

# Joint Impacts of climate and land use change on the terrestrial biosphere

## Abstract

Humans have a long history of shaping their environment to better suit their needs that dates back at least to the development of agriculture in the early Holocene. However, human-induced environmental change has accelerated dramatically with industrialisation and has now reached a magnitude that rivals that of geological forces. In light of the scope of anthropogenic changes it has been suggested that humanity is pushing the Earth System out of the Holocene into a new geological epoch: the Anthropocene.

The two major pathways of human interference with the terrestrial biosphere are

1. directly through land use change (LUC), primarily for agriculture,
2. indirectly through anthropogenic climate change (CC) which in turn drives ecosystem change.

This dissertation presents an attempt to assess human-induced biosphere change through both these pathways in a consistent and quantitative way. Its main objectives are

1. to quantify how much anthropogenic forcing has already shifted the biosphere from its potential natural state over the course of the last ~300 years,
2. to systematically explore the space of plausible future scenarios for the terrestrial biosphere until the end of the 21st century.

The analysis is based on an integrated indicator of macro-scale changes in biogeochemical characteristics and ecosystem structure: the  $\Gamma$  metric. Large shifts in these basic building blocks of the biosphere are taken to indicate a risk to more complex ecosystem properties as they potentially disrupt long-standing biotic interactions such as predator-prey relations, complementarity and competition regarding resource use, or mutual interactions like pollination.

This dissertation relies on simulations with the dynamic global vegetation, agriculture and hydrology model LPJmL to quantify how biogeochemical characteristics and ecosystem structure have responded to historical LUC and CC. For future projections LPJmL is driven by a large number of CC and LUC scenarios, using the same indicator to measure the impact on the biosphere.

Simulation results show that major impacts on the biosphere from CC and LUC – defined by  $\Gamma$  exceeding a threshold of 0.3 – have expanded from merely 0.5% of the land surface in 1700 to 25–31% of the land surface today. Land use has been the main anthropogenic driver causing major ecosystem change in the past and is currently responsible for major ecosystem change on 16–19% of the land surface. CC has caused major ecosystem change on 5–10% of the land surface since the beginning of the 20th century.

Assuming that the ultimate goal of the Paris Agreement can be reached and global warming can be limited to below 2°C above pre-industrial levels major CC impacts on the biosphere are still projected to expand to 16–27% of the land surface by the end of the 21st century. Concurrent expansion of land use could result in major human-induced ecosystem changes from both CC and LUC on 40–53% of the land surface by century's end. If greenhouse gas emissions cannot be reduced and global warming exceeds 4 or even 5°C humans may profoundly transform ecosystems covering 67–80% of the land surface. In this worst-case scenario analysed here, another roughly 20% of the land surface are projected to experience moderate ecosystem change, leaving only 3–8% of terrestrial ecosystems with only minor human alteration.

Overall, results show that CC is expected to take over as the main anthropogenic driver of major ecosystem change during this century in all but the most ambitious climate mitigation scenarios. Despite a growing world population, some land use scenarios project that future efficiency improvements in the agricultural system will allow for a reduction of agricultural land and hence a reduction of the impact of LUC on the terrestrial biosphere compared to today. Yet, results also show that reduced LUC impacts will likely not be able to compensate for the increase in CC impacts, and human-induced transformation of the biosphere is likely to grow during this century regardless of the considered scenario.

## Zusammenfassung

Schon seit langem haben Menschen ihre Umwelt gestaltet, um sie ihren Bedürfnissen anzupassen, eine Geschichte, die mindestens bis zur Entwicklung landwirtschaftlicher Praktiken im frühen Holozän zurückreicht. Mit der Industrialisierung hat die vom Menschen verursachte Umweltveränderung jedoch enorm zugenommen und nimmt nun eine Größenordnung an, die sonst nur von geologischen Prozessen erreicht wird. In Anbetracht des Ausmaßes anthropogener Veränderungen wird vermutet, dass die Menschheit das Erdsystem aus dem Holozän in eine neue geologische Epoche drängt: das Anthropozän.

Die zwei Hauptpfade, über die der Mensch die terrestrische Biosphäre verändert, sind

1. direkt durch Landnutzungswandel (LNW), in erster Linie für die Landwirtschaft,
2. indirekt durch Klimawandel (KW), welcher seinerseits zu Ökosystemveränderungen führt.

Die vorliegende Dissertation unternimmt den Versuch, die vom Menschen über beide diese Pfade verursachten Veränderungen der Biosphäre konsistent und quantitativ zu bestimmen. Ihre Hauptziele sind

1. zu quantifizieren, wie stark die Biosphäre im Verlauf der letzten ca. 300 Jahre bereits durch anthropogene Triebkräfte verändert wurde,
2. den Raum plausibler Zukunftsszenarien für die terrestrische Biosphäre bis zum Ende des 21. Jahrhunderts systematisch zu erforschen.

Die Analyse basiert auf einem integrierten Indikator für makro-skalige Veränderungen der biogeochemikalischen Eigenschaften und der Ökosystemstruktur: der  $\Gamma$ -Metrik. Große Verschiebungen bei diesen grundlegenden Bausteinen der Biosphäre bedeuten ein Risiko für komplexere Ökosystemeigenschaften, da sie möglicherweise lange bestehende biotische Interaktionen wie Räuber-Beute-Beziehungen, Komplementarität und Konkurrenz bei der Ressourcennutzung oder symbiotische Beziehungen wie z.B. Bestäubung unterbrechen.

Die vorliegende Dissertation stützt sich auf Simulationen mit dem dynamischen globalen Vegetations-, Agrar- und Hydrologiemodell LPJmL, um zu quantifizieren, wie biogeochemische Eigenschaften und die Ökosystemstruktur auf historischen LNW und KW reagiert haben. Für die Zukunftsprojektionen wird LPJmL mit einer großen Anzahl an Klima- und Landnutzungsszenarien angetrieben, wobei derselbe Indikator verwendet wird, um die Auswirkungen auf die Biosphäre zu bestimmen.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich schwerwiegende Auswirkungen von LNW und KW auf die Biosphäre – definiert als eine Überschreitung des Grenzwertes von 0,3 durch  $\Gamma$  – von lediglich 0,5% der Landoberfläche um 1700 auf 25–31% der Landoberfläche heute ausgedehnt haben. Landnutzung war in der Vergangenheit der wichtigste anthropogene Treiber für schwerwiegende Ökosystemveränderungen, mit einem derzeitigen Ausmaß von 16–19% der Landoberfläche. KW hat seit Anfang des 20. Jahrhunderts schwerwiegende Ökosystemveränderungen auf 5–10% der Landoberfläche verursacht.

Unter der Annahme, dass das Hauptziel des Pariser Klimaabkommens, die globale Erwärmung auf weniger als 2°C über vorindustriellem Niveau zu begrenzen, erreicht werden kann, werden sich schwerwiegende Klimafolgen für die Biosphäre trotzdem bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auf 16–27% der Landoberfläche ausdehnen. Die gleichzeitige Ausweitung der Landwirtschaft könnte dazu führen, dass der Anteil der Landoberfläche mit schwerwiegenden Ökosystemveränderungen durch LNW und KW bis zum Ende des Jahrhunderts auf 40–53% ansteigt. Sollten die Treibhausgasemissionen nicht reduziert werden können und die globale Erwärmung 4 oder sogar 5°C übersteigen, könnte die Menschheit Ökosysteme auf 67–80% der Landoberfläche grundlegend verändern. In diesem Worst-Case-Szenario werden für weitere etwa 20% der Landoberfläche mittelschwere Ökosystemveränderungen prognostiziert, so dass in nur 3–8% der terrestrischen Ökosysteme maximal geringe menschliche Veränderungen zu erwarten sind.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass KW in diesem Jahrhundert voraussichtlich in allen außer den ambitioniertesten Klimaschutzszenarien den Platz als Haupttreiber für schwerwiegende Ökosystemveränderungen übernehmen wird. Trotz einer wachsenden Weltbevölkerung gehen einige Landnutzungsszenarien davon aus, dass zukünftige Effizienzsteigerungen in der Landwirtschaft eine Verringerung der landwirtschaftlichen Fläche und damit eine Verringerung der Auswirkungen von LNW auf die terrestrische Biosphäre im Vergleich zu heute ermöglichen werden. Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass verminderte Landnutzungsauswirkungen wahrscheinlich nicht in der Lage sein werden, die Zunahme von Klimafolgen zu kompensieren, so dass die vom Menschen verursachte Transformation der Biosphäre in diesem Jahrhundert wahrscheinlich unabhängig vom Szenario wachsen wird.