



Doctoral Thesis

Enhancing regionalized analysis of water consumption and degradation in water footprint and life cycle assessment

Author(s):

Scherer, Laura

Publication Date:

2016

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010629464> →

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. 23430

**ENHANCING REGIONALIZED ANALYSIS OF WATER CONSUMPTION
AND DEGRADATION IN WATER FOOTPRINT AND LIFE CYCLE
ASSESSMENT**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

LAURA SCHERER
M.Sc., University of Göttingen
born on 08.02.1987
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Stefanie Hellweg, examiner
Dr. Stephan Pfister, co-examiner
Prof. Dr. Andrew Henderson, co-examiner

2016

ABSTRACT

Humankind is increasingly exerting pressure on our vital resource freshwater. Its consumption and degradation especially due to agricultural production and energy generation adversely affect ecosystems, human health and the economy. Its significance has recently been recognised in life cycle assessment (LCA), a tool to comprehensively quantify the environmental burdens of a good or service from “cradle to grave”; and regionalized methods have been developed to assess impacts of freshwater consumption. While chemical freshwater degradation such as eutrophication, acidification and ecotoxicity are traditional impact categories considered in LCA, they are mostly evaluated generically without any spatial differentiation. Flow alterations as physical degradation of freshwater have so far been neglected. This dissertation aims at enhancing the assessment of regionalized impacts by both, freshwater consumption and degradation, which combined form water footprints.

Impacts by water consumption are typically described by water scarcity indices (WSIs), which indicate the severity of water scarcity and the vulnerability to additional freshwater consumption. They are based on global hydrological and water use models and usually aggregated to watersheds. The WSIs were refined in a study on the Mississippi watershed (Chapter 2) which is one of the world’s largest river basins and covers multiple climate zones. In this study, water availability was simulated using the Soil Water Assessment Tool (SWAT) at the subbasin level. It enabled one to better understand the water balance, but manual calibration has proven to be tedious and therefore infeasible at the global scale. Nonetheless, global coverage is required for LCAs in our globalized world. With the emergence of a new multi-model ensemble from the European Earth2Observe project, the WSIs were subsequently updated globally (Chapter 3). The study confirmed that we are already living under water scarce conditions with a consumption-weighted average of monthly WSIs of 0.51 in 2001-2010. The severity was slightly increasing compared to 1981-1990 and this increase is rather driven by changes in water consumption than water availability.

Besides limited water quantity, reduced water quality also imposes pressure on water resources. Eutrophication, the result of excessive nutrient emissions especially of phosphorus, is considered the main global threat to freshwater quality. Existing characterization factors for freshwater eutrophication were complemented by phosphorus emissions to analyse the impacts of global crop production on biodiversity (Chapter 4). Phosphorus emissions can arise both from fertilizer application and from erosion of naturally occurring phosphorus. Erosion was identified as the dominant cause for phosphorus emissions to freshwater; nonetheless, depending on the location, any of the other processes can prevail. The resulting global and national emissions were found to be generally higher than estimates from ecoinvent – the most widely used life cycle inventory database. In addition to pollution, water can also be degraded by flow alterations and a method was developed to account for adverse impacts by reduced as well as increased river discharge on aquatic ecosystems (Chapter 6).

Trade-offs between water consumption and degradation were analysed in case studies on Swiss food consumption (Chapter 5) and global hydropower generation (Chapter 6). To assess the impacts of Swiss food consumption (Chapter 5), LCA was coupled with trade data from the Swiss customs, Exiobase as a multi-regional input-output database and the FAO. The results showed that products and countries rank differently when it comes to water consumption, phosphorus emissions, water deprivation and biodiversity loss, but that Switzerland overwhelmingly outsources the environmental

impacts related to all categories. Concerning hydropower generation, water footprints were calculated for ~1500 globally distributed plants (Chapter 6), based on their design (especially the area-to-electricity ratio), their main purpose, and local environmental conditions. The results indicated that previous studies mostly overrated the impacts of hydropower on water scarcity which can even be beneficial, but that flow alterations affect the environment more than water consumption.

The analyses carried out during this thesis highlight the importance of a fine resolution. This is evidenced by the spatial heterogeneity of water scarcity in the Mississippi river basin that is masked at the watershed level (Chapter 2), but also by the spatial variability in phosphorus emissions by crop production (Chapter 4) and water footprints of hydropower generation (Chapter 6). Contribution-to-variance analysis proved that regionalization is important for both, inventory data and impact characterization factors (Chapter 4). Likewise, a fine temporal resolution is important. Annual WSIs underestimated impacts compared to monthly WSIs (Chapter 2 and 3) and only the finer resolution allowed to account for benefits of storing water in hydropower reservoirs and to evaluate flow alterations in terms of reduced as well as increased runoff (Chapter 6).

While site-specific assessments increase the accuracy of LCA results, they still entail high uncertainties due to the simplified conceptualisation of environmental processes in global models. Performance and uncertainties of such models are rarely reported, which impedes the evaluation of how significant the differences in impacts between two products, two locations or two time periods are. The magnitude of such uncertainties was exemplified with the Mississippi watershed that contains a high density of discharge gauges (Chapter 2). Monte Carlo simulations using latin hypercube sampling showed the large variation among global models and the resulting high uncertainties (Chapter 3). Sensitivity analyses demonstrated further uncertainties in input parameters for modelling phosphorus emissions (Chapter 4) and water footprints of hydropower (Chapter 6), and in tracing trade origins (Chapter 5). Such uncertainties should be communicated transparently. Likewise, this thesis advocates multi-criteria model evaluation (Chapter 2) as no universal performance indicator exists.

Concluding, this dissertation enhanced regionalized life cycle impact assessment of water consumption and degradation. Integrated into a LCA framework, the compiled inventory data and developed impact assessment methods contribute to improving environmental decision-making; for instance, choosing between product alternatives, selecting sites for agricultural and energy-related activities, and setting priorities for more detailed studies in identified hotspots or for the implementation of sustainability measures.

ZUSAMMENFASSUNG

Menschen üben zunehmend Druck auf die lebenswichtige Ressource Süßwasser aus. Ihr Konsum und ihre Degradierung, besonders aufgrund von Agrarproduktion und Energieerzeugung, wirken sich negativ auf Ökosysteme, die Gesundheit und die Wirtschaft aus. Ihre Bedeutung wurde kürzlich in Ökobilanzen (Lebenszyklusanalysen, LZA) anerkannt, welche die Umweltschäden eines Produkts oder einer Dienstleistung “von der Wiege zur Bahre” quantifizieren, und regionalisierte Methoden wurden entwickelt, um die Auswirkungen von Wassernutzung zu bewerten. Während die Verschmutzung von Süßwasser, wie beispielsweise Eutrophierung, Versauerung und Ökotoxizität, gewöhnlich in LZA berücksichtigt werden, werden sie selten räumlich differenziert betrachtet. Änderungen des Abflussregimes werden bisher vernachlässigt. Diese Dissertation setzt sich zum Ziel, die regionalisierte Bewertung von Wassernutzung und -degradierung, deren gemeinsame Auswirkungen den Wasserfußabdruck bilden, weiterzuentwickeln.

Auswirkungen von Wasserkonsum werden gewöhnlich über Wasserknappheitsindizes (WKIs) beschrieben, welche das Ausmass der Wasserknappheit und die Verwundbarkeit durch zusätzliche Wassernutzung offenlegen. Sie basieren auf globalen Modellen zur Hydrologie und Wassernutzung und werden häufig zu Einzugsgebieten aggregiert. Die WKIs wurden in einer Studie zum Einzugsgebiet des Mississippi verbessert (Kapitel 2), welches eines der weltweit grössten Einzugsgebiete ist und mehrere Klimazonen umfasst. In dieser Studie wurde Wasserverfügbarkeit mithilfe des Soil Water Assessment Tools (SWAT) auf Teileinzugsgebietsskala simuliert. Dies ermöglichte ein besseres Verständnis des Wasserkreislaufs. Jedoch hat sich die manuelle Kalibrierung als langwierig und daher auf globaler Skala als unausführbar erwiesen. Dennoch ist aufgrund unserer globalisierten Welt eine globale Abdeckung in LZA erforderlich. Nachdem mit dem europäischen Projekt Earth2Observe ein neues Multi-Modell erschienen ist, wurden die WKIs global aktualisiert (Kapitel 3). Die Studie hat bestätigt, dass wir mit einem konsumgewichteten Mittelwert der monatlichen WKIs von 0.51 in 2001-2010 bereits unter wasserknappen Bedingungen leben. Im Vergleich zu 1981-1990 bedeutet dies eine leichte Zunahme, welche eher durch Änderungen im Wasserkonsum als in der Wasserverfügbarkeit hervorgerufen wurde.

Neben einer begrenzten Wassermenge kann auch eine verminderte Wasserqualität Druck auf Wasserressourcen ausüben. Global gesehen gilt Eutrophierung als Folge der übermässigen Emissionen von Nährstoffen und besonders Phosphor als die am weitesten verbreitete Beeinträchtigung der Süßwasserqualität. Existierende Charakterisierungsfaktoren für die Eutrophierung von Binnengewässern wurden durch Phosphoremissionen ergänzt, um die Auswirkungen des globalen Anbaus von Kulturpflanzen auf die Biodiversität zu analysieren (Kapitel 4). Phosphoremissionen können durch Düngereinsatz, aber auch durch die Erosion von natürlich vorkommendem Phosphor hervorgerufen werden. Im Allgemeinen wurde Erosion als die primäre Ursache für Phosphoremissionen in Süßwasser identifiziert, jedoch können je nach Standort auch andere Prozesse dominieren. Im Vergleich zur meist genutzten Sachbilanzdatenbank Ecoinvent sind die globalen und nationalen Ergebnisse dieser Studie generell höher. Neben Verschmutzung können auch Änderungen des Abflussregimes Wasser degradieren und eine Methode wurde entwickelt, um Auswirkungen von verminderten sowie erhöhten Abflüssen auf aquatische Ökosysteme zu berücksichtigen (Kapitel 6).

Abwägungen zwischen Wasserkonsum und –degradierung wurden in Fallstudien über Schweizer Nahrungsmittelkonsum (Kapitel 5) und globale Wasserkrafterzeugung (Kapitel 6) analysiert. Um die Auswirkungen des Schweizer Nahrungsmittelkonsums zu bewerten (Kapitel 5), wurde die LZA mit Handelsdaten des Schweizer Zolls, von Exiobase als multi-regionale Input-Output-Datenbank und von FAO gekoppelt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Rangfolge der Produkte und Länder für Wasserkonsum, Phosphoremissionen und die resultierenden Auswirkungen unterscheidet, aber dass die Schweiz in allen Fällen Umweltauswirkungen stark auslagert. Hinsichtlich Wasserkrafterzeugung wurden für ~1500 global verteilte Kraftwerke Wasserfussabdrücke berechnet (Kapitel 6), die auf deren Bauweise (vor allem dem Verhältnis von Fläche zu Elektrizität), den lokalen Umweltbedingungen und dem Hauptzweck der zugehörigen Reservoirs basieren. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass vorherige Studien die Auswirkungen von Wasserkraft auf Wasserknappheit meistens überschätzt haben und sogar vorteilhaft sein können, aber dass Änderungen des Abflussregimes die Umwelt mehr beeinträchtigen als Wasserverbrauch.

Die Analysen innerhalb dieser Dissertation verdeutlichen, wie wichtig eine hohe Auflösung ist. Dies zeigt sich in der räumlichen Variabilität der Wasserknappheit im Einzugsgebiet des Mississippi (Kapitel 2), der Phosphoremissionen durch Pflanzenanbau (Kapitel 4) und der Wasserfussabdrücke von Wasserkraftwerken (Kapitel 6). Weitere Analysen haben nachgewiesen, dass sowohl Sachbilanzdaten wie auch Charakterisierungsfaktoren stark zur räumlichen Variabilität der Auswirkungen beitragen und somit Regionalisierung in beiden Fällen wichtig ist (Kapitel 4). Zudem ist auch eine hohe zeitliche Auflösung wichtig. Jährliche WKIs unterschätzen die Auswirkungen im Vergleich zu monatlichen (Kapitel 2 und 3) und nur eine höhere Auflösung ermöglichte Nutzen für das Speichern von Wasser anzurechnen und Änderungen des Abflussregimes auch für erhöhte Abflüsse zu evaluieren (Kapitel 6).

Während standortspezifische Bewertungen die Genauigkeit von LZA-Ergebnissen erhöht, beinhalten sie dennoch hohe Unsicherheiten aufgrund der Abstraktion von Umweltprozessen in globalen Modellen. Die Modellgüte und Unsicherheiten werden selten berichtet, was die Beurteilung erschwert, wie signifikant die Unterschiede in den Auswirkungen zwischen zwei Produkten, Standortorten oder Zeitabschnitten sind. Das Ausmass der Unsicherheiten wurde durch das Beispiel des Mississippi-Einzugsgebietes gezeigt, das durch eine hohe Dichte an Abflusspegeln gekennzeichnet ist (Kapitel 2). Monte-Carlo-Simulationen mittels Latin-Hypercube-Stichprobenverfahren haben die hohe Variabilität unter globalen Modellen und die resultierenden hohen Unsicherheiten aufgezeigt (Kapitel 3). Sensitivitätsanalysen haben auf weitere Unsicherheiten hingedeutet, die mit Eingangsparametern zur Modellierung von Phosphoremissionen (Kapitel 4) und Wasserfussabdrücken von Wasserkraft (Kapitel 6) sowie mit dem Zurückverfolgen von Handelsursprüngen (Kapitel 5) verbunden sind. Solche Unsicherheiten sollten offen kommuniziert werden. Zudem empfiehlt es sich Modelle nach mehreren Kriterien zu bewerten (Kapitel 2), da es kein allgemeingültiges Gütemass gibt.

Zusammenfassend hat diese Dissertation die regionalisierte Wirkungsabschätzung von Wassernutzung und -degradierung verbessert. Die neuen Sachbilanzdaten und Wirkungsabschätzungsmethoden unterstützen im Rahmen einer Ökobilanz die Entscheidungsfindung. Sie helfen dabei, zwischen alternativen Produkten oder Standorten zu wählen und Prioritäten für Detailstudien oder Nachhaltigkeitsmassnahmen zu setzen.

RESUMEN

La humanidad está ejerciendo presión sobre nuestro recurso vital agua dulce. Su consumo y degradación – sobre todo por la producción agrícola y la generación de energía – afectan negativamente ecosistemas, la salud humana y la economía. Su importancia ha sido reconocida sólo recientemente en Análisis del Ciclo de Vida (ACV), una herramienta para cuantificar daños ambientales de un producto o un servicio “de la cuna a la tumba”; y métodos regionalizados han sido desarrollados para evaluar diversos impactos del consumo de agua dulce. A pesar de que la degradación química del agua dulce, tal como eutrofización, acidificación y ecotoxicidad, ya es considerada entre las categorías de impacto tradicionales en ACV, la mayoría de las veces es evaluada sin diferenciación espacial. Alteraciones del caudal, como degradación física del agua dulce, han sido hasta ahora ignoradas. Esta disertación tiene como objetivo mejorar la evaluación regionalizada de impactos del consumo y degradación de ella, ambos representados por la denominada huella hídrica.

Los impactos del consumo de agua son comúnmente representados por medio de índices de escasez de agua (IEAs), los cuales indican la severidad de la escasez de ella y la vulnerabilidad de su consumo adicional. Los índices, basados en modelos globales de hidrología y uso de agua, son normalmente expresados en la escala de cuencas. Estos IEAs han sido refinados en un estudio sobre la cuenca del Mississippi (Capítulo 2), una de las cuencas más grandes del mundo, abarcando múltiples zonas climáticas. En el estudio, la disponibilidad del agua fue simulada con el Soil Water Assessment Tool (SWAT) al nivel de subcuencas, para así comprender mejor el balance hidrológico. En un mundo globalizado como el nuestro, la cobertura mundial de ACV es necesaria; sin embargo, la calibración manual del modelo resultó impráctica, y por lo tanto imposible a nivel global. Con la aparición de un nuevo sistema multimodal del proyecto europeo Earth2Observe, los IEAs han sido actualizados globalmente (Capítulo 3). El estudio del capítulo 3 confirmó que ya vivimos en condiciones escasas de agua con un promedio ponderado en el consumo de IEAs mensuales de 0.51 en 2001-2010. La severidad del problema ha aumentado ligeramente en comparación con 1981-1990 debido al cambio del consumo de agua, y no a su disponibilidad.

No solamente una cantidad limitada de agua, sino también una reducción en su calidad puede ejercer presión sobre los recursos hídricos. Eutrofización – el resultado de emisiones excesivas de nutrientes, especialmente de fósforo – es considerada globalmente la mayor amenaza a la calidad de agua. Los indicadores existentes de caracterización para la eutrofización de agua dulce, fueron complementados por emisiones de fósforo para evaluar los impactos de la producción global de cultivos a la biodiversidad (Capítulo 4). Las emisiones de fósforo pueden originarse del uso de fertilizantes, así como también de la erosión de fósforo natural. Los resultados identificaron a la erosión como la causa dominante de emisiones de fósforo al agua dulce, pero – dependiendo de la ubicación – se encontró que también otros procesos pueden dominar. Las estimaciones globales y nacionales resultaron ser generalmente más altas que los valores enecoinvent, la base de datos de inventario más usada. Dado que – además de la contaminación – las alteraciones del caudal también degradan el agua, un método fue desarrollado para considerar los impactos negativos por un caudal reducido o aumentado en ecosistemas acuáticos (Capítulo 6).

Dos casos de estudio: uno sobre la alimentación en Suiza (Capítulo 5), y otro sobre la producción mundial de hidroelectricidad (Capítulo 6), analizan y comparan el consumo y la degradación de agua

dulce. Para evaluar los impactos de alimentación suiza (Capítulo 5), ACV fue combinado con datos de comercio de la aduana suiza, de Exiobase (como fuente de datos de insumo-producto multiregional) y de la FAO. Los resultados indican que productos y países se clasifican diferente en cuanto a consumo de agua, emisiones de fósforo, privación del agua y pérdida de biodiversidad; pero claramente concluyen que Suiza externaliza la gran mayoría de sus impactos ambientales en todas las categorías. En cuanto a hidroelectricidad, las huellas hídricas fueron calculados para ~1500 plantas en todo el mundo (Capítulo 6). Los cálculos fueron basados en el diseño de las plantas (sobre todo, la relación entre el área y la electricidad), las condiciones ambientales y el propósito principal del depósito asociado. Los resultados indican que estudios anteriores sobreestiman los impactos de hidroelectricidad sobre escasez de agua la mayoría de las veces (los cuales pueden resultar aún beneficiosos), pero que alteraciones del caudal tienen un impacto ambiental mayor que el consumo de agua.

Los análisis de esta tesis destacan la importancia de una alta resolución; así lo demuestran la heterogeneidad espacial de escasez de agua en la cuenca del Mississippi (Capítulo 2), las emisiones de fósforo por la producción de cultivos (Capítulo 4) y las huellas hídricas de hidroelectricidad (Capítulo 6). Otros análisis prueban que tanto los datos del inventario como los indicadores de caracterización contribuyen a la variabilidad espacial de los impactos; demostrando así la importancia de regionalización en ambos casos (Capítulo 4). Por otro lado, se concluye que una resolución temporal fina es importante. Mientras los IEAs anuales subestiman los impactos en comparación con los IEAs mensuales (Capítulo 2 y 3), solamente una resolución más fina permite considerar los beneficios de almacenar agua en depósitos y evaluar las alteraciones del caudal, ya sean reducciones o incrementos (Capítulo 6).

Si bien, evaluaciones específicas del sitio aumentan la exactitud de los resultados de ACV, su uso implica una alta incertidumbre debido a la conceptualización simplificada de procesos ambientales en modelos globales. El rendimiento y las incertidumbres de estos modelos son escasamente reportados, lo que dificulta la evaluación de las diferencias de impactos entre dos productos, lugares o períodos. La escala de estas incertidumbres fue ejemplificada para la cuenca del Mississippi, que contiene una alta densidad de fluviómetros (Capítulo 2). Simulaciones de Monte Carlo usando el muestreo Latin Hypercube muestran la gran variabilidad entre modelos globales y sus resultantes altas incertidumbres (Capítulo 3). Análisis de sensibilidad mostraron incertidumbres adicionales en parámetros de entrada para modelar emisiones de fósforo (Capítulo 4) y huellas hídricas de hidroelectricidad (Capítulo 6), así como también para rastrear la procedencia original de productos (Capítulo 5). Estas incertidumbres deberían ser claramente comunicadas. Además, dada la falta de un indicador universal, esta tesis aboga la evaluación de modelos con criterios múltiples (Capítulo 2).

En conclusión, esta disertación mejoró la evaluación regionalizada del impacto del ciclo de vida del consumo y de la degradación del agua dulce. Integrados en un marco de ACV, los datos compilados y los métodos de evaluación de impactos desarrollados mejoran la toma de decisiones, ayudan a elegir entre productos alternativos, a seleccionar sitios para actividades agrícolas o energéticas, a priorizar el desarrollo de estudios más detallados en focos críticos identificados, y a la implementación de medidas sostenibles.