

# Ökobilanzen rezyklierter Gesteinskörnung für Beton

Ein Forschungsbericht der Holcim (Schweiz) AG



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Management Summary</b>	<b>2</b>	<b>7</b>	<b>Ökobilanz für Varianten zur regionalen Bewirtschaftung von Betonabbruch</b>	<b>60</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b>	<b>8</b>	7.1	Festlegen des Ziels der Untersuchung und Untersuchungsrahmen	60
2.1	Problem und Auftrag	8	7.2	Ausgewählte Ergebnisse der Sachbilanz	64
2.2	Ziel der Untersuchung	9	7.3	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	65
2.3	An wen richtet sich der Bericht?	9	7.4	Sensitivitätsüberlegungen durch Variation ausgewählter Parameter	66
2.4	Projektbeteiligte und Projektablauf	9	7.5	Interpretation der Ergebnisse	68
<b>3</b>	<b>Genereller Rahmen der Untersuchung</b>	<b>12</b>	<b>8</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick</b>	<b>70</b>
3.1	Auswahl der analysierten Ökobilanzen	12	8.1	Schlussfolgerungen	70
3.2	Überblick über die Datengrundlagen	13	8.2	Ausblick	72
3.3	Anforderungen an die Datenqualität	13			
3.4	Generelle methodische Festlegungen	15			
3.5	Auswahl der Verfahren zur Wirkungsabschätzung	16			
<b>4</b>	<b>Ökobilanzen für Gesteinskörnungen</b>	<b>19</b>		<b>Review-Bericht</b>	<b>74</b>
4.1	Festlegen des Ziels der Untersuchung und Untersuchungsrahmen	19		<b>Anhänge</b>	
4.2	Ausgewählte Ergebnisse der Sachbilanz	23	A	UBP-Betrachtung	78
4.3	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	25	B	Inventardaten Aufbereitung Gesteinskörnung und Betonherstellung	82
4.4	Sensitivitätsüberlegungen und Vergleich mit anderen Studien	30	C	Beschreibung der Kiesgruben	86
4.5	Interpretation der Ergebnisse	32	D	Detaillierte Beschreibung der Inventardaten der Kiesgruben und der Aufbereitungsanlagen	90
<b>5</b>	<b>Ökobilanzen für ausgewählte Betone</b>	<b>33</b>	E	Zuordnung der Prozesse der untersuchten Kiesgruben von Holcim und des Inventars der Kiesbereitstellung aus ecoinvent	95
5.1	Festlegen des Ziels der Untersuchung und Untersuchungsrahmen	33	F	Datenerfassungsblätter	96
5.2	Ausgewählte Ergebnisse der Sachbilanz	38	G	Detaillierte Darstellung der Berechnungsergebnisse	98
5.3	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	40	H	Grundlage Sensitivitätsanalyse/ Parametervariation	105
5.4	Sensitivitätsüberlegungen und Vergleich mit anderen Studien	42	I	Betrachtung Wirkungskategorien und Umweltbelastungspunkte	106
5.5	Interpretation der Ergebnisse	47	J	Einfluss Zusatzmittel	107
<b>6</b>	<b>Ökobilanz für ein fiktives Bauprojekt</b>	<b>49</b>	K	Wirkungsabschätzung für Prozesse im Kontext der Entsorgung von Betonabbruch	108
6.1	Festlegen des Ziels der Untersuchung und Untersuchungsrahmen	49			
6.2	Ausgewählte Ergebnisse der Sachbilanz	52			
6.3	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	53			
6.4	Sensitivitätsüberlegungen durch Variation ausgewählter Parameter	55			
6.5	Interpretation der Ergebnisse	59			
				<b>Quellen- und Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>109</b>

# Vorwort

In der Schweiz werden jährlich etwa 50 Millionen Tonnen mineralische Baustoffe verbaut. Heute fallen rund 10 Millionen Tonnen mineralische Bauabfälle (Ausbauasphalt, Strassenaufbruch, Betonabbruch, Mischabbruch) an, die zu 80% – vorwiegend in loser Form im Tiefbau – wiederverwertet werden. Ein kleiner Teil wird dabei derzeit im Beton als Kiesersatz, mehrheitlich für Magerbeton, eingesetzt. In den kommenden Jahrzehnten wird mit einer markanten Zunahme von Betongranulat und Mischgranulat als Folge des Rückbaus von Gebäuden aus den 1950er-Jahren gerechnet. Gleichzeitig wird prognostiziert, dass sowohl der verfügbare Deponieraum als auch die für den Kiesabbau bewilligten Reserven knapp werden.

Als Reaktion auf diese Entwicklung wird vorgeschlagen, Betongranulat und Mischgranulat vermehrt als Kiesersatz auch für Konstruktionsbetone zu verwenden. Für die sichere Verwendung von Betongranulat und Mischgranulat zur Herstellung von Beton nach SN EN 206-1 gilt neu das Merkblatt SIA 2030 «Recyclingbeton». Die technischen Fragestellungen werden derzeit in Untersuchungen an Betonen mit Betongranulat und Mischgranulat an der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) in Dübendorf geklärt. Neben Fragen zur technischen Realisierbarkeit bestehen heute auch noch Unsicherheiten hinsichtlich der ökologischen Vorteile des Einsatzes von rezyklierter Gesteinskörnung als Kiesersatz bei der Betonherstellung.

Holcim (Schweiz) AG erteilte dem Institut für Bau und Umwelt (IBU) der Hochschule Rapperswil (HSR) im Jahre 2008 den Auftrag, eine ökologische Bewertung von Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung vorzunehmen. Hierzu wurde eine Analyse von vergleichenden Ökobilanzen für den Einsatz von rezyklierter und natürlicher Gesteinskörnung in Betonen durchgeführt. Die Ökobilanzen sind von einem unabhängigen Prüfungsausschuss, bestehend aus Dr. R. Frischknecht (Vorsitz), Prof. Dr. H. Wallbaum und Dr. S. Rubli, auf ihre ISO-Konformität nach SN EN ISO 14040:2006 «Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen» und nach SN EN ISO 14044:2006 «Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen» überprüft worden.



Zusammenfassend zeigt die Studie, dass einerseits eine differenzierte Abschätzung der Vorteile des Einsatzes von rezyklierter Gesteinskörnung in der Betonproduktion für die Umwelt im Kontext des konkreten Einsatzortes notwendig ist. Andererseits muss die Aufmerksamkeit verstärkt auf Optimierungspotenziale in der Prozesskette der Betonproduktion gelenkt werden, die eine Umweltentlastung versprechen – allen voran der Einsatz von Zementklinker-reduzierten Zementen, sogenannten Kompositzementen (z. B. CEM II/B-M Zemente).

Die vorliegende Studie behandelt ein für die Schweizer Bauwirtschaft wichtiges und aktuelles Thema und richtet sich an Personen und Institutionen, die sich mit Umweltaspekten in der Prozesskette der Betonproduktion auseinandersetzen. Diese Studie soll zur Diskussion anregen und zu mehr Transparenz für alle am Bau beteiligten Personen führen.

Zürich, im Juni 2010  
Stefan Bischof  
Projektleiter

# 1 Management Summary

In der Schweiz wird in den kommenden Jahrzehnten mit einer markanten Zunahme von Betongranulat und Mischgranulat gerechnet als Folge des Rückbaus von Gebäuden, die ab 1950 errichtet worden sind. Gleichzeitig wird prognostiziert, dass sowohl der verfügbare Deponieraum als auch die für den Kiesabbau bewilligten Reserven knapp werden. Als Reaktion auf diese Entwicklung wird vorgeschlagen, Mischgranulat und Betongranulat vermehrt als Kiesersatz zu verwenden.

Die Holcim (Schweiz) AG hat das Institut für Bau und Umwelt an der Hochschule Rapperswil beauftragt, durch die Analyse von vergleichenden Ökobilanzen für den Einsatz von rezykliertem und natürlicher Gesteinskörnung an ausgewählten Beispielen Informationen über die ökologische Bewertung des Einsatzes von rezykliertem Gesteinskörnung in Betonen bereitzustellen. Zum diesem Zweck werden in diesem Projekt vier Ökobilanzen für

den Einsatz von rezykliertem und natürlicher Gesteinskörnung erstellt und analysiert, mit denen der Einsatz von rezykliertem Gesteinskörnung aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet wird. Diese Ökobilanzen sollen den Grundsätzen der ISO 14040 entsprechen und werden im vorliegenden Bericht dokumentiert. Die Ökobilanzen wurden von einem unabhängigen Prüfungsausschuss auf ihre ISO-Konformität überprüft. Darüber hinaus wurde eine Wirkungsabschätzung mit der Methode der Ökologischen Knappheit (nicht ISO-konform) durchgeführt, deren Ergebnisse in Anhang A dargestellt sind und welche nicht Bestandteil des vom Prüfungsausschuss auf ISO-Konformität geprüften Berichtsteils sind.

Folgende Ökobilanzen werden erstellt:

**(i) Ökobilanzen für Gesteinskörnungen:** Ziel ist der Vergleich von alternativen Verfahren zur Herstellung von Gesteinskörnung. Um ein möglichst breites Spektrum

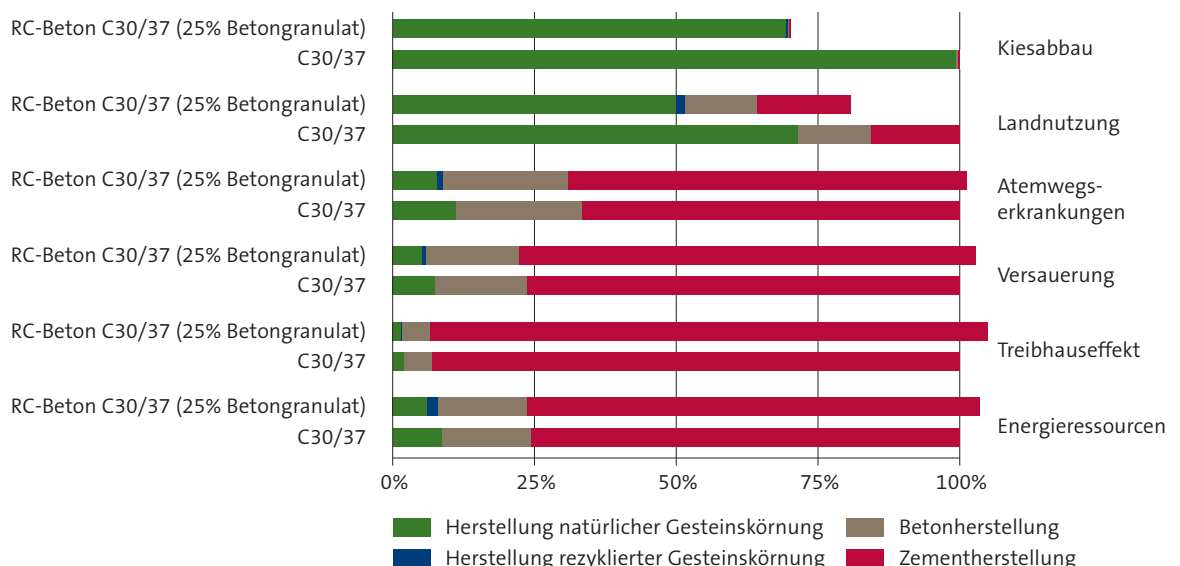


Abb. 1.1

**Wirkungsabschätzung für Konstruktionsbetone**

Ergebnisse für die Herstellung von je 1 m<sup>3</sup> Konstruktionsbeton C30/37 und RC-Beton C30/37, dargestellt relativ zu den Ergebnissen von C30/37 (= 100%). «Landnutzung» steht für die Wirkungskategorie «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung». Betrachtet wird ein System von der Herstellung der Gesteinskörnung und des Zements bis zur Fertigstellung des Betons im Betonwerk («cradle to gate») einschliesslich Herstellung der Energieträger, Betriebs- und Hilfsmittel sowie Infrastrukturen und Produktionsanlagen. Vernachlässigt wird die Herstellung von Zusatzmitteln. Zur Produktion von C30/37 werden 303 kg Portlandkalksteinzement (CEM II/A-LL) und 1999 kg natürliche Gesteinskörnung (Rundkies) eingesetzt. Für RC-Beton C30/37 werden 320 kg Portlandkalksteinzement (CEM II/A-LL), 1397 kg natürliche Gesteinskörnung (Rundkies) sowie 465 kg Betongranulat eingesetzt.

von unterschiedlichen Herstellungsverfahren von Gesteinskörnungen abbilden zu können, wurde als Bezugseinheit (funktionale Einheit) 1 Tonne Gesteinskörnung gewählt, die keinen besonderen Qualitätsanforderungen genügen muss.

**(ii) Ökobilanzen für ausgewählte Betone:** Dafür wurden zwei Betone ausgewählt, die sich hinsichtlich ihrer Eigenschaften stark unterscheiden: Einerseits wird ein Konstruktionsbeton NPK C aus dem Normpositionskatalog betrachtet (gemäss SN EN 206-1:2000 mit definierter Druckfestigkeitsklasse C30/37), an den in der Anwendung hohe Anforderungen gestellt werden, und andererseits ein Magerbeton, an den keine besonderen Anforderungen in der Anwendung gestellt werden. Diese beiden Betone werden ausgewählt, weil sie sich deutlich in ihren Zusammensetzungen unterscheiden und ihre exemplarische Betrachtung einen Eindruck über die

Bandbreite der ökologischen Bewertung von Betonen gibt. Auch werden beide Betone in der Schweiz in grossen Mengen verwendet. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Variation des Zementgehalts im Beton. In dieser Studie wird davon ausgegangen, dass der Zementgehalt im betrachteten Konstruktionsbeton ansteigt, wenn rezyklierte Gesteinskörnung eingesetzt wird. Dies entspricht der praktischen Erfahrung in der Schweiz in den letzten Jahren. Bei Magerbeton ist der Zementgehalt hingegen unabhängig vom Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung.

**(iii) Ökobilanz für die Bereitstellung von Betonen und die Entsorgung von Betonabbruch, am Beispiel eines fiktiven Ersatzneubauprojektes:** Hier werden zwei Leistungen betrachtet, die im Kontext eines Ersatzneubaus miteinander verknüpft sind: die Lieferung einer bestimmten Betonmenge für den Neubau und die Entsorgung einer

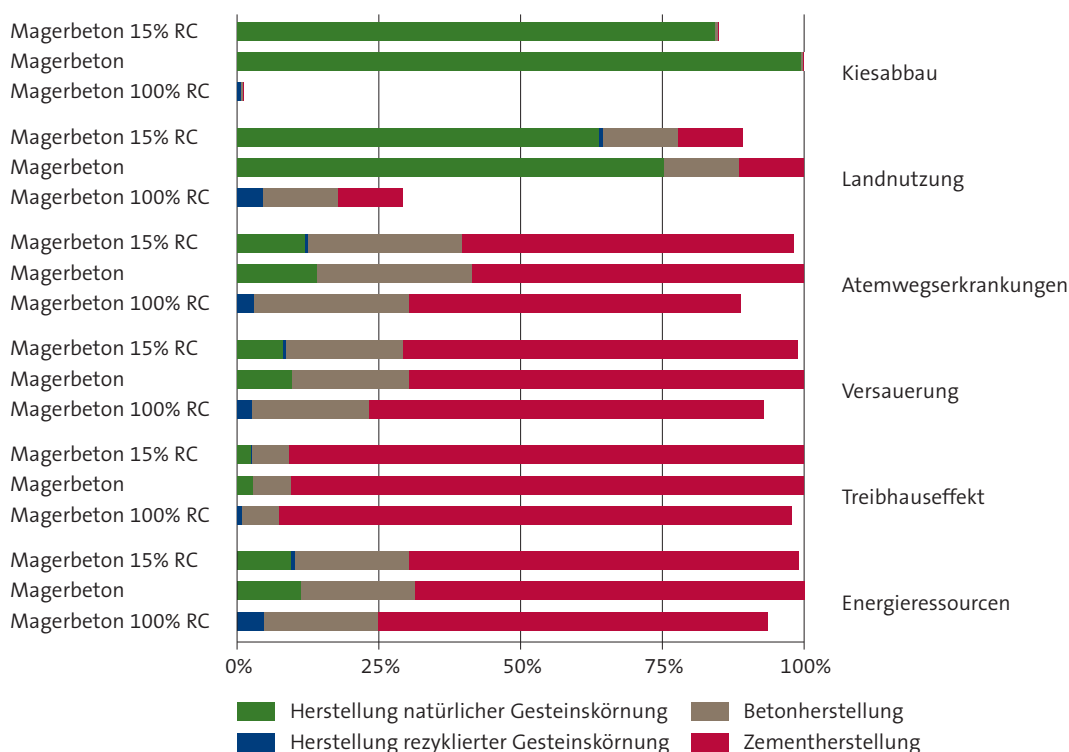


Abb. 1.2

**Wirkungsabschätzung für Magerbetone**

Ergebnisse für die Herstellung von je 1 m<sup>3</sup> Magerbeton, dargestellt in Relation zu den Ergebnissen für die Herstellung von Magerbeton mit ausschliesslich natürlicher Gesteinskörnung (= 100%). «Landnutzung» steht für «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung». Betrachtet wird ein System von der Herstellung der Gesteinskörnung und des Zements bis zur Fertigstellung des Betons im Betonwerk («cradle to gate») einschliesslich Herstellung der Energieträger, Betriebs- und Hilfsmittel sowie Infrastrukturen und Produktionsanlagen. Vernachlässigt wird die Herstellung von Zusatzmitteln. Zur Produktion von Magerbeton wurde in allen Varianten 200 kg Portlandkalksteinzement (CEM II/A-L) eingesetzt. Die Variante Magerbeton enthält 1895 kg natürliche Gesteinskörnung (Rundkies); die Variante 100% RC enthält 1587 kg Mischgranulat; die Variante Magerbeton 15% RC enthält 1605 kg natürliche Gesteinskörnung (Rundkies) und 242 kg Mischgranulat.

## Management Summary

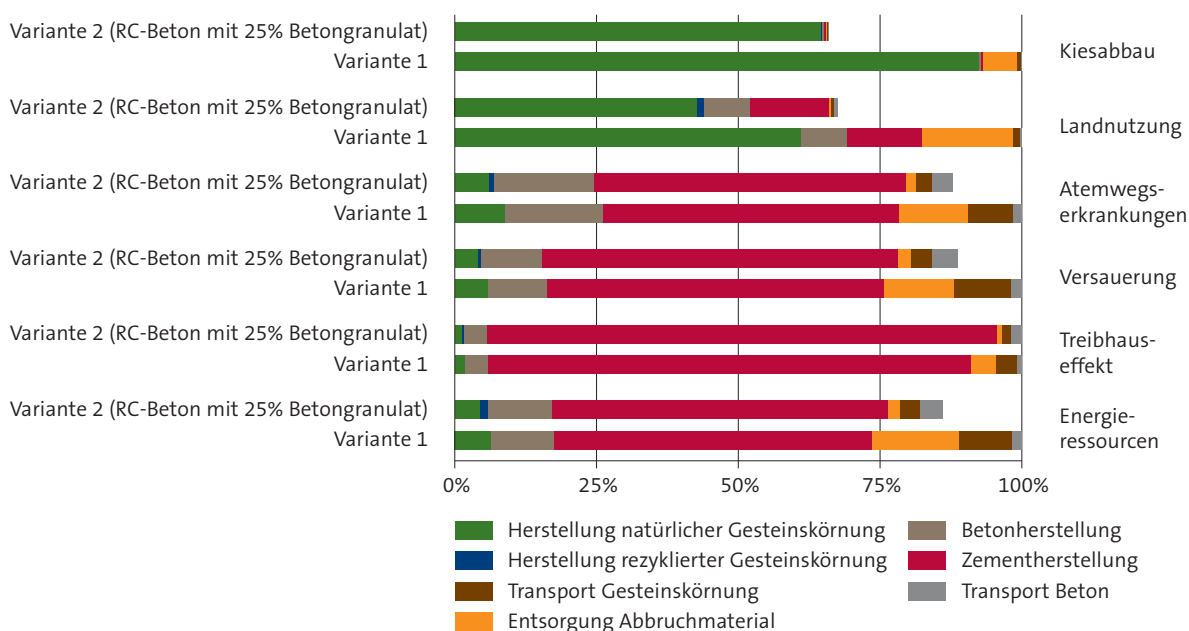


Abb. 1.3

### Wirkungsabschätzung bei Herstellung und Entsorgung von Beton für ein fiktives Bauprojekt

Ergebnisse für die Herstellung von Konstruktionsbetonen für ein fiktives Bauprojekt und der Entsorgung des beim Ersatzneubau anfallenden Betonabbruchs, dargestellt relativ zu Variante 1 (= 100%). In Variante 1 werden zur Produktion von C30/37 303 kg Portlandkalksteinzement (CEM II/A-LL) und 1999 kg natürliche Gesteinskörnung (Rundkies) eingesetzt. Für RC-Beton C30/37 (Variante 2) werden hingegen 320 kg Portlandkalksteinzement (CEM II/A-LL), 1397 kg natürliche Gesteinskörnung (Rundkies) sowie 465 kg Betongranulat eingesetzt. «Landnutzung» steht für «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung». Betrachtet werden ein System von der Herstellung der Gesteinskörnung, des Zements und des Betons bis zur Anlieferung des Betons an die Baustelle («cradle to construction site») und ein System zur Entsorgung von Betonabbruch von der Abholung an der Baustelle bis zur Entsorgung auf einer Inertstoffdeponie bzw. zur Aufbereitung zu Betongranulat («construction site to grave or reuse») einschliesslich Herstellung der Energieträger, Betriebs- und Hilfsmittel sowie Infrastrukturen und Produktionsanlagen. Vernachlässigt wird die Herstellung von Zusatzmitteln.

bestimmten Menge Betonabbruch aus dem abgebrochenen Gebäude. Das Errichten des Gebäudes – d. h. der Bauprozess – und der Abriss des bestehenden Gebäudes werden hingegen nicht betrachtet. Die Annahme eines erhöhten Zementgehalts im Konstruktionsbeton mit Rezyklatanteil wird aus (ii) übernommen.

#### (iv) Ökobilanz für Szenarien der regionalen Bewirtschaftung von Betonabbruch am Beispiel einer fiktiven Region:

Ausgangspunkt ist die Gesamtheit der zu errichtenden Bauwerke, für welche eine bestimmte Menge an Beton (Hochbau) und Gesteinskörnung (Strassenbau) hergestellt wird. In der Region stehen zwei alternative Quellen für die Herstellung von Gesteinskörnung zur Verfügung, die zur Betonherstellung und in loser Form im Strassenbau eingesetzt werden kann: natürliche Kieslager bzw. abgebrochener Beton aus dem bestehenden Bauwerk. Es wird untersucht, zu welchen Umweltbelastungen verschiedene Varianten für den Einsatz der jährlich verfügbaren Menge an Betonabbruch führen. Die Annahme

eines erhöhten Zementgehalts im Konstruktionsbeton mit Rezyklatanteil wird aus (ii) übernommen.

Für diese vier Ökobilanzen werden unterschiedliche Systeme definiert. Dabei werden insbesondere für die Bilanzierung der Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung eine Reihe von Annahmen getroffen, die die Ergebnisse dieses Prozesses massgeblich bestimmen, vor allem das Vernachlässigen der Transporte des Betonabbruchs zum Ort der Aufbereitung und die wertmässige Allokation der Emissionen und Ressourcenverbräuche auf die beiden Leistungen des Aufbereitungsprozesses (Entsorgung von Betonabbruch und Herstellen der Gesteinskörnung). Die Emissionen und Ressourcenverbräuche der betrachteten Systeme werden mit Hilfe von Daten aus der ecoinvent-Datenbank (Version 2.01) und Daten der Holcim (Schweiz) AG abgeschätzt. Die Qualität der verwendeten Daten ist gut für die Prozesse der Beton- und Zementherstellung sowie der Transporte; bei den Herstellprozessen der Gesteinskörnungen reicht die Bandbreite der Datenqualität

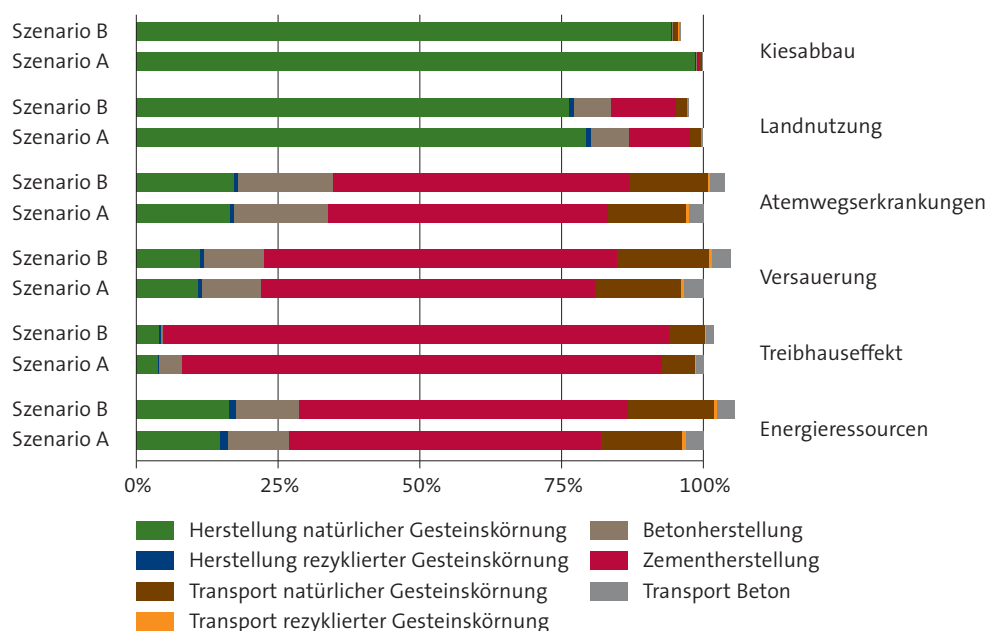


Abb. 1.4

**Wirkungsabschätzung der Herstellung von Konstruktionsbetonen und gebrochener Gesteinskörnung für eine fiktive Region**

Ergebnisse für die Herstellung von Konstruktionsbetonen und gebrochener Gesteinskörnung für eine fiktive Region, dargestellt relativ zu Szenario A (= 100%). In Szenario A werden zur Produktion von C30/37 303 kg Portlandkalksteinzement (CEM II/A-LI) und 1999 kg natürliche Gesteinskörnung (Rundkies) eingesetzt. Für die Produktion von RC-Beton C30/37 (Szenario B) werden hingegen 320 kg Portlandkalksteinzement (CEM II/A-LI), 1397 kg natürliche Gesteinskörnung (Rundkies) sowie 465 kg Betongranulat eingesetzt. Wird natürliche Gesteinskörnung in loser Form eingesetzt, dann gehen wir hier davon aus, dass es sich um gebrochenes Material handelt.

«Landnutzung» steht für «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung». Betrachtet wird ein System von der Herstellung der Gesteinskörnung, des Zements und des Betons bis zur Anlieferung des Betons bzw. der Gesteinskörnung an die Baustelle («cradle to construction site») einschliesslich Herstellung der Energieträger, Betriebs- und Hilfsmittel sowie Infrastrukturen und Produktionsanlagen. Vernachlässigt wird die Herstellung von Zusatzmitteln.

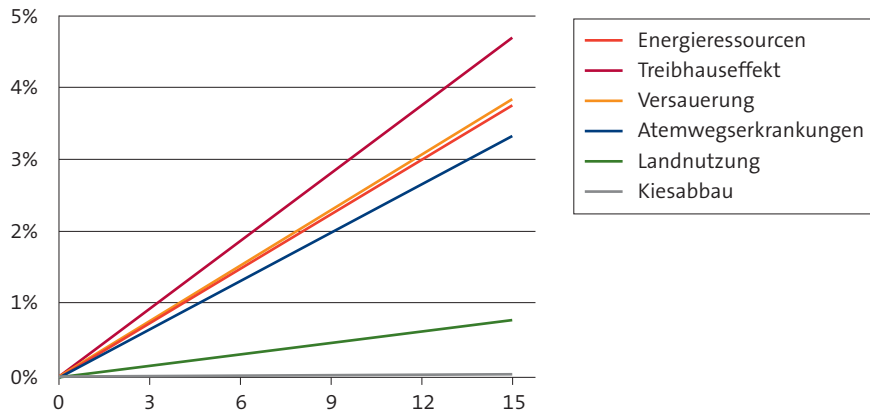
hingegen von «gut» (für die Daten der Holcim (Schweiz) AG) bis «gering» (für die Abschätzung der Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung auf der Grundlage der Daten der ecoinvent-Datenbank).

Die Ergebnisse der Sachbilanz zeigen, dass sich die verglichenen Varianten in den meisten Ökobilanzen (siehe oben) vor allem hinsichtlich des Kiesverbrauchs unterscheiden. Für die Emissionen und weiteren Ressourcenverbräuche zeigen die untersuchten Varianten jeweils ähnliche Ergebnisse. Die Herstellung der Gesteinskörnung bildet hier eine Ausnahme: Die Bandbreite der Ergebnisse der verglichenen Prozessketten ist sehr gross und ergibt sich aus Unterschieden im Ausgangsmaterial, in den spezifischen Situationen der Betriebsstandorte (z. B. lange Transportwege auf dem Werksgelände) und den gewünschten Qualitäten der Produkte. Aus diesem Grund wird für die Ökobilanzen für Betone, für das fiktive Bauprojekt und für die regionale Bewirtschaftung von Betonabbruch auf den Datensatz der ecoinvent-Datenbank

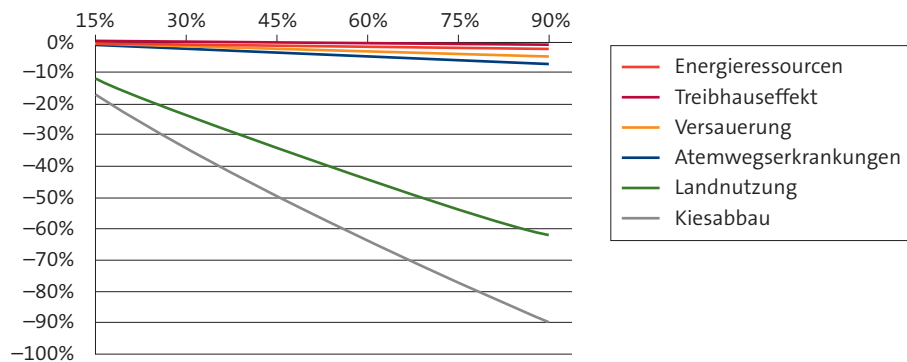
zurückgegriffen. Die Ergebnisse der Untersuchung weisen jedoch darauf hin, dass im ecoinvent-Datensatz die Landnutzung und der Wasserverbrauch überschätzt werden.

Für die Wirkungsabschätzung werden die folgenden sechs Wirkungskategorien ausgewählt: Energieressourcen, Treibhauseffekt, Versauerung, Atemwegserkrankungen, Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung und Kiesabbau. Die Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse aus den Sachbilanzen (siehe Abb. 1.1 bis 1.4). Relevante Unterschiede ergeben sich vor allem für den Kiesabbau und im Falle der Ökobilanz für das fiktive Bauprojekt auch für das Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung. In den anderen Wirkungskategorien sind die Unterschiede in den Ergebnissen kleiner als ±20%. Eine Ausnahme bildet hier wieder die Ökobilanz der Herstellung von Gesteinskörnung, wobei die Interpretation der hier erhaltenen Ergebnisse durch die eingeschränkte Qualität der Daten deutlich erschwert wird. Aufgrund der wertmässigen Allokation der Umweltbelastungen

## Management Summary



**Zusätzliche Zementmenge in Kilogramm**  
(bezogen auf eine Ausgangsmenge von 303 Kilogramm Zement pro Kubikmeter Konstruktionsbeton C30/37)



**Anteil an Betongranulat an der totalen Gesteinskörnung**  
(bezogen auf eine Ausgangsmenge von 1999 kg natürlicher Gesteinskörnung pro Kubikmeter Konstruktionsbeton C30/37)

**Abb. 1.5**

**Grobe Abschätzung der Auswirkungen einer Erhöhung der Zementmenge und des Anteils an rezyklierter Gesteinskörnung im Konstruktionsbeton C30/37 – jeweils pro Kubikmeter Beton – auf die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung in Prozent der Ergebnisse für Konstruktionsbeton C30/37**

Betrachtet wird ein System von der Herstellung der Gesteinskörnung und des Zements bis zur Fertigstellung des Betons im Betonwerk einschliesslich Herstellung der Energieträger, Betriebs- und Hilfsmittel sowie Infrastrukturen und Produktionsanlagen (ohne Herstellung von Zusatzmitteln). Zur Produktion von C30/37 werden 303 kg Portlandkalksteinzement (CEM II/A-LL) und 1999 kg natürliche Gesteinskörnung (Rundkies) eingesetzt. In der Abbildung oben werden die Auswirkungen einer Zunahme der Zementmenge auf die Ergebnisse der Wirkungskategorien dargestellt. Ausgangspunkt ist die Zementmenge von 303 kg/m<sup>3</sup> Beton.

In der Abbildung unten werden die Auswirkungen einer Zunahme der Menge an Betongranulat dargestellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass Betongranulat die natürliche Gesteinskörnung ersetzt (unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Dichten der beiden Materialien). Ausgangspunkt ist wiederum die oben beschriebene Betonzusammensetzung.

aus dem Herstellprozess von rezyklierter Gesteinskörnung liegen die Ergebnisse für die Herstellung von Mischgranulat in allen Wirkungskategorien deutlich tiefer als die entsprechenden Ergebnisse für die Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung. Für die Herstellung von Betongranulat ist der Unterschied zur Herstellung von

natürlicher Gesteinskörnung in den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung deutlich kleiner.

Die Parametervariationen im Rahmen aller Ökobilanzen zeigen, dass sich zwei Gruppen von Wirkungskategorien unterscheiden lassen (siehe Abb. 1.5). Die Ergebnisse in



der ersten Gruppe (Landnutzung und Kiesabbau) werden vom Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung beeinflusst. Diese Wirkungskategorien adressieren Knappheiten von nicht energetischen Ressourcen. Die Ergebnisse in der zweiten Gruppe (Energieressourcen, Treibhauseffekt, Versauerung, Atemwegserkrankungen) werden vom Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung kaum beeinflusst. Diese Wirkungskategorien sprechen Umweltbelastungen aus der Verbrennung fossiler Energieträger bzw. der Zementherstellung an. Wenn ein erhöhter Anteil rezyklierter Gesteinskörnung mit einer erhöhten Zementmenge verbunden ist – wie im Beispiel des in dieser Studie untersuchten Konstruktionsbetons C30/37 (NPK C) – dann sind die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung nicht eindeutig. Für die erste Gruppe der Wirkungskategorien (vor allem dem «Kiesabbau») führt diese Erhöhung des Anteils an rezyklierter Gesteinskörnung zu tieferen Werten; für die andere Gruppe der Wirkungskategorien hingegen führt eine Erhöhung der Zementmenge zu höheren Werten – insbesondere beim «Treibhauseffekt».

Weiter zeigen die Parametervariationen die Bedeutung der Wahl der Entsorgungsart für Betonabbruch (in der Ökobilanz für ein fiktives Bauprojekt), sowie die Bedeutung der Transportdistanzen bei der ökologischen Bewertung der Verwendung von Gesteinskörnung (in der Ökobilanz zu Szenarien der regionalen Bewirtschaftung von Betonabbruch). Wir empfehlen daher, Beton- und Mischabbruch – wo immer möglich – zur Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung einzusetzen, bei deren Verwendung aber – wo immer möglich – Transporte zu minimieren.

Im Laufe der Untersuchung haben sich zwei Aufgaben gezeigt, die weiter bearbeitet werden sollten. Einerseits sollte die funktionale Einheit im Vergleich zwischen Betonen differenziert werden nach Verwendung (Bauteilbetrachtung) und Verarbeitung (Betrachtung des Bauprozesses). Andererseits sollten die Inventardaten für die Herstellung von natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung überarbeitet und möglichst repräsentative Inventardatensätze für die Schweiz in der ecoinvent-Datenbank zur Verfügung gestellt werden.

## 2 Einleitung

### 2.1 Problem und Auftrag

In der Schweiz rechnet man in den kommenden Jahrzehnten mit einer markanten Zunahme von Betongranulat und Mischgranulat als Folge des Rückbaus von Gebäuden, die ab 1950 errichtet worden sind. Auch in anderen westlichen Industrienationen weisen Experten auf ähnliche Trends hin. Gleichzeitig wird prognostiziert, dass sowohl der verfügbare Deponieraum als auch die für den Kiesabbau bewilligten Reserven knapp werden. Als Reaktion auf diese Entwicklung wird vorgeschlagen, Betongranulat und Mischgranulat vermehrt als Kiesersatz zu verwenden. Dies ist bereits heute eine gängige Praxis. Bei einer zunehmenden Menge von Betongranulat und Mischgranulat rechnet man jedoch mit einem Angebotsüberhang. Beim Mischgranulat ist ein solcher bereits heute zu beobachten, während beim Betongranulat die Nachfrage eher das Angebot übersteigt. Dies wird sich jedoch voraussichtlich in den kommenden Jahrzehnten ändern (vgl. Arioli und Haag 2001). Damit ist die Förderung des Einsatzes von Betongranulat und Mischgranulat als Kiesersatz zu einem (abfall-)politischen Thema geworden. Ein vermehrter Einsatz von Betongranulat und Mischgranulat in loser Form im Strassenbau wird durch die aktuellen Normen und/oder die Beschaffungspraxis der Tiefbauämter für den Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen einschränkt. Ein möglicher Lösungsansatz für die Zukunft ist der vermehrte Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen in der Betonproduktion – als sogenannter Recycling-Beton (RC-Beton).

Es bestehen jedoch heute noch Unsicherheiten hinsichtlich der ökologischen Vorteile des Einsatzes von rezyklerten Gesteinskörnungen als Kiesersatz bei der Betonherstellung. Dabei stehen drei Aspekte im Vordergrund:

- **Betonzusammensetzungen:** Eine Ökobilanz der Betonproduktion in der Schweiz (Künniger et al. 2001) zeigt, dass die Produktion des Zements massgeblich zu den Umweltbelastungen des Betons beiträgt. Damit hängt die Frage nach den ökologischen Vorteilen des RC-Betons von Parametern der Betonzusammensetzungen

ab: dem Zementanteil und der Zementart. Wird für die Produktion von RC-Beton beispielsweise mehr Zement eingesetzt als für die Produktion von Beton aus ausschliesslich natürlicher Gesteinskörnung, dann sind kaum Umweltentlastungen durch den Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen zu erwarten.

- **Entsorgung von mineralischen Bauabfällen:** Die Produktion von RC-Beton reduziert den Druck auf den knappen Deponieraum kurzfristig nur unwesentlich, denn das hierfür verwendete Betongranulat könnte – unter der Voraussetzung einer Anpassung von Normen/Richtlinien bzw. der aktuellen Beschaffungspraxis der Tiefbauämter – auch in loser Form als Kiesersatz eingesetzt werden (z. B. im Strassenbau). Das eigentliche Problem liegt heute beim Überschuss von Mischgranulat. Mit Überschüssen von Betongranulat ist erst zu rechnen, wenn die verfügbare Menge an Bauabfall steigt (wie aktuell prognostiziert (Arioli und Haag 2001)). Es ist daher strittig ob – bzw. ab wann – der Einsatz von Betongranulat in der Betonproduktion als Entsorgungsdienstleistung betrachtet werden sollte.
- **Knappheit von Kies:** Die Schweiz verfügt über grosse Lagerstätten von Rundkies. Dennoch ist diese Ressource grundsätzlich endlich (Frischknecht et al. 2008, S. 146). Infolge der Siedlungsdichte und den hohen Standards in Natur- und Landschaftsschutz können jedoch nicht alle vorhandenen Kieslager erschlossen werden. Diese Knappheit der Ressource Kies wurde bislang in Ökobilanzen nicht abgebildet. Mit den «Ökofaktoren 2006» ist erstmalig ein Bewertungsverfahren verfügbar, in dem diese Lücke geschlossen wird (Frischknecht et al. 2008). Damit ändern sich die Rahmenbedingungen einer ökologischen Bewertung der Betonproduktion grundsätzlich.

Vor diesem Hintergrund will die Holcim (Schweiz) AG Entscheidungsgrundlagen für den Einsatz von Mischgranulat und Betongranulat erarbeiten, die dazu beitragen, mit diesen Unsicherheiten in der ökologischen Bewertung qualifiziert umzugehen. Dazu sollen eine Reihe von Ökobilanzen durchgeführt werden, in denen anhand ver-

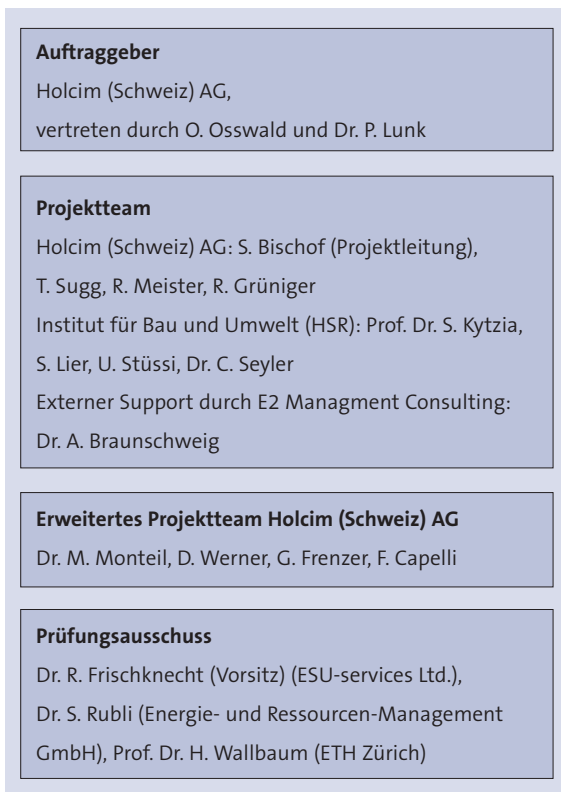


Abb. 2.1  
Projektorganisation

schiedener Beispiele der Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen mit dem Einsatz von natürlichen Gesteinskörnungen verglichen wird.

## 2.2 Ziel der Untersuchung

Ziel des vorliegenden Projektes ist es, durch die Analyse von vergleichenden Ökobilanzen für den Einsatz von rezyklierter und natürlicher Gesteinskörnung an ausgewählten Beispielen Informationen über die ökologischen Bewertung des Einsatzes von rezyklierter Gesteinskörnung in Betonen zu gewinnen. Diese Ökobilanzen sollen den Grundsätzen der ISO 14040 und ISO 14044 entsprechen. Durch die Analyse der vergleichenden Ökobilanzen soll untersucht werden, wie man durch den Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung am wirksamsten die Umweltbelastungen in der Prozesskette der Betonherstellung vermindern kann.

## 2.3 An wen richtet sich der Bericht?

Der vorliegende Bericht richtet sich an die Projektverantwortlichen der Holcim (Schweiz) AG (siehe Kap. 2.4). Er dient als Grundlage für:

- Das Erkennen von Potenzialen für eine ökologische Optimierung der Bereitstellung von Gesteinskörnung und Beton durch die Holcim (Schweiz) AG.
- Das Entwickeln von Szenarien für eine ökologisch optimierte Bereitstellung von Gesteinskörnung und Beton bezogen auf konkrete Bauvorhaben.
- Die Kommunikation von Umweltbelastungen aus der Bereitstellung von Gesteinskörnung und Beton gegenüber den verschiedenen Stakeholdern des Unternehmens.

Der Bericht wird – gemäss den Grundsätzen der ISO 14040 – veröffentlicht. Er richtet sich an Personen und Institutionen, die sich mit Umweltaspekten in der Prozesskette der Betonproduktion auseinandersetzen.

## 2.4 Projektbeteiligte und Projektablauf

Das Projekt wurde in Zusammenarbeit zwischen der Holcim (Schweiz) AG und dem Institut für Bau und Umwelt an der Hochschule für Technik Rapperswil durchgeführt.

Das Projekt wurde von Stefan Bischof (Holcim (Schweiz) AG) geleitet. Er wurde von Dr. Arthur Braunschweig, E2 Management Consulting AG, beraten (externer Support). Abb. 2.1 gibt eine Übersicht über die Projektorganisation sowie die am Projekt beteiligten Personen. Abb. 2.2 zeigt den Projektablauf und die Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Personen.

Weiter am Projekt beteiligt ist der Ausschuss für die kritische Prüfung der Ökobilanz nach ISO 14040, bestehend aus Dr. Rolf Frischknecht (ESU-services Ltd.), der den Vorsitz des Ausschusses innehatte, Dr. Stefan Rubli (Energie- und Ressourcen-Management GmbH) und Prof. Dr. Holger Wallbaum (ETH Zürich).

## Einleitung

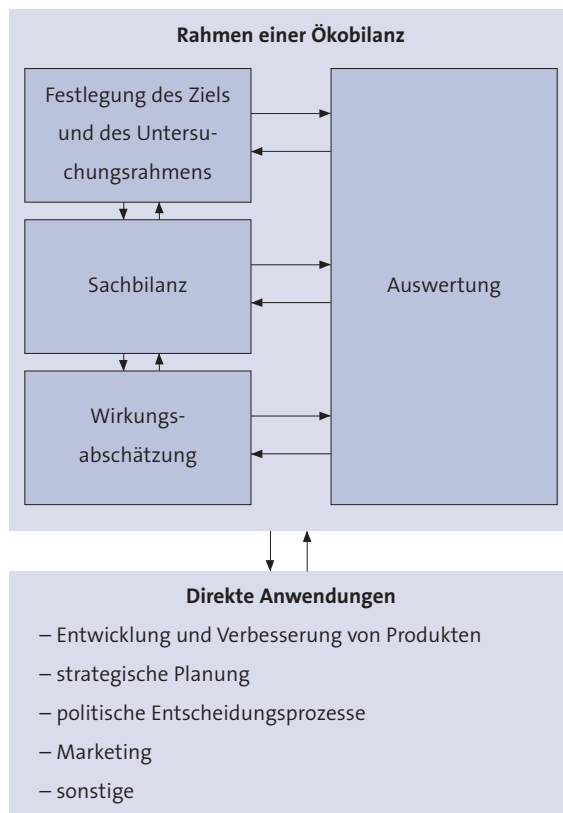
Zeitraum	Treffen	Arbeitsschritte Zielsetzung/Systemdefinition
Oktober – November 2008	31.10.08	Festlegung des Projektziels und der zu untersuchenden Fragen
		Grundlagen erarbeiten (Software, Inventardaten)
	25.11.08	Systemdefinition der modularen Ökobilanz
Dezember 2008		
	10/19.12.08	Systemdefinition: Kieswerke Holcim (Schweiz) AG
Januar/Februar 2009		
	20.1.09	
	7.2.09	Definition der Szenarien
	20.2.09	Diskussion der Auswahl der Bewertungsverfahren
	27.2.09	Anpassen der Zielsetzung: Verzicht auf Asphalt-LCA; Auswahl der Bewertungsverfahren
März/April 2009		
	12.3.09	Anpassen der Systemgrenzen: Gebäudeabbruch wird in der Prozesskette RC-Material nicht betrachtet.
	Diverse Sitzungen	
	23.4.09	
Mai 2009	7.5.09	
		Vorbereiten des critical reviews
		Erstellen des Berichts
Juni 2009 – Februar 2010	Diverse Sitzungen	Critical review (Prüfung) und Überarbeitung des Berichts
Februar – April 2010	Diverse Sitzungen	Verfassen des Prüfungsberichts, sprachliche Überarbeitung und Veröffentlichung des Berichts

Abb. 2.2  
Projekttablauf und Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Personen

Inventar/Bewertung	Interpretation	Beteiligte
		Erweitertes Projektteam
		IBU-HSR
		Projektteam
Überprüfen der Eignung der Ecoinvent-Inventare: Transporte, Betonproduktion		Projektteam
Modellierung der modularen Ökobilanz (Umberto); Vorbereiten der Bilanzierung der Kieswerke der Holcim (Schweiz) AG		IBU-HSR
		Projektteam
Erste Abschätzung der Umweltbelastungen der Module auf der Grundlage von ecoinvent	Validierung der Ergebnisse der Modellrechnungen	IBU-HSR
Datenerfassung Kieswerk Aigle der Holcim (Schweiz) AG		Projektteam
	Diskussion der Ergebnisse der ersten Abschätzung (Grundlage: Ecoinvent)	Projektteam
		Projektteam
Berechnung der Szenarien		IBU-HSR
	Diskussion der Ergebnisse der Szenarien	Projektteam
	Diskussion der Ergebnisse der Szenarien	Erweitertes Projektteam
	Parametervariation in den Szenarien	IBU-HSR
Festlegen der weiteren Datenerfassung der Kies- werke der Holcim (Schweiz) AG sowie der Aufbe- reitung von Abbruchmaterial	Diskussion der Ergebnisse der Szenarien	Projektteam
Datenerfassung: Kieswerke Holcim (Schweiz) AG, Zindel AG	Validierung der bisherigen Ergebnisse	Projektteam
	Diskussion der Ergebnisse der Szenarien	Auftraggeber
	Validierung der Inventare für die Kieswerke der Holcim (Schweiz) AG	Projektteam
Berechnung der restlichen Szenarien	Parametervariation Abschluss der Validierung	IBU-HSR
	Diskussion der Ergebnisse der Szenarien	Erweitertes Projektteam
		Projektleitung
		IBU-HSR
		Projektleitung, IBU-HSR und Prüfungsausschuss
		Projektleitung, IBU-HSR und Prüfungsausschuss

# 3 Genereller Rahmen der Untersuchung

Die vorliegende Untersuchung orientiert sich an den Normen der ISO zum Erstellen von Lebenszyklusanalysen – englisch «Life Cycle Assessment (LCA)» (ISO 14040:2006 und ISO 14044:2006). Abbildung 3.1 gibt eine Übersicht über das grundsätzliche Vorgehen. Es wird in jeder der in den nachfolgenden Kapiteln dargestellten Ökobilanzen zwischen den vier Arbeitsschritten unterschieden: dem Festlegen von Ziel und Untersuchungsrahmen, der Sachbilanz, der Wirkungsabschätzung und der Interpretation der Ergebnisse.



**Abb. 3.1**  
Arbeitsschritte in der ökologischen Lebensweganalyse (LCA) gemäss ISO 14040 (2006)

In Abb 2.2 im vorherigen Kapitel wurde gezeigt, wie diese Arbeitsschritte im Projektteam bearbeitet wurden. Dabei wird deutlich, dass nicht ein Schritt nach dem anderen bearbeitet wurde, sondern im Projektverlauf mit zunehmenden Kenntnisstand Anpassungen in allen Arbeitsschritten vorgenommen wurden.

In dieser Studie werden verschiedene Ökobilanzen erstellt, um Informationen über die ökologische Bewertung des Einsatzes von rezyklierter Gesteinskörnung in Betonen zu gewinnen. In Kapitel 3.1 werden diese vier Ökobilanzen kurz skizziert. Soweit möglich, wurde in allen Ökobilanzen von den gleichen methodischen Festlegungen und den gleichen Datengrundlagen ausgegangen. Dies ist nicht in jedem Fall möglich und sinnvoll. So wird beispielsweise für die Ökobilanz von Konstruktionsbetonen von einem durchschnittlichen Transportmix für die Transporte von Gesteinskörnung vom Ort ihrer Herstellung zum Ort der Betonherstellung ausgegangen. In der Ökobilanz für ein fiktives Bauprojekt hingegen werden spezifische Annahmen zu Transportdistanzen und -mitteln getroffen. In Kapitel 3.4 wird beschrieben, welche methodischen Festlegungen für alle Ökobilanzen getroffen werden. In den einzelnen Ökobilanz-Kapiteln werden dann die jeweils spezifischen methodischen Festlegungen beschrieben. Ähnlich wird auch bei der Darstellung der Datengrundlagen verfahren. In Kapitel 3.2 wird ein allgemeiner Überblick gegeben, eine detaillierte Darstellung erfolgt in den Kapiteln zu den verschiedenen Ökobilanzen.

## 3.1 Auswahl der analysierten Ökobilanzen

Durch die Definition mehrerer Ökobilanzen wird der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung aus verschiedenen Blickwinkeln untersucht. In Kapitel 4 wird zunächst eine Ökobilanz für die Herstellung von Gesteinskörnungen erstellt, um die Datengrundlagen für die Ökobilanzierung der Betone zu verstehen und zu verbessern. In Kapitel 5 wird dann am Beispiel von zwei Betonen – einem Konstruktionsbeton und einem Magerbeton – verglichen, wie sich der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung auf die Bereitstellung von Beton von der Rohstoffgewinnung bis zur Abholung am Betonwerk auswirkt. In den Kapiteln 6 und 7 wird untersucht, welche Wirkungen der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung in grösseren Systemen

auf die Umwelt hat. Dazu wird zunächst eine Ökobilanz für ein fiktives Bauprojekt erstellt, in dem ein Ersatzneubau errichtet wird (Kapitel 6). In diesem Fall wird nicht nur der Beton bereitgestellt, sondern auch eine Entsorgungsdienstleistung. Ausserdem werden die Transporte bis zur Baustelle bzw. von der Baustelle zum Entsorgungsunternehmen mitberücksichtigt. In der letzten Ökobilanz, die in Kapitel 7 beschrieben wird, werden Varianten zur regionalen Bewirtschaftung von Betonabbruch am Beispiel einer fiktiven Region untersucht. Hier wird der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung im Hochbau mit dem Einsatz im Strassenbau verglichen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen – gesamt-haft – dazu beitragen, mit den Unsicherheiten bei der ökologischen Bewertung des Einsatzes von rezyklierter Gesteinskörnung in Betonen qualifizierter umzugehen.

### 3.2 Überblick über die Datengrundlagen

Die für die Bilanzierung verwendeten Inventare stammen mehrheitlich aus Künniger et al. (2001). In Künniger et al. (2001) wurde in der Schweiz erstmalig eine umfassende Ökobilanzstudie über die Herstellung von Zementen und Betonen vorgestellt. Die dort erhobenen Inventardaten wurden in die ecoinvent-Datenbank aufgenommen (Kellenberger et al. 2003). Die Daten jener Studie stammen aus einer Erhebung bei Schweizer Beton- und Zementwerken. Die Datenqualität wird als gut eingestuft<sup>1</sup>. Die Inventardaten für die Herstellung natürlicher Gesteinskörnung werden ebenfalls aus der ecoinvent-Datenbank übernommen. Deren Qualität sei jedoch nach Auskunft von Tina Künniger (Empa Dübendorf) deutlich schlechter, da nur einzelne Kieswerke exemplarisch betrachtet wurden, die u.U. nicht repräsentativ für die gesamte Schweiz seien. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Studie Daten zur Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung in vier Kieswerken der Holcim (Schweiz) AG erfasst. Dabei wurden Kieswerke mit unterschiedlichen Abbaumethoden ausgewählt, um ein möglichst breites Spek-

trum aufzuzeigen. Die Kiesgruben sind nicht repräsentativ für Kieswerke in der Schweiz, da ihre Abbaumenge, mit Ausnahme des Kieswerkes Oberdorf, über dem schweizerischen Durchschnitt liegt<sup>2</sup>. Die Daten und das Vorgehen bei der Datenerfassung sind im Anhang dieses Berichts dokumentiert (siehe Anhänge B, C, D und E). Die Qualität dieser Daten wird als gut eingestuft. Mangels Repräsentativität (vgl. auch Kapitel 4.5) werden diese Datensätze jedoch nicht für die weiteren Ökobilanzen in Kapitel 5, 6 und 7 verwendet.

In Künniger et al. (2001) wurde die Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung nicht betrachtet. Bislang wurde in der Schweiz für diesen Prozess kein Inventardatensatz publiziert. In der vorliegenden Untersuchung werden die Inventardaten für diesen Prozess aus dem Datensatz zur Entsorgung von Betonabbruch aus Doka (2000) abgeschätzt, der Teil der ecoinvent-Datenbank ist. Die Qualität dieser Daten wird als mittel bis gering eingestuft<sup>3</sup>. Das Vorgehen und die Annahmen, die dieser Schätzung zugrunde liegen, werden in Kapitel 3.4 beschrieben. Abb. 3.1 auf der folgenden Seite gibt einen Überblick über die wichtigsten verwendeten Datensätze und zeigt, wo sie verwendet werden.

### 3.3 Anforderungen an die Datenqualität

Bei der Interpretation der Ergebnisse pro Wirkungskategorie bezeichnen wir einen Unterschied von bis zu  $\pm 20\%$  der Referenzvariante als «gering» und betrachten solche Unterschiede als nicht signifikant. Die Grösse dieses Toleranzbereiches ist dadurch motiviert, dass diese Studie auf Annahmen zu den durchschnittlichen Emissionen und Ressourcenverbräuchen verschiedener Prozesse bzw. Annahmen zu spezifischen Betonzusammensetzungen basiert. Ein Abweichen von einem dieser Durchschnittswerte bzw. von diesen spezifischen Betonzusammensetzungen kann zu einer Differenz in den Ergebnissen von bis zu  $\pm 20\%$  führen. Derartige Abweichungen ergeben sich vor allem aus:

<sup>1</sup> Persönliche Kommunikation mit T. Künniger, Empa, 2.4.2009.

<sup>2</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 24.11.2009.

<sup>3</sup> Persönliche Kommunikation mit G. Doka, Doka Ökobilanzen, 17.3.2009.

## Genereller Rahmen der Untersuchung

Prozess	Datengrundlage	Verwendet in ...
Zementherstellung	ecoinvent-Inventar «portland calcareous cement, at plant» (Kellenberger et al. 2003)	Ökobilanz für ausgewählte Betone (Kapitel 5) Ökobilanz für ein fiktives Bauprojekt (Kapitel 6) Ökobilanz für Varianten zur regionalen Bewirtschaftung von Betonabbruch (Kapitel 7)
Betonherstellung	ecoinvent-Inventar «concrete, normal, at plant » (Kellenberger et al., 2003)	Ökobilanz für ausgewählte Betone (Kapitel 5): mit angepassten Betonzusammensetzungen. Ökobilanz für ein fiktives Bauprojekt (Kapitel 6): mit angepassten Betonzusammensetzungen und angepasstem Transportmix. Ökobilanz für Varianten zur regionalen Bewirtschaftung von Betonabbruch (Kapitel 7): mit angepassten Betonzusammensetzungen und angepasstem Transportmix.
Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung	ecoinvent-Inventar «gravel, round, at mine » (Kellenberger et al., 2003)	Ökobilanz für Gesteinskörnungen (Kapitel 4) Ökobilanz für ausgewählte Betone (Kapitel 5) Ökobilanz für ein fiktives Bauprojekt (Kapitel 6) Ökobilanz für Varianten zur regionalen Bewirtschaftung von Betonabbruch (Kapitel 7)
	ecoinvent-Inventar «gravel, crushed, at mine » (Kellenberger et al., 2003)	Ökobilanz für Varianten zur regionalen Bewirtschaftung von Betonabbruch (Kapitel 7)
	Eigene Datenerfassung bei Kieswerken der Holcim (Schweiz) AG	Ökobilanz für Gesteinskörnungen (Kapitel 4)
Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung	ecoinvent-Inventar «disposal, building, concrete gravel, to sorting plant» (Doka, 2000); angepasst gemäss Abschnitt 3.4	Ökobilanz für Gesteinskörnungen (Kapitel 4) Ökobilanz für ausgewählte Betone (Kapitel 5) Ökobilanz für ein fiktives Bauprojekt (Kapitel 6) Ökobilanz für Varianten zur regionalen Bewirtschaftung von Betonabbruch (Kapitel 7)
	Datenerfassung für eine mobile Anlage der Holcim (Schweiz) AG und einer weiteren Anlage eines schweizerischen Beton- und Kiesherstellers	Ökobilanz für Gesteinskörnungen (Kapitel 4)

**Abb. 3.2**

### Übersicht über die wichtigsten Datengrundlagen

Die Daten der Datenquelle «Holcim (Schweiz) AG» sind im Anhang B dieses Berichts dokumentiert.

- Den Annahmen zum Einsatz von alternativen Brennstoffen zur Zementherstellung. Im hier verwendeten Datensatz wird von einem durchschnittlichen Brennstoffmix für alle Schweizer Zementwerke ausgegangen. Tatsächlich ist die Spannweite zwischen den Zementwerken erheblich<sup>4</sup>. Einzelne Zementwerke setzen sehr viel alternative Brennstoffe ein, andere hingegen sehr wenig. Daher hängen die tatsächlichen Emissionen aus der Zementherstellung davon ab, aus welchem Zementwerk der Zement stammt.
- Den Annahmen zur Zementmenge in den Betonzusammensetzungen. Diese Menge kann um bis zu ±10%

<sup>4</sup> Persönliche Kommunikation mit Dr. M. Monteil, Holcim (Schweiz) AG, 27.2.2009. Die Holcim (Schweiz) AG veröffentlicht ihre Umweltdaten jährlich. Die Daten aus 2008 können im Internet auf der Website der Holcim Schweiz unter der Rubrik «Nachhaltige Entwicklung» abgerufen werden; u.a. auch die Angaben des Anteils an alternativen Brennstoffen total und je Werk für die Zementproduktion.



schwanken, beispielsweise um Qualitätsunterschiede in den Gesteinskörnungen auszugleichen<sup>5</sup>.

- Den Annahmen zu den Transporten. Die Transportdistanzen zwischen dem Ort der Herstellung der Gesteinskörnung und dem Ort der Betonherstellung können sehr stark variieren. Im Extremfall finden beide Produktionsprozesse am gleichen Standort statt. Es sind aber auch Transportdistanzen von mehr als 50 km möglich (zumeist mit der SBB)<sup>6</sup>.

Wir gehen davon aus, dass diese möglichen Variationen der Parameterwerte unabhängig vom Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung sind. Mit Hilfe von Parametervariationen wird die Relevanz solcher Abweichungen in den verschiedenen Ökobilanzen abgeschätzt.

Der oben beschriebene Signifikanzbereich von  $\pm 20\%$  soll – soweit möglich – durch eine mangelnde Qualität der Sachbilanzdaten und der Wirkungsabschätzung nicht vergrößert werden. Deshalb wird für jene Prozesse, die einen massgeblichen Beitrag zu den Ergebnissen einer bestimmten Wirkungskategorie liefern, die Datenqualität qualitativ abgeschätzt – auf der Grundlage der Dokumentation der Datensätze in ecoinvent und ergänzender Interviews mit den für die Erfassung der Datensätze verantwortlichen Personen. Diese Einschätzung der Datenqualität wird bei der Interpretation der Ergebnisse mitberücksichtigt.

### 3.4 Generelle methodische Festlegungen

Wie in Abb. 3.2 gezeigt, verwenden wir zur Bilanzierung der meisten Prozesse Datensätze aus der Datenbank ecoinvent (Version 2.01) und orientieren uns dabei an den dortigen methodischen Festlegungen. Dies sind insbesondere:

- Die Bilanzierung der für den jeweiligen Prozess notwendigen Infrastrukturen, d.h. Bereitstellen, Unterhalt und Instandsetzung der Verkehrsinfrastrukturen, der Fahrzeuge und der Produktionsanlagen.

- Die Verwendung von regionsspezifischen Modellen der Strombereitstellung. Für Prozesse, die in der Schweiz stattfinden, wird beispielsweise der Strommix des in der Schweiz verwendeten Stroms gewählt.
- Die Transportmodelle, insbesondere hinsichtlich der Annahmen zur Auslastung, zur durchschnittlichen Lebensdauer und zum durchschnittlichen Verbrauch der Fahrzeuge.
- Die Entsorgungsmodelle, die die Schweizer Situation abbilden. Dies betrifft vor allem die Wahl der Deponietypen und die Annahme der Verbrennung von Siedlungsabfällen in Anlagen, die der Schweizer Umweltschutzgesetzgebung entsprechen.

In den Prozessen, für die im Rahmen dieser Studie eigene Daten erfasst wurden, orientiert sich die Datenerfassung am jeweils korrespondierenden Inventar der ecoinvent-Datenbank. Für die Erfassung der Inventardaten für die Kieswerke der Holcim (Schweiz) AG wird dies ausführlich in Kapitel 4 beschrieben.

Für die Bilanzierung der Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung in einer stationären Anlage wurde vom Ecoinvent-Datensatz «disposal, building, concrete gravel, to sorting plant» aus Doka (2000) ausgegangen. Für die Erstellung des in dieser Studie verwendeten Inventars wurden folgende Annahmen getroffen:

- Zunächst wurde die funktionale Einheit dieses Inventars angepasst. Während sich das Inventar der ecoinvent-Datenbank auf ein Kilogramm zu entsorgendem Bauabfall (Beton- bzw. Mischabbruch) bezieht (Input in den Prozess), wird im Prozess «Herstellung rezyklierter Gesteinskörnung in einer stationären Anlage» ein Kilogramm Granulat (Mischgranulat und Betongranulat) als funktionale Einheit gewählt (Output aus dem Prozess).
- Im nächsten Schritt wurde festgelegt, welcher Anteil der Wirkungen der in diesem Inventar beschriebenen Prozesse dieser neuen funktionalen Einheit (ein Kilogramm Mischgranulat bzw. Betongranulat) zugerechnet wird.

<sup>5</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 7.2.2009.

<sup>6</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 7.2.2009.

## Genereller Rahmen der Untersuchung

In diesem Schritt wurde zudem festgelegt, dass der Abbruch der Bauwerke und der Transport von Beton- und Mischabbruch zur Aufbereitungsanlage nicht dieser neuen funktionalen Einheit zugerechnet werden. Diesem Entscheid zur Abgrenzung des Systems liegen folgende Überlegungen zugrunde:

- Wir nehmen erstens an, dass die Motivation für den Abbruch der Bauwerke und den Transport von Beton- und Mischabbruch zum Ort der Herstellung der Gesteinskörnung ausschliesslich in der Entsorgung der mineralischen Bauabfälle liegt. Mit anderen Worten: «Wir brechen ein Gebäude ab, um Platz für einen Neubau zu schaffen, und nicht, um mineralische Baustoffe zu gewinnen.» Einen Hinweis auf diese Motivationslage geben die aktuellen Preise für die Annahme von Betonabbruch und Mischabbruch durch die Betreiber von Anlagen zur Herstellung von Gesteinskörnung (Kind et al. 2006). Diese Betreiber verlangen ein Entgelt für die Annahme des Materials: Abbruch und Transport sind also nicht Teil einer Prozesskette zur Bereitstellung von Rohstoffen, sondern vielmehr Teil der Prozesskette zur Entsorgung von Bauabfällen.
- Zweitens gehen wir davon aus, dass der Transport zwischen der Baustelle und dem Ort der Herstellung von Gesteinskörnung nicht länger ist als der Transport zwischen der Baustelle und einer Inertstoffdeponie. In einer Studie für den Kanton Waadt wird sogar davon ausgegangen, dass die Wege zu den Orten der Herstellung von Gesteinskörnung im Mittel aller Baustellen kürzer sind als die Wege zu Inertstoffdeponien (Harbi et al. 2008). Daher gehen wir davon aus, dass kein zusätzlicher Aufwand durch die Wahl der Herstellung von Gesteinskörnung als Variante der Entsorgung mineralischer Bauabfälle entsteht.
- Weiter wurde festgelegt, dass die Wirkungen der Aufbereitungsanlage gemäss ökonomischer Allokation zugerechnet werden, d.h. dass die Wirkungen im Verhältnis der Verkaufserträge von Betongranulat bzw. Mischgranulat am Gesamtumsatz aus der Aufbereitung von Beton- bzw. Mischabbruch dieser neuen funktionalen Einheit (ein Kilogramm Misch- bzw. Betongranulat) zugerechnet werden. Die Daten für die in dieser Studie verwendeten Wertrelationen stammen

aus Kind et al. (2006). Wir gehen auf dieser Grundlage von einem Allokationsfaktor von 30% für Mischgranulat und 81% für Betongranulat aus. Konkret bedeutet das, dass nur 30% der Wirkungen einer Aufbereitungsanlage der Herstellung von Mischgranulat zugerechnet werden, wenn der Betreiber dieser Anlage 30% seines Ertrags aus der Aufbereitung von Mischabbruch mit dem Verkauf von Mischgranulat erwirtschaftet und die restlichen 70% mit der Annahme des Mischgranulats als Entsorgungsdienstleistung.

Diese Allokation bedeutet aber gleichzeitig, dass auch der Entsorgung von Beton- bzw. Mischabbruch in einer Aufbereitungsanlage nur ein Teil der Wirkungen dieser Anlage zugerechnet werden. Bei der Entsorgung von Betonabbruch sind dies somit nur 19% der Wirkungen, und bei der Entsorgung von Mischabbruch werden 70% der Wirkungen der Aufbereitungsanlage zugerechnet. Gleichzeitig wird der Anteil von zu entsorgendem Material, das als Abfallstoff im Prozess anfällt, herabgesetzt. Diese Anpassung der Inventardaten aus ecoinvent wird motiviert durch die aktuell hohe Ausbeute des Prozesses der Aufbereitung mineralischer Bauabfälle. Diese Ausbeute liegt heute bei 95%<sup>7</sup>.

## 3.5 Auswahl der Verfahren zur Wirkungsabschätzung

Zur Wirkungsabschätzung werden sechs Wirkungskategorien ausgewählt (siehe Abb. 3.3). Die Auswahl dieser Wirkungskategorien folgt zwei Überlegungen:

- In dieser Studie sollen vor allem Wirkungskategorien analysiert werden, die von den wichtigen Akteuren der Schweizer Umweltpolitik als massgeblich eingestuft werden. Frischknecht et al. (2008) geben bei ihrer Darstellung der Herleitung der «Ökofaktoren 2006» einen Überblick über die aktuell von der schweizerischen Umweltpolitik als wichtig eingestuftes Wirkungskategorien. Für die Prozesskette zur Herstellung von Betonen sind dabei vor allem der Kiesverbrauch, das Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung, der Energieverbrauch, der Treibhauseffekt sowie

<sup>7</sup> Persönliche Kommunikation mit Dr. S. Rubli, Energie- und Ressourcen-Management GmbH, 9.7.2009.

Wirkungskategorie	Wirkungsindikator	Charakterisierungsmodell
Kiesabbau	Kies aus begrenzt verfügbaren Lagerstätten (z.B. Alluvialkies)	Wird nicht durchgeführt
Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung	Siedlungsflächen-Äquivalent	Ecosystem Damage Potential Nach Köllner (2001) Verwendet in der in Frischknecht et al. (2008) vorgeschlagenen Anpassung
Atemwegserkrankungen	Emissionen von Partikeln in die Luft (<10µm)	Wird nicht durchgeführt
Versauerung	SO <sub>2</sub> -Äquivalent	Acidification Potential (AP) Nach CML 2001 (Guinée et al., 2001)
Treibhauseffekt	CO <sub>2</sub> -Äquivalent	Global Warming Potential 100 (Integrationszeit: 100 Jahre) Nach CML 2001 (Guinée et al., 2001)
Energieressourcen	Cumulative Energy Demand (CED)	Kumulierter Energieaufwand total (erneuerbare und nicht erneuerbare Ressourcen) nach Frischknecht et al. (2007)

Abb. 3.3  
Auswahl der Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren, Charakterisierungsmodelle und Vorgehen zur Klassifizierung

Wirkungen in Zusammenhang mit Luftemissionen relevant, die aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen (Baumaschinen und Transporte) entstehen. Analysiert man die Umweltbelastungen der Prozesskette zur Herstellung von Betonen mit Hilfe der «Ökofaktoren 2006», so sind die vorher genannten Wirkungskategorien für über 80% aller Umweltbelastungspunkte der Prozesskette verantwortlich. Wir gehen daher davon aus, dass wir mit dieser Auswahl von Wirkungskategorien die aus der Sicht der Akteure der Schweizer Umweltpolitik relevanten Grössen betrachten<sup>8</sup>.

- In dieser Studie sollen vor allem Wirkungskategorien analysiert werden, für die Prozesse verantwortlich sind, die im direkten Einflussbereich der Holcim (Schweiz) AG liegen. Diese Prozesse sind die Zementherstellung, die Herstellung von Gesteinskörnung, die Betonher-

stellung und alle damit verbundenen Transportprozesse. Sogenannte «Hintergrundprozesse», also Prozesse zur Herstellung von Produkten und Dienstleistungen, die in den vorher genannten Prozessen eingesetzt werden (z.B. die Herstellung von Stahl für eine Produktionsanlage), sind hingegen von zweitrangigem Interesse. Künniger et al. (2001) zeigen in ihrer Studie zu Ökobilanzen von Kies, Zement und Betonen, dass man aufgrund dieser Überlegung vor allem den Ozonabbau und die Ökotoxizität von Wasser vernachlässigen kann. Hingegen sind der Treibhauseffekt und die Versauerung Wirkungskategorien, für die auch die oben genannten Prozesse relevant sind. Weiter relevant sind gemäss Künniger et al. (2001) die Humantoxizität und die Eutrophierung. Wir verzichten in dieser Studie bewusst auf das Verwenden des in Künniger et al. (2001) verwendeten Charakterisierungsmodells für Humantoxizität, da in diesem Modell sehr viele unterschiedli-

<sup>8</sup> Die Bewertung der Prozesskette zur Betonherstellung mit Hilfe der «Ökofaktoren 2006» zeigen die Emissionen von Dioxinen in die Luft als wichtige Umweltbelastung (mit ca. 7% aller Umweltbelastungspunkte; vgl. Anhang I). Diese Emissionen stammen vor allem aus dem Prozess der Zementherstellung. Genauere Abklärungen bei den Zementwerken der Holcim (Schweiz) AG ergaben, dass geringe Mengen von Dioxin bei der Zementherstellung an die Luft abgegeben werden. Diese Mengen liegen jedoch deutlich unter den entsprechenden Grenzwerten der schweizerischen Umweltgesetzgebung. Im verwendeten Datensatz wird davon ausgegangen, dass bei der Klinkerherstellung Dioxinemissionen von 0,96 ng I-TEQ pro kg Klinker entstehen. Unter der Annahme, dass pro kg Klinker 1,8 m<sup>3</sup> Abluft entstehen, sind dies 0,53 ng I-TEQ pro m<sup>3</sup> (gemäss Email von Dr. R. Frischknecht, ESU-services Ltd., vom 25.3.2010). Eine Messkampagne von Emissionen von Dioxinen und Furanen, die im Jahre 2005 in sämtlichen Zementwerken der Schweiz durchgeführt wurde, zeigt, dass die Dioxinemissionen in die Abluft rund 1–2 Grössenordnungen unter dem deutschen Grenzwert von 0,1 ng I-TEQ/m<sup>3</sup> liegen (cemsuisse, 2007). Dies weist darauf hin, dass diese Emissionen in dem für die Ökobilanz verwendeten Datensatz mindestens um den Faktor 50 überschätzt werden.

## Genereller Rahmen der Untersuchung

che Wirkungen auf die menschliche Gesundheit in einer Kenngrösse zusammengefasst werden, die nur sehr schwer zu verstehen und zu interpretieren sind. Wir wählen daher eine Wirkung aus dem Bereich Humantoxizität aus, der in der Schweizer Umweltpolitik eine grosse Bedeutung beigemessen wird, nämlich Atemwegserkrankungen, ausgelöst durch Emissionen von Partikeln in die Luft. Nicht betrachtet werden hingegen weitere humantoxisch relevante Emissionen aus den Zementwerken, vor allem Schwermetalle und Dioxine/Furane. Wir gehen jedoch davon aus, dass die grosse Bedeutung der Zementherstellung für die Umweltbelastungen im System der Betonproduktion durch die in dieser Studie gewählten Wirkungskategorien bereits sehr deutlich wird. Eine zusätzliche Betrachtung von humantoxischen Emissionen aus dem Zementwerk würde dies nur noch weiter unterstreichen.

Ebenfalls nicht betrachtet wird die Eutrophierung. Gemäss Künniger et al. (2001) wird diese im System der Betonproduktion vor allem durch die Emission von Stickoxiden und Schwefeldioxid verursacht. Diese Emissionen werden in der vorliegenden Studie auch in der Wirkungskategorie «Versauerung» betrachtet. In diesem Sinne wird keine relevante Emission vernachlässigt, sondern nur eine weitere Wirkung der in dieser Studie analysierten Emissionen. Es ist jedoch zu vermuten, dass die Transportemissionen in der Wirkungskategorie der Eutrophierung noch stärker ins Gewicht fallen als in der Wirkungskategorie der Versauerung.

Frischknecht et al. (2008) geben einen ausführlichen Überblick über die in Abb. 3.3 genannten Wirkungskategorien, die Wirkungsmechanismen ebenso wie die verwendeten Charakterisierungsmodelle. Aus diesem Grund verzichten wir in diesem Bericht auf eine ausführliche Darstellung, verweisen auf Frischknecht et al. (2008) und erwähnen nur die Aspekte, in denen die vorliegende Studie abweicht.

Abweichend zu Frischknecht et al. (2008) verwenden wir für die Wirkungskategorie «Energieressourcen» den «cumulative energy demand (CED)» gemäss Frischknecht et al. (2007) als Wirkungsindikator.

## 4 Ökobilanzen für Gesteinskörnungen

### 4.1 Festlegen des Ziels der Untersuchung und Untersuchungsrahmen

In diesen Ökobilanzen sollen einerseits geeignete Datengrundlagen für die Analyse des Einsatzes von rezyklierten Gesteinskörnungen in Betonen bereitgestellt werden. Dazu ist es notwendig, Sachbilanzdaten für die Herstellung von natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen zu erfassen bzw. aus vorhandenen Studien abzuschätzen. Andererseits soll untersucht werden, welche Wirkungen die Herstellung von Gesteinskörnungen auf die Umwelt hat und von welchen Parametern diese Wirkungen abhängen.

Um ein möglichst breites Spektrum von unterschiedlichen Varianten der Herstellung von Gesteinskörnungen abbilden zu können, wurde als Bezugseinheit (funktionale Einheit) 1 Tonne Gesteinskörnung gewählt. Vereinfachend werden für die Gesteinskörnung keine besonderen Qualitätsanforderungen angenommen. Sie ist damit nur für minderwertige Anwendungen geeignet, wie beispielsweise die Herstellung von Magerbeton oder eine Hinterfüllung unter einer geschlossenen Deckschicht. Beim Erstellen von Ökobilanzen für Betone muss man dann aus den untersuchten Varianten zur Herstellung von Gesteinskörnungen diejenigen auswählen, mit denen man die betrachtete Betone auch tatsächlich herstellen kann.

#### 4.1.1 Funktionale Einheit

Im Rahmen dieser Ökobilanz werden einerseits Gesteinskörnungen aus Abbau und Aufbereitung natürlicher Kieslager und andererseits aus Abbruch von Bauwerken aus Beton und Mauerwerk und Aufbereitung der daraus resultierenden mineralischen Bauabfälle betrachtet. Je nach Zusammensetzung des eingesetzten Materials sind dabei erhebliche Unterschiede in den Qualitäten der Gesteinskörnung möglich. Ausserdem werden die Einsatzmöglichkeiten von Gesteinskörnungen durch gesetzliche Richtlinien weiter eingeschränkt (vgl. Bafu 2006). Daher wird durch die Wahl der funktionalen Einheit die Vielfalt

der Varianten zur Herstellung von Gesteinskörnungen potenziell eingeschränkt.

In der vorliegenden Studie soll ein möglichst breites Spektrum von unterschiedlichen Varianten der Herstellung von Gesteinskörnungen abgebildet werden. Aus diesem Grund wird als funktionale Einheit 1 Tonne Gesteinskörnung gewählt, die keinen besonderen Qualitätsanforderungen genügen muss, und nur für Anwendungen eingesetzt wird, für die Bafu (2006) alle untersuchten Varianten von Gesteinskörnungen zulässt (z. B. für die Herstellung von Magerbeton, wenn die Untersuchung Mischgranulat mitberücksichtigt). Durch diese Wahl wird keine Verfahrensvariante zur Herstellung von Gesteinskörnung a priori ausgeschlossen. Die Gesteinskörnung, die durch diese funktionale Einheit beschrieben wird, ist aber vereinfachend nur für minderwertige Anwendungen geeignet, wie beispielsweise die Herstellung von Magerbeton oder eine Hinterfüllung unter einer geschlossenen Deckschicht.

#### 4.1.2 Systemdefinition

In diesem System wird die Prozesskette der Herstellung von Gesteinskörnung von der Gewinnung der dazu notwendigen Rohstoffe bis zum Abtransport der aufbereiteten Gesteinskörnung ab Werk betrachtet («from cradle to gate»). Es werden zwei grundsätzlich verschiedene Varianten dieser Prozesskette betrachtet: Einerseits die Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung und andererseits die Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung. Zur Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung wird zunächst das Kiesvorkommen erschlossen (Prozess «Aufschluss»). Je nach Abbaufahren muss dazu eine gewisse Menge an Material aus den oberen Bodenschichten bewegt werden. Dazu werden verschiedene Baumaschinen eingesetzt. Anschliessend können die Kiessande abgebaut werden (Prozess «Abbau»). Hierzu werden je nach Abbaufahren verschiedene Baumaschinen eingesetzt. Der Kiessand wird anschliessend zur Aufbereitung transportiert (Prozess «Beladen»). Das geschieht wieder mit unterschiedlichen Einrichtungen, u. a. mit Baumaschinen oder Förderbändern. In der Aufbereitung

## Ökobilanzen für Gesteinskörnungen

werden die Kiessande gesiebt, gewaschen und teilweise gebrochen (Prozess «Aufbereitung»). Im letzten Verarbeitungsschritt werden die aufbereiteten Kiessande zum Abtransport bereit gemacht (Prozess «Entladen»). Nach dem Abbau wird die Abbaustätte rekultiviert, d. h. ein bestimmter Anteil der abgetragenen oberen Bodenschichten wird wieder aufgefüllt, bepflanzt und landschaftlich gestaltet (Prozess «Rekultivierung»).

Zur Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung wird nur ein Teil der oben beschriebenen Prozesse durchgeführt. Im hier betrachteten System werden lediglich das Be- und Entladen der Aufbereitungsanlage und die Aufbereitung selbst betrachtet. Der Abbruch der Bauwerke und der Transport von Beton- und Mischabbruch zwischen der Baustelle und dem Ort der Herstellung von Gesteinskörnung werden vernachlässigt. Die Gründe für diese Annahme werden ausführlich in Kapitel 3.3 be-

schrieben. In Kapitel 4.4 wird untersucht, wie sehr diese Annahme die Ergebnisse der Ökobilanz beeinflusst.

Das Be- und Entladen der Aufbereitungsanlage wird mit verschiedenen Baumaschinen durchgeführt. In der Aufbereitung selbst werden der Beton- bzw. der Mischabbruch gebrochen und gesiebt. Es wird vereinfachend angenommen, dass die angelieferten Mengen an Beton- und Mischabbruch bereits soweit sortiert sind, dass keine Fremdfractionen wie Metalle oder Holz mehr abgetrennt werden müssen.

Es wird angenommen, dass alle in den vorhergehenden Abschnitten genannten Prozesse in der Schweiz stattfinden während des Zeitraums der Nutzung eines Kieswerks (d. h. in der Regel während mehrerer Jahrzehnte). Ausserdem werden Prozesse bzw. ganze Prozessketten mitbilanziert, die für die bereits genannten Prozesse Energie und Entsorgungsleistungen bereitstellen bzw. zur Herstellung der Produktionsanlagen und den für Betrieb und Instandhaltung notwendigen Materialien dienen. Diese Prozesse finden teilweise in der Schweiz und teilweise in anderen Ländern statt. Der betrachtete Zeitraum variiert ebenfalls, da insbesondere die Prozesse zum Herstellen der Produktionsanlagen und Infrastrukturen bis zu mehreren Jahrzehnten zurückliegen können. Die genauen Informationen zum zeitlichen und räumlichen Bezug sind in den jeweiligen Datensätzen in der ecoinvent-Datenbank dokumentiert.

### 4.1.3 Datengrundlagen und Datenqualität

In dieser Ökobilanz werden verschiedene Varianten zur Herstellung von Gesteinskörnungen betrachtet, die auf unterschiedlichen Datengrundlagen aufbauen. Für die Analyse der Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung wird von einem Inventar aus Künniger et al. (2001) ausgegangen. In Künniger et al. (2001) wurde in der Schweiz erstmalig eine umfassendere Ökobilanzstudie über die Herstellung von Zementen und Betonen vorgestellt. Die dort erhobenen Inventardaten sind in die Ecoinvent-Datenbank aufgenommen worden (Kellenberger et al. 2003). Die Inventardaten basieren auf der Bilanzierung von vier Schweizer Kieswerken und umfassen sowohl den gesamten Herstellungsprozess als auch interne Prozesse (Transporte usw.), Baumaschinen, Landnutzung und Rekultivierung. Es werden dabei drei Inventare unter-

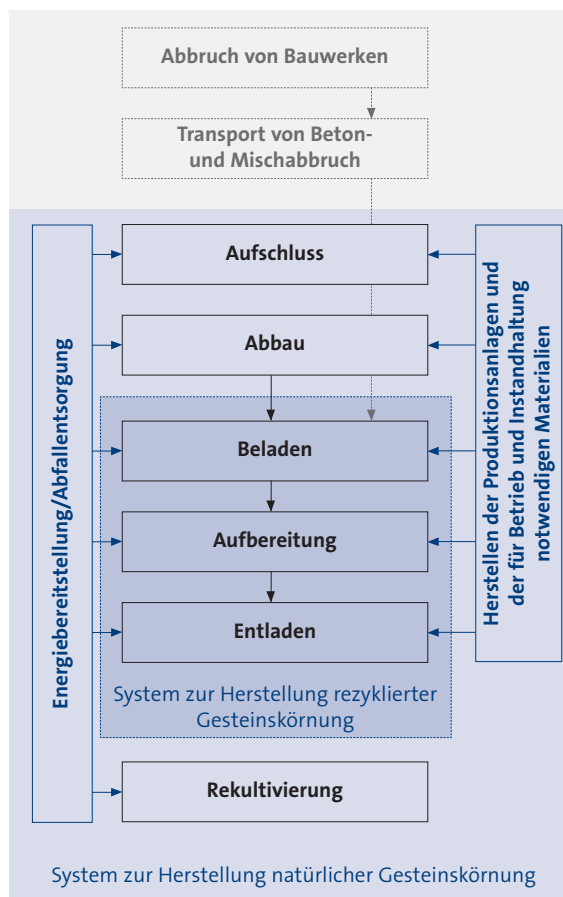


Abb. 4.1  
Übersicht über die Definition des Systems zur Herstellung von Gesteinskörnungen

## Ökobilanzen für Gesteinskörnungen

Prozesse		Natürliche Gesteinskörnung		Rezyklierte Gesteinskörnung	
		Kieswerke Holcim	Ecoinvent	Mobile Anlage	Stationäre Anlage
Aufschluss	Daten- grundlage	Holcim (Schweiz) AG; Schäffler und Keller (2008)	Inventar «mine, gravel/sand»	–	–
	Annahme	Wirkungen abhängig von der bewegten Materialmenge;  Massenproportionale Allokation der Wirkungen	Massenproportionale Allokation der Wirkungen	–	–
	Daten- qualität	Gut	Mittel	–	–
Abbau	Daten- grundlage	Holcim (Schweiz) AG; Schäffler und Keller (2008)	Inventar «gravel round, at mine»	–	–
	Annahme	Massenproportionale Allokation der Wirkungen	Massenproportionale Allokation der Wirkungen	–	–
	Daten- qualität	Gut	Mittel	–	–
Aufbereitung/Be- und Entladen	Daten- grundlage	Holcim (Schweiz) AG; Schäffler und Keller (2008)	Inventar «gravel round, at mine»	Holcim (Schweiz) AG; Schäffler und Keller (2008)	Ecoinvent-Inventar «building disposal, concrete gravel, in sorting plant»; Kind et al. (2006).
	Annahme	Materialzusammensetzung und Lebensdauern der Anlagen im Werk Aigle sind repräsentativ für alle Kieswerke; Massenproportionale Allokation der Wirkungen	Massenproportionale Allokation der Wirkungen	Wertproportionale Allokation der Wirkungen	Wertproportionale Allokation der Wirkungen
	Daten- qualität	Gut	Mittel	Mittel	Mittel bis gering
Rekultivierung	Daten- grundlage	Holcim (Schweiz) AG; Schäffler und Keller (2008)	Inventar «recultiva- tion, limestone mine»	–	–
	Annahme	Wirkungen abhängig von der bewegten Materialmenge; Massenproportionale Allokation der Wirkungen	Massenproportionale Allokation der Wirkungen	–	–
	Daten- qualität	Gut	Mittel	–	–

**Abb. 4.2**

**Übersicht über die verwendeten Datengrundlagen für die Inventardaten**

Die in dieser Abbildung erwähnten Ecoinvent-Inventare sind in Kellenberger et al. (2003) und in Doka (2000) dokumentiert. Die Datenquellen «Holcim (Schweiz) AG» sind in den Anhängen B bis F dieses Berichts dokumentiert.

## Ökobilanzen für Gesteinskörnungen

schieden: (i) das Bereitstellen des Kieswerks (Inventar «mine, gravel/sand»), (ii) der Betrieb des Kieswerks (Inventar «gravel round, at mine») und (iii) die Rekultivierung des Kieswerks, abgeschätzt mit Inventardaten zur Rekultivierung von Kalksteinbruch (Inventar «recultivation, limestone mine»). Die Datenqualität wird als «mittel» eingestuft, da die betrachteten Kieswerke nicht repräsentativ für die gesamte Schweiz sind <sup>9</sup>.

Um die Datengrundlage zu verbessern, werden in der vorliegenden Studie ergänzende Daten zu verschiedenen Kieswerken der Holcim (Schweiz) AG erfasst. Dazu wurden vier Kieswerke ausgewählt, in denen unterschiedliche Abbauverfahren angewendet werden, um eine mögliche Bandbreite von Umweltbelastungen durch Kiesabbau aufzuzeigen und so eine bessere Einschätzung der Eignung der Inventardaten aus Künniger et al. (2001) für die in dieser Studie untersuchte Fragestellung zu gewinnen. Die Bilanzierung dieser Kieswerke liefert keine repräsentativen Daten für einen durchschnittlichen Herstellungsprozess von natürlicher Gesteinskörnung in der Schweiz, da ihre Jahresproduktion über der durchschnittlichen Jahresproduktion Schweizer Kieswerke liegt<sup>10</sup>. Dies sind:

- Kieswerk Aigle: Gewinnung von Kies mit einem Schwimmbagger aus einem Baggersee. Hier werden ausschliesslich Rundkies und Sand gewonnen.
- Kieswerk Brunnen: Sprengen von Kies aus dem Fels. Hier wird ausschliesslich gebrochener Kies (Splitt) hergestellt.
- Kieswerk Mülligen: Hier wird Hydro-Jetting zum Kiesabbau eingesetzt. Es werden ausschliesslich Rundkies und Sand gewonnen.
- Das Kieswerk Oberdorf ist ein klassisches Kieswerk mit einem Abbau mit Baggern. Hier werden ausschliesslich Rundkies und Sand gewonnen.

Eine genauere Beschreibung dieser Kieswerke, das Vorgehen bei der Datenerfassung sowie die Inventardaten finden sich im Anhang dieses Berichts (vgl. Anhänge B, C, D und E).

Für die Analyse der Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung wurde in der Schweiz bislang kein Inventar-

datensatz publiziert. In der vorliegenden Untersuchung werden die Inventardaten für diesen Prozess aus dem Datensatz zur Entsorgung von Betonabbruch aus Doka (2000) abgeschätzt, der Teil der ecoinvent-Datenbank ist. Das Vorgehen und die Annahmen, die dieser Schätzung zugrunde liegen, werden in Kapitel 3.3 beschrieben. Die Qualität dieser Daten wird als «mittel bis gering» eingestuft <sup>11</sup>.

Ergänzend dazu wurden Daten zu den Wirkungen der Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung auf die Umwelt mit einem mobilen Brecher durch die Holcim (Schweiz) AG zur Verfügung gestellt. Eine genauere Beschreibung dieses Prozesses sowie die Inventardaten finden sich im Anhang dieses Berichts (siehe Anhang B).

### 4.1.4 Methodische Festlegungen

In dieser Ökobilanz werden die generellen methodischen Festlegungen übernommen, die in Kapitel 3.4 beschrieben werden. Im Zusammenhang mit der Analyse der Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung in den Kieswerken der Holcim (Schweiz) AG werden ausserdem folgende Annahmen getroffen:

- Die Emissionen und Ressourcenverbräuche der Kieswerke werden proportional zu den produzierten Mengen den beiden Produkten Sand und Kies zugerechnet (massenproportionale Allokation).
- Die Emissionen und Ressourcenverbräuche aus Aufschluss und Rekultivierung werden in Abhängigkeit vom Volumen der Bodenschichten abgebildet, das bei Aufschluss und Rekultivierung bewegt werden muss. Dazu werden Schätzwerte zu den Leistungen, den Treibstoffverbräuchen und den Emissionen der verwendeten Baumaschinen verwendet, sowie Schätzwerte der bewegten Volumina.
- Bei der Bilanzierung der Materialzusammensetzungen und Lebensdauern der Anlagen eines Kieswerks, die zur Aufbereitung und zu Be- und Entladen eingesetzt werden, wird angenommen, dass die Werte des Kieswerks Aigle repräsentativ für alle betrachteten Kieswerke sind. Für das Kieswerk Aigle werden die Materialzusammensetzungen und die Lebensdauern durch

<sup>9</sup> Persönliche Kommunikation mit T. Künniger, Empa, 2.4.2009.

<sup>10</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 10.12.2008.

<sup>11</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 24.11.2009.



Experten der Holcim (Schweiz) AG abgeschätzt. Für die Bilanzierung der Prozesskette der Herstellung der Materialien wird auf die ecoinvent-Datenbank zurückgegriffen.

- Bei der Erfassung der Emissionen in die Luft werden nur die Verbrennungsemissionen der Baumaschinen sowie der Heizungsanlagen berücksichtigt. Es wird angenommen, dass die Staubeentwicklung der Kiesaufbereitung (Veredelung Brechen/Sieben) im Kieswerk selber vernachlässigt werden kann, da sie durch fest installierte Entstaubungsanlagen unterbunden werden. Die Staubemissionen der Kieswerke der Holcim (Schweiz) AG liegen je nach Entstaubungsanlage um die Faktoren 6 bis 20 tiefer als die maximal zulässigen Werte von  $20 \text{ mg/m}^3$  gemäss Luftreinhalteverordnung. Die Staubemissionen, die aus dem Sprengvorgang, dem Beladen, dem Transport usw. entstehen, werden nicht erfasst, da diese Emissionen auch mehrheitlich in der Kiesgrube selber verbleiben.<sup>12</sup>

Im Zusammenhang mit der Analyse der Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung werden ausserdem folgende Annahmen getroffen:

- Die Emissionen und Ressourcenverbräuche aus der Herstellung, der Instandhaltung und der Entsorgung der notwendigen Bauten auf dem Werkgelände der stationären Anlage (Bodenbefestigung, Lager, Verwaltungsgebäude, Waagen usw.) werden vernachlässigt. Betrachtet werden hingegen die Landinanspruchnahme und der Energieverbrauch für den Betrieb eines Verwaltungsgebäudes.
- Die Emissionen und Ressourcenverbräuche aus dem Umschlag der mineralischen Sekundärrohstoffe auf dem Werkgelände der stationären Anlage (Baumaschinen, Förderbänder usw.) werden vernachlässigt.
- Es wird angenommen, dass die Energieverbräuche des Betriebs der Aufbereitungslagen bei der Aufbereitung von Mischabbruch und Betonabbruch gleich gross sind.
- Die Emissionen und Ressourcenverbräuche aus der Aufbereitung von Misch- und Betonabbruch werden proportional zum Anteil des Umsatzes aus dem Verkauf von Misch- bzw. Betongranulaten am Gesamt-

umsatz der Aufbereitungsanlage der Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung zugerechnet (vgl. Kap. 3.3). Die Allokation ist also «wertproportional».

- Bei der Bilanzierung der mobilen Anlage wird der Transport der Anlage zwischen den Baustellen mitberücksichtigt.

Die Relevanz dieser Annahmen für die Ergebnisse der Ökobilanzen wird in Kapitel 4.4 diskutiert.

## 4.2 Ausgewählte Ergebnisse der Sachbilanz

In den Sachbilanzen der Herstellung von Gesteinskörnungen werden theoretisch alle Emissionen und Ressourcenverbräuche bilanziert, die von dem in Abb. 4.1 dargestellten System an die Umwelt abgegeben werden bzw. aus ihr entnommen werden. Tatsächlich werden in der vorliegenden Studie jene Emissionen und Ressourcenverbräuche abgebildet, für die die ecoinvent-Datenbank Daten bereitstellt. Dies sind je nach Inventardatensatz mehrere hundert verschiedene Emissionen und Ressourcenverbräuche. Aus dieser Fülle von Informationen werden im vorliegenden Bericht einzelne Ergebnisse direkt ausgewertet. Dies sind einerseits Emissionen in die Luft, die aus der Verbrennung von fossilen Brenn- und Treibstoffen entstehen. Andererseits sind es Ressourcenverbräuche von mineralischen Ressourcen, Wasser sowie energetisch genutzten Ressourcen.

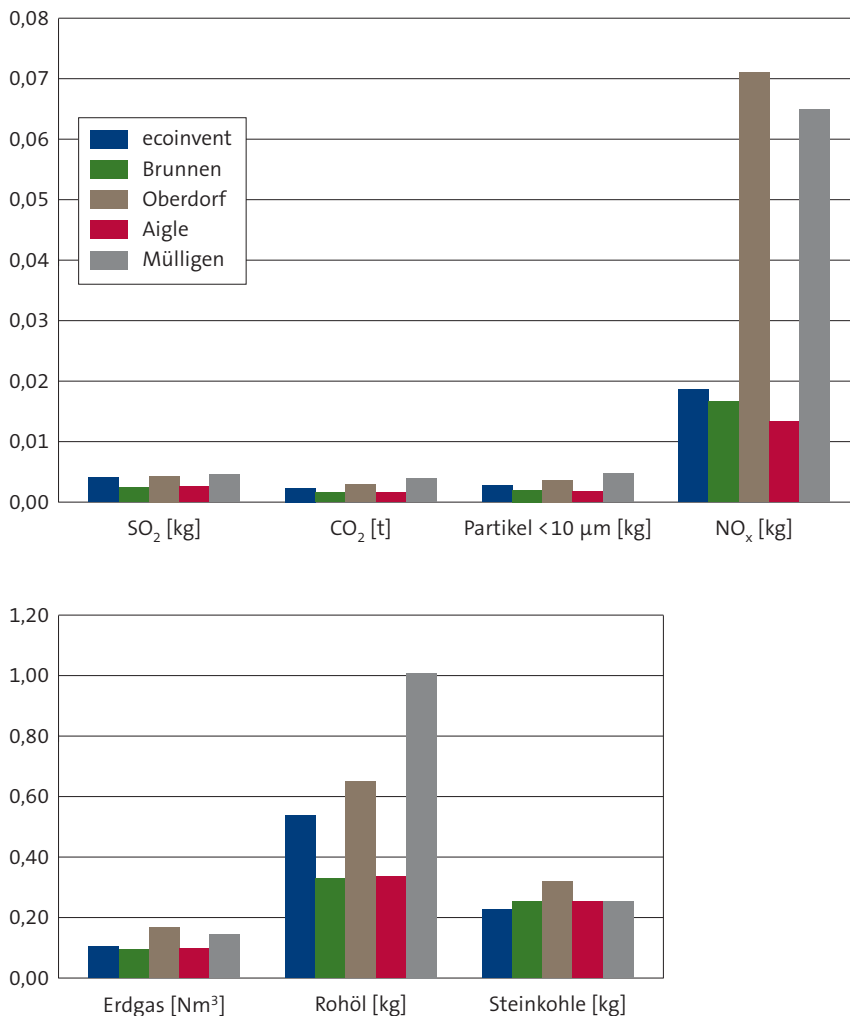
In diesem Kapitel wird zwischen der Herstellung von natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen unterschieden, da die Prozessketten innerhalb einer Variante besser vergleichbar sind. Ein Vergleich zwischen den beiden Varianten wird in Kapitel 4.3 dargestellt.

### 4.2.1 Natürliche Gesteinskörnungen

Die überwiegende Menge Luftemissionen aus der Herstellung von Gesteinskörnungen besteht aus Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ). Diese Emissionen entstehen vor allem bei der Verbrennung von Treibstoffen in den Baumaschinen.

<sup>12</sup> Persönliche Kommunikation mit G. Doka, Doka Ökobilanzen, 17.3.2009.

## Ökobilanzen für Gesteinskörnungen



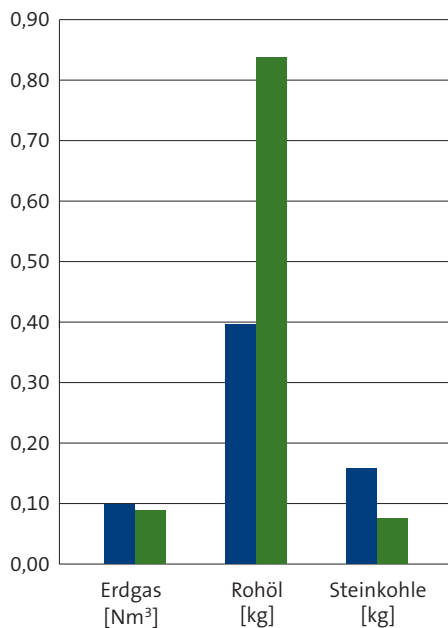
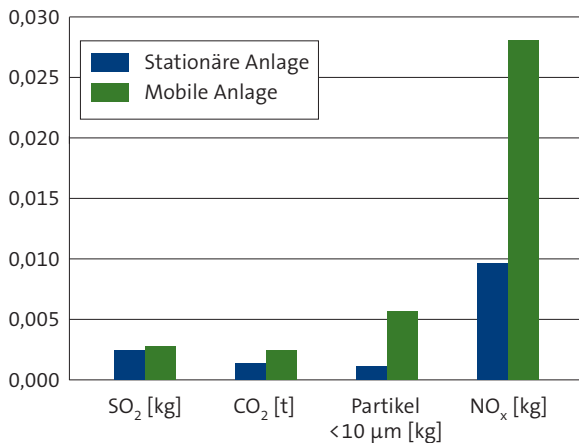
**Abb. 4.3**  
**Luftemissionen und energetischer Ressourcenverbrauch bei Herstellung von natürlichen Gesteinskörnungen**  
 Mengen Emissionen in die Luft (oben) und Ressourcenverbrauch (unten) des betrachteten Systems (siehe Abb. 4.1), pro Tonne Gesteinskörnung, in den jeweiligen Masseinheiten.

Ausserdem entstehen Kohlendioxidemissionen durch das Verbrennen von Brennstoffen in den Aufbereitungsanlagen. Ähnlich stellt sich die Situation auch bei den Emissionen von Schwefeldioxid und Stickoxiden dar: Auch hier dominieren die Baumaschinen.

Für das Kieswerk Brunnen werden deutlich höhere Luftemissionen ausgewiesen als für die anderen Kieswerke. Es bildet eine Ausnahme, da in diesem Werk die Gesteinskörnung aus dem Fels gesprengt wird. Der Energieverbrauch und die damit verbundenen Luftemissionen sind in Brunnen daher deutlich höher als in den anderen Kieswerken. Der Sprengprozess ist für 60% aller Stickoxidemissionen im Kieswerk Brunnen verantwortlich. Der zweite Ausreisser beim Vergleich der Kieswerke ist das

Kieswerk Oberdorf, das ebenfalls durch relative hohe Luftemissionen auffällt. Beim Kieswerk in Oberdorf wird Kies ausschliesslich mit Baumaschinen abgebaut. Die Emissionen durch den Maschinenbetrieb (längere Transportwege usw.) sind dadurch ebenfalls erhöht im Vergleich mit den übrigen Kieswerken.

Der im ecoinvent-Inventar vorhandene Datensatz «Kies, rund ab Werk» zeigt Luftemissionen, die innerhalb der Bandbreite der Luftemissionen der untersuchten Kieswerke der Holcim (Schweiz) AG liegen. Tendenziell liegen die Werte des ecoinvent-Datensatzes aber im oberen Bereich dieser Bandbreite, insbesondere bezogen auf die Werke zur Herstellung von Kiessanden ohne Brechen des Materials (alle Kieswerke mit Ausnahme von Brunnen).



**Abb. 4.4**  
Luftemissionen und energetischer Ressourcenverbrauch bei Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen

Ausgewählte Luftemissionen (oben) und Ressourcenverbrauch (unten) aus der Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen, pro Tonne Gesteinskörnung, in den jeweiligen Masseinheiten.

Auch bei den energetisch genutzten Ressourcen fallen die Kieswerke Oberdorf und Brunnen durch besonders hohe Werte auf. Hier ist der Betrieb der Anlagen genauso wichtig wie der Verbrauch der Baumaschinen. Die Werte des Ecoinvent-Inventars liegen wieder tendenziell im oberen Bereich der Bandbreite der betrachteten Kieswerke.

Weiter wurde der Verbrauch von Brauchwasser betrachtet. Hier liegen alle untersuchten Kieswerke der Holcim (Schweiz) AG bei rund 0,05 Liter pro Tonne Gesteinskörnung. Der Ecoinvent-Datensatz weist mit 1,43 Liter pro

Tonne Gesteinskörnung einen deutlich höheren Wert auf. Leider gibt die Dokumentation dieses Datensatzes in Kellenberger et al. (2003) keine Hinweise, welche diese Abweichung erklären könnten.

### 4.2.2 Rezyklierte Gesteinskörnungen

In Abb. 4.4 wird jeweils der gesamte Prozess der Verarbeitung von Misch- bzw. Betonabbruch gemäss der in Abb. 4.1 dargestellten Systemdefinition betrachtet. Dabei wird nicht zwischen den beiden Produkten dieses Prozesses, Misch- bzw. Betongranulat einerseits und Entsorgungsdienstleistung für Misch- bzw. Betonabbruch andererseits unterschieden. Für die Interpretation von Abb. 4.4 muss zusätzlich berücksichtigt werden, dass nur rund 80% dieser Werte dem Betongranulat bzw. nur rund 30% der Werte dem Mischgranulat zugerechnet werden.

Der in Abb. 4.4 dargestellte Vergleich der Luftemissionen aus der Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen zeigt, dass die mobile Anlage zu durchwegs höheren Emissionen führt als die stationäre Anlage. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die mobile Anlage mit Diesel betrieben wird, während in der stationären Anlage Strom verbraucht wird, dessen Bereitstellung mit dem Schweizer Strommix modelliert wird, wodurch der stationären Anlage vergleichsweise geringe Emissionen zugerechnet werden. Dementsprechend wird in der mobilen Anlage auch mehr Rohöl verbraucht als in der stationären Anlage. Die stationäre Anlage benötigt hingegen mehr Steinkohle zur Produktion von (Import-)Strom (vgl. Abb. 4.4).

## 4.3 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

In diesem Kapitel werden die Verfahren zur Herstellung von Gesteinskörnung jeweils relativ zueinander verglichen (normiert auf die Wirkungen einer dieser Varianten) und anschliessend die Ergebnisse zusammenfassend tabellarisch dargestellt (ohne Normierung). Dabei werden zunächst jeweils die Verfahren zur Herstellung von natürlichen Gesteinskörnungen und die Verfahren zur Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen verglichen. Anschliessend werden ausgewählte Verfahren von beiden Varianten – natürlich und rezykliert – einander gegenübergestellt.

## Ökobilanzen für Gesteinskörnungen

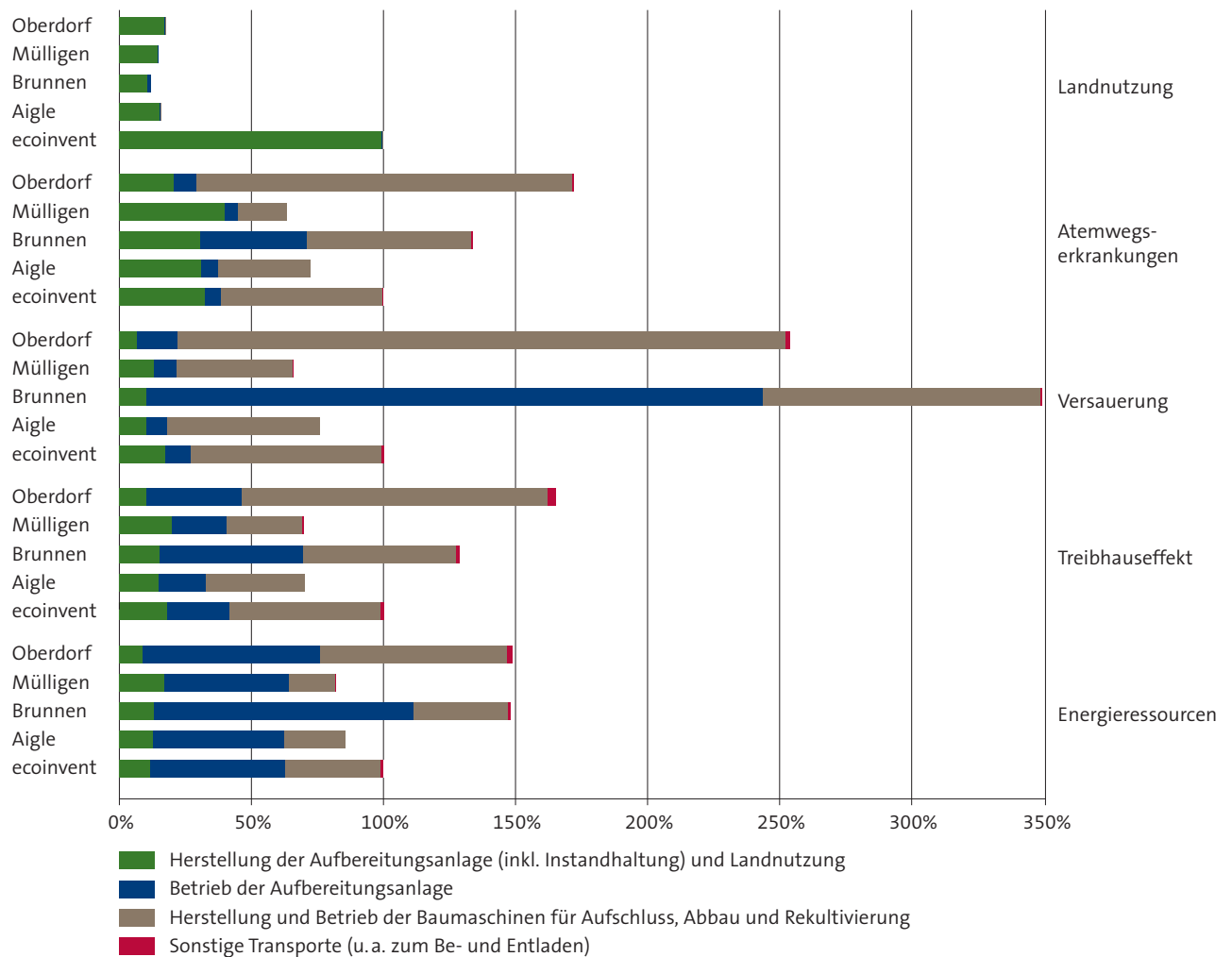


Abb. 4.5

### Wirkungsabschätzung für die Herstellung von natürlichen Gesteinskörnungen

Wirkungsabschätzung für die Herstellung von natürlichen Gesteinskörnungen, unterschieden nach ausgewählten Prozessen des Systems. Die Ergebnisse für natürliche Gesteinskörnung werden in Relation zu den jeweiligen Ergebnissen für den ecoinvent-Datensatz «gravel, round, at mine» (= 100%) dargestellt.

#### (i) Vergleich der Verfahren zur Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung

Die Wirkungsabschätzung der verschiedenen Herstellungsverfahren von natürlicher Gesteinskörnung zeigt eine grosse Bandbreite zwischen den verschiedenen Kieswerken. In der Wirkungskategorie «Versauerung» ist der höchste Wert – für das Kieswerk Brunnen – rund viermal so gross wie der kleinste Wert – für das Kieswerk Mülligen. Die Kieswerke Brunnen und Oberdorf zeigen – wie bereits bei der Sachbilanz im vorhergehenden Kapitel – die höchsten Werte in allen Wirkungskategorien – mit Ausnahme des Ökosystem-Schadenspotenzials durch Landnutzung. Die Kieswerke Aigle und Mülligen zeigen die kleinsten Werte.

Die Ergebnisse für den ecoinvent-Datensatz liegen für fast alle Wirkungskategorien innerhalb der Spannweite der Werte der Kiesgruben der Holcim (Schweiz) AG. Die Wirkungskategorie des Ökosystem-Schadenspotenzials durch Landnutzung (in Abb 4.5 abgekürzt als «Landnutzung») stellt eine Ausnahme dar. Hier liegen die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für den ecoinvent-Datensatz deutlich höher als bei den Kieswerken der Holcim (Schweiz) AG. Leider gibt die Dokumentation dieses Datensatzes in Kellenberger et al. (2003) keine Erklärung für diese Abweichung.

Tendenziell dominieren die Baumaschinen (Herstellung, Instandhaltung und Betrieb) jene Wirkungen, welche auf

## Ökobilanzen für Gesteinskörnungen

Wirkungskategorie	Wirkungsindikator	Varianten	Herstellung der Aufbereitungsanlage (inkl. Instandhaltung) und Landnutzung	Betrieb der Aufbereitungsanlage und Kiesabbau	Herstellung und Betrieb der Baumaschinen für Aufschluss, Abbau und Rekultivierung	Sonstige Transporte (u.a zum Be- und Entladen)	Summe
Treibhauseffekt	CO <sub>2</sub> -Äquivalent [kg]	ecoinvent	$4,43 \cdot 10^{-1}$	$5,88 \cdot 10^{-1}$	$1,40 \cdot 10^0$	$2,79 \cdot 10^{-2}$	$2,46 \cdot 10^0$
		Aigle	$3,70 \cdot 10^{-1}$	$4,39 \cdot 10^{-1}$	$9,19 \cdot 10^{-1}$	$5,92 \cdot 10^{-198}$	$1,73 \cdot 10^0$
		Brunnen	$3,72 \cdot 10^{-1}$	$1,34 \cdot 10^0$	$1,43 \cdot 10^0$	$3,01 \cdot 10^{-2}$	$3,17 \cdot 10^0$
		Mülligen	$4,86 \cdot 10^{-1}$	$5,15 \cdot 10^{-1}$	$7,07 \cdot 10^{-1}$	$9,82 \cdot 10^{-3}$	$1,72 \cdot 10^0$
		Oberdorf	$2,51 \cdot 10^{-1}$	$8,87 \cdot 10^{-1}$	$2,85 \cdot 10^0$	$7,26 \cdot 10^{-2}$	$4,07 \cdot 10^0$
Versauerung	SO <sub>2</sub> -Äquivalent [kg]	ecoinvent	$2,58 \cdot 10^{-3}$	$1,50 \cdot 10^{-3}$	$1,08 \cdot 10^{-2}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{-2}$
		Aigle	$1,52 \cdot 10^{-3}$	$1,20 \cdot 10^{-3}$	$8,63 \cdot 10^{-3}$	$4,78 \cdot 10^{-200}$	$1,13 \cdot 10^{-2}$
		Brunnen	$1,53 \cdot 10^{-3}$	$3,50 \cdot 10^{-2}$	$1,57 \cdot 10^{-2}$	$1,08 \cdot 10^{-4}$	$5,23 \cdot 10^{-2}$
		Mülligen	$2,00 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$6,53 \cdot 10^{-3}$	$3,53 \cdot 10^{-5}$	$9,85 \cdot 10^{-3}$
		Oberdorf	$1,03 \cdot 10^{-3}$	$2,25 \cdot 10^{-3}$	$3,45 \cdot 10^{-2}$	$2,61 \cdot 10^{-4}$	$3,80 \cdot 10^{-2}$
Atemwegserkrankungen	Partikel < 10 µm [kg]	ecoinvent	$8,90 \cdot 10^{-4}$	$1,67 \cdot 10^{-4}$	$1,68 \cdot 10^{-3}$	$9,10 \cdot 10^{-6}$	$2,75 \cdot 10^{-3}$
		Aigle	$8,55 \cdot 10^{-4}$	$1,74 \cdot 10^{-4}$	$9,59 \cdot 10^{-4}$	$2,28 \cdot 10^{-201}$	$1,99 \cdot 10^{-3}$
		Brunnen	$8,38 \cdot 10^{-4}$	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$1,71 \cdot 10^{-3}$	$8,97 \cdot 10^{-6}$	$3,67 \cdot 10^{-3}$
		Mülligen	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$1,40 \cdot 10^{-4}$	$5,08 \cdot 10^{-4}$	$2,92 \cdot 10^{-6}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$
		Oberdorf	$5,66 \cdot 10^{-4}$	$2,41 \cdot 10^{-4}$	$3,90 \cdot 10^{-3}$	$2,16 \cdot 10^{-5}$	$4,73 \cdot 10^{-3}$
Energieressourcen	CED [MJ-Äquivalent]	ecoinvent	$6,85 \cdot 10^0$	$3,02 \cdot 10^1$	$2,12 \cdot 10^1$	$4,77 \cdot 10^{-1}$	$5,87 \cdot 10^1$
		Aigle	$7,42 \cdot 10^0$	$2,92 \cdot 10^1$	$1,35 \cdot 10^1$	$0,00 \cdot 10^0$	$5,01 \cdot 10^1$
		Brunnen	$7,66 \cdot 10^0$	$5,78 \cdot 10^1$	$2,08 \cdot 10^1$	$5,17 \cdot 10^{-1}$	$8,68 \cdot 10^1$
		Mülligen	$9,99 \cdot 10^0$	$2,77 \cdot 10^1$	$1,03 \cdot 10^1$	$1,68 \cdot 10^{-1}$	$4,82 \cdot 10^1$
		Oberdorf	$5,17 \cdot 10^0$	$3,95 \cdot 10^1$	$4,14 \cdot 10^1$	$1,25 \cdot 10^0$	$8,74 \cdot 10^1$
Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung	Siedlungsflächen-Äquivalent [m <sup>2</sup> · Nutzungsjahre]	ecoinvent	$3,70 \cdot 10^0$	$1,41 \cdot 10^{-2}$	$5,16 \cdot 10^{-3}$	$8,00 \cdot 10^{-4}$	$3,72 \cdot 10^0$
		Aigle	$5,69 \cdot 10^{-1}$	$1,45 \cdot 10^{-2}$	$7,57 \cdot 10^{-3}$	$9,86 \cdot 10^{-200}$	$5,91 \cdot 10^{-1}$
		Brunnen	$3,97 \cdot 10^{-1}$	$4,75 \cdot 10^{-2}$	$7,25 \cdot 10^{-3}$	$9,21 \cdot 10^{-4}$	$4,52 \cdot 10^{-1}$
		Mülligen	$5,48 \cdot 10^{-1}$	$1,24 \cdot 10^{-2}$	$3,61 \cdot 10^{-3}$	$3,00 \cdot 10^{-4}$	$5,64 \cdot 10^{-1}$
		Oberdorf	$6,35 \cdot 10^{-1}$	$1,81 \cdot 10^{-2}$	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$2,22 \cdot 10^{-3}$	$6,69 \cdot 10^{-1}$
Kiesabbau	Kies [kg]	ecoinvent	$5,52 \cdot 10^{-1}$	$1,04 \cdot 10^3$	$2,10 \cdot 10^{-2}$	$1,57 \cdot 10^{-2}$	$1,04 \cdot 10^3$
		Aigle	$4,28 \cdot 10^{-2}$	$1,04 \cdot 10^3$	$3,19 \cdot 10^{-2}$	$9,34 \cdot 10^{-199}$	$1,04 \cdot 10^3$
		Brunnen	$4,29 \cdot 10^{-2}$	$1,04 \cdot 10^3$	$4,14 \cdot 10^{-2}$	$1,45 \cdot 10^{-2}$	$1,04 \cdot 10^3$
		Mülligen	$5,59 \cdot 10^{-2}$	$1,04 \cdot 10^3$	$2,05 \cdot 10^{-2}$	$4,72 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^3$
		Oberdorf	$2,89 \cdot 10^{-2}$	$1,04 \cdot 10^3$	$8,10 \cdot 10^{-2}$	$3,49 \cdot 10^{-2}$	$1,04 \cdot 10^3$

**Abb. 4.6**

### Wirkungsabschätzung für die Herstellung von natürlichen Gesteinskörnungen

Wirkungsabschätzung für das in Abb. 4.1 definierte System für die Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung, unterschieden nach Wirkungskategorien und ausgewählten Prozessen, bezogen auf die funktionale Einheit (= 1 Tonne Gesteinskörnung).

Emissionen in die Luft zurückzuführen sind (Treibhauseffekt, Versauerung und Atemwegserkrankungen). Die Baumaschinen werden in den drei Prozessen Aufschluss, Abbau und Rekultivierung eingesetzt. Der Anteil dieser drei Prozesse ist in den verschiedenen Kiesgruben sehr

unterschiedlich. In Brunnen und Oberdorf dominiert der Abbau mit 99% (Brunnen) bzw. 86% (Oberdorf) des gesamten Dieselverbrauchs in Baumaschinen während der Lebensdauer des Kieswerks. In Mülligen macht der Abbau nur 70% dieses Verbrauchs aus, da ein wesentlich

## Ökobilanzen für Gesteinskörnungen

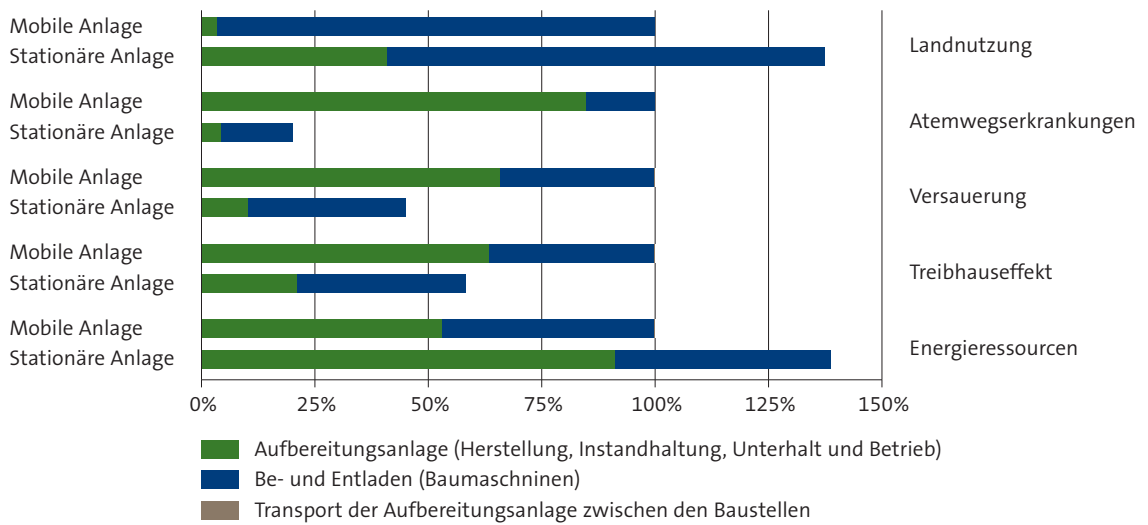


Abb. 4.7

### Wirkungsabschätzung für die Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen

Wirkungsabschätzung für die Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen, unterschieden nach Wirkungskategorien und ausgewählten Prozessen des Systems. Die Ergebnisse werden relativ zur mobilen Anlage (= 100%) dargestellt.

Wirkungskategorie	Wirkungsindikator	Varianten	Brecher	Be- und Entladen	Transporte zwischen den Baustellen	Summe
Treibhauseffekt	CO <sub>2</sub> -Äquivalent [kg]	ecoinvent	$5,43 \cdot 10^{-1}$	$9,25 \cdot 10^{-1}$	$0,00 \cdot 10^0$	$1,49 \cdot 10^0$
		mobil	$1,63 \cdot 10^0$	$9,28 \cdot 10^{-1}$	$7,02 \cdot 10^{-3}$	$2,56 \cdot 10^0$
Versauerung	SO <sub>2</sub> -Äquivalent [kg]	ecoinvent	$1,78 \cdot 10^{-3}$	$6,04 \cdot 10^{-3}$	$0,00 \cdot 10^0$	$7,82 \cdot 10^{-3}$
		mobil	$1,14 \cdot 10^{-2}$	$5,89 \cdot 10^{-3}$	$2,79 \cdot 10^{-5}$	$1,74 \cdot 10^{-2}$
Atemwegserkrankungen	Partikel < 10 µm [kg]	ecoinvent	$2,48 \cdot 10^{-4}$	$8,85 \cdot 10^{-4}$	$0,00 \cdot 10^0$	$1,13 \cdot 10^{-3}$
		mobil	$4,77 \cdot 10^{-3}$	$8,53 \cdot 10^{-4}$	$3,45 \cdot 10^{-6}$	$5,63 \cdot 10^{-3}$
Energieressourcen	CED [MJ-Äquivalent]	ecoinvent	$4,17 \cdot 10^1$	$2,17 \cdot 10^1$	$0,00 \cdot 10^0$	$6,34 \cdot 10^1$
		mobil	$2,42 \cdot 10^1$	$2,13 \cdot 10^1$	$1,26 \cdot 10^{-1}$	$4,57 \cdot 10^1$
Ökosystem-Schadenspot. durch Landnutzung	Siedlungsfl.-Äquiv. [m <sup>2</sup> ·Nutzungsjahre]	ecoinvent	$1,03 \cdot 10^{-1}$	$2,43 \cdot 10^{-1}$	$0,00 \cdot 10^0$	$3,46 \cdot 10^{-1}$
		mobil	$8,92 \cdot 10^{-3}$	$2,43 \cdot 10^{-1}$	$1,40 \cdot 10^{-4}$	$2,52 \cdot 10^{-1}$
Kiesabbau	Kies [kg]	ecoinvent	$6,82 \cdot 10^{-2}$	$9,20 \cdot 10^0$	$0,00 \cdot 10^0$	$9,27 \cdot 10^0$
		mobil	$4,89 \cdot 10^{-2}$	$9,20 \cdot 10^0$	$9,24 \cdot 10^{-3}$	$9,26 \cdot 10^0$

Abb. 4.8

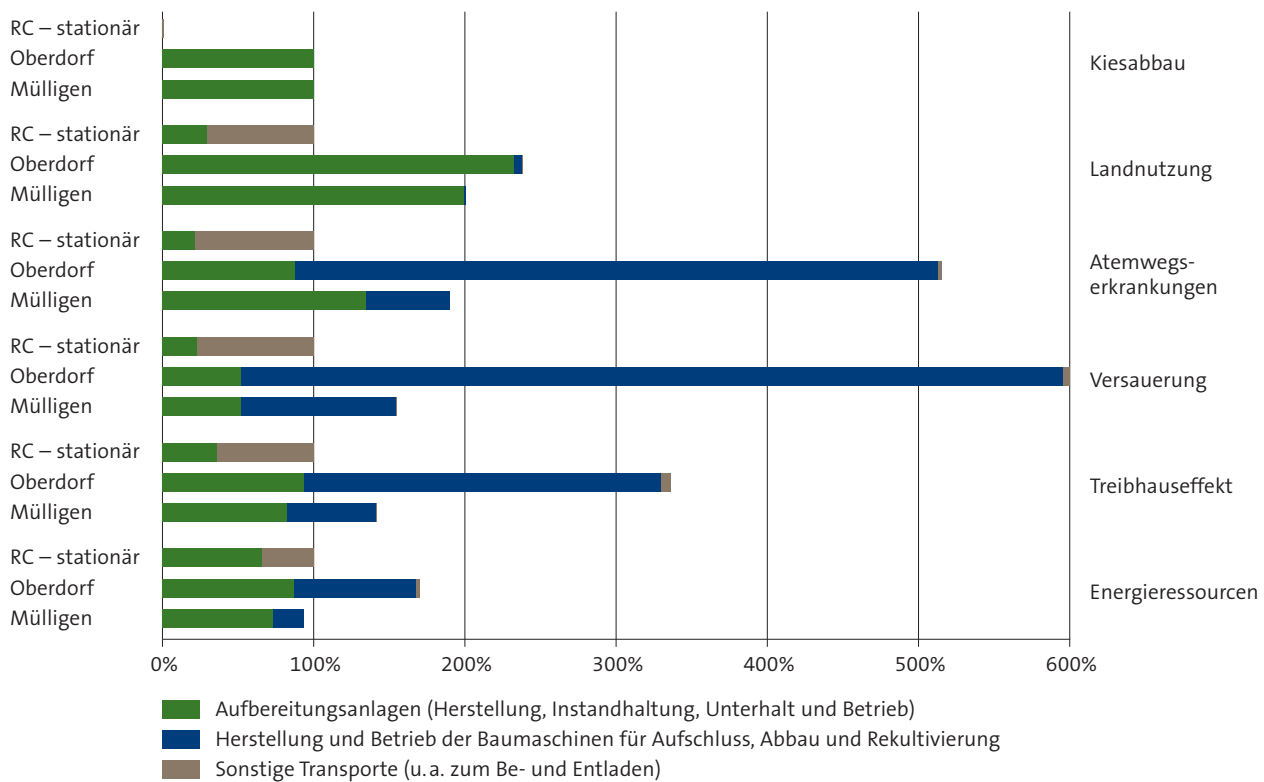
### Wirkungsabschätzung für die Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen

Wirkungsabschätzung für die Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung, unterschieden nach Wirkungskategorien und ausgewählten Prozessen. «ecoinvent» steht für die stationäre Anlage. Die Werte beziehen sich auf 100% dieses Systems. Aufgrund der wertproportionalen Allokation (gem. Kap. 3.4) werden bei der Bilanzierung von Betongranulat nur 81% dieser Werte der Gesteinskörnung zugerechnet, bei Mischgranulat sind es nur 30%.

grösserer Anteil des abgebauten Volumens bei der Rekultivierung wieder aufgefüllt wird als in Brunnen oder Oberdorf. In Aigle hingegen werden nur 40% des Dieselverbrauchs durch den Abbau verursacht, da der eigentliche Kiesabbau mit einem Schwimmbagger erfolgt, der

als Teil der Aufbereitungsanlage bilanziert wird. Für die Energieressourcen ist der Betrieb der Aufbereitungsanlagen aber mindestens ebenso wichtig. Hier wird in allen Kieswerken vor allem Strom verbraucht. Da für die Strombereitstellung von der Schweizer Situation ausge-

## Ökobilanzen für Gesteinskörnungen



**Abb. 4.9**  
**Wirkungsabschätzung für die Herstellung von natürlicher und rezyklierten Gesteinskörnungen**

Wirkungsabschätzung für die Herstellung von natürlicher und rezyklierten Gesteinskörnungen, unterschieden nach Wirkungskategorien und ausgewählten Prozessen. Die Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung wird in Relation gesetzt zur (stationären) Herstellung von Betonabbruchgranulat (= 100%; als «RC – stationär» bezeichnet). Aufgrund der wertproportionalen Allokation auf das Produkt «Betonabbruchgranulat» bei der Herstellung rezyklierter Gesteinskörnung werden nur 81% der Werte der Ergebnisse des gesamten Prozesses betrachtet.

gangen wird, führt der Stromverbrauch zu deutlich weniger Emissionen in die Luft als der Verbrauch von Diesel. Er zeigt sich aber deutlich in der Wirkungskategorie der Energieressourcen. In Aigle, Brunnen und Mülligen führt der Stromverbrauch aus dem Betrieb der Aufbereitungsanlagen zum grössten Anteil des Verbrauchs von Energieressourcen. In Oberdorf hingegen verbrauchen Baumaschinen und Aufbereitungsanlage ungefähr gleich viele Energieressourcen.

Die Wirkungskategorie Kiesabbau wird in diesem Vergleich nicht ausgewiesen, da wir vereinfachend annehmen, dass in allen Kieswerken pro 1 kg produziertem Kiessand rund 1,04 kg Kiessande abgebaut werden müssen<sup>13</sup>. Wir gehen vereinfachend davon aus, dass alle ab-

gebauten Kiessande unter die Wirkungskategorie Kiesabbau fallen, unabhängig davon, ob Lagerstätten von Rundkies abgebaut werden (z. B. Kieswerk Aigle), oder Gesteinskörnung aus dem Fels gesprengt wird (Kieswerk Brunnen).

### (ii) Vergleich der Verfahren zur Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung

Bei rezyklierter Gesteinskörnung werden zwei Verfahren verglichen: die Herstellung in einer stationären Aufbereitungsanlage und die Herstellung in einer mobilen Aufbereitungsanlage. Die stationäre Anlage weist in den Wirkungskategorien Atemwegserkrankungen, Versauerung und Treibhauseffekt tiefere Werte auf, da diese Anlage mit Strom betrieben wird, der nach dem Schwei-

<sup>13</sup> Der Verlust zwischen abgebautem Kies und veredeltem bzw. verkauftem Kies in den einzelnen Kieswerken kann relativ stark variieren und ist abhängig von der Geologie. Bei den Holcim Kieswerken Aigle und Mülligen beträgt der Verlust an abschlämmbaren Anteilen zwischen 1 und 3%, in Oberdorf 3 bis 8%. In Brunnen wird der gesprengte Fels trocken aufbereitet und hat keine abschlämmbaren Anteile. Quelle: Persönliche Kommunikation, S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 24.11.2009.

## Ökobilanzen für Gesteinskörnungen

zer Strommix hergestellt wird. In den Wirkungskategorien Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung und Energieressourcen führt die mobile Aufbereitungsanlage zu geringeren Werten.

### **(iii) Vergleich ausgewählter Verfahren zur Herstellung von natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung**

Nachfolgend wird die Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung in einer stationären Anlage verglichen mit der Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung in zwei verschiedenen Kieswerken der Holcim (Schweiz) AG, in denen Kiessand ohne Brechprozess hergestellt wird. Um die Bandbreite der Ergebnisse der verschiedenen Kieswerke abzubilden, wurde ein Kieswerk mit tiefen Werten (Mülligen) und ein Kieswerk mit hohen Werten (Oberdorf) ausgewählt. In der Anlage zur Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung wird Betongranulat hergestellt, d. h. es werden nur 81% der Werte dieses Herstellungsprozesses betrachtet (wertproportionale Allokation gemäss Kap. 3.3).

Es zeigt sich (Abb. 4.9), dass die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für Herstellung von Betongranulat in einer stationären Anlage in allen Wirkungskategorien – mit Ausnahme der Energieressourcen – zu tieferen Werten führt als die Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung in den untersuchten Kieswerken der Holcim (Schweiz) AG.

## 4.4 Sensitivitätsüberlegungen und Vergleich mit anderen Studien

Die im vorhergehenden Kapitel dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf Vergleiche im Rahmen der in Kapitel 4.1 beschriebenen Annahmen zu Systemdefinition, Wahl der funktionalen Einheit und der Wahl der Datengrundlagen. In diesem Kapitel wird nun diskutiert, welchen Einfluss diese verschiedenen Annahmen auf die Ergebnisse haben.

Zunächst wird die Frage untersucht, ob bzw. wie sehr sich die Annahmen zur Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung auf den Vergleich zwischen rezyklierter und natürlicher Gesteinskörnung (Abb. 4.9) auswirken. Wie in Abb. 4.9 dargestellt, führt die Herstellung von Betongranulat in einer stationären Anlage in allen Wirkungs-

kategorien zu tieferen Werten. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass die Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung durch die getroffenen Annahmen tendenziell begünstigt wird. Insbesondere durch:

**(i) Die wertproportionale Allokation der Werte des Prozesses auf das Produkt Betongranulat:** Aufgrund dieser Annahme werden nur 81% der Werte des Prozesses betrachtet. Wenn wir diesen Parameter verändern und annehmen, dass 100% der Werte betrachtet werden, verändert sich der Vergleichs zugunsten der Kieswerke. Die Herstellung des Betongranulats bleibt aber das Verfahren mit den geringsten Werten in allen Wirkungskategorien.

**(ii) Das Vernachlässigen eines erheblichen Teils der Emissionen und Ressourcenverbräuche aus der Herstellung, dem Betrieb und der Instandhaltung der notwendigen Bauten auf dem Werkgelände der stationären Anlage (Bodenbefestigung, Lager, Waagen usw.) und des Umschlags der mineralischen Sekundärrohstoffe auf dem Werkgelände der stationären Anlage (Baumaschinen, Förderbänder usw.):** In der Bilanzierung der stationären Anlage zur Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung liegt der Fokus auf dem Betrieb sowie dem Be- und Entladen des Brechers. Es wird nur ein Teil der Infrastrukturen der Betriebsanlagen bilanziert (z. B. die Betriebsaufwendungen eines kleinen Verwaltungsgebäudes). Wir gehen aber ausserdem davon aus, dass in derartigen stationären Anlagen auch Betonabbruch und Betongranulat zwischengelagert wird. Dazu sind Infrastrukturen für die Lagerung (Silos, Bodenbefestigung usw.) notwendig. Darüber hinaus ist anzunehmen, dass Baumaschinen auch für den Lagerumschlag eingesetzt werden. Wenn wir annehmen, dass für den Lagerumschlag die gleiche Menge an Diesel verbraucht wird wie für das Be- und Entladen des Brechers, dann verändern sich die Ergebnisse des Vergleichs zwischen den Verfahren deutlich zugunsten der Herstellung der natürlichen Gesteinskörnung. In den Wirkungskategorien der Energieressourcen, des Treibhauseffekts, der Versauerung und der Atemwegserkrankungen liegt die Herstellung von Betongranulat innerhalb der Bandbreite der Werte der untersuchten Kieswerke der Holcim (Schweiz) AG. Beim Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung und dem Kiesabbau bleibt die Herstellung von Betongranulat die Variante mit den tiefsten Werten. Die Abstände zwischen



den Varianten werden jedoch in allen Wirkungskategorien – mit Ausnahme des Kiesabbaus – deutlich kleiner.

**(iii) Die Annahme, dass die Energieverbräuche des Betriebs der Aufbereitungslagen bei der Aufbereitung von Mischabbruch und Betonabbruch gleich gross sind:** Hier wird von einem durchschnittlichen Energieverbrauch ausgegangen. Nach Angaben der Holcim (Schweiz) AG ist der Energieverbrauch der Aufbereitung von Betonabbruch jedoch grösser als der Energieverbrauch bei der Aufbereitung von Mischabbruch<sup>14</sup>. Wenn wir annehmen, dass der Energieverbrauch der Aufbereitung von Betonabbruch rund 20% grösser ist als bislang angenommen, so wird der Unterschied zu den Ergebnissen der Kieswerke kleiner. Die Herstellung des Betongranulats bleibt aber das Verfahren zur Herstellung von Gesteinskörnung mit den tiefsten Werten in allen Wirkungskategorien.

Wir gehen daher zusammenfassend betrachtet davon aus, dass die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung in jedem Fall innerhalb der Bandbreite alternativer Verfahren der Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung liegen und den unteren Wert dieser Bandbreite für die Wirkungskategorien Kiesabbau und Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung immer unterschreiten. Durch die wertproportionale Allokation (es werden nur 30% der Wirkungen des Prozesses betrachtet) führt die Herstellung von Mischgranulat für alle Wirkungskategorien auch unter Berücksichtigung der oben genannten Unsicherheiten zu tieferen Werten als die Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung. Die Herstellung von Betongranulat führt – unter Berücksichtigung der oben diskutierten Unsicherheiten – tendenziell zu gleich hohen Werten wie die Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung für die Wirkungskategorien «Atemwegserkrankungen», «Versauerung» und «Treibhauseffekt».

Um die Qualität der verwendeten Daten besser beurteilen zu können, werden die Ergebnisse dieser Studie mit den Ergebnissen anderer aktueller Studien verglichen. In Abb. 4.10 werden zunächst ausgewählte Sachbilanzdaten für die Bilanzierung der untersuchten Kieswerke

den Sachbilanzdaten aus Harbi et al. (2008) gegenübergestellt. Harbi et al. haben 2008 im Auftrag der Holcim (Schweiz) AG Sachbilanzdaten für drei Kieswerke der Holcim (Schweiz) AG im Kanton Waadt erfasst. Ein Vergleich der Strom- und Dieselverbräuche pro Tonne produzierter Gesteinskörnung sowie der Landnutzung zeigt, dass beide Studien zu vergleichbaren Ergebnissen kommen. Die Kieswerke Brunnen und La Sarraz produzieren beide gebrochene Gesteinskörnung, was im erhöhten Stromverbrauch zum Ausdruck kommt. Bezüglich Landnutzung kommen beide Studien auf vergleichbare Werte, was darauf hinweist, dass das ecoinvent-Inventar «gravel round, at mine» die Landnutzung tendenziell überschätzt.

Für die Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung haben Jeske et al. (2004) Kennwerte für drei Aufbereitungsanlagen in Deutschland für das Treibhauspotenzial und den kumulierten Energieaufwand veröffentlicht. Demnach liegt der kumulierte Energieaufwand pro

Kieswerk	Stromverbrauch [kWh/Tonne]	Dieselverbrauch [MJ/Tonne]	Landnutzung [m <sup>2</sup> /Tonne]
Aigle	2,87	9,37	0,55
Brunnen	4,83	15,40	0,38
Mülligen	2,58	7,61	0,52
Oberdorf	3,29	30,81	0,62
La Sarraz	4,10	20,40	0,31
Bière	3,26	18,30	0,09
Brettonnières	2,19	11,40	0,13

**Abb. 4.10**  
Vergleich ausgewählter Sachbilanzdaten (jeweils pro Tonne produzierter Gesteinskörnung) von sieben Kieswerken der Holcim (Schweiz) AG aus dieser Studie und aus Harbi et al. (2008)

Tonne Gesteinskörnung zwischen 34,5 MJ und 55 MJ-Äquivalent und das Treibhauspotenzial zwischen 2,2 kg und 3,7 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent. Diese Kenngrössen liegen in der gleichen Grössenordnung wie die in dieser Studie verwendeten Werte von 1,5 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent (stationäre Anlage) und 2,6 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent (mobile Anlage) bzw. 45 MJ-Äquivalent (mobile Anlage) und 64 MJ-Äquivalent (stationäre Anlage). Die Unterschiede bei der sta-

<sup>14</sup> Persönliche Kommunikation mit S.Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 20.3.2009.

## Ökobilanzen für Gesteinskörnungen

tionären Anlage sind wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass diese Anlage mit Strom aus dem Schweizer Strommix betrieben wird. Aus Jeske et al. (2004) geht nicht hervor, welcher Strommix der Studie zugrunde gelegt wurde. Da es sich um eine deutsche Studie handelt, ist jedoch wahrscheinlich, dass man hier vom westeuropäischen oder vom deutschen Stromverbund ausgeht.

### 4.5 Interpretation der Ergebnisse

Bezüglich Kiesabbau sind die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für die Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung (Beton- und Mischgranulat) deutlich tiefer als die Ergebnisse für die Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung.

In den Wirkungskategorien Energieressourcen, Treibhauseffekt, Versauerung und Atemwegserkrankungen sind die Ergebnisse für die Herstellung von Mischgranulat ebenfalls deutlich tiefer, da nur 30% der Wirkungen des Prozesses der Mischabbruchaufbereitung betrachtet werden (infolge der wertproportionalen Allokation). Bei der Herstellung von Betongranulat ist unsicher, ob die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung tatsächlich signifikant unter dem Niveau der Ergebnisse für die Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung liegen. Diese Unsicherheit ist darauf zurückzuführen, dass die Qualität der Daten zur Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung nur mittel bis gering ist und die Inventardaten dieses Prozesses in dieser Studie tendenziell unterschätzt werden. Gleichzeitig schwanken die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für die Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung stark in Abhängigkeit der Abbaufverfahren. Wir kommen daher zum Schluss, dass die Herstellung von Betongranulat in den Wirkungskategorien Energieressourcen, Treibhauseffekt, Versauerung und Atemwegserkrankungen vergleichbare Werte aufweist wie die Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung.

In der Wirkungskategorie des «Ökosystem-Schadenspotenzials durch Landnutzung» weist die Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung tendenziell tiefere Werte auf als die Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung.

Insgesamt zeigt sich, dass die Annahme der wertproportionalen Allokation zwar einen deutlichen Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanz von Gesteinskörnungen hat (siehe oben), aber die grundsätzliche Aussage im Vergleich zwischen natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung nicht verändert – im Sinne eines «Kippens» des Ergebnisses. Der Prozess der Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung führt für alle Wirkungskategorien – mit Ausnahme der Energieressourcen – zu gleich grossen oder geringeren Wirkungen als die Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung – sogar wenn 100% der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für den Prozess der Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung betrachtet werden. Für Energieressourcen liegen die Ergebnisse auch bei der Einbezug von 100% der Werte in der Bandbreite der Werte der Kieswerke der Holcim (Schweiz) AG (vgl. Abb. 4.9).

Angesichts der grossen Spannweite in den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung für die Herstellung der natürlichen Gesteinskörnung ist es im Rahmen dieser Untersuchung nicht möglich, einen Inventardatensatz für einen repräsentativen Prozess der Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung in der Schweiz herzuleiten. Es wird daher in allen folgenden Ökobilanzen in dieser Untersuchung davon ausgegangen, dass der Datensatz der ecoinvent-Datenbank am ehesten geeignet ist, ein repräsentatives Kieswerk in der Schweiz zu beschreiben. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss allerdings berücksichtigt werden, dass dieser Inventardatensatz deutlich höhere Werte für die Landinanspruchnahme und den Brauchwasserverbrauch aufweist als alle anderen hier untersuchten Kieswerke. Diese Abweichung für die Landinanspruchnahme konnte auch durch einen Vergleich mit den Ergebnissen von Harbi et al. (2008) bestätigt werden. Wir nehmen daher an, dass durch die Verwendung des ecoinvent-Datensatz zur Beschreibung der Herstellung natürlicher Gesteinskörnung die Ergebnisse in der Wirkungskategorie «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung» tendenziell um den Faktor 3 bis 4 überschätzt werden. Wir empfehlen, dieser Frage in weiteren Untersuchungen vertieft nachzugehen, um einen Inventardatensatz für ein repräsentatives Schweizer Kieswerk zu entwickeln.

# 5 Ökobilanzen für ausgewählte Betone

## 5.1 Festlegen des Ziels der Untersuchung und Untersuchungsrahmen

In diesen Ökobilanzen wird für zwei unterschiedliche Betone verglichen, wie der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung die Umweltbelastungen in der Prozesskette der Betonherstellung verändert. Dabei werden zwei Betone ausgewählt, die sich hinsichtlich ihrer Eigenschaften stark unterscheiden. Einerseits wird ein Konstruktionsbeton NPK C aus dem Normpositionskatalog betrachtet (gemäss SN EN 206-1:2000 mit definierter Druckfestigkeitsklasse C30/37)<sup>15</sup>, an den in der Anwendung relativ hohe Anforderungen gestellt werden, und

andererseits ein Magerbeton, an den keine besonderen Anforderungen in der Anwendung gestellt werden. Diese beiden Betone werden ausgewählt, weil sie sich deutlich in ihren Zusammensetzungen unterscheiden und ihre exemplarische Betrachtung einen ersten Eindruck über mögliche Variationen bei den Ergebnissen der ökologischen Bewertung von Betonen gibt. Ausserdem werden beide Betone in der Schweiz in grossen Mengen verwendet.

Diese Betone variieren in Bezug auf die Betonzusammensetzungen, insbesondere die Zementmenge: NPK-C-Betone beinhalten am meisten Zement – Magerbetone am wenigsten. Wir gehen in dieser Untersuchung von

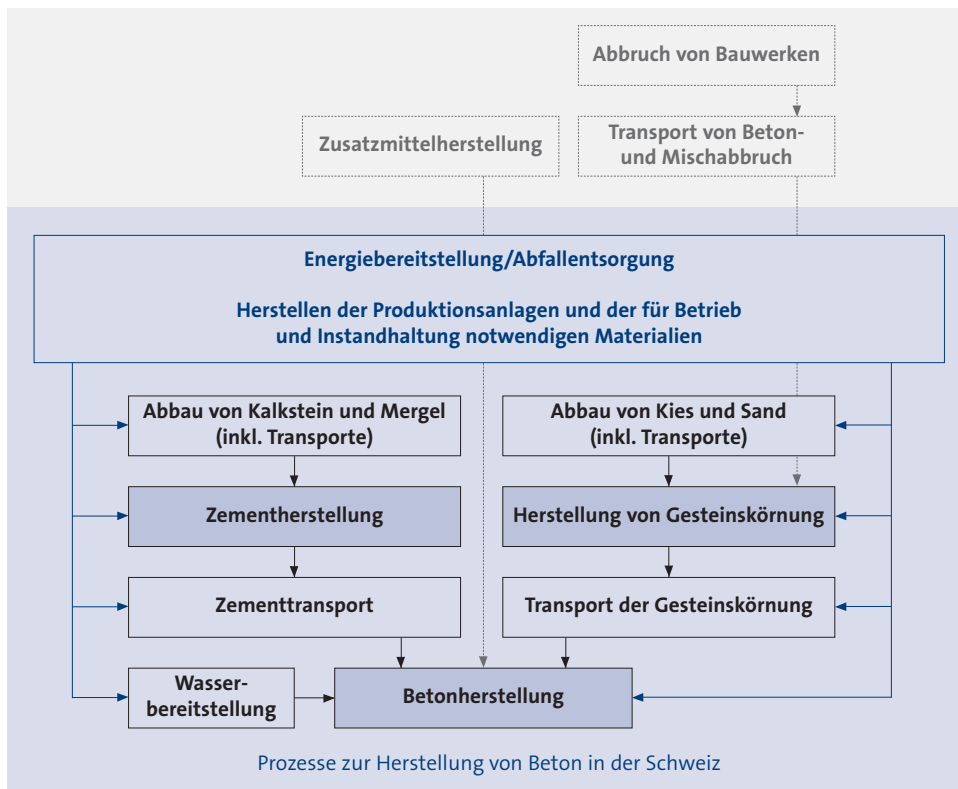


Abb. 5.1 Übersicht über das System zur Analyse der Umweltbelastungen aus der Herstellung von Beton

<sup>15</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 2.7.2009.

## Ökobilanzen für ausgewählte Betone

der Hypothese aus, dass sich die anderen Betone der Normpositionsklassen A und B auch in Bezug auf die Ergebnisse der ökologischen Bewertung zwischen den beiden Extrempositionen – NPK C und Magerbeton – positionieren. Es ist jedoch nicht Ziel dieser Untersuchung, diese Hypothese zu bestätigen oder zu verwerfen. Vielmehr werden zwei Betone exemplarisch betrachtet, um erste Anhaltspunkte über die ökologische Bewertung von Betonen zu gewinnen. Die Resultate der Untersuchung beziehen sich jedoch explizit nur auf die betrachteten Betone.

### 5.1.1 Funktionale Einheit

Im Rahmen dieser Ökobilanz werden einerseits Konstruktionsbetone und andererseits Magerbetone verglichen. Da die Funktionen dieser beiden Betone in Bauwerken verschieden sind, ist es nicht sinnvoll, die Ökobilanzen dieser beiden Betone direkt zu vergleichen. Für Konstruktionsbetone ist ein solcher Vergleich nur zulässig innerhalb einzelner NPK-Betonsorten gemäss SN EN 206-1:2000. In der Ökobilanz für Konstruktionsbetone wird 1 m<sup>3</sup> Beton der Betonsorte NPK C (Druckfestigkeitsklasse C30/37) als funktionale Einheit gewählt. Seine Eigenschaften sind charakterisiert durch die Druckfestigkeitsklasse, die Expositionsklasse, das Grösstkorn, die Konsistenzklasse, die Chloridgehaltsklasse und die Anwendung. Dieser Beton kann zu unterschiedlichen Zwecken eingesetzt werden – beispielsweise für Decken, Wände oder direkt bewitterte Aussenbauteile im Hochbau. Über die genaue Funktion dieses Betons im konkreten Bauwerk kann keine Aussage gemacht werden, da seine Verwendung nicht mehr Teil des betrachteten Systems ist. Für die Interpretation der Ergebnisse dieser Ökobilanz wird jedoch angenommen, dass es keine Unterschiede in den Verwendungsmöglichkeiten der beiden betrachteten Betone gibt. Diese Annahme wird in Kapitel 5.4 diskutiert.

Magerbeton wird eingesetzt, wo keine besonderen Anforderungen an den Beton bestehen, wie z. B. bei Schutzwänden während der Bauphase, für Dichtungsschichten

oder für Anwendungen ohne grosse Belastung und ohne Wetterexposition. Für Magerbetone gibt es keine Schweizer Norm. Anforderungen werden im Normpositionenkatalog für den Mindestzementgehalt in Höhe von 150 kg/m<sup>3</sup> definiert. Für diese Studie wurden von Experten der Holcim (Schweiz) AG alternative Betonzusammensetzungen zur Verfügung gestellt<sup>16</sup>, die einen Magerbeton mit vergleichbaren Eigenschaften charakterisieren. In der Ökobilanz für Magerbetone wird 1 m<sup>3</sup> dieses Magerbetons als funktionale Einheit gewählt.

### 5.1.2 Systemdefinition

In diesem System wird die Prozesskette der Herstellung von Betonen von der Gewinnung der dazu notwendigen Rohstoffe bis zum Ende des eigentlichen Prozesses der Betonherstellung in einem Transportbetonwerk betrachtet («from cradle to gate»). Das betrachtete System der Herstellung von Betonen umfasst die Zementherstellung einschliesslich des Abbaus der dazu notwendigen mineralischen Rohstoffe (inkl. der Transporte zwischen dem Steinbruch und dem Zementwerk) und den Transport des Zements vom Ort der Zementherstellung zum Ort der Betonherstellung. Dieser Transport erfolgt mit der Bahn oder dem LKW.

Weiter umfasst das System die Herstellung von Gesteinskörnung, wobei hier zwischen zwei alternativen Verfahren unterschieden wird. Einerseits wird Gesteinskörnung durch die Aufbereitung von Kies und Sand aus unterschiedlichen natürlichen Quellen wie Kiesgruben, Steinbrüchen oder Seen hergestellt. Das Produkt dieses Herstellungsverfahrens wird als natürliche Gesteinskörnung bezeichnet. Im betrachteten System werden sowohl der Abbau von Kies und Sand (einschliesslich der Transporte zwischen dem Abbauort und dem Ort der Herstellung der Gesteinskörnung) als auch der Prozess der Herstellung der Gesteinskörnung bilanziert. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass zur Produktion der betrachteten Betone ausschliesslich Rundkies eingesetzt wird<sup>17</sup>. Gemäss Künniger et al. (2001) besteht die gesamte Kiesherstellung der Schweiz zu 85% aus Rundkies und zu

<sup>16</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 2.7.2009.

<sup>17</sup> Diese vereinfachende Annahme beschreibt für die Rundkiesproduktion D ≥ 4 mm die gängige Praxis der Holcim (Schweiz) AG. Für die Rundsandproduktion D < 4 mm hingegen wird häufig auch gebrochenes Material verwendet. Quelle: persönliche Kommunikation, S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 24.11.2009.

## Ökobilanzen für ausgewählte Betone

15% aus gebrochener Gesteinskörnung. Der Prozess des Brechens führt dabei in diesem Prozess zu massgeblichen Umweltbelastungen. Daher werden die Umweltbelastungen der Herstellung von Beton aus natürlicher Gesteinskörnung durch die Annahme, es werde dafür nur Rundkies eingesetzt, tendenziell unterschätzt. Mit Hilfe einer Parametervariation wird die Relevanz dieser Annahme für die Ergebnisse der Ökobilanz diskutiert (siehe Kapitel 5.4.1).

Alternativ wird Gesteinskörnung für die Betonproduktion durch die Aufbereitung von Betonabbruch und Mischabbruch hergestellt. Das Produkt dieses Herstellungsverfahrens wird als rezyklierte Gesteinskörnung bezeichnet. Im hier betrachteten System wird lediglich die Herstellung von Gesteinskörnung aus Beton- und Mischabbruch bilanziert. Der Abbruch der Bauwerke und der Transport von Beton- und Mischabbruch zwischen der Baustelle und dem Ort der Herstellung von Gesteinskörnung werden hingegen vernachlässigt (siehe dazu Kapitel 3.3).

Der nächste Prozess im System ist der Transport zwischen dem Ort der Herstellung von Gesteinskörnung und dem Ort der Betonherstellung. Dieser Transport erfolgt in der Schweiz mit der Bahn, mit dem LKW oder mit dem Schiff.

Im Prozess der Betonherstellung wird in der vorliegenden Studie ausschliesslich die Produktion von Transportbeton betrachtet. Dabei wird Beton aus Gesteinskörnung, Zement, Wasser und Zusatzmitteln hergestellt. Im betrachteten System wird die Bereitstellung des Wassers mitberücksichtigt. Vernachlässigt wird hingegen die Herstellung der Zusatzmittel. Diese Vereinfachung wird gewählt, weil in der ecoinvent-Datenbank keine Inventare für die Herstellung von Zusatzmitteln vorhanden sind. Künniger et al. (2001) gelingt eine grobe Abschätzung der Umweltbelastungen aus der Herstellung von Zusatzmitteln durch eine Kombination verschiedener Inventardatensätze. Dazu sind jedoch Informationen über die Zusammensetzung der Zusatzmittel notwendig, die im Rahmen der vorliegenden Studie nicht verfügbar waren. Ausserdem zeigt die Analyse von Künniger et al. (2001),

Bezeichnung	Zement	Gesteinskörnung
C30/37	303 kg (CEM II/A-LL)	natürlich: 1999 kg
RC-Beton C30/37	320 kg (CEM II/A-LL)	natürlich: 1397 kg Betongranulat: 465 kg

**Abb. 5.2**  
Zusammensetzung der untersuchten Konstruktionsbetone pro m<sup>3</sup> Beton

dass der Beitrag der Herstellung von Zusatzmitteln an den Gesamtbelastungen der untersuchten Betone je nach Wirkungskategorie zwischen 0% und 7% liegt. Damit gehen wir davon aus, dass wir durch diese Vereinfachung des Systems keine wesentlichen Umweltbelastungen vernachlässigen. Die Sensitivität dieser Annahme im Kontext der vorliegenden Studie wird in Kapitel 5.4 diskutiert.

Es wird angenommen, dass alle in den vorhergehenden Abschnitten genannten Prozesse in der Schweiz stattfinden.

Weiter werden aber Prozesse bzw. ganze Prozessketten mitbilanziert, die für die bereits genannten Prozesse Energie und Entsorgungsleistungen bereitstellen bzw. zum Herstellen der Produktionsanlagen und der für Betrieb und Instandhaltung notwendigen Materialien dienen. Diese Prozesse finden teilweise in der Schweiz und teilweise in anderen Ländern statt. Der betrachtete Zeitraum variiert ebenfalls, da insbesondere die Prozesse zum Herstellen der Produktionsanlagen und Infrastrukturen bis zu mehrere Jahrzehnte zurückliegen können. Die genauen Informationen zum zeitlichen und räumlichen Bezug sind in den jeweiligen Datensätzen in der ecoinvent-Datenbank dokumentiert.

### 5.1.3 Datengrundlagen und Datenqualität

Die Daten der in Abb. 5.2 und 5.3 dargestellten Betonzusammensetzungen stammen von der Holcim (Schweiz) AG<sup>18</sup>. Der Anteil an Betongranulat im RC-Beton C30/37 wurde so gewählt, dass dieser Beton der Definition von Recyclingbeton gemäss SN EN 206-1 (nationaler Anhang NA, Ziffer 3.1.50) entspricht. Der Mindestgehalt an Be-

<sup>18</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 2.7.2009.

## Ökobilanzen für ausgewählte Betone

Bezeichnung	Zement	Gesteinskörnung
Magerbeton 100% RC	200 kg (CEM II/A LL)	Mischgranulat: 1587 kg
Magerbeton	200 kg (CEM II/A LL)	natürlich: 1895 kg
Magerbeton 15% RC	200 kg (CEM II/A LL)	natürlich: 1605 kg Mischgranulat: 242 kg

**Abb. 5.3**  
Zusammensetzung der untersuchten Magerbetone pro m<sup>3</sup> Beton

tongranulat beträgt 25 Massen-Prozent. In Kapitel 5.4 wird in einer Parametervariation untersucht, wie sich eine Erhöhung dieses Anteils auf die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung auswirkt.

Gemäss der gewählten Betonzusammensetzung wird für den Beton mit Betongranulat mehr Zement eingesetzt als für den Beton aus ausschliesslich natürlicher Gesteinskörnung. Diese Annahme wird damit begründet, dass man aufgrund des höheren Hohlraumgehalts des Beton-

granulats einen erhöhten Bindemittelleimgehalt benötigt, um eine gute Verarbeitbarkeit zu erreichen. Diese erhöhten Zementgehalte bei Beton mit Betongranulat bestätigen sich auch aus der Auswertung von mehr als hundert untersuchten Recyclingbetonen der Holcim (Schweiz) AG<sup>19</sup>. Weitere Hinweise auf diesen Zusammenhang geben Hoffman und Huth (2006), Hoffmann und Jacobs (2007) und Hoffmann und Leemann (2009). Als Zementart wird in beiden Betonzusammensetzungen Portlandkalksteinzement (CEM II/A-LL) gewählt, da diese

Prozesse	Datengrundlage	Annahmen	Datenqualität
Zementherstellung, Abbau von Kalkstein und Mergel sowie Transporte zwischen Steinbruch und Zementwerk	Ecoinvent-Inventar «portland calcareous cement, at plant» (Kellenberger et al. 2003)		Gut <sup>20</sup>
Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung, Abbau von Kies und Sand sowie Transporte zwischen Abbauort und Ort der Herstellung der Gesteinskörnung	Ecoinvent-Inventar «gravel, round, at mine» (Kellenberger et al. 2003)	Es wird angenommen, dass ausschliesslich Rundkies eingesetzt wird.	Mittel <sup>21</sup>
Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung	Ecoinvent-Inventar «disposal, building, concrete gravel, to sorting plant» (Doka 2000)	Siehe Kapitel 3.3	Mittel bis gering <sup>22</sup>
Betonherstellung	Ecoinvent-Inventar «concretes normal, at plant» (Kellenberger et al. 2003)	Die Herstellung von Zusatzmitteln wird vernachlässigt.	Gut <sup>23</sup>
Transporte von Zement und Gesteinskörnung zur Betonherstellung.	Ecoinvent-Inventare «transport, freight, rail» und «transport, lorry > 16t», «transport, barge» (Spielmann et al. 2004)	Siehe Kapitel 5.1.4	Gut (gemäss Beurteilung in der ecoinvent-Datenbank)

**Abb. 5.4**  
Übersicht über die verwendeten Datengrundlagen für die Inventardaten

<sup>19</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 24.11.2009.

<sup>20</sup> Persönliche Kommunikation mit T. Künniger, Empa, 2.4.2009.

<sup>21</sup> Persönliche Kommunikation mit T. Künniger, Empa, 2.4.2009.

<sup>22</sup> Persönliche Kommunikation mit G. Doka, Doka Ökobilanzen, 17.3.2009.

<sup>23</sup> Persönliche Kommunikation mit T. Künniger, Empa, 2.4.2009.

Zementart in der Schweiz sehr verbreitet ist (relativer Marktanteil 2008 von 62 %).

Aus den Angaben in den Abb. 5.2 und 5.3 wird deutlich, dass sich die Betone hinsichtlich ihrer Dichte unterscheiden: Der Beton C30/37, der ausschliesslich aus natürlicher Gesteinskörnung hergestellt wird, ist 100 kg pro m<sup>3</sup> schwerer als der Beton C30/37, der aus einer Kombination aus natürlicher Gesteinskörnung und Betongranulat hergestellt wird (im folgenden als «RC-Beton C30/37» bezeichnet). Dies ergibt sich u.a. aus dem Unterschied in den Rohdichten von natürlicher Gesteinskörnung und Betongranulat, der bis zu 10% betragen kann <sup>24</sup>.

Beton, der ausschliesslich aus Mischgranulat hergestellt wird (im Folgenden bezeichnet als «Magerbeton 100% RC»), ist 300 kg pro m<sup>3</sup> leichter als ein vergleichbarer Magerbeton aus natürlicher Gesteinskörnung (im Folgenden bezeichnet als «Magerbeton») und ein vergleichbarer Magerbeton aus einer Kombination aus natürlicher Gesteinskörnung und Mischgranulat (im Folgenden bezeichnet als «Magerbeton 15% RC»). Auch hier erklären die Unterschiede in den Rohdichten von natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung diese Variationen.

Abb. 5.4 gibt einen Überblick über die Datengrundlagen der verwendeten Inventardatensätze. Aus den in Kapitel 4.5 beschriebenen Überlegungen wird für natürliche Gesteinskörnung auf die Verwendung der Daten der Holcim (Schweiz) AG verzichtet.

Für die Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung wird eine Modellierung eines stationären Brechers verwendet, da der in Kapitel 4 bilanzierte mobile Brecher nicht zur Herstellung von Betongranulat geeignet ist (nach Angaben des Betreibers <sup>25</sup>) und wir vereinfachend für Konstruktions- und Magerbeton die gleichen Datengrundlagen verwenden wollten.

### 5.1.4 Methodische Festlegungen

Es werden die generellen methodischen Festlegungen gemäss Kapitel 3.3 übernommen. Ausserdem wird ver-

einfachend angenommen, dass es bei beiden jeweils verglichenen Betonen keine Unterschiede gibt in den Transporten vom Ort der Zementherstellung zum Ort der Betonherstellung sowie vom Ort der Herstellung von Gesteinskörnung (rezykliert oder natürlich) zum Ort der Betonherstellung hinsichtlich der Transportdistanzen und der Transportmittel. Dies bedeutet mit anderen Worten:

- Wir vernachlässigen, dass für die Herstellung von 1 m<sup>3</sup> RC-Beton C30/37 17 kg Zement mehr transportiert werden müssen als für die Herstellung von 1 m<sup>3</sup> Beton C30/37.
- Wir nehmen an, dass die Transporte zwischen den Orten der Herstellung von natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung gleich sind hinsichtlich der Transportdistanzen und der Transportmittel.
- Wir vernachlässigen die Auswirkungen der Unterschiede in den Rohdichten von natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung (bis zu 10%) auf die Transporte und die Unterschiede in den Betonzusammensetzungen in Bezug auf die Mengen der eingesetzten Gesteinskörnung (bis zu 20%). Die Rohdichte von natürlicher Gesteinskörnung ist grösser als die Rohdichte von rezyklierter Gesteinskörnung. Damit wird für die Herstellung von 1 m<sup>3</sup> RC-Beton weniger Gesteinskörnung benötigt und es muss entsprechend weniger Gesteinskörnung transportiert werden.

Wir begründen diese Vereinfachung damit, dass einerseits im Rahmen dieser Studie keine genauen Informationen über die möglichen Standorte zur Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung vorliegen und andererseits in zwei anderen Ökobilanzen im Rahmen dieser Studie genauer auf die Auswirkungen der Transporte eingegangen wird (siehe Kapitel 6 und 7). Die Relevanz dieser Annahme für die Ergebnisse der Ökobilanz wird in Kapitel 5.4 diskutiert.

<sup>24</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 2.7.2009.

<sup>25</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 23.4.2009.

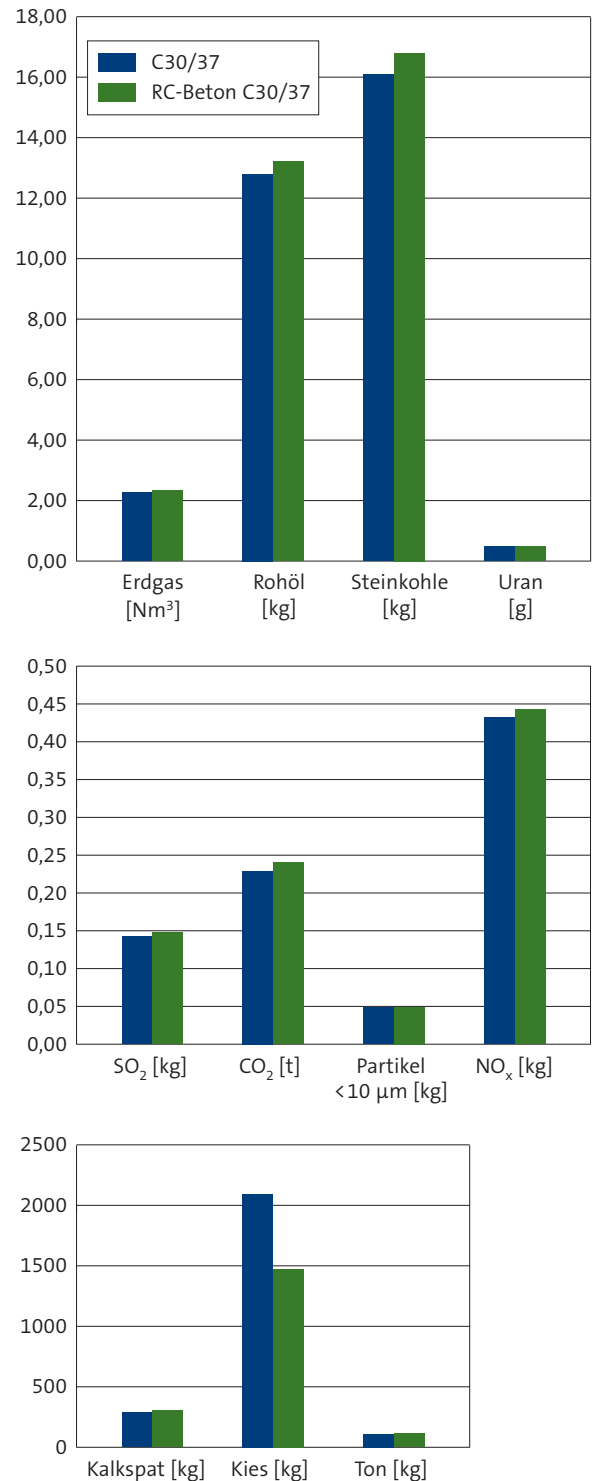
## 5.2 Ausgewählte Ergebnisse der Sachbilanz

In den Sachbilanzen der beiden Betone werden theoretisch alle Emissionen und Ressourcenverbräuche bilanziert, die von dem in Abb. 5.1 dargestellten System an die Umwelt abgegeben werden bzw. aus ihr entnommen werden. Tatsächlich werden in der vorliegenden Studie nur jene Emissionen und Ressourcenverbräuche abgebildet, für die die ecoinvent-Datenbank Daten bereitstellt. Dies sind je nach Datensatz mehrere hundert verschiedene Emissionen und Ressourcenverbräuche. Aus dieser Fülle von Informationen werden im vorliegenden Bericht nur einzelne Ergebnisse ausgewählt. Dies sind einerseits Emissionen in die Luft, die aus der Verbrennung von fossilen Brenn- und Treibstoffen entstehen. Andererseits sind es Verbräuche von mineralischen Ressourcen sowie energetisch genutzten Ressourcen.

### 5.2.1 Konstruktionsbetone

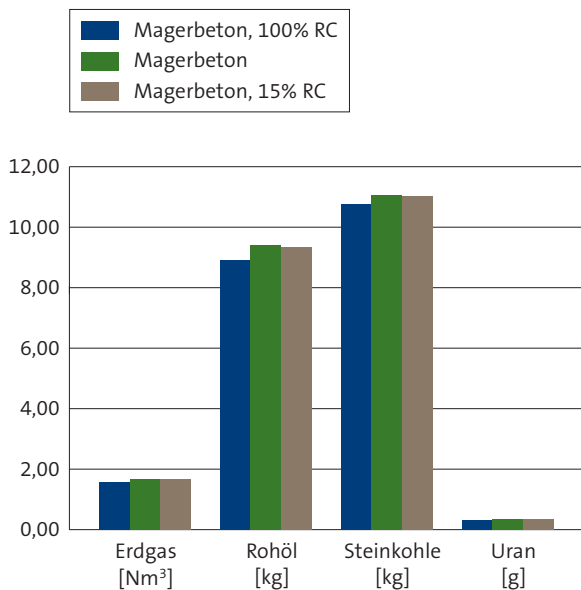
Die überwiegende Menge Luftemissionen aus der Herstellung von Konstruktionsbetonen besteht aus Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Diese Emissionen entstehen vor allem bei der Zementherstellung durch die Verbrennung von Brennstoffen im Zementofen und durch das Kalzinieren des Klinkers. Ausserdem entsteht Kohlendioxid durch das Verbrennen von Treibstoffen in den Baumaschinen bei der Herstellung der Gesteinskörnung und in Transportfahrzeugen zum Transport von Zement und Gesteinskörnung. Diese Mengen sind aber gesamthaft eine Grössenordnung kleiner als die Kohlendioxidemissionen aus der Zementherstellung. Ähnlich stellt sich die Situation auch bei den Emissionen von Schwefeldioxid und Stickoxiden dar: Auch hier dominiert die Zementherstellung. Allerdings ist hier nur die Verbrennung von Brennstoffen im Zementofen massgeblich. Bei den Partikelemmissionen hingegen ist die Zementherstellung deutlich weniger dominant. Hier sind auch die Transporte wichtige Verursacher. Werden die beiden untersuchten Konstruktionsbetone C30/37 und RC-Beton C30/37 vergleichend betrachtet, zeigen sich nahezu keine Unterschiede. Die Prozesskette der Herstellung von C30/37 führt zu geringfügig tieferen Emissionen, da hier weniger Zement eingesetzt wird (siehe Abb. 5.2).

Bei den energetisch genutzten Ressourcen dominiert die Zementherstellung mit ihrem Verbrauch an Steinkohle



**Abb. 5.5**  
**Energetischer Ressourcenverbrauch, Luftemissionen und Verbrauch mineralischer Ressourcen bei der Herstellung von C30/37 und RC-Beton C30/37**  
 Auf der y-Achse sind die Mengen pro Kubikmeter Beton in den jeweiligen Masseinheiten dargestellt.



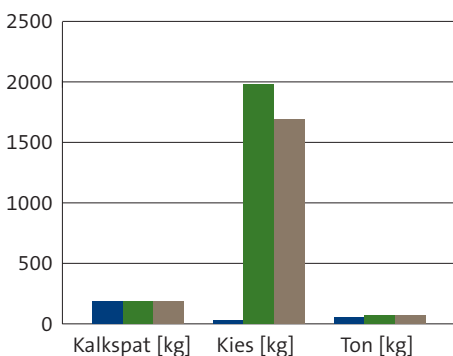
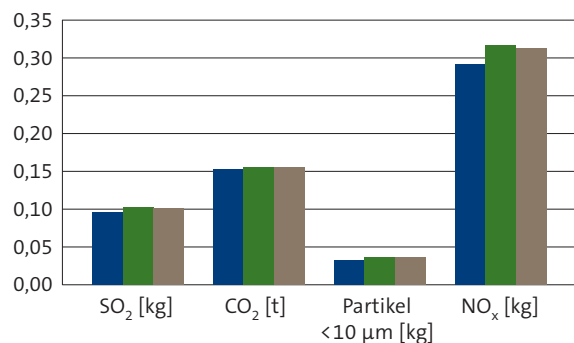


und Schweröl, gefolgt von den Transporten. Im Vergleich zum Verbrauch an fossilen Brenn- und Treibstoffen ist der Stromverbrauch des Systems gering. Auch für die energetisch genutzten Ressourcen zeigt eine vergleichende Betrachtung der beiden untersuchten Konstruktionsbetone nahezu keine Unterschiede. Die Prozesskette der Herstellung von C30/37 führt zu geringfügig tieferen Emissionen, da hier weniger Zement eingesetzt wird (siehe Abb. 5.2).

Beim Vergleich ausgewählter mineralischer Rohstoffe weist RC-Beton C30/37 einen geringeren Kiesverbrauch auf. Die Verbrauchsmengen von Ton und Kalkspat (in der Zementproduktion) unterscheiden sich hingegen nur geringfügig.

### 5.2.2 Magerbetone

Der Vergleich der betrachteten Luftemissionen aus dem System der Herstellung von Magerbetonen zeigt ein sehr ähnliches Bild wie die Luftemissionen aus der Herstellung von Konstruktionsbetonen. Interessant ist hier jedoch, dass alle drei untersuchten Betone die gleiche Zementmenge enthalten. Da die Emissionen/Ressourcenverbräuche aus den massgeblichen Transporten ebenfalls konstant gehalten werden (siehe Kapitel 6.1.3) ergeben sich die Unterschiede zwischen den drei Betonen nur aus den Varianten zur Herstellung von Gesteinskörnungen. Hier zeigen sich insgesamt wenige Unterschiede. Am stärksten variieren die Stickoxidemissionen in Abhängigkeit der eingesetzten Menge an rezyklierter Gesteinskörnung.



**Abb. 5.6**  
**Ressourcenverbrauch, Luftemissionen und Verbrauch mineralischer Ressourcen bei der Herstellung von Magerbetonen**  
 Gemäss den Betonzusammensetzungen in Abb. 5.3. Auf der y-Achse die Mengen pro Kubikmeter Beton in den jeweiligen Masseinheiten.

Der Vergleich der Verbräuche von energetisch genutzten Ressourcen zeigt ein ähnliches Bild. Je mehr rezyklierte Gesteinskörnung eingesetzt wird, desto geringer ist der Ressourcenverbrauch. Die Unterschiede sind jedoch klein. Beim Vergleich der Verbräuche von mineralischen Rohstoffen zeigt sich hingegen für «Magerbeton 100% RC» ein deutlich geringerer Kiesverbrauch. Der Verbrauch von Ton und Kalkspat (in der Zementproduktion) bleibt dagegen konstant.

### 5.3 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

In den beiden nachfolgenden Kapiteln für Konstruktions- bzw. Magerbetone werden die analysierten Betone in den Wirkungskategorien jeweils relativ zueinander (normiert auf die Werte der Wirkungskategorien des Betons

ohne rezyklierte Gesteinskörnung) verglichen und anschliessend die Ergebnisse zusammenfassend tabellarisch dargestellt (ohne Normierung).

#### 5.3.1 Konstruktionsbetone

Die Wirkungsabschätzung der beiden Konstruktionsbetone C30/37 und RC-Beton C 30/37 zeigt nur sehr geringe

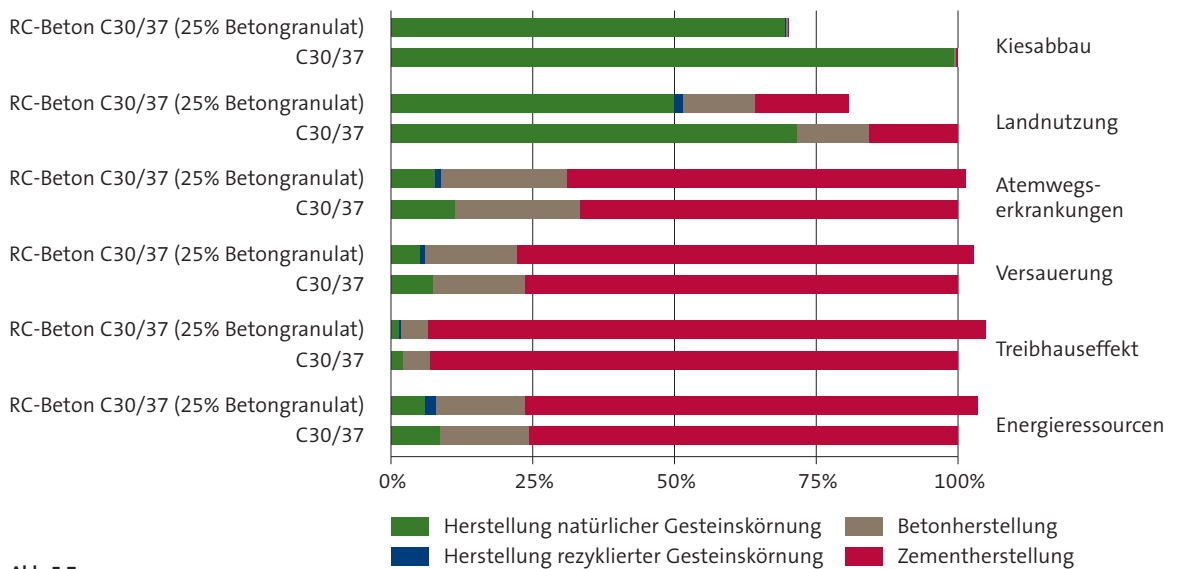


Abb. 5.7

#### Wirkungsabschätzung für Konstruktionsbetone

Wirkungsabschätzung für die Herstellung von Konstruktionsbetonen C30/37 und RC-Beton C30/37, gemäss den in Abb. 5.2 dargestellten Betonzusammensetzungen, nach Wirkungskategorien und ausgewählten Prozessen. Die Ergebnisse von RC-Beton C30/37 sind in Relation zu den jeweiligen Ergebnissen von C30/37 (= 100%) gesetzt.

Wirkungskategorie	Wirkungsindikator	Varianten	Herstellung natürlicher Gesteinskör.	Herstellung rezyklierter Gesteinskör.	Betonherstellung	Zementherstellung	Summe
Treibhauseffekt	CO <sub>2</sub> -Äquivalent [kg]	C30/37	4,92	–	11,39	217,84	234,15
		RC-Beton C30/37	3,44	0,62	11,39	230,07	245,51
Versauerung	SO <sub>2</sub> -Äquivalent [kg]	C30/37	0,03	–	0,07	0,31	0,40
		RC-Beton C30/37	0,02	< 0,01	0,07	0,32	0,41
Atemwegserkrankungen	Partikel < 10 µm [kg]	C30/37	0,01	–	0,01	0,03	0,05
		RC-Beton C30/37	< 0,01	< 0,01	0,01	0,03	0,05
Energieressourcen	CED [MJ-Äquivalent]	C30/37	117,33	–	215,20	1025,35	1357,88
		RC-Beton C30/37	82,01	25,48	215,16	1082,89	1405,54
Ökosystem-Schadenspot. durch Landnutz.	Siedlungsfl.-Äquiv. [m <sup>2</sup> ·Nutzungsjahre]	C30/37	7,44	–	1,34	1,62	10,40
		RC-Beton C30/37	5,20	0,15	1,34	1,71	8,40
Kiesabbau	Kies [kg]	C30/37	2080,24	–	7,24	6,06	2093,54
		RC-Beton C30/37	1454,03	4,31	7,22	6,40	1471,96

Abb. 5.8

#### Wirkungsabschätzung für Konstruktionsbetone, pro m<sup>3</sup> Beton

Wirkungsabschätzung für das in Abb. 5.1 definierte System der Herstellung von Konstruktionsbetonen C30/37 und RC-Beton C30/37, gemäss den in Abb. 5.2 dargestellten Betonzusammensetzungen, unterschieden nach Wirkungskategorien und ausgewählten Prozessen.

## Ökobilanzen für ausgewählte Betone

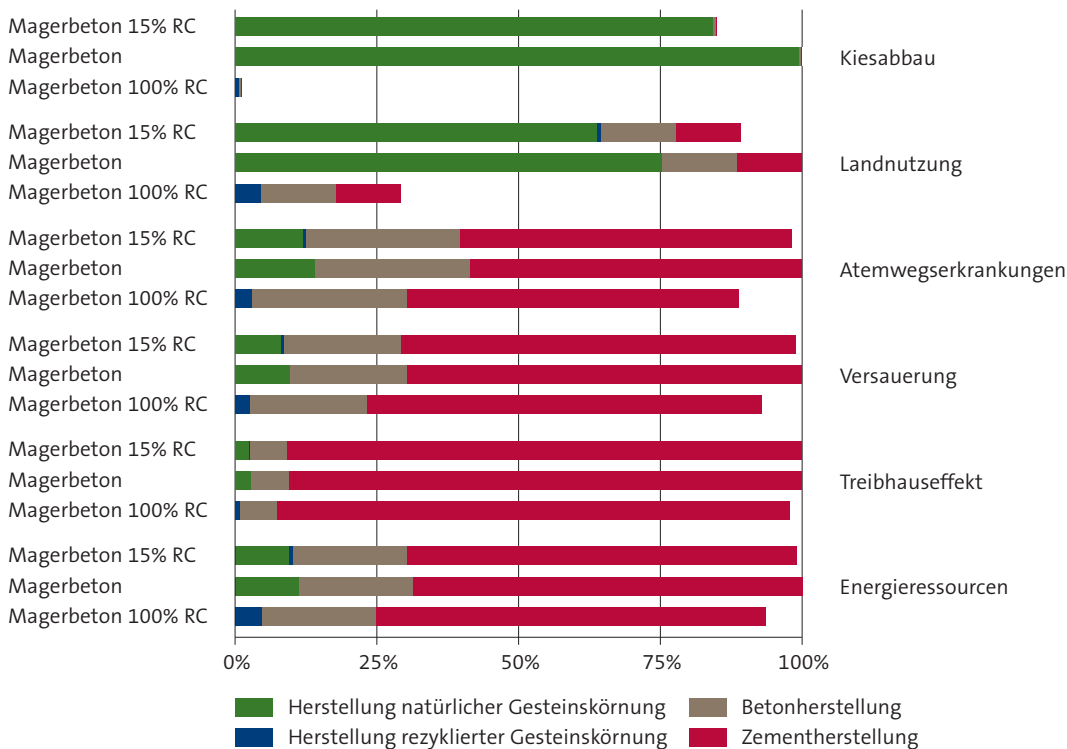


Abb. 5.9

### Wirkungsabschätzung für Magerbetone

Wirkungsabschätzung für die Herstellung von Magerbetonen gemäss den in Abb. 5.3 dargestellten Betonzusammensetzungen, unterschieden nach Wirkungskategorien und ausgewählten Prozessen. Die Ergebnisse für die beiden Magerbetone mit rezyklierter Gesteinskörnung sind in Relation gesetzt zu den jeweiligen Ergebnissen für die Herstellung von Magerbeton mit ausschliesslich natürlicher Gesteinskörnung (= 100%).

Unterschiede bei Energieressourcen, Treibhauseffekt, Versauerung, Atemwegserkrankungen und Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung (abgekürzt als «Landnutzung»). Tendenziell weist RC-Beton C30/37 leicht höhere Werte auf für alle Wirkungskategorien, die in Zusammenhang mit Emissionen in die Luft stehen, was auf die höhere Zementmenge in der Betonzusammensetzung zurückzuführen ist (siehe Abb. 5.2). Beim Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung weist der RC-Beton C30/37 tiefere Werte auf. Jedoch wird dieser Effekt tendenziell durch das Verwenden des ecoinvent-Datensatzes für die Bilanzierung der Herstellung der natürlichen Gesteinskörnung überschätzt (vgl. dazu Kap. 4.5). Beim Kiesabbau hingegen zeigen sich beim RC-Beton C30/37 deutlich geringere Werte, sodass dieser Unterschied als relevant eingestuft werden kann. Massgeblich ist hier die Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung.

### 5.3.2 Magerbetone

Im Vergleich der Wirkungsabschätzung der drei Magerbetone liegen die Unterschiede bei den Atemwegserkrankungen, der Versauerung, dem Treibhauseffekt

und den Energieressourcen zwischen 2% und 10%. Sie sind damit etwas grösser als die Unterschiede bei den Konstruktionsbetonen, aber insgesamt immer noch als gering einzustufen. Tendenziell weisen die Magerbetone umso tiefere Werte auf, je mehr rezyklierte Gesteinskörnung eingesetzt wird. Die Zementmenge bleibt in allen Betonen gleich.

Beim Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung weist Magerbeton mit rezyklierter Gesteinskörnung tiefere Werte auf. Jedoch wird dieser Effekt tendenziell durch das Verwenden des ecoinvent-Datensatzes für die Bilanzierung der Herstellung der natürlichen Gesteinskörnung überschätzt (vgl. dazu Kapitel 4.5). Bei Magerbeton mit 100% rezyklierter Gesteinskörnung ist die Reduktion der Werte jedoch beträchtlich, sodass der Unterschied in diesen Wirkungskategorie relevant ist.

Auch bei Kiesabbau zeigt Magerbeton mit rezyklierter Gesteinskörnung einen deutlich tieferen Wert. Der Unterschied zwischen Magerbeton 10% und den anderen Magerbetonen (15% RC und 100% RC) ist relevant.

## Ökobilanzen für ausgewählte Betone

Wirkungskategorie	Wirkungsindikator	Varianten	Herstellung	Herstellung	Beton-	Zement-	Summe
			natürlicher Gesteinskör.	rezyklierter Gesteinskör.			
Treibhauseffekt	CO <sub>2</sub> -Äquivalent [kg]	Magerbeton 100% RC	–	1,40	143,79	10,49	155,68
		Magerbeton	4,66	–	143,79	10,48	158,94
		Magerbeton 15% RC	3,95	0,21	143,79	10,48	158,43
Versauerung	SO <sub>2</sub> -Äquivalent [kg]	Magerbeton 100% RC	–	0,01	0,20	0,06	0,27
		Magerbeton	0,03	–	0,20	0,06	0,29
		Magerbeton 15% RC	0,02	< 0,01	0,20	0,06	0,29
Atemwegs- erkrankungen	Partikel < 10 µm [kg]	Magerbeton 100% RC	–	< 0,01	0,02	0,01	0,03
		Magerbeton	0,01	–	0,02	0,01	0,04
		Magerbeton 15% RC	< 0,01	< 0,01	0,02	0,01	0,03
Energieressourcen	CED [MJ-Äquivalent]	Magerbeton 100% RC	–	48,06	676,81	198,23	923,10
		Magerbeton	111,23	–	676,81	198,04	986,08
		Magerbeton 15% RC	94,21	7,33	676,81	197,96	976,29
Ökosystem- Schadenspotenzial durch Landnutzung	Siedlungsfl.-Äquiv. [m <sup>2</sup> ·Nutzungs- jahre]	Magerbeton 100% RC	–	0,43	1,07	1,23	2,73
		Magerbeton	7,06	–	1,07	1,23	9,36
		Magerbeton 15% RC	5,98	0,07	1,07	1,23	8,34
Kiesabbau	Kies [kg]	Magerbeton 100% RC	–	14,62	4,00	6,77	25,39
		Magerbeton	1971,94	–	4,00	6,75	1982,69
		Magerbeton 15% RC	1670,16	2,23	4,00	10,75	1687,14

Abb. 5.10

### Wirkungsabschätzung für Magerbetone, pro m<sup>3</sup> Beton

Wirkungsabschätzung für das in Abb. 5.1 definierte System der Herstellung von Magerbetonen gemäss den in Abb. 5.3 dargestellten Betonzusammensetzungen, unterschieden nach Wirkungskategorien und ausgewählten Prozessen des Systems bezogen auf die funktionale Einheit (= ein Kubikmeter Beton).

## 5.4 Sensitivitätsüberlegungen und Vergleich mit anderen Studien

Die im vorhergehenden Kapitel dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf Vergleiche im Rahmen der in Kapitel 5.1 beschriebenen Annahmen zu Systemdefinition, Wahl der funktionalen Einheiten und weiteren methodischen Festlegungen. In diesem Kapitel wird nun diskutiert, welchen Einfluss diese verschiedenen Annahmen auf die Ergebnisse haben. Dazu werden zunächst allgemeine Überlegungen zur Relevanz der Herstellung der Zusatzmittel in Betonen und zur funktionalen Äquivalenz der betrachteten Betone beschrieben. Anschliessend werden in Kapitel 5.4.1 ausgewählte Parameter variiert und die Relevanz dieser Variationen für die Wirkungsabschätzung

dargestellt. In Kapitel 5.4.2 werden die Ergebnisse dieser Untersuchung mit anderen Studien verglichen.

Im betrachteten System wird die Herstellung von Zusatzmitteln bei der Betonherstellung vernachlässigt (s. Abb. 5.1). Es stellt sich nun die Frage, ob durch diese Annahme ein Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung systematisch benachteiligt bzw. begünstigt wird und wie gross dieser Effekt allenfalls ist. Gemäss Angaben der Holcim (Schweiz) AG<sup>26</sup> kann man vereinfachend davon ausgehen, dass je nach Gehalt an rezyklierter Gesteinskörnung die eingesetzte Zementmenge und die damit korrelierende Menge an Zusatzmitteln ansteigt. Aufgrund des höheren Hohlraumgehaltes der rezyklierten Gesteinskörnung wird für einen Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung ein erhöhter Bindemittelleimgehalt benötigt, um eine gute Verar-

<sup>26</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 28.8.2009 und 24.11.2009.

beitbarkeit zu erreichen. Um gleichzeitig den Wasseranspruch zu verringern, werden Zusatzmittel zugemischt.

Das bedeutet, dass beim Vergleich der Konstruktionsbetone RC-Beton C30/37 durch das Vernachlässigen der Herstellung von Zusatzmitteln tendenziell begünstigt wird. Für die betrachteten Wirkungskategorien gehen wir jedoch davon aus, dass dieser Effekt gering ist. Gemäss Künniger et al. (2001) macht die Herstellung von Zusatzmitteln in der Prozesskette der Betonherstellung je nach Wirkungskategorie maximal 7% der Gesamtwirkung aus. Im Rahmen dieser Studie haben wir diesen Effekt für das von uns gewählte System für die Wirkungskategorien «Treibhauseffekt» und «Energieressourcen» abgeschätzt. Hier zeigt sich ein Effekt von maximal 4% (siehe Anhang J). Beim Vergleich der Magerbetone hat das Vernachlässigen der Herstellung von Zusatzmitteln keine Auswirkungen auf die Ergebnisse, da sich die Magerbetone hinsichtlich des Einsatzes von Zusatzmitteln nicht unterscheiden <sup>27</sup>.

Weiter gehen wir in dieser Studie davon aus, dass die gewählten funktionalen Einheiten jeweils Betone repräsentieren, die für die gleichen Anwendungen geeignet sind, d. h. funktional äquivalent sind. Diese Annahme ist für die Magerbetone sicherlich zulässig, da dieser Beton für Anwendungen eingesetzt wird, die keine besonderen Anforderungen an die Betonqualitäten stellen <sup>28</sup>. Im Falle von Konstruktionsbetonen ist diese Annahme jedoch kritischer zu betrachten, da man sich heute in Fachkreisen nicht einig ist, ob und unter welchen Bedingungen Konstruktionsbeton aus natürlicher Gesteinskörnung durch Konstruktionsbeton aus einem Gemisch aus natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung ersetzt werden kann (siehe dazu u.a. Hauer et al. 2007 und Müller 2001). Da wir in dieser Studie jedoch von einem Beton ausgehen, in dem der Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung an der Gesamtmenge von Gesteinskörnung relativ gering ist, sollten die Unterschiede in den Verwendungsmöglichkeiten klein sein <sup>29</sup>. Derartige Unterschiede können aber nicht ausgeschlossen werden und sollten bei der Interpretation der Ergebnisse dieser Studie in Bezug auf

Konstruktionsbetone unbedingt berücksichtigt werden (siehe Kapitel 8).

### 5.4.1 Variation ausgewählter Parameter

Durch die Variation ausgewählter Parameter soll gezeigt werden, wie sich die Ergebnisse des Vergleichs zwischen den verschiedenen Betonen durch alternative Annahmen zur Systemdefinition und zu den Betonzusammensetzungen verändert. Dazu werden jeweils ausgewählte Parameter bei der Bilanzierung von RC-Beton C30/37 bzw. Magerbeton 100% RC variiert, um zu zeigen wie sehr sich die Unterschiede zu den entsprechenden Betonen aus ausschliesslich natürlicher Gesteinskörnung verändern (C30/37 bzw. Magerbeton). Abb. 5.11 zeigt die variierten Parameter und das Ausmass der Variation und beschreibt die Motivation für diese Auswahl.

Für die Wirkungsabschätzung der Konstruktionsbetone zeigt sich, dass sich die Aussagen durch die Variation dieser Parameter in der Tendenz nicht verändern: In den Wirkungskategorien «Energieressourcen», «Treibhauseffekt», «Versauerung», «Atemwegserkrankungen» und «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung» bleiben die Unterschiede zwischen den beiden Betonen gering. In der Wirkungskategorie «Kiesabbau» bleiben die Unterschiede relevant. Der RC-Beton C30/37 weist deutlich geringere Werte auf.

Von allen variierten Parametern verändert die Variation der Zementmenge und der Zementart die Ergebnisse in den Wirkungskategorien «Energieressourcen», «Treibhauseffekt», «Versauerung» und «Atemwegserkrankungen» am stärksten (vgl. Abb. 5.12 und 5.13). Die Ergebnisse der Wirkungskategorien «Kiesabbau» und «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung» werden am stärksten durch die Variation des Anteils an rezyklierter Gesteinskörnung in der Betonzusammensetzung beeinflusst.

Die ausgewählten Parameter zur Herstellung der natürlichen Gesteinskörnung und zum Transport der Gesteinskörnung beeinflussen die Werte in den Wirkungskatego-

<sup>27</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 7.2.2009.

<sup>28</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 7.2.2009.

<sup>29</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 7.2.2009.

## Ökobilanzen für ausgewählte Betone

	Parameter	Variation	Begründung
Betonzusammensetzung	Zementmenge	± 10% im Verhältnis zum Wert in den Abb. 5.2 und 5.3	Mögliche Bandbreite der Variation der Zementmenge für Konstruktionsbeton; für Magerbeton ist diese Bandbreite tendenziell zu gross, da hier die Zementmenge aus Kostengründen (noch) stärker minimiert wird <sup>30</sup> .
	Zementart	CEM I anstelle von CEM II/A LL	Portlandzement (CEM I) ist die Zementart, die in der Schweiz – nach Portlandkalksteinzement (CEM II/A LL) – den grössten Marktanteil hat.
	Anteil rezyklierter Gesteinskörnung	50% rezyklierte Gesteinskörnung anstelle von 25% rezyklierter Gesteinskörnung (Betongranulat)	Gemäss SN EN 206-1 (nationaler Anhang NA, Ziffer 3.1.50) beträgt der Mindestgehalt an rezyklierter Gesteinskörnung (Betongranulat und/oder Mischgranulat) 25 Massen-Prozent. Dieser Anteil kann jedoch auch deutlich höher sein.
Herstellung natürlicher Gesteinskörnung	Wahl des Inventars für die Herstellung der natürlichen Gesteinskörnung	Anstelle des Ecoinvent-Datensatz «gravel, round, at mine» wird der Ecoinvent-Datensatz «gravel, crushed, at mine» gewählt.	In der Schweiz werden nach Künniger et al. (2001) 15% aller natürlichen Gesteinskörnungen in Prozessen hergestellt, in denen die Gesteinskörnung gebrochen werden muss. Der Prozess des Brechens ist mit erheblichen Wirkungen auf die Umwelt verbunden, insbesondere durch seinen Energieverbrauch.
Transporte	Transporte zwischen Kieswerk und Betonwerk	Der LKW-Transport der Gesteinskörnung vom Kieswerk zum Betonwerk wird um 20 km erhöht.	Die Distanz zwischen Kieswerk und Betonwerk kann je nach Standort des Betonwerks sehr stark schwanken. Transportdistanzen von Gesteinskörnung mit dem LKW überschreiten aus wirtschaftlichen Gründen jedoch selten 30 km <sup>31</sup> .

**Abb. 5.11**  
Auswahl der variierten Parameter, Ausmass der Variation und Motivation für diese Auswahl

rien «Energieressourcen», «Treibhauseffekt», «Versauerung» und «Atemwegserkrankungen», aber ihr Einfluss ist weniger stark als der Einfluss der Zementmenge und der Zementart.

Für die Wirkungsabschätzung der analysierten Magerbetone zeigt sich das gleiche Bild: Auch hier verändern sich die Aussagen zum Vergleich der beiden Betone (C30/37 und RC-Beton C30/37) durch die Variation ausgewählter Parameter in der Tendenz nicht. In den Wirkungskategorien «Energieressourcen», «Treibhauseffekt», «Versauerung» und «Atemwegserkrankungen» bleiben die Unterschiede zwischen den drei Betonen gering – auch wenn sie beispielsweise bei der Variation der Zementmenge auf bis zu 17% steigen. Der Effekt dieser

Parametervariation bleibt hier jedoch geringer als der vergleichbare Effekt bei Konstruktionsbetonen, weil die Zementmenge insgesamt kleiner ist. In den Wirkungskategorien «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung» und «Kiesabbau» bleiben die Unterschiede relevant für Magerbeton 100% RC.

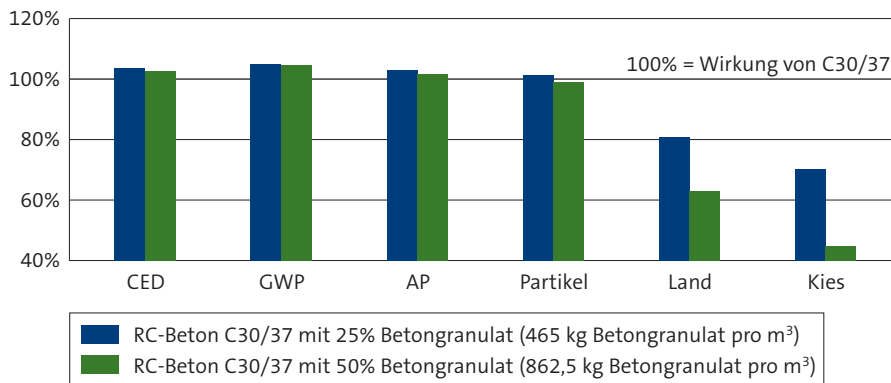
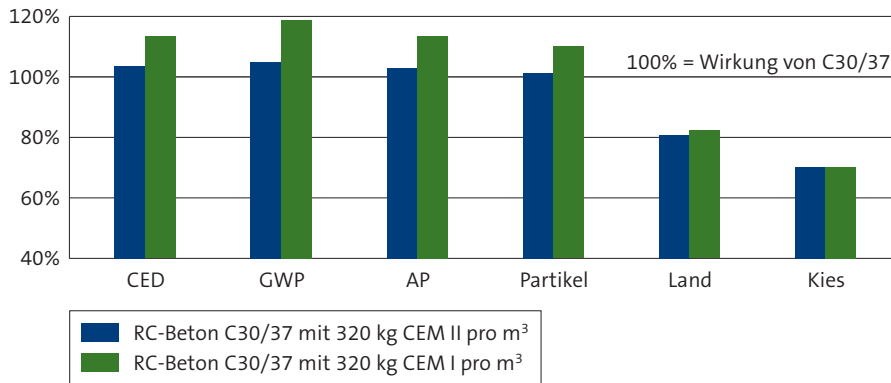
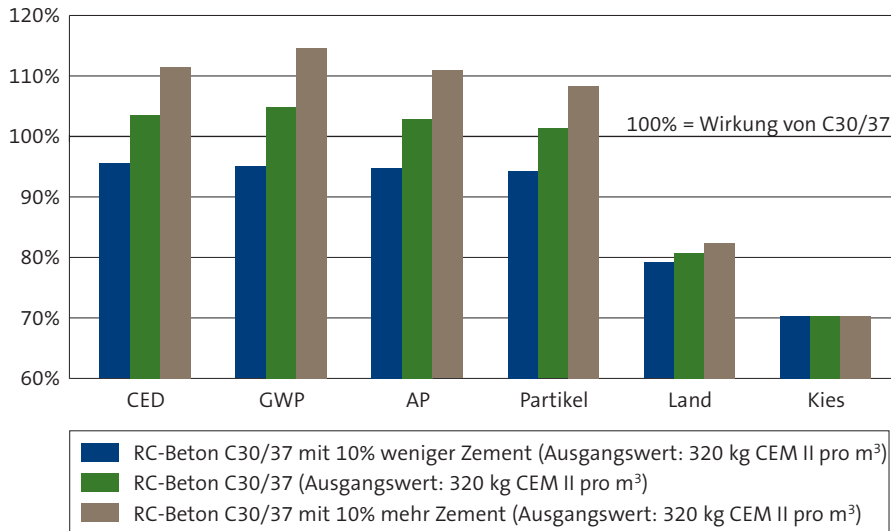
### 5.4.2 Vergleich mit anderen Studien

Die hier vorgestellte Analyse basiert im Wesentlichen auf den Datengrundlagen aus Künniger et al. (2001) bzw. deren Umsetzung in die ecoinvent-Datenbank, welche in Kellenberger et al. (2003) beschrieben wird. Unterschiede zwischen den Ergebnissen der hier vorgestellten Studie und den Ergebnissen von Künniger et al. (2001) ergeben sich aus unterschiedlichen Annahmen zu Betonzusam-

<sup>30</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 7.2.2009.

<sup>31</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 7.2.2009.

## Ökobilanzen für ausgewählte Betone



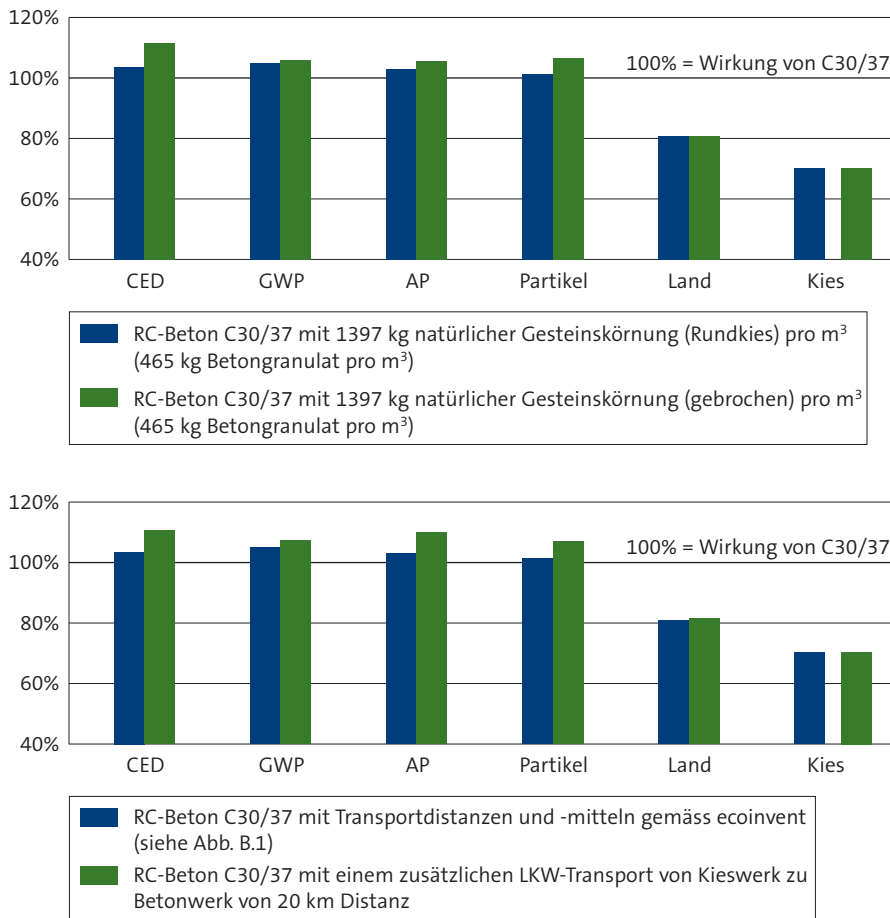
**Abb. 5.12**

### Auswirkungen der Variation der Betonzusammensetzungen

Gemäss den Angaben in Abb. 5.11 auf den Vergleich zwischen RC-Beton C30/37 und C30/37. Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung von RC-Beton C30/37 sind in Relation zu den jeweiligen Ergebnissen von C30/37 (= 100%) gesetzt.

Es bedeuten: CED: Energieressourcen; GWP: Treibhauseffekt, AP: Versauerung; Partikel: Atemwegserkrankungen; Land: Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung; Kies: Kiesabbau (gemäss Abb. 3.3).

## Ökobilanzen für ausgewählte Betone



**Abb. 5.13**

### Auswirkungen der Parametervariation von Herstellung und Transport der Gesteinskörnung

Gemäss den Angaben in Abb. 5.11 auf den Vergleich zwischen RC-Beton C30/37 und C30/37. Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung von RC-Beton C30/37 sind in Relation zu den jeweiligen Ergebnissen von C30/37 (= 100%) gesetzt.

Es bedeuten: CED: Energieressourcen; GWP: Treibhauseffekt, AP: Versauerung; Partikel: Atemwegserkrankungen; Land: Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung; Kies: Kiesabbau (gemäss Abb. 3.3).

mensetzungen (insbesondere bezüglich der Zusatzmittel) und zwischenzeitlich durchgeführten Anpassungen in anderen Inventardaten der ecoinvent-Datenbank, mit denen die Prozesskette der Betonherstellung verknüpft ist, insbesondere im Bereich der Energiebereitstellung<sup>32</sup>.

Künniger et al. (2001) dokumentieren ausführlich einen Vergleich der Ergebnisse ihrer Studie mit älteren Studien zur Ökobilanzierung von Kies, Zement und Beton. Sie zeigen, dass ihre Ergebnisse für alle drei Prozesse relativ gut mit anderen Studien übereinstimmen. Relevant sind insbesondere die Annahmen zum (i) Klinkeranteil im Zement, (ii) Anteil alternativer Brennstoffe bei der Zementher-

stellung, (iii) zu den Transporten, (iv) den Systemen der Energiebereitstellung sowie (v) den Betonzusammensetzungen. Diese Unterschiede, deren Auswirkungen auf die Ergebnisse teilweise nicht systematisch dokumentiert werden, machen einen detaillierten Vergleich der Ergebnisse nahezu unmöglich.

Dies trifft auch auf den Vergleich der vorliegenden Studie mit anderen Studien zum Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung in Betonen zu. Müller (2001) und Jeske et al. (2004) zeigen aber mit den Ergebnissen ihrer Studien deutlich, dass die Vorteile des Einsatzes von rezyklierter Gesteinskörnung in Betonen wesentlich von der An-

<sup>32</sup> Persönliche Kommunikation mit H.-J. Althaus, Empa, 17.4.2009.



nahme abhängen, wie sich die Zementmenge verändert. Nach Jeske et al. (2004) zeigt sich durch den Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen immer ein positiver Effekt auf den Verbrauch von Kies als natürliche Ressource. In Bezug auf Energieressourcen und Treibhauseffekt ist das Ergebnis jedoch von den Annahmen zur Zementmenge abhängig. Dies bestätigt die Ergebnisse der vorliegenden Studie im Grundsatz.

### 5.5 Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchung des Einsatzes rezyklierter Gesteinskörnung in Konstruktionsbeton (NPK C gemäss SN EN 206-1:2000 mit definierter Druckfestigkeitsklasse C30/37) und Magerbeton unterscheiden sich deutlich bezüglich der folgenden beiden Gruppen von Wirkungskategorien:

Für die Wirkungskategorien «Energieressourcen», «Treibhauseffekt», «Versauerung» und «Atemwegserkrankungen» dominiert der Prozess der Zementherstellung die Ergebnisse der Wirkungsabschätzungen. Am deutlichsten ist dies bei der Wirkungskategorie «Treibhauseffekt»: Hier ist die Zementherstellung in allen untersuchten Systemen für rund 90% des Werts der Ergebnisse verantwortlich. In anderen Kategorien sind es zwischen 50% und 80%, wobei hier auch die Betonherstellung einen wichtigen Beitrag zu den Ergebnissen leistet. Die Parametervariation zeigt, dass die Ergebnisse sensitiv auf eine Veränderung der Annahmen zu den Transporten und der Herstellung der natürlichen Gesteinskörnung reagieren. Der Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung wirkt sich hingegen nicht auf die Ergebnisse in diesen Wirkungskategorien aus bzw. die Werte steigen beim Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung leicht an, wenn dieser mit einem erhöhten Zementeinsatz einher geht.

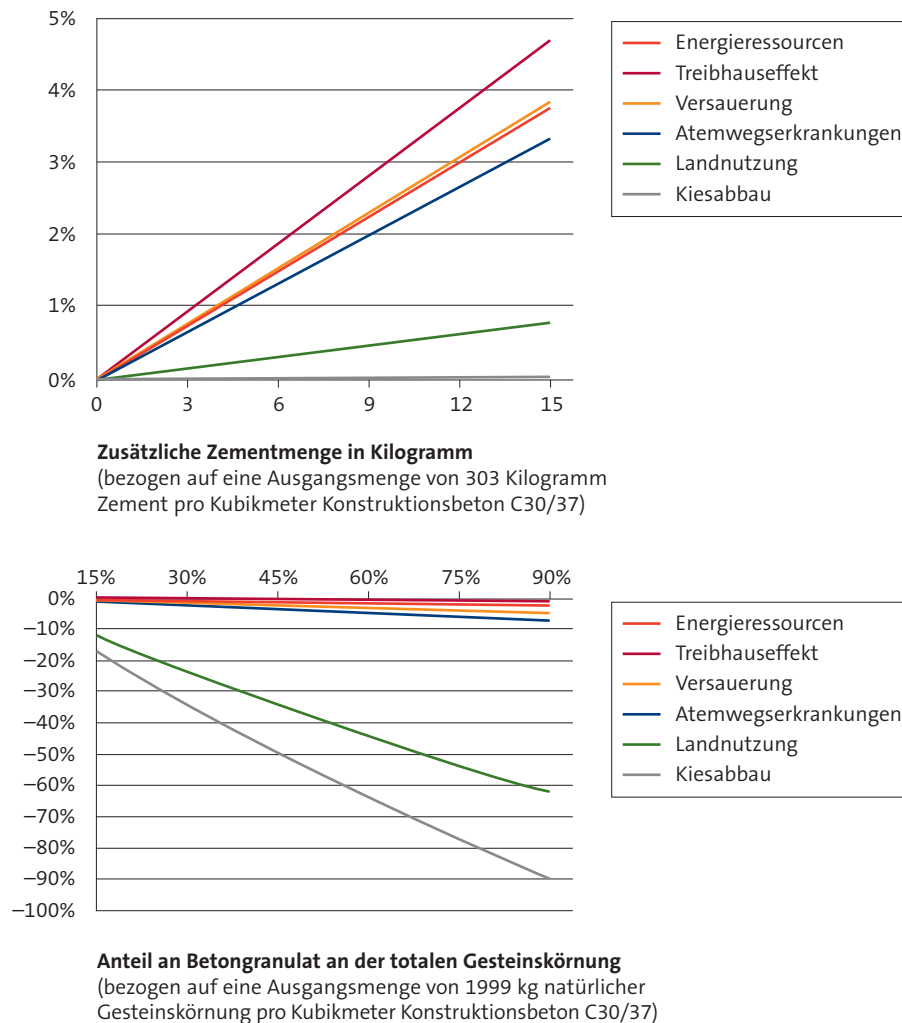
Für die Wirkungskategorien «Kiesabbau» und «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung» ist der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung entscheidend. Beim «Kiesabbau» reduzieren sich die Werte der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung direkt durch den Ersatz von natürlicher Gesteinskörnung durch rezyklierte Gesteinskörnung. Da die Herstellung natürlicher Gesteinskörnung wesentlich zu den Ergebnissen der Wirkungskategorie

«Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung» beiträgt, wirkt sich diese Substitution auch hier deutlich aus. Der Effekt ist jedoch nicht ganz so ausgeprägt wie beim «Kiesabbau», da auch die Zement- und die Betonherstellung zu dieser Wirkungskategorie beitragen. Ausserdem muss berücksichtigt werden, dass dieser Effekt durch das Verwenden des ecoinvent-Datensatzes für die Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung wahrscheinlich deutlich überschätzt wird.

Diese Unterscheidung zwischen den beiden Gruppen von Wirkungskategorien wird in der Darstellung in Abb. 5.14 unterstrichen. Darin wird der Zusammenhang zwischen der Zementmenge bzw. dem Anteil rezyklierter Gesteinskörnung im Beton und den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung am Beispiel von Konstruktionsbeton C30/37 grob abgeschätzt. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse für «Kiesabbau» und «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung» vom Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung abhängen, während die Ergebnisse in den anderen Wirkungskategorien primär vom Zementanteil abhängig sind. Eine Variation der Zementart würde ein ähnliches Muster zeigen wie die die Variation des Zementanteils: Beton mit Portlandkalksteinzement schneidet in den gleichen Wirkungskategorien deutlich besser ab als der entsprechende Beton mit Portlandzement.

Wenn die Erhöhung des Anteils an rezyklierter Gesteinskörnung mit einer Erhöhung der Zementmenge verbunden ist – wie im Beispiel des in dieser Studie untersuchten Konstruktionsbetons C30/37 – dann ist die Interpretation der Auswirkungen dieser Veränderung der Betonzusammensetzung auf die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung nicht eindeutig. Für die eine Gruppe der Wirkungskategorien («Kiesabbau» und «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung») führt sie zu tieferen Werten; für die andere Gruppe der Wirkungskategorien hingegen zu (tendenziell) höheren Werten – insbesondere beim «Treibhauseffekt». Da sich die Zementmenge im hier betrachteten Beispiel des Konstruktionsbetons C30/37 jedoch nur geringfügig erhöht, bleiben die Auswirkungen auf die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung gering. Über die Höhe der Auswirkungen auf das «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung» kann auf der Grundlage der vorliegenden Daten keine fundierte Aussage gemacht werden.

## Ökobilanzen für ausgewählte Betone



**Abb. 5.14**  
Grobe Abschätzung der Auswirkungen einer Erhöhung der Zementmenge und des Anteils an rezyklierter Gesteinskörnung im Konstruktionsbeton C30/37 auf die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung in Prozent der Ergebnisse für Konstruktionsbeton C30/37

Ausgangspunkt ist die Betonzusammensetzung für C30/37 gemäss Abb. 5.3. Bei der Erhöhung des Anteils an rezyklierter Gesteinskörnung wird die Reduktion der Dichte der Gesteinskörnung mit berücksichtigt. «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung» wird mit «Landnutzung» abgekürzt.

Wir kommen daher auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Untersuchung zur Schlussfolgerung, dass man rezyklierte Gesteinskörnung in erster Priorität zur Produktion von Betonen einsetzen sollte, bei denen dies nicht oder nur in geringem Ausmass zu einer Erhöhung der Zementmenge im Beton führt. Dies sind vor allem Magerbetone. Unter der eingangs erwähnten Annahme, dass Konstruktionsbeton NPK C von den hier betrachteten Betonen die grösste Zementmenge pro Tonne Beton beinhaltet und hier tendenziell am ehesten eine Erhöhung des Anteils rezyklierter Gesteinskörnung zu einer Erhöhung der Zementmenge führt, ist aus ökologischer

Sicht dieser Beton am wenigsten für den Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung geeignet. Vor dem Hintergrund einer steigenden Menge an mineralischen Bauabfällen, die zukünftig im Bauprozess verwendet werden können, sollte die Zement- und Betonindustrie bestrebt sein, die Verwendung von Zement im Prozess der Herstellung von RC-Beton weiter zu optimieren – bezogen auf die Zementmenge wie auch auf die Zementart.

# 6 Ökobilanz für ein fiktives Bauprojekt

## 6.1 Festlegen des Ziels der Untersuchung und Untersuchungsrahmen

In dieser Ökobilanz soll gezeigt werden, wie sich der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung in einem Bauprojekt auswirkt, bei dem ein bestehendes Gebäude ersetzt wird (Ersatzneubau). Dazu wird ein fiktives Bauprojekt gewählt. Es basiert auf Angaben zu einem konkreten Bauprojekt im Raum Zürich, die für diese Studie angepasst und vereinfacht wurden. Konkret übernommen werden die Transportdistanzen und die Wahl der Transportmittel zwischen den verschiedenen Standorten sowie die Standorte der Anlagen zur Herstellung von Gesteinskörnung und Beton. Die Analyse bleibt exemplarisch, aber sie hat ein Bauprojekt zum Gegenstand, das wir als typisch für ein grosses Ersatzneubauprojekt im städtischen Raum des Schweizer Mittellands ansehen.

In diesem Bauprojekt werden zwei Leistungen erbracht, die im untersuchten System abgebildet werden: einer-

seits die Herstellung und Anlieferung des Betons und andererseits die Entsorgung des beim Abbruch des bestehenden Gebäudes anfallenden Betonabbruchs.

Das Ausmass des Einsatzes von rezyklierter Gesteinskörnung wird – wie auch in Kapitel 5 – durch Annahmen zu den Betonzusammensetzungen definiert. Die Ergebnisse der Ökobilanzen beziehen sich daher auf diese Betonzusammensetzungen. Anhand von Parametervariationen wird anschliessend analysiert, welche Relevanz mögliche Veränderungen der Betonzusammensetzungen oder der Transportdistanzen auf die Ergebnisse der Ökobilanzen haben.

### 6.1.1 Funktionale Einheit

Im Rahmen dieser Ökobilanz werden zwei Leistungen betrachtet, die im Kontext eines Ersatzneubaus miteinander verknüpft sind: die Lieferung einer bestimmten Betonmenge für den Neubau und die Entsorgung einer bestimmten Menge Betonabbruch aus dem abgebrochenen Gebäude. Das Errichten des Gebäudes – d. h. der

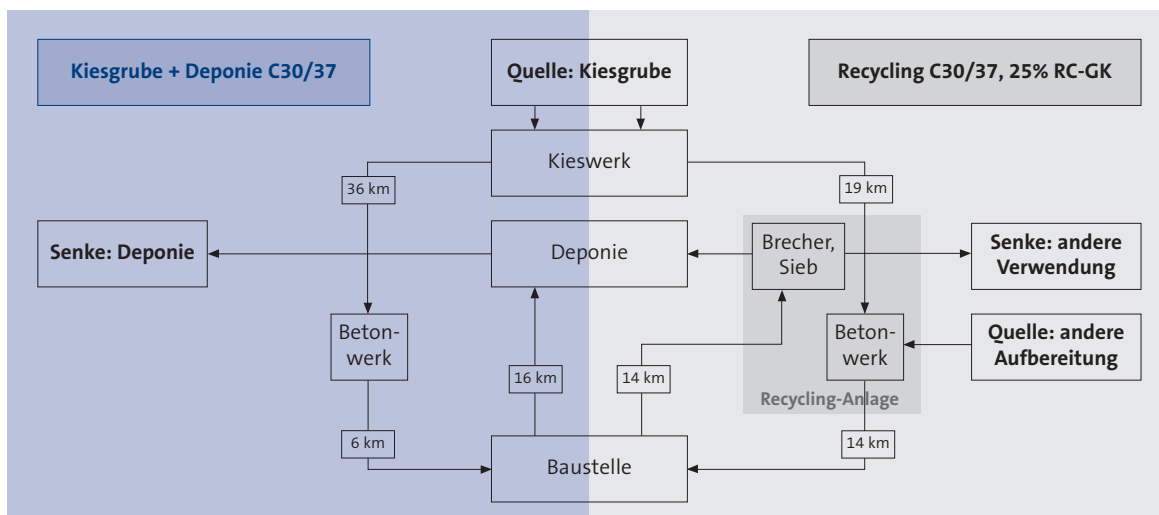


Abb. 6.1

### Skizze der Prozesse der Ökobilanz eines fiktiven Bauprojekts

Alle Transporte werden mit dem LKW durchgeführt (mit Ausnahme des hier nicht dargestellten Transports des Zements zum Betonwerk). Die Recycling-Anlage wird so modelliert, dass kein Zusammenhang zwischen der Entsorgung des Abbruchmaterials und der Bereitstellung des Betongranulats besteht. Dazu wird eine «Senke» für das aus dem Betonabbruch hergestellte Granulat eingeführt: Es wird angenommen, dass es in anderen Bauprozessen weiter verwendet wird. Ausserdem wird als «Quelle» für das Betongranulat angenommen, dass es aus anderen Abbruchprozessen stammt. Die für die Bilanzierung relevante Systemdefinition wird in Abb. 6.2 dargestellt.

## Ökobilanz für ein fiktives Bauprojekt

Bauprozess – und der Abriss des bestehenden Gebäudes werden hingegen nicht betrachtet.

Betrachtet wird die Lieferung von 10 000 m<sup>3</sup> Beton C30/37 an den Standort und die Entsorgung von 5000 m<sup>3</sup> Betonabbruch inkl. Abholen dieser Menge von diesem Standort.

### 6.1.2 Systemdefinition

In diesem System werden alle Prozesse betrachtet, die notwendig sind, um die genannte Betonmenge an einer Baustelle zur Verfügung zu stellen («from cradle to construction site») und eine bestimmte Menge Betongranulat an dieser Baustelle abzuholen und zu entsorgen («from construction site to grave/reuse»). Der Einsatz des Betons an der Baustelle (Bauprozess), der Abbruch des alten Gebäudes und die Sortierung des mineralischen Bauabfalls an der Baustelle werden vernachlässigt, da

wir annehmen, dass sich diese Prozesse in den beiden betrachteten Varianten nicht unterscheiden.

#### (i) «from cradle to construction site»

Das betrachtete System der Herstellung von Betonen umfasst die Zementherstellung einschliesslich des Abbaus der dazu notwendigen mineralischen Rohstoffe (inkl. der Transporte zwischen dem Steinbruch und dem Zementwerk) und den Transport des Zements vom Ort der Zementherstellung zum Ort der Betonherstellung. Dieser Transport erfolgt mit der Bahn oder dem LKW. Weiter umfasst das System die Herstellung von Gesteinskörnung, wobei auch in dieser Ökobilanz, wie bereits in Kapitel 5.1.2, zwischen zwei Herstellungsverfahren unterschieden wird: einerseits die Aufbereitung von natürlichem Kies und Sand aus z. B. Kiesgruben, Steinbrüchen oder Seen, andererseits die Aufbereitung von Beton- bzw. Mischabbruch zu rezykliertem Granulat. Mit einer Para-

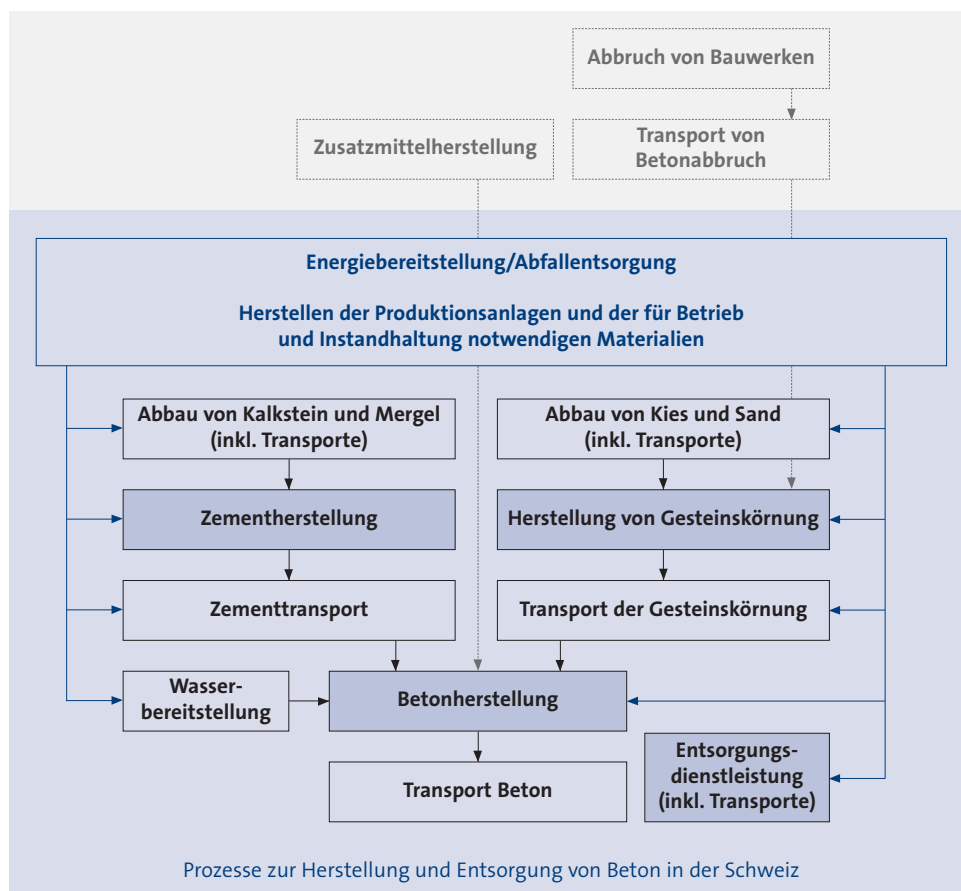


Abb. 6.2

#### System zur Analyse der Umweltbelastungen aus der Herstellung und Entsorgung von Beton

Übersicht über das System zur Betonherstellung (inkl. Anlieferung zur Baustelle) und zur Entsorgung von Betonabbruch (inkl. Anlieferung zur Entsorgungsanlage) für ein fiktives Bauprojekt.

Funktion	Variante 1	Variante 2 (RC-Beton)
Bereitstellen einer Betonmenge für den Neubau	10 000 m <sup>3</sup> C30/37 (gemäss Abb. 5.2)	10 000 m <sup>3</sup> RC-Beton C30/37 (gemäss Abb. 5.2)
Entsorgen einer Menge Betonabbruch	5000 m <sup>3</sup> Betonabbruch (ohne Fremdstoffe; Rohdichte: 2,4 t/m <sup>3</sup> ) Entsorgung: Inertstoffdeponie	5000 m <sup>3</sup> Betonabbruch (ohne Fremdstoffe; Rohdichte: 2,4 t/m <sup>3</sup> ) Entsorgung: Herstellen von Betongranulat

**Abb. 6.3**  
Definition der verglichenen Varianten

metervariation wird in Kapitel 6.4 die Relevanz einiger zentralen Annahmen diskutiert.

Der Transport vom Ort der Herstellung von Gesteinskörnung zum Ort der Betonherstellung erfolgt mit LKW, ebenso der Transport des Betons von der Betonherstellung zur Baustelle.

Auch hier wird bei der Betonherstellung ausschliesslich die Produktion von Transportbeton betrachtet, wobei die Bereitstellung des eingesetzten Wassers mitberücksichtigt, die Herstellung der Zusatzmittel hingegen vernachlässigt wird (vgl. Kapitel 5.1.2). In Kapitel 6.4 wird gezeigt, dass der Einfluss dieser Annahme auf die Ergebnisse der Ökobilanz von Betonen wahrscheinlich gering ist.

**(ii) «from construction site to grave»**

Hier werden zwei Prozesse betrachtet: der Transportprozess von der Baustelle zur Entsorgungsanlage mit dem LKW und der Prozess der Entsorgungsanlage selbst. Dabei werden zwei alternative Verfahren zur Entsorgung von Betonabbruch betrachtet: Einerseits wird der Betonabbruch in einer Inertstoffdeponie abgelagert. Andererseits wird der Betonabbruch in einer Anlage zur Herstellung von Gesteinskörnung eingesetzt. Wie bereits oben beschrieben, wird in diesem System nicht weiter betrachtet, wie diese Gesteinskörnung weiterverwendet wird. Der Prozess der Entsorgung des anfallenden Betonabbruchs ist im hier betrachteten System daher unabhängig vom Prozess der Herstellung der rezyklierten Gesteinskörnung.

Es wird angenommen, dass alle genannten Prozesse in der Schweiz stattfinden, in einem für die Produktion von

1 m<sup>3</sup> Beton bzw. zur Entsorgung von Betonabbruch notwendigen Zeitraum. Dabei werden aber Prozesse bzw. ganze Prozessketten mitbilanziert, die für die bereits genannten Prozesse Energie und Entsorgungsleistungen bereitstellen bzw. zum Herstellen der Produktionsanlagen und der für den Betrieb und Instandhaltung notwendigen Materialien dienen. Diese Prozesse finden teilweise in der Schweiz und teilweise in anderen Ländern statt. Der betrachtete Zeitraum variiert ebenfalls, da insbesondere die Prozesse zum Herstellen der Produktionsanlagen und Infrastrukturen bis zu mehrere Jahrzehnte zurückliegen können. Informationen zum zeitlichen und räumlichen Bezug sind in den jeweiligen Datensätzen in der ecoinvent-Datenbank dokumentiert.

**6.1.3 Datengrundlagen**

Die Daten, die die beiden Varianten charakterisieren, stammen von der Holcim (Schweiz) AG<sup>33</sup>. Es werden zwei Varianten verglichen, wie diese Leistungen erbracht werden können (siehe Abb. 6.3). In Variante 1 wird die Betonmenge in Form eines Konstruktionsbetons C30/37 geliefert, der ausschliesslich mit natürlicher Gesteinskörnung hergestellt wird, und der Betonabbruch wird in einer Inertstoffdeponie entsorgt. In Variante 2 wird die Betonmenge in Form eines Konstruktionsbetons C30/37 geliefert, der mit einem Gemisch aus 75% natürlicher und 25% rezyklierten Gesteinskörnung hergestellt wird, und der Betonabbruch wird in einer Anlage zur Herstellung von Betongranulat entsorgt. Diese Variante wird im folgenden Text als «Variante 2 (RC-Beton)» bezeichnet. Es werden die gleichen Betonzusammensetzungen angenommen wie in Kapitel 5 (siehe Abb. 5.2). Es wird davon ausgegangen, dass diese beiden Betone sich in ihrer

<sup>33</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 7.2.2009.

## Ökobilanz für ein fiktives Bauprojekt

Weg	Distanz	Transportmittel
Ort der Herstellung der natürlichen Gesteinskörnung zum Ort der Betonherstellung C30/37 (Variante 1)	36 km	LKW (> 28t)
Ort der Herstellung der natürlichen Gesteinskörnung zum Ort der Betonherstellung C30/37 RC-Beton (Variante 2 RC-Beton)	19 km	LKW (> 28t)
Ort der Betonherstellung zur Baustelle (Variante 1)	6 km	LKW (> 28t)
Ort der Betonherstellung zur Baustelle (Variante 2 RC-Beton)	14 km	LKW (> 28t)
Baustelle zur Inertstoffdeponie (Variante 1)	16 km	LKW (> 28t)
Baustelle zum Ort der Herstellung der rezyklierten Gesteinskörnung (Variante 2 RC-Beton)	14 km	LKW (> 28t)

**Abb. 6.4**  
Angaben zu Transportdistanzen und -mitteln

Verwendung nicht unterscheiden. Auf diese Annahme wird in den Kapiteln 5.1.1 und 5.4 ausführlich eingegangen. Abb. 6.4 zeigt die Angaben zu den Transportdistanzen und -mitteln.

Die Datengrundlagen der Inventare entsprechen den Datengrundlagen der Ökobilanzen von Betonen, die in Kapitel 5.1.3 ausführlich dargestellt werden. Abweichend zu dieser Darstellung wird der Datensatz für die Betonherstellung angepasst, indem

- der Transport des Zements von der Zementherstellung zum Ort der Betonherstellung neu in Abhängigkeit von der eingesetzten Zementmenge dargestellt wird. Dazu wird angenommen, dass Zement in der Schweiz im Durchschnitt 50 km mit dem LKW (> 28 t) und 50 km mit der Bahn transportiert wird <sup>34</sup>.
- die für die Betonherstellung notwendigen Hilfsstoffe und Brennstoffe gemäss Angaben aus Künniger et al. (2001) zum Standort der Anlagen transportiert werden.
- der Transport der Gesteinskörnung gemäss den Angaben aus Abb. 6.4 erfolgt.

Ausserdem wird für die Entsorgung des Betonabbruchs in der Inertstoffdeponie der Datensatz «disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill» aus der ecoinvent-Datenbank verwendet.

### 6.1.4 Methodische Festlegungen

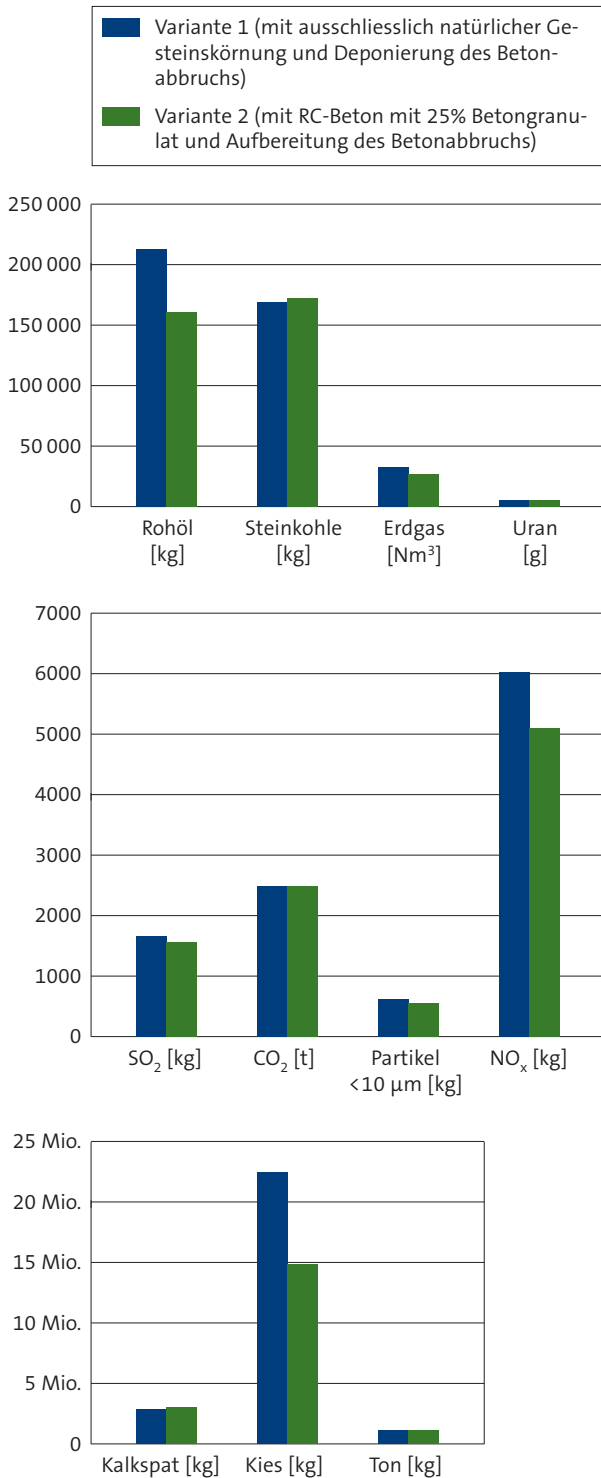
Es gelten die generellen methodischen Festlegungen aus Kapitel 3.3. Dabei kommt insbesondere die wertproportio-

nale Allokation der Emissionen und Ressourcenverbräuche bei der Herstellung der rezyklierten Gesteinskörnung zum Tragen. Im hier betrachteten System werden – wie in Kapitel 3.4 beschrieben – 19% dieser Emissionen und Verbräuche der Entsorgung des Betonabbruchs und 81% dieser Mengen der Herstellung des Betongranulats zugerechnet. Dies bedeutet, dass in Variante 2 nur 19% der Belastungen aus der Aufbereitung des Betonabbruchs mitbilanziert werden. Ausserdem vernachlässigen wir in dieser Untersuchung die Auswirkungen der Unterschiede in den Rohdichten von natürlicher und rezyklierte Gesteinskörnung (bis zu 10%) auf die Transporte.

## 6.2 Ausgewählte Ergebnisse der Sachbilanz

In den Sachbilanzen der beiden Varianten werden theoretisch alle Emissionen und Ressourcenverbräuche bilanziert, die von dem in Abb. 6.1 dargestellten System an die Umwelt abgegeben werden bzw. aus ihr entnommen werden. Tatsächlich werden in der vorliegenden Studie nur jene Emissionen und Ressourcenverbräuche abgebildet, für die die ecoinvent-Datenbank Daten bereitstellt. Dies sind je nach Datensatz mehrere hundert verschiedene Emissionen und Ressourcenverbräuche. Aus dieser Fülle von Informationen werden im vorliegenden Bericht nur einzelne Ergebnisse ausgewählt. Dies sind einerseits Emissionen in die Luft, die aus der Verbrennung von fossilen Brenn- und Treibstoffen entstehen. Andererseits

<sup>34</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 20.3.2009.



**Abb. 6.5**  
Luftemissionen, energetischer Ressourcenverbrauch und mineralischer Ressourcenverbrauch bei Herstellung und Entsorgung von Beton für ein fiktives Bauprojekt

Ausgewählte Ergebnisse der Sachbilanz aus der Herstellung von Konstruktionsbetonen für ein fiktives Bauprojekt und der Entsorgung des im Rahmen des Ersatzneubaus anfallenden Betonabbruchs. Auf der y-Achse sind die Mengen pro funktionale Einheit gemäss den Angaben in Abb. 6.3 in den jeweiligen Masseinheiten dargestellt.

sind es Verbräuche von mineralischen Ressourcen sowie energetisch genutzten Ressourcen.

Betrachtet man die beiden untersuchten Varianten vergleichend, so zeigen sich nahezu keine Unterschiede für Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Emissionen von Partikeln in die Luft. Variante 2 (RC-Beton) führt zu geringfügig tieferen Emissionen, da hier insgesamt weniger transportiert werden muss (siehe Abb. 6.4) und weniger Emissionen aus der Herstellung der Gesteinskörnung und der Entsorgung des Betonabbruchs anfallen. Dies gleicht den Anstieg der Emissionen infolge des erhöhten Zementeinsatzes aus. Die Stickoxidemissionen sind in Variante 2 deutlich tiefer.

Bei den energetisch genutzten Ressourcen hingegen sieht man den Effekt der erhöhten Zementmenge in Variante 2 (RC-Beton) im leicht höheren Verbrauch an Steinkohle (im Zementwerk). Beim Rohöl hingegen schneidet die Variante 2 (RC-Beton) aus den bereits oben genannten Gründen besser ab. Die Unterschiede zwischen den beiden Varianten beim Verbrauch von Erdgas und Uran sind sehr gering.

Beim Vergleich ausgewählter mineralischer Rohstoffe zeigt sich der tiefere Kiesverbrauch der Variante 2 (RC-Beton). Die Verbrauchsmengen von Ton und Kalkspat in der Zementproduktion unterscheiden sich hingegen nur geringfügig. Die Unterschiede im Wasserverbrauch sind auf die Unterschiede bei der Herstellung der Gesteinskörnung zurückzuführen (siehe dazu Kapitel 4).

### 6.3 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Die beiden Varianten werden in den verschiedenen Wirkungskategorien zunächst relativ zueinander verglichen, normiert auf die Ergebnisse der Variante ohne rezyklierte Gesteinskörnung (siehe Abb. 6.6). Anschliessend werden die Ergebnisse zusammenfassend tabellarisch dargestellt (siehe Abb. 6.7).

Der Vergleich zeigt, dass die Unterschiede zwischen den beiden Varianten in den Wirkungskategorien «Energieressourcen», «Treibhauseffekt», «Versauerung» und «Atem-

## Ökobilanz für ein fiktives Bauprojekt

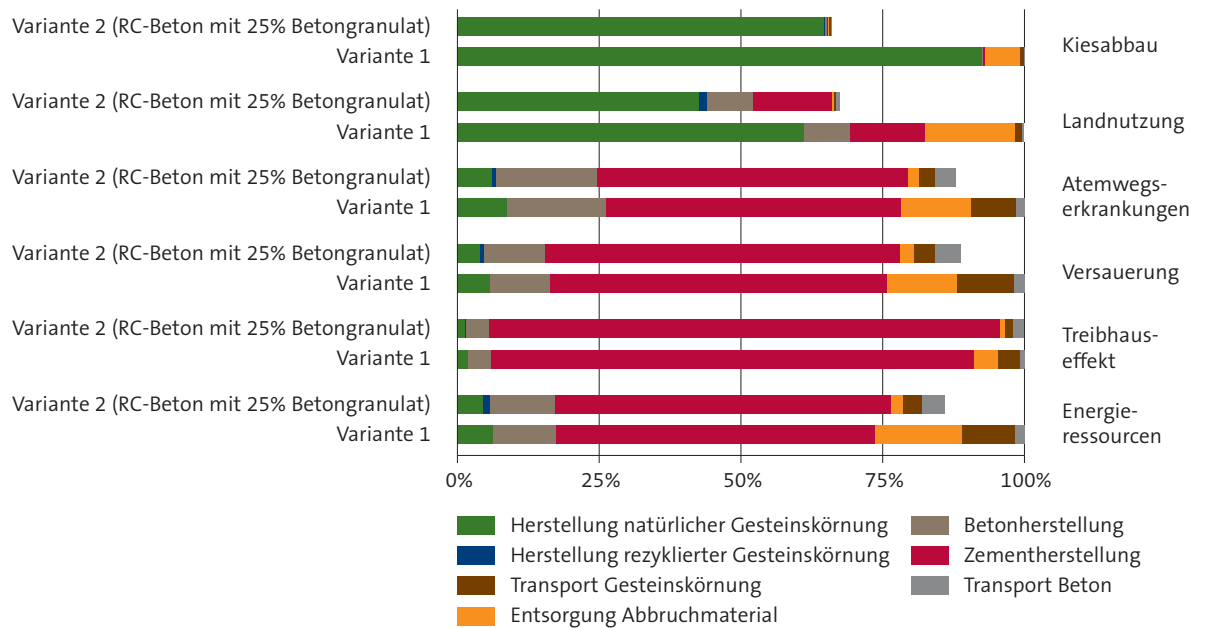


Abb. 6.6

### Wirkungsabschätzung bei Herstellung und Entsorgung von Beton für ein fiktives Bauprojekt

Wirkungsabschätzung für die Herstellung von Konstruktionsbetonen für ein fiktives Bauprojekt und der Entsorgung des im Rahmen des Ersatzneubaus anfallenden Betonabbruchs (siehe Abb. 6.1), nach Wirkungskategorien und ausgewählten Prozessen. Die Ergebnisse werden jeweils in Relation zu Variante 1 (= 100%) gesetzt. Mit «Landnutzung» wird die Wirkungskategorie «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung» abgekürzt.

wegserkrankungen» gering sind. Tendenziell schneidet die Variante 2 (RC-Beton) besser ab, mit zwischen 0% und 14% tieferen Werten. Variante 2 (RC-Beton) verzeichnet ausserdem deutlich tiefere Werte beim Kiesabbau und dem Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung (abgekürzt als «Landnutzung»). Bei der Landnutzung ist der Unterschied zwischen den beiden Varianten rund zur Hälfte auf die vermiedene Entsorgung des Abbruchmaterials in einer Inertstoffdeponie und zur Hälfte auf den vermiedenen Kiesabbau zurückzuführen (in Variante 2). Daher gehen wir davon aus, dass dieser Unterschied auch trotz der schlechten Datenlage beim Landverbrauch der Herstellung natürlicher Gesteinskörnung (vgl. Kapitel 4.5) relevant ist.

Die Entsorgung des Abbruchmaterials in einer Inertstoffdeponie in Variante 1 trägt in den Wirkungskategorien «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung», «Atemwegserkrankungen», «Versauerung» und «Energieressourcen» jeweils zu über 10% der Ergebnisse bei. Damit vergrössert sich die Differenz der Ergebnisse zwischen der Variante mit rezyklierter Gesteinskörnung und der Variante ohne rezyklierte Gesteinskörnung (im Vergleich

zu den Ergebnissen des Vergleichs zwischen C30/37 und RC-Beton C30/37 in Kapitel 5). Die Transporte tragen in Variante 1 ebenfalls rund 10% zu den Ergebnissen in den Wirkungskategorien «Atemwegserkrankungen», «Versauerung» und «Energieressourcen» bei; in Variante 2 (RC-Beton) liegt der Beitrag der Transporte in den vorgenannten Wirkungskategorien etwas tiefer. Dadurch vergrössert sich wiederum die Differenz der Ergebnisse zwischen der Variante mit rezyklierter Gesteinskörnung und der Variante ohne rezyklierte Gesteinskörnung – im hier betrachteten fiktiven Bauprojekt. Insgesamt wird die Differenz jedoch in keiner Wirkungskategorie grösser als 20%.



## Ökobilanz für ein fiktives Bauprojekt

Wirkungskategorie	Wirkungsindikator	Varianten	Entsorgung Abbruchmaterial	Herstellung natürlicher Gesteinskör.	Betonherstellung	Zementherstellung	Herstellung rezyklierter Gesteinskör.	Transport natürlicher Gesteinskör.	Transport rezyklierter Gesteinskör.	Betontransport	Summe
Treibhauseffekt	CO <sub>2</sub> -Äquivalent [t]	Variante 1	109,44	49,17	101,49	2178,45	–	98,14	–	18,05	2554,74
		Variante 2 (RC-Beton)	22,91	34,37	103,24	2300,68	6,22	36,21	6,22	42,11	2529,05
Versauerung	SO <sub>2</sub> -Äquivalent [kg]	Variante 1	634,78	299,23	544,63	3064,29	–	516,97	–	98,61	5158,51
		Variante 2 (RC-Beton)	120,69	209,16	554,17	3236,22	32,85	190,71	32,85	230,09	4606,3
Atemwegserkrankungen	Partikel < 10 µm [kg]	Variante 1	76,65	54,90	108,62	324,56	–	49,00	–	9,47	623,20
		Variante 2 (RC-Beton)	11,44	38,37	109,95	342,77	4,74	18,07	4,74	22,11	552,18
Energieressourcen	CED [TJ-Äquivalent]	Variante 1	2,81	1,17	2,03	10,25	–	1,70	–	0,31	18,28
		Variante 2 (RC-Beton)	0,40	0,82	2,06	10,83	0,26	0,63	0,26	0,72	15,97
Ökosystem-Schadenspot. durch Landnutz.	Siedlungsfl.-Äquivalent [ha · Nutzungsjahre]	Variante 1	1,95	7,44	0,98	1,62	–	0,15	–	0,03	12,18
		Variante 2 (RC-Beton)	0,04	5,20	0,99	1,71	0,15	0,06	0,15	0,07	8,37
Kiesabbau	Kies [t]	Variante 1	1,39	20,80	0,07	0,06	–	0,14	–	0,02	22,48
		Variante 2 (RC-Beton)	0,03	14,54	0,08	0,06	0,04	0,05	0,04	0,05	14,90

Abb. 6.7

### Wirkungsabschätzung der Herstellung und Entsorgung von Beton für ein fiktives Bauprojekt

Wirkungsabschätzung für das in Abb. 6.1 definierte System der Herstellung von Konstruktionsbetonen für ein fiktives Bauprojekt und der Entsorgung des im Rahmen des Ersatzneubaus anfallenden Betonabbruchs, unterschieden nach Wirkungskategorien und ausgewählten Prozessen. In dieser Darstellung werden die absoluten Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der beiden Varianten (gemäß den Angaben in Abb. 6.3 und 6.4) verglichen. Bezugseinheit ist die funktionale Einheit des Systems (vgl. Kapitel 6.1.1).

## 6.4 Sensitivitätsüberlegungen durch Variation ausgewählter Parameter

Die im vorhergehenden Kapitel dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf Vergleiche im Rahmen der in Kapitel 6.1 beschriebenen Annahmen zu Systemdefinition, Wahl der funktionalen Einheiten und weiteren methodischen Festlegungen. In diesem Kapitel wird nun untersucht, welchen Einfluss diese verschiedenen Annahmen auf die Ergebnisse haben.

Die allgemeinen Überlegungen zur Relevanz der Herstellung der Zusatzmittel in Betonen und zur funktionalen Äquivalenz der betrachteten Betone, die in Kapitel 5.4 beschrieben werden, sind auch hier gültig. Durch die Variation ausgewählter Parameter soll gezeigt werden,

wie sich die Ergebnisse des Vergleichs zwischen den Varianten durch alternative Annahmen zur Systemdefinition, zu den Transporten und zu den Betonzusammensetzungen verändern. Dabei werden jeweils einzelne Parameter bei der Bilanzierung von Variante 2 (RC-Beton) variiert, um zu zeigen, wie sehr sich die Unterschiede zur Wirkungsabschätzung für Variante 1 verändern. Eine Ausnahme ist die Variation der Parameter zur Entsorgung des Abbruchmaterials. In diesem Fall werden die entsprechenden Parameter in Variante 1 variiert und mit den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung in Variante 2 (RC-Beton) verglichen. Abb. 6.8 zeigt die variierten Parameter und das Ausmass der Variation und beschreibt die Motivation für diese Auswahl.

Im Ergebnis zeigt sich, dass sich die Aussagen zum Vergleich der beiden Varianten durch die Variation der aus-

## Ökobilanz für ein fiktives Bauprojekt

	Parameter	Variation	Begründung
Betonzusammensetzung	Zementmenge	± 10%	Mögliche Bandbreite der Variation der Zementmenge für Konstruktionsbeton (siehe Abb. 5.11).
	Zementart	CEM I anstelle von CEM II/A LL	Portlandzement (CEM I) ist die Zementsorte, die in der Schweiz – nach Portlandkalkzement (CEM II/A LL) – den grössten Marktanteil hat.
	Anteil rezyklierter Gesteinskörnung	50% rezyklierte Gesteinskörnung anstelle von 25% rezyklierter Gesteinskörnung	Der Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung beträgt mindestens 25% in Betonen, die als «Recycling-Beton» verkauft werden. Dieser Anteil ist in vielen «Recycling-Betonen», die aktuell angeboten und eingesetzt werden, jedoch deutlich höher.
Herstellung natürlicher Gesteinskörnung	Wahl des Inventars für die Herstellung der natürlichen Gesteinskörnung	Anstelle des Ecoinvent-Datensatz «gravel, round, at mine» wird der Ecoinvent-Datensatz «gravel, crushed, at mine» gewählt.	In der Schweiz werden nach Künniger et al. (2001) 15% aller natürlichen Gesteinskörnungen in Prozessen hergestellt, in denen die Gesteinskörnung gebrochen werden muss. Der Prozess des Brechens ist mit erheblichen Wirkungen auf die Umwelt verbunden, insbesondere durch seinen Energieverbrauch.
Transporte	Transporte in Variante 2 (RC-Beton)	Sämtliche Transportdistanzen in Variante 2 werden verdoppelt.	Diese Parametervariation wird motiviert durch die aktuelle Diskussion über das Gebäudelabel Minergie-Eco, in dem der Einsatz von Beton aus rezyklierter Gesteinskörnung vorgeschrieben wird, sofern die zu seinem Einsatz zurückgelegten Transportdistanzen nicht zu gross werden.
Entsorgung Abbruchmaterial	Entsorgung des Abbruchmaterials in Variante 1	Das Abbruchmaterial wird in Variante 1 neu zur Herstellung von Betongranulat verwendet.	In vielen Ersatzneubauprojekten wird das Abbruchmaterial zu Anlagen zur Herstellung von Betongranulat geliefert, während zum Neubau Beton aus ausschliesslich natürlicher Gesteinskörnung eingesetzt wird. Das hergestellte Betongranulat wird dann zu anderen Zwecken bzw. an anderen Orten weiterverwendet.

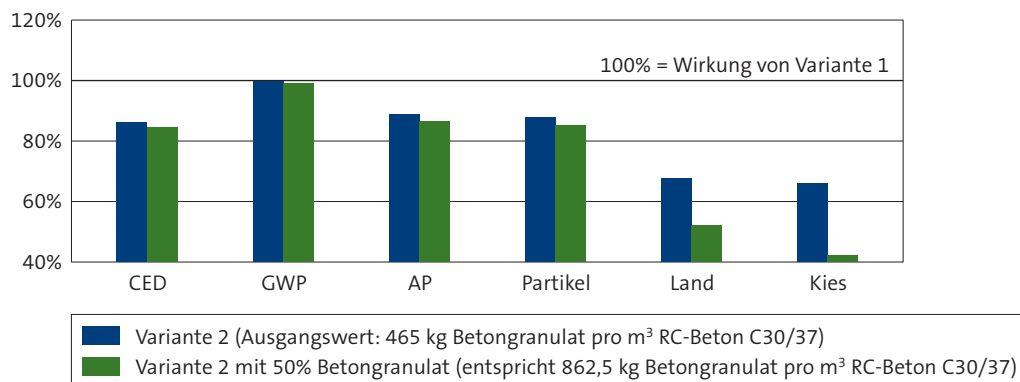
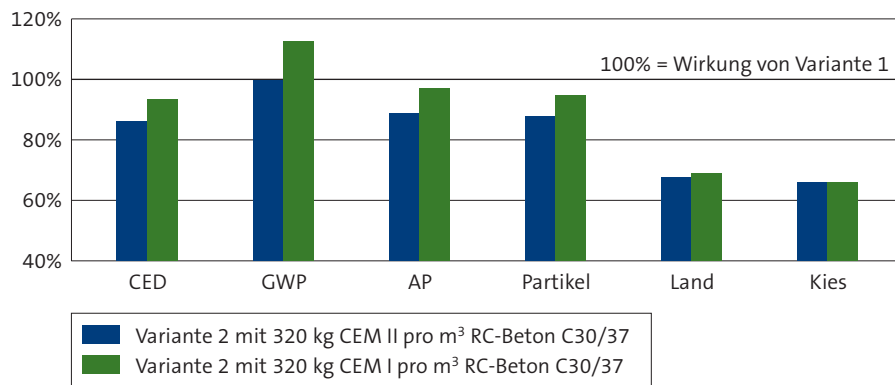
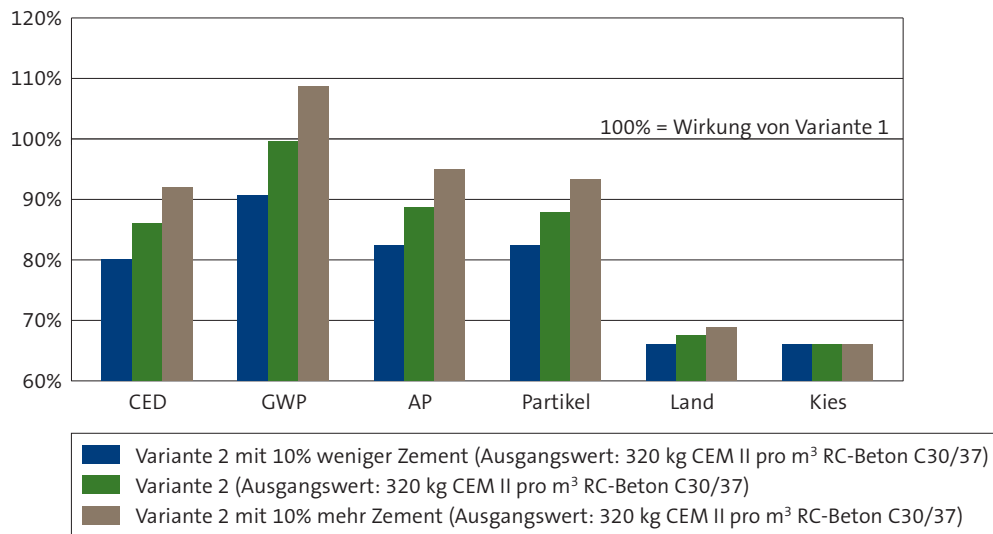
**Abb. 6.8**  
Auswahl der variierten Parameter, Ausmass der Variation und Motivation für diese Auswahl

gewählten Parameter in der Tendenz nicht verändern. In den Wirkungskategorien «Energieressourcen», «Treibhauseffekt», «Versauerung» und «Atemwegserkrankungen» bleiben die Unterschiede zwischen den beiden Varianten gering. In den Wirkungskategorien «Kiesabbau» und «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung» bleiben die Unterschiede relevant. Die Variante 2 (RC-Beton) weist in diesen Wirkungskategorien deutlich geringere Werte auf.

Von allen variierten Parametern verändern die Variation der Zementmenge, der Zementart, der Transporte und der Art der Entsorgung des Abbruchmaterials die Ergebnisse in den Wirkungskategorien «Energieressourcen»,

«Treibhauseffekt», «Versauerung» und «Atemwegserkrankungen» am stärksten (vgl. Abb. 6.9). Durch die Variation der Zementmenge steigt der Unterschied zwischen den Varianten auf 20% und liegt damit an der Grenze zu einer Einstufung als «relevant». In Abb. 6.10 wird jedoch deutlich, dass der hier gezeigte Vorteil von Variante 2 (RC-Beton) von den Annahmen zu den Transportdistanzen und zur Art der Entsorgung des Abbruchmaterials beeinflusst wird. Wird das Abbruchmaterial in Variante 1 in einer Anlage zur Herstellung von Betongranulat entsorgt, so verschwinden die Unterschiede zwischen den beiden Varianten. In diesem Fall würde auch eine Reduktion der Zementmenge im RC-Beton C30/37 zu keinem relevanten Unterschied zwischen den beiden Varianten führen.

## Ökobilanz für ein fiktives Bauprojekt



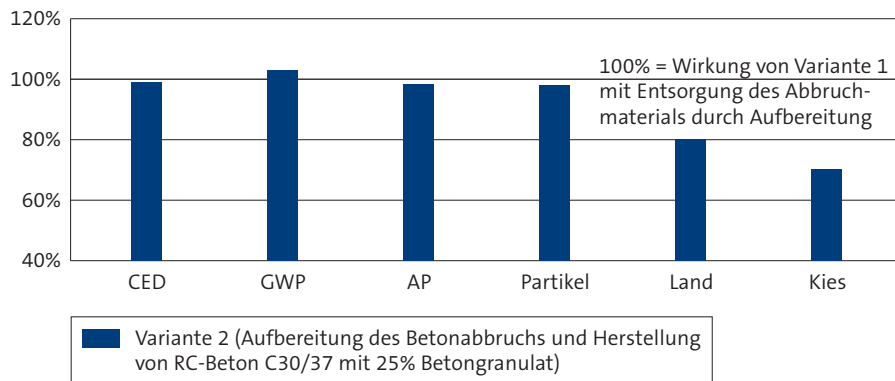
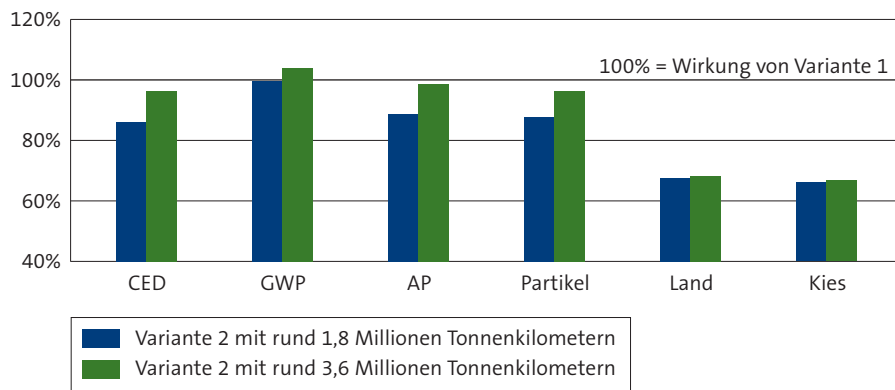
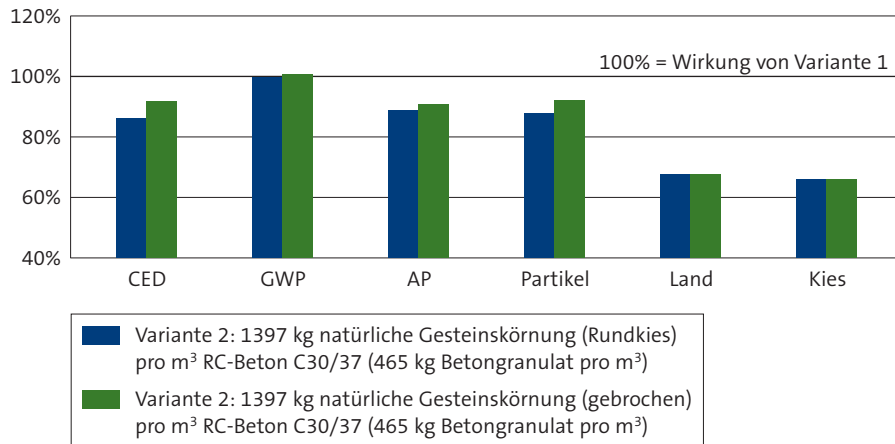
**Abb. 6.9**

**Auswirkungen der Variation der Betonzusammensetzungen gemäss Abb. 6.8, auf den Vergleich zwischen Variante 1 und Variante 2 (RC-Beton).**

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung von Variante 2 (RC-Beton) sind in Relation zu den jeweiligen Ergebnissen von Variante 1 (=100%) gesetzt.

Es bedeuten: CED: Energieressourcen; GWP: Treibhauseffekt, AP: Versauerung; Partikel: Atemwegserkrankungen; Land: Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung; Kies: Kiesabbau (gemäss Abb. 3.3).

## Ökobilanz für ein fiktives Bauprojekt



**Abb. 6.10**

**Auswirkungen der Parametervariation von Herstellung der Gesteinskörnung und der Transporte gemäss den Angaben in Abb. 6.8 auf den Vergleich zwischen Variante 1 und Variante 2 (RC-Beton).**

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung von Variante 2 (RC-Beton) sind in Relation zu den jeweiligen Ergebnissen von Variante 1 (=100%) gesetzt.

Es bedeuten: CED: Energieressourcen; GWP: Treibhauseffekt, AP: Versauerung; Partikel: Atemwegserkrankungen; Land: Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung; Kies: Kiesabbau (gemäss Abb. 3.3).

Die Ergebnisse der Wirkungskategorien «Kiesabbau» und «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung» werden am stärksten durch die Variation des Anteils an rezyklierter Gesteinskörnung (Betongranulat) in der Betonzusammensetzung beeinflusst. Alle anderen Parametervariationen haben nur einen sehr geringfügigen Einfluss auf die diese beiden Wirkungskategorien.

### 6.5 Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Ökobilanz für das fiktive Bauprojekt bestätigen im Wesentlichen die Erkenntnisse aus der Ökobilanz für ausgewählte Betone (vgl. Kapitel 5.5). Die Unterschiede zwischen den Varianten sind nur relevant für die Wirkungskategorie «Kiesabbau». Für die Ergebnisse in den Wirkungskategorien, die in Zusammenhang mit der Verbrennung von fossilen Energieträgern und Kohlendioxidemissionen aus der Zementherstellung stehen, sind die Unterschiede zwischen den Varianten gering.

Interessant sind jene Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Ökobilanz für das fiktive Bauprojekt und der Ökobilanz für ausgewählte Betone, die sich aus der Bilanzierung der Entsorgungsdienstleistung ergeben. In der Wirkungskategorie «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung» werden die Unterschiede zwischen den beiden Varianten durch das Berücksichtigen der Entsorgungsdienstleistung so hoch, dass wir sie als relevant einstufen – auch vor dem Hintergrund der in Kapitel 4.5 geschilderten Vorbehalte in Bezug auf die Datenqualität des ecoinvent-Datensatzes für die Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung.

Für die Wirkungskategorien der Energieressourcen, der Versauerung und der Atemwegserkrankungen bestimmt die Entsorgungsdienstleistung über 10% der Ergebnisse von Variante 1. Damit führt Variante 2 (RC-Beton) in diesen Wirkungskategorien zu kleineren Werten. Der in Kapitel 5.5 diskutierte Effekt der höheren Zementmenge in RC-Beton wird dadurch ausgeglichen. Wenn man annähme, dass das abgebrochene Betonvolumen dem neu errichteten Volumen entspräche (und nicht nur der Hälfte

wie im hier untersuchten fiktiven Bauprojekt), dann würde der Unterschied zwischen den Varianten auch in den vorgenannten Wirkungskategorien relevant.

Hier zeigt sich, dass im Fall des hier untersuchten fiktiven Ersatzneubauprojekts die Entsorgungsart (Inertstoffdeponie versus Aufbereitung) des Betonabbruchs entscheidender ist als der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung im Konstruktionsbeton. Bei dieser Überlegung muss jedoch berücksichtigt werden, dass es in der Praxis eher unwahrscheinlich ist, dass man bei einem Ersatzneubau die gesamte anfallende Menge an Betonabbruch in einer Inertstoffdeponie entsorgt<sup>35</sup>. Viel wahrscheinlicher ist hingegen die Kombination von einem Neubau aus Beton ohne rezyklierte Gesteinskörnung mit einer Entsorgung des Betonabbruchs in einer Anlage zur Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung. Die erzeugte Menge an rezyklierter Gesteinskörnung kann dann in anderen Bauprojekten verwendet werden. Wie in Abb. 6.10 gezeigt, ergeben sich in dieser Variante keine relevanten Unterschiede mehr zu Variante 2 (RC-Beton).

Die Transporte gewinnen in der Ökobilanz für das fiktive Bauprojekt an Bedeutung gegenüber der Ökobilanz für ausgewählte Betone. Entscheidend ist dabei vor allem der Transport der Gesteinskörnung vom Ort ihrer Herstellung zum Ort der Betonherstellung. Dabei schneidet die Variante 2 (RC-Beton) besser ab. Dieser Unterschied ist jedoch spezifisch für das hier betrachtete fiktive Bauprojekt. Es wäre ebenso denkbar, dass die Transportdistanzen in der Variante ohne rezyklierte Gesteinskörnung kürzer sind. Ausserdem ist die Transportdistanz zwischen Kieswerk und Betonwerk mit 36 km mit dem LKW eher grosszügig angesetzt. Nach Angaben der Holcim (Schweiz) AG überschreiten Transportdistanzen von Gesteinskörnung mit dem LKW aus Kostengründen selten 30 km<sup>36</sup>.

Damit zeigt sich in dieser Analyse eine wichtige Ergänzung zu den Aussagen aus Kapitel 5.5: Betrachtet man die Entsorgung des bestehenden Bauwerks als Teil des Systems, dann schneidet eine Variante umso besser ab, je weniger Material transportiert und in einer Inertstoffdeponie eingelagert werden muss.

<sup>35</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 5.7.2009.

<sup>36</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 7.2.2009.

# 7 Ökobilanz für Varianten zur regionalen Bewirtschaftung von Betonabbruch

## 7.1 Festlegen des Ziels der Untersuchung und Untersuchungsrahmen

In dieser Ökobilanz soll gezeigt werden, wie sich verschiedene Varianten zur Verwendung von Gesteinskörnung in einer fiktiven Region auf die Umwelt auswirken. Ausgangspunkt ist das zu errichtende Bauwerk, für welches eine bestimmte Menge an Beton (Hochbau) und Gesteinskörnung (Strassenbau) hergestellt wird. In der Region stehen zwei alternative Quellen für Herstellung von Gesteinskörnung zur Verfügung, die zur Betonherstellung und im Strassenbau eingesetzt werden können: natürliche Kieslager und Betonlager im bestehenden Bauwerk. Die jährlich verfügbare Menge an Betonabbruch ist begrenzt durch die Menge des im jährlich rückgebauten Bauwerk enthaltenen Betons. Es werden zwei Varianten betrachtet. Einerseits kann das aus dem Betonabbruch hergestellte Betongranulat im Strassenbau eingesetzt werden. Für die Herstellung von Beton in dieser Region wird dann ausschliesslich natürliche Gesteinskörnung verwendet, die in der Region hergestellt wird. Andererseits kann das aus dem Betonabbruch hergestellte Betongranulat in der Betonproduktion eingesetzt werden und hier die natürliche Gesteinskörnung teilweise ersetzen. Dann muss aber mehr natürliche Gesteinskörnung im Strassenbau eingesetzt werden. Bei der Herstellung der rezyklierten Gesteinskörnung fallen in beiden

Varianten 5% der gesamten aufbereiteten Menge als Abfall an, der in einer Inertstoffdeponie eingelagert wird.

Das Ausmass des Einsatzes von rezyklierter Gesteinskörnung wird also durch die verfügbare Menge an Betongranulat bestimmt. Gleichzeitig bestimmen die nachgefragte Betonmenge und die gewählten Betonzusammensetzungen die Nachfrage nach Betongranulat. Die Mengenverhältnisse werden so gewählt, dass die Mengenebilanzen der Prozesse aufgehen.

Die Ergebnisse der Ökobilanzen beziehen sich auf die vorgegebenen Mengenverhältnisse und die gewählten Betonzusammensetzungen. Anhand von Parametervariationen wird anschliessend analysiert, welche Relevanz mögliche Veränderungen der Betonzusammensetzungen oder der Transportdistanzen auf die Ergebnisse der Ökobilanzen haben.

### 7.1.1 Funktionale Einheit

Im Rahmen dieser Ökobilanz werden zwei Leistungen betrachtet: die Bereitstellung von Beton und Gesteinskörnung zur Befriedigung der Nachfrage aus der jährlichen Bautätigkeit in einer fiktiven Region.

### 7.1.2 Systemdefinition

In diesem System werden alle Prozesse betrachtet, die notwendig sind, um eine bestimmte Betonmenge und

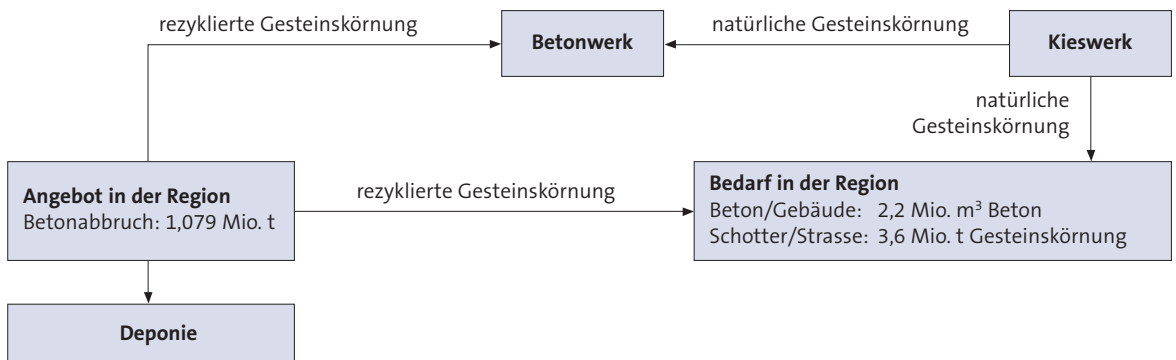


Abb. 7.1 Flüsse von Gesteinskörnung in dieser regionalen Ökobilanz

## Ökobilanz für Varianten zur regionalen Bewirtschaftung von Betonabbruch

eine bestimmte Menge an Gesteinskörnung an einer fiktiven Baustelle zur Verfügung zu stellen («from cradle to construction site»). Der Einsatz des Betons und der Gesteinskörnung an der Baustelle (Bauprozess), der Abbruch des Gebäudes und die Sortierung des mineralischen Bauabfalls an der Baustelle werden vernachlässigt, da wir annehmen, dass sich diese Prozesse in den beiden betrachteten Varianten nicht unterscheiden. Es wird vereinfachend angenommen, dass die im Prozess der Herstellung von Gesteinskörnung angelieferten Mengen an Betonabbruch bereits soweit sortiert sind, dass keine Fremdfractionen wie Metalle oder Holz mehr abgetrennt werden müssen.

Das betrachtete System der Herstellung von Beton umfasst die Zementherstellung einschliesslich des Abbaus der dazu notwendigen mineralischen Rohstoffe (inkl. der Transporte zwischen dem Steinbruch und dem Zementwerk) und den Transport des Zements vom Ort der Ze-

mentherstellung zum Ort der Betonherstellung. Dieser Transport erfolgt mit der Bahn oder dem LKW.

Weiter umfasst das System die Herstellung von Gesteinskörnung, wobei hier zwischen zwei alternativen Verfahren der Herstellung unterschieden wird. Einerseits wird Gesteinskörnung durch die Aufbereitung von Kies und Sand aus unterschiedlichen natürlichen Quellen hergestellt, wie Kiesgruben, Steinbrüchen oder Seen. Das Produkt dieses Herstellungsverfahrens wird als natürliche Gesteinskörnung bezeichnet. Im betrachteten System werden sowohl der Abbau von Kies und Sand (einschliesslich der Transporte zwischen dem Abbauort und dem Ort der Herstellung der Gesteinskörnung) als auch der Prozess der Herstellung der Gesteinskörnung bilanziert. Dabei wird angenommen, dass zur Produktion der betrachteten Betone ausschliesslich Rundkies eingesetzt wird, während zur Produktion von natürlicher Gesteinskörnung für den Strassenbau ausschliesslich gebroche-

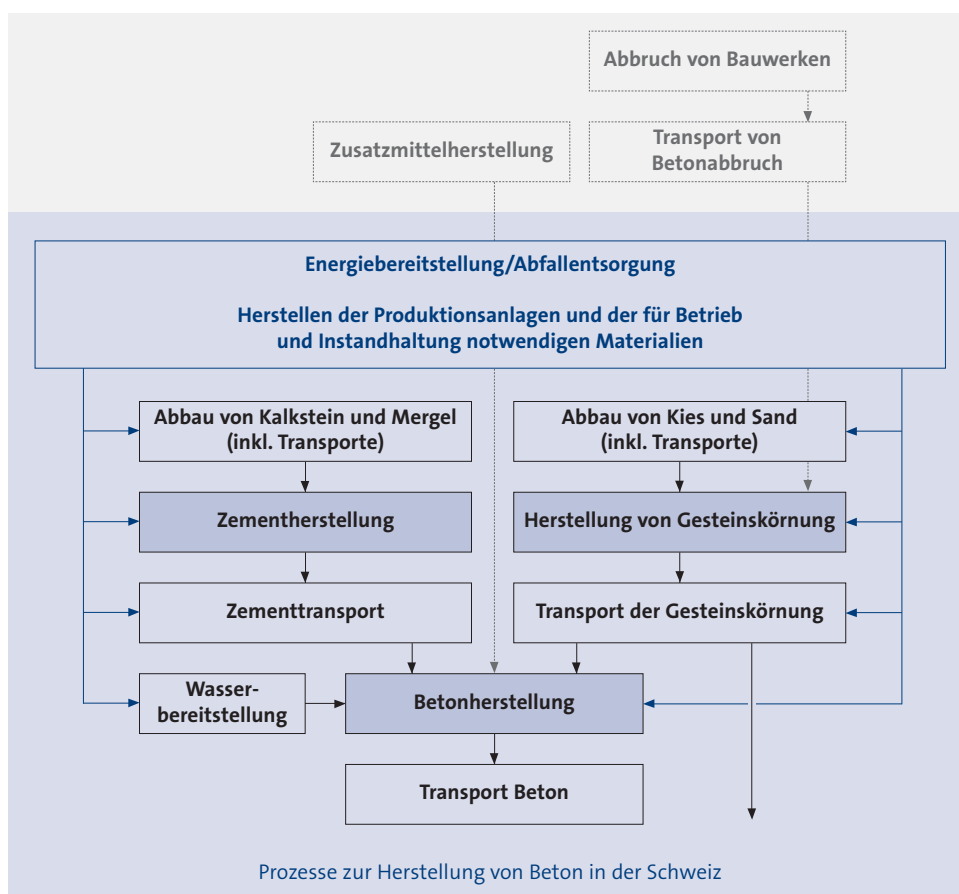


Abb. 7.2  
Übersicht über die Definition des Systems zur Analyse der Herstellung von Beton und Gesteinskörnung für die Bautätigkeit in der betrachteten Region

## Ökobilanz für Varianten zur regionalen Bewirtschaftung von Betonabbruch

ner Kies verwendet wird. Mit Hilfe einer Parametervariation wird die Relevanz dieser Annahmen für die Ergebnisse der Ökobilanz diskutiert (siehe Kapitel 7.4).

Andererseits wird Gesteinskörnung durch die Aufbereitung von Betonabbruch hergestellt. Das Produkt dieses Herstellungsverfahrens wird als Betongranulat bezeichnet. Der Abbruch der Bauwerke und der Transport von Betonabbruch zwischen der Baustelle und dem Ort der Herstellung von Gesteinskörnung werden vernachlässigt. Dieser Entscheidung wird in Kapitel 3.4 ausführlich begründet.

Der nächste Prozess im System ist der Transport zwischen dem Ort der Herstellung von Gesteinskörnung und dem Ort der Betonherstellung bzw. der Baustelle, auf der diese Gesteinskörnung eingesetzt wird. Der Transport von der Herstellung der natürlichen Gesteinskörnung zur Betonherstellung erfolgt zu 60% mit dem LKW und zu 40% mit der Bahn. Die restlichen Transporte werden mit LKW durchgeführt.

Im Prozess der Betonherstellung wird in der vorliegenden Studie ausschliesslich die Produktion von Transportbeton betrachtet. Dabei wird Beton aus Gesteinskörnung, Zement, Wasser und Zusatzmitteln hergestellt. Hier wird die Bereitstellung des Wassers mitberücksichtigt. Vernachlässigt wird die Herstellung der Zusatzmittel. Dies wird in Kapitel 5.1.2 ausführlich begründet. In Kapitel 5.4 wird gezeigt, dass der Einfluss dieser Annahme auf die Ergebnisse der Ökobilanz von Betonen wahrscheinlich gering ist.

Weiter wird der Transport des Betons vom Ort der Betonherstellung zur Baustelle mit betrachtet. Dieser Transport erfolgt mit dem LKW.

Es wird angenommen, dass alle in den vorhergehenden Abschnitten genannten Prozesse in der Schweiz stattfinden während des Zeitraums eines Jahres. Während die Betonherstellung und die Herstellung der Gesteinskörnung in der Region selbst stattfinden, wird der Zement in einem durchschnittlichen Schweizer Zementwerk hergestellt.

Daneben werden Prozesse bzw. ganze Prozessketten mitbilanziert, die für die bereits genannten Prozesse Energie und Entsorgungsleistungen bereitstellen bzw. zum Herstellen der Produktionsanlagen und der für den Betrieb und Instandhaltung notwendigen Materialien dienen. Diese Prozesse finden teilweise in der Schweiz und teilweise in anderen Ländern statt. Der betrachtete Zeitraum variiert ebenfalls, da insbesondere die Prozesse zum Herstellen der Produktionsanlagen und Infrastrukturen bis zu mehreren Jahrzehnten zurückliegen können. Die genauen Informationen zum zeitlichen und räumlichen Bezug sind in den jeweiligen Datensätzen in der Ecoinvent-Datenbank dokumentiert.

### 7.1.3 Datengrundlagen

Die Daten, die die beiden Varianten charakterisieren, stammen von der Holcim (Schweiz) AG<sup>37</sup>. Neben den Angaben in Abb. 7.3 sind dies Daten zu den Transportdistanzen und -mitteln (siehe Abb. 7.4).

Es werden zwei Szenarien (Szenario A und Szenario B) für die regionale Bewirtschaftung von Betonabbruch verglichen (siehe Abb. 7.3). In Szenario A wird die rezyklierte Gesteinskörnung im Tiefbau eingesetzt. Dieses Szenario wird im folgenden Text als «Szenario A (RC-Gesteinskörnung)» bezeichnet. Der Beton hingegen wird als Konstruktionsbeton C30/37 geliefert, der ausschliesslich mit natürlicher Gesteinskörnung hergestellt wird (mit der in Abb. 5.2 dargestellten Zusammensetzung). Von der Gesamtmenge an gebrochener Gesteinskörnung werden 2,575 Millionen Tonnen als natürliche gebrochene Gesteinskörnung geliefert und 1,025 Millionen Tonnen als Betongranulat.

In Szenario B wird die rezyklierte Gesteinskörnung zur Betonproduktion eingesetzt. Dieses Szenario wird im folgenden Text als «Szenario B (RC-Beton)» bezeichnet. Der gesamte Beton wird in diesem Szenario als Konstruktionsbeton geliefert, der aus 74% natürlicher und 26% rezyklierter Gesteinskörnung hergestellt wird (mit der in Abb. 5.2 dargestellten Zusammensetzung). Dieser Beton wird im folgenden Text als «RC-Beton C30/37» bezeichnet. Die gelieferte Gesteinskörnung besteht

<sup>37</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim Schweiz AG, 7.2.2009.



## Ökobilanz für Varianten zur regionalen Bewirtschaftung von Betonabbruch

Funktion	Szenario A (RC-Gesteinskörnung)	Szenario B (RC-Beton)
Bereitstellen einer bestimmten Betonmenge	2,2 Millionen m <sup>3</sup> C30/37 (gemäss Abb. 5.2)	2,2 Millionen m <sup>3</sup> C30/37 (gemäss Abb. 5.2)
Bereitstellen einer bestimmten Menge Gesteinskörnung	2,575 Millionen Tonnen natürliche, gebrochene Gesteinskörnung 1,025 Millionen Tonnen Betongranulat	3,6 Millionen Tonnen natürliche, gebrochene Gesteinskörnung

**Abb. 7.3**  
Definition der verglichenen Szenarien

Weg	Distanz	Transportmittel
Ort der Herstellung der natürlichen Gesteinskörnung zum Ort der Betonherstellung (in beiden Szenarien A und B)	40 km	60% LKW (> 28t) und 40% Bahn
Ort der Betonherstellung zur Baustelle (in beiden Szenarien A und B)	10 km	LKW (> 28t)
Ort der Herstellung von Betongranulat zum Ort der Betonherstellung (Szenario B RC-Beton)	10 km	LKW (> 28t)
Ort der Herstellung der natürlichen Gesteinskörnung zur Baustelle (in beiden Szenarien A und B)	50 km	LKW (> 28t)
Ort der Herstellung von Betongranulat zur Baustelle (Szenario A RC-Gesteinskörnung)	10 km	LKW (> 28t)

**Abb. 7.4**  
Angaben zu Transportdistanzen und -mitteln

ausschliesslich aus natürlicher gebrochener Gesteinskörnung.

Es wird davon ausgegangen, dass die beiden Betone in Szenario A und B sich in ihrer Verwendung nicht unterscheiden. Auf diese Annahme wird in Kapitel 5.1 und 5.4 ausführlich eingegangen.

Die Datengrundlagen der für die Bilanzierung verwendeten Inventare entsprechen den Datengrundlagen der Ökobilanzen von Betonen, die in Kapitel 5.1.3 ausführlich dargestellt werden. Abweichend zu dieser Darstellung wird der Datensatz für die Betonherstellung angepasst, indem

- der Transport des Zements vom Ort der Zementherstellung zum Ort der Betonherstellung neu in Abhängigkeit von der eingesetzten Zementmenge dargestellt wird. Dazu wird angenommen, dass Zement in der

Schweiz im Durchschnitt 50 km mit dem LKW (> 28 t) und 50 km mit der Bahn transportiert wird<sup>38</sup>.

- die für die Betonherstellung notwendigen Hilfsstoffe und Brennstoffe gemäss Angaben aus Künniger et al. (2001) zum Standort der Anlagen transportiert werden.
- der Transport der Gesteinskörnung gemäss den Angaben aus Abb. 7.4 erfolgt.

### 7.1.4 Methodische Festlegungen

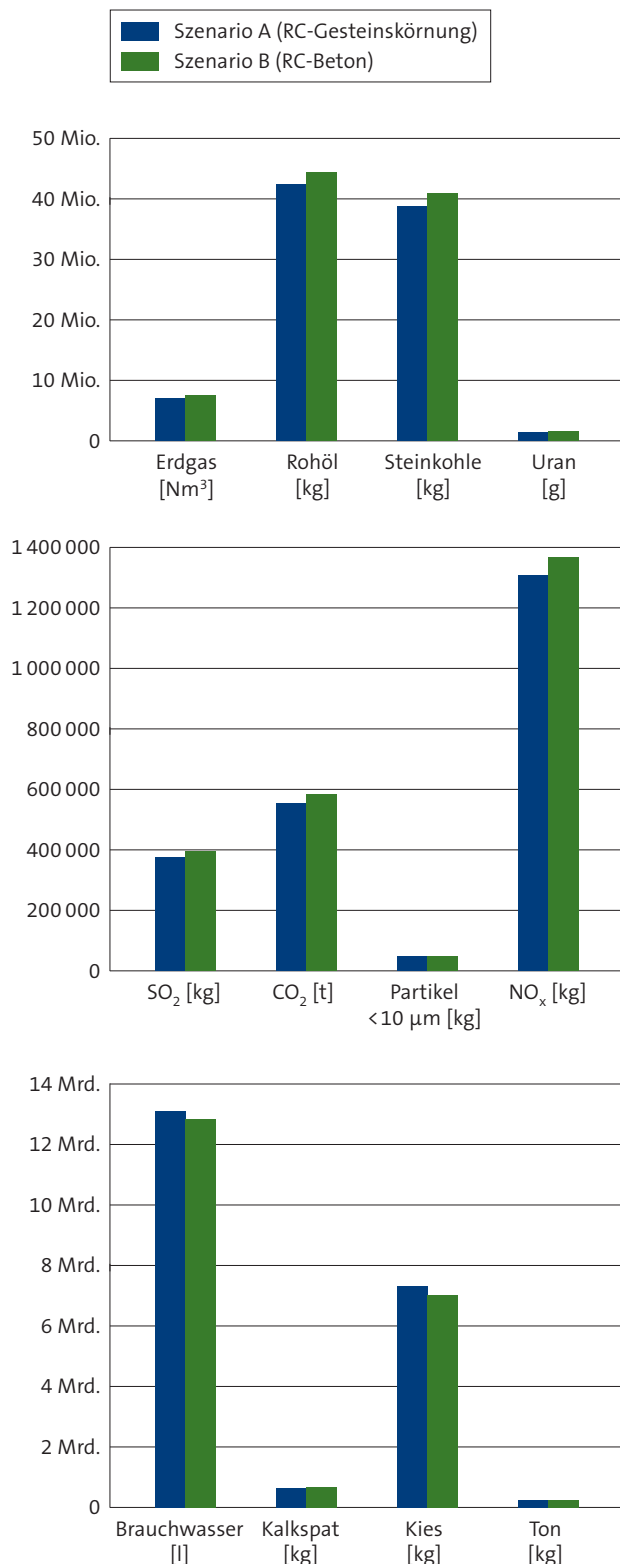
In diesen Ökobilanzen werden die generellen methodischen Festlegungen übernommen, die in Kapitel 3.3 beschrieben werden.

Ausserdem werden die folgenden Annahmen getroffen:

- Es wird angenommen, dass der gesamte Betonverbrauch der Region durch Beton C30/37 repräsentiert werden kann. Tatsächlich beträgt der Anteil von Betonen der Sorten C aus dem Normpositionenkatalog (NPK C) nur 28% der Jahresproduktion der Holcim

<sup>38</sup> Persönliche Kommunikation mit S. Bischof, Holcim Schweiz AG, 20.3.2009.

## Ökobilanz für Varianten zur regionalen Bewirtschaftung von Betonabbruch



**Abb. 7.5**  
**Energetischer Ressourcenverbrauch, Luftemissionen und mineralischer Ressourcenverbrauch bei der Herstellung von Konstruktionsbetonen und gebrochener Gesteinskörnung für eine fiktive Region**  
 Ausgewählte Ergebnisse der Sachbilanz aus der Herstellung von Konstruktionsbetonen und gebrochener Gesteinskörnung für eine fiktive Region. Auf der y-Achse sind die Mengen pro funktionale Einheit (siehe Kapitel 7.1.1) in den jeweiligen Masseinheiten dargestellt.

(Schweiz) AG. Weitere 40% der Jahresproduktion der Holcim (Schweiz) AG bestehen aus NPK A, 17% aus NPK B und 15% aus Magerbetonen. Diese Betone variieren in Bezug auf die Betonzusammensetzungen, insbesondere der Zementmenge, der Zementart sowie der Menge und der Art der Gesteinskörnung. In Kapitel 7.4 wird die Relevanz dieser Annahme für die Ergebnisse der Ökobilanz diskutiert.

- Weiter vernachlässigen wir die Auswirkung der Unterschiede in den Rohdichten von natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung (bis zu 10%) auf die Transporte.
- Das Ausmass des Einsatzes von rezyklierter Gesteinskörnung wird einerseits durch die verfügbare Menge an Betongranulat und andererseits durch die nachgefragte Betonmenge und die gewählten Betonzusammensetzungen bestimmt. Um die Mengenbilanz in der Region auszugleichen, wird angenommen, dass in beiden Szenarien genauso viel Betongranulat zur Verfügung steht, wie in Szenario B RC-Beton benötigt wird. Unter Berücksichtigung von Verlusten in der Herstellung von Betongranulat fallen in dieser fiktiven Region dann rund 1 079 000 Tonnen Betonabbruch pro Jahr an.

## 7.2 Ausgewählte Ergebnisse der Sachbilanz

In den Sachbilanzen der beiden Szenarien werden theoretisch alle Emissionen und Ressourcenverbräuche bilanziert, die von dem in Abb. 7.1 dargestellten System an die Umwelt abgegeben werden bzw. aus ihr entnommen werden. Tatsächlich werden in der vorliegenden Studie nur jene Emissionen und Ressourcenverbräuche abgebildet, für die die ecoinvent-Datenbank Daten bereitstellt. Dies sind je nach Datensatz mehrere hundert verschiedene Emissionen und Ressourcenverbräuche. Aus dieser Fülle von Informationen werden im vorliegenden Bericht nur einzelne Ergebnisse ausgewählt. Dies sind einerseits Emissionen in die Luft, die aus der Verbrennung von fossilen Brenn- und Treibstoffen entstehen. Andererseits sind es Verbräuche von mineralischen Ressourcen sowie energetisch genutzten Ressourcen.

Betrachtet man die beiden untersuchten Szenarien vergleichend, so zeigen sich nahezu keine Unterschiede für Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)

und Emissionen von Partikeln in die Luft. Szenario A (RC-Gesteinskörnung) führt zu geringfügig tieferen Emissionen, da hier insgesamt weniger transportiert werden muss (siehe Abb. 7.4) und für die Produktion des Betons weniger Zement eingesetzt wird (siehe Abb. 5.2).

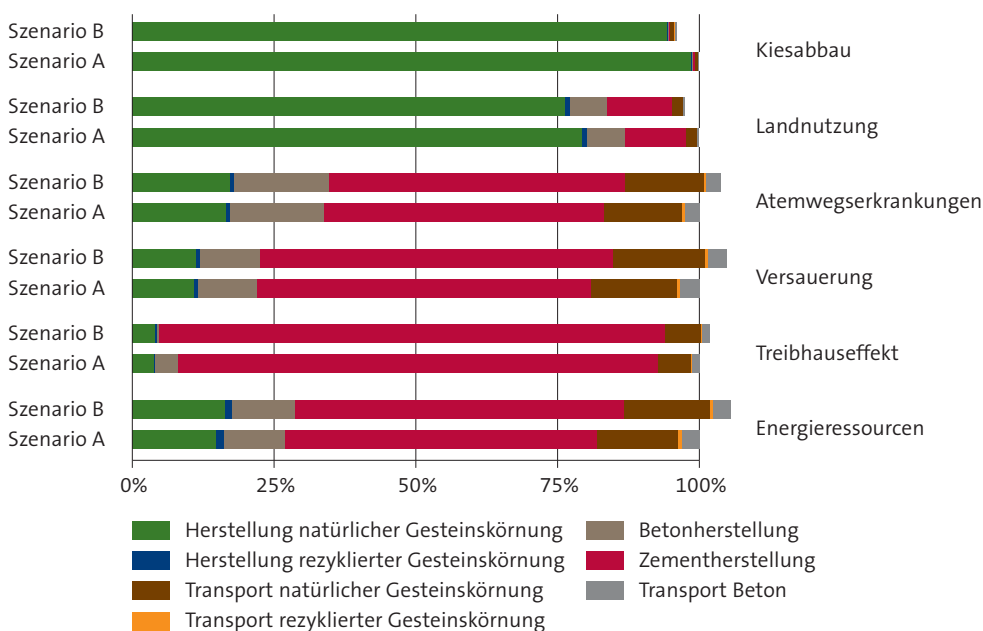
Bei den energetisch genutzten Ressourcen sieht man den Effekt der erhöhten Zementmenge in Szenario B (RC-Beton) im leicht höheren Verbrauch an Steinkohle (im Zementwerk) in Kombination mit dem Effekt der längeren Transportdistanzen (Verbrauch von Rohöl). Insgesamt sind aber die Unterschiede sehr gering.

Beim Vergleich ausgewählter mineralischer Rohstoffe zeigen sich praktisch keine Unterschiede zwischen den beiden Szenarien. Infolge der geringeren Zementmenge im Szenario A wird minimal weniger Ton und Kalk abgebaut. In Szenario A RC-Gesteinskörnung wird geringfügig mehr Kies verbraucht, da die im Konstruktionsbeton C30/37 eingesetzte Menge an Gesteinskörnung insgesamt grösser ist als die im vergleichbaren Konstruktionsbeton C30/37 mit rezyklierter Gesteinskörnung (RC-Beton C30/37) eingesetzte Menge – gemäss den in Abb. 5.2 dargestellten Betonzusammensetzungen.

### 7.3 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Die beiden Szenarien werden in den einzelnen Wirkungskategorien zunächst relativ zueinander verglichen, normiert auf die Ergebnisse des Szenarios A RC-Gesteinskörnung (siehe Abb. 7.6), und anschliessend werden die Ergebnisse zusammenfassend tabellarisch dargestellt (siehe Abb. 7.7).

Der Vergleich zeigt, dass die Unterschiede sehr gering sind. Szenario A RC-Gesteinskörnung weist in den Wirkungskategorien Energieressourcen, Treibhauseffekt, Versauerung und Atemwegserkrankungen geringfügig tiefere Werte auf, da weniger Zement eingesetzt wird und die Gesteinskörnung über kleinere Distanzen transportiert wird. Szenario B RC-Beton weist beim Kiesabbau sowie beim Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung geringfügig tiefere Werte auf, da die im RC-Beton C30/37 (gemäss Abb. 5.2) eingesetzte Menge an Gesteinskörnung insgesamt kleiner ist als die für die Betonherstellung in Szenario A eingesetzte Menge (Konstruktionsbeton C30/37 mit ausschliesslich natürlicher Gesteinskörnung).



**Abb. 7.6**  
**Wirkungsabschätzung der Herstellung von Konstruktionsbetonen und gebrochener Gesteinskörnung für eine fiktive Region**  
 Wirkungsabschätzung für die Herstellung von Konstruktionsbetonen und gebrochener Gesteinskörnung für eine fiktive Region, nach Wirkungskategorien und ausgewählten Prozessen. Die Wirkungen von Szenario B RC-Beton sind jeweils in Relation zu Szenario A RC-Gesteinskörnung (= 100%) gesetzt.

## Ökobilanz für Varianten zur regionalen Bewirtschaftung von Betonabbruch

Wirkungskategorie	Wirkungsindikator	Varianten	Herstellung natürlicher Gesteinskör.	Herstellung rezyklierter Gesteinskör.	Betonherstellung	Zementherstellung	Transport rezyklierter Gesteinskör.	Transport natürlicher Gesteinskör.	Transport Frischbeton	Summe
Treibhauseffekt	CO <sub>2</sub> -Äquivalent [t]	Szenario A	21 950,41	1369,31	22 326,96	479 259,52	1397,41	32 967,29	7200,83	566 471,73
		Szenario B	23 123,83	1369,31	22 713,42	506 148,66	1397,41	35 316,90	7200,83	597 270,36
Versauerung	SO <sub>2</sub> -Äquivalent [kg]	Szenario A	125,38	7,23	119,82	674,14	7,36	172,96	37,93	1144,82
		Szenario B	129,26	7,23	121,92	711,97	7,36	185,55	37,93	1201,21
Atemwegserkrankungen	Luftpartikel < 10 µm [t]	Szenario A	23,91	1,04	23,90	71,40	0,70	19,91	3,59	144,46
		Szenario B	24,98	1,04	24,19	75,41	0,70	20,05	3,59	149,96
Energieressourcen	CED [TJ-Äquivalent]	Szenario A	608,67	56,14	447,06	2255,79	24,21	593,49	124,74	4110,10
		Szenario B	670,43	56,14	454,15	2382,35	24,21	627,45	124,74	4339,48
Ökosystem-Schadenspot. durch Landnutz.	Siedlungsfl.-Äquivalent [ha · Nutzs.-jahre]	Szenario A	2621,27	33,50	216,43	356,69	2,18	63,44	11,21	3304,72
		Szenario B	2519,62	33,50	217,32	376,70	2,18	63,45	11,21	3223,98
Kiesabbau	Kies [t]	Szenario A	7261,59	9,48	16,28	13,33	1,97	49,85	10,17	7362,67
		Szenario B	6952,23	9,48	16,77	14,08	1,97	52,17	10,17	7056,87

Abb. 7.7

### Wirkungsabschätzung der Herstellung von Konstruktionsbetonen und gebrochener Gesteinskörnung für eine fiktive Region

Wirkungsabschätzung für das in Abb. 7.1 definierte System der Herstellung von Konstruktionsbetonen und gebrochener Gesteinskörnung für eine fiktive Region, unterschieden nach Wirkungskategorien und ausgewählten Prozessen. Szenario A = RC-Gesteinskörnung, Szenario B = RC-Beton. Bezugseinheit ist die funktionale Einheit des Systems gemäss Kapitel 7.1.1.

## 7.4 Sensitivitätsüberlegungen durch Variation ausgewählter Parameter

Die im vorhergehenden Kapitel dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf Vergleiche im Rahmen der in Kapitel 7.1 beschriebenen Annahmen zu Systemdefinition, Wahl der funktionalen Einheiten und weiteren methodischen Festlegungen. In diesem Kapitel wird nun untersucht, welchen Einfluss diese verschiedenen Annahmen auf die Ergebnisse haben.

Die allgemeinen Überlegungen zur Wahl der funktionalen Einheit und zur Relevanz der Herstellung der Zusatzmittel in Betonen, die in Kapitel 5.4 beschrieben werden, sind grundsätzlich auch hier gültig. Durch die Variation ausgewählter Parameter soll gezeigt werden, wie sich die Ergebnisse des Vergleichs zwischen den Szenarien durch alternative Annahmen zu den Transporten und zu den Betonzusammensetzungen verändern. Dabei werden ausgewählte Parameter bei der Bilanzierung von Szenario

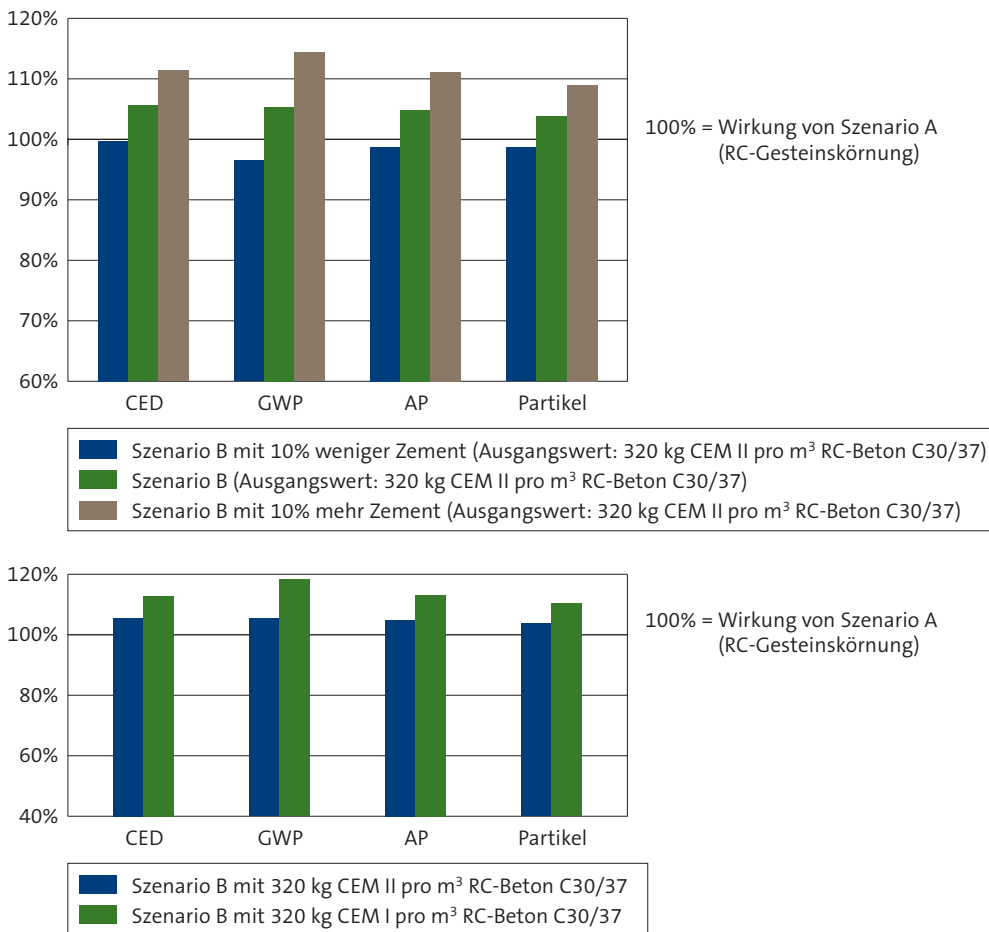
B RC-Beton variiert, um zu zeigen, wie sehr sich die Unterschiede zur Wirkungsabschätzung für Szenario A verändern. Abb. 7.8 zeigt die variierten Parameter und das Ausmass der Variation und beschreibt die Motivation für diese Auswahl.

Die Wirkungskategorien «Kiesabbau» und «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung» werden in der Parametervariation vernachlässigt, da die Mengen von rezyklierter und natürlicher Gesteinskörnung in dieser Analyse nicht variiert werden. Im Ergebnis zeigt sich, dass sich die Aussagen zum Vergleich der beiden Szenarien durch die Variation der ausgewählten Parameter in der Tendenz nicht verändern. In den Wirkungskategorien «Energieressourcen», «Treibhauseffekt», «Versauerung» und «Atemwegserkrankungen» bleiben die Unterschiede zwischen den beiden Varianten gering. Von allen variierten Parametern verändert die Variation der Zementmenge, der Zementart und der Transporte die Ergebnisse am stärksten (vgl. Abb. 7.9).

## Ökobilanz für Varianten zur regionalen Bewirtschaftung von Betonabbruch

	Parameter	Variation	Begründung
Beton-zusammensetzung	Zementmenge	± 10%	Mögliche Bandbreite der Variation der Zementmenge für Konstruktionsbeton (siehe Abb. 5.11).
	Zementart	CEM I anstelle von CEM II/A LL	Portlandzement (CEM I) ist die Zementsorte, die in der Schweiz – nach Portlandkalkzement (CEM II/A-LL) – den grössten Marktanteil hat.
Herstellung natürlicher Gesteinskörnung	Wahl des Inventars für die Herstellung der natürlichen Gesteinskörnung im Strassenbau	Anstelle des Ecoinvent-Datensatz «gravel, round, at mine» wird der Ecoinvent-Datensatz «gravel, crushed, at mine» gewählt.	In der Schweiz werden nach Künniger et al. (2001) 15% aller natürlichen Gesteinskörnungen in Prozessen hergestellt, in denen die Gesteinskörnung gebrochen werden muss. Der Prozess des Brechens ist mit erheblichen Wirkungen auf die Umwelt verbunden, insbesondere durch seinen Energieverbrauch.
Transporte	Transporte in Szenario B (RC-Beton)	Sämtliche Transportdistanzen in Szenario B (RC-Beton) werden um 50% erhöht.	Siehe Begründungen in Abb. 5.11 und 6.8.

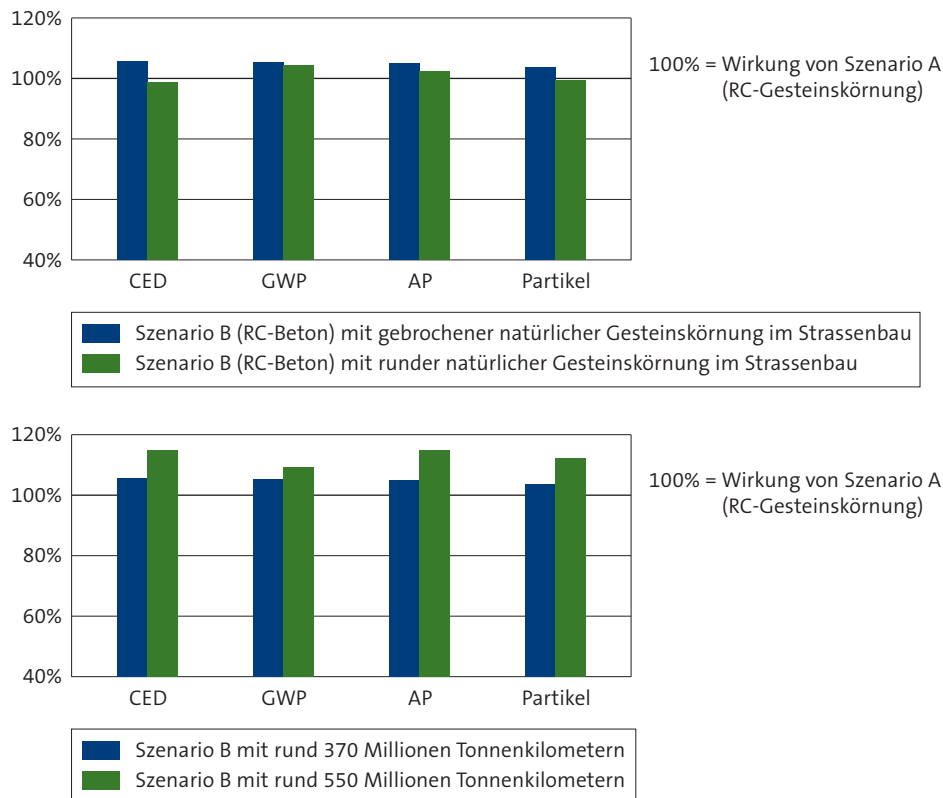
**Abb. 7.8**  
Auswahl der variierten Parameter, Ausmass der Variation und Motivation für diese Auswahl



**Abb. 7.9**  
Auswirkungen der Variation der Betonzusammensetzungen gemäss Abb. 7.8 auf den Vergleich zwischen Szenario A (RC-Gesteinskörnung) und Szenario B (RC-Beton).

Die Ergebnisse von Szenario B (RC-Beton) sind in Relation zu Szenario A (= 100%) gesetzt.  
Es bedeuten: CED: Energieressourcen; GWP: Treibhauseffekt, AP: Versauerung; Partikel: Atemwegserkrankungen (gemäss Abb 3.3).

## Ökobilanz für Varianten zur regionalen Bewirtschaftung von Betonabbruch



**Abb. 7.10**

**Auswirkungen der Parametervariation von Herstellung der Gesteinskörnung und Transporten gemäss den Angaben in Abb. 7.8 auf den Vergleich zwischen Szenario A (RC-Gesteinskörnung) und Szenario B (RC-Beton).**

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung von Szenario B (RC-Beton) sind in Relation zu Szenario A (= 100%) gesetzt. Es bedeuten: CED: Energieressourcen; GWP: Treibhauseffekt; AP: Versauerung; Partikel: Atemwegserkrankungen (gemäss Abb. 3.3).

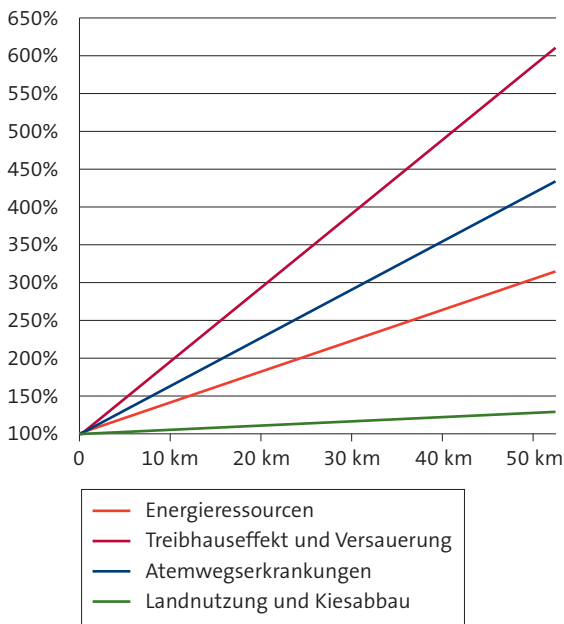
## 7.5 Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse dieser Ökobilanz für Varianten zur regionalen Bewirtschaftung von Betonabbruch bestätigen im Grundsatz die Erkenntnisse aus den Kapiteln 5 und 6. Durch den Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung in Betonen verändert sich die ökologische Bewertung des Systems in den Wirkungskategorien des Treibhauseffekts, der Energieressourcen, der Versauerung und der Atemwegserkrankungen kaum. Die Zusammensetzung der Betone – insbesondere die Zementmenge und Zementart – hat einen grösseren Einfluss. Dabei wird deutlich, dass die Zementherstellung die Umweltbelastungen der Bereitstellung von Betonen und Gesteinskörnung für die regionale Bautätigkeit dominiert. Die Zementherstellung ist damit der Schlüsselprozess dieses Systems, und seine Wirkungen können durch die Wahl von Zementmenge und -art in den Betonzusammensetzungen beeinflusst werden.

In der regionalen Betrachtung nimmt die Bedeutung von Annahmen zu Transportwegen und -arten deutlich zu. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in der untersuchten Region nicht nur Beton, sondern auch eine erhebliche Menge von Gesteinskörnung im Strassenbau eingesetzt wird. Damit sind die Wirkungen der Transporte insgesamt in Relation zu den Wirkungen der Zementherstellung deutlich grösser als in den Ökobilanzen, die in den Kapiteln 5 und 6 dargestellt sind.

Abb. 7.10 zeigt die Bedeutung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für die Transporte vom Ort der Herstellung von Gesteinskörnungen bis zur Baustelle in Relation zu den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung für die Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung. Hier zeigt sich, dass die Transporte in diesem Vergleich sehr relevant sind. In den Wirkungskategorien «Treibhauseffekt» und «Versauerung» sind bereits bei einer Trans-

## Ökobilanz für Varianten zur regionalen Bewirtschaftung von Betonabbruch



**Abb. 7.11**  
**Grobe Abschätzung der Auswirkungen einer Erhöhung der Transportdistanzen für Gesteinskörnung auf die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung, in Prozent der Ergebnisse der Herstellung eines Kilogramms rezyklierter Gesteinskörnung**  
 Die Ergebnisse in den Wirkungskategorien Treibhauseffekt und Versauerung bzw. Landnutzung und Kiesabbau werden jeweils von der gleichen Kurve repräsentiert, da sich die Kurven in diesen Wirkungskategorien sehr ähnlich entwickeln (hinsichtlich Lage und Steigung).

portdistanz von 10 km die Werte für die Transporte in der gleichen Grössenordnung wie die Werte für die Herstellung. Bei «Atemwegserkrankungen» ist dies bei einer Transportdistanz von 15 km der Fall; bei «Energie» bei einer Transportdistanz von 25 km.

Damit beeinflussen die Transportdistanzen die ökologische Bewertung von Gesteinskörnungen deutlich. In dieser Ökobilanz zur regionalen Bewirtschaftung von Betonabbruch wird dieser Zusammenhang dadurch hervorgehoben, dass wir von grossen Transportdistanzen für Gesteinskörnungen ausgehen. Insbesondere die Transportdistanzen zwischen dem Ort der Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung und dem Ort der Betonherstellung bzw. der fiktiven Baustelle sind mit 40 km bzw. 50 km sehr grosszügig bemessen. Die Holcim (Schweiz) AG transportiert Gesteinskörnung nur in Ausnahmefällen über Distanzen grösser als 30 km mit dem LKW. Für längere Strecken wird die Gesteinskörnung mit der Bahn transportiert. Damit werden die Wirkungen der Transporte in dieser Ökobilanz tendenziell überschätzt.

Des Weiteren wird in dieser Ökobilanz für Szenarien zur regionalen Bewirtschaftung von Betonabbruch die Verfügbarkeit von mineralischen Bauabfällen – in diesem Fall Betonabbruch – begrenzt. Betonabbruch ist in dieser Region knapp und man muss sich entscheiden, ob man ihn für den Strassenbau oder für die Betonherstellung verwenden möchte. Die Studie kommt zum Ergebnis, dass sich diese beiden Szenarien hinsichtlich ihrer Wirkungen auf die Umwelt nicht signifikant unterscheiden.

Die hier beschriebene Situation entspricht in den meisten Schweizer Regionen der aktuellen Situation. Betonabbruch ist tatsächlich nur begrenzt verfügbar, da heute deutlich mehr Bauwerke errichtet als abgebrochen werden. Aus diesem Grund stellt sich die Frage, wo der verfügbare Betonabbruch am sinnvollsten eingesetzt werden soll. Auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Studie folgern wir, dass Betonabbruch sowohl zur Betonproduktion als auch in Form von Gesteinskörnung im Bau eingesetzt werden kann. Die Variante A (Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung ausschliesslich im Tiefbau und Herstellung Beton ausschliesslich mit natürlicher gebrochener Gesteinskörnung) und die Variante B (Verwendung natürlicher gebrochener Gesteinskörnung ausschliesslich im Tiefbau und Herstellung Beton bzw. RC-Beton ausschliesslich mit rezyklierter Gesteinskörnung) unterscheiden sich in ihrer ökologischen Bewertung nicht signifikant. Eine Variante verschlechtert sich aber in der Bewertung, wenn

- mehr Zement eingesetzt wird,
- eine Zementart eingesetzt wird, deren Produktion zu mehr Emissionen führt, oder
- die Transportdistanzen für die Gesteinskörnung sich deutlich erhöhen.

Wie in der Einleitung zu dieser Studie beschrieben, wird in Zukunft mit einer steigenden Menge an Betongranulat gerechnet, sodass sich die Situation in den meisten Schweizer Regionen verändern wird. Im Falle eines Überschusses an Betongranulat müsste dann die Deponierung von mineralischen Bauabfällen mit bilanziert werden. Wie in Kapitel 6 beschrieben, verschieben sich dann die Ergebnisse einer ökologischen Bewertung zugunsten jener Varianten, in denen eine Deponierung vermieden werden kann.

## 8 Schlussfolgerungen und Ausblick

### 8.1 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der im Rahmen dieser Studie erstellten Ökobilanzen liefern folgende Erkenntnisse:

**(i) Bezogen auf die Prozesskette der Betonherstellung lassen sich zur ökologischen Beurteilung des Einsatzes von rezyklierter Gesteinskörnung zwei Gruppen von Wirkungskategorien unterscheiden:**

- Die Knappheit von Kies und der Ökosystem-Lebensraum: diese Wirkungskategorien werden durch den Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung deutlich beeinflusst.
- Die Umweltbelastungen aus der Verbrennung fossiler Energieträger bzw. der Zementherstellung (hier: verschiedene Luftemissionen und der Verbrauch energetischer Ressourcen): Hier trägt der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung nur zu einem geringen Teil zur Gesamtbelastung in der Prozesskette der Betonherstellung bei, und der Ersatz von natürlicher Gesteinskörnung durch Betonabbruchgranulat führt zu keinem erkennbaren Unterschied in diesen Wirkungen.

In der Wirkungskategorie «Kiesabbau» senkt der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung den Wert der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung deutlich. Beim «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung» trägt der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung zu einer Reduktion der Ergebnisse bei. Diese beiden Aussagen basieren auf Datensätzen der ecoinvent-Datenbank zur Herstellung natürlicher Gesteinskörnung und zur Entsorgung von Betonabbruch, deren Qualität als «mittel» bzw. «mittel bis gering» eingestuft wird, sowie eigenen Annahmen (siehe Abb. 4.2). In Bezug auf die Aussagen zur Wirkungskategorie «Kiesabbau» sind die Schlussfolgerungen robust, denn durch Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung wird der Kiesabbau eindeutig reduziert. Es besteht jedoch eine gewisse Unsicherheit, ob lediglich der Abbau von Alluvialkies unter diese Wirkungskategorie fällt oder auch das Brechen von Gestein zur Herstellung von gebrochenem Kies (z. B. im Kieswerk Brunnen). Während die Vorkommen von Alluvialkies in der Schweiz begrenzt

sind (siehe dazu Frischknecht et al., 2008), kann man im Alpenraum kaum von einer Knappheit an Gestein ausgehen. Diese Unterscheidung wird in der hier vorliegenden Untersuchung vernachlässigt, sodass die Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung tendenziell zu schlecht bewertet wird.

In Bezug auf die Aussagen zur Wirkungskategorie «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung» sind die Schlussfolgerungen hingegen nicht robust. Wie in Kapitel 4.5 beschrieben, ergeben sich aus den Ergebnissen des Vergleichs zwischen den Inventardaten aus verschiedenen Quellen deutliche Hinweise auf eine Überschätzung der Werte für diese Wirkungskategorie im für die Herstellung der natürlichen Gesteinskörnung verwendeten Datensatz um einen Faktor 6 bis 9. Wir gehen daher davon aus, dass die Unterschiede zwischen der Herstellung von natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung in der Wirkungskategorie «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung» deutlich geringer sind, als die in den Ökobilanzen dieses Berichts gezeigten Werte. Genauere Aussagen sind jedoch auf der Grundlage der vorhandenen Daten nicht möglich.

Für die Wirkungskategorien «Energieressourcen», «Treibhauseffekt», «Versauerung» und «Atemwegserkrankungen» dominiert hingegen die Zementherstellung die Ergebnisse dieser Studie. Ihr Anteil an den Gesamtergebnissen hängt ab von der zur Betonproduktion eingesetzten Zementmenge und der gewählten Zementart. Am deutlichsten ist dies beim «Treibhauseffekt»: Hier verursacht die Zementherstellung in allen untersuchten Systemen rund 85–90% der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung. Aber auch bei «Energieressourcen», «Versauerung» und «Atemwegserkrankungen» stammen zwischen 49% und 78% der Belastungen aus der Zementherstellung. Die Ergebnisse in diesen vier Wirkungskategorien werden massgeblich durch Prozesse bestimmt, in denen fossile Energieträger verbrannt werden. Neben der Zementherstellung sind die Transporte relevant mit rund 3–19% der Ergebnisse in diesen Wirkungskategorien. Die



Parametervariationen zeigen denn auch in allen untersuchten Systemen, dass die Ergebnisse sensitiv auf eine Veränderung in Annahmen zu diesen Prozessen reagieren. Hingegen wirkt sich der Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung nur geringfügig auf die Ergebnisse in diesen Wirkungskategorien aus.

Diese Schlussfolgerungen basieren auf Datensätzen der ecoinvent-Datenbank, deren Datenqualität überwiegend als «gut» eingestuft wird (siehe Abb. 3.2). Wie oben beschrieben bilden die Datensätze für die Herstellung von natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung hier eine Ausnahme. Da der Beitrag dieser Prozesse zu den Ergebnissen in den Wirkungskategorien «Treibhauseffekt», «Energieressourcen», «Versauerung» und «Atemwegserkrankungen» relativ gering ist, schränken die Unsicherheiten infolge geringer Datenqualität in diesen Prozessen die Robustheit der Aussagen kaum ein. Entscheidender sind hingegen die Auswirkungen der zugrundeliegenden Annahmen zum Brennstoffmix in den Zementwerken, Zementart, Zementmengen in den Betonzusammensetzungen und Transporten (siehe dazu Kapitel 3.4).

**(ii) Die Vorteile des Einsatzes von rezyklierter Gesteinskörnung in der Betonproduktion sind nicht eindeutig, wenn dieser Einsatz mit einer Erhöhung der Zementmenge verbunden ist. Die Wahl des Zements (Zementgehalt und Zementart) hat einen deutlich grösseren Einfluss auf die Ergebnisse in der Wirkungskategorie «Treibhauseffekt» als die Wahl der Gesteinskörnung.**

Für «Kiesabbau» und tendenziell auch für «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung» führt der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung zu einer Reduktion der Umweltbelastungen. Für «Energieressourcen», «Treibhauseffekt», «Versauerung» und «Atemwegserkrankungen» hingegen führt der zusätzliche Einsatz von Zement oder eine Substitution von Portlandkalksteinzement mit Portlandzement zu einer Erhöhung der Umweltbelastungen. Da sich die Zementmenge im hier betrachteten Beispiel des Konstruktionsbetons C30/37 mit rezyklierter Gesteinskörnung jedoch nur geringfügig erhöht, bleiben die Auswirkungen auf die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung gering.

Aus den oben beschriebenen Überlegungen zur Datenqualität erachten wir auch diese Schlussfolgerung als

robust. Dabei muss berücksichtigt werden, dass der Unterschied in der Zementmenge in den Betonzusammensetzungen von Konstruktionsbetonen mit bzw. ohne rezyklierte(r) Gesteinskörnung nur rund 5% beträgt (vgl. Abb. 5.2 und 5.3) und damit im Bereich der möglichen Schwankungen der Zementmenge von  $\pm 10\%$  liegt (siehe Kapitel 3.4). Die Parametervariation in Abb. 5.12 zeigt, dass selbst eine Variation der Zementmenge von  $\pm 10\%$  (beim Einsatz von Portlandkalksteinzement) zu Unterschieden von weniger als  $\pm 20\%$  führt und damit als nicht relevant eingestuft wird. Eine Erhöhung der Zementmenge wird im hier betrachteten Beispiel für Konstruktionsbeton mit rezyklierter Gesteinskörnung in den folgenden Wirkungskategorien erst relevant ab einer zusätzlichen Zementmenge von rund 25% bei «Energieressourcen», rund 20% beim «Treibhauseffekt», rund 25% bei «Versauerung» und rund 30% bei «Atemwegserkrankungen».

**(iii) Wenn man durch das Herstellen von rezyklierter Gesteinskörnung das zu deponierende Abfallvolumen vermindert, wird die Umwelt entlastet.**

Durch die Einlagerung von Beton- und Mischabbruch in einer Inertstoffdeponie wird die Umwelt deutlich mehr belastet als durch die Herstellung von Betongranulat bzw. Mischgranulat. Damit ist ein Recycling auf jeden Fall vorzuziehen. In einem konkreten Bauprojekt macht diese Entlastung unter den hier gewählten Annahmen bis zu 16% der Ergebnisse in einzelnen Wirkungskategorien aus. Bei der Interpretation ist zu berücksichtigen, dass in der hier vorgestellten Ökobilanz das Neubausvolumen doppelt so gross ist wie das Abrissvolumen. Unter den Annahmen, beide Volumina seien gleich gross und das gesamte Abrissvolumen würde in einer Inertstoffdeponie eingelagert, steigen die Anteile des Prozesses «Entsorgung Abbruchmaterial» an den Ergebnissen auf bis zu 32% in einzelnen Wirkungskategorien.

Diese Schlussfolgerungen basieren auf Datensätzen der ecoinvent-Datenbank zur Entsorgung von Betonabbruch durch Aufbereitung bzw. durch Einlagerung in einer Inertstoffdeponie sowie zu LKW-Transporten. Die Datenqualität wird für die Einlagerung in einer Inertstoffdeponie sowie für die LKW-Transporte als «gut» eingestuft. Unsicher sind hingegen die Annahmen zu den Transportdistanzen. Je nach Lage der Baustelle können die Transportdistanzen bis zur nächst gelegenen Inertstoffdepo-

## Schlussfolgerungen und Ausblick

nie stark schwanken. Gleichzeitig ist die Qualität der Daten zum Prozess der Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung – wie bereits zuvor beschrieben – unzureichend. Da jedoch die Werte für die Inertstoffdeponie in allen Wirkungskategorien 3 bis 5 Mal so hoch sind wie die vergleichbaren Werte des Prozesses zur Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung bzw. die vergleichbaren Werte eines LKW-Transports von 20 km (siehe Abb. K.1 in Anhang K), gehen wir davon aus, dass unsere Schlussfolgerung robust ist. Mit anderen Worten: selbst wenn die Werte für die Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung und für die LKW-Transporte beide um 100% höher sind als in dieser Studie angenommen, schneidet die Einlagerung von Betonabbruch in einer Inertstoffdeponie in allen Wirkungskategorien schlechter ab als die Herstellung von Betongranulat.

**(iv) Wenn der Einsatz von Gesteinskörnung zu mehr als 30 km LKW-Transporten führt, dann entstehen durch den Transport mindestens doppelt so hohe Belastungen für «Energieressourcen», «Treibhauseffekt», «Versauerung» und «Atemwegserkrankungen» wie für die Herstellung der Gesteinskörnung. Da eine solche Relation unverhältnismässig ist, sollten LKW-Transporte von mehr als 30 km vermieden werden.**

Diese Schlussfolgerung ist bewusst sehr konservativ formuliert, da die Datenqualität der Prozesse der Herstellung von natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung unzureichend ist. Beim oben genannten Unterschied von 200% zwischen den Ergebnissen für die LKW-Transporte und den Ergebnissen für die Herstellungsprozesse der Gesteinskörnung erscheint uns diese Schlussfolgerung auch angesichts der Bandbreite der Ergebnisse für die verschiedenen Kieswerke (siehe Abb. 4.5) als robust.

## 8.2 Ausblick

Folgende Fragen haben sich im Laufe der Untersuchung ergeben und sollten weiter bearbeitet werden:

**(v) Wir gehen in der vorliegenden Studie davon aus, dass 1 m<sup>3</sup> Konstruktionsbeton aus natürlicher Gesteinskörnung funktional äquivalent ist zu 1 m<sup>3</sup> aus einem Gemisch von natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung. Diese Annahme sollte in weiteren Untersuchungen überprüft werden.**

Insbesondere sollte dabei berücksichtigt werden, dass man aufgrund der Eigenschaften von Recycling-Beton für bestimmte Bauteile – beispielsweise Decken – mehr Beton einsetzen muss, um die gewünschten Eigenschaften zu erhalten. Es stellt sich daher die Frage, für welche Bauteile der Einsatz von Recycling-Beton zu empfehlen ist. Ausserdem kann es relevante Unterschiede geben bei der Verarbeitung von Recycling-Beton im Bauprozess im Vergleich zu Beton mit ausschliesslich natürlicher Gesteinskörnung. Wenn diese Unterschiede beispielsweise zu längeren Bauzeiten führen, dann kann die Annahme der funktionalen Äquivalenz nicht mehr aufrechterhalten werden. Es stellt sich hier die Frage, wie man derartige Aspekte bei der Anpassung der funktionalen Einheit berücksichtigen kann und welche Auswirkungen eine solche Anpassung auf die Ergebnisse der Ökobilanz hat. Wir empfehlen, in weiteren Untersuchungen die funktionale Einheit im Vergleich zwischen Betonen zu differenzieren nach Verwendung (Bauteilbetrachtung) und Verarbeitung (Betrachtung des Bauprozesses).

**(vi) Wir kommen in der vorliegenden Studie zu keinen eindeutigen Aussagen, inwieweit sich der Ersatz von natürlicher Gesteinskörnung durch Betongranulat auf die Ergebnisse in der Wirkungskategorie «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung» auswirkt. Ursache sind Mängel in der Datenqualität in den Inventardaten der ecoinvent-Datenbank für die Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung und für die Aufbereitung von Betonabbruch. Die Qualität dieser Daten sollte in weiteren Studien verbessert werden. Wir erwarten als Ergebnis dieser Studien eine Reduktion des «Ökosystem-Schadenspotenzials durch Landnutzung» bei der Herstellung von natürlicher Gesteinskörnung und eine Erhöhung des entsprechenden Wertes bei der Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung.**

Wenn es keinen relevanten Unterschied zwischen der Herstellung von natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung in Bezug auf das «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung» gibt, reduziert sich der in der zweiten Schlussfolgerung (ii) dargestellte Zielkonflikt auf die Frage nach der Knappheit von Kies in der Schweiz. Mit anderen Worten: In diesem Fall gäbe es mit Ausnahme des Kiesabbaus keine relevanten Unterschiede mehr in der ökologischen Bewertung von Recycling-Beton und Beton mit ausschliesslich natürlicher Gesteinskörnung.

Dieser Frage sollte in weiteren Untersuchungen nachgegangen werden.

Wir empfehlen, in weiteren Untersuchungen die im Rahmen der vorliegenden Studie erfassten Inventardaten für die Herstellung von natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung zu überarbeiten und möglichst repräsentative Inventardatensätze für die Schweiz zu erstellen und in der ecoinvent-Datenbank zur Verfügung zu stellen.

**(vii) In den Ergebnissen der vorliegenden Studie zeigt sich die relativ grosse Bedeutung der Zementherstellung für die ökologische Bewertung der Prozesskette der Betonherstellung. Zukünftige Anstrengungen zur Verminderung der Umweltbelastungen der Prozesskette der Betonherstellung sollten daher bei der Zementherstellung ansetzen. Neben dem vermehrten Einsatz von Sekundärbrennstoffen bietet die Reduktion des Klinkerfaktors das grösste Verbesserungspotenzial.**

Die Substitution von Portlandkalksteinzement mit Portlandzement führt in der Ökobilanz für Betone zu einer ebenso grossen Erhöhung der Ergebnisse in den Wirkungskategorien «Energieressourcen», «Treibhauseffekt», «Versauerung» und «Atemwegserkrankungen» wie die Erhöhung der Zementmenge um 10%. Dies deutet darauf hin, dass Portlandkompositzemente, bei denen der Klinkeranteil weiter gesenkt wird (z. B. CEM II/B-Zemente), tendenziell zu noch geringeren Umweltbelastungen führen, was auch von Künniger et al. (2001) bestätigt wird. Ein weiterer Ansatzpunkt, der in dieser Studie nicht untersucht wurde, ist der vermehrte Einsatz von Sekundärbrennstoffen. Hier stellt sich die Frage nach dem Effekt dieser Massnahme auf die Ergebnisse der Ökobilanz von Zement – insbesondere in Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung der Sekundärbrennstoffe und den Annahmen zur Allokation der Umweltbelastungen aus der energetischen Verwertung von Abfällen. Wir empfehlen, diese beiden Verbesserungspotenziale in weiteren Untersuchungen genauer zu analysieren.

# Review-Bericht

## Ausgangslage und Auftrag

Im Jahr 2008 beauftragte Holcim (Schweiz) AG das Institut für Bau und Umwelt der Hochschule für Technik Rapperswil, eine vergleichende Ökobilanz von Beton und Gesteinskörnungen zu erarbeiten. Die Studie sollte gemäss den Anforderungen der ISO 14040 und 14044 durchgeführt werden. In der vorliegenden Studie werden vergleichende Aussagen über verschiedene Betone und Gesteinskörnungen vorgenommen, die zur Veröffentlichung bestimmt sind. Deshalb ist die Durchführung einer kritischen Prüfung der Ökobilanz nach ISO 14040, Abschnitt 7.3.3, obligatorisch. Der Vorsitzende des Prüfungsausschusses, Dr. Rolf Frischknecht, ESU-services Ltd., zog Prof. Dr. Holger Wallbaum, Lehrstuhl Nachhaltiges Bauen der ETH Zürich, und Dr. Stefan Rubli, Energie- und Ressourcen-Management GmbH, als weitere externe Experten bei. Alle drei besitzen langjährige Erfahrungen mit Ökobilanzen, sind mit den ISO-Normen gut vertraut und Fachleute auf dem Gebiet des Bauwesens. Der so zusammengesetzte Prüfungsausschuss wurde mit der Durchführung einer kritischen Prüfung ex post betraut.

## Ziel und Untersuchungsrahmen der kritischen Prüfung

Durch die kritische Prüfung soll gemäss ISO 14044, Abschnitt 6.1, sichergestellt werden, dass

- die bei der Durchführung der Ökobilanz angewendeten Methoden mit der internationalen Norm übereinstimmen;
- die bei der Durchführung der Ökobilanz angewendeten Methoden wissenschaftlich begründet sind und dem Stand der internationalen Ökobilanz-Technik entsprechen;
- die verwendeten Daten in Bezug auf das Ziel der Studie hinreichend und zweckmässig sind;
- die Auswertungen die erkannten Einschränkungen und das Ziel der Studie berücksichtigen;
- der Bericht transparent und in sich stimmig ist.

## Vorgehen

Der Prüfungsausschuss wurde gemäss der Entscheidung des Auftraggebers erst nach Vorliegen der Schlussversion

des Berichtes zur Studie «Ökobilanzen zum Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung in Betonen» (datiert 11. Februar 2010) beigezogen. Die kritische Prüfung fand in mehreren Etappen statt. Die individuell formulierten Empfehlungen der Gutachter wurden mit dem Projektteam am 9. Juli 2009 diskutiert. Die wesentlichen Empfehlungen betrafen die präzisere Beschreibung der Fragestellung und Zielsetzung der Studie sowie der erarbeiteten Systemmodelle und die Verwendung ISO-konformer Bewertungsmethoden. Das Projektteam hat darauf nach Rücksprache mit dem Auftraggeber den Bericht gründlich überarbeitet und die Empfehlungen der kritischen Gutachter weitestgehend übernommen. Anfang September 2009 wurde den Mitgliedern des Prüfungsausschusses eine Zwischenversion des überarbeiteten Berichts unterbreitet. Der Vorsitzende des Prüfungsausschusses gab dazu schriftlich Rückmeldung. Im Weiteren wurde am 16. November 2009 eine erste Version des Schlussberichts diskutiert. Die Ergebnisse dieser Diskussion führten zur Schlussfassung des Ökobilanzberichts. Dieser wurde dem Prüfungsausschuss am 19. April 2010 vorgelegt.

Für die kritische Prüfung lagen folgende Dokumente vor:

- Berichtsentwurf «Modulare Ökobilanz für Beton und Gesteinskörnungen», Stand vom 12. Juni 2009
- Berichtsentwurf «Ökobilanzen zum Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung in Betonen», Stand 25. August 2009 (dieser wurde nur vom Vorsitzenden geprüft)
- Berichtsentwurf «Ökobilanzen zum Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung in Betonen», Stand 1. September 2009
- Schlussbericht «Ökobilanzen zum Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung in Betonen», Stand 30. Oktober 2009
- Schlussbericht «Ökobilanzen zum Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung in Betonen», Stand 11. Februar 2010
- Schlussbericht «Ökobilanzen zum Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung in Betonen», Stand 19. April 2010

Während der Phase der Prüfung fanden die folgenden Treffen statt:

- 9.7.2009 in Rapperswil: Prüfung der erstellten Modelle und Besprechung der bis dann erfolgten schriftlichen

Rückmeldungen; Teilnehmende: Prof. Dr. Susanne Kytzia, Ulrich Stüssi, Dr. Rolf Frischknecht, Dr. Stefan Rubli

- 16.11.2009 in Zürich: Besprechung des Schlussberichts auf Basis der Review-Berichte der Mitglieder des Prüfungsausschusses; Teilnehmende: Prof. Dr. Susanne Kytzia, Stefan Bischof, Dr. Peter Lunk, Dr. Arthur Braunschweig, Dr. Rolf Frischknecht, Dr. Stefan Rubli, Prof. Dr. Holger Wallbaum.

Die Sachbilanzrohdaten werden im Bericht auszugsweise dargestellt. Die Gutachter erhielten auf Anfrage Einsicht in die wesentlichen Sachbilanzdaten und Modelle in Form von Screenshots. Die im Prüfungsprozess zur Verfügung gestellten Informationen erlaubten den Gutachtern, die Daten auf ihre Konsistenz, Zweckmässigkeit und Korrektheit zu prüfen. In der Schlussversion wurden keine Fehler oder Auffälligkeiten entdeckt. Die korrekte Übertragung von Daten aus der EDV-Software in die Resultat-Tabellen und von dort in den Bericht wurde nicht überprüft. Einige der während der kritischen Prüfung gemachten Kommentare führten zu Änderungen in der Studie. Im vorliegenden Bericht ist dies bei den entsprechenden Kommentaren vermerkt. In den nachfolgenden Absätzen werden die gemäss ISO 14040 durch das Gutachten zu beantwortenden Fragen behandelt. Der Studienbericht enthält vier eigenständige Ökobilanzen. Wenn nichts anderes vermerkt wird, beziehen sich die nachfolgenden Aussagen summarisch auf alle vier Ökobilanzen.

### **ISO-Konformität und Wissenschaftlichkeit der angewendeten Methoden**

Die in der Studie dokumentierten Ökobilanzen entsprechen den Vorgaben der ISO-Normen (14040 und 14044) für vergleichende, zu veröffentlichende Ökobilanzen. Die in den vier Ökobilanzen verwendeten funktionalen Einheiten sind zielführend und sind für die gemachten Vergleiche geeignet. Die durchgeführte Wirkungsabschätzung entspricht den für Vergleiche geltenden, erhöhten Anforderungen der ISO-Normen. Die Auswahl der Wirkungskategorien zur Quantifizierung der Umweltbelastung ist plausibel und deckt die mit der verfügbaren Datengrundlage sinnvoll quantifizierbaren Umweltindikatoren ab.

Die gewählten Modellierungsansätze in den Sachbilanzen entsprechen der heutigen wissenschaftlichen Praxis. Abschneiderregeln werden nicht explizit formuliert, son-

dern basieren auf Expertenschätzungen. Dieses Vorgehen ist zweckmässig und zielführend. Das Vernachlässigen von Teilen der Produktsysteme wird in bedeutenden Fällen begründet (beispielsweise zum Thema Zusatzmittel). Die Allokation, insbesondere zwischen dem Erbringen einer Entsorgungsdienstleistung einerseits und dem Erzeugen von Beton- beziehungsweise Mischgranulat andererseits erfolgt auf Empfehlung der Gutachter auf der Basis der Einkünfte des Aufbereitungsprozesses. Diese Vorgehensweise ist in Übereinstimmung mit den Normen ISO 14040 und 14044.

Um die Stabilität der Ergebnisse zu testen werden ausführliche Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Diese lassen die Stabilität der Ergebnisse gut erkennen. Die Parameter werden teilweise einseitig variiert, wodurch die Bandbreite der möglichen Ergebnisse nicht vollständig abgebildet wird. Unterschiede von mehr als 20% werden als relevant bezeichnet. Auf dem Hintergrund der Tatsache, dass wesentliche Prozesse in beiden Produktsystemen vorkommen, erachtet der Prüfungsausschuss diesen Wert als eher hoch. Eine quantitative Unsicherheitsanalyse, beispielsweise mittels Monte-Carlo-Simulation, würde es erlauben, die Frage der Signifikanz der Unterschiede zwischen den untersuchten Alternativen quantitativ zu beantworten.

Auf Empfehlung des Prüfungsausschusses wird im Hauptbericht auf das Anwenden von vollaggregierenden Bewertungsmethoden (Methode der ökologischen Knappheit 2006) verzichtet. Die mit der Methode der ökologischen Knappheit bewerteten Ergebnisse werden in einem Anhang der Studie gezeigt. Die Ergebnisse und Grafiken sind mit dem Hinweis «nicht ISO-konform» gekennzeichnet. Damit wird den Anforderungen der ISO-Normen 14040 und 14044 in vorbildlicher Weise entsprochen.

### **Einschätzung von Umfang, Zweckmässigkeit und Konsistenz der verwendeten Daten**

Im Rahmen der Studie wurden Sachbilanzdaten zur Gewinnung von natürlichen Gesteinskörnungen in vier unterschiedlichen Kieswerken erhoben. Die den Daten zugrunde liegenden Informationsquellen werden detailliert referenziert. Damit legt die Studie im Bereich Kiesabbau ein solides Fundament. Die im Rahmen dieser Studie erhobenen Primärdaten zu Kieswerken werden in den weiteren Ökobilanzen nicht genutzt. Stattdessen

## Review-Bericht

wird der ecoinvent-Datensatz verwendet, der im Bereich der Flächennutzung einen offensichtlichen Fehler enthält (Flächennutzung der Kiesgewinnung ist um einen Faktor 10 zu hoch) und damit die Ergebnisse dieses Wirkungsindikators verfälscht. Im Weiteren wurden Daten zu den Aufwendungen eines mobilen Brechers zur Herstellung von Misch- und Betongranulat erhoben. Als weitere Informationsquellen dienen die Daten des ecoinvent-Datenbestandes Version 2.01 und persönliche Auskünfte des Vertreters des Auftraggebers (Letzteres gilt beispielsweise für die Unterschiede in den Zementgehalten von Beton mit natürlicher Gesteinskörnung und Recycling-Beton).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Rezeptur der Betone wie auch die Transportdistanzen und -mittel eine zentrale Rolle spielen. Deshalb ist es aus Sicht der Gutachter wichtig, dass in zukünftigen Ökobilanzen die Angaben zur Zementproduktion (Angaben zu verwendeten Ersatzbrennstoffen), Zementherkunft, zum Zementgehalt, zur Zementart und zu den Transportdistanzen und -mitteln (insbesondere in Bezug auf mögliche Unterschiede zwischen Betonen aus natürlichen und solchen aus rezyklierten Gesteinskörnungen) möglichst fallspezifisch erhoben werden, repräsentativ sind und auf einer soliden Informationsbasis beruhen.

Die Studie identifiziert ein Verbesserungspotenzial bezüglich der Datenlage zu stationären Brechern. Im Vergleich zu Zementherkunft, Zementgehalt, Zementart und Transportdistanzen (und -mitteln) ist die geringe bis mittlere Datenqualität bezüglich des Energiebedarfs stationärer Brecher von untergeordneter Bedeutung. In der Ökobilanz zu Betonen wird bei Konstruktionsbeton Betongranulat und bei Magerbeton Mischgranulat als Gesteinskörnung eingesetzt. Da Betongranulat im RC-Beton ähnliche materialtechnische Eigenschaften hat wie die natürliche Gesteinskörnung, ist die Vergleichbarkeit, bezogen auf einen  $m^3$  Beton, sichergestellt. Die gewählte Differenzierung der Anwendungsfälle von Betongranulat und Mischgranulat ist zweckmässig und zielführend. Sie garantiert die Vergleichbarkeit der Varianten.

Die Ökobilanzen zu einem Gebäude beziehungsweise einer Region basieren auf realen, aber anonymisierten Bauprojekten und Situationen. Dadurch erhalten sie den Charakter von Fallstudien, was sie sehr anschaulich

macht. Sensitivitätsanalysen zeigen auf, dass keine verallgemeinernden Aussagen möglich sind und auch hier Fragen der Zementherkunft, des Zementgehalts, der Zementart und der Transportdistanzen und -mittel von ausschlaggebender Bedeutung sein können.

Zusammen mit der Beschreibung der Sachbilanzdaten wird auch deren Datenqualität gewürdigt. Damit wird die Leserschaft in vorbildlicher Weise über die unterschiedliche Belastbarkeit der verwendeten Sachbilanzdaten informiert.

### **Einschätzung der Inhaltlichen Konsistenz von Zielsetzung und Folgerungen**

Die Zielsetzungen der in der Studie präsentierten Ökobilanzen sind vielfältig. Es werden das Herstellen von natürlicher mit rezyklierter Gesteinskörnung und das Herstellen von Betonen mit verschiedenen Gesteinskörnungen verglichen. Im Weiteren wird eine Situation betrachtet, in welcher der Beton eines bestehenden Gebäudes zu entsorgen beziehungsweise zu verwerten und Beton für einen Ersatzneubau bereitzustellen ist. In der vierten Ökobilanz wird eine vergleichende Betrachtung der Verwendung von anfallendem Betonabbruch in einer Modellregion durchgeführt. Die Ergebnisse werden einerseits in jeder der vier Ökobilanzen interpretiert und die Folgerungen werden unter Berücksichtigung aller vier Ökobilanzen formuliert. Die Interpretationen in den einzelnen Ökobilanzen sind gut auf die Erkenntnisse der Ergebnisdiskussion abgestimmt. Die Schlussfolgerungen fokussieren auf vier Aspekten:

1. Signifikanz der Unterschiede je Umweltwirkung,
2. Zementmenge und Zementart,
3. Deponieren oder Rezyklieren und
4. Transportdistanzen.

Die Folgerungen sind sehr differenziert formuliert. Folgerung (iv) widerspiegelt mit seiner neutralen Formulierung die Erkenntnisse in idealer Weise. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse kommen die Gutachter zum Schluss, dass zwischen Betonen aus rezyklierter und natürlicher Gesteinskörnung keine signifikanten Unterschiede bezüglich Umweltbelastung bestehen – mit Ausnahme des deutlich geringeren Kiesbedarfs im Falle von rezyklierter Gesteinskörnung. Verallgemeinernde Aussagen können aufgrund der geringen Unterschiede

nicht gemacht werden. Differenziertere Aussagen sind eher bei einer Bilanzierung von konkreten Bauprojekten möglich. Die Mitglieder des Prüfungsausschusses beurteilen die Konsistenz von Zielsetzung, Bericht und Folgerungen als ausreichend.

#### **Einschätzung von Transparenz und Konsistenz des Berichts**

Der Bericht weist die für eine Ökobilanz wesentlichen Kapitel auf. Die Ziele und die jeweils gültigen Untersuchungsrahmen sind klar beschrieben und mit Grafiken illustriert. Durch die Präsentation von vier aufeinander aufbauenden Ökobilanzen weist der Bericht eine klare Struktur auf. Dieser modulare Aufbau erhöht die Nachvollziehbarkeit der Bilanzen und Ergebnisse. Die Sachbilanzdaten der Kieswerke wie auch die Sachbilanzdaten der übrigen Prozesse werden zum Grossteil in Anhängen gezeigt. Die Studie weist damit einen sehr hohen Grad an Transparenz auf. Die Ergebnisse auf Stufe Sachbilanz und Wirkungsabschätzung werden ausführlich in Tabellen und Grafiken präsentiert und diskutiert.

Die Folgerungen nehmen einen Teil der Erkenntnisse aus den Ergebnisdiskussionen auf. Bei den gewählten Formulierungen besteht ein Optimierungspotenzial bezüglich Klarheit einerseits und Schwerpunktsetzung andererseits. Der Bericht macht einen weitgehend konsistenten, abgerundeten Eindruck.

#### **Einschätzung der Korrektheit der Modellierung und der Ergebnisse**

Die Gutachter hatten Gelegenheit, die Implementierung der Daten in der verwendeten Software Umberto mittels Screenshots zu überprüfen. Die Übereinstimmung der Beschreibung der Modellierung im Bericht und die entsprechende Modellierung in Umberto wurden ebenfalls stichprobenartig überprüft. Diese Kontrollen der Gutachter haben in wenigen Einzelfällen zu Korrekturen in den Datenmodellen geführt. Insgesamt beurteilt der Prüfungsausschuss die Modellierung der Ökobilanzen als detailliert, zweckmässig und sehr sorgfältig.

#### **Fazit**

Die Studie behandelt ein für die Schweizer Bauwirtschaft wichtiges und aktuelles Thema. Die Umweltauswirkungen der Verwendung von natürlicher beziehungsweise

rezyklierter Gesteinskörnung in Betonen und in loser Form wurden aus vier verschiedenen Blickwinkeln quantifiziert und verglichen. Die Studie liefert einen soliden und wichtigen Beitrag zur Diskussion über die optimale Verwendung von Beton- und Mischgranulaten und dem Stellenwert von Zementmenge, Zementart, Klinkerherstellung und Transportaufwendungen. Die Modellierung erfolgte gründlich und auf dem Stand der Technik bezüglich Ökobilanzierung. Ausführliche Sensitivitätsanalysen helfen der Leserschaft die sensitiven Grössen zu erkennen und damit die Robustheit der Ergebnisse und der daraus abgeleiteten Folgerungen einzuschätzen. Die Ergebnisse der vier Ökobilanzen sind, mit Ausnahme des Indikators «Ressource Kies» (alle vier Fragestellungen) und des Indikators «Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung» (fiktives Bauprojekt) nicht eindeutig. So ist beispielsweise eine Beurteilung der Frage, welche der Gesteinskörnungen in konkreten Anwendungen Vorteile bezüglich einzelner Umweltwirkungen wie Energieressourcen, Treibhauseffekt, Versauerung oder Atemwegserkrankungen aufweist, nur bedingt möglich, weil die Unterschiede teilweise nicht signifikant sind. Durch Ergänzungen einerseits und prägnantere Formulierungen andererseits könnten die Folgerungen noch besser auf die Erkenntnisse aus den umfangreichen Analysen und Ergebnisse abgestimmt werden. Durch die geringen Unterschiede (Ausnahme bildet hier die Ressource Kies) kann erst auf der Basis von konkreten Anwendungsfällen entschieden werden, ob beispielsweise aus Klimaschutzgründen der rezyklierten oder der natürlichen Gesteinskörnung der Vorzug gegeben werden soll. Hierbei kann es erforderlich sein, zwischen dem Klimaschutz und dem Schonen der Kiesreserven eine Güterabwägung vorzunehmen.

Der Prüfungsausschuss kommt zum Schluss, dass die Studie (mit Ausnahme des speziell markierten Anhangs A) den Anforderungen der Normen ISO 14040 und 14044 weitestgehend entspricht.

Uster, 3. Mai 2010

Dr. Rolf Frischknecht

im Namen des Prüfungsausschusses

# Anhang A: UBP-Betrachtung

In diesem Anhang wird eine Wirkungsabschätzung mit dem Verfahren der ökologischen Knappheit nach Frischknecht et al. (2009) vorgestellt. Diese Methode ist nicht konform mit der ISO 14040 und ist deswegen nicht Teil der vorliegenden Studie, die einer Prüfung auf ISO-Konformität unterzogen wurde.

Tatsächlich wurden aber im Rahmen dieser Untersuchungen alle Ökobilanzen auch mit der Methode der ökologischen Knappheit bewertet. Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse basieren auf den gleichen Grundlagen für die Systemabgrenzung, Datenerfassung und Modellierung wie die im Bericht beschriebenen Ergebnisse und sollen diese zum Zweck der unternehmensinternen Kommunikation der Holcim (Schweiz) AG ergänzen.

Die Darstellung in Abb. A.1 korrespondiert mit den Darstellungen in den Abb. 4.6, 4.8, 5.8, 5.10, 6.7 und 7.7.

Die Darstellung in Abb. A.2 korrespondiert mit den Darstellungen in den Abb. 5.7 und 5.9.

Die Darstellung in Abb. A.3 korrespondiert mit den Darstellungen in den Abbildungen 4.5 und 4.7.

Die Darstellung in Abb. A.4 korrespondiert mit den Darstellungen in den Abbildungen 6.6 und 7.6.

		Herstellung natürlicher Gesteinskörnung	Betonherstellung	Zementherstellung	Herstellung rezyklierter Gesteinskörnung	–
Konstruktionsbetone	C30/37	6.94E+04	1.64E+04	1.22E+05	0.00E+00	2.08E+05
	RC-Beton C30/37	4.85E+04	1.64E+04	1.29E+05	1.31E+03	1.96E+05

		Herstellung natürlicher Gesteinskörnung	Betonherstellung	Zementherstellung	Herstellung rezyklierter Gesteinskörnung	–
Magerbetone	scoinvent, ngk	6.70E+04	1.51E+04	6.06E+04	0.00E+00	1.43E+05
	Magerbeton, 100% RC	0.00E+00	1.51E+04	8.08E+04	2.67E+03	9.86E+04
	Magerbeton	6.58E+04	1.51E+04	8.08E+04	0.00E+00	1.62E+05
	Magerbeton, 15% RC	5.57E+04	1.51E+04	8.08E+04	4.07E+02	1.52E+05

		Herstellung der Aufbereitungsanlage (inkl. Instandhaltung) und Landnutzung	Betrieb der Aufbereitungsanlage und Kiesabbau	Herstellung und Betrieb der Baumaschinen für Aufschluss, Abbau und Rekultivierung	sonstige Transporte (u.a. zum Be- und Entladen)	–
natürlich Gesteinskörnung	scoinvent	1.64E+00	3.13E+01	1.75E+00	3.12E-02	3.47E+01
	Agile	7.42E-01	3.13E+01	1.34E+00	0.00E+00	3.34E+01
	Brunnen	7.00E-01	3.49E+01	2.30E+00	3.38E-02	3.79E+01
	Mülligen	9.20E-01	3.13E+01	9.98E-01	1.10E-02	3.32E+01
	Oberdorf	5.53E-01	3.17E+01	5.14E+00	8.14E-02	3.75E+01

		Aufbereitungsanlage (Herstellung, Instandhaltung, Unterhalt und Betrieb)	Be- und Entladen (Baumaschinen)	Transport der Aufbereitungsanlage zwischen den Baustellen	–
Recycling-Gesteinskörnung (100% Allokationsfaktor)	stationäre Anlage	1.75E+00	1.46E+00	0.00E+00	3.21E+00
	mobile Anlage	2.40E+00	1.43E+00	7.27E-03	3.83E+00

		Herstellung natürlicher Gesteinskörnung	Betonherstellung	Zementherstellung	Aufbereitung/Deponie rezyklierte Gesteinskörnung	Transport natürliche Gesteinskörnung	Transport rezyklierte Gesteinskörnung	Transport Frischbeton	–
fiktives Bauprojekt	Variante 1	6.94E+08	1.50E+08	1.22E+09	1.69E+08	1.08E+08	0.00E+00	2.02E+07	2.37E+09
	Variante 2 (RC-Beton)	4.85E+08	1.52E+08	1.29E+09	1.60E+07	3.99E+07	2.52E+07	4.72E+07	2.06E+09

		Bereitstellung ngk	Betonproduktion	Zement	Bereitstellung RC-GK	Transport ngk	Transport RC-GK	Transport Frischbeton	–
regionale Betrachtung	Szenario A (RC-GK)	2.52E+11	3.30E+10	2.69E+11	2.88E+09	3.73E+10	1.54E+09	7.93E+09	6.05E+11
	Szenario B (RC-Beton)	2.46E+11	3.34E+10	2.85E+11	2.88E+09	3.96E+10	1.54E+09	7.93E+09	6.16E+11

**Abb. A.1**  
**Ergebnisse UBP-Betrachtung Ökobilanzen**  
 Die Ergebnisse dieser Wirkungsabschätzung sind nicht konform mit der ISO 14040.



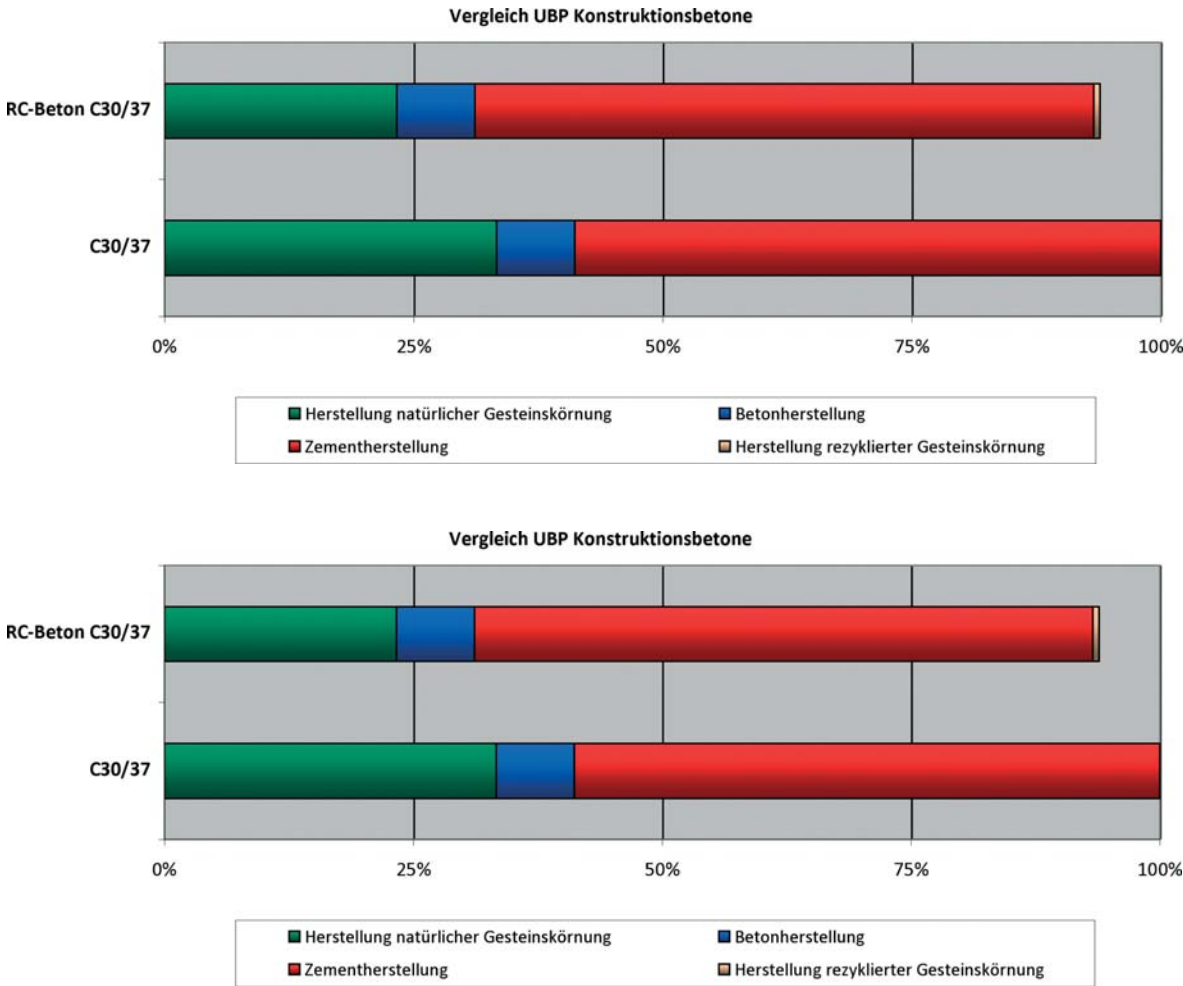
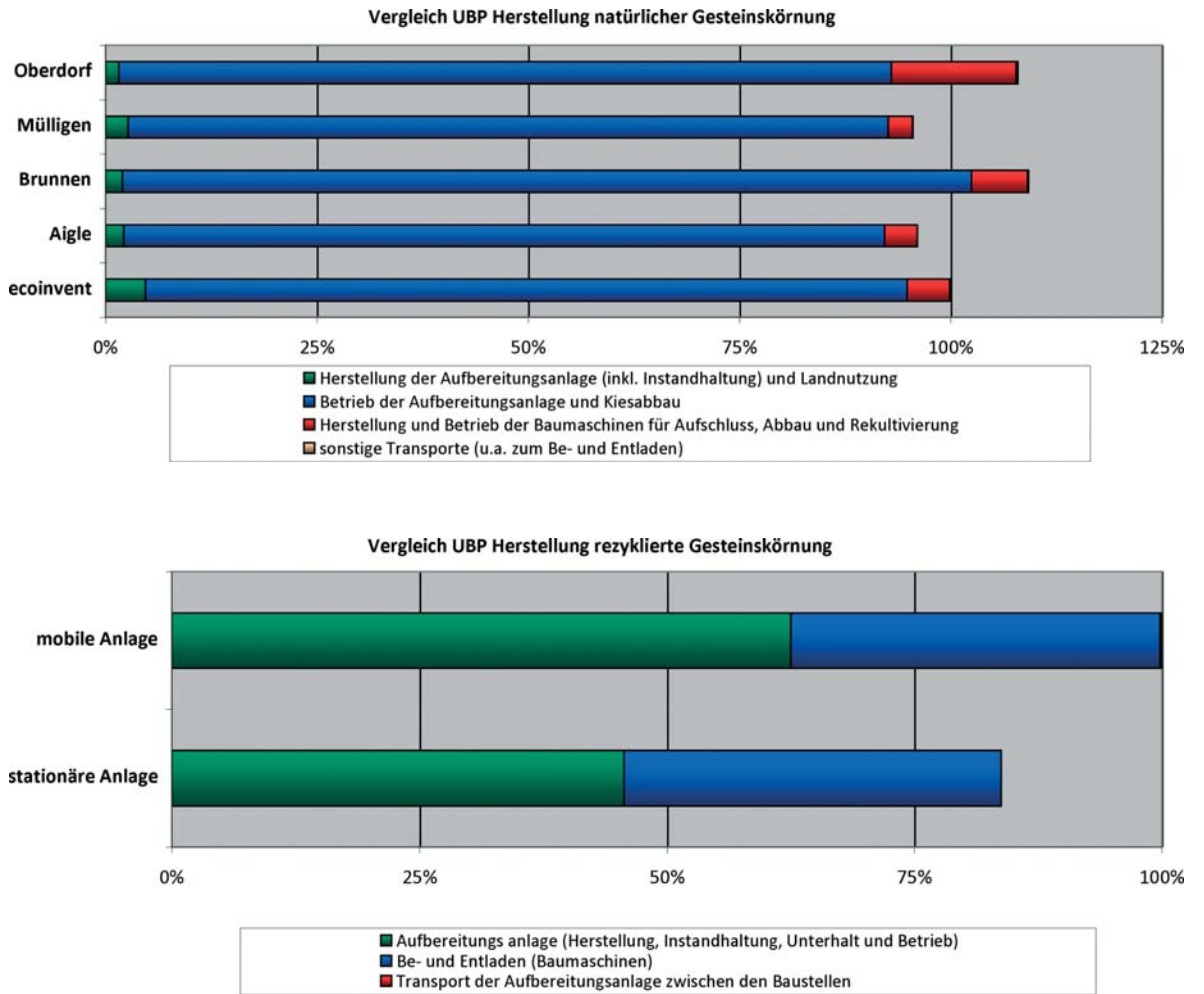


Abb. A.2  
Vergleich UBP-Betrachtung Betone  
Die Ergebnisse dieser Wirkungsabschätzung sind nicht konform mit der ISO 14040.

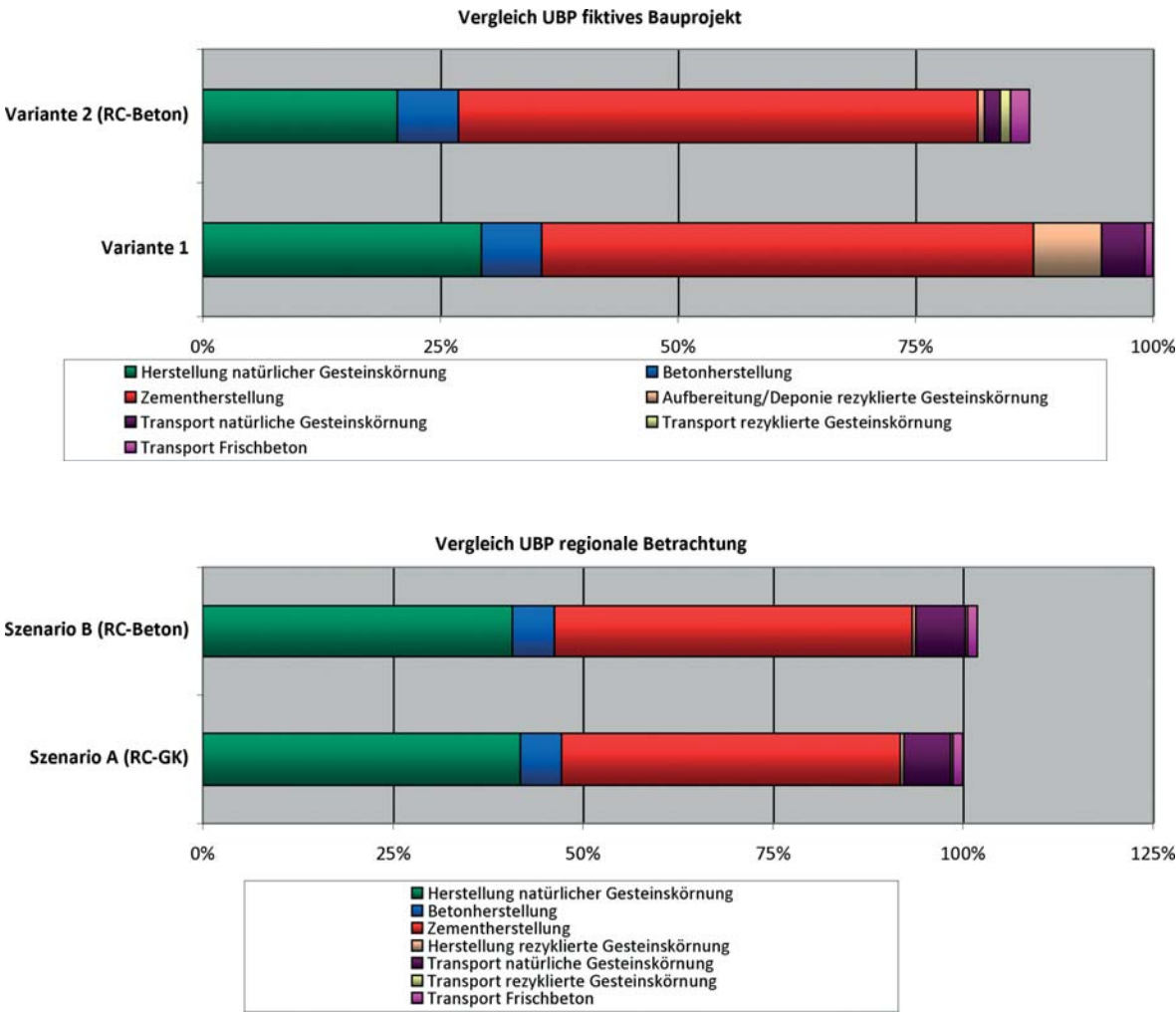
## Anhang



**Abb. A.3**

### Vergleich UBP-Betrachtung Gesteinskörnungen

Die Ergebnisse dieser Wirkungsabschätzung sind nicht konform mit der ISO 14040.



**Abb. A.4**  
**Vergleich UBP-Betrachtung Szenariorechnung**  
Die Ergebnisse dieser Wirkungsabschätzung sind nicht konform mit der ISO 14040.

## Anhang B: Inventardaten Aufbereitung Gesteinskörnung und Betonherstellung

Quellenangaben Inventardaten:

- 1 Schweizerische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Dübendorf
- 2 Künniger T., Werner F. und Richter K. (2001) Ökologische Bewertung von Kies, Zement und Beton in der Schweiz. Schweizerische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Dübendorf
- 3 Rundkies ab Werke Holcim; vorliegende Studie
- 4 Persönliche Kommunikation S. Bischof, Holcim (Schweiz) AG, 10.2.2009 bzw. 2.4.2009
- 5 Datengrundlage Kieswerk Aigle, erfasst durch R. Grüniger, Holcim (Schweiz) AG, 01/2009
- 6 Datenerfassung Holcim gemäss Anhang D1–D4
- 7 Schöffeler U. und Keller M. (2008), Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Offroad-Sektors. Studie für die Jahre 1980–2020. Umwelt-Wissen Nr. 0828. Bundesamt für Umwelt (Bafu), Bern.
- 8 Doka G. (2000), Ökoinventar der Entsorgungsprozesse von Baumaterialien. Schweizerische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Dübendorf.
- 9 Persönliche Kommunikation G. Doka, Doka Ökobilanzen, 17.3.2009
- 10 Abschätzung IBU aufgrund (8)
- 11 Persönliche Kommunikation Dr. S. Rubli, Energie- und Ressourcen-Management GmbH, 9.7.2009
- 12 Kellenberger D., Althaus H.-J., Jungbluth N. und Künniger T. (2007), Life Cycle Inventories of Building Products. Final report ecoinvent data V2.0 No. 7. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Empa – TSL, Dübendorf, CH

# Anhang

Stoffflussinformationen			Erscheinen ecoinvent							Unsicherheit
Input	Prozess	Output	Bemerkungen	Länderbezug	ecoinvent-Bezeichnung	Wert	Einheit	Quelle	Datenqualität	
Zement	spezifizierbar	normaler Beton ab Werk, ecoinvent	Bereitstellung Zemente exklusiv Transporte zum Betonwerk	CH	cement, unspecified, at plant	variabel	kg	1	gut	
	CEM II / A-L 32.5			CH	portland calcareous cement, at plant	variabel	kg	2	gut	
	CEM I / 42.5			CH	portland cement, strength class Z 42.5, at plant	variabel	kg	2	gut	
	CEM I / 52.5			CH	portland cement, strength class Z 52.5, at plant	variabel	kg	2	gut	
	CEM II / A-S 42.5			CH	portland slag sand cement, at plant	variabel	kg	2	gut	
CEM III	CH		blast furnace slag cement, at plant	variabel	kg	2	gut			
Gesteinskörnung	natürlich (ecoinvent)		Bereitstellung Gesteinskörnung für die Betonherstellung exklusiv Transporte zum Betonwerk	CH	gravel, round, at mine	variabel	kg	2	gut	
	natürlich (Aigle)			CH	-	variabel	kg	3	gut	
	natürlich (Mülligen)			CH	-	variabel	kg	3	gut	
	natürlich (Oberdorf)			CH	-	variabel	kg	3	gut	
	recycliert			CH	-	variabel	kg	4	schlecht	
Wasser			Wassermenge für die Betonherstellung	CH	tap water, at user	variabel	kg	2	gut	
in Baumaschine verbrannter Diesel			interne Transporte	global	diesel, burned in building machine	2.27E+01	MJ	2	gut	
Elektrizität			für die Produktion nötige Menge	CH	electricity, medium voltage, at grid	4.36E+00	kWh	2	gut	
Gas			für die Produktion nötige Menge	europäisch	natural gas, burned in industrial furnace low- NOx > 100kW	1.16E+00	MJ	2	gut	
Heizöl	Heizöl EL		für die Produktion nötige Menge	CH	light fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating	1.33E+01	MJ	2	gut	
	Heizöl S			CH	heavy fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating	3.09E+00	MJ	2	gut	
Schmieröl			Schmierfett / -öl	europäisch	lubricating oil, at plant	1.19E-02	kg	2	gut	
Transporte	Lastwagen 16t		Prozessmaterialien und Abfallabtransport	CH	transport, lorry, 3.5-20t, fleet average	9.98E-01	tkm	2	mittel - gut	
	Lastwagen 28t		Betriebsstoffe	CH	transport, lorry, 20-28t, fleet average	9.44E+00	tkm	2	mittel - gut	
	Schiff	Zementtransport	europäisch	transport, barge	4.92E+01	tkm	2	mittel - gut		
	Bahn	Zementtransport	CH	transport, freight, rail	6.82E+00	tkm	2	mittel - gut		
Stahl		Verschleissteile	europäisch	steel, low-alloyed, at plant	2.38E-02	kg	2	gut		
Kunststoff		Verschleissteile	europäisch	synthetic rubber, at plant	7.13E-03	kg	2	gut		
Betonwerk		Produktionsvolumen: 5.2 Mio. t Beton über 50 Jahre	CH	concrete mixing plant	4.57E-07	Einheit	2	mittel		
		Abwärme		gleiche Menge wie gebrauchte Elektrizität	1.57E+01	MJ	2	gut		
		Prozessabfallstoffe	CH	Betonverluste während Produktion	1.69E+01	kg	2	gut		
		Haushaltsabfälle	CH	diverse Abfälle	9.51E-02	kg	2	gut		
		Behandlung Prozessabwasser	CH	treatment, concrete production effluent, to wastewater treatment, class 3	1.43E-02	m³	2	gut		
		Beton	CH	concrete, normal, at plant	1.00E+00	m³	2	-		
variabel										
fix										

Abb. B.1  
Überblick über das Inventar «normaler Beton ab Werk, ecoinvent»

# Anhang

Stoffflussinformationen			Erscheinen ecoinvent							Unsicherheit	
Input	Prozess	Output	Bemerkungen	Länderbezug	ecoinvent-Bezeichnung	Wert	Einheit	Quelle	Datenqualität		
natürliche Ressource	gebundener Kies		4% Verluste bei Abbau	-	gravel, in ground	1.04E+00	kg	2	gut		
			Daten in Aigle erhoben; Anpassung an Produktionsmenge bei den anderen Werken	europäisch	steel, low-alloyed, at plant	variabel	kg	5	gut		
Anlagen	Stahl			europäisch	synthetic rubber, at plant	variabel	kg	5	gut		
	Gummi			europäisch	polyurethane, rigid foam, at pant	variabel	kg	5	gut		
	PU			europäisch	offene Fläche	-	occupation, mineral extrction site	variabel	m²a	6	gut
Ländernutzung	Nutzung durch Ressourcenabbau			-	befahrbare Fläche Werkareal	-	occupation, traffic area, road network	variabel	m²a	6	gut
	Nutzung durch Verkehrswege			-	durch Bauwerk versiegelte Fläche	-	occupation, industrial area	variabel	m²a	6	gut
	Nutzung durch Industriebetrieb				Dichte: 0.8325 kg/l	CH	diesel, at regional stage	variabel	kg	6	mittel
Aufschluss, Abbau, Reaktivierung	verbrannter Diesel in Baumaschinen				aufgrund Leistung und Jahrgang gemäss BAFU <sup>1)</sup>	CH	carbon monoxide, fossil	variabel	kg	6/7	gut
	Emissionen CO				aufgrund Leistung und Jahrgang gemäss BAFU <sup>1)</sup>	CH	hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified	variabel	kg	6/7	gut
	Emissionen HC				aufgrund Leistung und Jahrgang gemäss BAFU <sup>1)</sup>	CH	nitrogen oxides	variabel	kg	6/7	gut
	Emissionen NO <sub>x</sub>				aufgrund Leistung und Jahrgang gemäss BAFU <sup>1)</sup>	CH	carbon dioxide, fossil	3.15 g/€ <sub>netto</sub>	kg	7	gut
	Emissionen CO <sub>2</sub>				aufgrund Leistung und Jahrgang gemäss BAFU <sup>1)</sup>	CH	particulates, ... µm	variabel	kg	6/7	gut
	Feinstaub					Lebensdauer 25a	europäisch	steel, low-alloyed, at plant	variabel	kg	6
Betrieb-Anlagen	Elektrizität				nur Kiesproduktion	CH	electricity, medium voltage, at grid	variabel	kWh	6	mittel - gut
	Stahlverschleiss				-	europäisch	steel, low-alloyed, at plant	variabel	kg	6	mittel
	Gummiverschleiss				-	europäisch	synthetic rubber, at plant	variabel	kg	6	mittel
	Schmierölverbrauch				Dichte: 0.85 kg/l	europäisch	lubricating oil, at plant	variabel	kg	6	mittel
	Heizölverbrauch				Heizwert 36 MJ/l	CH	heat, light fuel oil, at boiler 10kW, non-modulating	variabel	MJ	6	mittel
	Entsorgung Nebenprodukte				Nebenprodukte Betonproduktion	CH	disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill	variabel	kg	6	mittel
	Entsorgung Haushaltsabfälle				Annahme Dichte: 400kg/m³	CH	disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to municipal incineration	variabel	kg	6	mittel
	Sprengen				Tovex Sprengstoff	europäisch	blasting	variabel	kg	6	gut
Transporte	Fahrzeuge <3.5t				grubeninterne Transporte	CH	transport, van <3.5t	variabel	tkm	6	schlecht
	fix				-	CH	-	1.00E+00	kg	6	-

Abb. B.2 Überblick über das Inventar «Kies ab Werke Holcim»

Stoffflussinformationen			Erscheinen ecoinvent							Unsicherheit
Input	Prozess	Output	Bemerkungen	Länderbezug	ecoinvent-Bezeichnung	Wert	Einheit	Quelle	Datenqualität	
Beladung	Stationäre Aufbereitung Recycling-Gesteinskörnung			europäisch	excavation, hydraulic digger	5.56E-04	m³	8	schlecht	
Elektrizität				CH	electricity, low voltage, at grid	3.70E-03	kWh	8	schlecht	
Entsorgung Inertstoffe					CH	disposal, inert material, 0%water, to sanitary landfill	5.00E-02	kg	8	schlecht
Sortieranlage für Bauabfälle					CH	sorting plant for construction waste	1.00E-10	Einheit	8	schlecht
					CH	disposal, building, concrete gravel, to sorting plant	9.50E-01	kg	9	-

Abb. B.3 Überblick über das Inventar «stationäre Aufbereitung Recycling-Gesteinskörnung»

## Anhang

Stoffflussinformationen			Erscheinen ecoinvent						Unsicherheit		
Input		Prozess	Output	Bemerkungen	Länderbezug	ecoinvent-Bezeichnung	Wert	Einheit	Quelle	Datenqualität	
Brecher	Stahl	Mobile Aufbereitung Recycling-Gesteinskörnung		Annahme: 100% des gesamten Anlagengewichts	europäisch	steel, low-alloyed, at plant	4.33E-05	kg	4	gut	
	Schmieröl		-	europäisch	lubricating oil, at plant	8.02E-07	kg	4	mittel		
	Diesel		-	CH	diesel, at regional storage	3.94E-04	kg	4	gut		
	Entsorgung Inertstoffe		-	CH	dipsoal, inert material, 0% water, to sanitary landfill	5.00E-02	kg	11	gut		
Be- und Entladen	Pneulader			entspricht 'sorting plant' ecoinvent	europäisch	excavation, skid-steer loader	5.29E-04	m <sup>3</sup>	10	schlecht	
				Verschiebung alle 15'000t (Produktionsmenge)	CH	transport, lorry 20-28t, fleet average	5.75E-05	tkm	Holcim	mittel	
Transporte					-	-	-	9.50E-01	kg	-	-
variabel				Recycling-Gesteinskörnung	1.14E-02 g/g <sup>Diesel</sup>	CH	carbon monoxide, fossil	4.49E-06	kg	12	gut
fix				Emissionen CO <sub>2</sub>	3.12E+00 g/g <sup>Diesel</sup>	CH	carbon dioxide, fossil	1.23E-03	kg	12	gut
				Emissionen NO <sub>x</sub>	4.40E-02 g/g <sup>Diesel</sup>	CH	nitrogen oxides	1.73E-05	kg	12	gut
			Feinstaub	4.48E-03 g/g <sup>Diesel</sup>	CH	particulates, ... µm	1.77E-06	kg	12	gut	

Annahmen:	Produktionsmenge [t·h <sup>-1</sup> ]:	1.12E+02	
	Gewicht Anlage [t]:	5.50E+04	
	Anteil Stahl am Gewicht [%]:	1.00E+02	
	Lebensdauer [h <sub>a</sub> ]:	3.00E+04	
	Verschleissteile [Gewichts-%]:	1.50E+02	
	Schmierölverbrauch [l·h <sup>-1</sup> ]:	1.00E-01	(Dichte = 0.85 kg·l <sup>-1</sup> )
	Dieserverbrauch [l·t <sub>Input</sub> <sup>-1</sup> ]:	4.50E-01	(Dichte = 0.8325 kg·l <sup>-1</sup> )
	Ausbeute [%]:	9.95E+01	
	Korrekturfaktor Rubli [-]:	1.05E+00	(da Ausbeute angepasst auf 95%)
	Be- und Entladung [m <sup>3</sup> ·t <sub>Output</sub> <sup>-1</sup> ]:	5.05E-04	
	Transportintervall [t <sub>Output</sub> <sup>-1</sup> ]:	6.67E-08	
	mittlere Transportdistanz [km]:	1.50E+01	

**Abb. B.4**  
Übersicht über das Inventar «mobile Aufbereitung Recycling-Gesteinskörnung»

# Anhang C: Beschreibung der Kiesgruben

## Kieswerk Aigle

Im Kieswerk Aigle wird Kies über dem Grundwasser mit Baggern und Planierraupen abgebaut. Nach Erreichen der Grundwasserschicht wird weiter mit Eimerkettenbaggern und Schwimmbaggern abgebaut. Die Baumaschinen setzen dabei nur ein relativ kleines Volumen um und der wesentliche Teil des Abbaus erfolgt über die Eimerkettenbagger und Schwimmbagger. Eine Zurechnung der Umweltbelastungen der Baumaschinen auf die hergestellte Menge ist daher mit grossen Unsicherheiten behaftet.



Der Aufschluss des Bergwerkfelds erfolgt durch Abtragen des Mutterbodens sowie nicht nutzbarer Schichten mit Lehm und Ton mit Radladern und Bulldozern. Dieser Abraum wird für die spätere Verfüllung des Baggersees und der Rekultivierung am Standort gelagert. Für Auffüllung und Rekultivierung wird zudem externer Aushub verwendet, der aus einer durchschnittlichen Distanz von 50 km mit dem Lastwagen angeliefert wird.

Der Kies wird nach dem Abbau je nach Bedarf aufbereitet (waschen, brechen, sieben) und gelagert. Dazwischen finden verschiedene Transporte mit Förderbändern und Bulldozern statt. Es werden verschiedene Infrastrukturtteile benötigt: Kiesgrube, Baumaschinen, Silos, Gebäude.

Im Werk Aigle werden auf die gesamte Produktionsmenge bezogen 35% Sand und 65% Kies produziert.

## Umweltbelastungen

Berücksichtigt werden der Ressourcenverbrauch durch Verbrauch von Treibstoffen (Baumaschinen) und Strom (Pumpen), Luftemissionen durch Abgase aus Verbrennungsmotoren und Brennern zur Bereitstellung von Raumwärme sowie die Landinanspruchnahme. Nicht berücksichtigt werden Staub (Begründung: Nassprozess), Abwärme, Washwasser und Schlamm (Begründung: Wasser im Kreislauf, Schlamm wird wieder in See geschüttet). Ein jährlicher Trinkwasserverbrauch von etwa 1300 m<sup>3</sup> wird vereinfachend nicht berücksichtigt. Durch das Verfüllen von externem Aushub erfolgt ausserdem eine Entsorgungsleistung, die in der Betrachtung nicht berücksichtigt wird.

## Kieswerk Brunnen

Im Kieswerk Brunnen wird in einem Steinbruch Felsmaterial abgebaut (Kalkstein), aus dem Schotter, gebrochener Sand und Wurfsteine hergestellt wird. Der Abbau erfolgt stufenweise (Höhe: rund 15 m) mit Sprengungen.



## Technische Beschreibung

1 Entlang eines Plateaus werden mit einem dieselbetriebenen Bohrer Löcher in 2 bis 3 m Entfernung zur Bruchkante gebohrt. In diese Löcher wird anschliessend der Sprengstoff eingebracht. Danach werden die einzelnen Löcher sprengtechnisch mit Zündern versehen und es wird eine Wand gesprengt.



- 2 Das gesprengte Material wird mit Radladern auf Dumper geladen, von wo aus es zum Aufgabetrichter (Punkt 4) gefahren wird.
- 3 Falls nach der Sprengung zu grosse Steine übrig bleiben, werden diese mit einem Meisselbagger zerkleinert und anschliessend mit einem Radlader auf den Dumper geladen.
- 4 Hier wird das Material von den Dumpfern abgeladen. Das Material fällt auf einen Aufgabetrichter, in dem der erste Brecher installiert ist. Das Material, das nun vorgebrochen ist, läuft entlang des Förderbandes zum Punkt 5.
- 5 Fallschacht: Hier fällt das Material in einen senkrechten Schacht (rund 80 m tief). Im kleinmassstäblichen Übersichtsbild ist ersichtlich, dass auf einem tieferen Niveau dieses Material wieder auf einem Förderband (Punkt 6) aus einem Stollen tritt und zum Kieswerk transportiert wird.
- A Eine Besonderheit in Brunnen ist die zusätzliche Herstellung von Wurfsteinen. Diese werden aus einer Sprengung herausortiert (meist rechteckige Steine mit einem Gewicht von bis zu acht Tonnen). Sie eignen sich hervorragend für den Bau von Hochwasserschutzmassnahmen.



- 7 Die eigentliche Aufbereitung des Materials findet im Kieswerk statt. Das Kieswerk Brunnen verfügt nur über eine Splittstrasse, da es ausschliesslich gebrochenes Material herstellt. Sind die Silos unterhalb des Kieswerks voll, werden die einzelnen Kornfraktionen zu den Aussensilos gefahren und dort gelagert.
- 8 Rückfahren/Aushubdeponie für sauberes Material: Hier bringen Bauunternehmer den sauberen, unbelasteten Aushub von Baustellen zur «Entsorgung» hin. Das Material wird von den Bauunternehmern mit

LKWs angeliefert. Dabei werden gegebenenfalls durch die Holcim Bodenproben genommen und im Labor ausgewertet. Ist das Material unbelastet, wird es von einem Bulldozer verschoben und verdichtet.

#### Umweltbelastungen

Ressourcenverbrauch von Diesel (Radlader, Bulldozer) und Strom (Pumpen, Kieswerk), Luftemissionen durch Abgase aus Verbrennungsmotoren. Ein jährlicher Trinkwasserverbrauch von etwa 11 000 m<sup>3</sup> wird vereinfachend nicht berücksichtigt.

## Kieswerk Mülligen

Im Werk Mülligen werden auf die gesamte Produktionsmenge bezogen 22% Sand und 78% Kies produziert.

#### Abbau



Wo die Gesteinskörnung für den Beton nicht durch Sieben und Waschen von Material aus Flüssen, Seen oder Gruben gewonnen werden kann, baut man sie in Steinbrüchen ab. Beim Abbauverfahren, wie es das Bild zeigt, wird die Kieswand mit einem Wasserstrahl unterspült, bis sie lawinenartig zusammenstürzt.

#### Technische Beschreibung

- 1 Der Aufschluss des Bergwerkfelds erfolgt durch Abtragen des Mutterbodens sowie nicht nutzbarer Schichten (Lehm, Ton) mit Radladern und Bulldozern. Dieser Abraum wird für die spätere Rekultivierung am Standort gelagert. Die Kieswand in Mülligen ist etwa 35 m hoch. Diese wird wie abgebildet im Wasserjetting-Verfahren abgebaut. Das so gewonnene Kiesmaterial wird mit einem Radlader aufgenommen und auf das

## Anhang



- im Übersichtsbild rot dargestellte Transportband aufgegeben. Bei der Aufgabe auf das Band kippt der Radlader das Material auf einen groben Rost, um etwaige grosse Steine > 400 mm auszusortieren. Diese werden separat gesammelt und gegebenenfalls ein- bis zweimal im Jahr mit einem mobilen Brecher verarbeitet. Anschliessend läuft das Material auf diesem Transportband bis zum kleinen Haus B. Dort ist der Vorbrecher (Primärbrecher) installiert. Dieser bricht das Material auf eine Grösse < 125 mm. Von dort läuft das Material zum Zwischendepot (Punkt 4). Dieses Zwischendepot hat ein Volumen von rund 2000–4000 Tonnen. Unterhalb dieses Zwischendepots sind Abzugsbänder installiert, von wo aus das Material des Zwischendepots letztlich in das Kieswerk transportiert wird, wo dann
- 5 die eigentliche Aufbereitung des Materials stattfindet. Das Kieswerk Mülligen verfügt sowohl über eine Rundstrasse als auch eine Splittstrasse. Auf der Rundstrasse wird das natürliche Material des Kiesabbaus nur gesiebt und gewaschen und in die einzelnen Kornfraktionen in separaten Silos gelagert. Die Splittstrasse verarbeitet das Material, welches gebrochen und in verschiedenen Fraktionen in Silos gelagert wird.
  - 6 Sind die Silos unterhalb des Kieswerkes voll, werden die einzelnen Kornfraktionen auf die Aussensilos gefahren und dort gelagert.
  - 7 Das angrenzende Betonwerk bezieht die Kieskomponenten direkt vom Kieswerk und benötigt keine separaten Transporte mehr.
  - 3 Im Absetzbecken setzen sich die Feianteile des zum Waschen des Kiesmaterials benutzten Wassers ab. Anschliessend wird das Wasser wieder zurückgepumpt und dem Kreislauf wieder zugeführt. Ein Teil des Waschwassers ist Frischwasser, welches der Reuss entnommen wird.

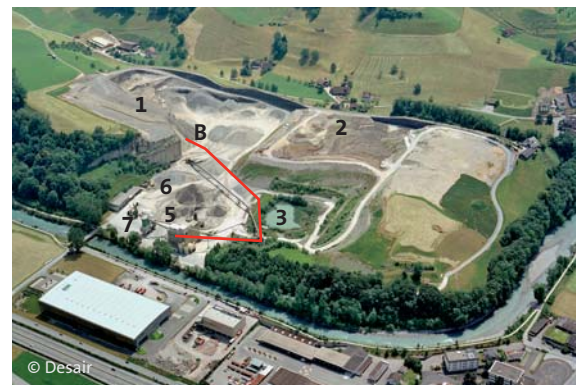
- 2 Rückfahren/Aushubdeponie für sauberes Material: Hier bringen Bauunternehmer den sauberen, unbelasteten Aushub von Baustellen zur «Entsorgung» hin. Anschliessend werden gegebenenfalls durch die Holcim Bodenproben genommen. Ist das Material unbelastet, wird es von einem Bulldozer verschoben und verdichtet.

### Umweltbelastungen

Ressourcenverbrauch von Diesel (Jettingmaschine, Radlader, Bulldozer) und Strom (Pumpen, Kieswerk), Luftemissionen durch Abgase aus Verbrennungsmotoren. Ein jährlicher Trinkwasserverbrauch von etwa 5800 m<sup>3</sup> wird vereinfachend nicht berücksichtigt.

## Kieswerk Oberdorf

Im Kieswerk Oberdorf werden in einer Kiesgrube Kies und Sand ab einer Kieswand abgebaut. Der Abbau erfolgt auf verschiedenen Abbaubermen (Höhe: rund 12 m) mithilfe eines Baggers. Dieser löst den Kies und wirft ihn eine Etage tiefer, von wo aus er mit Hilfe eines Radladers aufgenommen und auf das Transportband mit Brecher aufgegeben wird. Im Werk Oberdorf werden auf die gesamte Produktionsmenge bezogen 65% Sand und 35% Kies produziert.



### Technische Beschreibung

- 1 Der Aufschluss des Bergwerkfelds erfolgt durch Abtragen des Mutterbodens sowie nicht nutzbarer Schichten (Lehm, Ton) mit Radladern und Bulldozern. Dieser Abraum wird für die spätere Rekultivierung am Standort gelagert. Die Kieswände in Oberdorf sind rund 12 m hoch. Diese werden wie oben beschrieben mit Baggern und Radladern abgebaut. Das so gewonnene Kiesma-

terial wird mit Radladern aufgenommen und auf das im Übersichtsbild rot dargestellte Transportband aufgegeben. Bei der Aufgabe auf das Band kippt der Radlader das Material auf einen groben Rost, um etwaige grosse Steine > 400 mm auszusortieren. Diese werden separat gesammelt und gegebenenfalls ein- bis zweimal im Jahr mit einem mobilen Brecher verarbeitet. Im Aufgabetrichter für das Material ist der Vorbrecher (B), welcher das Material auf eine Grösse von < 125 mm bricht, integriert. Anschliessend läuft das Material auf diesem Transportband bis zum

- 5 Kieswerk, wo die eigentliche Aufbereitung des Materials stattfindet. Das Kieswerk Oberdorf verfügt sowohl über eine Rundstrasse als auch eine Splittstrasse. Auf der Rundstrasse wird das natürliche Material des Kiesabbaus nur gesiebt und gewaschen und in die einzelnen Kornfraktionen in separaten Silos gelagert. Die Splittstrasse verarbeitet das gebrochene Material und führt dieses ebenfalls in verschiedenen Fraktionen zu den Silos.
- 6 Sind die Silos unterhalb des Kieswerkes voll, werden die einzelnen Kornfraktionen auf die Aussensilos gefahren und dort gelagert.
- 7 Das angrenzende Betonwerk bezieht die Kieskomponenten direkt vom Kieswerk und benötigt keine separaten Transporte mehr.
- 3 Im Absetzbecken setzen sich die Feianteile des zum Waschen des Kiesmaterials benutzten Wassers ab. Anschliessend wird das Wasser wieder zurückgepumpt und dem Kreislauf wieder zugeführt. Ein Teil des Waschwassers ist Frischwasser, welches der Engelberger Aa entnommen wird.
- 2 Rückfahren/Aushubdeponie für sauberes Material: Hier bringen Bauunternehmer den sauberen, unbelasteten Aushub von Baustellen zur «Entsorgung» hin. Anschliessend werden gegebenenfalls durch die Holcim Bodenproben genommen. Ist das Material unbelastet, wird es von einem Bulldozer verschoben und verdichtet.

### **Umweltbelastungen**

Ressourcenverbrauch von Diesel (Radlader, Bulldozer) und Strom (Pumpen, Kieswerk), Luftemissionen durch Abgase aus Verbrennungsmotoren. Ein jährlicher Trinkwasserverbrauch von etwa 2300 m<sup>3</sup> wird vereinfachend nicht berücksichtigt.

# Anhang D: Detaillierte Beschreibung der Inventardaten der Kiesgruben und der Aufbereitungsanlagen

## Erläuterung des Inventars

### Baumaschinen

#### – Abbau

Umfasst den Diesel- und Stahlverbrauch der für den Kiesabbau benötigten Baumaschinen. Die Gesamtmasse der Stahlanteile in den Baumaschinen wird als Stahlgewicht bezeichnet. Die Berechnung der Werte für die Kategorie «Abbau» basiert auf Daten, welche von Holcim (Schweiz) AG geliefert wurden.

#### – Aufschluss & Rekultivierung

Grunddaten zum Aufschluss und Rekultivierung der Kieswerke wurden von Holcim (Schweiz) AG geliefert. Anhand dieser Daten wurden die Werte für den Stahl- und Dieselverbrauch berechnet.

#### – Emissionen

Die Emissionen umfassen Kohlenmonoxide (CO), Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Kohlenwasserstoffe (HC) und Partikel (PM). Die Partikel wurden zusätzlich in drei Subkategorien nach Partikelgrösse unterteilt (<2,5 Mikrometer, 2,5 bis 10 Mikrometer und >10 Mikrometer). Die prozentuale Aufteilung nach Partikelgrösse wurde aus der ecoinvent-Datenbank übernommen. Die Emissionswerte für die einzelnen Baumaschinen stammen aus der Studie von Schöffeler U. und Keller M. (2008), welche die Werte nach Leistungsklasse und Abgasemissionsstufen der Baumaschinen ausweist. Auf Basis dieser Werte wurden die durch den Kiesabbau entstehenden Gesamtemissionen einer Kiesgrube berechnet.

### Infrastruktur/Anlagen/Landnutzung

Umfasst die gesamte Infrastruktur und alle Anlagen (z. B. Brecherei, Siebanlage, Förderbänder, Container) sowie die durch den Betrieb des Kieswerks genutzte Landfläche, unterschieden nach Nutzungstyp (Ressourcenabbau, Verkehrswege, Industriebetrieb). Für die Infrastruktur und Anlagen wurden das Stahl-, Gummi- und Polyurethangewicht (PU-Gewicht) und die entsprechenden Verbrauchs-

werte ermittelt. Für das Kieswerk Aigle wurden die benötigten Daten von Holcim (Schweiz) AG angegeben. Die Werte für die übrigen Kieswerke wurden proportional zur durchschnittlichen Jahresproduktion berechnet. Nur die Landnutzung wurde für jedes Kieswerk individuell angegeben.

### Transporte

Umfasst alle Transporte innerhalb der Kiesgrube. Bewegungen von Baumaschinen sind hiervon explizit ausgeschlossen. Die Werte wurden von Holcim (Schweiz) AG anhand von jährlichen Treibstoffverbrauchsmengen angegeben.

### Kiesressource

Der Faktor «Kiesressource» gibt an, welche Menge Kies als Grundressource abgebaut werden muss, um daraus 1 kg Kies als Endprodukt zu gewinnen.

### Betrieb Anlagen

Umfasst den Strom-, Heizöl-, Stahl-, Kunststoff- und Schmierölbedarf, welcher für den Betrieb aller Anlagen benötigt wird. Des Weiteren wurde das Deponievolumen von Inertstoffen und Haushaltsabfällen erfasst.

Für die Datenerfassung in Umberto wurden die Werte des Inventars jeweils auf die Bezugseinheit von 1 kg abgebautem Kies umgerechnet ( $XY \cdot \text{kg}_{\text{Kies}}^{-1}$ ). Diese Werte sind im Inventar blau gekennzeichnet.

# Anhang

durchschnittliche Jahresproduktion [ $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$ ]:	3.00E+08
Lebensdauer [a]:	6.40E+01
gesamte Produktion während Lebensdauer [ $\text{kg} \cdot \text{a}$ ]:	1.92E+10

Aigle

in Umberto verwendete Daten

Baumaschinen	
<b>Abbau:</b>	
Dieselvebrauch [ $\text{l}_{\text{Diesel}} \cdot \text{a}^{-1}$ ]:	3.12E+04
Dieselvebrauch [ $\text{kg}_{\text{Diesel}} \cdot \text{a}^{-1}$ ]:	2.60E+04
Dieselvebrauch [ $\text{kg}_{\text{Diesel}} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	8.66E-05
Stahlgewicht [kg]:	1.82E+05
Stahlverbrauch [ $\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	2.42E-05
<b>Aufschluss &amp; Rekultivierung:</b>	
Dieselvebrauch [ $\text{l}_{\text{Diesel}} \cdot \text{Lebensdauer}^{-1}$ ]:	3.05E+06
Dieselvebrauch [ $\text{kg}_{\text{Diesel}} \cdot \text{Lebensdauer}^{-1}$ ]:	2.54E+06
Dieselvebrauch [ $\text{kg}_{\text{Diesel}} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	1.32E-04
Stahlverbrauch [ $\text{kg}_{\text{Stahl}} \cdot \text{Lebensdauer}^{-1}$ ]:	3.18E+05
Stahlverbrauch [ $\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	2.72E-05
<b>Emissionen (nur Abbau):</b>	
CO [ $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$ ]:	1.10E+03
CO [ $\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	3.65E-06
NO <sub>x</sub> [ $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$ ]:	3.24E+03
NO <sub>x</sub> [ $\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	1.08E-05
HC [ $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$ ]:	2.75E+02
HC [ $\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	9.18E-07
PM <sub>10</sub> [ $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$ ]:	1.54E+02
PM <sub>10</sub> [ $\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	5.15E-07
PM <sub>2.5</sub> [ $\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	4.63E-07
PM <sub>2.5-10</sub> [ $\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	2.06E-08
PM <sub>10-2.5</sub> [ $\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	3.09E-08
CO <sub>2</sub> [ $\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	5.18E-04

Transporte	
Benzinverbrauch [ $\text{l}_{\text{Benzin}} \cdot \text{a}^{-1}$ ]:	-
Kleintransporte [ $\text{tkm} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	-
<b>Kiesressource</b>	
Kiesressource [ $\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	1.04E+00

Abbau + Aufschluss + Rekultivierung

2.19E-04

5.14E-05

inkl. Aufschluss und Rekultivierung

4.86E-06

1.44E-05

1.22E-06

2.06E+02

6.85E-07

6.17E-07

2.74E-08

4.11E-08

6.90E-04

Infrastruktur/Anlagen/Landnutzung	
Stahlgewicht [kg]:	1.19E+06
Lebensdauer Stahlteile [a]:	2.50E+01
Ersatzrate [Stahlteile $\cdot \text{Lebensdauer}_{\text{Mittel}}^{-1}$ ]:	2.56E+00
Stahlverbrauch [ $\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	1.58E-08
Gummigewicht [kg]:	4.42E+04
Lebensdauer Gummiteile [a]:	5.00E+00
Ersatzrate [Gummiteile $\cdot \text{Lebensdauer}_{\text{Mittel}}^{-1}$ ]:	1.28E+01
Gummiverbrauch [ $\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	2.95E-05
PU-Teile [kg]:	2.90E+03
Lebensdauer PU-Teile [a]:	5.00E+00
Ersatzrate [PU-Teile $\cdot \text{Lebensdauer}_{\text{Mittel}}^{-1}$ ]:	1.28E+01
PU-Verbrauch [ $\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	1.93E-06
Nutzung durch Ressourcenabbau [ $\text{m}^3$ ]:	1.00E+05
Nutzung durch Ressourcenabbau [ $\text{m}^3 \cdot \text{a} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	3.33E-04
Nutzung durch Verkehrswege [ $\text{m}^3$ ]:	6.45E+04
Nutzung durch Verkehrswege [ $\text{m}^3 \cdot \text{a} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	2.15E-04
Nutzung durch Industriebetrieb [ $\text{m}^3$ ]:	1.00E+05
Nutzung durch Industriebetrieb [ $\text{m}^3 \cdot \text{a} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	3.33E-06

Betrieb Anlagen	
durchschnittlicher Stromverbrauch [ $\text{kWh} \cdot \text{a}^{-1}$ ]:	8.60E+05
durchschnittlicher Stromverbrauch [ $\text{kWh} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	2.87E-03
Stahlverschleiss [ $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$ ]:	4.95E+03
Stahlverschleiss [ $\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	1.65E-05
Kunststoffverschleiss [ $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$ ]:	3.00E+02
Kunststoffverschleiss [ $\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	1.00E-06
Schmierölverschleiss [ $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$ ]:	8.50E+02
Schmierölverschleiss [ $\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	2.83E-06
Heizwert Heizöl [ $\text{MJ} \cdot \text{I}^{-1}$ ]:	5.48E+03
Heizwert Heizöl [ $\text{MJ} \cdot \text{I}^{-1}$ ]:	3.60E+01
Heizölverbrauch [ $\text{MJ} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	6.57E-04
Deponie Inertstoffe [ $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ]:	5.00E+01
Dichte Inertstoffe [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]:	2.00E+03
Deponie Inertstoffe [ $\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	3.33E-04
Deponie Haushaltsabfälle [ $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ]:	5.00E+00
Dichte Haushaltsabfälle [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]:	4.00E+02
Deponie Haushaltsabfälle [ $\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{Gestein}}^{-1}$ ]:	6.67E-06

Abb. D.1  
Kieswerk Aigle – Datengrundlagen für das Inventar

# Anhang

durchschnittliche Jahresproduktion [kg a <sup>-1</sup> ]:	3.75E+08
Lebensdauer [a]:	5.50E+01
gesamte Produktion während Lebensdauer [kg a]:	2.06E+10

## Brunnen

in Umberto verwendete Daten

Baumaschinen	
<b>Abbau:</b>	
Dieselvebrauch [L <sub>norm</sub> a <sup>-1</sup> ]:	1.61E+05
Dieselvebrauch [kg <sub>norm</sub> a <sup>-1</sup> ]:	1.34E+05
Dieselvebrauch [kg <sub>norm</sub> kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	3.58E-04
Stahlgewicht [kg]:	2.19E+05
Stahlverbrauch [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	2.34E-05

Aufschluss & Rekultivierung:	
Dieselvebrauch [L <sub>norm</sub> Lebensdauer <sup>-1</sup> ]:	5.03E+04
Dieselvebrauch [kg <sub>norm</sub> Lebensdauer <sup>-1</sup> ]:	4.19E+04
Dieselvebrauch [kg <sub>norm</sub> kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	2.03E-06
Stahlverbrauch [kg <sub>Beton</sub> Lebensdauer <sup>-1</sup> ]:	2.42E+05
Stahlverbrauch [kg <sub>Beton</sub> kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.17E-05

Emissionen (nur Abbau):	
CO [kg a <sup>-1</sup> ]:	5.53E+03
CO [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.48E-05
NO <sub>x</sub> [kg a <sup>-1</sup> ]:	1.03E+04
NO <sub>x</sub> [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	2.74E-05
HC [kg a <sup>-1</sup> ]:	1.38E+03
HC [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	3.68E-06
PM <sub>10</sub> [kg a <sup>-1</sup> ]:	5.75E+02
PM <sub>10</sub> [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.53E-06
PM <sub>2.5</sub> [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.38E-06
PM <sub>2.5</sub> [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	6.13E-08
PM <sub>10</sub> [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	9.20E-08
CO <sub>2</sub> [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.13E-03

Transporte	
Benzinverbrauch [L <sub>norm</sub> a <sup>-1</sup> ]:	5.27E+02
Kleintransporte [tkm kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	4.92E-05
Annahmen:	
Benzinverbrauch Kleintransport [L <sub>norm</sub> tkm <sup>-1</sup> ]:	7.32E-01
<b>Kiesressource</b>	
Kiesressource [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.04E+00

Abbau - Aufschluss & Rekultivierung	
CO <sub>2</sub> [kg a <sup>-1</sup> ]:	3.60E-03
CO <sub>2</sub> [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	3.51E-01

inkl. Aufschluss und Rekultivierung	
CO <sub>2</sub> [kg a <sup>-1</sup> ]:	1.48E-05
CO <sub>2</sub> [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	2.75E-05
HC [kg a <sup>-1</sup> ]:	3.70E-06
HC [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	5.78E-02
PM <sub>10</sub> [kg a <sup>-1</sup> ]:	1.54E-06
PM <sub>10</sub> [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.39E-06
PM <sub>2.5</sub> [kg a <sup>-1</sup> ]:	6.17E-08
PM <sub>2.5</sub> [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	9.25E-08
CO <sub>2</sub> [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.13E-03

Infrastruktur/Anlagen/Landnutzung	
Stahlgewicht [kg]:	-
Lebensdauer Stahlteile [a]:	2.50E+01
Ersatzrate [Stahlteile Lebensdauer <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	-
Stahlverbrauch [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.54E-04
Gummigewicht [kg]:	-
Lebensdauer Gummiteile [a]:	5.00E+00
Ersatzrate [Gummiteile Lebensdauer <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	-
Gummiverbrauch [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	3.35E-03
PU-Teile [kg]:	-
Lebensdauer PU-Teile [a]:	5.00E+00
Ersatzrate [PU-Teile Lebensdauer <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	-
PU-Verbrauch [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.75E-01
Nutzung durch Ressourcenabbau [m <sup>2</sup> ]:	1.00E+05
Nutzung durch Ressourcenabbau [m <sup>2</sup> a kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	2.67E-04
Nutzung durch Verkehrswege [m <sup>2</sup> ]:	3.40E+04
Nutzung durch Verkehrswege [m <sup>2</sup> a kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	9.07E-03
Nutzung durch Industriebetrieb [m <sup>2</sup> ]:	6.70E+03
Nutzung durch Industriebetrieb [m <sup>2</sup> a kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.79E-05

140700.00

Betrieb Anlagen	
durchschnittlicher Stromverbrauch [kWh a <sup>-1</sup> ]:	1.81E+06
durchschnittlicher Stromverbrauch [kWh kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	4.99E-05
Stahlverschleiss [kg a <sup>-1</sup> ]:	1.52E-03
Stahlverschleiss [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.32E-05
Kunststoffverschleiss [kg a <sup>-1</sup> ]:	3.00E+02
Kunststoffverschleiss [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	8.00E-07
Schmierölverschleiss [kg a <sup>-1</sup> ]:	7.23E+05
Schmierölverschleiss [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.93E-05
Heizölverschleiss [l a <sup>-1</sup> ]:	4.48E+04
Heizwert Heizöl [MJ MJ <sup>-1</sup> ]:	5.80E+06
Heizölverbrauch [MJ kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	4.30E-03
Deponie Inertstoffe [m <sup>3</sup> a <sup>-1</sup> ]:	0.00E+00
Dichte Inertstoffe [kg m <sup>-3</sup> ]:	2.00E+04
Deponie Inertstoffe [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	0.00E+00
Deponie Haushaltsabfälle [m <sup>3</sup> a <sup>-1</sup> ]:	1.57E+01
Dichte Haushaltsabfälle [kg m <sup>-3</sup> ]:	4.00E+02
Deponie Haushaltsabfälle [kg kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.67E-05
Sprengstoffverschleiss [kg a <sup>-1</sup> ]:	4.50E+04
Sprengstoffverbrauch [kg <sub>norm</sub> kg <sub>Beton</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.20E-04

Abb. D.2  
Kieswerk Brunnen – Datengrundlagen für das Inventar

# Anhang

durchschnittliche Jahresproduktion [ $\text{kg a}^{-1}$ ]:	4.90E+08
Lebensdauer [a]:	6.50E+01
gesamte Produktion während Lebensdauer [ $\text{kg a}$ ]:	3.18E+10

Baumaschinen	
<b>Abbau:</b>	
Dieselvebrauch [ $\text{L}_{\text{abau}} \text{a}^{-1}$ ]:	7.32E+04
Dieselvebrauch [ $\text{kg}_{\text{abau}} \text{a}^{-1}$ ]:	6.09E+04
Dieselvebrauch [ $\text{kg}_{\text{abau}} \text{kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	1.24E-04
Stahlgewicht [kg]:	1.05E+05
Stahlverbrauch [ $\text{kg kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	8.60E-06

Aufschluss & Reaktivierung:	
Dieselvebrauch [ $\text{L}_{\text{abau}} \text{Lebensdauer}^{-1}$ ]:	2.04E+06
Dieselvebrauch [ $\text{kg}_{\text{abau}} \text{Lebensdauer}^{-1}$ ]:	1.70E+06
Dieselvebrauch [ $\text{kg}_{\text{abau}} \text{kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	5.33E-05
Stahlverbrauch [ $\text{kg}_{\text{abau}} \text{Lebensdauer}^{-1}$ ]:	2.86E+05
Stahlverbrauch [ $\text{kg}_{\text{abau}} \text{kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	8.98E-06

Emissionen (nur Abbau):	
CO [ $\text{kg a}^{-1}$ ]:	2.32E+03
CO [ $\text{kg kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	4.74E-06
NO <sub>x</sub> [ $\text{kg a}^{-1}$ ]:	3.80E+03
NO <sub>x</sub> [ $\text{kg kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	7.77E-06
HC [ $\text{kg a}^{-1}$ ]:	1.04E+03
HC [ $\text{kg kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	2.12E-06
PM <sub>10</sub> [ $\text{kg a}^{-1}$ ]:	1.37E+02
PM <sub>10</sub> [ $\text{kg kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	2.80E-07
PM <sub>2.5</sub> [ $\text{kg kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	2.52E-07
PM <sub>2.5-10</sub> [ $\text{kg kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	1.12E-08
PM <sub>10-2.5</sub> [ $\text{kg kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	1.68E-08
CO <sub>2</sub> [ $\text{kg kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	3.92E-04

Infrastruktur/Anlagen/Landnutzung	
Stahlgewicht [kg]:	-
Lebensdauer Stahlteile [a]:	2.50E+01
Ersatzrate (Stahlteile-Lebensdauer $_{\text{abau}}^{-1}$ ):	-
Stahlverbrauch [ $\text{kg kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	2.01E-04
Gummigewicht [kg]:	-
Lebensdauer Gummiteile [a]:	5.00E+00
Ersatzrate (Gummiteile-Lebensdauer $_{\text{abau}}^{-1}$ ):	-
Gummiverbrauch [ $\text{kg kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	4.37E-05
PU-Teile [kg]:	-
Lebensdauer PU-Teile [a]:	5.00E+00
Ersatzrate (PU-Teile-Lebensdauer $_{\text{abau}}^{-1}$ ):	-
PU-Verbrauch [ $\text{kg kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	2.29E-06
Nutzung durch Ressourcenabbau [ $\text{m}^3$ ]:	2.00E+05
Nutzung durch Ressourcenabbau [ $\text{m}^3 \text{a kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	4.08E-04
Nutzung durch Verkehrswege [ $\text{m}^3$ ]:	5.18E+04
Nutzung durch Verkehrswege [ $\text{m}^3 \text{a kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	1.06E-04
Nutzung durch Industriebetrieb [ $\text{m}^3$ ]:	5.20E+05
Nutzung durch Industriebetrieb [ $\text{m}^3 \text{a kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	6.33E-06

## Mülligen

in Umberto verwendete Daten

Transporte	
Benzinverbrauch [ $\text{L}_{\text{abau}} \text{a}^{-1}$ ]:	2.24E+03
Kleintransporte [ $\text{tkm kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	6.26E-06
Annahmen:	
Benzinverbrauch in Kleintransportern [ $\text{L}_{\text{abau}} \text{tkm}^{-1}$ ]:	7.32E-01
Kiesressource	
Kiesressource [ $\text{kg kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	1.04E+00

### Abbau + Aufschluss + Reaktivierung

1.78E-04

1.76E-05

### inkl. Aufschluss und Reaktivierung

6.77E-06

1.11E-05

3.03E-06

1.98E+02

4.01E-07

3.61E-07

1.60E-08

2.40E-08

5.60E-04

Betrieb Anlagen	
durchschnittlicher Stromverbrauch [ $\text{kWh a}^{-1}$ ]:	1.26E+06
durchschnittlicher Stromverbrauch [ $\text{kWh kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	2.58E-03
Stahlverschleiss [ $\text{kg a}^{-1}$ ]:	4.93E+03
Stahlverschleiss [ $\text{kg kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	1.01E-05
Kunststoffverschleiss [ $\text{kg a}^{-1}$ ]:	1.73E+02
Kunststoffverschleiss [ $\text{kg kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	3.54E-07
Schmierölverschleiss [ $\text{kg a}^{-1}$ ]:	1.12E+03
Schmierölverschleiss [ $\text{kg kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	2.29E-06
Heizölverschleiss [ $\text{L a}^{-1}$ ]:	2.48E+04
Heizölverschleiss [ $\text{MJ a}^{-1}$ ]:	3.60E+04
Heizölverschleiss [ $\text{MJ kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	1.82E-03
Deponie Inertstoffe [ $\text{m}^3 \text{a}^{-1}$ ]:	0.00E+00
Dichte Inertstoffe [ $\text{kg m}^{-3}$ ]:	2.00E+03
Deponie Inertstoffe [ $\text{kg kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	0.00E+00
Deponie Haushaltsabfälle [ $\text{m}^3 \text{a}^{-1}$ ]:	4.80E+01
Dichte Haushaltsabfälle [ $\text{kg m}^{-3}$ ]:	4.00E+02
Deponie Haushaltsabfälle [ $\text{kg kg}_{\text{abau}}^{-1}$ ]:	3.92E-05

Abb. D.3

Kieswerk Mülligen – Datengrundlagen für das Inventar

# Anhang

durchschnittliche Jahresproduktion [kg a <sup>-1</sup> ]:	2.53E+08
Lebensdauer [a]:	5.00E+01
gesamte Produktion während Lebensdauer [kg a]:	1.26E+10

<b>Baumaschinen</b>	
<b>Abbau:</b>	
Dieselvebrauch [L <sub>norm</sub> a <sup>-1</sup> ]:	1.88E+05
Dieselvebrauch [kg <sub>norm</sub> a <sup>-1</sup> ]:	1.57E+05
Dieselvebrauch [kg <sub>norm</sub> kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	6.20E-08
Stahlgewicht [kg]:	2.82E+05
Stahlverbrauch [kg kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	4.46E-05

<b>Aufschluss &amp; Reaktivierung:</b>	
Dieselvebrauch [L <sub>norm</sub> Lebensdauer <sup>-1</sup> ]:	1.51E+06
Dieselvebrauch [kg <sub>norm</sub> Lebensdauer <sup>-1</sup> ]:	1.26E+06
Dieselvebrauch [kg <sub>norm</sub> kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	9.95E-05
Stahlverbrauch [kg <sub>norm</sub> Lebensdauer <sup>-1</sup> ]:	2.20E+05
Stahlverbrauch [kg <sub>norm</sub> kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.74E-05

<b>Emissionen (nur Abbau):</b>	
CO [kg a <sup>-1</sup> ]:	6.68E+03
CO [kg kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	2.64E-05
NO <sub>x</sub> [kg a <sup>-1</sup> ]:	1.33E+04
NO <sub>x</sub> [kg kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	5.27E-05
HC [kg a <sup>-1</sup> ]:	4.17E+03
HC [kg kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.65E-05
PM <sub>10</sub> [kg a <sup>-1</sup> ]:	7.90E+02
PM <sub>10</sub> [kg kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	3.13E-06
PM <sub>2.5</sub> [kg a <sup>-1</sup> ]:	2.81E-06
PM <sub>2.5</sub> [kg kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.25E-07
PM <sub>10-2.5</sub> [kg a <sup>-1</sup> ]:	1.88E-07
PM <sub>10-2.5</sub> [kg kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.95E-03

<b>Infrastruktur/Anlagen/Landnutzung</b>	
Stahlgewicht [kg]:	-
Lebensdauer Stahlteile [a]:	2.50E+01
Ersatzrate [Stahlteile/Lebensdauer <sub>norm</sub> ]:	-
Stahlverbrauch [kg kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.04E-04
Gummigewicht [kg]:	-
Lebensdauer Gummiteile [a]:	5.00E+00
Ersatzrate [Gummiteile/Lebensdauer <sub>norm</sub> ]:	-
Gummiverbrauch [kg kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	2.26E-05
PU-Teile [kg]:	-
Lebensdauer PU-Teile [a]:	5.00E+00
Ersatzrate [PU-Teile/Lebensdauer <sub>norm</sub> ]:	-
PU-Verbrauch [kg kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.18E-06
Nutzung durch Ressourcenabbau [m <sup>3</sup> ]:	1.20E+05
Nutzung durch Ressourcenabbau [m <sup>3</sup> a kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	4.75E-04
Nutzung durch Verkehrswege [m <sup>3</sup> ]:	3.50E+04
Nutzung durch Verkehrswege [m <sup>3</sup> a kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	4.39E-04
Nutzung durch Industriebetrieb [m <sup>3</sup> ]:	1.80E+03
Nutzung durch Industriebetrieb [m <sup>3</sup> a kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	7.13E-06

## Oberdorf

in Umberto verwendete Daten

<b>Transporte</b>	
Benzinverbrauch [L <sub>norm</sub> a <sup>-1</sup> ]:	8.56E+03
Kleintransporte [tkm kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	4.63E-05
Annahmen:	
Benzinverbrauch in Kleintransportern [L <sub>norm</sub> tkm <sup>-1</sup> ]:	7.32E-01
<b>Kiesressource</b>	
Kiesressource [kg kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.04E+00

### Abbau + Aufschluss + Reaktivierung

7.20E-04
6.20E-05

### inkl. Aufschluss und Reaktivierung

3.07E-05
6.11E-05
1.91E-05
9.17E+02
3.63E-06
3.27E-06
1.45E-07
2.18E-07
2.27E-03

<b>Betrieb Anlagen</b>	
durchschnittlicher Stromverbrauch [kWh a <sup>-1</sup> ]:	8.30E+05
durchschnittlicher Stromverbrauch [kWh kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	3.29E-03
Stahlverschleiss [kg a <sup>-1</sup> ]:	3.95E+03
Stahlverschleiss [kg kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.56E-05
Kunststoffverschleiss [kg a <sup>-1</sup> ]:	1.20E+05
Kunststoffverschleiss [kg kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	4.76E-06
Schmierölverschleiss [kg a <sup>-1</sup> ]:	3.37E+05
Schmierölverschleiss [kg kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	1.33E-05
Heizölverschleiss [l a <sup>-1</sup> ]:	3.00E+04
Heizwert Heizöl [MJ a <sup>-1</sup> ]:	3.60E+01
Heizölverbrauch [MJ kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	4.28E-01
Deponie Inertstoffe [m <sup>3</sup> a <sup>-1</sup> ]:	0.00E+00
Dichte Inertstoffe [kg m <sup>-3</sup> ]:	2.00E+03
Deponie Inertstoffe [kg kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	0.00E+00
Deponie Haushaltsabfälle [m <sup>3</sup> a <sup>-1</sup> ]:	4.47E+01
Dichte Haushaltsabfälle [kg m <sup>-3</sup> ]:	4.00E+02
Deponie Haushaltsabfälle [kg kg <sub>norm</sub> <sup>-1</sup> ]:	7.09E-05

Abb. D.4

Kieswerk Oberdorf – Datengrundlagen für das Inventar



# Anhang E: Zuordnung der Prozesse der untersuchten Kiesgruben von Holcim und des Inventars der Kiesbereitstellung aus ecoinvent

	Herstellung und Betrieb der Baumaschinen für Aufschluss, Abbau und Rekultivierung	sonstige Transporte (u.a. zum Be- und Entladen)	Betrieb der Aufbereitungsanlagen und Kiesabbau	Herstellung der Aufbereitungsanlagen (inkl. Instandhaltung) und Landnutzung
<b>Datenerhebung Holcim</b>				
Stahl (steel, low-alloyed, at plant )				x
Gummi (synthetic rubber, at plant )				x
PU (polyurethane, rigid foam, at plant )				x
Kies (gravel, in ground)			x	
Nutzung durch Ressourcenabbau (Occupation, mineral extracting site )				x
Nutzung durch Verkehrswege (Occupation, traffic area, road network )				x
Nutzung künstlicher Wasserfläche (Occupation, water bodies, artificial )				x
Nutzung durch Industriebetrieb (Occupation, Industrial area )				x
Diesel (Baumaschinen) (diesel, at refinery )	x			
Stahl (Baumaschinen) (steel, low-alloyed, at plant )	x			
Strom (electricity, medium voltage, at grid )			x	
Stahl (steel, low-alloyed, at plant )			x	
Gummi (synthetic rubber, at plant )			x	
Schmieröl (lubricating oil, at plant )			x	
Heizöl (heat, light fuel oil, at boiler 10KW, non-modulating)			x	
Deponie Inertstoffe (disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill )			x	
Deponie Haushaltsabfälle (disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to municipal incineration )			x	
Diesel (Transporte) (diesel, at refinery )		x		
Sprengen (blasting )			x	
	Herstellung und Betrieb der Baumaschinen für Aufschluss, Abbau und Rekultivierung	sonstige Transporte (u.a. zum Be- und Entladen)	Betrieb der Aufbereitungsanlagen und Kiesabbau	Herstellung der Aufbereitungsanlagen (inkl. Instandhaltung) und Landnutzung
<b>Ecolivent</b>				
Gebäude (building, hall, steel construction)				x
Förderband (conveyor belt, at plant)				x
Diesel (Baumaschinen) (diesel, burned in building machine)	x			
Deponie Haushaltsabfälle (disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to municipal incineration)			x	
Deponie Altöl (disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration)			x	
Strom (electricity, medium voltage, at grid)			x	
Heizöl (heat, light fuel oil, at boiler 10KW, non-modulating)			x	
Maschine allgemein (industrial machine, heavy, unspecified, at plant)				x
Schmieröl (lubricating oil, at plant)			x	
Kiesmiene (mine, gravel/sand)				x
Rekultivierung (reclamation, limestone mine)	x			
Stahl (steel, low alloyed, at plant)			x	
Gummi (synthetic rubber, at plant)			x	
Trinkwasser (tap water, at user)			x	
Lastwagentransport 3.5-20t (transport, lorry 3.5-20t, fleet average)		x		
Lastwagentransport 20-28t (transport, lorry 20-28t, fleet average)		x		
Vantransport (transport, van <3.5t)		x		
Kiesressource (gravel, in ground)			x	
Nutzung Ressourcenabbau (occupation, mineral extraction site)				x
Nutzung künstlicher Wasserfläche (occupation, water bodies, artificial)				x
Umwandlung zu Ressourcenabbau (transformation, to mineral extraction site)				x
Umwandlung zu künstlicher Wasserfläche (transformation, to water bodies, artificial)				x
Wasserressourcen (water, unspecified natural origin)				x
Umwandlung von unbekannt (transformation, from unknown)				x

Abb. E.1  
Zuordnung der Eingabedaten zu den Kategorien der Auswertung

# Anhang F: Datenerfassungsblätter

Die Erfassung der Daten für die Kieswerke der Holcim (Schweiz) AG erfolgte durch Experten der Holcim (Schweiz) AG in Zusammenarbeit mit dem Projektteam. Dazu wurde zunächst eine Systemanalyse für ein exemplarisches Kieswerk erstellt. Dabei wurde entschieden, das Kieswerk als «Black Box» während der gesamten Betriebsdauer (inkl. Aufschluss und Renaturierung) zu betrachten. Anschliessend wurden Datenerfassungsblätter entwickelt (vgl. Abb. F.1 bis F.5). Diese Datenblätter wurden von den Experten der Holcim (Schweiz) AG

ausgefüllt. Datengrundlagen waren das betriebliche Informationssystem (für Produktionsmengen, Betriebsstunden und Energieverbräuche) und die Projektierungsunterlagen zu den verschiedenen Kieswerken (für Materialmengen im Aufschluss, Abbau und Rekultivierung sowie die versiegelte Fläche). Fehlende Daten wurden auf der Grundlage von Literaturwerten – vor allem Schäffeler und Keller (2008) – abgeschätzt. In einer abschliessenden Sitzung wurden die Daten für alle Kieswerke verglichen und auf Plausibilität überprüft.

		total	2007	2006	2005	2004	2003	2002	....
Abbau	Lebensdauer der Mine	in Jahren							
	Jährliche abgebautes Volumen der Mine	in Kubikmeter pro Jahr							
	Gesamt abgebautes Volumen während der Lebensdauer	in Kubikmeter							
	Jährliche Produktionsmenge Sand	in Tonnen pro Jahr							
	Jährliche Produktionsmenge Kies	in Tonnen pro Jahr							
Aufschluss	Jährliche Produktionsmenge Brechsand	in Tonnen pro Jahr							
	Jährliche Produktionsmenge Splitt	in Tonnen pro Jahr							
	Menge an Abraum (Mutterboden, Lehm, Ton etc.), die bewegt werden muss	in Kubikmeter							
Rekultivierung	Menge an Abraum (Mutterboden, Lehm, Ton etc.), die für die Rekultivierung wieder eingesetzt wird	in Kubikmeter							
	Menge an Abraum, die extern zur Kultivierung angeliefert wird	in Kubikmeter							

Wenn möglich: die Mengen aller Produkte pro Jahr differenziert angeben.

Schätzwert für den gesamten Prozess des Aufschlusses

Schätzwert für den gesamten Prozess der Rekultivierung

**Abb. F.1**  
Datenblatt 1 «Abbauvolumen und -zeit»

Parameter	Einheit	Aufschluss				Abbau				Rekultivierung			
		Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
Anzahl des Baumaschinen dieses Typs	Stück												
Kapazität der Baumaschinen dieses Typs (pro Baumaschine)	m <sup>3</sup> Material pro Betriebsstunde												
Treibstoffverbrauch der Baumaschinen dieses Typs (pro Baumaschine)	kWh oder Liter pro Betriebsstunde												
Art des Treibstoffs der Baumaschinen (pro Baumaschine)	Diesel, Benzin, Strom etc.												
Gewicht der Baumaschinen (pro Baumaschine)	in Tonnen pro Stück												
Lebensdauer der Baumaschinen (pro Baumaschine)	in Betriebsstunden												
Leistung der Baumaschinen dieses Typs (pro Baumaschine)	kW												
Kohlenmonoxide (CO)	g pro kWh												
Stickoxide (NOx)	g pro kWh												
Kohlenwasserstoffe (HC)	g pro kWh												
Partikel (PM)	g pro kWh												

Material bedeutet je nach Bauphase: Abraum, gewonnenes Material oder wieder aufgefülltes Material.

Standardwerte nach Leistung der Maschine finden sich unter: Standardwerte Baumaschinen

Alternativ kann man auch die Lebensdauer in Jahren angeben und die Dauer der Nutzung der Maschine für Aufschluss, Abbau und Rekultivierung.

**Abb. F.2**  
Datenblatt 2 «Baumaschinen»

			Total						
			2007	2006	2005	2004	2003	2002	...
Energieverbrauch (Abbau)	Strom	kWh pro Jahr							
		Anteil Anlagen ohne Brechen (in %)							
	Brennstoffe	Liter pro Jahr							
		Anteil Anlagen ohne Brechen (in %)							
		Anteil Brechen (in %)							
Betriebsmittel (Abbau)	Verschleissteile	kg pro Jahr							
		Anteil Anlagen ohne Brechen (in %)							
	Schmiermittel	kg pro Jahr							
		Anteil Anlagen ohne Brechen (in %)							
		Anteil Brechen (in %)							
Abfälle (Abbau)	an Reaktordeponie	kg pro Jahr							
	an Reststoffdeponie	kg pro Jahr							
	Sonderabfälle	kg pro Jahr							
Emissionen aus der Verbrennung von Brennstoffen	Kohlenmonoxide (CO)	mg pro kWh							
		Stickoxide (Nox)	mg pro kWh						
		Kohlenwasserstoffe (HC)	mg pro kWh						
		Partikel (PM)	mg pro kWh						

Als Kontrollwert für die Angaben aus Baumaschinen

Die Abgrenzung sollte für jede Kiesgrube neu festgelegt und dokumentiert werden. Es ist beispielsweise möglich, hier nur den Brecher selbst zu betrachten. Die Abgrenzung muss in jedem Fall konsistent sein mit den 'Infrastrukturen'.

**Abb. F.3**

**Datenblatt 3 «Energie, Betriebsmittel und Abfall»**

Beschreibung	Nutzung	Fläche (in m <sup>2</sup> )	Dauer der Inanspruchnahme (in Jahren)
Durch Bauwerke versiegelte Flächen	Gebäude		
	Strassen, Parkplätze etc.		
Durch Bauwerke genutzte, unversiegelte Fläche	Gebäude		
	Strassen, Parkplätze etc.		
Durch den Abbau in Anspruch genommene Fläche	Abbau		
	Baggersee		
Rekultivierte Fläche	in den gewünschten Zustand transformiert		

**Abb. F.4**

**Datenblatt 4 «Landinanspruchnahme»**

		Anzahl	Grösse (Einheit je nach Anlage)			Betriebsdauer in Jahren
			Stck	umbautes Volumen (Halle)	Geschossfläche (mehrstöckiges Gebäude)	
Gebäude	Gebäude 1					
	Gebäude 2					
	Gebäude 3					
	Gebäude 4					
Anlagen (ohne Brechen)	Siebe					
	Silos					
	Wäscher					
	Förderband					
Anlagen (des Brechens)	Brecher					
	Siebe					
	Silos					
	Förderband					
	...					

Die Abgrenzung sollte für jede Kiesgrube neu festgelegt und dokumentiert werden. Es ist beispielsweise möglich, hier nur den Brecher selbst zu betrachten.

**Abb. F.5**

**Datenblatt 5 «Infrastrukturen»**

# Anhang G: Detaillierte Darstellung der Berechnungsergebnisse

Die Erfassung der Daten für die Kieswerke der Holcim (Schweiz) AG erfolgte durch Experten der Holcim (Schweiz) AG in Zusammenarbeit mit dem Projektteam. Dazu wurde zunächst eine Systemanalyse für ein exemplarisches Kieswerk erstellt. Dabei wurde entschieden, das Kieswerk als «Black Box» während der gesamten Betriebsdauer (inkl. Aufschluss und Renaturierung) zu betrachten. Anschliessend wurden Datenerfassungsblätter entwickelt (vgl. Abb. F.1 bis F.5). Diese Datenblätter wurden von den Experten der Holcim (Schweiz) AG

ausgefüllt. Datengrundlagen waren das betriebliche Informationssystem (für Produktionsmengen, Betriebsstunden und Energieverbräuche) und die Projektierungsunterlagen zu den verschiedenen Kieswerken (für Materialmengen im Aufschluss, Abbau und Rekultivierung sowie die versiegelte Fläche). Fehlende Daten wurden auf der Grundlage von Literaturwerten – vor allem Schöffeler und Keller (2008) – abgeschätzt. In einer abschliessenden Sitzung wurden die Daten für alle Kieswerke verglichen und auf Plausibilität überprüft.

## Beton

		Herstellung natürlicher Gesteinskörnung	Betonherstellung	Zementherstellung	Herstellung rezyklierter Gesteinskörnung	–		
KEA [MJ-Äq/m <sup>3</sup> ]	C30/37	1.17E+02	2.15E+02	1.03E+03	0.00E+00	1.36E+03		
	RC-Beton C 30/37	8.20E+01	2.15E+02	1.08E+03	2.55E+01	1.41E+03		
GWP, 100a [kg CO <sub>2</sub> -Äq/m <sup>3</sup> ]	C30/37	4.92E+00	1.14E+01	2.18E+02	0.00E+00	2.34E+02		
	RC-Beton C 30/37	3.44E+00	1.14E+01	2.30E+02	6.21E-01	2.46E+02		
Emissionen und Ressourcenverbrauch	C30/37	AP, Ø eur. [kg SO <sub>2</sub> -Äq]	2.99E-02	6.54E-02	3.06E-01	0.00E+00	4.02E-01	
		Nox [kg]					4.32E-01	
		Luftpartikelstoffe <10µm [kg]	5.49E-03	1.08E-02	3.25E-02	0.00E+00	4.88E-02	
		Dioxine / Furane [kg]					6.49E-08	
		Landinanspruchnahme [m <sup>2</sup> -a]	7.44E+00	1.34E+00	1.62E+00	0.00E+00	1.04E+01	
		natürliche Ressourcen	Wasser [m <sup>3</sup> ]					5.15E+02
			Kies [kg]	2.08E+03	7.24E+00	6.06E+00	0.00E+00	2.09E+03
			Rohöl [kg]					1.28E+01
			Steinkohle [kg]					1.61E+01
			Ton [kg]					1.09E+02
		Energieressourcen [MJ]	Kalkspat [kg]					2.87E+02
			Biomasse					8.34E+00
	Wind						1.12E+00	
	Wasser						7.06E+01	
	Solar					3.14E-02		
	RC-Beton C30/37	AP, Ø eur. [kg SO <sub>2</sub> -Äq]	2.09E-02	6.54E-02	3.24E-01	3.28E-03	4.13E-01	
		Nox [kg]					4.43E-01	
		Luftpartikelstoffe <10µm [kg]	3.84E-03	1.08E-02	3.43E-02	4.74E-04	4.94E-02	
		Dioxine / Furane [kg]					6.09E-08	
		Landinanspruchnahme [m <sup>2</sup> -a]	5.20E+00	1.34E+00	1.71E+00	1.52E-01	8.40E+00	
		natürliche Ressourcen	Wasser [m <sup>3</sup> ]					5.36E+02
			Kies [kg]	1.45E+03	7.22E+00	6.40E+00	4.31E+00	1.47E+03
			Rohöl [kg]					1.32E+01
			Steinkohle [kg]					1.68E+01
Ton [kg]							1.15E+02	
Energieressourcen [MJ]		Kalkspat [kg]					3.03E+02	
		Biomasse					8.48E+00	
	Wind					1.15E+00		
	Wasser					7.34E+00		
Solar					3.25E-02			

Abb. G.1  
Berechnungsergebnisse Konstruktionsbeton

		Bereitstellung nGK	Betonproduktion	Zementproduktion	Bereitstellung RC-GK	—		
KEA [MJ-Äq/m³]	Energiebedarf, nGK, ecoinvent	1.13E+02	1.98E+02	5.08E+02	0.00E+00	8.19E+02		
	Energiebedarf, Holcim, ZM19 (MA)	0.00E+00	1.98E+02	6.77E+02	4.81E+01	9.23E+02		
	Energiebedarf, Holcim, X108	1.11E+02	1.98E+02	6.77E+02	0.00E+00	9.86E+02		
	Energiebedarf, Holcim, ZN19-15 (13% MA)	9.42E+01	1.98E+02	6.77E+02	7.33E+00	9.76E+02		
GWP [kg CO2-Äq/m³]	Treibhauseffekt, nGK, ecoinvent	4.75E+00	1.05E+01	1.08E+02	0.00E+00	1.23E+02		
	Treibhauseffekt, Holcim, ZM19 (MA)	0.00E+00	1.05E+01	1.44E+02	1.40E+00	1.56E+02		
	Treibhauseffekt, Holcim, X108	4.66E+00	1.05E+01	1.44E+02	0.00E+00	1.59E+02		
	Treibhauseffekt, Holcim, ZN19-15 (13% MA)	3.95E+00	1.05E+01	1.44E+02	2.14E-01	1.58E+02		
Emissionen und Ressourcenverbrauch	nGK, ecoinvent	AP, Ø eur. [kg SO2-Äq]	2.89E-02	6.02E-02	1.52E-01	0.00E+00	2.41E-01	
		Nox [kg]					2.65E-01	
		Luftpartikelstoffe <10µm [kg]	5.30E-03	9.97E-03	1.61E-02	0.00E+00	3.13E-02	
		Dioxine / Furane [kg]					5.34E-08	
		Landinanspruchnahme [m2-a]	7.19E+00	1.23E+00	8.03E-01	0.00E+00	9.22E+00	
		natürliche Ressourcen	Wasser [m3]					3.11E+02
			Kies [kg]	2.01E+03	6.80E+00	3.00E+00	0.00E+00	2.02E+03
			Rohöl [kg]					7.90E+00
			Steinkohle [kg]					8.70E+00
			Ton [kg]					5.45E+01
			Kalkspat [kg]					1.42E+02
		Energieressourcen [MJ]	Biomasse					5.75E+00
			Wind					7.25E-01
			Wasser					4.32E+01
			Solar					2.00E-02
		ZM19 (MA)	AP, Ø eur. [kg SO2-Äq]	0.00E+00	6.03E-02	2.02E-01	7.74E-03	2.70E-01
	Nox [kg]						2.92E-01	
	Luftpartikelstoffe <10µm [kg]		0.00E+00	9.98E-03	2.14E-02	1.09E-03	3.25E-02	
	Dioxine / Furane [kg]						4.03E-08	
	Landinanspruchnahme [m2-a]		0.00E+00	1.23E+00	1.07E+00	4.31E-01	2.73E+00	
	natürliche Ressourcen		Wasser [m3]					3.43E+02
			Kies [kg]	0.00E+00	6.77E+00	4.00E+00	1.46E+01	2.54E+01
			Rohöl [kg]					8.90E+00
			Steinkohle [kg]					1.07E+01
			Ton [kg]					7.19E+01
			Kalkspat [kg]					1.89E+02
	Energieressourcen [MJ]		Biomasse					6.00E+00
			Wind					7.48E-01
			Wasser					4.69E+01
			Solar					2.08E-02
	X108		AP, Ø eur. [kg SO2-Äq]	2.84E-02	6.02E-02	2.02E-01	0.00E+00	2.91E-01
		Nox [kg]					3.17E-01	
		Luftpartikelstoffe <10µm [kg]	5.20E-03	9.97E-03	2.14E-02	0.00E+00	3.66E-02	
		Dioxine / Furane [kg]					5.59E-08	
		Landinanspruchnahme [m2-a]	7.06E+00	1.23E+00	1.07E+00	0.00E+00	9.36E+00	
		natürliche Ressourcen	Wasser [m3]					3.76E+02
			Kies [kg]	1.97E+03	6.75E+00	4.00E+00	0.00E+00	1.98E+03
			Rohöl [kg]					9.41E+00
			Steinkohle [kg]					1.11E+01
			Ton [kg]					7.22E+01
Kalkspat [kg]							1.90E+02	
Energieressourcen [MJ]		Biomasse					6.51E+00	
		Wind					8.42E-01	
		Wasser					5.16E+01	
		Solar					2.34E-02	
ZN19-15 (13% MA)		AP, Ø eur. [kg SO2-Äq]	2.40E-02	6.02E-02	2.02E-01	1.18E-03	2.88E-01	
	Nox [kg]					3.13E-01		
	Luftpartikelstoffe <10µm [kg]	4.41E-03	9.97E-03	2.14E-02	1.66E-04	3.60E-02		
	Dioxine / Furane [kg]					5.35E-08		
	Landinanspruchnahme [m2-a]	5.98E+00	1.23E+00	1.07E+00	6.58E-02	8.34E+00		
	natürliche Ressourcen	Wasser [m3]					3.71E+02	
		Kies [kg]	1.67E+03	1.07E+01	4.00E+00	2.23E+00	1.69E+03	
		Rohöl [kg]					9.33E+00	
		Steinkohle [kg]					1.10E+01	
		Ton [kg]					7.22E+01	
		Kalkspat [kg]					1.90E+02	
	Energieressourcen [MJ]	Biomasse					6.42E+00	
		Wind					8.28E-01	
		Wasser					5.09E+01	
		Solar					2.30E-02	

Abb. G.2  
Berechnungsergebnisse Magerbeton

# Anhang

## Gesteinskörnungen

		Infrastruktur, Anlagen, Landnutzung	Betrieb Anlagen	Baumaschinen	Transporte	Kiesressource	-		
KEA [MJ-Äq/Äq]	Energiebedarf ecoinvent	6.85E-03	3.02E-02	2.12E-02	4.77E-04	0.00E+00	<b>5.87E-02</b>		
	Energiebedarf Aigle	7.42E-03	2.92E-02	1.35E-02	0.00E+00	0.00E+00	<b>5.01E-02</b>		
	Energiebedarf Brunnen	7.66E-03	5.78E-02	2.08E-02	5.17E-04	5.17E-04	<b>8.73E-02</b>		
	Energiebedarf Mülligen	9.99E-03	2.77E-02	1.03E-02	1.68E-04	1.68E-04	<b>4.83E-02</b>		
	Energiebedarf Oberdorf	5.17E-03	3.95E-02	4.14E-02	1.25E-03	1.25E-03	<b>8.86E-02</b>		
GWP [kg CO2-Äq/kg]	Treibhauseffekt ecoinvent	4.43E-04	5.88E-04	1.40E-03	2.79E-05	0.00E+00	<b>2.46E-03</b>		
	Treibhauseffekt Aigle	3.70E-04	4.39E-04	9.19E-04	0.00E+00	0.00E+00	<b>1.73E-03</b>		
	Treibhauseffekt Brunnen	3.72E-04	1.34E-03	1.43E-03	3.01E-05	0.00E+00	<b>3.17E-03</b>		
	Treibhauseffekt Mülligen	4.86E-04	5.15E-04	7.07E-04	9.82E-06	0.00E+00	<b>1.72E-03</b>		
	Treibhauseffekt Oberdorf	2.51E-04	8.87E-04	2.85E-03	7.26E-05	0.00E+00	<b>4.07E-03</b>		
Emissionen und Ressourcenverbrauch	ecoinvent	AP, Ø eur. [kg SO2-Äq]	2.58E-06	1.50E-06	1.08E-05	1.07E-07	0.00E+00	<b>1.50E-05</b>	
		Nox [kg]						1.87E-05	
		Luftpartikelstoffe <10µm [kg]	8.90E-07	1.67E-07	1.68E-06	9.10E-09	0.00E+00	<b>2.75E-06</b>	
		Dioxine / Furane [kg]						8.67E-12	
		Landinanspruchnahme [m2-a]	3.70E-03	1.41E-05	5.16E-06	8.00E-07	0.00E+00	<b>3.72E-03</b>	
		natürliche Ressourcen	Wasser [m3]						2.75E-02
			Kies [kg]	5.52E-04	5.13E-05	2.10E-05	1.57E-05	1.04E+00	<b>1.04E+00</b>
			Rohöl [kg]						5.36E-04
			Steinkohle [kg]						2.27E-04
			Ton [kg]						1.59E-04
			Kalkspat [kg]						1.32E-04
		Energieressourcen [MJ]	Biomasse						3.51E-04
			Wind						7.80E-05
			Wasser						4.13E-03
	Solar							2.28E-06	
	Aigle	AP, Ø eur. [kg SO2-Äq]	1.52E-06	1.20E-06	8.63E-06	0.00E+00	0.00E+00	<b>1.13E-05</b>	
		Nox [kg]						1.66E-05	
		Luftpartikelstoffe <10µm [kg]	8.55E-07	1.74E-07	9.59E-07	0.00E+00	0.00E+00	<b>1.99E-06</b>	
		Dioxine / Furane [kg]						4.15E-13	
		Landinanspruchnahme [m2-a]	5.69E-04	1.45E-05	7.57E-06	0.00E+00	0.00E+00	<b>5.91E-04</b>	
		natürliche Ressourcen	Wasser [m3]						2.66E-02
			Kies [kg]	4.28E-05	8.26E-05	3.19E-05	0.00E+00	1.04E+00	<b>1.04E+00</b>
			Rohöl [kg]						3.30E-04
			Steinkohle [kg]						2.54E-04
			Ton [kg]						8.59E-06
			Kalkspat [kg]						8.04E-05
		Energieressourcen [MJ]	Biomasse						2.09E-04
			Wind						8.00E-05
			Wasser						4.24E-03
	Solar							2.36E-06	
	Brunnen	AP, Ø eur. [kg SO2-Äq]	1.53E-06	3.50E-05	1.57E-05	1.08E-07	0.00E+00	<b>5.23E-05</b>	
		Nox [kg]						7.11E-05	
		Luftpartikelstoffe <10µm [kg]	8.38E-07	1.11E-06	1.71E-06	8.97E-09	0.00E+00	<b>3.67E-06</b>	
Dioxine / Furane [kg]							9.64E-13		
Landinanspruchnahme [m2-a]		3.97E-04	4.75E-05	7.25E-06	9.21E-07	0.00E+00	<b>4.52E-04</b>		
natürliche Ressourcen		Wasser [m3]						4.60E-02	
		Kies [kg]	4.29E-05	1.12E-04	4.14E-05	1.45E-05	1.04E+00	<b>1.04E+00</b>	
		Rohöl [kg]						6.49E-04	
		Steinkohle [kg]						3.18E-04	
		Ton [kg]						1.60E-05	
		Kalkspat [kg]						9.00E-05	
Energieressourcen [MJ]		Biomasse						4.35E-04	
		Wind						1.27E-04	
		Wasser						7.28E-03	
	Solar						3.88E-06		

Emissionen und Ressourcenverbrauch	Mülligen	AP, Ø eur. [kg SO2-Äq]	2.00E-06	1.29E-06	6.53E-06	3.53E-08	0.00E+00	9.85E-06	
		Nox [kg]						1.34E-05	
		Luftpartikelstoffe <10µm [kg]	1.09E-06	1.40E-07	5.08E-07	2.92E-09	0.00E+00	1.75E-06	
		Dioxine / Furane [kg]						4.14E-13	
		Landinanspruchnahme [m2·a]	5.48E-04	1.24E-05	3.61E-06	3.00E-07	0.00E+00	5.64E-04	
		natürliche Ressourcen	Wasser [m3]						2.43E-02
			Kies [kg]	5.59E-05	4.46E-05	2.05E-05	4.72E-06	1.04E+00	1.04E+00
			Rohöl [kg]						3.35E-04
			Steinkohle [kg]						2.52E-04
			Ton [kg]						9.06E-06
			Kalkspat [kg]						8.27E-05
		Energieressourcen [MJ]	Biomasse						2.12E-04
			Wind						7.60E-05
			Wasser						3.86E-03
	Solar							2.18E-06	
	Oberdorf	AP, Ø eur. [kg SO2-Äq]	1.03E-06	2.25E-06	3.45E-05	2.61E-07	0.00E+00	3.80E-05	
		Nox [kg]						6.49E-05	
		Luftpartikelstoffe <10µm [kg]	5.66E-07	2.41E-07	3.90E-06	2.16E-08	0.00E+00	4.73E-06	
		Dioxine / Furane [kg]						1.12E-12	
		Landinanspruchnahme [m2·a]	6.35E-04	1.81E-05	1.36E-05	2.22E-06	0.00E+00	6.69E-04	
		natürliche Ressourcen	Wasser [m3]						3.06E-02
			Kies [kg]	2.89E-05	6.71E-05	8.10E-05	3.49E-05	1.04E+00	1.04E+00
			Rohöl [kg]						1.01E-03
			Steinkohle [kg]						2.52E-04
			Ton [kg]						1.04E-05
			Kalkspat [kg]						7.75E-05
		Energieressourcen [MJ]	Biomasse						2.35E-04
Wind								9.51E-05	
Wasser							4.90E-03		
Solar							2.77E-06		

Abb. G.3  
Vergleich Gewinnung natürlicher Gesteinskörnung

## Anhang

		Brecher	Be- & Entladen	Transporte zwischen den Baustellen	-		
KEA [MJ-Äq/kg]	Energiebedarf, ecoinvent	4.17E-02	2.17E-02	0.00E+00	<b>6.34E-02</b>		
	Energiebedarf, mobil	2.42E-02	2.13E-02	1.26E-04	<b>4.57E-02</b>		
GWP, 100a [kg CO <sub>2</sub> -Äq/kg]	Treibhauseffekt, ecoinvent	5.43E-04	9.52E-04	0.00E+00	<b>1.49E-03</b>		
	Treibhauseffekt, mobil	1.63E-03	9.28E-04	7.02E-06	<b>2.56E-03</b>		
Emissionen und Ressourcenverbrauch	ecoinvent	AP, Ø eur. [kg SO <sub>2</sub> -Äq]	1.78E-06	6.04E-06	0.00E+00	<b>7.82E-06</b>	
		Nox [kg]				9.66E-06	
		Luftpartikelstoffe <10µm [kg]	2.48E-07	8.85E-07	0.00E+00	<b>1.13E-06</b>	
		Dioxine / Furane [kg]				6.53E-13	
		Landinanspruchnahme [m <sup>2</sup> -a]	1.03E-04	2.43E-04	0.00E+00	<b>3.46E-04</b>	
		natürliche Ressourcen	Wasser [m <sup>3</sup> ]				3.83E-02
			Kies [kg]	6.82E-05	9.20E-03	0.00E+00	<b>9.27E-03</b>
			Rohöl [kg]				3.96E-04
			Steinkohle [kg]				1.58E-04
			Ton [kg]				1.56E-05
		Energieressourcen [MJ]	Kalkspat [kg]				5.28E-05
			Biomasse				2.42E-04
			Wind				9.95E-05
			Wasser				6.25E-03
	Solar					3.29E-06	
	mobil	AP, Ø eur. [kg SO <sub>2</sub> -Äq]	1.14E-05	5.89E-06	2.79E-08	<b>1.74E-05</b>	
		Nox [kg]				2.80E-05	
		Luftpartikelstoffe <10µm [kg]	4.77E-06	8.53E-07	3.45E-09	<b>5.63E-06</b>	
		Dioxine / Furane [kg]				1.06E-12	
		Landinanspruchnahme [m <sup>2</sup> -a]	8.92E-06	2.43E-04	1.40E-07	<b>2.52E-04</b>	
		natürliche Ressourcen	Wasser [m <sup>3</sup> ]				2.18E-03
			Kies [kg]	4.89E-05	9.20E-03	9.24E-06	<b>9.26E-03</b>
			Rohöl [kg]				8.37E-04
			Steinkohle [kg]				7.48E-05
			Ton [kg]				1.37E-05
		Energieressourcen [MJ]	Kalkspat [kg]				5.11E-05
			Biomasse				5.70E-05
			Wind				1.64E-05
Wasser						3.09E-04	
Solar					2.91E-07		

Abb. G.4  
Vergleich Aufbereitung Recycling-Gesteinskörnung



Fiktives Bauprojekt

		Bereitstellung nGK	Betonproduktion	Zement	Transport + Deponie/Aufbereitung Abbruchmaterial	Transport nGK	Transport RC-GK	Transport Frischbeton	...		
CED	[m <sup>2</sup> ·Äq]	Energiebedarf, nGK	1.17E+06	2.03E+06	1.03E+07	2.84E+06	1.70E+06	0.00E+00	3.10E+05	1.83E+07	
		Energiebedarf, RC-GK	8.20E+05	2.06E+06	1.08E+07	3.18E+05	6.27E+05	3.97E+05	7.24E+05	1.58E+07	
Treibhauseffekt	[kg CO <sub>2</sub> -Äq]	Treibhauseffekt, nGK	4.92E+04	1.01E+05	2.18E+06	1.11E+05	9.81E+04	0.00E+00	1.80E+04	2.56E+06	
		Treibhauseffekt, RC-GK	3.44E+04	1.03E+05	2.30E+06	7.39E+03	3.62E+04	2.29E+04	4.21E+04	2.55E+06	
Emissionen und Ressourcenverbrauch	nGK	AP, Ø eur. [kg SO <sub>2</sub> -Äq]	2.99E+02	5.45E+02	3.06E+03	6.43E+02	5.17E+02	0.00E+00	9.86E+01	5.17E+03	
		Nox [kg]								6.03E+03	
		Luftpartikelstoffe <10µm [kg]	5.49E+01	1.09E+02	3.25E+02	7.75E+01	4.90E+01	0.00E+00	9.47E+00	6.24E+02	
		Dioxine / Furane [kg]								8.42E-04	
		Landinanspruchnahme [m <sup>2</sup> -a]	7.44E+04	9.84E+03	1.62E+04	1.95E+04	1.53E+03	0.00E+00	3.18E+02	1.22E+05	
		natürliche Ressourcen	Wasser [m <sup>3</sup> ]								5.57E+06
			Kies [kg]	2.08E+07	7.40E+04	6.06E+04	1.39E+06	1.39E+05	0.00E+00	2.24E+04	2.25E+07
			Rohöl [kg]								2.13E+05
			Steinkohle [kg]								1.69E+05
			Ton [kg]								1.09E+06
			Kalkspat [kg]								2.87E+06
			Biomasse								9.02E+04
		Energieressourcen [MJ]	Wind								1.28E+04
			Wasser								7.66E+05
	Solar									3.45E+02	
	RC-GK	AP, Ø eur. [kg SO <sub>2</sub> -Äq]	2.09E+02	5.54E+02	3.24E+03	3.84E+01	1.91E+02	1.21E+02	2.30E+02	4.58E+03	
		Nox [kg]								5.10E+03	
		Luftpartikelstoffe <10µm [kg]	3.84E+01	1.10E+02	3.43E+02	5.59E+00	1.81E+01	1.14E+01	2.21E+01	5.48E+02	
		Dioxine / Furane [kg]								7.01E-04	
		Landinanspruchnahme [m <sup>2</sup> -a]	5.20E+04	9.88E+03	1.71E+04	1.66E+03	5.64E+02	3.57E+02	7.41E+02	8.24E+04	
		natürliche Ressourcen	Wasser [m <sup>3</sup> ]								5.70E+06
			Kies [kg]	1.45E+07	7.62E+04	6.40E+04	4.32E+04	5.11E+04	3.23E+04	5.24E+04	1.49E+07
			Rohöl [kg]								1.61E+05
			Steinkohle [kg]								1.72E+05
			Ton [kg]								1.15E+06
			Kalkspat [kg]								3.03E+06
			Biomasse								8.79E+04
Energieressourcen [MJ]		Wind								1.22E+04	
		Wasser								7.84E+05	
	Solar								3.41E+02		

Abb. G.5  
Ergebnisse Szenariorechnung

# Anhang

## Regionale Bewirtschaftung von Betonabbruch

			Herstellung natürliche Gesteinskörnung	Transport natürliche Gesteinskörnung	Transport rezyklierte Gesteinskörnung	Transport Beton	-	
KEA [MJ-Äq]	Energiebedarf, Szenario A		6.09E+08	5.93E+08	2.42E+07	1.25E+08	1.35E+09	
	Energiebedarf, Szenario B		6.70E+08	6.27E+08	2.42E+07	1.25E+08	1.45E+09	
GWP [kg CO2-Äq]	Treibhauseffekt, Szenario A		2.20E+07	3.30E+07	1.40E+06	7.20E+06	6.35E+07	
	Treibhauseffekt, Szenario B		2.31E+07	3.53E+07	1.40E+06	7.20E+06	6.70E+07	
Emissionen und Ressourcenverbrauch	Szenario A	AP, Ø eur. [kg SO2-Äq]	1.25E+05	1.73E+05	7.36E+03	3.79E+04	3.44E+05	
		Nox [kg]					1.31E+06	
		Luftpartikelstoffe <10µm [kg]	2.39E+04	1.99E+04	6.98E+02	3.59E+03	4.81E+04	
		Dioxine / Furane [kg]					2.22E-01	
		Landinanspruchnahme [m2-a]	2.62E+07	6.34E+05	2.18E+04	1.12E+05	2.70E+07	
		natürliche Ressourcen	Wasser [m3]					1.58E+09
			Kies [kg]	7.26E+09	4.98E+07	1.97E+06	1.02E+07	7.32E+09
			Rohöl [kg]					4.23E+07
			Steinkohle [kg]					3.88E+07
			Ton [kg]					2.41E+08
		Energieressourcen [MJ]	Kalkspat [kg]					6.33E+08
			Biomasse					2.22E+07
			Wind					3.44E+06
			Wasser					2.26E+08
	Solar						9.62E+04	
	Szenario B	AP, Ø eur. [kg SO2-Äq]	1.29E+05	1.86E+05	7.36E+03	3.79E+04	3.60E+05	
		Nox [kg]					1.37E+06	
		Luftpartikelstoffe <10µm [kg]	2.50E+04	2.00E+04	6.98E+02	3.59E+03	4.93E+04	
		Dioxine / Furane [kg]					2.33E-01	
		Landinanspruchnahme [m2-a]	2.52E+07	6.34E+05	2.18E+04	1.12E+05	2.60E+07	
		natürliche Ressourcen	Wasser [m3]					1.65E+09
			Kies [kg]	6.95E+09	5.22E+07	1.97E+06	1.02E+07	7.02E+09
			Rohöl [kg]					4.44E+07
			Steinkohle [kg]					4.09E+07
			Ton [kg]					2.55E+08
		Energieressourcen [MJ]	Kalkspat [kg]					6.69E+08
			Biomasse					2.33E+07
			Wind					3.67E+06
Wasser							2.36E+08	
Solar						1.03E+05		

Abb. G.6  
Ergebnisse Szenariorechnung

# Anhang H: Grundlage Sensitivitätsanalyse/ Parametervariation

Faktor	Bezugseinheit	CEP [MJ-Äq]	GWP, 100a [CO <sub>2</sub> -Äq]	AP, Ø eur. [kg SO <sub>2</sub> -Äq]	NO <sub>x</sub> [kg]	Luftpartikelstoffe <10µm [kg]	Dioxine / Furane [kg]	Landnutzung [m <sup>2</sup> -a]	natürliche Ressourcen	Energieressourcen [MJ]	UBP [UBP]	
Transporte	Lastwagen >10t	1 tkm	2.15E+00	1.25E-01	6.85E-04	1.04E-03	6.58E-05	1.14E-10	2.21E-03	Turbiniwasser 0,16m <sup>3</sup> Kies 0,16kg Rohöl 0,04kg Steinkohle 0,01kg	Biomasse 4,07E-03 Wind 1,04E-03 Wasser 2,95E-02 Solar 1,94E-05	1.41E+02
	Lastwagen >28t	1 tkm	2.36E+00	1.36E-01	7.18E-04	1.08E-03	6.81E-05	1.17E-10	2.12E-03	Turbiniwasser 0,16m <sup>3</sup> Kies 0,19kg Rohöl 0,04kg Steinkohle 0,01kg	Biomasse 4,16E-03 Wind 1,08E-03 Wasser 2,91E-02 Solar 1,98E-05	1.50E+02
	Bahn	1 tkm	5.67E-01	1.44E-02	6.53E-05	6.83E-05	5.63E-05	5.00E-12	1.95E-03	Turbiniwasser 1,51m <sup>3</sup> Kies 0,07kg	Biomasse 2,36E-03 Wind 4,86E-04 Wasser 2,85E-01 Solar 8,84E-06	3.04E+01
Zemente	CEM I, 42,5	1 kg	3.80E+00	8.22E-01	1.14E-03	1.18E-03	1.20E-04	6.16E-11	5.84E-03	Turbiniwasser 1,64m <sup>3</sup> Kalkspat 1,08kg Ton 0,41kg Steinkohle 0,05kg Rohöl 0,03kg Kies 0,02kg	Biomasse 2,96E-03 Wind 2,64E-03 Wasser 1,91E-01 Solar 7,81E-05	4.59E+02
	CEM I, 52,5	1 kg	4.03E+00	8.32E-01	1.16E-03	1.20E-03	1.22E-04	6.23E-11	5.96E-03	Turbiniwasser 1,64m <sup>3</sup> Kalkspat 1,09kg Ton 0,41kg Steinkohle 0,06kg Rohöl 0,03kg Kies 0,02kg	Biomasse 1,74E-02 Wind 3,07E-03 Wasser 2,20E-01 Solar 9,27E-05	4.70E+02
	CEM II, A-L 32,5	1 kg	3.38E+00	7.19E-01	1.01E-03	1.05E-03	1.07E-04	5.58E-11	5.35E-03	Turbiniwasser 1,30m <sup>3</sup> Kalkspat 0,94kg Ton 0,35kg Steinkohle 0,05kg Rohöl 0,03kg Kies 0,02kg	Biomasse 1,52E-02 Wind 2,39E-03 Wasser 1,72E-01 Solar 7,08E-05	4.04E+02
	CEM II, A-S 42,5	1 kg	3.55E+00	7.05E-01	1.01E-03	1.03E-03	1.06E-04	5.57E-11	5.34E-03	Turbiniwasser 1,44m <sup>3</sup> Kalkspat 0,92kg Ton 0,34kg Steinkohle 0,05kg Rohöl 0,03kg Kies 0,02kg	Biomasse 1,58E-02 Wind 2,77E-03 Wasser 1,95E-01 Solar 8,98E-05	4.03E+02
	CEM II, A-S 42,5	1 kg	3.55E+00	7.05E-01	1.01E-03	1.03E-03	1.06E-04	5.57E-11	5.34E-03	Turbiniwasser 1,44m <sup>3</sup> Kalkspat 0,92kg Ton 0,34kg Steinkohle 0,05kg Rohöl 0,03kg Kies 0,02kg	Biomasse 1,58E-02 Wind 2,77E-03 Wasser 1,95E-01 Solar 8,98E-05	4.03E+02
Beton	C30/37, 1999kg nGK, 303kg CEM II	1 m <sup>3</sup>	1.36E+03	2.34E+02	4.02E-01	4.32E-01	4.88E-02	6.49E-08	1.04E+01	Turbiniwasser 515m <sup>3</sup> Kalkspat 287kg Ton 109kg Steinkohle 16,1kg Rohöl 12,8kg Kies 2094kg	Biomasse 8,34E-00 Wind 1,12E-00 Wasser 7,06E+01 Solar 3,14E-02	2.08E+05
	C30/37, 1397kg nGK, 466kg RC-GK, 320kg CEM II	1 m <sup>3</sup>	1.41E+03	2.46E+02	4.13E-01	4.43E-01	4.94E-02	6.09E-08	8.40E+00	Turbiniwasser 530m <sup>3</sup> Kalkspat 303kg Ton 115kg Steinkohle 16,8kg Rohöl 13,2kg Kies 1472kg	Biomasse 8,48E-00 Wind 1,15E-00 Wasser 7,34E+01 Solar 3,25E-02	1.97E+05
	C30/37, 932kg nGK, 932kg RC-GK, 320kg CEM II	1 m <sup>3</sup>	1.40E+03	2.45E+02	4.10E-01	4.39E-01	4.86E-02	5.72E-08	6.82E+00	Turbiniwasser 539m <sup>3</sup> Kalkspat 309kg Ton 115kg Steinkohle 16,8kg Rohöl 13,1kg Kies 992kg	Biomasse 8,41E-00 Wind 1,15E-00 Wasser 7,99E+01 Solar 3,27E-02	1.84E+05
Entsorgungsdienleistung	Deponie mineralischer Bauabfall (inkl. Transporte)	1 kg	2.48E-01	9.97E-03	5.80E-05	8.59E-05	6.87E-06	8.14E-12	1.64E-03	Turbiniwasser 0,01m <sup>3</sup> Kies 0,12kg	Biomasse 3,14E-04 Wind 8,21E-05 Wasser 1,70E-03 Solar 1,51E-06	1.45E+01
Abbruch	Baumaschinenaufwand bei Abbrucharbeiten	1 kg	6.04E-02	3.99E-03	3.08E-05	4.72E-05	8.48E-05	1.44E-12	1.47E-05	Turbiniwasser 1,22E-03m <sup>3</sup> Rohöl 1,17E-03kg	Biomasse 5,10E-05 Wind 2,17E-05 Wasser 1,48E-04 Solar 3,12E-07	1.70E+01
Grundlagengewinnung	RC, ab Abbruch (Allokationsfaktor =0.815)	1 kg	5.48E-02	1.34E-03	7.05E-06	8.85E-06	1.02E-06	6.19E-13	3.27E-04	Turbiniwasser 0,03m <sup>3</sup> Steinkohle 1,33E-04kg Rohöl 3,77E-04kg Kies 0,03kg	Biomasse 2,03E-04 Wind 8,24E-05 Wasser 5,13E-03 Solar 2,71E-06	2.81E+00
	Abbau gebrochener Kies	1kg	1.36E-01	4.32E-03	2.31E-05	2.19E-05	4.59E-06	1.69E-11	3.72E-03	Wasser 8,61E-02m <sup>3</sup> Rohöl 6,97E-04kg Kies 1,04kg	Biomasse 9,16E-04 Wind 2,90E-04 Wasser 1,95E-02 Solar 7,19E-06	3.81E+01
	Abbau Rundkies	1 kg	5.87E-02	2.46E-03	1.50E-05	1.87E-05	2.75E-06	8.67E-12	3.72E-03	Wasser 2,74E-02m <sup>3</sup> Rohöl 5,36E-04kg Kies 1,04kg	Biomasse 3,51E-04 Wind 7,80E-05 Wasser 4,13E-03 Solar 2,28E-06	3.47E+01

Abb. H.1  
Tabellen als Grundlage zur Berechnung der Sensitivität einzelner Parameter

# Anhang I: Betrachtung Wirkungskategorien und Umweltbelastungspunkte

Konstruktionsbeton C30/37	
Menge-Einheit	1 m <sup>3</sup>
Zementart [-]	CEM II, A-L, 32.5 (Kalksteinzement)
Zementmenge [kg]	303
Wassermenge [kg]	148.12
Kiesart [-]	Rundkies
Kiesmenge [kg]	1999
UBP <sub>total</sub> ·m <sup>-3</sup> [UBP]	2.08E+05

Stoffflüsse [-m <sup>3</sup> ]					
Input	Output	Menge	UBP·[-] <sup>1</sup>	UBP	% UBP <sub>total</sub> ·m <sup>-3</sup>
	<b>Partikelstoffe &lt;10µm [kg]</b>	<b>4.88E-02</b>	<b>1.50E+05</b>	<b>7.32E+03</b>	<b>3.51%</b>
Kies [kg]		2.09E+03	2.90E+01	6.07E+04	29.15%
	No <sub>x</sub> [kg]	4.32E-01	4.50E+04	1.95E+04	9.34%
	SO <sub>2</sub> [kg]	1.43E-01	3.00E+04	4.28E+03	2.05%
	CO <sub>2</sub> [kg]	2.29E+02	3.10E+02	7.10E+04	34.07%
	Dioxine [kg]	2.53E-10	5.70E+13	1.44E+04	6.92%
	Furane [kg]	6.47E-08	1.80E+04	1.16E-03	0.00%
Rohöl [kg]		1.28E+01	1.51E+02	1.93E+03	0.93%
Steinkohle [kg]		1.61E+01	6.30E+01	1.01E+03	0.49%
Ton [kg]		1.09E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00%
Kalkspat [kg]		2.87E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00%
Energieressourcen, Biomasse [MJ]		8.34E+00	3.30E+01	2.75E+02	0.13%
Energieressourcen, Wasser [MJ]		7.06E+01	1.50E+00	1.06E+02	0.05%
Energieressourcen, Wind [MJ]		1.12E+00	1.02E+00	1.14E+00	0.00%
Energieressourcen, Solar [MJ]		3.14E-02	1.00E+00	3.14E-02	0.00%

∑ UBP

1.80E+05

86.65%

Abb. I.1  
Deckungsgrad der Wirkungskategorien im Vergleich mit Umweltbelastungspunkten (UBP); Beton gemäss Rezeptur Holcim

# Anhang J: Einfluss Zusatzmittel

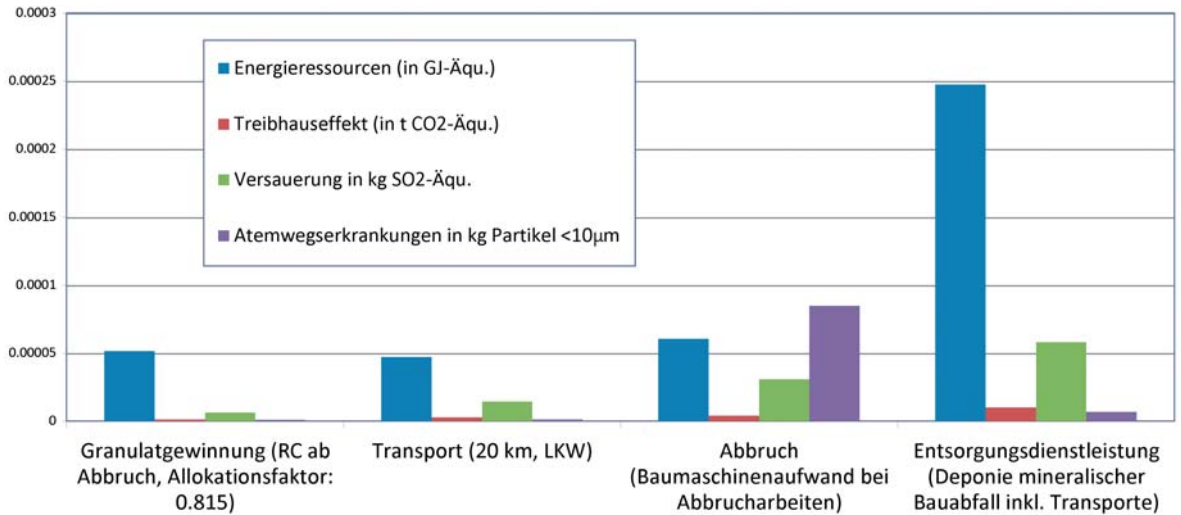
	Konstruktionsbeton für hohe Anforderungen
Menge-Einheit	1 m <sup>3</sup>
Zementart [-]	CEM I, 42.5
Zementmenge [kg]	375
Wassermenge [kg]	150
Kiesart [-]	Rundkies
Kiesmenge [kg]	1880
UBP·m <sup>3</sup> [UBP]	236649
CEDE·m <sup>3</sup> [MJ-Äq]	1592
Treibhauseffekt·m <sup>3</sup> [CO <sub>2</sub> -Äq]	288

Zusatzmittelbestandteil	Einheit	Menge	UBP·m <sup>3</sup> [UBP]	CEDE·m <sup>3</sup> [MJ-Äq]	Treibhauseffekt·m <sup>3</sup> [CO <sub>2</sub> -Äq]
organische Chemikalien	kg·m <sup>-3</sup> Beton	0.678			
Natriumhydroxid 50% in Wasser	kg·m <sup>-3</sup> Beton	0.5544			
Wasser, vollentsalzt	kg·m <sup>-3</sup> Beton	3.903			
in Industrieheizung verbranntes Erdgas	MJ·m <sup>-3</sup> Beton	0.215			
Formaldehyd	kg·m <sup>-3</sup> Beton	0.149			
Schwefelsäure	kg·m <sup>-3</sup> Beton	0.642			

Σ	3317	65	1
%	1.4%	4.1%	0.3%

**Abb. J.1**  
Einfluss Zusatzmittel für einen Konstruktionsbeton für hohe Anforderungen (Inventar ecoinvent)

# Anhang K: Wirkungsabschätzung für Prozesse im Kontext der Entsorgung von Betonabbruch



**Abb. K.1**  
**Wirkungsabschätzung Prozesse, die im Rahmen der Entsorgung von Betonabbruch durchgeführt werden.**

Wirkungsabschätzung für vier Prozesse, die im Rahmen der Entsorgung von Betonabbruch durchgeführt werden (jeweils bezogen auf 1 kg Betonabbruch): die Herstellung von Betongranulat, ein LKW-Transport von Betongranulat über 20 Kilometer, der Abbruch von 1 kg Gebäude für die Gewinnung von Betonabbruch und die Entsorgung von 1 kg Betonabbruch in einer Inertstoffdeponie (inkl. Transport von der Baustelle zur Deponie). Quelle: Anhang H in diesem Bericht.

# Quellen- und Abkürzungsverzeichnis

## Quellen

- Althaus H.-J., Lehmann M. und Kellenberger D. (2008), Ökologische Baustoffliste (v2.06), Empa Abteilung Technologie und Gesellschaft, Dübendorf.
- Arioli M. und Haag M. (2001), Bauabfälle Schweiz – Mengen, Perspektiven und Entsorgungswege. Band 1 und 2. Umwelt-Materialien Nr. 131, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Buwal), Bern.
- Boesch M. E., Hellweg S., Huijbregts M. A. J. and Frischknecht R. (2007), Applying Cumulative Exergy Demand (CExD) Indicators to the ecoinvent Database. In: Int J LCA, 12(3), pp. 181–190.
- Bafu (2006), Bundesamt für Umwelt (Bafu), 2006: Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle. Umwelt-Vollzug Nr. 0631.
- Cemsuisse (2007), POPs in der Schweizerischen Zementindustrie. Verband der Schweizerischen Zementindustrie. Bern 2007.
- Doka G. (2000), Ökoinventar der Entsorgungsprozesse von Baumaterialien. Schweizerische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Dübendorf.
- Frischknecht R., Steiner R. und Jungbluth N. (2008), Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 2006. Methode für die Wirkungsabschätzung in Ökobilanzen. Bundesamt für Umwelt (Bafu), Bern.
- Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Dones R., Hischier R., Hellweg S., Humbert S., Margni M., Nemecek T. and Spielmann M. (2003), Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Final report ecoinvent 2000 No. 3. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- Guinée J. B., Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H. A., de Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M. A. J., Lindeijer E., Roorda A. A. H. und Weidema B. P. (2001), Life cycle assessment; An operational guide to the ISO standards; Characterisation and Normalisation Factors. Leiden.
- Harbi S., Loerincik Y., Margni M. und Humbert S. (2008), Analyse de cycle de vie de la fourniture de gravières en région Vaudoise, Rapport final, EcoIntesys, Lausanne.
- Hauer B., Klein H., Müller, C., Ruppert J., Schäfer S., Spanka G., Wassing W., Zunzer U., Ramolla S., Rübner K. und Meng B. (2007): Potenziale des Sekundärstoffeinsatzes im Betonbau – Teilprojekt B1. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.), Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens «Nachhaltig Bauen mit Beton». Beuth-Verlag Berlin 2007. S. 131–221.
- Hoffmann C. und Huth O. (2006), Konstruktionsbeton aus rezyklierter Gesteinskörnung (Beton- und Mischgranulat), Empa Report-Nr. 204 500.
- Hoffmann C. und Jacobs F. (2007), Recyclingbeton aus Beton- und Mischgranulat, Sachstandsbericht, Empa Report-Nr. 205 670.
- Hoffmann C. und Leemann A. (2009), Recyclingbeton – aktuelle Erfahrungen und neueste Erkenntnisse, 15. Holcim-Betontagung an der ETH Zürich 2009.
- ISO 14040 (2006), Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Ausgabe 2006-10.
- ISO 14044 (2006), Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. Ausgabe 2006-11.
- Jeske U., Buchgeister J., Schebeck L. und Weil M. (2004), Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung – eine Ökobilanz.

## Quellen- und Abkürzungsverzeichnis

- Nachrichten – Forschungszentrum Karlsruhe Jahrg. 36  
3/2004, S. 219–224.
- Kellenberger D., Althaus H.-J., Jungbluth N. und Künniger  
T. (2003), Life Cycle Inventories of Building Products. Final  
report ecoinvent 2000 No. 7, Empa Dübendorf, Swiss  
Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- Kind E., Müller E., Vogt L. und Suter B. (2006), Kieshaus-  
halt Schweiz: Eine ökonomische Betrachtung. Semester-  
arbeit an der ETH Zürich im Wintersemester 2005/6.
- Köllner T. (2001), Land Use in Product Life Cycles and its  
Consequences for Ecosystem Quality. Dissertation Nr.  
2519. Universität St. Gallen, Hochschule für Wirtschafts-,  
Rechts- und Sozialwissenschaften (HSG), St. Gallen.
- Künniger T., Werner F. und Richter K. (2001), Ökologische  
Bewertung von Kies, Zement und Beton in der Schweiz.
- Schweizerische Materialprüfungs- und Forschungs-  
anstalt (Empa), Dübendorf.
- Müller C. (2001), Beton als kreislaufgerechter Baustoff.  
Dissertation. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton  
(Hrsg.), Heft 513. Berlin 2001.
- Schäffeler U. und Keller M. (2008), Treibstoffverbrauch  
und Schadstoffemissionen des Offroad-Sektors. Studie  
für die Jahre 1980–2020. Umwelt-Wissen Nr. 0828.  
Bundesamt für Umwelt (Bafu), Bern.
- SN EN 206-1 (2003), Beton – Teil 1: Festlegung, Eigen-  
schaften, Herstellung und Konformität.
- Spielmann M., Kägi T., Stadler P. und Tietje O. (2004), Life  
cycle inventories of transport services. Final report ecoin-  
vent 2000 No. 14. UNS, ETH-Zürich, Swiss Centre for Life  
Cycle Inventories, Dübendorf.

## Abkürzungen

Bafu	Bundesamt für Umwelt	IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
BHKW	Blockheizkraftwerk	ISO	International Organization for Standardization
CED	Cumulative Energy Demand	KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren
CEM I	Portlandzement	LCA	Life Cycle Assessment (= Lebenszyklus- analyse)
CEM II	Portlandkompositzement	LKW	Lastkraftwagen
CEM II/A-LL	Portlandkalksteinzement	MJ-Äq	Megajoule-Äquivalent
CENTREL	Osteuropäisches Stromverbundnetz	nGK	natürliche Gesteinskörnung
CH	Länderkennung Schweiz	NPK	Normpositionenkatalog
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid	RC-Beton	Recycling-Beton
CO <sub>2</sub> -Äq	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent	RC-GK	Recycling-Gesteinskörnung
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt	SBB	Schweizerische Bundesbahnen
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule	SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
GWP	Global Warming Potential (= Treibhaus- potenzial)	TJ-Äq	Terajoule-Äquivalent
Heizöl EL	Heizöl extraleicht		
Heizöl S	Heizöl schwer		
IBU	Institut für Bau und Umwelt, Hochschule für Technik Rapperswil		







**Holcim (Schweiz) AG**

Marketing und Technischer Support

Hagenholzstrasse 83

8050 Zürich

Schweiz

Telefon +41 58 850 68 68

Telefax +41 58 850 68 69

[marketing-ch@holcim.com](mailto:marketing-ch@holcim.com)

[www.holcim.ch](http://www.holcim.ch)