



Doctoral Thesis

Analysis of land-use impacts based on source and sink capacities

Author(s):

Wollenmann, Regina Andrea

Publication Date:

2010

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006118374> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 18831

**ANALYSIS OF LAND-USE IMPACTS BASED
ON SOURCE AND SINK CAPACITIES**

A dissertation submitted to
ETH ZURICH
for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
REGINA ANDREA WOLLENMANN

Dipl. Forst-Ing. ETH

09.01.1974
citizen of Zurich

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Hans R. Heinemann, examiner
Prof. Dr. Stefanie Hellweg, co-examiner

2010

Summary

Land is a multifunctional resource that provides both renewable resources, such as biomass, and an ecological service of recycling waste and emissions. The growing world population has caused a dramatic decrease in the amount of land per capita that is available for fulfilling those roles. Therefore, to maintain a global biogeochemical cycle, we must adopt a 'sustainable' land use that keeps a balance between the substance flow of resources and emissions per unit of land. Substance flow and land use are the main pressures that account for the environmental impacts from human activities. Some current tools for their assessment include both of those factors. However, certain protocols treat them independently (e.g., life cycle assessment, or LCA), while others do not acknowledge this multifunctionality, and, thus, they combine the uses of land for providing resources as well as offsetting emissions (e.g., the 'ecological footprint'). This thesis presents a new approach to assessing the effect of land use and its related substance flows on the biogeochemical cycle. The cycle for a given chemical element remains in balance as long as the substance immobilization of a product (as a function of flows providing carrying capacity, such as land use and storage in products) outweighs the substance mobilization of that product (i.e., emissions flows generated by production processes).

Therefore, this innovative approach brings together two areas of knowledge -- industrial ecology (emissions and resources) and ecosystem ecology (sink capacities of land). Because the cycles for carbon and nitrogen are among the most altered by humanity, those elements are focused upon here. A newly developed, generic land-use model also is presented that is supplemented by the downstream processes (chain) of six products in order to assess their influence on the balance of the biogeochemical cycle. Those six products are wood chips, pellets, round wood, saw wood, glued laminated timber, and paper. Here, a closed cycle is mapped for chemical elements through the various compartments (spheres) of the biogeochemical cycle, thereby providing a full mass balance for each element.

The model also utilizes a network algebra of input–output analysis, where a one-unit process has multiple outputs (product and wastes). This thesis will depict the consequences of merging input and output networks with flow charts and the normalization of matrices.

Two new metrics have been developed to assess the impact of land use on the biogeochemical cycle. The first, a land-use balance (LUB), describes the difference between substance mobilization and immobilization of a chemical element in absolute numbers while the second, a land-use balance index (LUBI), visualizes 'sustainability' in a dimensionless ratio.

This model has now been implemented for three land-use scenarios in the Swiss lowland, where they represent a natural beech forest, a planted spruce forest, and a short-rotation poplar plantation. Different scenarios were considered for land transformation (with and without), the amount of biomass extracted (branches either removed or left on-site), and sink capacities (dependent on land occupation or the remaining dead organic biomass). Data sampling included the quantification of parameter uncertainties.

This new model requires the input of around 100 parameters, limiting its use for industrial purposes. Furthermore, this approach is not a substitute for other environmental assessment tools, e.g., LCA, because it does not account for chemical compounds or different impacts on the environment. Therefore, simplified calculations for LUB and LUBI are based on data available from current life-cycle inventories and from the IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.

Regarding carbon, these results suggest that paper, and in 2003, the product mix from Swiss for-

ests were a carbon source while wood chips, saw wood, and glued laminated timber were sinks. No defining statement could be made for pellets because their range of uncertainty covered positive and negative land-use balances. The results for nitrogen also provided no clear picture because LUB varied between negative and positive values depending on the scenario and the parameters used. Because nitrogen emitted along the product chain outweighs the N removed by resource extraction, fertilization would likely cause nitrogen overflows. (Whether the nitrogen emitted along the product chain was deposited on the surface where N had been extracted is another question). Therefore, the key drivers for LUBs are the intensity of land use (the available ecological service is diminished because it is mainly limited by the area or residuals left on-site) and the emissions along the product chain.

Overall land use for products is lower in intensive production systems even if virtual land occupation is required for offsetting emissions.

Substance flow per product due to land transformation becomes negligible when using a time frame of 100 years. Therefore, given a similar land occupation per product, the results of the simplified approach are in accordance with those of this new model.

This thesis presents both an integrated land-use assessment model and its simplified approach for data provided by life cycle inventories (LCIs) and the IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Consequently, decision-makers obtain two new metrics that assess the effect of the primary product chain (and its land use) on alterations in the biogeochemical cycle. The project described here clearly demonstrates that future LCIs must include more spatial data and greater detailed information on land-use management practices in order to allow for better mapping of ecological processes and their influence on substance flow.

Kurzfassung

Land ist eine multifunktionale Ressource, weil es einerseits die Grundlage für das Wachstum von biogenen Rohstoffen darstellt und andererseits eine wichtige Rolle spielt beim Recycling von "Abfallstoffen". Wobei unter Recycling von Abfallstoffen die Aufnahme und Transformation von Stoffen in Ökosystemen (biogeochemischer Kreislauf) zu verstehen ist. Land ist aber auch eine begrenzt verfügbare Ressource und somit findet mit der zunehmenden Weltbevölkerung eine drastische Senkung der Landfläche pro Kopf statt, die für das Wachstum biogener Rohstoffe sowie für das Recycling von Abfallstoffen zur Verfügung steht. Deshalb ist eine "nachhaltige" Landnutzung, bei der die Stoffflüsse durch Ressourcengewinnung und Emissionen in einem Gleichgewicht stehen, elementar.

Ausser Rand und Band geratene Stoffflüsse und Landnutzung sind den auch die Hauptursachen für die globalen Umweltprobleme. Die zur Zeit verfügbaren Instrumente zur Analyse von Umweltproblemen tragen diese Tatsache Rechnung, indem sie sowohl die Menge von Stoffflüssen als auch die Belastung durch Landnutzung erheben. Allerdings betrachten einige Landnutzung und Stoffflüsse unabhängig voneinander (z.B. Ökobilanzierung (LCA)) und andere ignorieren die Multifunktionalität von Land indem sie die benötigten Landflächen für das Ressourcenwachstum und das Stoffrecycling addieren (z.B. Ökologischer Fussabdruck).

Diese Arbeit zeigt einen neuen Ansatz, um die Auswirkungen durch Stoffflüsse (Ressourcen and Emissionen) und Landnutzung auf den globalen Stoffkreislauf abzuschätzen. Der globale Stoffkreislauf bleibt im Gleichgewicht solange das Freisetzen von Stoffen (Emissionen, verursacht durch Produktionsprozesse) und das Binden von Stoffen (Senkenleistung, durch ökologische Prozesse und durch Bindung in Produkten) für jedes Produkt in einem Gleichgewicht stehen. Dieser Ansatz bringt somit zwei Fachgebiete zusammen (1) industrielle Ökologie (Emissionen und Ressourcen) und (2) Ökosystemforschung (Senkenkapazität von Land). Weil die globalen Kreisläufe von Kohlenstoff und Stickstoff zu denjenigen gehören, die durch den Menschen am stärksten beeinflusst werden, wurde der neue Ansatz auf diese beiden chemischen Elemente angewandt.

Als Grundlage für die Methodik wurde ein generisches Landnutzungsmodell entwickelt, welches mit einem Modul erweitert wurde, das die nachfolgenden Prozesse der Ressourcenverarbeitung enthält (Prozesskette). Dabei wurden 6 verschiedene Produkte berücksichtigt nämlich Hackschnitzel, Pellets, Sägeholz, verleimtes Brettschichtholz sowie Papier. Weil wir den geschlossenen Kreislauf der chemischen Elemente durch alle Komponenten (Sphären) des biogeochemischen Kreislaufes betrachten, erfüllt unser Modell die Bedingungen der vollständigen Massenbilanz pro betrachtetes chemisches Element.

Das Instrument der Input-Output Analyse dient als Grundlage für das Modell. Allerdings können in unserem Modell pro Prozess (Knoten) nicht nur mehrere Eingangsmaterialien benötigt werden sondern auch mehrere Ausgangsmaterialien entstehen (Produkte und "Abfälle"). Diese Arbeit zeigt, welche Auswirkungen diese Mischung von Eingangs und Ausgangsnetzwerken auf das Zeichnen von Flussdiagrammen und die Normalisierung von Matrizen hat.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei neue Messgrößen entwickelt, um die Auswirkung von Landnutzung auf den globalen biogeochemischen Kreislauf zu beurteilen. Die erste Messgrösse, die Landnutzungsbilanz (LUB), beschreibt die Differenz zwischen der Freisetzung und der Bindung von Stoffen in absoluten Werten. Die zweite Messgrösse, der Landnutzungsbilanzindex (LUBI), visualisiert "Nachhaltigkeit" in einem dimensionslosen Quotient.

Eine Fallstudie beschreibt die Anwendung des Modells anhand von drei möglichen Landnutz-

ungsformen im schweizerischen Mittelland. Es sind dies ein natürlich entstandener Buchenwald, ein gepflanzter Fichtenwald sowie eine Pappelkurzumtriebsplantage. Wir betrachten verschiedene Szenarien bezüglich Landnutzungsumwandlung (erfolgt oder nicht erfolgt), Menge geernteter Biomasse (Äste verbleiben im Bestand oder nicht), und Senkenkapazität (abhängig von der genutzten Landfläche oder von der anfallenden Menge an totem organischem Material). Die Erhebung der Daten beinhaltet auch immer eine Abschätzung der Parameterunsicherheit.

Unser Modell benötigt etwa 100 Eingangsgrößen was seinen Nutzen für industrielle Anwendungen stark reduziert. Ausserdem ersetzt unser Ansatz herkömmliche Umweltbewertungsinstrumente wie zum Beispiel die Ökobilanzierung nicht, da wir nur chemische Elemente aber keine chemischen Schadstoffe und ihre unterschiedlichen Auswirkungen auf die Umwelt berücksichtigen. Deshalb wurde ein vereinfachter Ansatz entwickelt, der es erlaubt die beiden Messgrößen (LUB und LUBI) aufgrund von Daten zu berechnen, welche in Ökobilanzen und in den Richtlinien für nationale Treibhausgasinventare (IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories) verfügbar sind.

Was den Kohlenstoff betrifft, lassen unsere Resultate die Aussage zu, dass Papier und der Produktmix von Schweizer Wäldern im Jahre 2003 Kohlenstoff in der Atmosphäre anreichern, während Hackschnitzel, Sägeholz und verleimtes Brettschichtholz Kohlenstoff binden. Keine klare Aussage ist im Bezug auf Pellets möglich, da der Unsicherheitsbereich sowohl positive als auch negative Landnutzungsbilanzwerte aufweist. Auch kein klares Bild ergibt sich bezüglich Stickstoff, da die Landnutzungsbilanzwerte zwischen negativen und positiven Werten in Abhängigkeit von den gewählten Szenarien und Parametern variieren. Stickstoff der im Laufe der Prozesskette freigesetzt wird, steht in der Regel in einem Gleichgewicht zum Stickstoff der bei der Ressourcennutzung entfernt wurde. Deshalb verursacht eine Düngung immer einen Stickstoffüberschuss (ob der Stickstoff dann auch auf der Fläche abgelagert wird auf denen er extrahiert wurde ist eine andere Frage). Die Haupteinflussgrößen bezüglich Landnutzungsbilanzen sind die Intensität der Landnutzung (da die verfügbare Senkenkapazität abhängig ist von der Fläche oder der verbleibenden Biomasse) sowie die Menge an Emissionen entlang der Produktkette. Die gesamte Landnutzungsfläche ist in intensiven Produktionssystemen auch dann kleiner wenn virtuelle Flächen (ökologischer Fussabdruck) die allein dem Stoffrecycling dienen, benötigt werden.

Bei einer Allokation über 100 Jahre sind Stoffflussmengen per Produkteinheit durch Landnutzungsumwandlungen vernachlässigbar.

Die Landnutzungsbilanz (LUB) und der Landnutzungsindex (LUBI) für Produktanalysen mit dem vereinfachten Ansatz (Ökobilanzdaten und IPCC Daten) sind bei vergleichbarer Landnutzungsfläche den Resultaten aus unserem Modell vergleichbar.

Das integrierte Landnutzungsbewertungsmodell sowie sein vereinfachter Ansatz statet Entscheidungsträger mit zwei neuen Messgrößen aus, um den Einfluss der Primärproduktion sowie ihrer Prozesskette auf den globalen Stoffhaushalt abzuschätzen. Diese Arbeit zeigt aber auch deutlich, dass zukünftige Ökobilanzen mehr räumliche Daten sowie weitergehende Informationen bezüglich angewendeter Managementpraktiken beinhalten müssen. Nur so können ökologische Prozesse und ihr Einfluss auf den Stoffhaushalt besser abgebildet werden.