Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung

Schlussbericht vom 20. August 2016

Inventare zur Biomasse-Behandlung

Transfer in ecoinvent 3

carbotech
Umweltprojekte und Beratung

Datum: 20. August 2016

Ort: Zürich/Grenchen

Auftraggeberin:
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft AWEL, Walchetor, 8090 Zürich

Auftragnehmer/in:
Carbotech AG
Postfach, CH-4002 Basel
www.carbotech.ch

UMWEKO GmbH
Weinbergstrasse 46, CH-2540 Grenchen
www.umweko.ch

Autor/in:
Mischa Zschokke, Carbotech AG, m.zschokke@carbotech.ch
Konrad Schleiss, UMWEKO GmbH, k.schleiss@bluewin.ch

BFE-Bereichsleitung: Sandra Hermle, sandra.hermle@bfe.admin.ch
BFE-Programmleitung: Sandra Hermle, sandra.hermle@bfe.admin.ch
BFE-Vertragsnummer: SI/501279-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvertrags Nr. 154348 des Bundesamtes für Energie wurden durch die UMWEKO GmbH und Carbotech AG verschiedene Forschungsfragen rund um die Verwertung von biogenen Abfällen innerhalb der Schweiz untersucht. Die Schwerpunkte des Projektes lagen bei den Emissionen von Kompostierung und Vergärung, der Bewertung der organischen Substanz zur Humusbildung und die Schwermetallgehalte in Kompost und Gärgut. Die Resultate dieses Projektes sollten ursprünglich alle in ecoinvent Version 3 überführt werden und damit einem grösseren Interessenkreis zur Verfügung gestellt werden. Da einige der zentralen Fragen im Zusammenhang mit diesem Transfer leider nicht mehr im Zeitrahmen des Projektes geklärt werden konnten, musste der Transfer der Daten in obigem Projekt zurückgestellt werden. Entsprechende Version 2 Inventare wurden jedoch nach Abschluss der Arbeiten auf der Homepage www.lc-inventories zur Verfügung gestellt. Auf diese Weise konnten die Erkenntnisse und Resultate des Forschungsprojektes dennoch der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt werden.

Mit der vorliegenden Arbeit werden nun die bestehenden Prozesse erneut aktualisiert und anschliessend in ecoinvent Version 3 migriert werden. Zusätzlich soll der vorliegende Hintergrundbericht die Dokumentation der durchgeführten Schritte gewährleisten und die Abläufe transparent halten.

Die neuen Anforderungen von ecoinvent Version 3 für die bestehenden ecoinvent Version 2-Prozesse wurden abgeklärt und in Zusammenarbeit mit dem ecoinvent Centre bereinigt. Zusätzlich wurden vorgängig Diskussionen mit potentiellen Reviewern aus den jeweiligen Bereichen (Landwirtschaft/biogenen Abfälle sowie Entsorgung) durchgeführt um den anstehenden Review-Prozess möglichst effizient zu gestalten.

Folgende Prozesse sind in ecoinvent Version 3 eingegeben worden:

- **Thermophile Feststoffvergärung von biogenen Abfällen**
- **Industrielle Kompostierung von biogenen Abfällen**

Gemäss den Richtlinien von ecoinvent Version 3 wurden jeweils pro Prozess ein Schweizer und ein globaler Datensatz erstellt. Dabei wurden das Produktionsvolumen sowie die zugehörigen Unsicherheiten entsprechend angepasst.

Die Verarbeitungs-Prozesse nehmen als Ressource jeweils biogene Abfälle (biowaste) an, als Produkte fallen Biogas und Gärgut, respektive Kompost an.

Bei der Dokumentation der Prozesse wurde darauf geachtet, dass die Informationen so weit als möglich in sich vollständig und abgeschlossen sind und keine weiteren externen Quellen zum grundsätzlichen Verständnis notwendig sind.

Zur Beurteilung der stofflichen Nutzung von biogenen Abfällen wird eine neue Eigenschaft für die Nutzung in ecoinvent Version 3 hergeleitet, die sogenannten „Humus equivalents“:

Name	Unit	Type
compost	kg	2 - ByProduct/Waste

Name	Variable Name	Unit	Comment	Amount
humus equivalent	humus_eq	kg	Humus building fraction expressed in kg per	0.061
nitrogen content	N_content	dimen...	nitrogen content on a dry matter basis	0
concentration, cadmium	concentration_Cd	kg/kg		fx 1.532E-07
concentration, calcium	Ca_concentration	kg/kg	calcium content on a fresh matter basis	fx 0.0266

¨Abbildung 1:Humus equivalents als „exchange property“ innerhalb des ecoeditors

Die Bewertung von Schwermetalleinträgen im Boden durch biologische Verwertungsverfahren konnte im Rahmen dieses Projektes nicht ausführlich behandelt werden, wird aber in der integrierten Prozess-Dokumentation von ecoinvent gewürdigt.

Die Berücksichtigung der organischen Substanz konnte realisiert werden, die entsprechenden Bewertungsmethoden oder auch Märkte, welche diese Substanz berücksichtigen, stehen allerdings noch aus.

Da der Review zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen ist, sind nicht alle der hier aufgeführten Aussagen als endgültig zu betrachten. Namentlich konnten die fertig berechneten Prozesse und alloziierten LCIA-Inventare noch keiner Qualitätssicherung unterzogen werden, da die entsprechenden Berechnungen von Seiten des ecoinvent centres noch ausstehend sind.

Abstract

In the framework of the research contract no. 154348 of the Swiss Federal Office of Energy, UMWE-KO GmbH and Carbotech AG previously examined different research questions on the management of biogenic waste in Switzerland. The focus of the project was on emissions during composting and anaerobic digestion, on assessing organic matter with respect to humus formation, as well as on heavy metal contents in compost and biowaste. The results of this study were initially planned to be transferred into ecoinvent version 3 and, by this, to become accessible for the interested public. Unfortunately, several central issues regarding this transfer could not be clarified in the given time frame of the project and the data transfer had to be postponed. Instead, the project was completed by uploading the corresponding ecoinvent version 2 inventories on the platform www.lc-inventories, so that the findings and results of the research project would be publicly available.

In the present study, the existing processes are being updated again and subsequently migrated into ecoinvent version 3. In addition, this background report is providing a transparent documentation of the steps that are being carried out.

The new requirements for the update of existing ecoinvent version 2 processes to ecoinvent version 3 were addressed and adjusted with the help of the ecoinvent Centre. Furthermore, prior discussions took place with potential reviewers from the respective specialised fields (agriculture, biogenic waste, and disposal) in order to ensure that the upcoming review process would be as efficient as possible.

The following processes were generated in ecoinvent version 3:

- **Thermophilic solid-state anaerobic digestion of biogenic waste**
- **Industrial composting of biogenic waste**

According to the guidelines of ecoinvent version 3, both a global and a Swiss dataset were generated for each process by adapting the production volume as well as the respective uncertainty levels.

In the processing chain, used resources were defined to be biogenic waste (biowaste) and products were defined to be biogas and digestate, respectively compost.

As far as possible care was taken in the documentation of the processes to present information in a way that it is complete in itself and its basic understanding does not require any additional external references.

In order to assess the material use of biogenic waste, a new property called “humus equivalents” was developed in ecoinvent version 3.

Name	Unit	Type
compost	kg	2 - ByProduct/Waste

Name	Variable Name	Unit	Comment	Amount
humus equivalent	humus_eq	kg	Humus building fraction expressed in kg per	0.061
nitrogen content	N_content	dimen...	nitrogen content on a dry matter basis	0
concentration, cadmium	concentration_Cd	kg/kg		1.532E-07
concentration, calcium	Ca_concentration	kg/kg	calcium content on a fresh matter basis	0.0266

Figure 1: Humus equivalents as an „exchange property“ within ecoeditor

Heavy metal inputs into the soil resulting from biological recovery operations could not be assessed in depth during this project. It is however addressed in the integrated process documentation of ecoinvent.

Organic matter was taken into consideration. The corresponding assessment methods or markets that consider this substance however still need to be implemented.

Since the review process is presently not completed, the statements in this report cannot all be considered as final. Namely for the calculations of the processes as well as the allocated LCIA-inventories, no quality control was performed yet due to the fact that the corresponding calculations on behalf of the ecoinvent Centre are still pending.

Abkürzungsverzeichnis

C_{org}	Organischer Kohlenstoff
GWP	Global Warming Potential
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LCA	Life Cycle Assessment
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
OS	Organische Substanz
TOC	Total Organic Carbon
UBP	Umweltbelastungspunkte

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **3**

Abstract **5**

Abkürzungsverzeichnis **7**

Inhaltsverzeichnis **8**

1. Ausgangslage **9**

1.1. Rückblick auf FP Biomasse des BfE 9
1.2. Version 2 Inventare 10

2. Ziel der Arbeit **11**

3. Grundlagen – Rahmenbedingungen **11**

3.1. Datentransfer 11
3.2. Beurteilung der stofflichen Nutzung von biogenen Abfällen 11
3.2.1. Problemstellung 11
3.2.2. Gutschrift von organischer Substanz in Kompost und Gärgut in der Praxis 12
3.2.3. Monetäre Bewertung der Humusreproduktion von Kompost und Gärgut 13
3.2.4. Integration der Elemente in die Ökobilanz 14
3.2.5. Umsetzung in ecoinvent Version 2 17
3.2.6. Umsetzung in ecoinvent Version 3 17
3.3. Bewertung von Schwermetalleinträgen im Boden durch biologische Verwertungsverfahren 18

4. Eingabe in ecoinvent **19**

4.1. Anforderungen an ecoinvent-Inventare 19
4.2. Berücksichtigung organischer Substanz – Humus equivalents 19
4.2.1. Handhabung der Schwermetalle 21
4.3. Prozesse 22
4.3.1. Treatment of biowaste, anaerobic digestion 23
4.3.2. Treatment of biowaste, industrial composting 26

5. Ergebnisse / Erkenntnisse **28**

6. Ausblick **28**

7. Referenzen **29**

1. Ausgangslage

1.1. Rückblick auf FP Biomasse des BfE

Im Rahmen des Forschungsvertrags Nr. 154348 des Bundesamtes für Energie wurden durch die UMWEKO GmbH und Carbotech AG verschiedene Forschungsfragen rund um die Verwertung von biogenen Abfällen innerhalb der Schweiz mittels verschiedener Methoden untersucht.

Verschiedene Möglichkeiten um den Humus in Ökobilanzen zu bewerten wurden evaluiert, weiterentwickelt und mit internationalen Experten diskutiert. Für die Kompostierung und die Vergärung wurde die elementare Zusammensetzung der biogenen Abfälle überprüft und auch der Wassergehalt der verschiedenen Abfälle plausibilisiert. Aufgrund der Analysewerte konnte auch der Gehalt an organischer Substanz in den Produkten hochgerechnet werden.

Folgende Schwerpunkte wurden in dieser Arbeit behandelt:

- Emissionen bei der Kompostierung und Vergärung
  Messwerte aus verschiedenen Forschungsprojekten wurden zusammen mit einem internationalen Expertengremium diskutiert und evaluiert, so dass verlässliche Emissionsfaktoren vorliegen. Vor allem die Methanemissionen liegen sowohl für die Vergärung wie auch für die Kompostierung wesentlich tiefer als die bis heute in Ökoinventaren verwendeten Werte.

- Bewertung der organischen Substanz von Kompost und Gärgut zur Humusbildung
  Je weiter die Kompostierung fortschreitet, um so weniger organische Substanz bleibt übrig, hingegen steigt die Resistenz gegen schnellen Abbau, das heisst, es entsteht vermehrt Dauerhumus. Ein wichtiger Teil der Arbeit bestand auch darin, den Nutzen des Dauerhumus zu beschreiben und die verschiedenen Wirkungen (Wasserhaltekapazität, Erosionsschutz, Bodenbiodiversität etc.) zu diskutieren. Weil viele dieser Aspekte nicht leicht quantifizierbar sind, wurde der Ansatz der Ersatzbeschaffung gewählt. Für die landwirtschaftliche Anwendung wurde auf der Stroheinarbeitung zur Humuserhaltung gerechnet. Die gärtnerische Kompostanwendung würde aus ökologischen Gründen vermehrt auf Torfeinsparung setzen und mit reifen Komposten geeignete Mischungen herstellen.
  So konnte ein Verfahren gefunden werden, mit dem die organische Substanz im Kompost oder Gärgut in Ökobilanzen bewertet werden kann. Die Berechnungen haben gezeigt, dass die Berücksichtigung der organischen Substanz einen relevanten Einfluss auf das Resultat hat.

- Schwermetalle im Kompost und Gärgut
  Bei der Bewertung von Schwermetallen hat sich gezeigt, dass grosse Unsicherheiten auftreten. Je nach Bewertungsmethode dominieren die Schwermetallemissionen die gesamte Bilanz. Eine Überarbeitung der Methoden beziehungsweise der entsprechenden Inventare ist aus unserer Sicht notwendig. Diesbezüglich wurden einige Ansätze vorgestellt.

Die obigen Erkenntnisse sollten alle in ecoinvent Version 3 überführt werden und damit einem grösseren Interessenkreis zur Verfügung gestellt werden. Da einige der zentralen Fragen im Zusammenhang mit diesem Transfer leider nicht mehr im Zeitrahmen des Projektes geklärt werden konnten, musste der Transfer der Daten in obigem Projekt zurückgestellt werden.

1.2. Version 2 Inventare

Die fertig gestellten Inventare im Format von ecoinvent Version 2 wurden auf der Homepage www.lc-inventories zur Verfügung gestellt. Auf diese Weise konnten die Erkenntnisse und Resultate des Forschungsprojektes dennoch der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt werden.

2. Ziel der Arbeit

Die im erwähnten Forschungsprojekt erarbeiteten Daten sollen nun im Rahmen des aktuellen Projektes einerseits erneut aktualisiert und anschliessend in ecoinvent Version 3 migriert werden.

Zusätzlich soll der vorliegende Hintergrundbericht die Dokumentation der durchgeführten Schritte gewährleisten und die Abläufe transparent halten.

3. Grundlagen – Rahmenbedingungen

3.1. Datentransfer

Die folgenden Kapitel sowie Kapitel 4 liefern jeweils eine Übersicht zu den einzelnen Problemfeldern und deren Umsetzung bei der Migration in ecoinvent 3.

3.2. Beurteilung der stofflichen Nutzung von biogenen Abfällen

3.2.1. Problemstellung

Bei der Beurteilung von Kompost und Gärgut in Ökobilanzen wurden bisher meist nur deren Nährstoffe und der damit verbundene Ersatz von Mineraldünger berücksichtigt. Dagegen wurde die organische Substanz in Kompost und Gärgut in früheren Ökobilanzen in der Regel nicht mitbewertet. Diese Bewertung liefert bezüglich eines wichtigen Teils unvollständige Resultate und ist daher nur begrenzt belastbar. Problematisch wird es vor allem im Vergleich der Kompostierung und Vergärung mit thermischen Verwertungswegen wie zum Beispiel der Kehrichtverbrennung. Bei der Verbrennung wird die organische Substanz vollständig mineralisiert und je nach Nutzungsgrad energetisch verwertet. In ersten Ansätzen wurde von Schleiss und Jungbluth eine Anrechnung in der Ökobilanz für die Stadt Zürich vorgeschlagen (Schleiss u. a., 2005). Dieser Ansatz wurde mit der Carbotech AG für die Grüngutverwertungsstudie in Basel ergänzt und angepasst (Dinkel u. a., 2009). Dabei hat sich gezeigt, dass die Art der Gutschrift für die organische Substanz von entscheidender Bedeutung sein kann.

Aufgrund der grossen Bedeutung dieses Aspekts wurde im Projekt BfE FP Biomasse Nr. 103300 (Dinkel u. a., 2011) vor allem nach weiteren Modellen gesucht, um den eigenen Ansatz zu evaluieren. Für diese Arbeit waren Kontakte zu Forschungsinstitutionen und in die Ökobilanzszene sehr wichtig. Dennoch wurden nur wenige Arbeiten gefunden.

Die Thematik lässt sich grundsätzlich in die folgenden zwei Aspekte aufteilen:

- die Ermittlung der Bedeutung der organischen Substanz für den Boden und seine Fruchtbarkeit
- die Anrechnung der organischen Substanz in Kompost und Gärgut unter Berücksichtigung der entsprechenden Qualitätsbetrachtungen

Die Bedeutung der organischen Substanz im Boden wird von vielen Forschungsanstalten und Universitäten beschrieben und als hoch bewertet. In der Regel endet jedoch die Übereinstimmung schon beim Punkt, wie die Entwicklung der Menge an organischer Substanz im Boden, die Humusbilanz, zu berechnen ist. Dies ist insofern verständlich, da diese sehr stark von den regionalen und klimatischen

Einflüssen abhängt. Zudem gibt es keine Übereinstimmung, wie der Nutzen der organischen Substanz bewertet werden soll.

Um der organischen Substanz einen realen Wert zuzuweisen, wäre es sinnvoll deren ökonomischen Wert zu kennen. Das Hauptproblem besteht darin, dass der ökonomische Wert des Humus oder der organischen Substanz im Boden nicht beziffert ist. Das liegt daran, dass die organische Substanz nicht gehandelt wird und daher auch keine statistischen Daten zu Preisen und ihren Schwankungen bestehen. Damit wird der Versuch enorm erschwert bis unmöglich, einen Ersatzwert für Humusverlust zu bestimmen. Als einzige Möglichkeit wird hier der Weg über die Ersatzbeschaffung gesehen. Zur Anrechnung der organischen Substanz in Kompost und Gärgut basieren die wichtigsten Ansätze auf den Arbeiten von Reinhold und Kehres. Ihre Arbeiten sind vor allem in monatlich erscheinenden Informationsdienst Humuswirtschaft & KomPost (HUK) von der BGK – Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V., Köln, dokumentiert (Kehres, 2008). In diesem Zusammenhang wurde auch der monetäre Wert der organischen Substanz von Kompost berechnet, indem die Kosten derjenigen Strohmenge bestimmt wurden, welche denselben Nutzen wie der Kompost erbringt (Kehres & Reinhold, 2008).

Landwirtschaftliche Böden spielen eine zentrale Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf und werden als mögliche Kohlenstoffquellen- und Senken diskutiert. Die organische Substanz im Boden spielt eine wichtige Rolle als bedeutender CO_2-Speicher. In der organischen Substanz des Bodens ist mehr Kohlenstoff als in der Atmosphäre gespeichert. Dieser Speicher wird durch die Zufuhr an organischer Substanz gespeist und durch den biologischen Abbau reduziert. Über den aktuellen Stand des Speichers gibt es keine genauen Angaben, weil es keine schweizerische Humusbilanz gibt. Humusgehalte sind ausser von Standortfaktoren stark von der Bewirtschaftung abhängig.

3.2.2. Gutschrift von organischer Substanz in Kompost und Gärgut in der Praxis

Frische organische Substanz wie Gründüngung oder Mist bringt vor allem kurzfristig Nahrung für Bodenlebewesen, aber keine namhafte Zunahme des Humusgehaltes. Man spricht von Nährhumus. Stabilisierte organische Substanz in Kompost erhöht den Gehalt an Dauerhumus. Damit wird der Humusgehalt über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten beeinflusst. Für die Bildung von Dauerhumus braucht es aber auch einen Anteil Lignin (Holzleimstoff). In lange dauernden Umbauprozessen wird aus verschiedenen Substanzen Dauerhumus zusammengefügt. Dabei wird auch ein bedeutender Anteil Stickstoff immobilisiert. Beim Abbau von Humus wird dieser Stickstoff wieder frei, dabei sinkt aber auch der Humusgehalt wieder.

Bei den unterschiedlichen organischen Düngern wird davon ausgegangen, dass deren organischer Kohlenstoff (TOC) zu 14 % bis 51 % in die Humusmatrix des jeweils gedüngten Bodens eingebaut wird. Die leicht abbaubare organische Fraktion wird nicht humusreproduktionswirksam. Sie wird im Boden mikrobiologisch abgebaut, ohne dass daraus zwischenzeitlich Humusverbindungen entstehen. Das Bodenleben wird entsprechend intensiviert, der Sauerstoffverbrauch im Boden und die Freisetzung von Kohlendioxid aus dem Boden steigen. Das als Bestandteil der gesamten Bodenatmung aus organischen Düngern freigesetzte Kohlendioxid kann durch einen wüchsigen und mikroklimatisch vorteilhaften Pflanzenbestand weitgehend assimiliert werden.

C_{org} des Bodens

Der Kohlenstoffgehalt des Bodens (C_{org}) ist die üblicherweise verwendete Grösse, um die Menge organischer Substanz des Bodens anzugeben. Der Humusgehalt wird aus dem C_{org}-Gehalt berechnet unter der Annahme, dass Humus durchschnittlich 58 % Kohlenstoff enthält. Dieser Wert ist aber mit grosser Unsicherheit behaftet – kann also stark schwanken.

Der Humusgehalt des Bodens ergibt sich aus dem C_{org}-Gehalt wie folgt:

Humusgehalt [%] oder [mg g^{-1}] = $C_{total} – C_{inorg} * 1/0.58$

3.2.3. Monetäre Bewertung der Humusreproduktion von Kompost und Gärgut

Die Voraussetzungen zur monetären Bewertung der organischen Substanz können wie folgt beschrieben werden:

1. Organische Substanz gibt es nicht als Handelsgut. Es werden Oberboden und Erden gehandelt, aber der Gehalt an organischer Substanz stellt dabei keinen entscheidenden Preisfaktor dar. Deshalb gibt es zum Wert von organischer Substanz keine Preisstatistik, aus welcher ein verlässlicher Wert mit Schwankungsbreite etc. abgelesen werden kann.
2. Aus gesellschaftlicher und ökologischer Sicht ist ein positiver Wert der organischen Substanz bestätigt. In der Umfrage bei rund 50 Landwirten kam zum Beispiel beim Wert von Kompost heraus, dass die Landwirte der organischen Substanz in Kompost mindestens einen ebenso hohen Wert einräumen wie den Pflanzennährstoffen (Schleiss, Konrad, 1999) Dieser Aspekt wird in der Folge noch vertieft ausgeleuchtet.
3. Ein Weg einer Wertfindung geht über die Ersatzbeschaffung, weil Ersatzmaterialien nicht gratis zur Verfügung stehen. In der Praxis gibt es das meist zitierte Beispiel von Stroh. Dabei besteht ähnlich wie beim Kompost Stroh aus Pflanzennährstoffen und organischer Substanz. Zusätzlich wurde Stroh über die letzten Jahrzehnte hinweg vor allem von Ackerbau betonten Gebieten hin zu Tierhaltung betonten Regionen gehandelt. Daraus kann näherungsartig ein Wert für die organische Substanz berechnet werden, indem man vom Gesamtwert den Wert für Pflanzennährstoffe abzieht. Dazu werden entsprechende Zahlen in der Tabelle 1 präsentiert.
4. Der errechnete Wert ändert aber von der Wertschätzung her nichts daran, dass die vorhandenen Werte in keiner Buchhaltung und in keinem Inventar auftauchen. Das heisst, dass kurzfristig kalkulierende Landwirte aus der Zehrung der organischen Substanz Profit schlagen können, ohne dass dies in der Buchhaltung sichtbar ist. Erst wenn eine Korrektur des tiefen Humusgehaltes vorgenommen wird, fallen dem Landwirt die Kosten an. Eine wichtige Rolle spielt dabei der Stickstoff. In der organischen Substanz ist er organisch festgelegt und damit nicht direkt pflanzenverfügbar. Deshalb rechnet man den Stickstoffwert in Stroh und Kompost nicht oder nur zu 10 %. Ein wichtiger Bestandteil des Wertes der organischen Substanz ist der darin organisch gebundene Stickstoff.

Ökonomische Relevanz der organischen Substanz in organischen Düngern

Gemäss Angaben von Agridea auf dem Internet-Portal (Agrigate, 2011) gab es beim Strohhandel in den letzten fünf Jahren eine Preissteigerung von 15 % bis über 40 %. Eine grössere Nachfrage bei kleineren Produktionsmengen wird als Grund für die steigenden Preise angegeben. Aus ökonomi-

scher Sicht kann bei steigenden Energiepreisen mit einem steigenden Wert von Humus oder der organischen Substanz im Boden ausgegangen werden.

Wert in CHF pro Tonne	Stroh	Kompost	Gärgut fest
Stickstoff gesamt	8.71	10.81	9.15
Stickstoff verfügbar	0.00	1.08	0.92
Phosphat	3.76	5.43	5.19
Kalium	11.62	6.05	5.09
Magnesium	0.66	3.25	2.80
Kalk Ca	0.00	2.20	2.50
Summe mit 10% Stickstoff	16.04	18.01	16.50
organische Substanz	30.00	15.00	11.00

Tabelle 1: Berechnung des monetären Wertes der Nährstoffe und Schätzung für die organische Substanz in 1 Tonne Stroh, Kompost und Gärgut fest

Stroh wird zunehmend vielfältig genutzt. Neben der Einstreu der verschiedenen Tierarten gilt es auch als möglicher Industrierohstoff. Aber auch die energetische Nutzung von Biomasse ist keineswegs ausgeschlossen. Das könnte dazu führen, dass eine ausreichende Zufuhr an organischer Substanz auf Ackerflächen, im Sinne einer ausgeglichenen Humusreproduktion, nicht mehr gesichert ist.

3.2.4. Integration der Elemente in die Ökobilanz

Aus den vorgestellten Ergebnissen und entsprechend dem Stand des Wissens wurde vorgeschlagen, die Integration der Auswirkung der organischen Substanz von Kompost und Gärgut in die Ökobilanz mit dem Einsetzen von Substituten zu realisieren. Als Substitut wurden für die landwirtschaftliche Anwendung Stroh und für die gärtnerische Anwendung Torf gewählt. Stroh wird auf Ackerbauflächen in den Regionen Deutschlands und der Schweiz eingesetzt und ist für die Humusreproduktion der Flächen heute der mit Abstand wichtigste Stoff. Es wird angenommen, dass zwei Drittel der Menge von Kompost und Gärgut in der Landwirtschaft eingesetzt wird. Das dritte Drittel, das im Gartenbau Anwendung findet, ersetzt den dort üblichen Torf. Dies widerspiegelt im Grossen etwa Schweizer Verhältnisse.

Die Mengen der Substituten werden aufgrund der Fähigkeit der verschiedenen Produkte, Humus zu reproduzieren, berechnet. Die Umrechnungen erfolgt auf der Basis der Humuskoeffizienten, welche in Tabelle 2 dargestellt sind.

	Schütt-gewicht	Trockensubstanz TS	OS in TS	OS in FS	C in FS	C in FS	Humus-koeffizient	Humus-C
	kg/lt	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/lt		kg/m^3
Torf	0.15	0.7	0.9	0.63	0.37	0.05	0.21	11.5
Stroh	0.15	0.8	0.87	0.70	0.40	0.06	0.21	12.7
Kompost reif	0.61	0.56	0.38	0.21	0.12	0.08	0.51	38.4
Kompost frisch	0.56	0.51	0.48	0.27	0.16	0.09	0.43	37.5
Gärgut fest	0.47	0.53	0.5	0.27	0.15	0.07	0.35	25.3
Gärgut flüssig	1	0.12	0.42	0.05	0.03	0.03	0.28	8.2

Tabelle 2: Annahmen zur Gutschrift von organischer Substanz in Kompost und Gärgut

Ähnlich der Substitution von fossilen Energieträgern durch erneuerbare Energien bei der Bereitstellung von Nutzenergie, können beim Ersatz von fossilen Stoffen wie Torf mit erneuerbaren Stoffen wie Kompost und Gärgut, fossile Ressourcen geschont und die Emissionen von fossilem CO_2 reduziert werden.

Kompost und festes Gärgut weisen in der Analyse Werte auf, die nahe beieinanderliegen. Deshalb werden sie hier auch gleich eingesetzt. Aus 1 kg Grüngutkompostierung entstehen 0.5 kg Kompost, aus 1 kg Bioabfallvergärung jedoch nur 0.3 kg festes Gärgut und 0.3 kg flüssiges Gärgut. Diese Mengendifferenz bei den Produkten wird für die Ersatzmengen der organischen Substanz berücksichtigt (Tabelle 3).

Aufgrund des hohen OS-Anteils in Torf und Stroh, verglichen mit Kompost und Gärgut, wird mengenmässig mehr Kompost- und Gärgutmasse benötigt, um Torf oder Stroh zu ersetzen. Bezüglich Volumenersatz führt die geringe Dichte von Torf und Stroh dazu, dass deutlich weniger Kompost- und Gärgutvolumen benötigt wird, um Torf oder Stroh zu ersetzen (mit Ausnahme von Gärgut flüssig).

	1 m^3 ersetzt	m^3 Torf	m^3 Stroh
Kompost	1 m^3	3.3	3
Gärgut fest	1 m^3	2.2	2
Gärgut flüssig	1 m^3	0.7	0.6
	1 t ersetzt	t Torf	t Stroh
Kompost	1 t	0.8	0.8
Gärgut fest	1 t	0.7	0.6
Gärgut flüssig	1 t	0.1	0.1

Tabelle 3: Die Ersatzmengen für 1 kg Kompost bzw. Gärgut fest und flüssig[1]

Eine detaillierte Anrechnung der Wirkungen der organischen Substanz von Kompost und Gärgut nach sämtlichen Effekten, ist mit dem heutigen Datenstand nicht möglich. Auch für die Zukunft wäre das mit einem unverhältnismässigen Aufwand verbunden.

- Infolge der Interaktionen zwischen den verschiedenen Effekten wäre das Bestreben nach einer so genauen Lösung auch wenig sinnvoll.
- Die längerfristigen Effekte der Humusminderung in den landwirtschaftlichen Böden sind hier nicht betrachtet. Dafür müsste die landwirtschaftliche Produktion, bezüglich des Humushaushalts, spezifisch beurteilt werden.
- Der Einbezug der organischen Substanz hat einen grossen Einfluss auf die ökologische Beurteilung der Behandlung von biogenen Abfällen. Die vorliegenden Resultate sind ein erster Schritt zur besseren Berücksichtigung dieser Effekte.
- Grössere Grundlagenarbeiten, um diese Effekte besser zu verstehen und zu definieren, fehlen in diesem Bereich noch. Langfristige Versuche, in denen die Auswirkungen der Anwendung der verschiedenen Produkte verfolgt werden, sind ein vernünftiger Weg, um diese Wissenslücke zu schliessen.

Im Rahmen des ursprünglichen Projektes wurde daher vorgeschlagen, die Integration der Auswirkungen der organischen Substanz von Kompost und Gärgut in die Ökobilanz, mit dem globalen Einsetzen von Substituten als sogenannter „avoided burden“ Ansatz zu realisieren. Dieser pragmatische Ansatz wurde mit anderen Bodenspezialisten im In- und Ausland diskutiert und von diesen als sinnvoll erachtet.

Der Einfluss dieser Gutschrift auf das Gesamtergebnis ist in Abbildung 2 dargestellt. Dieses Resultat zeigt, dass die Gutschrift für die organische Substanz nicht zu vernachlässigen ist.

[1] Als Berechnungsbasis wurden die durchschnittlichen Gehalte an organischer Substanz der verschiedenen Produkte und die Humusreproduktionswirksamkeit ihres organischen Kohlenstoffs verwendet (Tabelle 2).

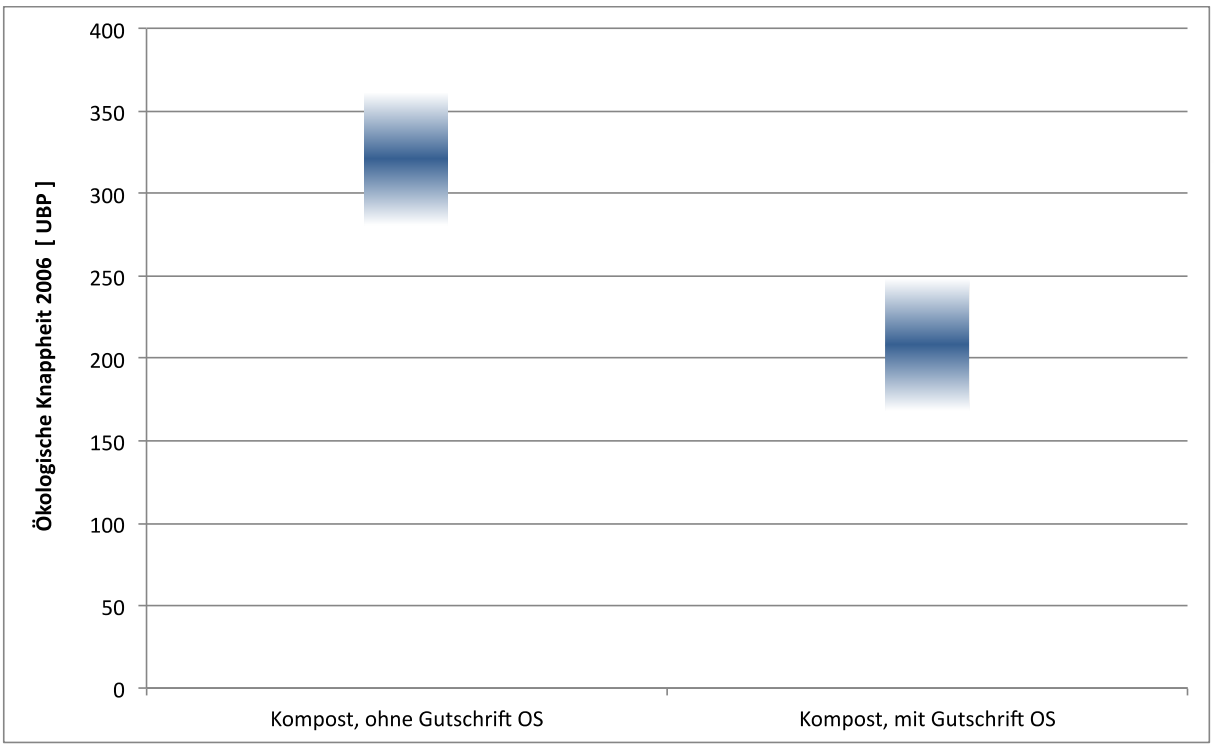


Abbildung 2: Kompost, bewertet mit der Methode der ökologischen Knappheit 2006; die Ausdehnung der Balken gibt jeweils die Unsicherheit der Ergebnisse an.

3.2.5. Umsetzung in ecoinvent Version 2

Innerhalb ecoinvent Version 2 wurden die erarbeiteten Prozesse in erster Linie zum Vergleich verschiedener Entsorgungswege von biogenen Abfällen verwendet. Die Gegenüberstellung von Vergärung, Kompostierung und Kehrichtverbrennung stand dabei im Vordergrund. Der Vergleich der unterschiedlichen Methoden mittels einer Systemerweiterung war aus diesem Grund sinnvoll und zielführend. Bei den beiden angewandten Ansätzen „avoided burden“ und „basket of benefits“ wurde jeweils die entsprechende Substitution der organischen Substanz mittels Ersatzprodukten wie Torf und Stroh modelliert.

Ausführliche Informationen zu den verschiedenen Ansätzen sowie die entsprechenden Resultate sind im Originalbericht zu finden (Dinkel u. a., 2011). Nach Abschluss des Projektes wurden die fertig gestellten Inventare im ecospold-Format Version 1 passend zu ecoinvent Version 2 auf der Homepage www.lc-inventories der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt (Abbildung 3).

Abbildung 3: Bildschirmfoto der Homepage www.lc-inventories.ch

3.2.6. Umsetzung in ecoinvent Version 3

Da es sich bei den Prozessen zur Eingabe in ecoinvent 3 um unalloziierte Einheitsprozesse handelt und keine Vergleiche mit anderen Produkten oder Verfahren berechnet werden, war der Ansatz mit-

tels Gutschriften nicht umsetzbar. Voralloziierte Prozesse werden nicht mehr direkt zur Eingabe verwendet, stattdessen werden die unalloziierten Prozesse mit Hilfe angepasster Datenbank-Algorithmen in verschiedene Datenmodelle überführt und fertig alloziiert zur Verfügung gestellt (weitere Informationen hierzu finden sich unter Weidema (2013)). Aus diesem Grund wurde ein neues Modell zur Eingabe der relevanten Informationen entwickelt.

Die ausführlichen Hintergrundinformationen sind im folgenden Kapitel 4 zu finden.

3.3. Bewertung von Schwermetalleinträgen im Boden durch biologische Verwertungsverfahren

In vorangegangenen Untersuchungen im Bereich der Grüngutverwertung (Carbotech AG & infraconsult, 2009; Dinkel u. a., 2009; Schleiss u. a., 2005) konnte aufgezeigt werden, dass die Schwermetallemissionen in den Boden bei der Bewertung mit verschiedenen vollaggregierenden Methoden wie beispielsweise Eco-Indicator 99 (Goedkoop u. a., 2000) und ökologische Knappheit 2006 (Frischknecht u. a., 2008) einen wesentlichen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. Insbesondere im Vergleich unterschiedlicher Verwertungssysteme ist dieser Einfluss auf das Resultat signifikant.

Welcher Anteil der Schwermetalle im Boden bioverfügbar ist, das heisst wie viele in einer Form vorliegen, welche aus dem Boden ausgetragen werden kann (sei es über Pflanzen oder physikalische Prozesse), wird von keiner der gängigen Bewertungsmethoden berücksichtigt.

Die in diesem Projekt erarbeiteten Ökoinventare beinhalten alle Schwermetalle gemäss der chemischen Analytik der Elementaranalyse. Damit werden die Schwermetallbelastungen durch Kompost und Gärgut unserer Einschätzung nach überschätzt. Aus diesem Grund wurde ein entsprechender Hinweis in der Prozess-Dokumentation eingefügt. Weitere Hintergründe, Details sowie Lösungsansätze sind beispielsweise in Dinkel u. a. (2011) zu finden.

Nach Ansicht der Autoren wird eine ökologisch korrekte Bewertung der Schwermetalle hier nicht erfüllt: diese würde darin bestehen, dass nur die zusätzlich zugeführten Schwermetalle diesen Prozessen angelastet würden. Wie oben festgehalten, werden heute die Gesamtgehalte den Prozessen von Kompostierung und Vergärung angerechnet, was diese im Rahmen der Bewertung stark belastet. Es besteht die Aussicht, dass in einem baldigen nächsten Schritt eine entsprechende Verfeinerung noch nachgeliefert werden kann.

4. Eingabe in ecoinvent

Die in den obigen Kapiteln dargelegten Erkenntnisse sowie Resultate wurden mit Hilfe der Software „ecoeditor“ (ifu Hamburg, 2015) zur Aufnahme in die ecoinvent Datenbank vorbereitet. Die Daten wurden fristgerecht aufbereitet und eingegeben, damit sie in die folgende Version 3.3 von ecoinvent integriert werden können.

4.1. Anforderungen an ecoinvent-Inventare

Die neuen Anforderungen von ecoinvent Version 3 für die bestehenden ecoinvent Version 2-Prozesse wurden abgeklärt und in Zusammenarbeit mit dem ecoinvent Centre bereinigt. Zusätzlich wurden vorgängig Diskussionen mit potentiellen Reviewern aus den jeweiligen Bereichen (Landwirtschaft/biogenen Abfälle sowie Entsorgung) durchgeführt um den anstehenden Review-Prozess möglichst effizient zu gestalten. Dabei wurden insbesondere folgende Bereiche diskutiert:

- Wie wird die Allokation der Haupt- und Koppelprodukte sinnvoll vorgenommen? (⇒ was ist der „wahre Wert“ („true value“) von Gärgut und Kompost?)
- Gehalt an Nährstoffen und Spurenelementen von Gärgut und Kompost: Wie sind die Effekte beim Ausbringen im Vergleich zu Mineraldüngern zu bewerten? Bezug zum Markt für organische Dünger innerhalb ecoinvent[2].
- Bewertung der Emissionen beim Verbrennen von biogenem Kohlenstoff.
- Gehalt an Schwermetallen in biogenen Abfällen (⇒ zusätzlicher Eintrag im Prozess bzw. wie sind Kreisläufe zu bewerten).
- Definition „biogene Abfälle“ oder „Biowaste“.
- Sind innerhalb der Prozessdefinitionen sinnvolle Parametrisierungen denkbar, zum Beispiel in folgenden Bereichen:
  - Emissionen (Luft- und Bodenemissionen)
  - Gehalt an organischer Substanz
  - Gehalte an Nährstoffen
  - Gehalte an Schwermetallen
  - Masseflüsse innerhalb der Prozesse

Der Validierungs und Review-Prozess mit ecoinvent ist aktuell noch in der aktiven Phase und die letzten Überarbeitungen/Revisionen der Prozesse sind erfolgt.

Entsprechend sind die im Folgenden präsentierten Bildschirmfotos der Prozesse nicht als endgültig anzusehen und können aus diesem Grund noch vorläufige Daten enthalten.

4.2. Berücksichtigung organischer Substanz – Humus equivalents

Wie in Kapitel 3.2.6 erwähnt, ist der Ansatz aus ecoinvent Version 2 nicht ohne weiteres auf Version 3 übertragbar. Aus diesem Grund wurde mit Hilfe einer neuen Eigenschaft („property“) der Produkte eine Hilfsgrösse eingeführt, um die Humusbildung zu modellieren. Diese sogenannte „exchange property“ wird als „humus equivalent“ definiert und gibt den Anteil der humusbildenden Fraktion an

[2] Ein Update war ursprünglich in ecoinvent Version 3.2 vorgesehen, nun wird eine grössere Aktualisierung des Agrarsektors in Version 3.3 erfolgen, inklusive der Integration eines Marktes für „organic fertiliser“.

(Tabelle 4). Die entsprechende Dokumentation ist im Prozess selber integriert, zusätzlich wird der vorliegende Bericht als integraler Bestandteil dieser Prozess-Dokumentation referenziert werden.

Der Ansatz zur Herleitung ist in folgender tabellarischer Darstellung zusammengefasst:

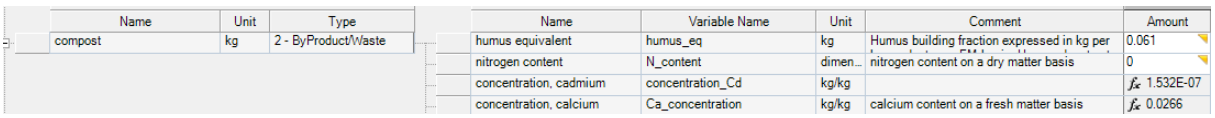
	Schütt-gewicht	Trocken-substanz TS	OS in TS	OS in FS	C in FS	C in FS	Humus-koeffi-zient*	Humus-C	Humus-C in FM
	kg/lt	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/lt		kg/m^3	kg/kg
Torf	0.15	0.7	0.9	0.63	0.37	0.05	0.21	11.5	0.078
Stroh	0.15	0.8	0.87	0.70	0.40	0.06	0.21	12.7	0.084
Kompost reif	0.61	0.56	0.38	0.21	0.12	0.08	0.51	38.4	0.061
Kompost frisch	0.56	0.51	0.48	0.27	0.16	0.09	0.43	37.5	0.069
Gärgut fest	0.47	0.53	0.5	0.27	0.15	0.07	0.35	25.3	0.053
Gärgut flüs-sig	1	0.12	0.42	0.05	0.03	0.03	0.28	8.2	0.008

Tabelle 4: Annahmen zur Gutschrift von organischer Substanz in Kompost und Gärgut

*die hier verwendeten Werte stammen von Reinhold u. a. (Kehres & Reinhold, 2008) aus früheren Arbeiten. Die späteren Angaben wurden mit einer grösseren Bandbreite versehen, was zu weniger genauen Angaben führte. Die Daten sind aber auch unter Kolbe und Zimmer (2015) erwähnt.

Das Humus-Äquivalent beschreibt die Menge eines organischen Materials, die zur Humusreproduktion im Boden führt, also als Humus im Boden wieder zu finden sein soll. Der Gehalt an Humus-Äquivalenten pro Frischmasse folgt damit aus dem Kohlenstoff-Gehalt in der Frischmasse und dem entsprechenden Humus-Koeffizient. Für reifen Kompost entspricht dies 0.12 kg/kg OS * 0.51 = 0.061 kg/kg. Weitergehende Diskussionen zu diesem Aspekt finden sich unter Kolbe u. a. (2016), im Leitfaden zur Humusreproduktion.

Abbildung 4 zeigt diese Implementierung im ecoeditor.



Name	Unit	Type
compost	kg	2 - ByProduct/Waste

Name	Variable Name	Unit	Comment	Amount
humus equivalent	humus_eq	kg	Humus building fraction expressed in kg per	0.061
nitrogen content	N_content	dimen...	nitrogen content on a dry matter basis	0
concentration, cadmium	concentration_Cd	kg/kg		1.532E-07
concentration, calcium	Ca_concentration	kg/kg	calcium content on a fresh matter basis	0.0266

Abbildung 4:Humus equivalents als „exchange property“ innerhalb des ecoeditors

4.2.1. Handhabung der Schwermetalle

Im Rahmen des aktuellen Projektes wurden keine neuen Daten bezüglich der Zusammensetzung von biogenen Abfällen erhoben. Innerhalb der Prozessdokumentation wird allerdings auf die Problematik der Kreislaufschwermetalle sowie deren Bewertung eingegangen. Zusätzliche Informationen hierzu sind unter Dinkel u. a. (2011) zu finden. Auch wird der vorliegende Bericht erwähnt und als Bestandteil der Dokumentation betrachtet:

The heavy metal contents of compost are presented in the following table:

		per kg DM compost	per kg FM compost	per kg FM bio-genic waste	values ecoeditor (FM) in kg/kg
Cadmium	mg/kg	0.29	0.15	0.08	1.53E-07
Copper	mg/kg	38.105	20.08	10.04	2.01E-05
Lead	mg/kg	26.625	14.03	7.02	1.41E-05
Mercury	mg/kg	0.1	0.05	0.03	5.28E-08
Nickel	mg/kg	16	8.43	4.22	8.45E-06
Zinc	mg/kg	120.345	63.42	31.71	6.36E-05

Previous studies in the corresponding field showed that the evaluation of heavy metal emissions into soil with various single score methods such as Eco-Indicator 99 and ecological scarcity have a significant impact on the overall results. It is therefore advised to take special care when evaluating these systems, especially to avoid potential double counting.

Abbildung 5: Zusammenstellung der Schwermetalle; Hinweise in der Dokumentation der Prozesse

Die entsprechende Umsetzung innerhalb des ecoeditor ist in Abbildung 6 dargestellt.

Name	Unit	Type
compost	kg	2 - ByProduct/Waste

Name	Variable Name	Unit	Comment	Amount
humus equivalent	humus_eq	kg	Humus building fraction expressed in kg per	0.061
nitrogen content	N_content	dimen...	nitrogen content on a dry matter basis	0
concentration, cadmium	concentration_Cd	kg/kg		1.532E-07
concentration, calcium	Ca_concentration	kg/kg	calcium content on a fresh matter basis	0.0266
concentration, copper	concentration_Cu	kg/kg		2.02E-05
concentration, lead	concentration_Pb	kg/kg		1.406E-05
concentration, magnesium	Mg_concentration	kg/kg	magnesium content on a fresh matter basis	0.00278
concentration, mercury	Hg_concentration	kg/kg	mercury content on a fresh matter basis	5.28E-08
concentration, nickel	Ni_concentration	kg/kg	nickel content on a fresh matter basis	8.44E-06
concentration, phosphorus	P_concentration	kg/kg	phosphorus content on a fresh matter basis	0.001456
concentration, potassium	K_concentration	kg/kg	potassium content on a fresh matter basis	0.00526
concentration, sulfur	concentration_S	kg/kg		0.001008
concentration, zinc	concentration_Zn	kg/kg		6.36E-05
concentration, nitrogen	N_concentration	kg/kg	nitrogen content on a fresh matter basis	0.0072
water in wet mass	WWM	kg	water content on a wet matter basis	0.5
dry mass	DM	kg		0.5
wet mass	WM	kg		1
price	price_EUR2005	EUR2...		0.03
water content	water_content	dimen...	water content on a dry matter basis	1
carbon content, fossil	C_content_fossil	dimen...	fossil carbon content on a dry matter basis	0
carbon content, non-fossil	C_content_non_fossil	dimen...	biogene carbon content on a dry matter basis	0.233

Abbildung 6: Schwermetalle, Gehalte in Kompost

Werden zusätzliche Daten oder Erkenntnisse im Rahmen des laufenden Review-Prozesses gewonnen, so werden diese selbstverständlich in der Dokumentation integriert werden.

4.3. Prozesse

Die Modellierung der verschiedenen Komponenten ist abgeschlossen und befindet sich aktuell im Review-Prozess des ecoinvent-Centres. Die folgenden Seiten geben eine kurze Übersicht der vorgenommenen Eingaben anhand diverser Bildschirmfotos aus dem Eingabeprozess.

Gemäss den Richtlinien von ecoinvent Version 3 wurden jeweils pro Prozess ein Schweizer und ein globaler Datensatz erstellt. Dabei wurden das Produktionsvolumen sowie die zugehörigen Unsicherheiten entsprechend angepasst.

Folgende Prozesse sind eingegeben worden:

Thermophile Feststoffvergärung:

- treatment of biowaste, anaerobic digestion, CH, 2011–2015
- treatment of biowaste, anaerobic digestion, GLO, 2011–2015

Industrielle Kompostierung:

- treatment of biowaste, industrial composting, CH, 2011–2015
- treatment of biowaste, industrial composting, GLO, 2011–2015

Die Verarbeitungs-Prozesse nehmen als Ressource jeweils biogene Abfälle (biowaste) an, als Produkte fallen Biogas und Gärgut, respektive Kompost an.

Bei der Dokumentation der Prozesse wurde darauf geachtet, dass die Informationen so weit als möglich in sich vollständig und abgeschlossen sind und keine weiteren externen Quellen zum grundsätzlichen Verständnis notwendig sind. Ein exemplarischer Auszug der zugehörigen Dokumentation ist in folgender Abbildung 7 zu sehen.

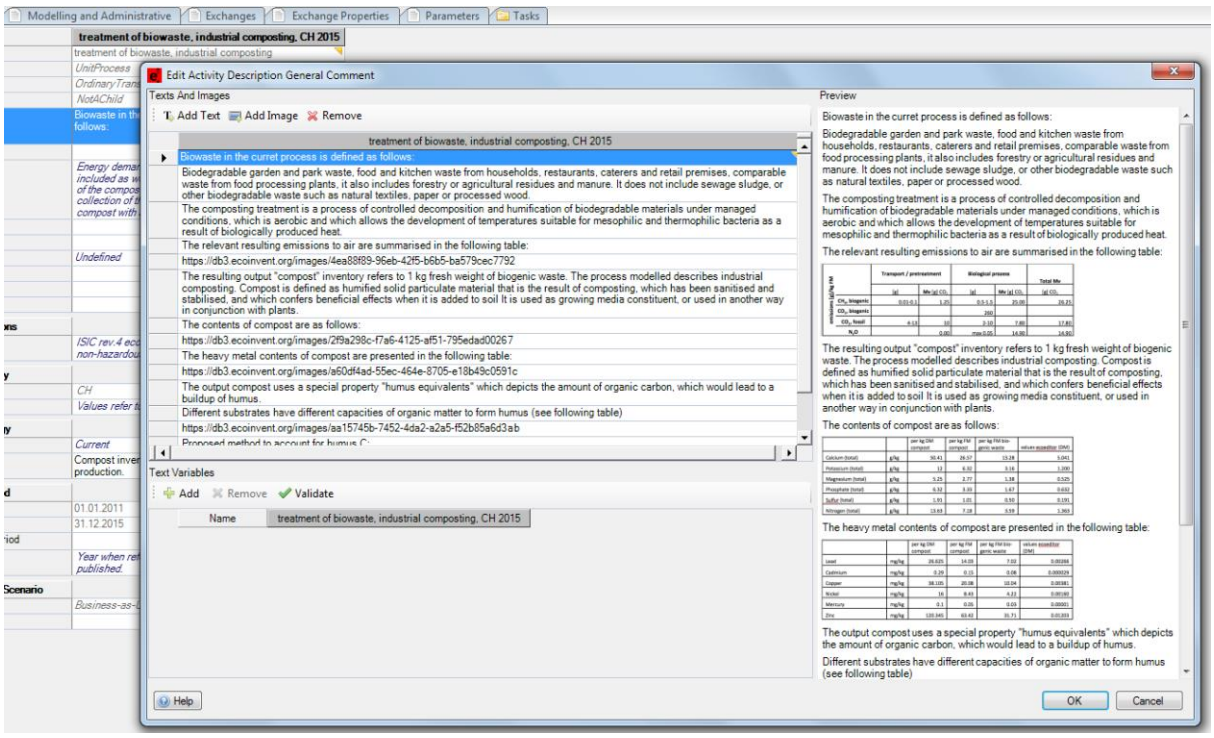


Abbildung 7: Dokumentation der Prozesse

Beide Verarbeitungsprozesse verarbeiten die gleiche Ressource „Biowaste“, das heisst, die jeweiligen Zusammensetzungen in Bezug auf Schwermetalle, Nährstoffe, Kohlenstoff und Wasser sind identisch (siehe Abbildung 8).

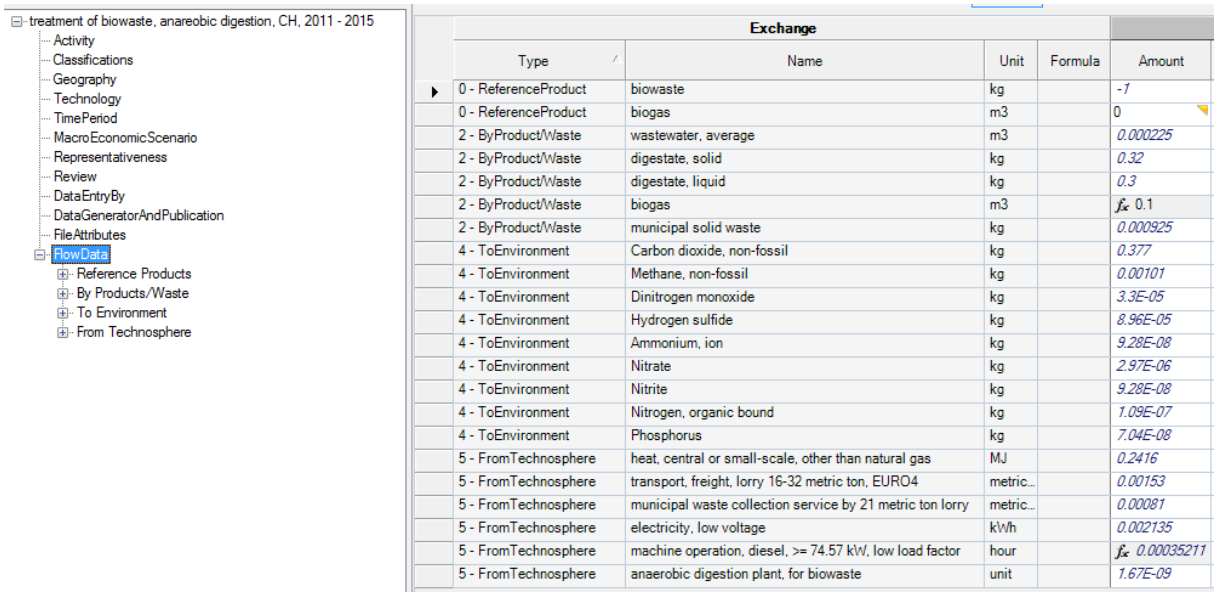
Name	Unit	Type
biowaste	kg	0 - ReferenceProduct

Name	Variable Name	Unit	Comment	Amount
concentration, cadmium	concentration_Cd	kg/kg		7.66E-08
concentration, copper	concentration_Cu	kg/kg		1.01E-05
concentration, lead	concentration_Pb	kg/kg		7.03E-06
concentration, sulfur	concentration_S	kg/kg		0.000504
concentration, zinc	concentration_Zn	kg/kg		3.18E-05
concentration, calcium	Ca_concentration	kg/kg	calcium content on a fresh matter basis	0.0133
concentration, mercury	Hg_concentration	kg/kg	mercury content on a fresh matter basis	2.64E-08
concentration, nickel	Ni_concentration	kg/kg	nickel content on a fresh matter basis	4.22E-06
concentration, phosphorus	P_concentration	kg/kg	phosphorus content on a fresh matter basis	0.000728
concentration, potassium	K_concentration	kg/kg	potassium content on a fresh matter basis	0.00263
concentration, magnesium	Mg_concentration	kg/kg	magnesium content on a fresh matter basis	0.00139
concentration, nitrogen	N_concentration	kg/kg	nitrogen content on a fresh matter basis	0.0036
water content	water_content	dimen...	water content on a dry matter basis	fx 1.5
carbon content, fossil	C_content_fossil	dimen...	fossil carbon content on a dry matter basis	fx 0
water in wet mass	WWM	kg	water content on a wet matter basis	fx 0.6
dry mass	DM	kg		fx 0.4
carbon content, non-fossil	C_content_non_fossil	dimen...	biogene carbon content on a dry matter basis	fx 0.406
wet mass	WM	kg		fx 1
price	price_EUR2005	EUR2...		fx 0

Abbildung 8: Zusammensetzung des Inputs „biowaste“

4.3.1. Treatment of biowaste, anaerobic digestion

Die wichtigsten Eckdaten des erfassten Vergärungs-Prozesses sind in Abbildung 9 dargestellt. Insbesondere die Menge an Biogas und Gärgut werden daraus ersichtlich. Ebenso ist erkennbar, welche zusätzlichen Emissionen in die Luft aus dem Prozess resultieren.



Exchange				
Type	Name	Unit	Formula	Amount
0 - ReferenceProduct	biowaste	kg		-1
0 - ReferenceProduct	biogas	m3		0
2 - ByProduct/Waste	wastewater, average	m3		0.000225
2 - ByProduct/Waste	digestate, solid	kg		0.32
2 - ByProduct/Waste	digestate, liquid	kg		0.3
2 - ByProduct/Waste	biogas	m3		fx 0.1
2 - ByProduct/Waste	municipal solid waste	kg		0.000925
4 - ToEnvironment	Carbon dioxide, non-fossil	kg		0.377
4 - ToEnvironment	Methane, non-fossil	kg		0.00101
4 - ToEnvironment	Dinitrogen monoxide	kg		3.3E-05
4 - ToEnvironment	Hydrogen sulfide	kg		8.96E-05
4 - ToEnvironment	Ammonium, ion	kg		9.28E-08
4 - ToEnvironment	Nitrate	kg		2.97E-06
4 - ToEnvironment	Nitrite	kg		9.28E-08
4 - ToEnvironment	Nitrogen, organic bound	kg		1.09E-07
4 - ToEnvironment	Phosphorus	kg		7.04E-08
5 - FromTechnosphere	heat, central or small-scale, other than natural gas	MJ		0.2416
5 - FromTechnosphere	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4	metric...		0.00153
5 - FromTechnosphere	municipal waste collection service by 21 metric ton lorry	metric...		0.00081
5 - FromTechnosphere	electricity, low voltage	kWh		0.002135
5 - FromTechnosphere	machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor	hour		fx 0.00035211
5 - FromTechnosphere	anaerobic digestion plant, for biowaste	unit		1.67E-09

Abbildung 9: Vergärungsprozess, Eingabe in ecoeditor

Die folgende Abbildung 10 wiederum gibt die Zusammensetzung von Gärgut (fest und flüssig) wieder, welche aus obigem Vergärungsprozess erfolgen.

Name	Unit	Type
digestate, liquid	kg	2 - ByProduct/Waste

Name	Variable Name	Unit	Comment	Amount
price	price_EUR2005	EUR2...		10
water content	water_content	dimen...	water content on a dry matter basis	fx 6.2993
dry mass	DM	kg		0.137
wet mass	WM	kg		1
water in wet mass	WWM	kg	water content on a wet matter basis	0.863
concentration, cadmium	concentration_Cd	kg/kg		1.15E-07
concentration, copper	concentration_Cu	kg/kg		1.59E-05
concentration, lead	concentration_Pb	kg/kg		1.05E-05
concentration, zinc	concentration_Zn	kg/kg		4.8E-05
concentration, sulfur	concentration_S	kg/kg		4.38E-07
concentration, mercury	Hg_concentration	kg/kg	mercury content on a fresh matter basis	3.96E-08
concentration, nickel	Ni_concentration	kg/kg	nickel content on a fresh matter basis	6.33E-06
concentration, phosphorus	P_concentration	kg/kg	phosphorus content on a fresh matter basis	0.00201
concentration, potassium	K_concentration	kg/kg	potassium content on a fresh matter basis	0.00457
concentration, calcium	Ca_concentration	kg/kg	calcium content on a fresh matter basis	0.00531
concentration, magnesium	Mg_concentration	kg/kg	magnesium content on a fresh matter basis	0.000966
humus equivalent	humus_eq	kg	Humus building fraction expressed in kg per	0.008
concentration, nitrogen	N_concentration	kg/kg	nitrogen content on a fresh matter basis	0.00515
carbon content, non-fossil	C_content_non_fossil	dimen...	biogene carbon content on a dry matter basis	0
carbon content, fossil	C_content_fossil	dimen...	fossil carbon content on a dry matter basis	0

Name	Unit	Type
digestate, solid	kg	2 - ByProduct/Waste

Name	Variable Name	Unit	Comment	Amount
price	price_EUR2005	EUR2...		10
water content	water_content	dimen...	water content on a dry matter basis	fx 1.3256
dry mass	DM	kg		0.43
wet mass	WM	kg		1
water in wet mass	WWM	kg	water content on a wet matter basis	0.57
humus equivalent	humus_eq	kg	Humus building fraction expressed in kg per	0.053
concentration, cadmium	concentration_Cd	kg/kg		1.23E-07
concentration, copper	concentration_Cu	kg/kg		1.61E-05
concentration, lead	concentration_Pb	kg/kg		1.12E-05
concentration, sulfur	concentration_S	kg/kg		0.00119
concentration, zinc	concentration_Zn	kg/kg		5.26E-05
concentration, mercury	Hg_concentration	kg/kg	mercury content on a fresh matter basis	4.22E-08
concentration, nickel	Ni_concentration	kg/kg	nickel content on a fresh matter basis	6.75E-06
concentration, phosphorus	P_concentration	kg/kg	phosphorus content on a fresh matter basis	0.00145
concentration, potassium	K_concentration	kg/kg	potassium content on a fresh matter basis	0.00411
concentration, calcium	Ca_concentration	kg/kg	calcium content on a fresh matter basis	0.0221
concentration, magnesium	Mg_concentration	kg/kg	magnesium content on a fresh matter basis	0.00198
concentration, nitrogen	N_concentration	kg/kg	nitrogen content on a fresh matter basis	0.00629
carbon content, non-fossil	C_content_non_fossil	dimen...	biogene carbon content on a dry matter basis	0
carbon content, fossil	C_content_fossil	dimen...	fossil carbon content on a dry matter basis	0

Abbildung 10: Gärgut fest und flüssig, Eingaben in ecoeditor

4.3.2. Treatment of biowaste, industrial composting

Der aktuelle Kompostierprozess in der ecoinvent-Datenbank Version 3.2 basiert auf Daten, welche ursprünglich im Jahr 1999 erhoben worden sind, weshalb eine Aktualisierung im engeren Sinn nicht sinnvoll durchgeführt werden kann. Der ursprüngliche Prozess wird daher innerhalb der ecoinvent-Datenbank ersetzt werden.

Wie der Name des Prozesses schon hervorhebt, handelt es sich bei dem modellierten Prozess um die industrielle Kompostierung. Entsprechend werden auch Infrastruktur-Elemente wie eine Kompostierungsanlage sowie Elektrizität und Maschinen zur Bearbeitung benötigt (Abbildung 11).

Activity Description | Modelling and Administrative | **Exchanges** | Exchange Properties | Parameters | Tasks

Add | Remove | Validate | Column Layouts: Amount Only Compact Extended | Customize Current Column Layout...

Exchange					
Type	Name	Unit	Compartment	Classification	Amount
0 - ReferenceProduct	biowaste	kg		Waste	-1
2 - ByProduct/Waste	compost	kg		allocatable product	0.5
2 - ByProduct/Waste	municipal solid waste	kg		Waste	*1.85E-05*
2 - ByProduct/Waste	wastewater, average	m3		Waste	0.000225
4 - ToEnvironment	Carbon dioxide, non-fossil	kg	air		0.379
4 - ToEnvironment	Methane, non-fossil	kg	air		0.001
4 - ToEnvironment	Nitrogen oxides	kg	air		*0.000453*
4 - ToEnvironment	Ammonia	kg	air		0.0007
4 - ToEnvironment	Dinitrogen monoxide	kg	air		2.5E-05
4 - ToEnvironment	Hydrogen sulfide	kg	air		0.000526
5 - FromTechnosphere	composting facility, open	unit		allocatable product	*7.41E-09*
5 - FromTechnosphere	municipal waste collection service by 21 metric ton lorry	metric ton*km		allocatable product	*0.00622*
5 - FromTechnosphere	electricity, low voltage	kWh		allocatable product	*0.0118*
5 - FromTechnosphere	machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor	hour		allocatable product	0.00035...

Abbildung 11: Übersicht der Auswirkungen des Kompostierungprozesses

Die Zusammenstellung der relevanten Austauschprozesse („Exchange properties“) ist in der nächsten Abbildung sichtbar. Insbesondere die Nährstoffgehalte und Schwermetall-Emissionen in den Boden werden daraus ersichtlich. Ebenso sind die neu eingeführten Humus-Äquivalente oder der Gehalt an biogenem Kohlenstoff aufgelistet.

Name	Unit	Type
compost	kg	2 - ByProduct/Waste

Name	Variable Name	Unit	Comment	Amount
humus equivalent	humus_eq	kg	Humus building fraction expressed in kg per	0.061
nitrogen content	N_content	dimen...	nitrogen content on a dry matter basis	0
concentration, cadmium	concentration_Cd	kg/kg		1.532E-07
concentration, calcium	Ca_concentration	kg/kg	calcium content on a fresh matter basis	0.0266
concentration, copper	concentration_Cu	kg/kg		2.02E-05
concentration, lead	concentration_Pb	kg/kg		1.406E-05
concentration, magnesium	Mg_concentration	kg/kg	magnesium content on a fresh matter basis	0.00278
concentration, mercury	Hg_concentration	kg/kg	mercury content on a fresh matter basis	5.28E-08
concentration, nickel	Ni_concentration	kg/kg	nickel content on a fresh matter basis	8.44E-06
concentration, phosphorus	P_concentration	kg/kg	phosphorus content on a fresh matter basis	0.001456
concentration, potassium	K_concentration	kg/kg	potassium content on a fresh matter basis	0.00526
concentration, sulfur	concentration_S	kg/kg		0.001008
concentration, zinc	concentration_Zn	kg/kg		6.36E-05
concentration, nitrogen	N_concentration	kg/kg	nitrogen content on a fresh matter basis	0.0072
water in wet mass	WWM	kg	water content on a wet matter basis	0.5
dry mass	DM	kg		0.5
wet mass	WM	kg		1
price	price_EUR2005	EUR2...		0.03
water content	water_content	dimen...	water content on a dry matter basis	1
carbon content, fossil	C_content_fossil	dimen...	fossil carbon content on a dry matter basis	0
carbon content, non-fossil	C_content_non_fossil	dimen...	biogene carbon content on a dry matter basis	0.233

Abbildung 12: Übersicht der „Exchange properties“ für den Prozess der Kompostierung

5. Ergebnisse / Erkenntnisse

Die neuen Erkenntnisse und eigenen Ansätze zur Modellierung der Prozesse konnten gut erfasst werden, dabei waren insbesondere die Unterstützung des ecoinvent centres und die Rückmeldungen externen Reviewer hilfreich und effizient.

Die organische Substanz ist für die korrekte Beurteilung der Recyclingdünger Kompost und Gärgut ein Kernfaktor. Daher haben wir uns in den letzten Jahren darauf konzentriert, diese Bewertung zu ermöglichen. Die Berücksichtigung der organischen Substanz konnte realisiert werden, die entsprechenden Bewertungsmethoden oder auch Märkte, welche diese Substanz berücksichtigen, stehen noch aus.

Ebenso ist nach Ansicht der Autoren eine ökologisch korrekte Bewertung der Schwermetalle aktuell noch nicht umgesetzt, da nicht nur die zusätzlich zugeführten Schwermetalle den Prozessen Kompostierung und Vergärung angelastet werden sondern die Gesamtgehalte. Es besteht jedoch die Aussicht, dass in einem baldigen nächsten Schritt eine entsprechende Verfeinerung noch nachgeliefert werden kann.

Das Eingabeprozedere der ecoinvent-Prozesse selbst gestaltet sich zurzeit immer noch sehr aufwändig, sowohl zeitlich als auch in Bezug auf den Eingabeprozess selber. Hierbei ist die Eingabe-Software (ecoeditor) leider weder benutzerfreundlich noch unterstützend.

Da der Review zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen ist, sind nicht alle der hier aufgeführten Aussagen als endgültig zu betrachten. Namentlich konnten die fertig berechneten Prozesse und alloziierten LCIA-Inventare noch keiner Qualitätssicherung unterzogen werden, da die entsprechenden Berechnungen noch ausstehend sind.

6. Ausblick

Die Publikation der ecoinvent Version 3.2 erfolgte am 30. November 2015, die nächste Version 3.3 ist für Mitte 2016 zur Freigabe geplant. Die erarbeiteten Prozesse werden gemäss ecoinvent centre in der vorliegenden Form in die nächste Version aufgenommen werden, allenfalls sind noch Ergänzungen bei den einzelnen „exchanges“ notwendig.

Die ursprünglich geplante Einführung eines Marktes für organische Dünger wurde nun auf die nächste Version 3.3 verschoben, weshalb dieser Aspekt der Prozesse allenfalls noch nicht adäquat abgebildet wird. Sobald ersichtlich wird, ob die geplanten Anpassungen im Sinne der Autoren umsetzbar sind, werden die entsprechenden Ergänzungen vorgenommen und an ecoinvent weitergeleitet werden.

Die Autorenschaft bleibt nach Eingabe der Prozesse bestehen, weshalb auch zukünftige Ergänzungen durch die Autoren erfolgen könnten. Allenfalls muss im Einzelfall der jeweilige Aufwand der Anpassungen geklärt werden.

7. Referenzen

Agrigate. (2011). Entwicklung des Strohpreises in den letzten Jahren, Agridea. Abgerufen von www.agrigate.ch/de/pflanzenbau/660/6702/stroh/

Carbotech AG, & infraconsult. (2009). *Verwertung von Grüngut in Köniz.* Gemeinde Köniz.

Dinkel, F., Schleiss, K., & Zschokke, M. (2009). *Ökobilanz zur Grüngutverwertung in Basel.* Basel-Stadt: im Auftrag des Amtes für Umwelt und Energie, Basel-Stadt.

Dinkel, F., Zschokke, M., & Schleiss, K. (2011). *Ökobilanzen zur Biomasseverwertung.* Bern: Carbotech AG, im Auftrag des Bundesamtes für Energie. Abgerufen von https://carbotech.ch/cms2/wp-content/uploads/LCA_Biomasseverwertung.pdf

Frischknecht, R., Steiner, R., & Jungbluth, N. (2008). Ökobilanzen: Methode der ökologischen Knappheit–Ökofaktoren 2006. *Zürich: öbu.* Abgerufen von http://www.oebu.ch/fileadmin/media/Publikationen/SR28.pdf

Goedkoop, M., Effting, S., & Collignon, M. (2000). *The Eco-indicator 99: A Damage Oriented Method for Life-cycle Impact Assessment: Manual for Designers.* PRé Consultants.

ifu Hamburg. (2015). ecoEditor for ecoinvent Version 3 (Version 3.7.200.14330). ifu Hamburg GmbH.

Kehres, B. (2008). *Informationsdienst Humuswirtschaft & KomPost.* BGK - Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V.

Kehres, B., & Reinhold, J. (2008). *Monetäre Bewertung der Humusreproduktion von Kompost und Gärrückständen.* H&K.

Kolbe, H., & Zimmer, J. (2015). Leitfaden zur Humusversorgung. Informationen für Praxis, Beratung und Schulung. Abgerufen von http://orgprints.org/29534/

Schleiss, K., Jungbluth, N., & Faist Emmenegger, M. (2005). *Ökobilanz zu Varianten der Grüngutentsorgung in der Stadt Zürich.* Zürich: Im Auftrag von Entsorgung und Recycling.

Schleiss, Konrad. (1999). Grüngutbewirtschaftung im Kanton Zürich aus betriebswirtschaftlicher und ökologischer Sicht, Situationsanalyse, Szenarioanalyse, ökonomische und ökologische Bewertung sowie Synthese mit MAUT. http://doi.org/10.3929/ethz-a-003857036

Weidema, B., Bauer, C., Hischier, R., Mutel, C., Nemecek, T., Reinhard, J., u. a. (2013). *Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3* (No. 1). St. Gallen: The ecoinvent Centre.