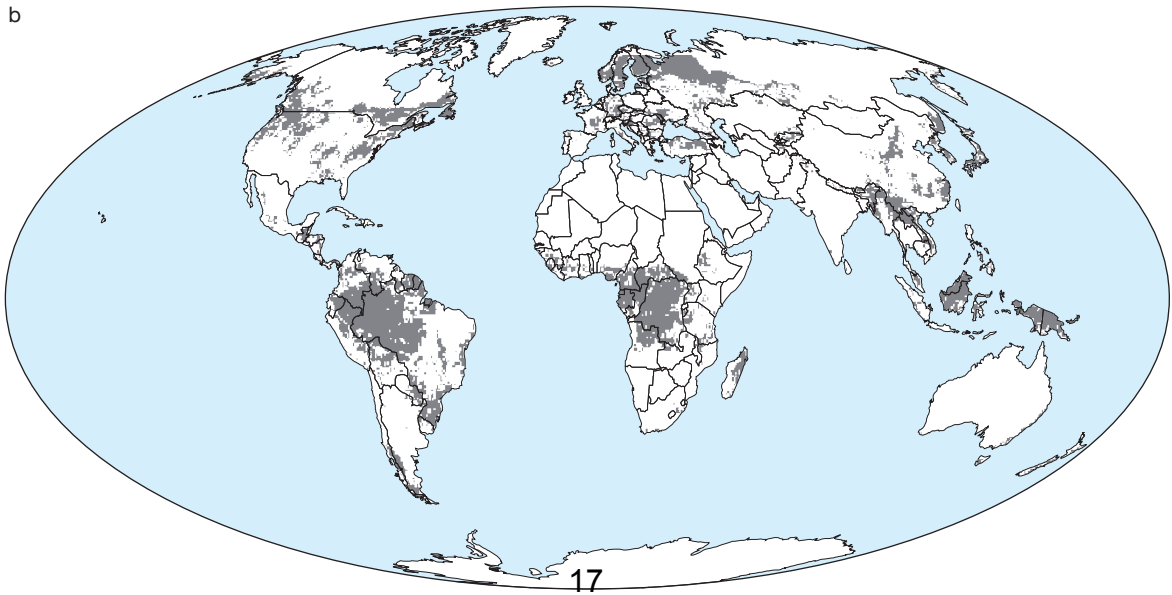
25 50 75 100 Anteil in Gitterzelle [%]



Kompensation der CO₂-Freisetzung durch Landnutzungsänderung



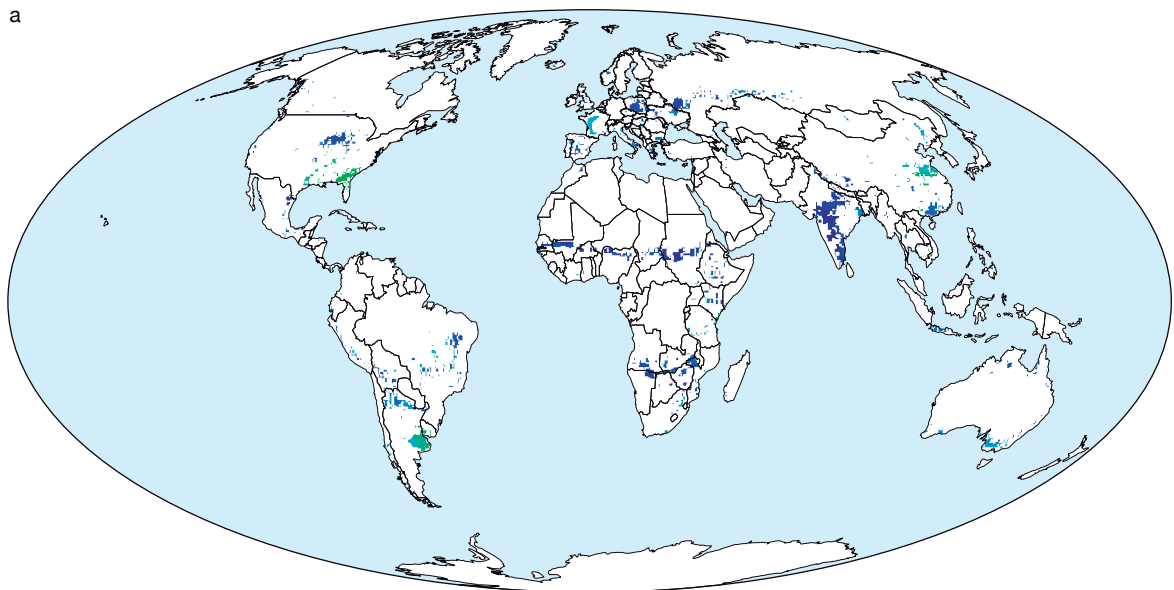
Innerhalb von 5 Jahren nicht möglich



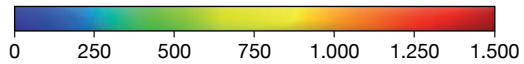
Kompensation der CO₂-Freisetzung durch Landnutzungsänderung

■ Innerhalb von 10 Jahren nicht möglich

a

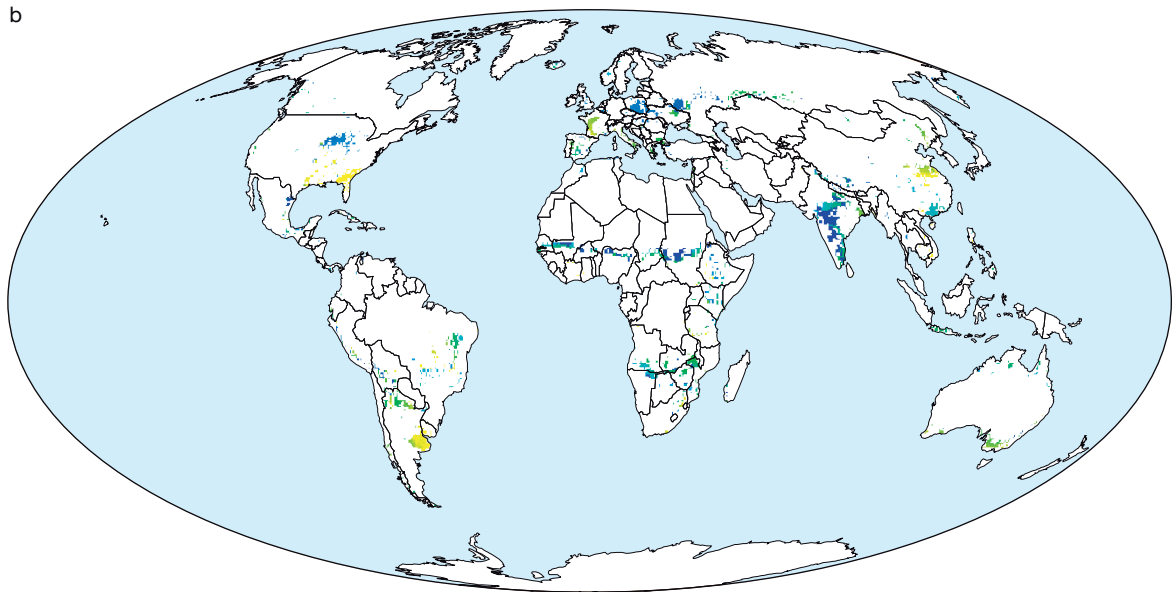


Bioenergiepotenzial [GJ/ha und Jahr]

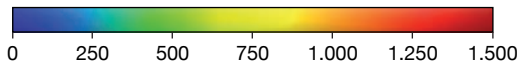


18

b

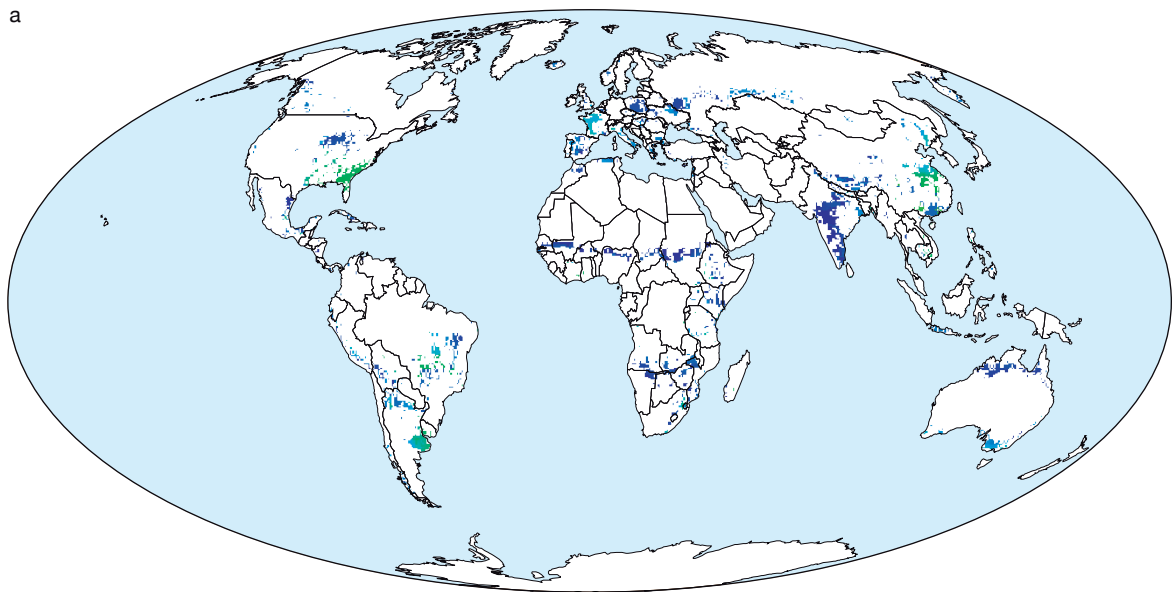


Bioenergiepotenzial [GJ/ha und Jahr]

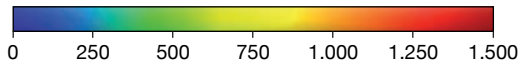


19

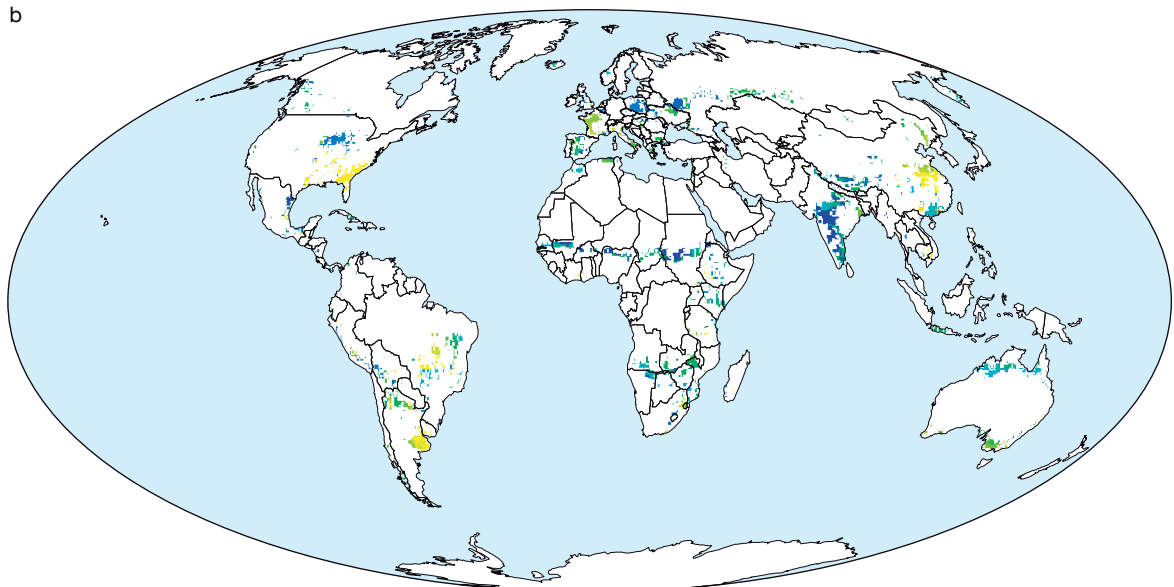
a



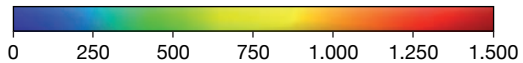
Bioenergiepotenzial [GJ/ha und Jahr]



20

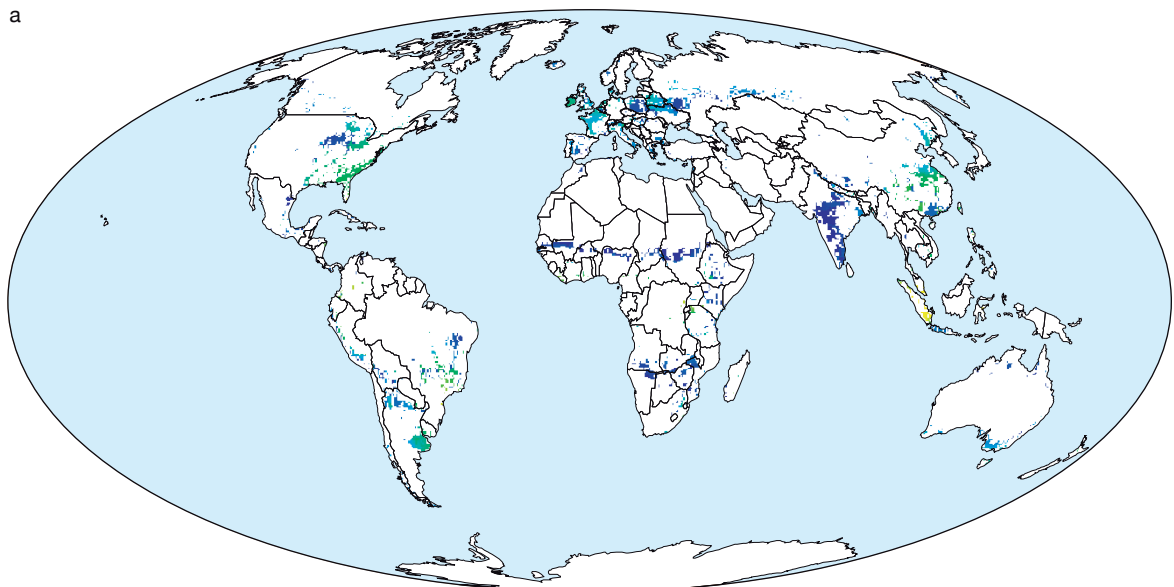


Bioenergiepotenzial [GJ/ha und Jahr]

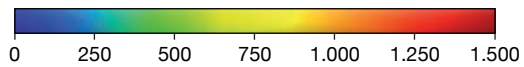


21

a

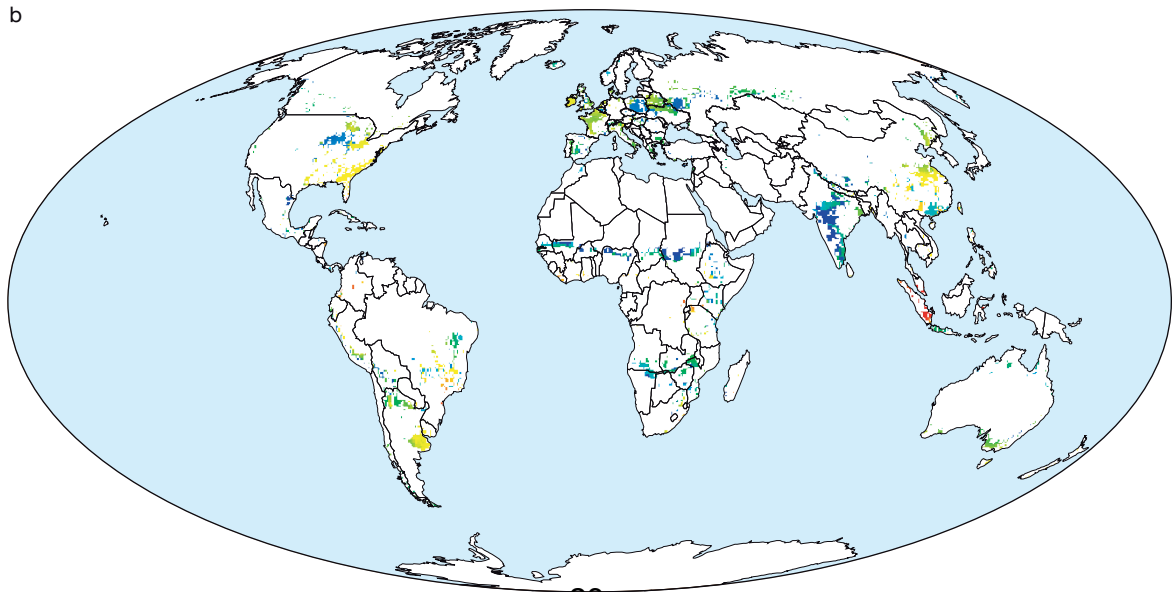


Bioenergiepotenzial [GJ/ha und Jahr]

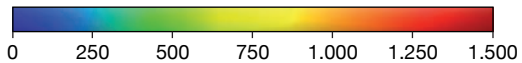


22

b

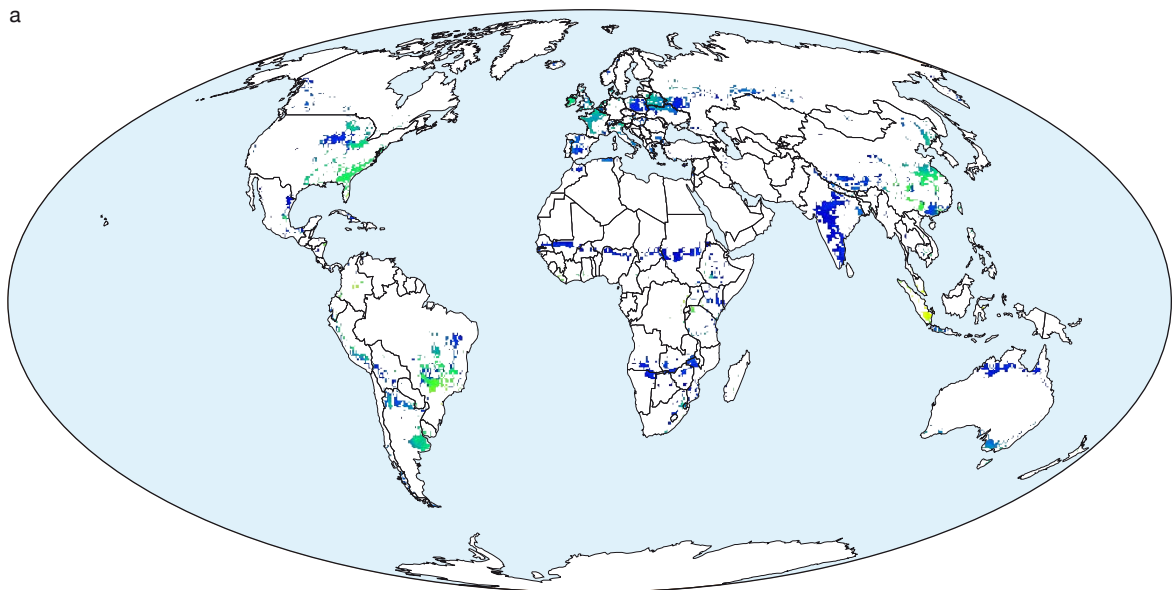


Bioenergiepotenzial [GJ/ha und Jahr]

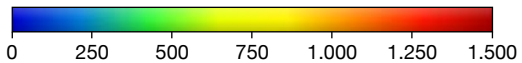


23

a

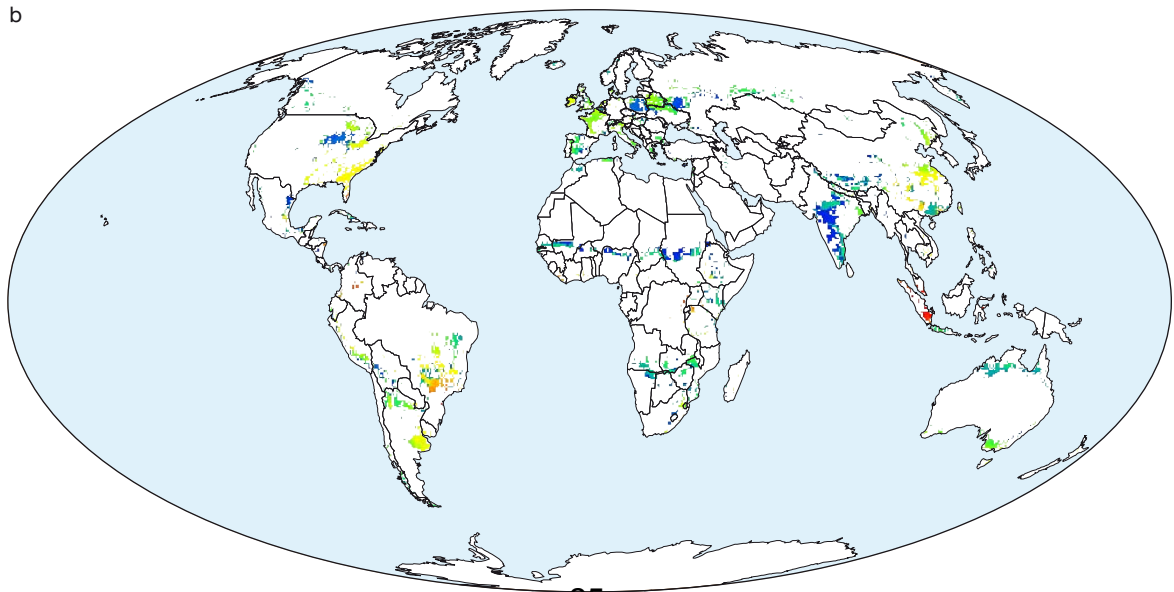


Bioenergiepotenzial [GJ/ha und Jahr]

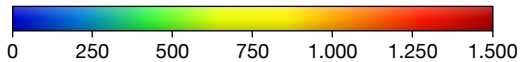


24

b

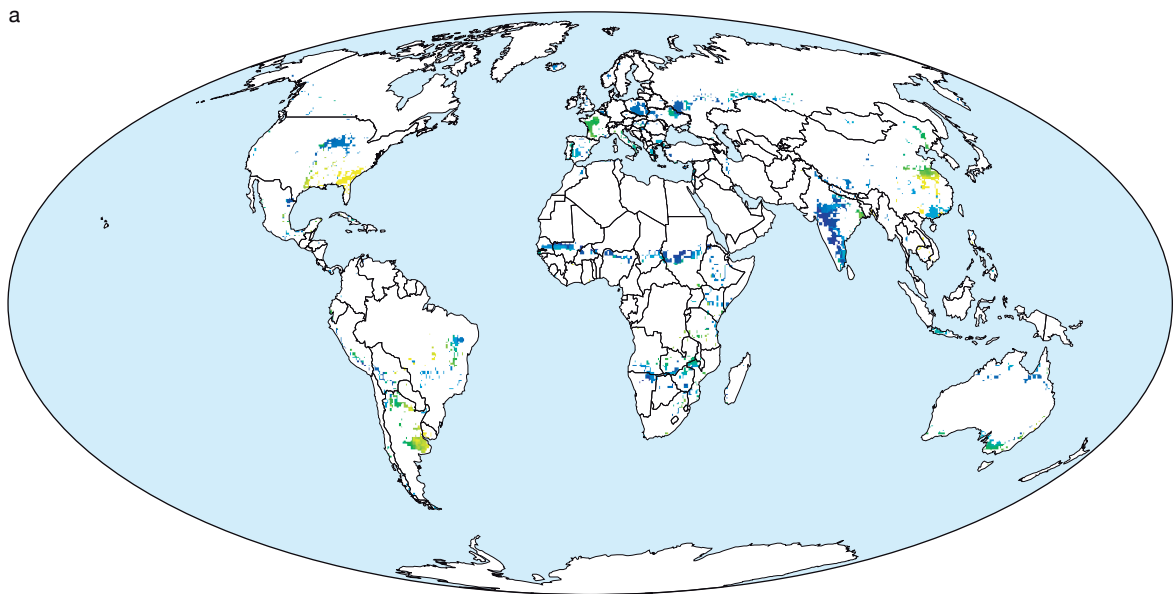


Bioenergiepotenzial [GJ/ha und Jahr]

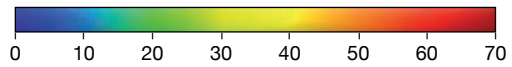


25

a

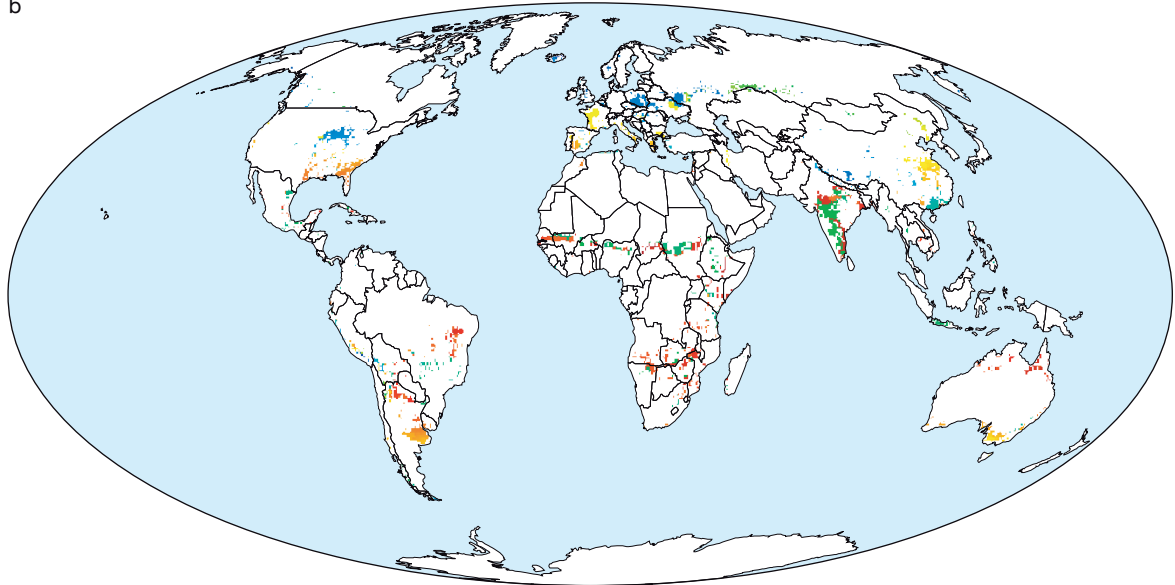


Simulierte Biomasseerträge [t TM/ha und Jahr]

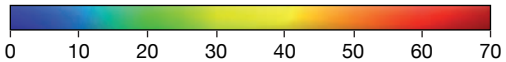


26

b

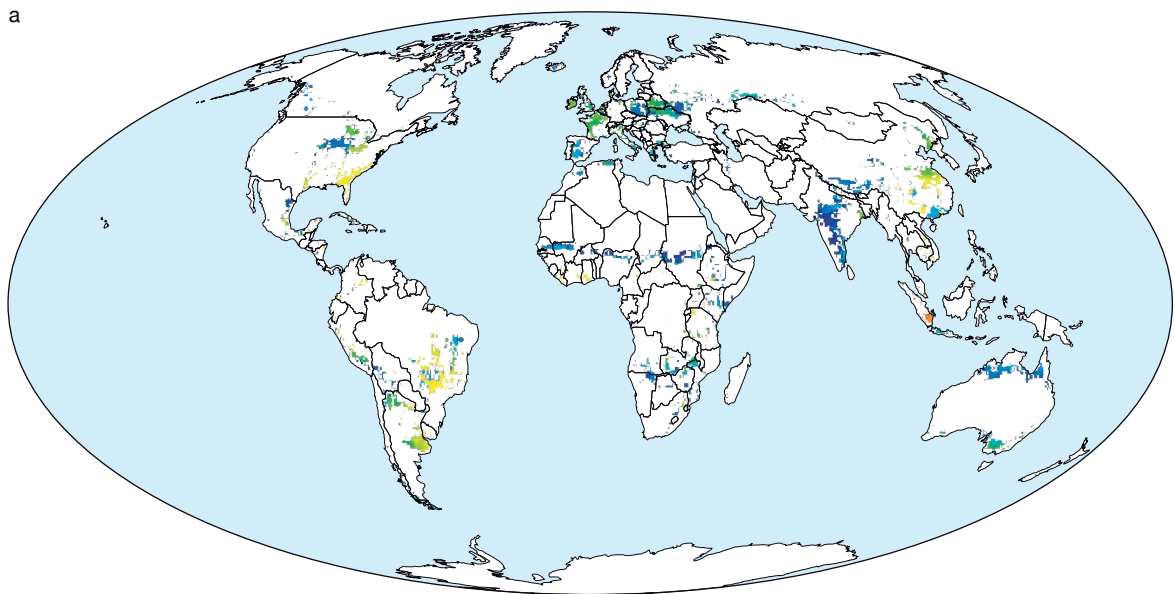


Simulierte Biomasseerträge [t TM/ha und Jahr]

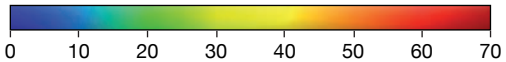


27

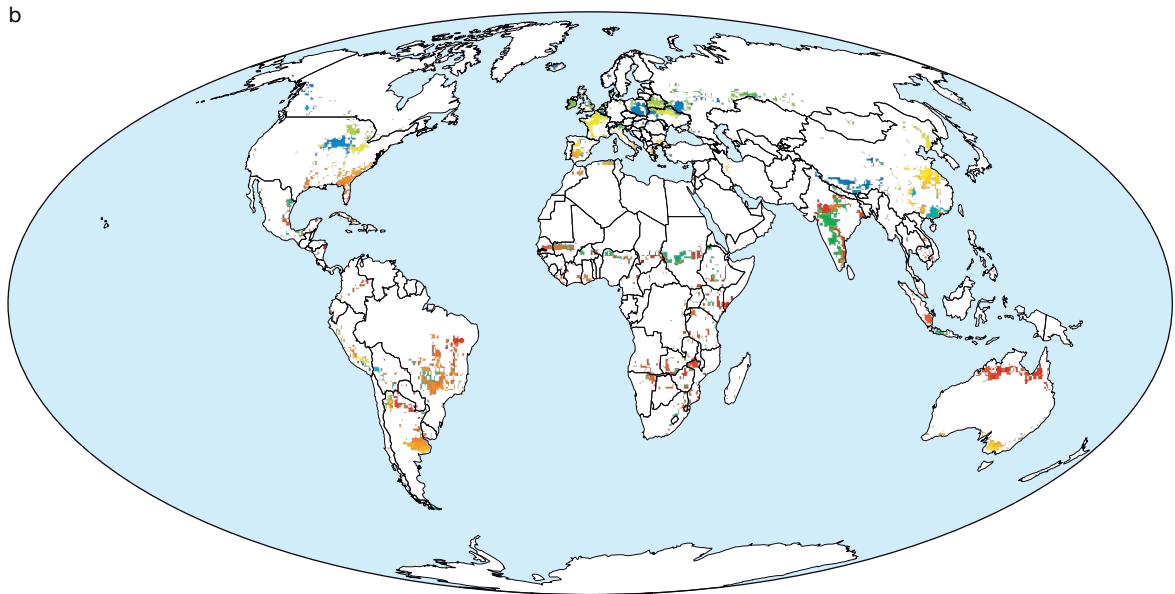
a



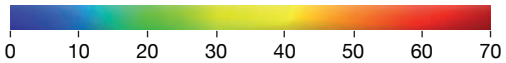
Simulierte Biomasseerträge [t TM/ha und Jahr]

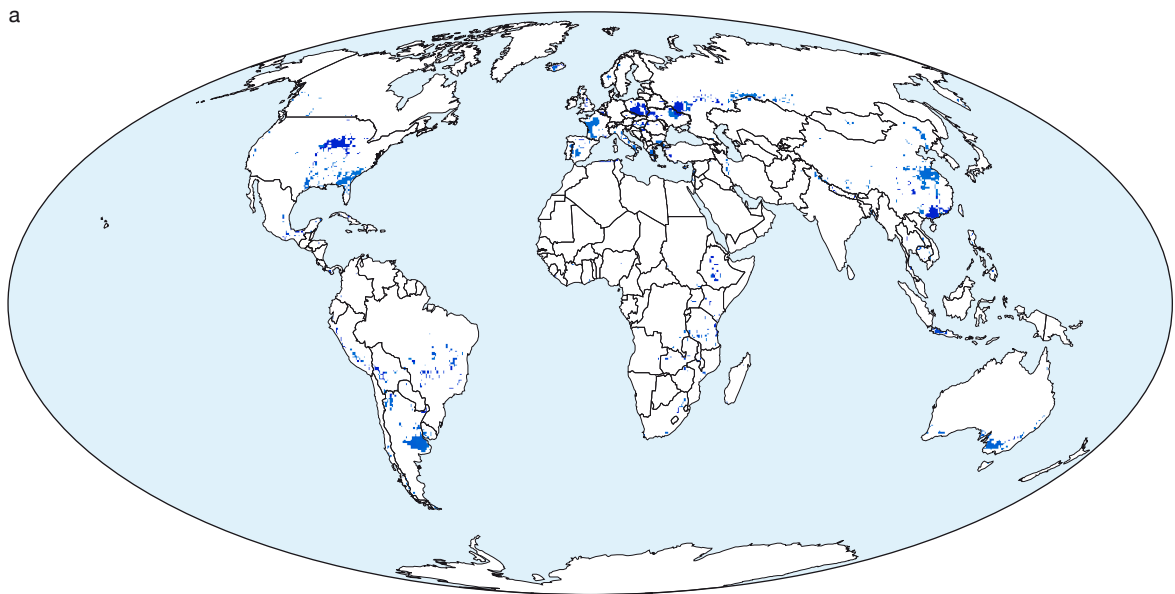


28

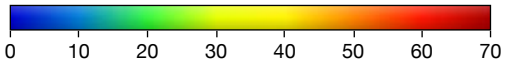


Simulierte Biomasseerträge [t TM/ha und Jahr]

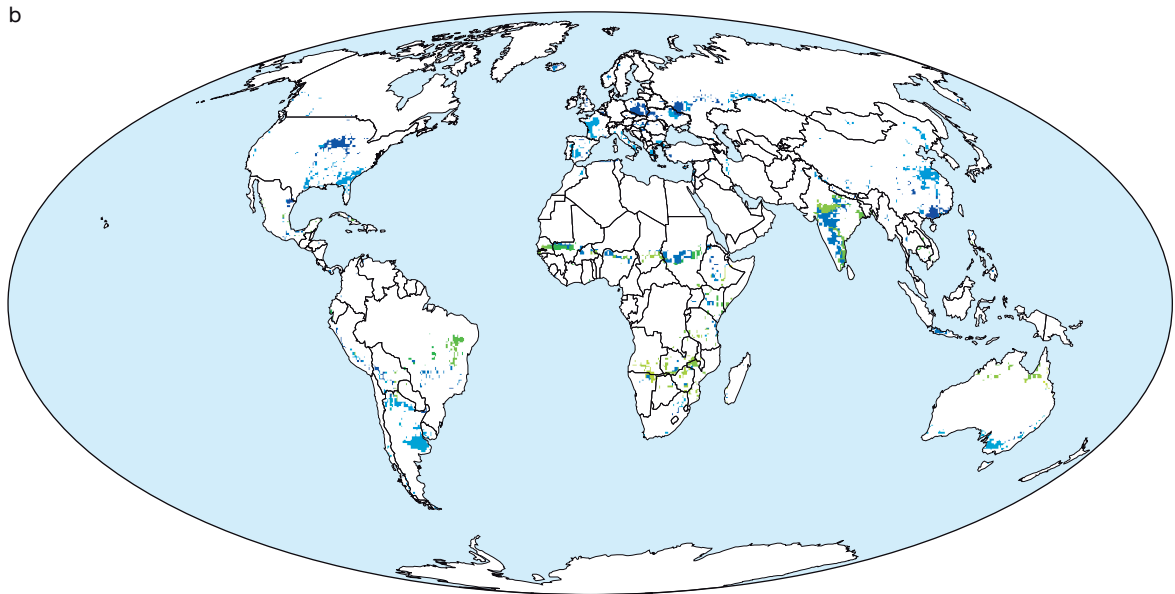




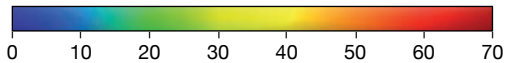
Simulierte Biomasseerträge [t TM/ha und Jahr]

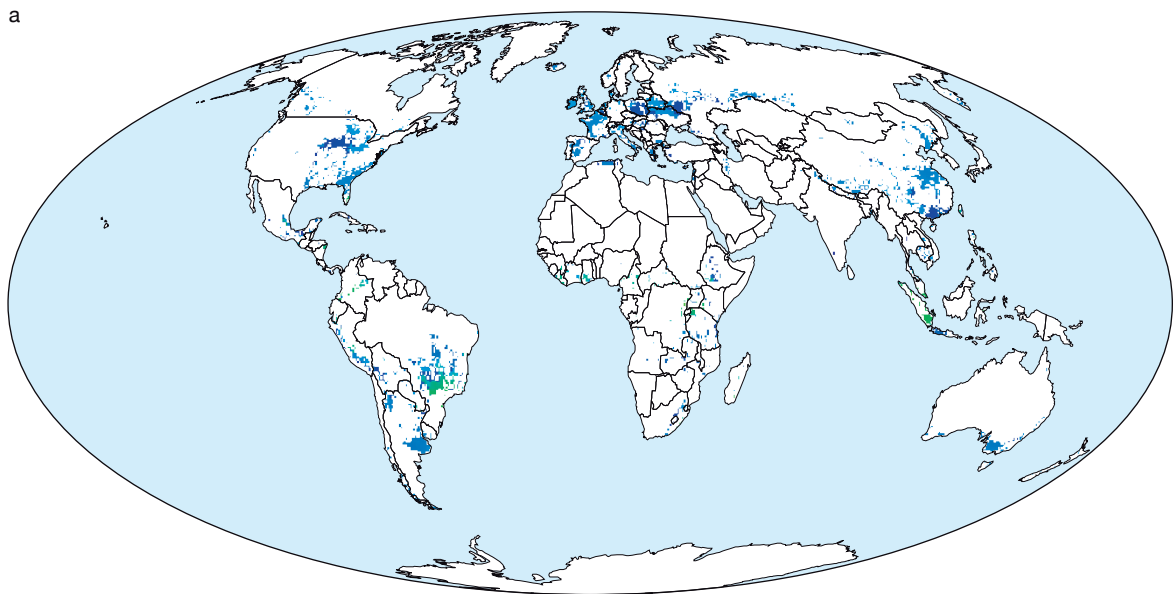


b

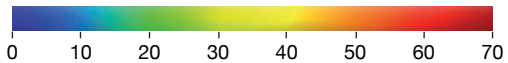


Simulierte Biomasseerträge [t TM/ha und Jahr]

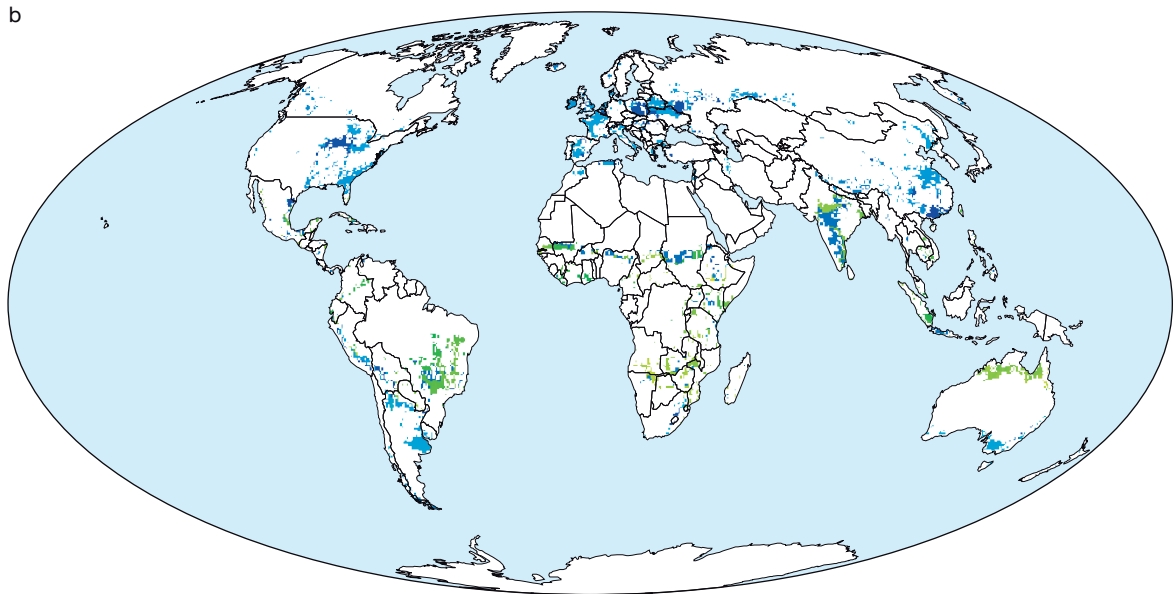




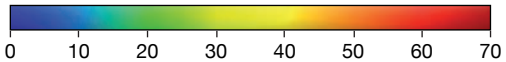
Simulierte Biomasseerträge [t TM/ha und Jahr]



b



Simulierte Biomasseerträge [t TM/ha und Jahr]



33