



Doctoral Thesis

Framework and tools for regionalization in life cycle assessment

Author(s):

Mutel, Christopher L.

Publication Date:

2012

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007586392> →

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. 20604

**FRAMEWORK AND TOOLS FOR
REGIONALIZATION IN LIFE CYCLE ASSESSMENT**

DISSERTATION

submitted to

ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

by

CHRISTOPHER L. MUTEL

M.S., University of Iowa

born August 22, 1977

citizen of the United States of America

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Stefanie Hellweg, examiner
Prof. Dr. Michael Hauschild, co-examiner

2012

Abstract

Life cycle assessment (LCA) is a tool to calculate the environmental burdens of goods and services throughout their life cycle, and is an increasingly important tool for sustainability. Though it is well known that both technological production systems and the impact of environmental emissions change depending on their location, these spatial changes are rarely included in LCA calculations. Production systems vary for a number of reasons, including available technologies, political, social, and economic constraints, resource availability, and legacy infrastructure. Many categories of environmental damage have widely different impacts depending on the location of an emission or resource consumption, including acidification, eutrophication, freshwater consumption, ground-level ozone formation, human and ecotoxicity, land occupation and transformation, and noise. Regionalization, in the context of LCA, is therefore the inclusion of spatial variation at appropriate spatial scales in both technical systems and the calculation and assessment of the resulting impacts from emissions and resource consumption. Regionalization is important in LCA to more accurately model global economic and environmental systems, and the environmental impacts of goods and services.

A first step towards regionalization is outlined in *chapter two*, which proposes a simple methodology to use existing inventory datasets and site-dependent impact assessment methods. Databases such asecoinvent link production, use, and disposal datasets with a country or larger region, and many impact assessment methods also provide country-scale characterization factors. These can be linked with a simple mapping function, allowing for the continued use of matrix-based calculations, and therefore can be implemented in existing LCA software. A case study uses this new methodology to assess the environmental impacts of electricity production for most countries in Europe, using three different impact assessment methods. The site-generic characterization factors are calculated using the weighted relative emissions of each country, so the average site-dependent and site-generic LCA scores are quite similar. However, the site-dependent LCA gives much more detailed and accurate information for assessments on a country-scale, and explain the spatial pattern in environmental impact due to emissions. Depending on the impact category, the differences between site-generic and site-dependent emissions can vary by two orders of magnitude. Another conclusion from the case study is that inventory spatial assignments should be carefully chosen, as shown in the example of Norwegian offshore natural gas production being located within the country of Norway and therefore having very high acidification impacts.

A framework for regionalized LCA is described in *chapter three*, which forms the core of the thesis. Following traditional linear LCA, the technosphere and biosphere matrices, and the demand vector, can be used without change. Instead of a characterization vector or matrix, however, three matrices are used: first, to link inventory processes to inventory spatial units; second, to map the spatial support of impact assessment to the spatial support of the inventory using a geographic information system (GIS); third, to provide regionalized characterization factors. The inventory spatial support can have points, lines, and polygons, and can be of any resolution.

Detailed inventory spatial data can include spatial uncertainty, as shown in the case study of freshwater consumption and air emissions of thousands of individual electrical generating units in the United States of America. In this chapter's case study, multiple databases for different emissions of the same electrical plants were matched, and an empirical spatial uncertainty distribution was constructed from the differences in reported locations for the same plant in the different databases. The proposed regionalized methodology can include these spatial uncertainty distributions. The case study also showed that the importance of regionalization increases as the range of regionalized characterization factors increase, that data quality checks are especially

necessary in large regionalized inventory databases, and that each impact category will have its own spatial pattern of impacts.

Choosing a spatial scale for impact assessment is a difficult challenge. A good spatial scale will preserve significant changes in characterization factors from one location to the next, while minimizing the computation and comprehension burdens that come with too many spatial units. The minimization of a spatial statistic called global spatial autocorrelation is proposed as a method of systematically choosing a spatial scale, and applied to a disaggregated map of characterization factors for ecosystem damage due to freshwater consumption. The proposed method created a map of characterization factors with approximately the same number of spatial units as the watershed-based map, but with much less variation in characterization factors within each spatial unit.

The last step in LCA is interpretation of the results, and *chapter four* presents a sensitivity assessment method that can help improve and explain complex regionalized LCA systems. The sensitivity method has two steps: first, the method of elementary effects is used to identify the system parameters that have the highest global sensitivities. These parameters are then examined in the second step, which is the application of contribution-to-variance (CTV). CTV is a useful method because it is model-independent and it gives the relative contribution of each parameter to overall model variance. However, CTV calculations are relatively computationally expensive, and CTV cannot be found in any available LCA software. This inability to implement methods to identify the most sensitive parameters may be one of the reasons thorough uncertainty analysis is rarely performed. This new sensitivity method is necessary for regionalized LCA because regionalized LCA dramatically increases the number of parameters, and calls for uncertainty distributions for regionalized characterization factors, making CTV even less practical.

The two-step sensitivity assessment is applied to a case study of the land use impacts of cocoa production, and the resulting trade, value chains, and final consumption of cocoa. In the case study, uncertainty distributions are generated for regional characterization factors, relative cocoa masses in each commodity class, trade amounts, and country yields and cultivated areas. A Gaussian kernel density estimator was used to model regional characterization factors, as standard distributions did not provide a good fit to the available data. In the case study results, the parameters with highest contribution to variance were the characterization factors for cocoa farming land use in the Ivory Coast and Ghana, a conclusion that held for consumption in Switzerland, Japan, and the United States of America, in both 2000 and 2005.

This dissertation is the first to provide an operational framework and software to calculate regionalized LCA, including inventory spatial uncertainty, matching inventory and impact assessment spatial scales, and selection of impact assessment spatial scales. It also describes a methodology to integrate site-dependent inventories and impact assessment methods that share the same spatial support in current LCA software. The inclusion of many regionalized parameters and characterization factors need the new two-step sensitivity assessment method for the comprehension, analysis, and improvement of regionalized LCA models. Future research possibilities include better allocation when matching spatial scales, use of raster data, and inclusion of spatial relationships in the autocorrelation discretization calculations. In the short term, the framework and tools developed in this dissertation will be used and improved in several widespread research projects. New inventory databases, such as ecoinvent 3, will be regionalized, and there are a number of global, regionalized impact assessment methods already available. The framework in this thesis is therefore not an academic exercise, but one of the key components that will make regionalized LCA part of normal practice.

Zusammenfassung

Die Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) ist ein Werkzeug, um Umweltwirkungen von Gütern und Dienstleistungen über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg zu quantifizieren. Sie wird vermehrt zur Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit eingesetzt. Obwohl hinreichend bekannt ist, dass sowohl Produktionsbedingungen als auch Emissionen ortsabhängig sind, werden diese lokalen Gegebenheiten bisher kaum in LCAs berücksichtigt. Produktionssysteme variieren aufgrund einer Vielzahl von Faktoren, wie vorhandene Technologien, Infrastruktur, politische, soziale und ökonomische Rahmenbedingungen, sowie der Ressourcenverfügbarkeit. Zudem haben viele Emissionen und Ressourcennutzungen stark ortsabhängige Effekte. Dies betrifft z.B. Wirkungskategorien wie Versauerung, Eutrophierung, Wasserverbrauch, bodennahe Ozonbildung, Human- und Ökotoxizität, Landnutzung und Lärm. Regionalisierte LCAs sollten lokale Gegebenheiten in einer geeigneten räumlichen Auflösung sowohl für die technischen Prozesse als auch für die Berechnung und Bewertung der resultierenden Emissionen und des Ressourcenverbrauchs berücksichtigen. Regionalisierung von LCA ist notwendig, um globale ökonomische und ökologische Systeme und Umweltwirkungen von Gütern und Dienstleistungen korrekt abzubilden.

In Kapitel zwei wird ein erster Schritt in Richtung Regionalisierung von LCA beschrieben. Es wird eine einfache Methode zur Verwendung von bestehenden Sachbilanzdaten und ortsabhängigen (site-dependent) Methoden der Wirkungsabschätzung vorgeschlagen. Inventar-Datenbanken, wie ecoinvent, spezifizieren Datensätze für Herstellungs-, Gebrauchs- und Entsorgungsprozesse für Länder oder noch grössere geographische Einheiten. Ferner stellen einige Wirkungsabschätzungsmethoden länderspezifische Charakterisierungsfaktoren bereit. Beide können mithilfe einfacher Mapping-Funktionen miteinander verlinkt werden. Dabei können zur Berechnung weiterhin Matrizen verwendet werden, was eine Implementierung in bestehende LCA Software ermöglicht. Diese neue Methode wird in einer Fallstudie angewendet, welche die Stromerzeugung der meisten europäischen Länder für drei Wirkungsabschätzungsmethoden untersucht. Die ortsabhängigen Charakterisierungsfaktoren wurden auf Grundlage der gewichteten relativen Emissionen für jedes Land berechnet. Somit liegen die ortsabhängig und die nicht-ortsabhängig modellierten LCA-Ergebnisse relativ nahe beieinander. Jedoch liefert die ortsabhängig modellierte LCA weitaus detailliertere und präzisere Informationen für Untersuchungen auf Landesebene und vermag räumliche Muster der Umweltwirkungen aufgrund von Emissionen zu erklären. Je nach Wirkungskategorie, kann der Unterschied zwischen ortsabhängig und nicht-ortsabhängig modellierten Emissionen um zwei Größenordnungen auseinander liegen. Wie im Beispiel der Gasförderung von Norwegen veranschaulicht, zeigt die Fallstudie, dass bei der räumlichen Zuordnung der Inventare Vorsicht geboten ist. Die Förderung von Öl findet Offshore statt, wird aufgrund der Länderaggregation jedoch modelliert, als wenn sie innerhalb der norwegischen Landesgrenzen stattfinden würde und hat deshalb eine sehr starke Versauerung zur Folge.

In Kapitel drei wird ein Modell für eine regionalisierte LCA beschrieben, welches das Kernstück dieser Arbeit darstellt. Wie in der konventionellen Ökobilanz wird in diesem Modell die Sachbilanz mit Hilfe einer Verknüpfung der Technosphären- und Biosphärenmatrix und des Nachfragevektors berechnet. Anstelle eines Charakterisierungsvektors bzw. -matrix, kommen jedoch drei Matrizen zum Einsatz: Die erste Matrix verbindet die Inventare mit räumlichen Informationen; die räumlichen Einheiten können hierbei jegliche Auflösung und Form (Punkt, Linie oder Polygon) haben; die zweite Matrix ordnet die ortsabhängigen Charakterisierungsfaktoren den

räumlichen Inventaren zu; die dritte Matrix stellt die ortsabhängig modellierten Charakterisierungsfaktoren bereit.

Inventardaten können mit räumlichen Unsicherheiten behaftet sein. Dies wird anhand einer Fallstudie veranschaulicht, welche den Frischwasserverbrauch und die Luftemissionen von über 5000 Stromerzeugern in den USA untersucht. Es wurde eine empirische räumliche Unsicherheitsverteilung auf Grundlage der in Datenbanken unterschiedlich dokumentierten Kraftwerksstandorte erstellt. Das in dieser Dissertation erarbeitete Modell ist in der Lage, diese räumlichen Unsicherheitsverteilungen miteinzubeziehen. Die Fallstudie zeigt ausserdem, dass die Bedeutung einer regionalisierten Betrachtung mit zunehmender Streuung der ortsabhängigen Charakterisierungsfaktoren an Bedeutung gewinnt, dass eine Überprüfung der Datenqualität für grosse regionalisierte Inventardatenbanken besonders wichtig ist und dass jede Wirkungskategorie ihre eigene räumlichen Muster an Umweltwirkungen aufweist.

Die Wahl der räumlichen Auflösung für die Wirkungsabschätzung ist eine schwierige Aufgabe. Signifikante Unterschiede der Charakterisierungsfaktoren sollen erhalten bleiben, aber zugleich sollte der Rechenaufwand und somit die Anzahl der räumlichen Einheiten auf ein nötiges Mass begrenzt bleiben. Es wird daher eine Methode zur systematischen Wahl der räumlichen Auflösung vorgeschlagen: die Minimierung der räumlichen Autokorrelation (*global spatial autocorrelation*). Diese Methode wird in einem Beispiel angewendet, in welchem die optimale Anzahl und Grösse der örtlichen Bezugseinheiten von Charakterisierungsfaktoren für Frischwasserkonsum definiert werden sollen. Es resultiert eine Karte von Charakterisierungsfaktoren mit einer ähnlichen Anzahl von räumlichen Einheiten wie die konventionelle, auf Wassereinzugsgebieten beruhende Karte. Jedoch weisen die Charakterisierungsfaktoren innerhalb der neu gebildeten räumlichen Einheiten eine weitaus geringere Schwankung auf.

Der letzte Schritt einer Ökobilanz besteht in der Auswertung der Ergebnisse. Kapitel vier stellt eine Methode für Sensitivitätsanalysen vor, welche dabei hilft, komplexe regionalisierte LCAs zu verbessern und zu verstehen. Die Sensitivitätsmethode besteht aus zwei Schritten: Zunächst wird die „elementary effects“ Methode verwendet, um sensitive Parameter zu identifizieren, die vertieft analysiert werden sollten. Diese Parameter werden anschliessend im Hinblick auf ihren Anteil an der Gesamtvarianz untersucht (contribution-to-variance, CTV). CTV ist eine hilfreiche Methode, da sie modellunabhängig ist und den relativen Beitrag jedes Parameters zur Gesamtmodellvarianz liefert. Allerdings sind CTV-Berechnungen relativ rechenintensiv und bisher in keiner gängigen LCA Software implementiert. Diese fehlende Funktionalität, die sensitivsten Parameter einer LCA zu bestimmen, ist vermutlich einer der Gründe dafür, dass in der Praxis nur selten umfassende Unsicherheitsanalysen durchgeführt werden. Die zweistufige Methode ist notwendig, da sich die Anzahl der Parameter durch die Regionalisierung erheblich erhöht und eine Anwendung der CTV auf alle Parameter zu rechenintensiv wäre. Ein Vorteil der neuen Methodik ist, dass eine Berücksichtigung von Unsicherheitsverteilungen von Charakterisierungsfaktoren ermöglicht wird. Die zweistufige Sensitivitätsanalyse wird auf eine Fallstudie zur Auswirkung der Landnutzung von Kakaoherstellung und die resultierenden Handels- und Wertschöpfungsketten und den Endverbrauch von Kakao angewendet. In der Fallstudie werden Unsicherheitsverteilungen für regionale Charakterisierungsfaktoren, prozentualer Kakaoanteil jeder Rohstoffklasse, gehandelte Mengen, landesspezifische Erträge und Anbaufläche berechnet. Es wurde ein Gausscher Kerndichteschätzer verwendet, um regionale Charakterisierungsfaktoren zu modellieren, da Standardverteilungen keine gute Übereinstimmung zu den vorhandenen Daten lieferten.

Die Ergebnisse der Fallstudie zeigten, dass die Varianz der Umweltwirkungen von in der Schweiz, Japan und den USA im Jahr 2000 und 2005 konsumierten Kakaos vor allem durch die Charakterisierungsfaktoren für Landnutzung an der Elfenbeinküste und in Ghana bestimmt wird.

Diese Dissertation liefert erstmalig operationelle Methoden und Software zur Erstellung von regionalisierten LCAs. Hierbei können räumliche Inventar-Unsicherheiten berücksichtigt werden. Des Weiteren werden, Inventarflüsse und Wirkungsfaktoren mit unterschiedlicher geographischer Auflösung kombiniert, und es wird eine Methode bereitgestellt, eine optimale räumliche Auflösung für Wirkungsabschätzungsmethoden zu identifizieren. Weiterhin wurde eine Methode entwickelt, um Sachbilanzen und Wirkungsabschätzungsmethoden mit gleicher regionalen Auflösung zu kombinieren, was direkt in aktuellen LCA Softwares implementiert werden könnte. Die durch die Regionalisierung steigende Anzahl an Parametern in der LCA verlangt nach recheneffizienten Sensitivitätsanalysemethoden, die dazu beitragen, die LCA zu verstehen, zu analysieren und Verbesserungsmaßnahmen zu identifizieren. Eine solche Methode wird in der Dissertation entwickelt. Zukünftiger Forschungsbedarf besteht bezüglich einer verbesserten räumlichen Zuordnung von Inventardaten und Charakterisierungsfaktoren, der Verwendung von Rasterdaten und der Einbeziehung von räumlichen Abhängigkeiten bei der Autokorrelations-Diskretisierungs-Berechnung. Die in dieser Dissertation entwickelten Methoden und Tools werden in naher Zukunft bei mehreren breit abgestützten Forschungsprojekten zum Einsatz kommen und verbessert werden: Neue Sachbilanz-Datenbanken, wie ecoinvent v3, werden ortsabhängige Datensätze enthalten. Einige globale, örtlich differenzierte Methoden zur Wirkungsabschätzung stehen zur Verfügung. Bei den in dieser Arbeit entwickelten Methoden handelt es sich also nicht um eine akademische Übung, sondern vielmehr um Schlüsselemente, die es ermöglichen, Regionalisierung in Oekobilanzen in Zukunft als Standard zu etablieren.