



Ökobilanz ausgewählter Betonsorten

Schlussbericht – Version 4.1

IMPRESSUM

Auftraggeberin:

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

Bearbeitung:

Laura Tschümperlin
Livia Ramseier
Rolf Frischknecht
treeze Ltd., Uster
frischknecht@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

Zürich, August 2020

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 _c	Körner aus Beton, Betonprodukten, Mörtel und Mauersteinen aus Beton, gemäss SN EN 933-11 (Definition aus SIA 2030)
R _b	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 _c und weniger als 5 Massenprozent R _b (Definition aus SIA 2030)
RC-M	Recyclingbeton aus einer Gesteinskörnung mit mindestens 25 Massenprozent R _c +R _b und mindestens 5 Massenprozent R _b (Definition aus SIA 2030)
RER	Europa
THG	Treibhausgas
tkm	Tonnenkilometer
UBP	Umweltbelastungspunkte

Grundlagen/Normen

SN EN 206:2013+A1:2016, 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	2
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 gebranntem Ölschiefer	15
3.7	Herstellung von Hochofenzement	17
3.8	Herstellung von CEM I Zement (Portlandzement)	18
3.9	Herstellung von CEM II Zement	19
3.10	Herstellung von Zement ZN/D	21
3.11	Herstellung unspezifischer Betonsorten	22
4	WIRKUNGSABSCHÄTZUNG	25
4.1	Überblick	25
4.2	Gesamtumweltbelastung	27
4.3	Primärenergie erneuerbar und nicht erneuerbar	29
4.4	Treibhausgasemissionen	30
5	FOLGERUNGEN	31
	LITERATUR	32
	ANHANG	33

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 CO₂ 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_b, sondern auch R_c 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, CEM III/B und CEM ZN/D 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 m³.

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. 2007b)
- 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), Portlandkompositzement (CEM II) und CEM ZN/D 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 Werner (2013) und Werner (2018) zur Verfügung gestellt.

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 Umweltkennwerte für die Herstellung von CEM ZN/D stammen aus Werner (2018).

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

3.3 Herstellung Recycling-Gesteinskörnung²

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.

² 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“ entspricht³. 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 m³ Schüttgut an³. Das Deponieren von Mischabbruch, < 70 cm hingegen ist mit 60 CHF pro m³ Schüttgut viel teurer als Betonabbruch³. 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-

³ 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 (Kompaktlander, 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 m² (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
		InfrastructureProcess								
		CH								
		0								
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

product	Name	Location	Unit	clinker (data from ecoinvent v3.2), at plant	UncertaintyType	StandardDeviation95%	GeneralComment
	Location			CH			
	InfrastructureProcess			0			
	Unit			kg			
	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 Hochofenschlacke⁴. 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 ersetzen⁴.

⁴ 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. Gegenüber der Version 3.0 dieses Berichtes wurde der Preis der Hochofenschlacke aktualisiert. Der Preis von granulierter, ungemahlener Hochofenschlacke variiert gemäss Preisrecherchen auf Alibaba.com¹ ca. zwischen 26 US-\$/t und 32 US-\$/t. Gemäss Broadbent (2014) variiert der Preis von Roheisen und Stahlbramme zwischen 310 €/t und 425 €/t. Preisrecherchen² ergaben, dass sich die Preise von Roheisen sich heute auf einem ähnlichen Niveau befinden wie 2012 bis 2014. Bei einem durchschnittlichen Preis der Hochofenschlacke von 27 €/t und einem durchschnittlichen Preis von Roheisen von rund 368 €/t resultiert ein durchschnittlicher Allokationsfaktor für die Hochofenschlacke von 0.019. Die restlichen Aufwendungen und Emissionen (0.981) werden dem Roheisen angerechnet. Tab. 3.7 zeigt die Sachbilanz der Hochofenschlacke nach Zuordnung der Aufwendungen und Emissionen des Stahlwerks.

¹ Recherche am 20.5.2019: verwendetes Stichwort: „granulated blast furnace slag price“

² <https://www.steelonthenet.com/files/pig-iron.html>, abgerufen am 21.5.2019.

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

	Name	Location	Unit	blast furnace slag, at plant					
				RER	UncertaintyType	StandardDeviation95			
							0	%	GeneralComment
product	blast furnace slag, at plant	RER	kg	1.00E+0					
technosphere	blast furnace	RER	unit	9.48E-13	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	6.91E-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			
	hard coal mix, at regional storage	UCTE	kg	1.07E-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	1.07E-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	7.11E-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			
	natural gas, high pressure, at consumer	RER	MJ	8.53E-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			
	pellets, iron, at plant	GLO	kg	2.84E-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	1.42E-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	7.47E-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			
	transport, barge	RER	tkm	1.17E-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	1.06E-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	7.14E-4	1	2.05 (2,1,1,1,1,5,BU:2); ; basiert auf dem Datensatz: pig iron, at plant aus ecoinvent v2.2			
	transport, freight, rail	RER	tkm	1.79E-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	6.04E-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		
Carbon monoxide, fossil		-	kg	9.53E-5	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	7.64E-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			

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

Name	Location	Unit	blast furnace slag, at plant	UncertaintyType	StandardDeviation95	%	GeneralComment
Location			RER				
InfrastructureProcess			0				
Unit			kg				
Nitrogen oxides	-	kg	5.67E-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
Sulfur dioxide	-	kg	9.45E-6	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	1.02E+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	1.89E-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	4.92E-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	5.29E-9	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	1.13E-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	2.04E-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	1.13E-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	1.13E-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	1.47E-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	3.03E-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	1.29E-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 Hochofenschlacke, der auf Basis der vorgehend beschriebenen ökonomischen Allokation ein Teil der Umweltauswirkungen der Stahlherstellung angerechnet wird, 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 %. Gegenüber der in der Ver-

sion 3 dieses Berichts dokumentierten Bilanz wurden die CO₂-Emissionen um einen Faktor 10 nach unten korrigiert (Fehlerkorrektur).

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

	Name	Location	Unit	ground granulated blast furnace slag, no burdens, at plant	ground granulated blast furnace slag, with burdens, at plant	UncertaintyType	StandardDeviation%	GeneralComment
				RER	RER			
	Location InfrastructureProcess			0 kg	0 kg			
product	ground granulated blast furnace slag, no burdens, at plant	RER	kg	1.00E+0				
product	ground granulated blast furnace slag, with burdens, at plant	RER	kg		1.00E+0			
technosphere	blast furnace slag, at plant	RER	kg	0	1.00143E+0	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	diesel, burned in building machine	GLO	MJ	4.52E-3	4.52E-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
	electricity, medium voltage, production ENTSO, at grid	ENTSO	kWh	9.12E-2	9.12E-2	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
	light fuel oil, at regional storage	RER	kg	1.00E-3	1.00E-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
	lubricating oil, at plant	RER	kg	4.01E-6	4.01E-6	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
	natural gas, high pressure, at consumer	RER	MJ	3.23E-1	3.23E-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
	air filter, central unit, 600 m3/h, at plant	RER	unit	8.03E-5	8.03E-5	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
	cement plant	CH	unit	5.36E-11	5.36E-11	1	3.00	(1,1,1,1,1,3,BU:3); entspricht Ecoinvent 3.2 Dataset documentation ground granulated blast furnace slag production, RoW
	solvents, organic, unspecified, at plant	GLO	kg	8.26E-7	8.26E-7	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
	ethylene glycol, at plant	RER	kg	1.26E-6	1.26E-6	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
	steel, low-alloyed, at plant	RER	kg	3.53E-4	3.53E-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
emission air, unspecified	Carbon dioxide, fossil	-	kg	1.97E-2	1.97E-2	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
	Carbon monoxide, fossil	-	kg	5.45E-5	5.45E-5	1	5.00	(1,1,1,1,1,3,BU:5); entspricht Ecoinvent 3.2 Dataset documentation ground granulated blast furnace slag production, RoW
	Hydrogen sulfide	-	kg	2.70E-4	2.70E-4	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
	Methane, fossil	-	kg	1.37E-6	1.37E-6	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
	Nitrogen oxides	-	kg	2.42E-6	2.42E-6	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
	NM/VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	-	kg	7.95E-7	7.95E-7	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
	Particulates, > 2.5 um, and < 10um	-	kg	1.53E-6	1.53E-6	1	2.00	(1,1,1,1,1,3,BU:2); entspricht Ecoinvent 3.2 Dataset documentation ground granulated blast furnace slag production, RoW
	Sulfur dioxide	-	kg	2.31E-4	2.31E-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
	Water	-	kg	1.38E-1	1.38E-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

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	Uncertainty Type	Standard Deviation %	General Comment
				RER 0 kg	RER 0 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	6.93E-1	6.93E-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 gebranntem Ölschiefer

Gebrannter Ölschiefer wird vor allem in CEM II/B Zementen und im Zement CEM ZN/D eingesetzt. Bei der Herstellung von gebranntem Ölschiefer wird auch Strom produziert. Die Herstellung von einer Tonne gebranntem Ölschiefer führt zur Produktion von 183.8 kWh Strom, welcher im benachbarten Zementwerk eingesetzt beziehungsweise an Dritte verkauft wird. Die Umweltkennwerte des gebrannten Ölschiefers basieren auf einer Sachbilanz von Werner (2013) mit einer ökonomischen Allokation zwischen den Co-Produkten Strom (28.7%) und gebranntem Ölschiefer (71.3%) gemäss Werner (2018). Die Sachbilanz des gebrannten Ölschiefers gemäss der Allokation aus Werner (2018) ist in Tab. 3.9 dargestellt. Für die Transportdistanzen wurden die Standarddistanzen gemäss Frischknecht et al. (2007a) verwendet (siehe Tab. 3.10).

Tab. 3.9: Sachbilanz von 1 kg gebranntem Ölschiefer (GÖS), ab Werk (Werner 2013), angepasst gemäss Allokation aus Werner (2018).

		Zuordnung zu GÖS	
		100 %	71.30 %
Input	Einheit	pro t	pro t
Energie und Betriebsmittel			
Sprengstoff	kg	9.45E-02	6.74E-02
Diesel Abbaugerät	l	5.40E-01	3.85E-01
Stromverbrauch Brecher	kWh	1.62E+00	1.16E+00
Stromverbrauch Förderbänder	kWh	7.02E-01	5.01E-01
Stromverbrauch Zerkleinern	kWh	4.86E+00	3.47E+00
Heizöl EL, Mühle	l	2.00E-01	1.43E-01
Stromverbrauch GÖS-Produktion	kWh	4.30E+01	3.07E+01
Stromverbrauch Stromerzeugung	kWh	1.60E+01	1.14E+01
Wasserverbrauch	m ³	7.00E-01	4.99E-01
Laugen/Säuren			
Salzsäure	kg	1.00E-01	7.13E-02
Natronlauge	kg	1.00E-01	7.13E-02
Chlorbleichlauge	kg	1.00E-01	7.13E-02
Chemikalien, org.	kg	8.00E-02	5.70E-02
Stromverbrauch Mahlen	kWh	3.00E+01	2.14E+01
Emissionen			
Staub	kg	1.33E-03	9.48E-04
Nox	kg	7.28E-01	5.19E-01
SO ₂	kg	6.37E-01	4.54E-01
CO ₂	kg	5.92E+02	4.22E+02
davon fossil	kg	3.59E+02	2.56E+02
davon geogen	kg	2.33E+02	1.66E+02
CO	kg	5.73E-01	4.09E-01
Outputs			
Abwasser, unbelastet	m ³	1.50E-01	1.07E-01

Tab. 3.10: Transportdistanzen für die Produktion von gebranntem Ölschiefer

Material	Einheit	Distanz Bahn	Distanz LKW
Heizöl	km	600	0
Salzsäure	km	200	100
Natronlauge	km	600	100
Chlorbleichlauge	km	600	100

Aufgrund der eingesehenen Unterlagen sind die Autoren der Ansicht, dass dem Strom keine Umweltauswirkungen zugeteilt werden dürften. Diese Ansicht wird vom Ersteller der Ökobilanz von gebranntem Ölschiefer jedoch nicht geteilt. Im Anhang A sind die Umweltkennwerte von gebranntem Ölschiefer einmal mit ökonomischer Allokation und einmal mit 100 % Zuordnung auf gebranntem Ölschiefer aufgeführt. Im Betonrechner werden die Umweltkennwerte des Ölschiefers gemäss Variante „ökonomische Allokation“ verwendet.

3.7 Herstellung von Hochofenzement

Hüttensand wird in grösseren Mengen vor allem den Hochofenzementen (CEM III) beigefügt. Bei den Hochofenzementen wird zwischen drei verschiedenen Hüttensandgehalten unterschieden⁵. CEM III/A enthält 36 M.-% bis 65 M.-% Hüttensand und CEM III/B enthält 66 M.-% bis 80 M.-% Hüttensand⁵. 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.

Im Betonrechner sind die Hochofenzemente mit der Variante „Hüttensand, ohne Aufwendungen“ implementiert.

Tab. 3.11 gibt die Sachbilanz in der für die KBOB-Empfehlung relevanten Umgebung wider.

⁵ http://www.beton-informationen.de/huettensandhaltige_zemente/, abgerufen am 14.01.2016

tiven Bandbreite des Klinkeranteils im Zementtype CEM II/B-LL abgeleitet. Laut Norm SN EN 197-1 setzt sich der CEM II/B-LL Zement aus 65-79 % Portlandklinker zusammen. Der CEM II/B-LL Zement von Vigier enthält weniger als 70 %⁶ Klinker und der Klinkeranteil im CEM II/B-LL von Jura Cement liegt innerhalb der normativen Bandbreite von 65 – 79 % Klinker⁷. 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 gebrannten Ölschiefer (siehe Beschreibung in Unterkapitel 3.6). Die Umweltkennwerte dieses Zements wurden mit den Sachbilanzdaten von gebranntem Ölschiefer gemäss den beiden Allokationsansätzen ermittelt (siehe Anhang A).

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

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

Die Umweltkennwerte des Zements ZN/D stammen aus Werner (2018) und wurden mit den Sachbilanzdaten von gebranntem Ölschiefer gemäss den beiden Allokationsansätzen ermittelt (siehe Beschreibung Unterkapitel 3.6 und Anhang A). Im Betonrechner ist die Variante „ökonomische Allokation“ implementiert.

3.11 Herstellung unspezifischer Betonsorten

Die vier unspezifischen Betone unterscheiden sich in ihrer Rohdichte, Druckfestigkeit, Verarbeitung, ihrem Anwendungsbereich sowie weiteren besonderen Eigenschaften⁸. Sie haben zudem unterschiedliche Zementgehalte.

Die Daten der Fachstelle Ingenieurwesen des Amtes für Hochbauten der Stadt Zürich geben Auskunft über die Zusammensetzung der Betone bezüglich deren Gehalt an natürlicher und Recycling-Gesteinskörnung, Zement (Anteile CEM I, CEM II/A und CEM II/B), deren Fließmittelbedarf sowie deren Rohdichte. Dabei handelt es sich um Durchschnittswerte der NPK Betonsorten dieser Anwendungsbereiche. Tab. 3.15 zeigt die Zusammensetzung der vier unspezifischen Betonsorten auf. Die Rohdichten der Betone berechnen sich durch das Aufaddieren der durchschnittlichen Mengen an Zement, natürlicher und Recycling-Gesteinskörnung, Wasser und Fließmittel. Der Wassergehalt wurde für alle vier unspezifischen Betone über den w/z-Wert von 0.5 bestimmt⁹.

Tab. 3.15: Zusammensetzung und Rohdichten der unspezifischen Betonsorten

Betonsorte	CEM I [kg/m ³]	CEM II/A [kg/m ³]	CEM II/B [kg/m ³]	Natürliche GK (Kies/Sand) [kg/m ³]	M [kg/m ³]	C [kg/m ³]	Wasser [l]	Fließmittel [kg/m ³]	Rohdichte [kg/m ³]
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. 3.16) 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

⁸ http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Beton_Klassifizierung-der-Betonarten_150972.html, abgerufen am 03.02.2016

⁹ Persönliche Mitteilung, Michael Pöll, Amt für Hochbauten Stadt Zürich, 27.06.2016

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 % recycelt 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 3.10 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 (siehe auch Beschreibungen der Aktualisierungen gegenüber Version 3 dieses Berichtes in den Kapiteln 3.5 und 3.6).

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 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 Dichte der vier bilanzierten Betone. Diese ergibt sich aus den Zement-, Wasser-, Gesteinskörnungs- und Fließmittelgehalten.

Die Umweltbelastung variiert zwischen 140'000 und 247'000 UBP/ m^3 , der Primärenergiebedarf gesamt zwischen 1'140 und 2'010 MJ Öl- eq/m^3 (mit einem Anteil nicht erneuerbarer Primärenergie von rund 94 %) und die Treibhausgas-Emissionen zwischen 128 und 274 kg/m^3 .

Die Entsorgung macht im Schnitt 29 % der totalen Umweltbelastung aus, und trägt durchschnittlich 26 % 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 m³

	Rohdichte/ Flächen-masse kg/m ³	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 ₂ -eq	kg CO ₂ -eq
Magerbeton, unspezifisch	2'150	m ³	140'000	86'600	53'400	1'140	760	377	1'070	704	361	71.6	56.2	15.4	128	109	19.2
Hochbaubeton, unspezifisch	2'300	m ³	217'000	155'000	62'000	1'760	1'300	458	1'650	1'210	441	111	94.8	16.4	230	205	25.0
Tiefbaubeton, unspezifisch	2'350	m ³	235'000	172'000	63'300	1'940	1'470	467	1'820	1'370	451	122	105	16.7	253	228	25.5
Bohrpfahlbeton, unspezifisch	2'325	m ³	247'000	184'000	62'500	2'010	1'550	462	1'890	1'440	445	129	113	16.5	274	249	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.

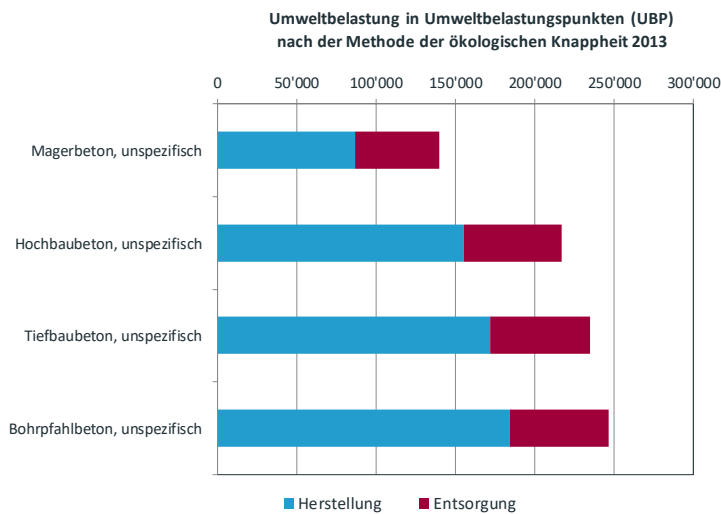


Fig. 4.1: Umweltbelastung in UBP der Herstellung und Entsorgung pro m³ unspezifische Betonsorte

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

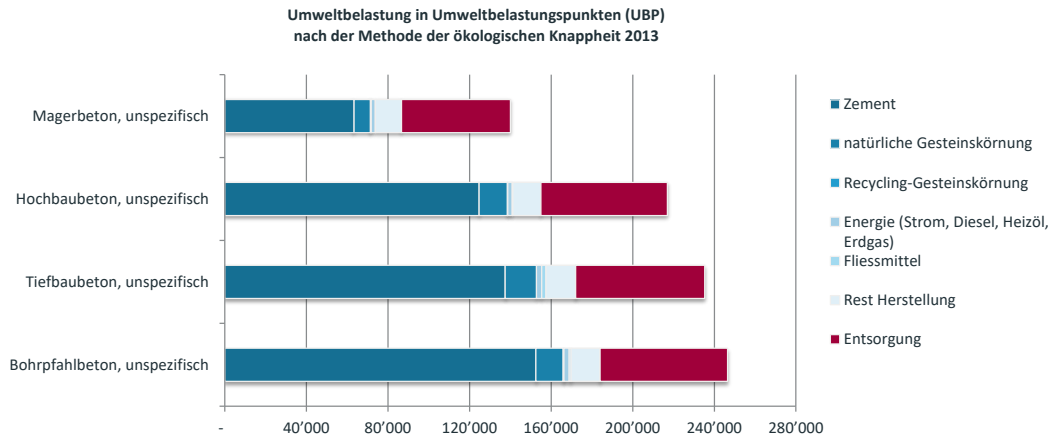


Fig. 4.2: Umweltbelastung (in UBP) pro m³ unspezifische Betonsorte

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 m³ den tiefsten und Bohrpfahlbeton mit 1'890 MJ Öl-eq pro m³ 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.

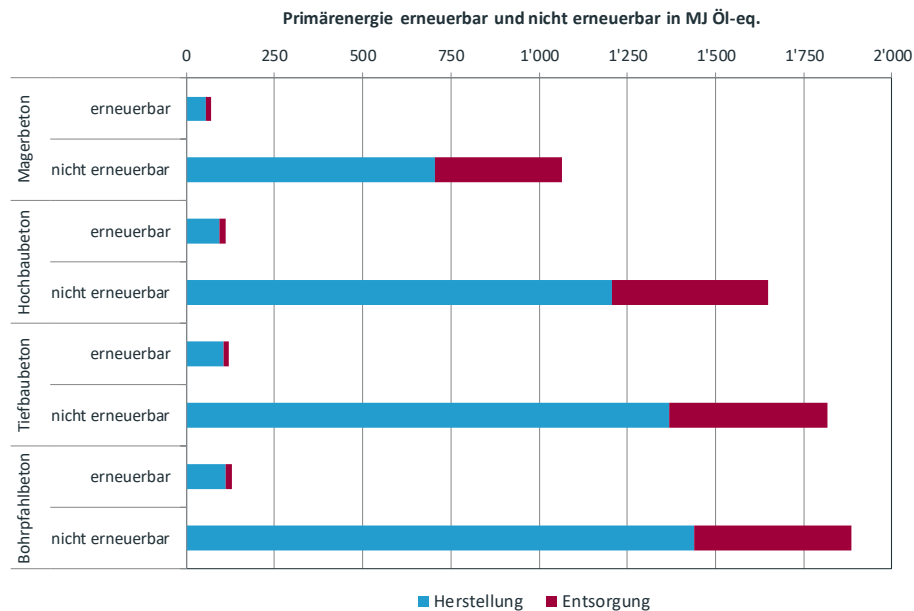


Fig. 4.3: Primärenergiebedarf erneuerbar und nicht erneuerbar in MJ Öl-eq. der Herstellung und Entsorgung pro m³ unspezifische Betonsorte

4.4 Treibhausgasemissionen

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

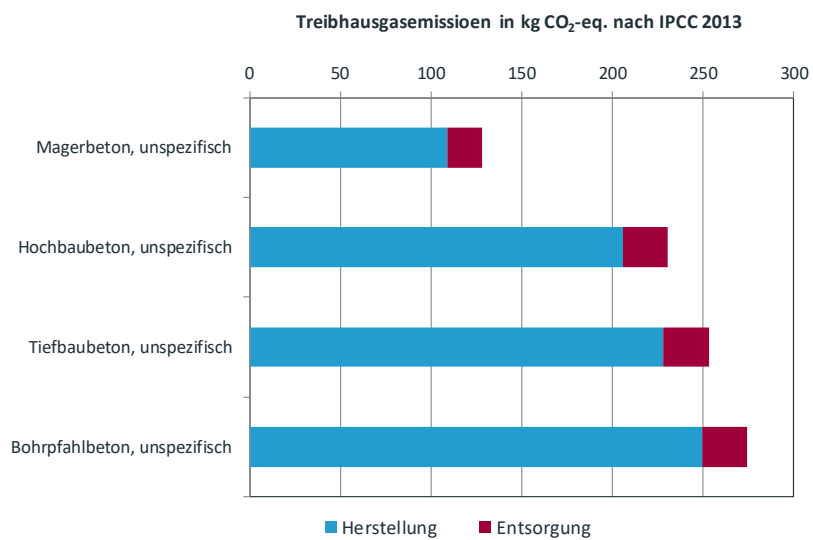


Fig. 4.4: Treibhausgasemissionen in kg CO₂-eq. der Herstellung und Entsorgung pro m³ unspezifische Betonsorte

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 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 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 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.
- Eberhard Bau AG (2015) Baustoffe 2015.
- Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Dones R., Heck T., Hellweg S., Hischier R., Nemecek T., Rebitzer G. and Spielmann M. (2007a) Overview and Methodology. ecoinvent report No. 1, v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, retrieved from:
www.ecoinvent.org.
- Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Bauer C., Doka G., Dones R., Hellweg S., Hischier R., Humbert S., Margni M. and Nemecek T. (2007b) 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.
- Frischknecht R. and Büsser 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 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_Produkt-spezifische%20Regeln_v3%200.pdf.
- Hischier 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.
- IPCC (2013) The IPCC fifth Assessment Report - Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Working Group I, IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland.
- KBOB, eco-bau and IPB (2016) KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016; 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.ecoinvent.org.
- Müller M. and Hampel C. (2010) Tailor-made Solutions for efficient Water Reduction in Gypsum Wallboard Production. Sika, Kazan.
- SIA (2030) Merkblatt 2030: Recyclingbeton. SIA, Zürich.
- Werner F. (2013) Koproduktallokation der Prozesse zur Herstellung von Gebranntem Ölschiefer bei Erstellung von Umweltproduktdeklarationen nach EN 15804. Holcim Schweiz.
- Werner F. (2018) Ökobilanz für den Zement ZN/D nach den methodischen Setzungen des Merkblattes KBOB 2009/1:2016, 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 ³	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 ₂ -eq	kg CO ₂ -eq
Magerbeton, unspezifisch	2'150	kg	65.1	40.3	25.0	0.529	0.353	0.176	0.495	0.327	0.169	0.0333	0.0262	0.00720	0.0596	0.0506	0.00900
Hochbaubeton, unspezifisch	2'300	kg	94.4	67.5	27.3	0.765	0.566	0.202	0.716	0.525	0.194	0.0483	0.0412	0.00720	0.100	0.0893	0.0110
Tiefbaubeton, unspezifisch	2'350	kg	100.00	73.1	27.3	0.826	0.627	0.202	0.774	0.582	0.194	0.0519	0.0448	0.00720	0.108	0.0969	0.0110
Bohrpfahlbeton, unspezifisch	2'325	kg	106	79.2	27.3	0.867	0.668	0.202	0.811	0.620	0.194	0.0557	0.0486	0.00720	0.118	0.107	0.0110

Tab. A. 2: Übersicht über die aktualisierten Umweltauswirkungen der Zemente CEM I, CEM II/A, CEM II/B, CEM II/B-LL, CEM III/A, CEM III/B und CEM ZN/D, des Hüttensands, der Hochofenschlacke und des gebrannten Ölschiefers und des neu bilanzierten Zements ZN/D; die Umweltauswirkungen der Zemente mit Hüttensand beziehungsweise gebranntem Ölschiefer wurden jeweils auf Basis beider Allokationsvarianten ermittelt. GÖS: Gebrannter Ölschiefer;

	Bezug	UBP 2013	CED tot	CED ne	CED e	IPCC GWP 2013	Treibhausgas-emissionen pro Primärenergie nicht erneuerbar
		Herstellung	Herstellung	Herstellung	Herstellung	Herstellung	Herstellung
		UBP	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	kg CO ₂ -eq	kg CO ₂ -eq / MJ Öl-eq
Sand	kg	35.27	0.06	0.05	0.01	0.002	0.04
Kies	kg	35.27	0.06	0.05	0.01	0.002	0.04
recyklierte Gesteinskörnung aus Betonabbruch (RC-C)	kg	2.14	0.04	0.04	0.00	0.001	0.03
recyklierte Gesteinskörnung aus Mischabbruch (RC-M)	kg	0.44	0.00	0.00	0.00	0.001	0.38
Portlandzement (CEM I)	kg	492.08	3.69	3.41	0.27	0.756	0.22
Portlandkompositzement CEM II/A	kg	429.99	3.16	2.94	0.23	0.660	0.22
Portlandkompositzement CEM II/A, Hüttensand mit Aufwendungen	kg	430.34	3.17	2.94	0.23	0.660	0.22
Portlandkompositzement CEM II/B CH-Mix, GÖS mit ökon. Allokation	kg	415.66	3.46	3.25	0.21	0.640	0.20
Portlandkompositzement CEM II/B CH-Mix, GÖS mit 100% Aufwendungen	kg	428.44	3.68	3.46	0.21	0.663	0.19
Portlandkompositzement CEM II/B-LL	kg	389.69	2.92	2.70	0.22	0.595	0.22
Hochofenzement CEM III/A	kg	358.92	3.49	3.23	0.26	0.466	0.14
Hochofenzement CEM III/A, Hüttensand mit Aufwendungen	kg	456.07	4.39	4.11	0.27	0.527	0.13
Hochofenzement CEM III/B	kg	288.90	3.35	3.09	0.25	0.319	0.10
Hochofenzement CEM III/B, Hüttensand mit Aufwendungen	kg	429.33	4.64	4.37	0.27	0.408	0.09
Klinker	kg	514.80	3.48	3.26	0.22	0.826	0.25
Hüttensand, ohne Aufwendungen	kg	91.76	1.45	1.35	0.10	0.072	0.05
Hüttensand, mit Aufwendungen	kg	284.14	3.23	3.10	0.13	0.193	0.06
Hochofenschlacke	kg	180.46	1.63	1.61	0.02	0.113	0.07
gebrannter Ölschiefer, ökonomische Allokation	kg	233.00	3.97	3.97	0.002	0.427	0.11
gebrannter Ölschiefer, 0% Aufwendungen auf Strom	kg	326.79	5.57	5.57	0.003	0.599	0.11
Fliessmittel	kg	1'344.59	34.84	33.88	0.97	1.246	0.04
Zement ZN/D, ökonomische Allokation	kg	375.00	3.71	3.44	0.271	0.563	0.16
Zement ZN/D, 0% Aufwendungen auf Strom	kg	392.82	4.01	3.75	0.271	0.596	0.16

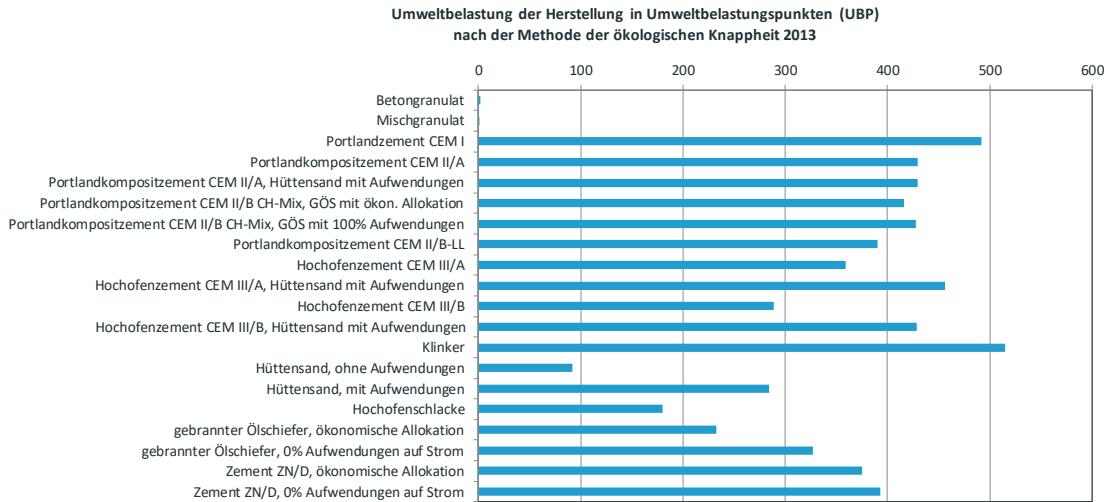


Fig. A. 3: Umweltbelastung der Herstellung in UBP pro kg Rohstoff für die Zement und Betonproduktion

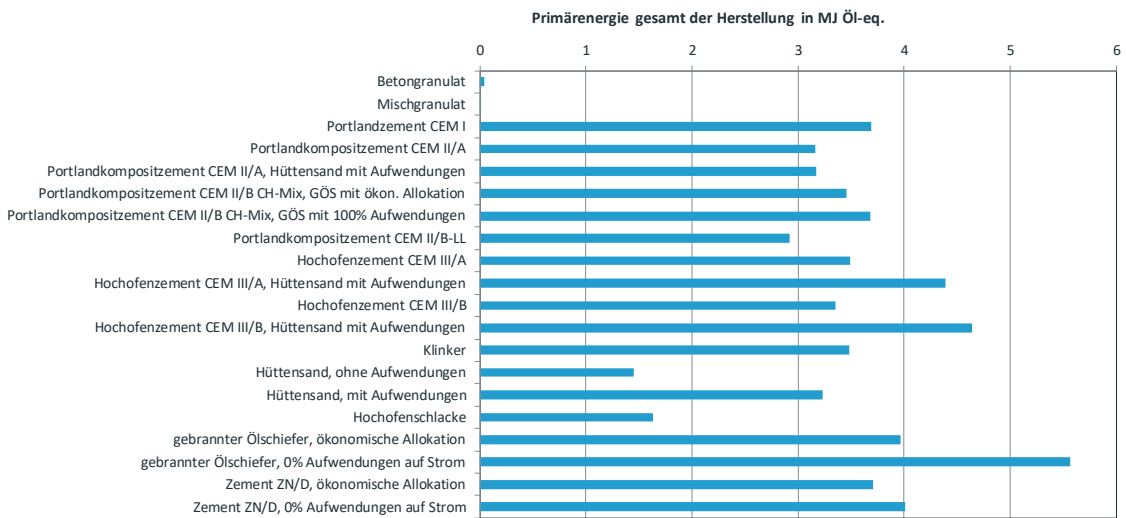


Fig. A. 4: Primärenergiebedarf gesamt der Herstellung in MJ Öl-eq. pro kg Rohstoff für die Zement und Betonproduktion

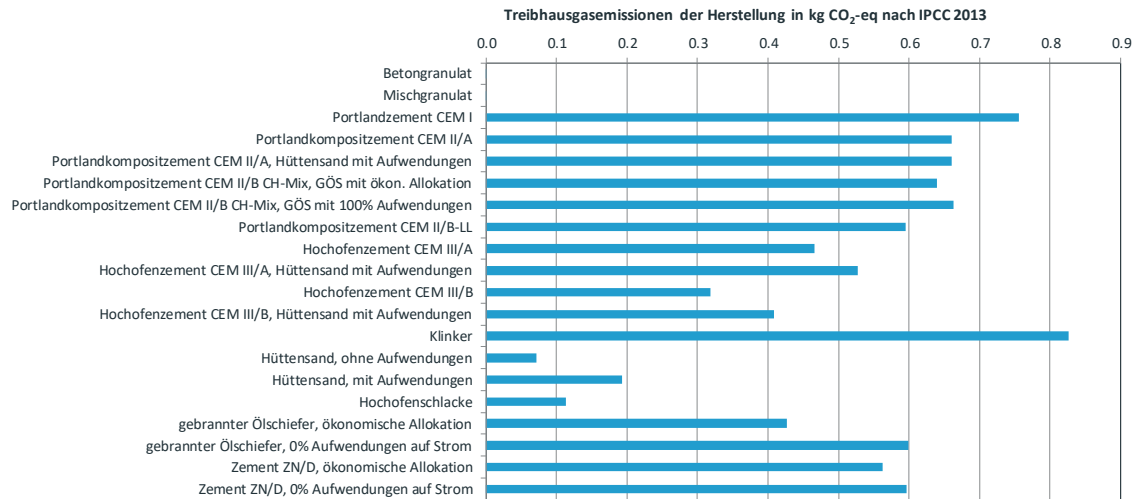


Fig. A. 5: Treibhausgasemissionen in kg CO₂-eq. pro kg Rohstoff für die Zement und Betonproduktion