



# Ökobilanz ausgewählter Betonsorten

Schlussbericht

## **IMPRESSUM**

### **Auftraggeberin:**

Stadt Zürich,  
Amt für Hochbauten,  
Fachstelle Nachhaltiges Bauen  
Amtshaus III, Lindenhofstrasse 21  
8021 Zürich

### **Bearbeitung:**

Laura Tschümperlin  
Rolf Frischknecht  
treeze Ltd., Uster  
tschuemperlin@treeze.ch

### **Projektleitung:**

Michael Pöll  
Fachstelle Nachhaltiges Bauen,

### **Projektteam:**

Armin Grieder (Stadt Zürich, AHB)  
Philipp Hubler (Stadt Zürich, AHB)  
Michael Pöll (Stadt Zürich, AHB)

Download als pdf von  
[www.stadt-zuerich.ch/nachhaltiges-bauen](http://www.stadt-zuerich.ch/nachhaltiges-bauen)

Zürich, November 2016

---

## Abkürzungsverzeichnis

---

a	annum (Jahr)
C	Betongranulat; rezyklierte Gesteinskörnung aus aufbereitetem Betonabbruch (Definition aus SIA 2030)
CEM I	Portlandzement
CEM II	Portlandkompositzement
CEM III	Hochofenzement
CH	Schweiz
GK	Gesteinskörnung
GLO	Globaler Durchschnitt
KBOB	Koordination der Bau- und Liegenschaftsorgane des Bundes
M	Mischgranulat; rezyklierte Gesteinskörnung aus aufbereitetem Mischabbruch (Definition aus SIA 2030)
NPK	Betonsorten nach der Norm SN EN 206:2013
R <sub>c</sub>	Körner aus Beton, Betonprodukten, Mörtel und Mauersteinen aus Beton, gemäss SN EN 933-11 (Definition aus SIA 2030)
R <sub>b</sub>	Körner aus Mauer- und Dachziegeln aus gebranntem Ton, Kalksandsteinen, Porenbetonsteinen, gemäss SN EN 933-1 (Definition aus SIA 2030)
RC-C	Recyclingbeton aus einer Gesteinskörnung mit mindestens 25 Massenprozent R <sub>c</sub> (Definition aus SIA 2030)
RC-M	Recyclingbeton aus einer Gesteinskörnung mit mindestens 25 Massenprozent R <sub>c</sub> +R <sub>b</sub> und mindestens 5 Massenprozent R <sub>b</sub> (Definition aus SIA 2030)
RER	Europa
THG	Treibhausgas
tkm	Tonnenkilometer
UBP	Umweltbelastungspunkte

---

## Grundlagen/Normen

---

SN EN 206:2013, Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität

SN EN 197-1, Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement

SIA Merkblatt 2030 Recyclingbeton Ausgabe 2010

---

# Inhalt

---

1	EINFÜHRUNG	1
1.1	Ausgangslage	1
1.2	Zielsetzung und Untersuchungsrahmen	1
1.3	Struktur des Berichtes	1
2	METHODIK UND DATENGRUNDLAGE	2
2.1	Methodischer Ansatz	2
2.2	Bewertung der Ressourcen im Rahmen der Methode der ökologischen Knappheit 2013	2
2.3	Datengrundlage	3
3	SACHBILANZDATEN UND MODELLIERUNGSANNAHMEN	3
3.1	Überblick	3
3.2	Datenerfassung	3
3.3	Herstellung Recycling-Gesteinskörnung	4
3.4	Klinkerherstellung	8
3.5	Herstellung von Hüttensand	10
3.6	Herstellung von Hochofenzement	14
3.7	Herstellung von CEM I Zement (Portlandzement)	15
3.8	Herstellung von CEM II Zement	16
3.9	Herstellung unspezifischer Betonsorten	18
4	WIRKUNGSABSCHÄTZUNG	21
4.1	Überblick	21
4.2	Gesamtumweltbelastung	23
4.3	Primärenergie erneuerbar und nicht erneuerbar	25
4.4	Treibhausgasemissionen	26
5	FOLGERUNGEN	27
	LITERATUR	28
	ANHANG	30

# 1 Einführung

## 1.1 Ausgangslage

Die Stadt Zürich hat sich das Ziel gesetzt, ihren Primärenergiebedarf auf 2000 Watt pro Person und die Treibhausgasemissionen auf 1 Tonne CO<sub>2</sub> pro Person und Jahr zu senken. Die Fachstelle Ingenieurwesen des Amts für Hochbauten der Stadt Zürich verlangt in ihren Ausschreibungen zu Bauvorhaben, dass der Beton jeweils mit Hochofenzement (Zement CEM III) hergestellt wird. Über die Umweltwirkungen dieser Betonqualität sind jedoch keine aktuellen Informationen verfügbar.

## 1.2 Zielsetzung und Untersuchungsrahmen

Ziel ist es, Umweltkennwerte zur Herstellung von verschiedenen Zuschlagstoffen, Zementsorten und darauf basierenden unspezifischen Betonsorten (Magerbeton, Hochbaubeton, Tiefbaubeton, Bohrpfahlbeton) bereitzustellen.

Bei den Zuschlagstoffen werden zusätzlich zu den bereits bestehenden Daten für natürliche Gesteinskörnung Betongranulat und Mischgranulat untersucht. Betongranulat bezeichnet die rezyklierte Gesteinskörnung aus aufbereitetem Betonabbruch (SIA 2030). Betonabbruch wird durch Abbrechen oder Fräsen von bewehrten oder unbewehrten Betonkonstruktionen und -belägen gewonnen (SIA 2030). Recycling-Gesteinskörnung aus aufbereitetem Mischabbruch wird Mischgranulat genannt (SIA 2030). Beim Mischabbruch handelt es sich um ein Gemisch von ausschliesslich mineralischen Bauabfällen von Massivbauteilen wie Betonabbruch, Backstein-, Kalksandstein- und Natursteinmauerwerkabbruch (SIA 2030). Mischgranulat enthält deshalb nicht nur R<sub>b</sub>, sondern auch R<sub>c</sub> sowie rezyklierter Kalksandstein, Sand und Kies.

Bei den Zementen sollen Umweltkennwerte zur Herstellung der Zementsorten CEM I, CEM II/A, CEM II/B, CEM III/A und CEM III/B bereitgestellt werden. Unterschiedliche Rohstoffe lassen zudem grössere Unterschiede in den Umweltkennwerten der CEM II/B-Typen erwarten. Innerhalb der unterschiedlichen CEM II/B-Typen soll darum ergänzend zum Schweizer Produktionsmix (CEM II/B CH-Mix) die Sorte CEM II/B-LL bilanziert werden.

Die Sachbilanzen für Misch- und Betongranulat sowie Zement beziehen sich auf 1 kg der jeweiligen Recycling-Gesteinskörnung bzw. Zement.

Die Bezugsgrösse für die Umweltkennwerte der Betone ist m<sup>3</sup>.

## 1.3 Struktur des Berichtes

Der Bericht ist wie folgt aufgebaut. In Kapitel 2 werden die zu quantifizierenden Umweltindikatoren und die Datengrundlage beschrieben. In Kapitel 3 werden alle erstellten

Sachbilanzen präsentiert und die Modellierungsannahmen dokumentiert. Die anschliessend ausgewerteten Datensätze und die daraus resultierenden Umweltauswirkungen werden in der Wirkungsabschätzung des Kapitels 4 diskutiert. Der Bericht schliesst mit Folgerungen in Kapitel 5.

## 2 Methodik und Datengrundlage

### 2.1 Methodischer Ansatz

Die Bilanzen werden gemäss den Erfassungsrichtlinien der Plattform „Ökobilanzdaten im Baubereich“ erstellt (Frischknecht 2015).

Die Umweltauswirkungen werden mit folgenden Indikatoren quantifiziert und ausgewiesen:

- Umweltbelastungspunkte (Methode der ökologischen Knappheit 2013, Frischknecht & Büsser Knöpfel 2013),
- Primärenergie gesamt, erneuerbar und nicht erneuerbar (Frischknecht et al. 2007)
- Treibhausgasemissionen (IPCC 2013)

### 2.2 Bewertung der Ressourcen im Rahmen der Methode der ökologischen Knappheit 2013

Mit der Methode der ökologischen Knappheit 2013 (Frischknecht & Büsser Knöpfel 2013) wird die dissipative Ressourcennutzung bewertet. Bei der stofflichen Nutzung von Ressourcen ist nicht die Ressourcenentnahme entscheidend, sondern die Tatsache, wieviel der entnommenen und verarbeiteten Ressource verloren geht und damit für eine künftige Nutzung nicht mehr zur Verfügung steht. Der restliche Anteil, welcher stofflich verwertet beziehungsweise wiederverwendet werden kann, wird lediglich «ausgeliehen» und steht damit zukünftigen Nutzern wieder zur Verfügung. Die dissipative Nutzung wird in den Sachbilanzen mithilfe von Ressourcenkorrekturen modelliert und angewendet auf Armierungseisen sowie Sand und Kies im Beton.

Metalle werden zu 100 % recycelt. Die Ressourcenkorrektur wird für den Primärstahlanteil in den Armierungseisen erteilt.

Beton wird zu 90 % recycelt. Beim Betonbedarf wird deshalb die Ressourcenkorrektur auf 90 % des Kies- und Sandanteils angewendet.

Die Indikatoren Primärenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen sind von diesen Ressourcenkorrekturen nicht betroffen.

## 2.3 Datengrundlage

Die erhobenen Sachbilanzdaten werden mit dem KBOB Ökobilanzdatenbestand v2.2:2016 (KBOB et al. 2016), welcher auf dem ecoinvent Datenbestand v2.2 basiert, verknüpft und in die Ökobilanz-Software SimaPro v8.0.4 eingegeben. Die Beiträge der einzelnen Prozessschritte an die gesamten Umweltauswirkungen der unspezifischen Betonsorten werden ermittelt und diskutiert.

# 3 Sachbilanzdaten und Modellierungsannahmen

## 3.1 Überblick

Neben den unspezifischen Betonsorten wird auch die Herstellung von Recycling-Gesteinskörnung, von Hochofenzement (CEM III), Portlandzement (CEM I) und Portlandkompositzement (CEM II) bilanziert. Neben der Herstellung der Zemente werden die Klinkerherstellung und für Hochofenzement ebenfalls die Hüttensandherstellung bilanziert, da diese Rohstoffe, zu welchen noch keine Datensätze im KBOB Ökobilanzdatenbestand v2.2:2016 (KBOB et al. 2016) vorhanden sind, für die Zementherstellung benötigt werden. Für den in der Zementproduktion ebenfalls benötigten Ölschiefer werden die Umweltkennwerte von Dritten zur Verfügung gestellt<sup>1</sup>, da dessen Herstellung und die zugehörigen Sachbilanzdaten vertraulich sind.

Unterkapitel 3.2 gibt Auskunft über die Datenherkunft der im Folgenden bilanzierten Rohstoffe und unspezifischen Betonsorten. Anschliessend werden deren Sachbilanzen vorgestellt und beschrieben.

## 3.2 Datenerfassung

Die Sachbilanzdaten zur Herstellung von Recycling-Gesteinskörnung wurden mit Hilfe eines Fragebogens und einem Betriebsrundgang bei der Eberhard Bau AG erhoben.

Die Daten für die Herstellung von Klinker, Hüttensand, CEM I, CEM II und CEM III liegen bereits im ecoinvent Datenbestand v3.2 vor und wurden in den KBOB Ökobilanzdatenbestand v2.2:2016 (KBOB et al. 2016) transferiert.

Die Zusammensetzung der unspezifischen Betonsorten für die vier Anwendungsbereiche Magerbeton, Hochbaubeton, Tiefbaubeton und Bohrpfahlbeton wurde in Zusammenarbeit mit der Fachstelle Ingenieurwesen des Amts für Hochbauten der Stadt Zürich festgelegt. Auf Basis dieser Rezepturen und mithilfe der vorgenannten Datensätze wurden die Sachbilanzen der unspezifischen Betonsorten erstellt.

---

<sup>1</sup> Persönliche Mitteilung, Frank Werner, Umwelt & Entwicklung, 23. März 2016

### 3.3 Herstellung Recycling-Gesteinskörnung<sup>2</sup>

Die Eberhard Bau AG produziert Beton- und Mischgranulat. Beide Recycling-Gesteinskörnungen werden in der gleichen stationären Mehrfach-Brech-Siebanlage trocken aufbereitet. Bevor das Material aufgegeben wird, werden grosse Störstoffe manuell entfernt und verschiedene Korngrössen untereinander gemischt. Danach wird das Material gebrochen, Eisen wird abgeschieden und das gebrochene Material wird in die einzelnen Komponentengrössen aufgeteilt. Jede Komponentengrösse wird anschliessend durch einen Windsichter geschleust. Durch die Windsichtung werden Störstoffe, wie Kunststoff oder Altholz aufgrund deren geringeren Dichte ausgesondert. Anschliessend werden die einzelnen Korngrössen und die Störstoffe in separaten Silos abgefangen. Zu grosse Körnungen, sogenanntes Überkorn, wird mit einem zweiten Brecher gebrochen und anschliessend wieder nach Komponentengrössen aufgetrennt.

Mischabbruch ist stärker verunreinigt als Betonabbruch. Altholz und Kunststoff werden fast ausschliesslich aus Mischabbruch ausgesondert. Betonabbruch hingegen enthält fast alles Armierungseisen, welches mit Magneten abgeschieden wird und in ein Recyclingwerk geht. Der brennbare Abfall (vor allem Altholz und Kunststoff) wird in einer Kehrichtverbrennungsanlage verbrannt.

Tab. 3.1 zeigt die Aufwendungen für die Herstellung von 1 kg Mischgranulat und 1 kg Betongranulat auf. Altholz und Kunststoff machen ungefähr je 1 Massen-% des Mischabbruches aus. Der Armierungseisenanteil im Betonabbruch beträgt rund 2 %. Maximal 0.5 % vom Misch- und Betonabbruch werden nach mehrmaliger Aufbereitung aufgrund ungenügender Qualität in einer Inertstoffdeponie abgelagert. Da Mischabbruch stärker verunreinigt ist, fallen pro Jahr zusätzlich noch 200 t Sickerkies an. Dieser Sickerkies wird in Inertstoffdeponien beim Bau der Sickerschicht verwertet und ist somit kein Abfall.

Der Strombedarf für die Herstellung von 1 kg Mischgranulat und 1 kg Betongranulat ist in etwa gleich. Der Brecher benötigt zwar zum Brechen des viel härteren Betonabbruchs mehr Strom, dafür muss Mischabbruch zum Teil mehrmals gesiebt werden. Auch der Dieselverbrauch durch das Beladen und Entleeren des Kompaktladers mit Misch- beziehungsweise Betonabbruch auf dem Recyclingplatz ist für beide Recycling-Gesteinskörnungen in etwa gleich.

Der Recyclingplatz vor der Aufbereitungsanlage wird regelmässig und ausschliesslich mit Regenwasser zur Staubbekämpfung bewässert. Da die gesamte Betriebsfläche versiegelt ist, wird dieses Regenwasser gesammelt und für die Betonaufbereitung benutzt. Somit fällt kein Abwasser an.

---

<sup>2</sup> Persönliche Mitteilungen, Martin Preisig, Eberhard Bau AG, November 2015 bis Februar 2016



Tab. 3.1: Massenbilanz von 1 kg Misch- und Betongranulat (trockene Aufbereitung)

Massenbilanz für 1 kg	Mischgranulat	Betongranulat	Einheit
Mischabbruch / Betonabbruch	1.03E+0	1.03E+0	kg
Strom	4.04E-3	4.05E-3	kWh
Diesel	1.41E-2	1.42E-2	MJ
Sortieranlage	1.00E-10	1.00E-10	unit
Armierungseisen ins Recycling		1.75E-02	kg
Altholz in KVA	9.42E-3		kg
Kunststoff in KVA	9.42E-3		kg
Gesteinskörnung in Inertstoffdeponie	5.14E-3	5.14E-3	kg
Sickerkies (Nebenprodukt geringerer Qualität)	3.42E-3		kg

Die Eberhard Bau AG nimmt unter anderem unverschmutzten Beton- und Mischabbruch zur Wiederverwendung an. Der Anlieferer trägt die Nachweispflicht, dass das Material den Anforderungen der Wegleitung Bodenaushub respektive TVA „Grenzwerte für unverschmutztes Aushub-, Abraum- und Ausbruchmaterial“ entspricht<sup>3</sup>. Der Anlieferer zahlt für die Deponierung des Bauschutts. Je nach Sorte, Korngrösse und Qualität muss er dafür mehr oder weniger viel zahlen.

Das Deponieren von Betonabbruch mit der Korngrösse < 70 cm bietet die Eberhard Bau AG für 5 CHF pro m<sup>3</sup> Schüttgut an<sup>3</sup>. Das Deponieren von Mischabbruch, < 70 cm hingegen ist mit 60 CHF pro m<sup>3</sup> Schüttgut viel teurer als Betonabbruch<sup>3</sup>. Die Eberhard Bau AG fungiert deshalb sowohl als Entsorger von Material, welches zu einem gewissen Grad mit Fremdstoffen verunreinigt ist als auch als Produzent von Recycling-Gesteinskörnungen. Eisenschrott im Betonabbruch und Sickerkies, welcher bei der Aufbereitung von Mischabbruch zu Mischgranulat entsteht und als Versiegelungsmaterial in Deponien eingesetzt werden kann, sind Nebenprodukte der Aufbereitung von Recycling-Gesteinskörnung. Diese Nebenprodukte haben nebst der erbrachten Entsorgungsdienstleistung und der Recycling-Gesteinskörnung ebenfalls einen ökonomischen Wert. Das Altholz und der Kunststoff im Mischabbruch hingegen müssen entsorgt werden und werden somit als Abfall betrachtet.

Da die Eberhard Bau AG einerseits als Entsorger für Beton- und Mischabbruch fungiert und andererseits Recycling-Gesteinskörnung produziert und dabei Eisenschrott zurückgewinnt, erfolgt eine ökonomische Allokation der Aufwendung der Gewinnung von Recycling-Gesteinskörnung auf die verschiedenen Produkte und Dienstleistungen. Si-

<sup>3</sup> [http://www.eberhard.ch/dnl/104\\_1275\\_RC\\_Primaerbaustoffe\\_Peisliste\\_2015.pdf](http://www.eberhard.ch/dnl/104_1275_RC_Primaerbaustoffe_Peisliste_2015.pdf), abgerufen am 3.12.2015

Sickerkies ist bei der Allokation vernachlässigbar, da dessen Preis noch geringer ist als derjenige von Mischgranulat und auch mengenmässig pro kg Mischgranulat nur 0.0043 kg Sickerkies entstehen. Als Nebenprodukt kommt Sickerkies deshalb in der Sachbilanz nicht mehr vor (siehe Tab. 3.4). Die Aufwendungen für die Gewinnung von Mischgranulat werden deshalb auf die Entsorgung von Mischabbruch und die Herstellung von Mischgranulat aufgeteilt. Für die Entsorgung einer Tonne Mischabbruch erhält die Eberhard Bau AG ungefähr 84 CHF (99.75 % der Mischabbruchanlieferungen haben eine Kantenlänge < 70 cm, Eberhard Bau AG 2015). Mischgranulat kostet zwischen 0 und 5.50 CHF. Demzufolge wird für die Allokation von Mischgranulat ein durchschnittlicher Preis von 2.50 CHF/t angenommen. Für die Produktion von 1 kg Mischgranulat braucht es 1.03 kg Mischabbruch. Daraus errechnen sich die in Tab. 3.2 gezeigten Volumenanteile. Gemäss Tab. 3.2 werden somit 97 % der Aufwendungen auf die Entsorgungsfunktion alloziert und Mischgranulat trägt lediglich 3 % der Belastungen aus dessen Aufbereitung.

Tab. 3.2: Ökonomische Allokation der Aufwendungen für die Gewinnung von Mischgranulat

Ökonomische Allokation für die Aufbereitung von Mischgranulat	Einheit	Mischgranulat	Entsorgungsdienstleistung
Preis, bezogen auf eine Tonne	Fr./t	2.50	84.15
Massenanteil	-	0.97	1.00
Allokationsfaktor	-	0.03	0.97

Bei der Entsorgung von Betonabbruch und der gleichzeitigen Gewinnung von Betongranulat wird hingegen 64 % der Aufbereitungsaufwendungen auf die Gesteinskörnung überwält (siehe Tab. 3.3).

Tab. 3.3: Ökonomische Allokation der Aufwendungen für die Gewinnung von Betongranulat

ökonomische Allokation für die Aufbereitung von Betongranulat	Einheit	Betongranulat	Alteisen	Entsorgungsdienstleistung
Preis, bezogen auf eine Tonne	Fr./t	18.70	77.00	8.86
Massenanteil	-	0.97	0.02	1.00
Allokationsfaktor	-	0.64	0.05	0.31

Die Aufwendungen der Aufbereitung werden auf die Entsorgungsdienstleistung von Betonabbruch, auf das zurückgewonnene Alteisen und auf Betongranulat aufgeteilt. Die Alteisenpreise unterliegen starken Schwankungen und sind im Jahr 2015 stark gesunken. Im Dezember 2015 erhielt die Eberhard Bau AG noch 77 CHF/t Alteisen. Pro kg Betonabbruch werden durchschnittlich 18 g Alteisen zurückgewonnen. Der in Tab. 3.3 gezeigte Preis der Entsorgung setzt sich aus der Entsorgung von Betonabbruch der Kantenlänge < 70 cm (98 % der Anlieferungen), der Entsorgung von Betonabbruch der Kantenlänge > 70 cm (1.5 % der Anlieferungen) und der Entsorgung von Betonelementen > 70 cm (0.5 % der Anlieferungen) zusammen und beträgt durchschnittlich rund 9 CHF/t. Pro Tonne Betongranulat für die Betonproduktion (normiert) erhält die Eberhard Bau AG 18.70 CHF (Eberhard Bau AG 2015). Dadurch entstehen die Allokations-

faktoren von 0.31 für die Entsorgung, 0.64 für Betongranulat und 0.05 für Alteisen, mit denen die Aufwendungen der Aufbereitung aufgeteilt werden.

Die Aufwendungen für die Aufbereitung von Recycling-Gesteinskörnung werden mit den Allokationsfaktoren auf die Entsorgung, die Recycling-Gesteinskörnung und bei Betongranulat auf Alteisen alloziert. Tab. 3.4 und Tab. 3.5 zeigen die Sachbilanzen von 1 kg Mischgranulat, beziehungsweise Betongranulat, der Entsorgung von Misch- bzw. Betonabbruch und Alteisen auf. Der Input „sorting plant for construction waste“ wurde von Doka (2003) modelliert. Darin enthalten ist die gesamte Infrastruktur (Kompaktlader, Brecher, Siebe, Ersatzteile, Bürogebäude, Produktionshalle) einer Aufbereitungsanlage. Die modellierte Sortieranlage hat eine Kapazität von 200'000 Tonnen pro Jahr, eine Lebenszeit von 50 Jahren und benötigt eine Fläche von 15'000 m<sup>2</sup> (Doka 2003).

Tab. 3.4: Sachbilanzen von 1 kg Mischgranulat (trockene Aufbereitung) und der Entsorgung von 1 kg Mischabbruch.

	Name	Location	InfrastructureProcess	Unit	recycling aggregate from mixed demolition, dry, at plant	disposal, mixed demolition, at plant	UncertaintyType	StandardDeviation95%	GeneralComment
	Location				CH	CH			
	InfrastructureProcess				0	0			
	Unit				kg	kg			
product	recycling aggregate from mixed demolition, dry, at plant	CH	0	kg	1	0			
product	disposal, mixed demolition, at plant	CH	0	kg	0	1			
technosphere	electricity, medium voltage, at grid	CH	0	kWh	1.17E-4	3.93E-3	1	1.26	(3,4,1,3,1,5,BU:1.05); Persönliche Mitteilung, Martin Preisig, Eberhard Bau AG, 09.11.2015;
	diesel, burned in building machine	GLO	0	MJ	4.09E-4	1.38E-2	1	1.26	(3,4,1,3,1,5,BU:1.05); Persönliche Mitteilung, Martin Preisig, Eberhard Bau AG, 09.11.2015;
	sorting plant for construction waste	CH	1	unit	2.89E-12	9.72E-11	1	3.06	(2,4,1,3,1,5,BU:3); Doka (2003);
	disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration	CH	0	kg	2.72E-4	9.15E-3	1	1.26	(3,4,1,3,1,5,BU:1.05); Persönliche Mitteilung, Martin Preisig, Eberhard Bau AG, 09.11.2015;
	disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to municipal incineration	CH	0	kg	2.72E-4	9.15E-3	1	1.26	(3,4,1,3,1,5,BU:1.05); Persönliche Mitteilung, Martin Preisig, Eberhard Bau AG, 09.11.2015;
	disposal, concrete, 5% water, to inert material landfill	CH	0	kg	1.48E-4	4.99E-3	1	1.26	(3,4,1,3,1,5,BU:1.05); Persönliche Mitteilung, Martin Preisig, Eberhard Bau AG, 09.11.2015;

Tab. 3.5: Sachbilanzen von 1 kg Betongranulat (trockene Aufbereitung), 1 kg Alteisen aus der Aufbereitung von Recycling-Gesteinskörnung und der Entsorgung von 1 kg Betonabbruch.

	Name	Location		Unit	recycling aggregate from concrete demolition, dry, at plant	iron scrap, from concrete demolition, at plant	disposal, concrete demolition, at plant	UncertaintyType	StandardDeviation95%	GeneralComment
		CH	0							
		InfrastructureProcess								
		Unit								
product	recycling aggregate from concrete demolition, dry, at plant	CH	0	kg	1	0	0			
product	iron scrap, from concrete demolition, at	CH	0	kg	0	1	0			
product	disposal, concrete demolition, at plant	CH	0	kg	0	0	1			
technosphere	electricity, medium voltage, at grid	CH	0	kWh	2.67E-3	1.10E-2	1.26E-3	1	1.26	(3,4,1,3,1,5,BU:1.05); Persönliche Mitteilung, Martin Preisig, Eberhard Bau AG, 09.11.2015;
	diesel, burned in building machine	GLO	0	MJ	9.34E-3	3.85E-2	4.42E-3	1	1.26	(3,4,1,3,1,5,BU:1.05); Persönliche Mitteilung, Martin Preisig, Eberhard Bau AG, 09.11.2015;
	sorting plant for construction waste	CH	1	unit	6.59E-11	2.72E-10	3.12E-11	1	3.06	(2,4,1,3,1,5,BU:3); Doka (2003);
	disposal, concrete, 5% water, to inert material landfill	CH	0	kg	3.39E-3	1.40E-2	1.61E-3	1	1.26	(3,4,1,3,1,5,BU:1.05); Persönliche Mitteilung, Martin Preisig, Eberhard Bau AG, 09.11.2015;

### 3.4 Klinkerherstellung

Tab. 3.6 zeigt die Sachbilanz für die Klinkerherstellung im Drehrohrföfen auf, welche auf den aktuellsten Sachbilanzdaten der cemsuisse basiert, die im ecoinvent Datenbestand v3.2 vorliegen. Die verwendeten Daten reflektieren den durchschnittlichen Einsatz von verschiedenen alternativen Brennstoffen und Rohmaterialien über die Jahre 2005 bis 2009. Als Output erhält man gekühlten Klinker. Die Daten werden in die für die KBOB-Empfehlung relevante Umgebung transferiert (siehe Tab. 3.6). Dabei wird zusätzlich der Transport der für die Klinkerherstellung notwendigen Materialien zum Klinkerwerk berücksichtigt.

Tab. 3.6: Sachbilanz von 1 kg Klinker, ab Werk

	Name	Location	Unit	clinker (data from ecoinvent v3.2), at plant	UncertaintyType	StandardDeviation95%	GeneralComment		
								Location	CH
								InfrastructureProcess	0
								Unit	kg
product	clinker (data from ecoinvent v3.2), at plant	CH	kg	1.00E+0					
technosphere	ammonia, liquid, at regional storehouse	CH	kg	1.88E-3	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	bauxite, at mine	GLO	kg	2.70E-3	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	calcareous marl, at plant	CH	kg	3.86E-1	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	diesel, burned in building machine	GLO	MJ	1.34E-2	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	electricity, medium voltage, at grid	CH	kWh	1.21E-1	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	hard coal supply mix	DE	kg	3.70E-2	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	heavy fuel oil, at regional storage	CH	kg	7.58E-4	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	industrial machine, heavy, unspecified, at plant	RER	kg	3.76E-5	1	3.00	(1,1,1,1,1,3,BU:3); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	light fuel oil, at regional storage	CH	kg	2.00E-4	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	limestone, crushed, for mill	CH	kg	1.16E+0	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	lubricating oil, at plant	RER	kg	4.71E-5	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	natural gas, high pressure, at consumer	CH	MJ	3.91E-3	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	petroleum coke, at refinery	RER	kg	8.91E-3	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	pulverised lignite, at plant	DE	MJ	1.56E-1	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	refractory, basic, packed, at plant	DE	kg	1.90E-4	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	refractory, fireclay, packed, at plant	DE	kg	8.21E-5	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	refractory, high aluminium oxide, packed, at plant	DE	kg	1.37E-4	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	chromium steel 18/8, at plant	RER	kg	5.86E-5	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	tap water, at user	CH	kg	3.40E-1	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	urea, as N, at regional storehouse	RER	kg	1.40E-4	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
emission air, unspecified	Ammonia	-	kg	2.21E-5	1	1.21	(1,1,1,1,1,3,BU:1.2); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	Antimony	-	kg	2.41E-8	1	5.00	(1,1,1,1,1,3,BU:5); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	Arsenic	-	kg	4.33E-8	1	5.00	(1,1,1,1,1,3,BU:5); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	Cadmium	-	kg	2.13E-9	1	5.00	(1,1,1,1,1,3,BU:5); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	Carbon dioxide, fossil	-	kg	7.69E-1	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	Carbon dioxide, biogenic	-	kg	4.81E-2	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	Carbon monoxide, fossil	-	kg	1.63E-3	1	5.00	(1,1,1,1,1,3,BU:5); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	Chromium	-	kg	5.91E-9	1	5.00	(1,1,1,1,1,3,BU:5); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	Cobalt	-	kg	2.25E-9	1	5.00	(1,1,1,1,1,3,BU:5); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		
	Copper	-	kg	4.18E-8	1	5.00	(1,1,1,1,1,3,BU:5); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"		

Tab. 3.6: Sachbilanz von 1 kg Klinker, ab Werk (Fortsetzung)

Name	Location	Unit	clinker (data from ecoinvent v3.2), at plant	UncertaintyType	StandardDeviation95%	GeneralComment	
Location			CH				
InfrastructureProcess			0				
Unit			kg				
Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	-	kg	2.78E-14	1	3.00	(1,1,1,1,1,3,BU:3); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"	
Hydrogen chloride	-	kg	2.94E-6	1	1.50	(1,1,1,1,1,3,BU:1.5); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"	
Lead	-	kg	2.97E-8	1	5.00	(1,1,1,1,1,3,BU:5); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"	
Mercury	-	kg	1.18E-8	1	5.00	(1,1,1,1,1,3,BU:5); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"	
NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	-	kg	6.05E-5	1	1.50	(1,1,1,1,1,3,BU:1.5); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"	
Nickel	-	kg	9.16E-9	1	5.00	(1,1,1,1,1,3,BU:5); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"	
Nitrogen oxides	-	kg	8.90E-4	1	1.50	(1,1,1,1,1,3,BU:1.5); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"	
Particulates, < 2.5 um	-	kg	3.96E-6	1	3.00	(1,1,1,1,1,3,BU:3); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"	
Particulates, > 10 um	-	kg	9.29E-7	1	1.50	(1,1,1,1,1,3,BU:1.5); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"	
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	-	kg	1.30E-6	1	2.00	(1,1,1,1,1,3,BU:2); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"	
Sulfur dioxide	-	kg	4.10E-4	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"	
Thallium	-	kg	1.46E-8	1	5.00	(1,1,1,1,1,3,BU:5); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"	
Tin	-	kg	1.34E-8	1	5.00	(1,1,1,1,1,3,BU:5); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"	
Vanadium	-	kg	1.84E-9	1	5.00	(1,1,1,1,1,3,BU:5); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"	
Zinc	-	kg	6.11E-8	1	5.00	(1,1,1,1,1,3,BU:5); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"	
Heat, waste	-	MJ	9.47E-1	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"	
emission resource, in water	Water, unspecified natural origin, CH	-	m3	1.62E-3	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); Basiert auf cemsuisse Daten; entspricht ecoinvent 3.2 Dataset "clinker production, CH"
	transport, lorry 20-28t, fleet average	CH	tkm	3.15E-2	1	2.00	(1,1,1,1,1,3,BU:2); hinzugefügt, da in ecoinvent v3.2 nicht berücksichtigt
	transport, freight, rail	RER	tkm	7.27E-3	1	2.00	(1,1,1,1,1,3,BU:2); hinzugefügt, da in ecoinvent v3.2 nicht berücksichtigt

### 3.5 Herstellung von Hüttensand

Bei der Roheisenherstellung entsteht als Nebenprodukt Hochofenschlacke<sup>4</sup>. Diese feuerflüssige Hochofenschlacke erstarrt unter Beigabe von Wasser und wird zu Hüttensand granuliert, der latent-hydraulische Eigenschaften aufweist. Hüttensand wird danach dem Zement beigemischt und kann durch seine Eigenschaften Portlandzementklinker ersetzen<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> [http://www.beton-informationen.de/huettensandhaltige\\_zemente/](http://www.beton-informationen.de/huettensandhaltige_zemente/), abgerufen am 14.01.2016

Die Umweltbilanz der Hochofenschlacke wird mit zwei verschiedenen Ansätzen quantifiziert. Einerseits wird Hochofenschlacke als Nebenprodukt der Stahlherstellung betrachtet, weshalb sie das Stahlwerk belastungsfrei verlässt. Andererseits wird eine Zuordnung der Aufwendungen und Emissionen des Stahlwerks auf Roheisen und Hochofenschlacke vorgenommen, die sich an ökonomischen Kriterien (Ertrag) orientiert. Die Umweltauswirkungen des Stahlwerks werden mit dem entsprechenden Datensatz „Roheisen, ab Werk“ des ecoinvent Datenbestands v2.2 quantifiziert.

Für die Herstellung von Hüttensand unter Berücksichtigung der Aufwendungen der Hochofenschlacken Herstellung wird der neue Datensatz „Hochofenschlacke, ab Werk“ erstellt. Pro kg gewonnenem Roheisen entstehen gemäss Classen et al. (2007) 0.261 kg Hochofenschlacke. Die anfallende Hochofenschlacke wird zu über 94 % weiterverwendet, unter anderem als Hüttensand in der Zementherstellung. Der Preis von Hochofenschlacke variiert gemäss Broadbent (2014) zwischen 5 €/t und 100 €/t und derjenige von Roheisen und Stahlbramme zwischen 310 €/t und 425 €/t. Bei einem durchschnittlichen Preis der Hochofenschlacke von 53 €/t und einem durchschnittlichen Preis von Roheisen von rund 368 €/t resultiert ein durchschnittlicher Allokationsfaktor für die Hochofenschlacke von 0.036. Die restlichen Aufwendungen und Emissionen (0.964) werden dem Roheisen angerechnet. Tab. 3.7 zeigt die Sachbilanz der Hochofenschlacke nach Zuordnung der Aufwendungen und Emissionen des Stahlwerks.

Tab. 3.7: Sachbilanz von 1 kg Hochofenschlacke, ab Werk, ökonomische Allokation

	Name	Location	Unit	blast furnace slag, at plant	UncertaintyType	StandardDeviation95	%	GeneralComment
	Location			RER				
	InfrastructureProcess			0				
	Unit			kg				
product	blast furnace slag, at plant	RER	kg	1.00E+0				
technosphere	blast furnace	RER	unit	1.84E-12	1	3.00		(1,1,1,1,1,3,BU:3); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	hard coal coke, at plant	RER	MJ	1.34E+0	1	1.07		(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	hard coal mix, at regional storage	UCTE	kg	2.07E-2	1	1.07		(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	iron ore, 65% Fe, at beneficiation	GLO	kg	2.07E-2	1	1.07		(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	limestone, at mine	CH	kg	1.38E-3	1	1.07		(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	natural gas, high pressure, at consumer	RER	MJ	1.65E-2	1	1.07		(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	pellets, iron, at plant	GLO	kg	5.51E-2	1	1.07		(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	refractory, fireclay, packed, at plant	DE	kg	2.75E-4	1	1.07		(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	sinter, iron, at plant	GLO	kg	1.45E-1	1	1.07		(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	transport, barge	RER	tkm	2.27E-3	1	2.00		(1,1,1,1,1,3,BU:2); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	transport, transoceanic freight ship	OCE	tkm	2.05E-1	1	2.00		(1,1,1,1,1,3,BU:2); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	transport, lorry >16t, fleet average	RER	tkm	1.38E-3	1	2.05		(2,1,1,1,1,5,BU:2); ; basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2

Tab. 3.7: Sachbilanz von 1 kg Hochofenschlacke, ab Werk, ökonomische Allokation (Fortsetzung)

	Name	Location	Unit	blast furnace slag, at plant		GeneralComment
				RER	UncertaintyType StandardDeviation95 %	
	Location			RER		
	InfrastructureProcess			0		
	Unit			kg		
	transport, freight, rail	RER	tkm	3.47E-2	1 2.05	(2,1,1,1,1,5,BU:2); ; basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
emission air, unspecified	Carbon dioxide, fossil	-	kg	1.17E-1	1 1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	Carbon monoxide, fossil	-	kg	1.85E-4	1 5.00	(1,1,1,1,1,3,BU:5); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	Hydrogen sulfide	-	kg	1.48E-6	1 1.50	(1,1,1,1,1,3,BU:1.5); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	Nitrogen oxides	-	kg	1.10E-5	1 1.50	(1,1,1,1,1,3,BU:1.5); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	Sulfur dioxide	-	kg	1.83E-5	1 1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	Heat, waste	-	MJ	1.97E+0	1 1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	-	kg	3.66E-16	1 3.00	(1,1,1,1,1,3,BU:3); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	Lead	-	kg	9.52E-9	1 5.00	(1,1,1,1,1,3,BU:5); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	Manganese	-	kg	1.03E-8	1 5.00	(1,1,1,1,1,3,BU:5); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	Nickel	-	kg	2.20E-9	1 5.00	(1,1,1,1,1,3,BU:5); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	Particulates, < 2.5 um	-	kg	3.96E-6	1 3.00	(1,1,1,1,1,3,BU:3); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	Particulates, > 2.5 um, and < 10um	-	kg	2.20E-7	1 2.00	(1,1,1,1,1,3,BU:2); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	Particulates, > 10 um	-	kg	2.20E-7	1 1.50	(1,1,1,1,1,3,BU:1.5); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
technosphere	disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill	CH	kg	2.86E-3	1 1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	disposal, sludge, pig iron production, 8.6% water, to residual material landfill	CH	kg	5.86E-4	1 1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2
	treatment, pig iron production effluent, to wastewater treatment, class 3	CH	m3	2.49E-4	1 1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2

Die Herstellung von Hüttensand aus Hochofenschlacke wird mit Literatur- und Industriedaten der USA aus den Jahren 2001 und 2002 modelliert und repräsentiert die durchschnittliche Hüttensandproduktion auf der Welt. Die Daten liegen im ecoinvent Datenbestand v3.2 vor, und werden in den KBOB Ökobilanzdatenbestand v2.2:2016 transferiert. Für Hüttensand aus vorbelasteter Hochofenschlacke (aufgrund der vorgehend beschriebenen ökonomischen Allokation) kommt der Input „blast furnace slag, at plant“ hinzu. Gemäss ecoinvent v3.2 Datensatz braucht es 1.001 kg Hochofenschlacke für 1 kg Hüttensand. Die Sachbilanzen sind in Tab. 3.8 abgebildet. Darin enthalten ist der Energieaufwand der Trocknung der Hochofenschlacke auf eine Restfeuchte von 10 %.





Tab. 3.8: Sachbilanz von 1 kg Hüttensand, ab Werk (Fortsetzung)

	Name	Location	Unit	ground granulated blast furnace slag, no burdens, at plant	ground granulated blast furnace slag, with burdens, at plant	UncertaintyType	StandardDeviation95%	GeneralComment
				RER	RER			
	Location			RER	RER			
	InfrastructureProcess			0	0			
	Unit			kg	kg			
emission water, unspecified	Water	-	kg	4.29E-1	4.29E-1	1	1.50	(1,1,1,1,1,3,BU:1.5); entspricht Ecoinvent 3.2 Dataset documentation ground granulated blast furnace slag production, RoW
	Heat, waste	-	MJ	7.21E-1	7.21E-1	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); entspricht Ecoinvent 3.2 Dataset documentation ground granulated blast furnace slag production, RoW
emission resource, in water	Water, unspecified, Europe	-	m3	9.19E-4	9.19E-4	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); entspricht Ecoinvent 3.2 Dataset documentation ground granulated blast furnace slag production, RoW
technosphere	disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill	CH	kg	1.12E-3	1.12E-3	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); entspricht Ecoinvent 3.2 Dataset documentation ground granulated blast furnace slag production, RoW
	treatment, concrete production effluent, to wastewater treatment, class 3	CH	m3	3.52E-4	3.52E-4	1	1.07	(1,1,1,1,1,3,BU:1.05); entspricht Ecoinvent 3.2 Dataset documentation ground granulated blast furnace slag production, RoW
	transport, lorry 16-32t, EURO4	RER	tkm	3.59E-5	5.01E-2	1	2.05	(2,1,1,1,1,5,BU:2); hinzugefügt, da in ecoinvent v3.2 nicht berücksichtigt;
	transport, freight, rail	RER	tkm	7.43E-5	7.43E-5	1	2.05	(2,1,1,1,1,5,BU:2); hinzugefügt, da in ecoinvent v3.2 nicht berücksichtigt;

### 3.6 Herstellung von Hochofenzement

Hüttensand wird in grösseren Mengen vor allem den Hochofenzementen (CEM III) beigefügt. Bei den Hochofenzementen wird zwischen drei verschiedenen Hüttensandgehalten unterschieden<sup>5</sup>. CEM III/A enthält 36 M.-% bis 65 M.-% Hüttensand und CEM III/B enthält 66 M.-% bis 80 M.-% Hüttensand<sup>5</sup>. Des Weiteren gibt es noch CEM III C mit einem noch höheren Hüttensandgehalt, welcher aber im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet wird. Bei einem Hüttensandanteil über 20 M.-% im Zement reicht die Abwärme des Mahlprozesses alleine nicht aus, den Hüttensand mit einer Restfeuchte von 10 % vollständig zu trocknen (Boesch & Hellweg 2010). Der Hüttensand für die CEM III Herstellung muss deshalb vor dem Mahlprozess vollständig getrocknet werden. Die Sachbilanz der Herstellung von CEM III/A und CEM III/B Zementen ist ebenfalls bereits im ecoinvent Datenbestand v3.2 enthalten und bildet eine durchschnittliche Herstellung von Hochofenzement in der Schweiz ab (Boesch & Hellweg 2010). Die Daten stammen aus dem Jahr 2009 und wurden für das Jahr 2015 extrapoliert. Tab. 3.9 gibt die Sachbilanz in der für die KBOB-Empfehlung relevanten Umgebung wieder.

<sup>5</sup> [http://www.beton-informationen.de/huettensandhaltige\\_zemente/](http://www.beton-informationen.de/huettensandhaltige_zemente/), abgerufen am 14.01.2016





men. Der CEM II/B-LL Zement von Vigier enthält weniger als 70 %<sup>6</sup> Klinker und der Klinkeranteil im CEM II/B-LL von Jura Cement liegt innerhalb der normativen Bandbreite von 65 – 79 % Klinker<sup>7</sup>. Der Klinkeranteil des zu bilanzierenden CEM II/B-LL Zements wird auf 71 % gesetzt, was dem Mittelwert der maximalen Klinkeranteile von Vigier und der Norm SN EN 197-1 entspricht. Da sich gemäss Norm SN EN 197-1 der Kalksteingehalt zwischen 21 % und 35 % bewegt, wurde die Differenz zu einem kg CEM II/B-LL Zement noch mit Kalkstein aufgefüllt. Die Transportaufwände reduzieren sich aufgrund des wegfallenden Imports des gebrannten Ölschiefers aus Deutschland. Alle weiteren Aufwendungen werden vom CEM II/B CH-Mix Datensatz übernommen.

CEM II/B CH-Mix Zement enthält Ölschiefer. Die Herstellung von Ölschiefer ist zwar als Systemprozess im ecoinvent Datenbestand v3.2 abrufbar, jedoch basiert dieser Datensatz auf einer falschen Allokation zwischen gebranntem Ölschiefer und der gleichzeitig erzeugten Elektrizität. Aus diesem Grund wurden die Umweltkennwerte von gebranntem Ölschiefer von Herrn Frank Werner, welcher den Datensatz erstellte, übernommen. Aus Vertraulichkeitsgründen stehen dazu weder die Sachbilanz noch die Sachbilanzergebnisse zur Verfügung.

---

<sup>6</sup> <http://www.vigier-ciment.ch/produkte/zemente/vigier-cem-iib-ll-325-r/>, abgerufen am 26.10.2016

<sup>7</sup> <http://www.juracement.ch/data/docs/download/8112/de/juraEco-broschuere.pdf>, abgerufen am 26.10.2016



Tab. 3.12: Zusammensetzung und Rohdichten der unspezifischen Betonsorten

Betonsorte	CEM I [kg/m <sup>3</sup> ]	CEM II/A [kg/m <sup>3</sup> ]	CEM II/B [kg/m <sup>3</sup> ]	Natürliche GK (Kies/Sand) [kg/m <sup>3</sup> ]	M [kg/m <sup>3</sup> ]	C [kg/m <sup>3</sup> ]	Wasser [l]	Fliessmittel [kg/m <sup>3</sup> ]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
Hochbaubeton, unspezifisch	30	130	130	1678	93	93	145	1	2300
Tiefbaubeton, unspezifisch	30	145	145	1865	0	0	160	5	2350
Bohrpfahlbeton, unspezifisch	35	160	160	1611	0	179	178	2	2325
Magerbeton, unspezifisch	0	75	75	963	963	0	75	0	2150

In den Sachbilanzdaten der vier unspezifischen Betonsorten (siehe Tab. 3.13) wird das Fliessmittel nicht mehr mit dem Datensatz „plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde“, welches die Produktion von Betonverflüssiger aus Melaminharz abbildet, sondern mit dem Datensatz „polycarboxylates, 40% active substance, at plant“ bilanziert. Heute werden Betonverflüssiger mehrheitlich auf Polycarboxylatbasis hergestellt, da diese effizienter wirken und dadurch geringer dosiert werden können. Zudem sind Fliessmittel auf Polycarboxylatbasis weniger problematisch für die Umwelt, da sie keine Formaldehyde beinhalten (Müller & Hampel 2010).

Die Transportaufwände der Hilfsmittel und Rohstoffe zum Betonwerk werden berücksichtigt. Die Distanzen per Bahn und per LKW werden über Standardtransportdistanzen von Materialien gemäss KBOB Ökobilanzdatenbestand v2.2:2016 (KBOB et al. 2016) ermittelt. Des Weiteren werden, wie in Unterkapitel 2.2 erklärt, Ressourcenkorrekturen für die Anteile an Primärsand und Primärkies in den einzelnen Betonen vorgenommen, da Beton zu 90 % rezykliert wird und somit 90 % der primären Gesteinskörnung später wieder verfügbar sein wird. Ausgewertet nach der Methode der ökologischen Knappheit 2013, werden nur 10 % der für die primäre Gesteinskörnung der Natur entnommenen Ressource Kies bewertet. Die Aufwendungen und Emissionen des Abbaus von Primärkies werden jedoch zu 100 % der natürlichen Gesteinskörnung angerechnet.

Die Entsorgung von Magerbeton wird mit dem Entsorgungsdatensatz von unbewehrtem und die Entsorgung der anderen drei unspezifischen Betonsorten mit dem Entsorgungsdatensatz von bewehrtem Beton modelliert.





## 4 Wirkungsabschätzung

### 4.1 Überblick

Dieses Kapitel beinhaltet die Resultate zu den in Unterkapitel 3.9 beschriebenen Sachbilanzen der unspezifischen Betone. Die Umweltauswirkungen der Betone werden mit den Umweltindikatoren Gesamtumweltbelastung, Primärenergiebedarf gesamt, erneuerbar und nicht erneuerbar, sowie Treibhausgasemissionen quantifiziert und diskutiert. Die Ergebnisse der restlichen für die Betonbilanzierung notwendigen Prozesse, wie die Herstellung von Klinker, Hüttensand, Recycling-Gesteinskörnung und Zement werden im Anhang aufgezeigt.

Bei der Erweiterung respektive Aktualisierung der KBOB-Empfehlung 2009/1:2016 um die vier unspezifischen Betonsorten ist es möglich, dass die im Rahmen der KBOB-Empfehlung 2009/1:2016 publizierten Umweltkennzahlen geringfügig von den hier ausgewiesenen abweichen.

Tab. 4.1 gibt eine Übersicht über die Umweltauswirkungen der vier unspezifischen Betone bezüglich Umweltbelastung, Primärenergiebedarf und Treibhausgasemissionen. Die Umweltauswirkungen beziehen sich jeweils auf einen  $\text{m}^3$ , da Planer und Architekten den Beton nach Volumen und nicht die Masse bestellen. Die Umweltauswirkungen pro kg Beton (wie in der KBOB-Empfehlung 2009/1:2016 präsentiert), sind dem Anhang (Tab. A. 1) zu entnehmen. Alle unspezifischen Betone gehören der Kategorie Beton (ohne Bewehrung) an. Die Resultattabellen geben zudem Auskunft über die Rohdichte der vier bilanzierten Betone. Diese ergibt sich aus den Zement-, Wasser-, Gesteinskörnungs- und Fließmittelgehalten.

Die Umweltbelastung variiert zwischen 140'000 und 246'000 UBP/ $\text{m}^3$ , der Primärenergiebedarf gesamt zwischen 1'150 und 2'040 MJ Öl- $\text{eq}/\text{m}^3$  (mit einem Anteil nicht erneuerbarer Primärenergie von rund 94 %) und die Treibhausgas-Emissionen zwischen 127 und 273  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

Die Entsorgung macht im Schnitt 29 % der totalen Umweltbelastung aus, und trägt durchschnittlich 25 % zum totalen Primärenergiebedarf und 11 % zu den totalen Treibhausgasemissionen bei. Die Belastung der Entsorgung von Magerbeton fällt deutlich geringer aus als diejenige der anderen drei Betonsorten, da Magerbeton nicht bewehrt ist und Magerbeton zudem die geringste Dichte hat. Die Umweltauswirkungen der Entsorgung von einem Kubikmeter bewehrtem Beton variieren geringfügig in Abhängigkeit der ausgehärteten Betondichte der unspezifischen Betonsorten.

Tab. 4.1: Übersicht der Umweltauswirkungen der unspezifischen Betone bezogen auf 1 m<sup>3</sup>

	Rohdichte/ Flächen-masse kg/m <sup>3</sup>	Bezug	UBP 2013			Primärenergie gesamt			Primärenergie nicht erneuerbar			Primärenergie erneuerbar			Treibhausgasemissionen		
			Total	Herstellung	Entsorgung	Total	Herstellung	Entsorgung	Total	Herstellung	Entsorgung	Total	Herstellung	Entsorgung	Total	Herstellung	Entsorgung
			UBP	UBP	UBP	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	kg CO <sub>2</sub> -eq	kg CO <sub>2</sub> -eq
Magerbeton, unspezifisch	2'150	m <sup>3</sup>	140'000	86'200	53'400	1'150	770	377	1'070	714	361	71.6	56.2	15.4	127	108	19.2
Hochbaubeton, unspezifisch	2'300	m <sup>3</sup>	217'000	155'000	62'000	1'780	1'320	458	1'660	1'220	441	111	94.8	16.4	229	204	25.0
Tiefbaubeton, unspezifisch	2'350	m <sup>3</sup>	234'000	171'000	63'300	1'960	1'490	467	1'840	1'390	451	122	105	16.7	252	226	25.5
Bohrpfahlbeton, unspezifisch	2'325	m <sup>3</sup>	246'000	183'000	62'500	2'040	1'570	462	1'910	1'460	445	129	113	16.5	273	248	25.2

## 4.2 Gesamtumweltbelastung

Fig. 4.1 zeigt die Umweltbelastung der unspezifischen Betone in deren Herstellung und Entsorgung. Der Magerbeton mit dem tiefsten Zementgehalt verursacht mit Abstand die geringste Umweltbelastung, gefolgt von Hochbaubeton. Der Zementgehalt ist massgebend für die Höhe der Umweltbelastung.

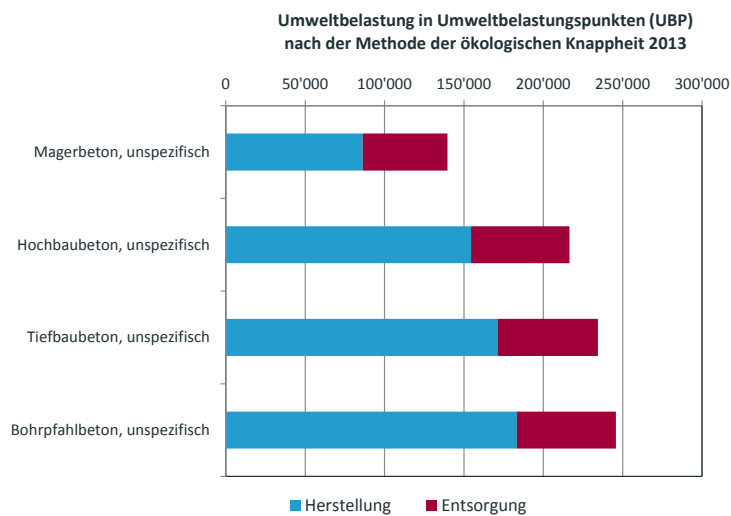


Fig. 4.1: Umweltbelastung in UBP der Herstellung und Entsorgung pro m<sup>3</sup> unspezifische Betonsorte

Fig. 4.2 zeigt die einzelnen Beiträge zur Gesamtumweltbelastung der unspezifischen Betone auf. Zement alleine verursacht dabei 73 % bis 83 % der Gesamtumweltbelastung der Herstellung, währendem die Gesteinskörnung für nur 7 % bis 10 % der Gesamtumweltbelastung der Herstellung verantwortlich ist.

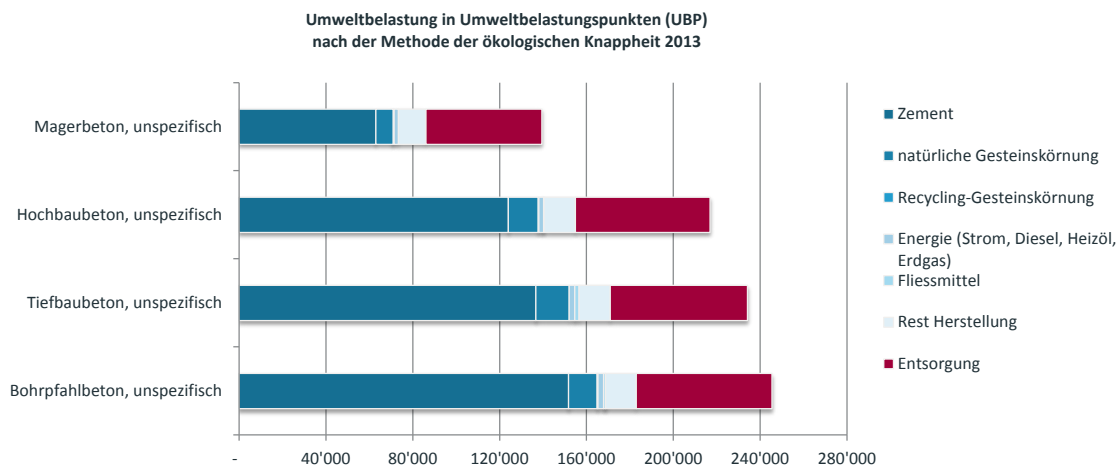


Fig. 4.2: Umweltbelastung (in UBP) pro m<sup>3</sup> unspezifische Betonsorte

### 4.3 Primärenergie erneuerbar und nicht erneuerbar

Fig. 4.3 zeigt den Primärenergiebedarf erneuerbar und nicht erneuerbar der unspezifischen Betone auf, unterteilt in Herstellung und Entsorgung. Der Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie ist rund 15 mal grösser als der Bedarf an erneuerbarer Primärenergie. Magerbeton weist mit 1'070 MJ Öl-eq pro m<sup>3</sup> den tiefsten und Bohrpfahlbeton mit 1'910 MJ Öl-eq pro m<sup>3</sup> den höchsten nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf auf. Der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf von Magerbeton ist rund 35 % tiefer als jener von Hochbaubeton und 44 % tiefer als jener von Bohrpfahlbeton. Bezüglich erneuerbarer Primärenergie sind die Verhältnisse sehr ähnlich.

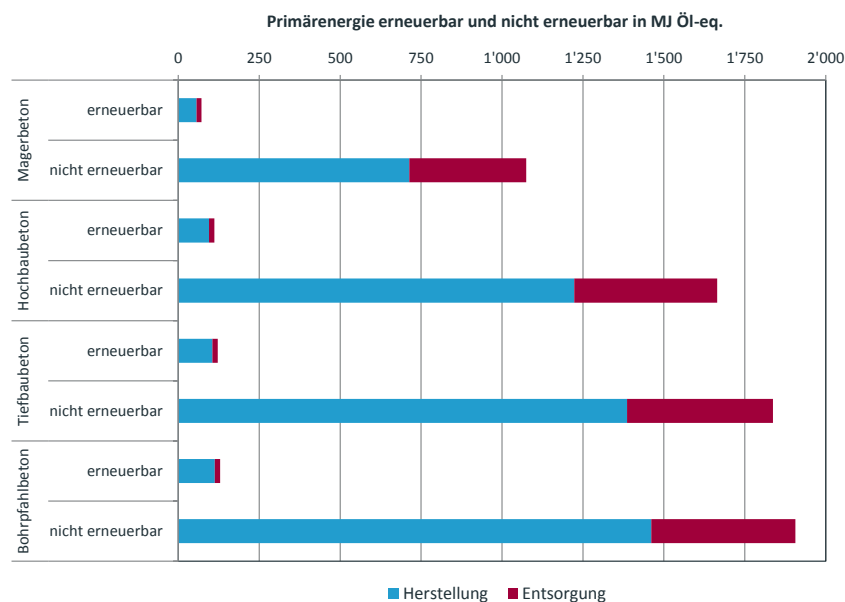


Fig. 4.3: Primärenergiebedarf erneuerbar und nicht erneuerbar in MJ Öl-eq. der Herstellung und Entsorgung pro m<sup>3</sup> unspezifische Betonsorte

## 4.4 Treibhausgasemissionen

Auch bezüglich des Indikators Treibhausgasemissionen verursacht der Bohrpfahlbeton die höchsten und der Magerbeton die tiefsten Emissionen (siehe Fig. 4.4). Magerbeton verursacht dabei um 53 % tiefere Treibhausgasemissionen als Bohrpfahlbeton.

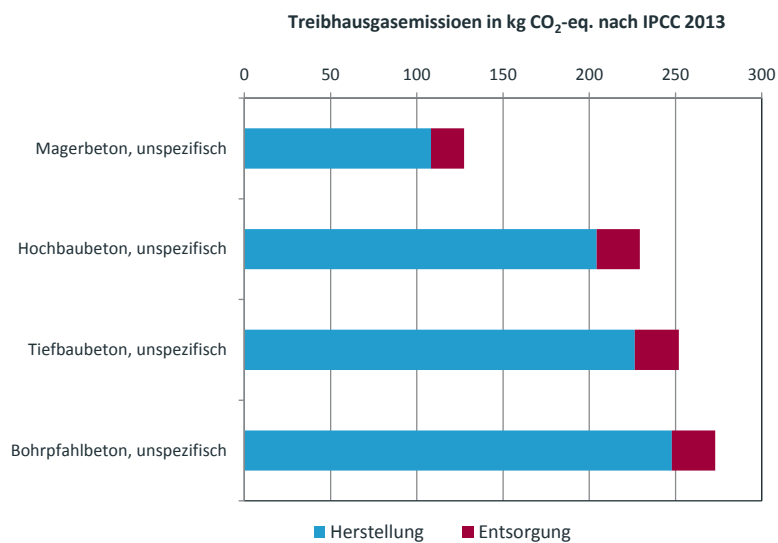


Fig. 4.4: Treibhausgasemissionen in kg CO<sub>2</sub>-eq. der Herstellung und Entsorgung pro m<sup>3</sup> unspezifische Betonsorte

## 5 Folgerungen

Die bilanzierten Betone unterscheiden sich in ihren Umweltauswirkungen teilweise deutlich. Ein paar generelle Aussagen lassen sich jedoch machen:

- Der Zement in den Betonen prägt die Umweltauswirkungen aller unspezifischen Betonsorten. Eine Reduktion des Zementgehalts unter Erfüllung der technischen Anforderungen trägt zur Reduktion der Umweltbelastung von Beton bei.
- Der Einsatz von Recycling-Gesteinskörnung aus Misch- und Betonabbruch empfiehlt sich bei den hier bilanzierten Betonen (bei denen dies technisch möglich und zugelassen ist). Gerade im Bereich einfacher Hochbauten sollte der Einsatz von Recyclingbeton RC-M gefördert werden.
- Da jeder Betonhersteller für jede Betonsorte über mehrere Betonrezepturen verfügt und deren Umweltauswirkungen je nach Zusammensetzung von Zement, Gesteinskörnung, Zusatzmitteln und –stoffen variieren, wäre für die Berechnung und Optimierung umweltfreundlicher Betone bei gegebener Betonsorte ein Betonrechner Excel-Tool sinnvoll.

Die Qualität der den hier dokumentierten Bilanzen zugrundeliegenden Daten kann durchwegs als gut bis sehr gut bezeichnet werden. Insbesondere die Daten zur Herstellung von Klinker und Zementen basieren auf aktuellen, repräsentativen Daten der Schweizerischen Zementindustrie. Die Herstellung wichtiger Zuschlagstoffe wie gebrannter Ölschiefer und gemahlener Hüttensand basieren ebenfalls auf Industriedaten.

Die Betonrezepturen können von Hersteller zu Hersteller variieren. Hierin liegt die Unsicherheit mit den potenziell grössten Auswirkungen auf die Ergebnisse.

## Literatur

- Boesch & Hellweg 2010 Boesch M. E. and Hellweg S. (2010) Identifying improvement potentials in cement production with life cycle assessment. In: Environmental Science & Technology, 44(23), pp. 9143-9149.
- Broadbent 2014 Broadbent C. (2014) A methodology to determine the LCI of steel industry co-products. World Steel Association, retrieved from: <https://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/downloads/steel-by-topic/Co-product-methodology-for-the-steel-industry-2014/document/Co-product%20methodology%20for%20the%20steel%20industry%202014.pdf>.
- Doka 2003 Doka G. (2003) Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Final report ecoinvent 2000 No. 13. EMPA St. Gallen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, retrieved from: [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org).
- Eberhard Bau AG 2015 Eberhard Bau AG (2015) Baustoffe 2015.
- Frischknecht et al. 2007 Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Bauer C., Doka G., Dones R., Hellweg S., Hischer R., Humbert S., Margni M. and Nemecek T. (2007) Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. ecoinvent report No. 3, v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, retrieved from: [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org).
- Frischknecht & Büsler Knöpfel 2013 Frischknecht R. and Büsler Knöpfel S. (2013) Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz. Umwelt-Wissen Nr. 1330. Bundesamt für Umwelt, Bern, retrieved from: <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01750/index.html?lang=de>.
- Frischknecht 2015 Frischknecht R. (2015) Regeln für die Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauprodukten in der Schweiz. Plattform "Ökobilanzdaten im Baubereich", KBOB, eco-bau, IPB, Bern, retrieved from: [http://www.eco-bau.ch/resources/uploads/Oekobilanzdaten/Plattform\\_OeDB\\_Memo\\_Produktsspezifische%20Regeln\\_v3%200.pdf](http://www.eco-bau.ch/resources/uploads/Oekobilanzdaten/Plattform_OeDB_Memo_Produktsspezifische%20Regeln_v3%200.pdf).
- Hischer et al. 2007 Hischer R., Classen M., Lehmann M. and Scharnhorst W. (2007) Life Cycle Inventories of Electric and Electronic Equipment - Production, Use & Disposal. ecoinvent report No. 18, v2.0. EMPA St. Gallen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, retrieved from: [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org).
- IPCC 2013 IPCC (2013) The IPCC fifth Assessment Report - Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Working Group I, IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland.



- KBOB et al. 2016  
KBOB, eco-bau and IPB (2016) KBOB Ökobilanzdatenbestand v2.2:2016; Grundlage für die KBOB-Empfehlung 2009/1:2016: Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2016. Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten und Logistik, retrieved from: [www.lc-inventories.ch](http://www.lc-inventories.ch).
- Müller & Hampel 2010  
Müller M. and Hampel C. (2010) Tailor-made Solutions for efficient Water Reduction in Gypsum Wallboard Production. Sika, Kazan.
- SIA 2030  
SIA (2030) Merkblatt 2030: Recyclingbeton. SIA, Zürich.

# Anhang

Tab. A. 1: Übersicht der Umweltauswirkungen der unspezifischen Betone bezogen auf 1 kg im Format der KBOB-Empfehlung 2009/1:2016

	Rohdichte/ Flächen-masse kg/m <sup>3</sup>	Bezug	UBP 2013			Primärenergie gesamt			Primärenergie nicht erneuerbar			Primärenergie erneuerbar			Treibhausgasemissionen		
			Total	Herstellung	Entsorgung	Total	Herstellung	Entsorgung	Total	Herstellung	Entsorgung	Total	Herstellung	Entsorgung	Total	Herstellung	Entsorgung
			UBP	UBP	UBP	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	kg CO <sub>2</sub> -eq	kg CO <sub>2</sub> -eq
Magerbeton, unspezifisch	2'150	kg	64.9	40.1	25.0	0.533	0.358	0.176	0.500	0.332	0.169	0.0333	0.0261	0.00720	0.0593	0.0503	0.00900
Hochbaubeton, unspezifisch	2'300	kg	94.1	67.2	27.3	0.772	0.573	0.202	0.724	0.532	0.194	0.0483	0.0412	0.00720	0.0997	0.0888	0.0110
Tiefbaubeton, unspezifisch	2'350	kg	99.7	72.8	27.3	0.834	0.635	0.202	0.782	0.590	0.194	0.0519	0.0448	0.00720	0.107	0.0963	0.0110
Bohrpfahlbeton, unspezifisch	2'325	kg	106	78.8	27.3	0.876	0.677	0.202	0.820	0.628	0.194	0.0556	0.0486	0.00720	0.117	0.107	0.0110

Tab. A. 2: Übersicht über die Umweltauswirkungen der natürlichen Gesteinskörnung, der Recycling-Gesteinskörnungen, der Zemente, des Hüttensands, des Klinkers, der Hochofenschlacke und des gebrannten Ölschiefers.

	Bezug	UBP 2013	Primärenergie gesamt	Primärenergie nicht erneuerbar	Primärenergie erneuerbar	Treibhausgas emissionen	Treibhausgas- emissionen pro Primärenergie nicht erneuerbar
		Herstellung	Herstellung	Herstellung	Herstellung	Herstellung	Herstellung
		UBP	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	kg CO <sub>2</sub> -eq	kg CO <sub>2</sub> -eq / MJ Öl-eq
Natürliche Gesteinskörnung	kg	35.3	0.0587	0.0536	0.00514	0.00234	0.0437
Betongranulat	kg	2.14	0.0411	0.0366	0.00448	0.00118	0.0322
Mischgranulat	kg	0.437	0.00203	0.00183	0.000202	0.000703	0.384
Portlandzement CEM I	kg	492	3.69	3.41	0.273	0.756	0.222
Portlandkompositzement CEM II/A	kg	430	3.16	2.94	0.228	0.660	0.224
Portlandkompositzement CEM II/B CH-Mix	kg	413	3.59	3.38	0.212	0.631	0.187
Portlandkompositzement CEM II/B-LL	kg	390	2.92	2.70	0.216	0.595	0.220
Hochofenzement CEM III/A	kg	401	3.51	3.25	0.261	0.557	0.171
Hochofenzement CEM III/B	kg	350	3.37	3.12	0.254	0.451	0.145
Klinker	kg	515	3.48	3.26	0.217	0.826	0.253
Hüttensand, ohne Aufwendungen	kg	175	1.49	1.39	0.101	0.252	0.181
Hüttensand, mit Aufwendungen	kg	537	4.79	4.65	0.146	0.479	0.103
Hochofenschlacke	kg	350	3.17	3.12	0.0434	0.218	0.0699
gebrannter Ölschiefer	kg	211	4.97	4.97	0.00166	0.362	0.0728

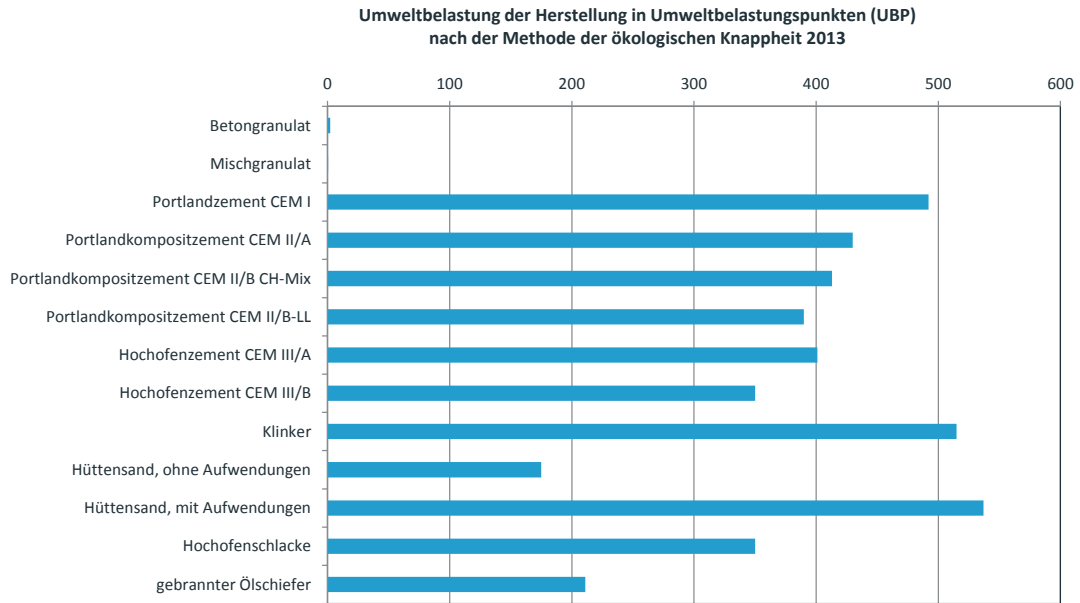


Fig. A. 3: Umweltbelastung der Herstellung in UBP pro kg Rohstoff für die Zement und Betonproduktion

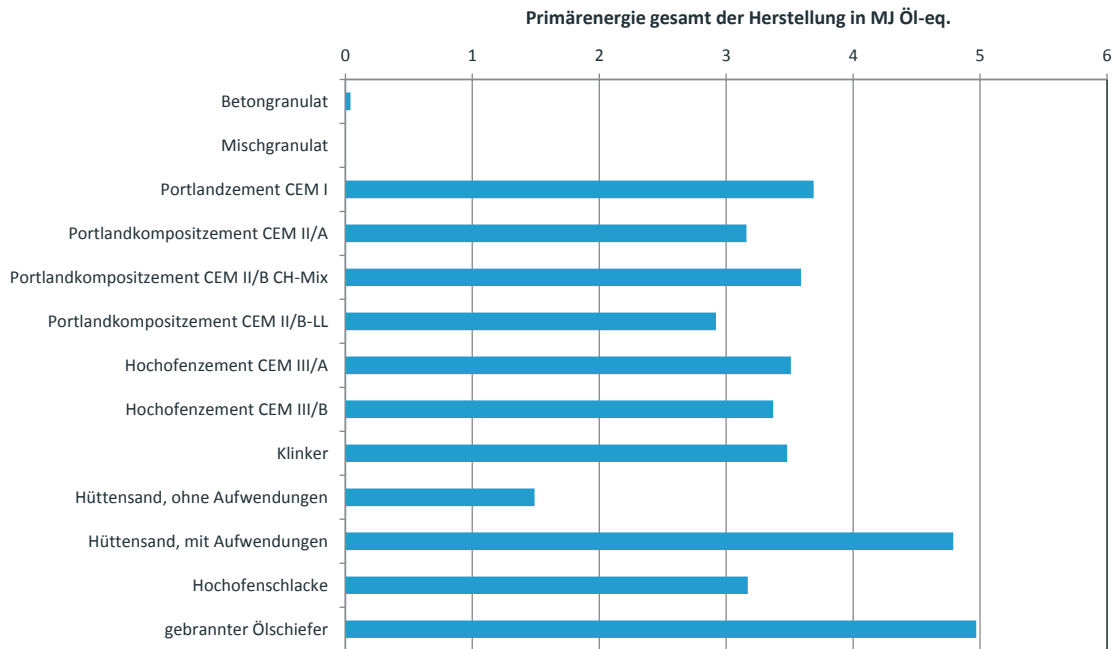


Fig. A. 4: Primärenergiebedarf gesamt der Herstellung in MJ Öl-eq. pro kg Rohstoff für die Zement und Betonproduktion

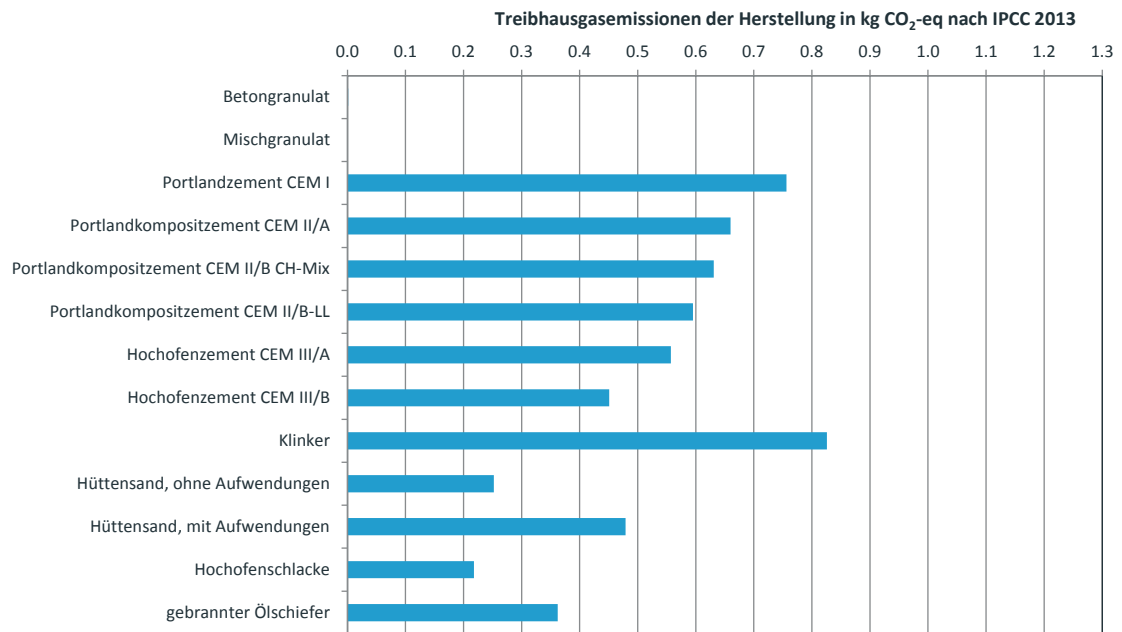


Fig. A. 5: Treibhausgasemissionen in kg CO<sub>2</sub>-eq. pro kg Rohstoff für die Zement und Betonproduktion