

DISS. ETH NO. 23119

**TOWARDS IMPROVED ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL IMPACTS
EMBODIED IN AGRICULTURE AND FORESTRY PRODUCTS**

A dissertation submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

ABHISHEK ABHISHEK

M.S., University of Cincinnati

born on 09.08.1984

citizen of India

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Stefanie Hellweg, examiner

Prof. Dr. Thomas Koellner, co-examiner

Dr. Stephan Pfister, co-examiner

2015

Abstract

Life cycle assessment (LCA) is increasingly used to assess the total environmental impacts ('cradle to grave') associated with a product or process but its results often suffer from large uncertainties owing to either incomplete inventories or underdeveloped impact assessment methods. For example, although human driven habitat change to meet consumption demands has the highest impact of all drivers of biodiversity loss for most ecosystems, the available LCA methods quantifying land use biodiversity impacts of consumer products are in nascent stage of development. Similarly, the potential human health impacts of toxic emissions from indoor products are rarely addressed in LCA. Both these shortcomings are particularly relevant when it comes to the assessment of forestry and wood products, which were the thematic focus of this dissertation.

This aim of this dissertation is to develop improved methods to quantify local, regional and global biodiversity loss due to land occupation and land use change as well as methods to include offgassed emissions occurring during the use phase of indoor wooden products. Another aim was to apply the new methods in case studies related to the wood value chain, as well as agricultural production to derive relevant conclusions for these cases.

In a first step, the local characterization factors (CFs) for assessing forest land-use related biodiversity loss were derived through categorical meta-analysis by reviewing 287 published studies containing 1008 pairwise comparisons of local species richness in managed and unmanaged forests. Results show that forest management types can be ranked, from best (low CF) to worse (high CF), as follows: selection and retention systems, reduced impact logging, conventional selective logging, clear-cutting, agroforestry, timber plantation, fuelwood and pulp plantations.

As the local CFs do not inform regarding irreversible extinctions caused by land use, regional and global CFs were also derived, using Countryside species-area relationship. In comparison

to previous approaches, improved ecological models, species habitat range and threat information were used in the assessment.

The new methods were applied to various case studies. First, the land use biodiversity impacts of 1 kg of bioethanol produced using six different feed stocks in different parts of the world are compared. It was found that sugarcane cultivation in Brazil resulted in higher global species extinctions as compared to maize from the USA or sugar beet from France.

Next, the new characterization factors were combined with high resolution spatial maps (inventory) of global crops, pasture and managed forests. The results reveal hotspots of land use driven biodiversity loss at a global scale as well as their particular drivers (agriculture or pasture or forestry). Moreover, the biodiversity impacts per kg of each of the 160 global crops from 250 countries are compared. Finally, the land use driven species extinctions embodied in international supply chains were assessed for the case of Swiss food consumption, demonstrating that imported impacts are 25-500 times larger than the impacts due to domestic agricultural land occupation. Cocoa, coffee and palm oil imports from Central America and SE Asia were identified as responsible for majority of imported impacts. The biodiversity impacts of 1 m³ of roundwood produced from natural managed and planted forests in 250 countries were also compared, concluding that wood from tropical areas had a particularly large impact, due to low timber yield in general and a large presence of vulnerable species.

In addition to assessing biodiversity impacts from land use, another gap in the LCA of the wood value chain was addressed and a new methodology was developed to incorporate human health impacts due to volatile organic compounds emitted from indoor wood products. The mass of each pollutant emitted into indoor compartment over the service life of common wooden products was modeled by statistically analyzing data from published chamber testing studies. The existing inventories of common indoor wood products which hitherto do not include these use phase emission data, were updated. The results show that the use-phase

human-toxicity impacts may be higher than those occurring during the rest of the product's life cycle and, hence, should not be neglected in LCA.

Finally, a discussion on the liaison of results with international agreements and goals, such as the *Aichi 2020* targets is carried out. Furthermore, the scientific achievements of the thesis are summarized, including improved globally operational impact assessment methodologies for land use and new insights on the hotspots of land use driven biodiversity loss, which can be useful for producing country to design mitigating measures. On the consumption side, reducing the volume of imported trade commodities that cause high species loss and raising consumers' awareness of the biodiversity damage caused by the products they buy can go a long way in reducing the existing rate of biodiversity loss. The findings provide further evidence to the theory of 'ecological unequal exchange' and recommends that the impacts 'hidden' in imported products must be included in any national accounting and sustainability assessments.

Zusammenfassung

Ökobilanzen (LCA) werden zunehmend verwendet, um die gesamten Umweltauswirkungen ("von der Wiege bis zur Bahre") zu bewerten, die ein Produkt oder Verfahren verursacht. Die Ergebnisse sind allerdings oft mit grossen Unsicherheiten behaftet aufgrund unvollständiger Inventare oder unterentwickelter Methoden zur Folgeabschätzung. Obwohl beispielsweise die anthropogen bedingten Landnutzungsänderungen zur Deckung der menschlichen Bedürfnisse in den meisten Ökosystemen die wichtigsten treibenden Faktoren für Biodiversitätsverluste darstellen, sind die entsprechenden Ökobilanz-Bewertungsmethoden noch im Anfangsstadium ihrer Entwicklung. Ebenso werden die möglichen gesundheitlichen Folgen der Schadstoffemissionen von Produkten in Innenräumen selten in Ökobilanzen berücksichtigt. Die beiden genannten Mängel sind besonders relevant, wenn es um die Beurteilung der Forstwirtschaft und ihrer Holzprodukte geht. Diese beiden Themenbereiche bilden den Schwerpunkt dieser Dissertation.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, verbesserte Verfahren zu entwickeln, um lokale, regionale und globale Biodiversitätsverluste durch Landbesetzungen und Landnutzungsänderungen zu quantifizieren, sowie die während der Nutzungsphase von Indoor-Holzprodukten auftretenden Emissionen zu berücksichtigen. Desweiteren sollen die neuen Methoden in Fallstudien angewendet werden, um relevante Schlussfolgerungen für die Holz-Wertschöpfungskette sowie die landwirtschaftliche Produktion abzuleiten

In einem ersten Schritt wurden die lokalen Charakterisierungsfaktoren (CF) für die Bewertung des waldfächennutzungsbezogenen Biodiversitätsverlustes abgeleitet durch eine kategorische Meta-Analyse mit Prüfung von 287 veröffentlichten Studien, welche 1008 paarweise Vergleiche des lokalen Artenreichtums in verwalteten und nicht verwalteten Wäldern machen. Ergebnisse zeigen, dass die Waldbewirtschaftungs-Typen wie folgt rangiert werden können vom besten (niedrige CF) zum schlechtesten (hohe CF): Auswahl- und Rückhaltesysteme,

Holzschlag mit reduzierten Auswirkungen, konventioneller selektiver Holzschlag, Kahlschlag, Agroforstwirtschaft, Holzplantage, Brennholz und Zellstoffplantagen.

Da die lokalen CF nichts aussagen über die Ausrottung von Arten durch Landnutzung, wurden durch ländliche Art-Areal-Beziehungen zusätzlich regionale und globale CF abgeleitet. Im Vergleich zu früheren Ansätzen wurden verbesserte ökologische Modelle, erweiterte artspezifische Habitatbereiche und differenziertere Informationen über Bedrohungsfaktoren verwendet.

Die neuen Methoden wurden in verschiedenen Fallstudien angewendet. Als erstes wurden die Biodiversitäts-Einflüsse von Landnutzungsänderungen, welche mit der Produktion von einem Kilo Bioethanol verbunden sind, untersucht, indem sechs verschiedene Kulturen in verschiedenen Teilen der Welt verglichen wurden. Die Resultate zeigen, dass Zuckerrohranbau in Brasilien zu einem höheren globalen Artensterben führt als Mais aus den USA oder Zuckerrüben aus Frankreich.

Als nächstes wurden die neuen Charakterisierungsfaktoren mit hochauflösenden räumlichen Karten (Inventar) von globalen Kulturen, Weiden und Wirtschaftswäldern kombiniert. Die Ergebnisse zeigen Hotspots von Biodiversitätsverlusten auf globaler Ebene, getrieben durch Landnutzungsänderungen, sowie deren Ursachen (Landwirtschaft, Weidehaltung oder Forstwirtschaft). Darüber hinaus wurden die Biodiversitäts-Auswirkungen von jedem der 160 globalen Kulturen in 250 Ländern pro kg Ertrag verglichen. Schließlich wurde das landnutzungsbedingte Artensterben von internationalen Lieferketten zur Deckung des Schweizer Nahrungsmittelkonsums untersucht. Es zeigte sich, dass die Einflüsse von importierten Waren 25 bis 500-mal größer sind als die Auswirkungen der Inlandproduktion. Kakao, Kaffee und Palmölimporte aus Zentralamerika und Südostasien wurden als hauptverantwortlich für die importierten Auswirkungen identifiziert. Ausserdem wurden die Biodiversitäts-Auswirkungen von 1 m³ Rundholz aus naturnah bewirtschafteten Wäldern

einerseits und aus angepflanzten Wäldern andererseits in 250 Ländern verglichen mit der Schlussfolgerung, dass Holz aus tropischen Gebieten eine besonders große Wirkung hatte, sowohl wegen der geringen Holzausbeute als auch wegen einer großen Anwesenheit von gefährdeten Arten.

Neben der Beurteilung der Biodiversität-Auswirkungen von Landnutzung wurde eine weitere Lücke in Ökobilanzen von Holzwertschöpfungsketten angegangen und eine neue Methodik entwickelt, um den Einfluss von flüchtigen organischen Verbindungen aus Holz-Produkten auf die menschliche Gesundheit zu untersuchen. Die Masse der jeweiligen Schadstoffe, die über die Lebensdauer von einer Auswahl gebräuchlicher Holzprodukte emittiert werden, wurde durch statistische Analyse von Daten aus veröffentlichten Studien mit Kammerversuchen modelliert. Die bestehenden Inventare von Holzprodukten in Innenräumen, welche bisher keine Emissionsdaten für die Nutzungsphase enthielten, wurden aktualisiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Human-Toxizität während der Nutzungsphase höher sein kann als diejenige während des übrigen Produktlebenszyklus und erstere daher in Ökobilanzen nicht vernachlässigt werden sollte.

Schließlich wird die Verknüpfung von Ergebnissen mit internationalen Vereinbarungen und Zielen wie z.B. den Zielen „Aichi 2020“ diskutiert. Darüber hinaus werden die wissenschaftlichen Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst, einschließlich der Verbesserung der globalen operativen Bewertungsmethoden über die Landnutzung und der neuen Erkenntnisse über die Hotspots landnutzungsbedingter Biodiversitätsverluste, welche für produzierende Länder Hinweise für Massnahmen zur Senkung der Biodiversitätsverluste liefern können. Auf Konsumentenseite können die Verringerung der Importe von Produkten, welche grosse Biodiversitätsverluste verursachen, sowie Konsumentensensibilisierung bezüglich der verursachten Schäden individueller Produkte wirksame Massnahmen sein, um die Biodiversitätsverluste in Zukunft zu verringern. Desweiteren liefern die Ergebnisse

Hinweise für die Theorie des "ungleichen ökologischen Austausches". Es wird empfohlen, die „versteckten“ Umweltauswirkungen von importierten Produkten in allen volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen und Nachhaltigkeitsbewertungen einzubeziehen.