

Vergleichende CO₂-Bilanz: Ortsnahe Verwertung mineralischer Bauabfälle gegenüber ortsferner Deponierung und Verfüllung

Verfasser des Forschungsberichts:

Prof. Dr.-Ing. Thorsten Stengel

Prof. Dr.-Ing. Andrea Kustermann

München, 26.06.2021

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG	3
2	GEBÄUDEABBRUCH AN DER BAYERNKASERNE IN MÜNCHEN	5
2.1	Vorbemerkungen	5
2.2	Abbruch und Herstellung rezyklierte Gesteinskörnung für Beton	6
2.3	Abbruch und Deponierung	9
2.4	RC-Beton mit 100% RC-Anteil Bayernkaserne (RC-B100, RC-B100V)	12
2.5	RC-Betone und Normalbeton Fa. Märker (Vergleichsbetone)	13
2.5.1	Vorbemerkungen	13
2.5.2	RC-Beton C25/30 25% RC-Anteil (RC-M25)	14
2.5.3	RC-Beton C25/30 35% RC-Anteil (RC-M35)	15
2.5.4	Normalbeton C25/30 (Vergleichsbeton NB-M)	16
2.6	CO ₂ -Bilanz	17
2.6.1	Vorbemerkungen	17
2.6.2	Produktsystem 1 (Abbruch, Aufbereitung bzw. Transport zur Deponie)	17
2.6.3	Produktsystem 2 linear und zirkulär (Herstellung von 1 m ³ Frischbeton)	18
3	ABBRUCH DER MAINFLUTBRÜCKE	22
3.1	Vorbemerkungen	22
3.2	Abbruch- und Aufbereitungsprozesse (Herstellung RC-Material für Hinterfüllung)	23
3.3	Abbruch- und Deponierung, Gewinnung und Antransport von Kies als Hinterfüllmaterial	25
3.4	CO ₂ -Bilanz	28
4	SCHLUSSFOLGERUNGEN AUS DEN DURCHGEFÜHRTEN ÖKOBILANZIERUNGEN	30
4.1	Verwendung von Betonabbruch als rezyklierte Gesteinskörnung in Beton	30
4.2	Verwendung von Betonabbruch als rezykliertes Hinterfüllmaterial	30
5	ZUSAMMENFASSUNG	31

1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Der Landesverband Bayerischer Bauinnungen (im Weiteren LBB) beauftragte im Juni 2020 die Hochschule München mit der Durchführung einer CO₂-Bilanz für die ortsnahe Aufbereitung und Verwendung (zirkuläres Wirtschaftssystem) im Vergleich zu einer ortsfernen Deponierung und Verfüllung (lineares Wirtschaftssystem) mineralischer Bauabfälle. Die Durchführung der vergleichenden CO₂-Bilanzen war für drei Praxisbeispiele (Abbruch Gebäude der Bayernkaserne München, Abbruch Mainflutbrücke und Abbruch Gebäude der Prinz-Leopold-Kaserne Regensburg) vorgesehen. Da für die Abbruchmaßnahmen an der Prinz-Leopold-Kaserne keine Daten zur Verfügung gestellt werden konnten, wurde die Studie auf den Abbruch der Mainflutbrücke und den Abbruch der Gebäude an der Bayernkaserne in München beschränkt. Für die letztgenannte Maßnahme wurden zusätzliche Betrachtungen zum Einfluss des Bindemittels bei den analysierten Betonsorten integriert.

Die beiden Praxisbeispiele unterscheiden sich hinsichtlich der Verwendung der Recyclingmaterialien. Im Falle der Bayernkaserne in München wird das Rezyklat als Gesteinskörnungseratz bei der Herstellung von Recycling-Beton (RC-Beton) auf der Baustelle verwendet. Als Vergleich zu 1 m³ RC-Beton wird ein gleichwertiger Transportbeton mit natürlicher Gesteinskörnung analysiert. Hierbei wird auch der Einfluss der Zusammensetzung des Bindemittels untersucht. Im zweiten Praxisbeispiel (Mainflutbrücke) wird grobkörniges RC-Material zur Verfüllung neu zu errichtender Brückenwiderlager eingesetzt. Für die Vergleichsvariante nach dem linearen Wirtschaftsmodell wird jeweils der Transport zur Deponie und die Bereitstellung der Primärbaustoffe abgebildet. Besonderes Augenmerk wird bei beiden Praxisbeispielen auf den Einfluss der erforderlichen Transporte gelegt.

Die CO₂-Bilanzierungen wurden mit Hilfe der Software openLCA und der Datenbank ecoinvent 3.6 durchgeführt. Die in der Datenbank enthaltenen Prozessdatensätze wurden – wo erforderlich – auf Basis der zur Verfügung gestellten Informationen aus den Praxisbeispielen angepasst, um eine möglichst realistische Modellierung der jeweiligen Maßnahme sicherzustellen. Dies betrifft beispielsweise den gesamten Herstellungsprozess der RC-Gesteinskörnung im Abbruchvorhaben der Bayernkaserne. Hierbei wurden die einzelnen Maschinendatensätze (Bagger, Radlader, Brecheranlage) hintereinander verknüpft, wobei die Maschinendaten von den beteiligten Firmen zur Verfügung gestellt wurden. Sofern keine Informationen zu einzelnen Prozessen aus den Praxisbeispielen vorlagen, wurden die Datensätze aus ecoinvent bzw. Erkenntnisse aus der Literatur verwendet.

Tabelle 1 gibt eine Übersicht der analysierten Produktsysteme. Die Systemgrenzen wurden so gewählt, dass Umweltwirkungen aus der Errichtung und Nutzung der abzubrechenden Bauwerke (Gebäude der Bayernkaserne bzw. Mainflutbrücke) keine Berücksichtigung fanden. Auch die Nutzung und Entsorgung der resultierenden Produktsysteme (siehe Produktsystem 2 in Tabelle 1) wurden nicht berücksichtigt.

Tabelle 1: Übersicht der analysierten Produktsysteme

Objektbeispiel	Wirtschaftsmodell	Produktsystem 1 (funktionelle Einheit)		Produktsystem 2 (funktionelle Einheit)
A Bayernkaserne München	zirkulär Z	Abbruch + Aufbereitung zu RC-0/16 (33000 to)	mit Verwendung in ²	1m ³ RC-Beton auf der Baustelle
	linear L	Abbruch & Depositionierung (33000 to)		1m ³ konv. Beton auf der Baustelle ¹
B Mainflutbrücke Baunach	zirkulär Z	Abbruch & Aufbereitung zu RC-0/56 (2500 to)	mit Verwendung als ²	2500 to RC-Schotter auf der Baustelle
	linear L	Abbruch & Depositionierung (2500 to)		2500 to nat. Schotter auf der Baustelle ¹

¹konv. = konventionell

²im zirkulären Wirtschaftsmodell werden im Produktsystem 2 die Outputs von Produktsystem 1 verwendet

2 GEBÄUDEABBRUCH AN DER BAYERNKASERNE IN MÜNCHEN

2.1 Vorbemerkungen

Auf dem ca. 48 ha großen Gelände der ehemaligen Bayernkaserne und einer östlich angrenzenden 10 ha großen Fläche soll ein Stadtquartier für ca. 15.000 Einwohner entstehen. Die neue Bebauung wird mit 2.000.000 m³ BRI in etwa viermal so groß sein wie die bisher vorhandene Bebauung.

Im Rahmen von Baufeldfreimachung und Neubebauung sind ca. 5.000.000 t Mineralstoffe an- oder abzutransportieren. Aus 50% dieses Materials soll Gesteinskörnung für RC-Beton, Substrate für den Landschaftsbau sowie Schüttmaterial gewonnen und vor Ort wieder eingesetzt werden. Dadurch sollen mindestens 10% der geschätzten Kosten von 90 Mio € für die Baufeldfreimachung eingespart werden. Das Projekt ist für die Stadt München wegen der hohen Recyclingquote einzigartig.

Im Rahmen dieses Bauvorhabens „Bayernkaserne“ soll die Gelegenheit genutzt werden, auf dieser großen Fläche das Abbruchmaterial, hochwertigen Bauschutt wieder als hochwertige rezyklierte Gesteinskörnung für Beton einzusetzen, immense Transportwege einzusparen und damit echte Ressourcenschonung zu betreiben.

2.2 Abbruch und Herstellung rezyklierte Gesteinskörnung für Beton

Für die Modellierung der Abbruch- und Aufbereitungsprozesse standen Daten von drei abzubrechenden Gebäuden der Bayernkaserne zur Verfügung, siehe Abbildung 1.



Abbildung 1: Ehemalige Bayernkaserne - Markierung der Abbruchgebäude dieser Studie (gelb)

Die Daten für die Modellierung der Abbruch- und Aufbereitungsprozesse stammen von der Fa. Ettengruber GmbH (Ansprechpartner: Herr Michael Weiß). Um den Vergleich der zwei Verwertungsvarianten (zirkulär und linear) auf derselben Grundlage durchführen zu können, wurde beim Produktsystem 2 die Bezugsgröße bzw. funktionelle Einheit von 1 m³ Beton eingeführt. Die Modellierung der Abbruch- und Aufbereitungsprozesse (Produktsystem 1) wurde mit 33.000 t Betonabbruchmaterial durchgeführt (Umfang an verfügbaren Daten). Das Abbruchmaterial wurde durch Aufbereitungsprozesse auf dem Gelände der Bayernkaserne zu rezyklierter Gesteinskörnung (RC-GK) aufbereitet, welche zur Herstellung von RC-Beton direkt auf der Baustelle in einer Baustellenmischanlage verwendet wurde. Hierbei sind nur geringe Transportwege notwendig. Der Abbau und Transport von Primärbaustoffen (Gesteinskörnung) in gleicher Menge auf die Baustelle wurde somit eingespart.

Im Rahmen dieser Studie wurden sämtliche Rückbau-, Sortier-, Transport-, Zerkleinerungs- und Aufbereitungsprozesse betrachtet, so dass die resultierende rezyklierte Gesteinskörnung (Körnung 0/16, Produktsystem 1) unmittelbar für die Herstellung von RC-Beton verwendet werden kann.

Der maschinelle Abbruch und die Aufbereitung des abgebrochenen Betonbruchs stellen zugleich die Herstellung eines Sekundärrohstoffs dar. Somit waren für die CO₂-Bilanzierung die entsprechenden Prozesse zu erfassen und die damit verbundenen CO₂-Emissionen mit Hilfe adäquater Datensätze aus der ecoinvent-Datenbank zu berechnen. In Abstimmung mit der Fa. Ettengruber GmbH wurden für den Abbruch und die Aufbereitung sieben Prozess- bzw. Arbeitsschritte identifiziert, welche nacheinander stattgefunden haben, siehe Tabelle 2. Für die sieben Teilprozesse wurden die folgenden technischen Daten der eingesetzten Maschinen gesammelt und mit den Werten aus der Literatur verglichen:

- Typ, Name, Modell
- Motorleistung [kWh] → Auswahl des ecoinvent-Datensatzes
- Arbeitsleistung [t/h] → Ableitung Gesamtaufwandsstunden
- Treibstoffverbrauch [l/h] → Ableitung bezogener Treibstoffverbrauch / Gesamtverbrauch

In Tabelle 2 ist für jeden Prozess die „quantitative Referenz“-Einheit und der Wert in Rot dargestellt, auf welche alle Input und Output-Flüsse bezogen sind. Beispielsweise ist der Rohdatensatz des ersten Prozesses (Abbruch mit Hydraulikbagger) auf 1 m³ Abbruch bezogen. Somit wurden alle Inputs und Outputs mit dem Faktor 17.368 (gesamtes Abbruchvolumen in m³ = neue quantitative Referenz) hochskaliert, da der Untersuchungsrahmen dieses Abbruchvolumen vorsieht. Dies wurde für alle Prozesse – entweder masse- oder volumenbezogen – gleichermaßen durchgeführt. Lediglich die absoluten Treibstoffverbräuche wurden aufgrund der Datenverfügbarkeit bei jedem Prozess gemäß dem tatsächlichen Verbrauch angepasst. Da vor allem die Auswirkung der unterschiedlichen Transportentfernungen betrachtet werden sollten, wurden die baustelleninternen Transporte in Abstimmung mit den beteiligten Firmen wie folgt definiert:

- Transportentfernung vom Abbruchplatz zum Brecher via Dumper: 500 m
- Transportentfernung vom Brecher zum Betonmischanlage via LKW: 500 m

Die Umrechnung der Volumina auf Tonnagen erfolgte mit der Schüttdichte von 1,90 t/m³, wobei die Werte in der Literatur diesbezüglich deutlich streuen. Durch die Produktzertifizierungsstelle für das Material der Mainflutbrücke wurde der oben genannte Wert empfohlen und im Rahmen dieser Studie sowohl für die Mainflutbrücke als auch für die Bayernkaserne verwendet. Die tägliche Arbeitszeit, auf die die Maschinenstunden bezogen wurden, betrug neun Arbeitsstunden je Tag. In ecoinvent wird Diesel nicht in der Einheit Liter, sondern in Kilogramm bilanziert. Die Umrechnung erfolgte mit der Dichte von 0,84 kg/l. Eine weitere Annahme musste für die Modellierung der mobilen Recyclinganlage (Teilprozess 5) getroffen werden, da hierfür kein Datensatz zur Verfügung stand. In ecoinvent liegen jedoch allgemeine Maschinendatensätze vor, die anhand der Motorleistung (bzw. anhand des Treibstoffverbrauchs) und ihrer Auslastung klassifiziert und herangezogen werden können.

Tabelle 2: Teilprozesse 1 bis 7 für den Gebäudeabbruch und die Aufbereitung des Betonbruchs zu rezyklierter Gesteinskörnung für die Verwendung in Beton

Nr.	Bayerkaserne (Z, Produkts. 1)		quantitative Referenzgröße für Inputs/ Outputs				
Herstellung 33000 to RC-GK			Hilfswerte				
1	Typ	Hydraulikbagger	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	Caterpillar 336	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Abbruch Stahlbeton (Hydraulikgreifer)	17368	33000	2442	71795	2,176
	Leistung [kW]	232		1,900	0,074	29,400	h/At
	Durchsatz [to/h]	13,51		to/m ³	h/to	kg/h	9,000
Datensatz aus ecoinvent: excavation, hydraulic digger							
2	Typ	Hydraulikbagger	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	CAT 325	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Beladung Dumper nach Abbruch	17368	33000	469	7878	0,239
	Leistung [kW]	129		1,900	0,014	16,800	h/At
	Durchsatz [to/h]	70,37		to/m ³	h/to	kg/h	9,000
Datensatz aus ecoinvent: excavation, hydraulic digger							
3	Typ	Dumper	Volumen	Tonage	Tonnenkilometer	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	Volvo A25G	m ³	to	to*km	kg	kg/to
	Tätigkeit	baustelleninterner Transport	17368	33000	16500	21884	0,663
	Leistung [kW]	235		1,900	0,028	23,333	0,500
	Durchsatz [to/h]	35,19		to/m ³	h/to	kg/h	km
Datensatz aus ecoinvent: transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5							
4	Typ	Hydraulikbagger	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	HITACHI 350	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Aufgabe Brechgut in Brecher	17368	33000	313	9191	0,279
	Leistung [kW]	210		1,900	0,009	29,400	9,000
	Durchsatz [to/h]	105,56		to/m ³	h/to	kg/h	h/At
Datensatz aus ecoinvent: excavation, hydraulic digger							
5	Typ	mobile Recyclinganlage	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	Hazemag III	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Zerkleinerung und Eisenseparation	17368	33000	188	5836	0,177
	Leistung [kW]	330		1,900	0,006	18,667	9,000
	Durchsatz [to/h]	175,93		to/m ³	h/to	kg/h	h/At
Datensatz aus ecoinvent: machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor							
6	Typ	großer Radlader	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	CAT 966H	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Laden nach Brecher auf LKW	17368	33000	469	9848	0,298
	Leistung [kW]	195		1,900	0,014	21,000	9,000
	Durchsatz [to/h]	70,37		to/m ³	h/to	kg/h	h/At
Datensatz aus ecoinvent: excavation, skid-steer loader							
7	Typ	LKW	Volumen	Tonage	Tonnenkilometer	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	Mercedes Arocs	m ³	to	to*km	kg	kg/to
	Tätigkeit	baustelleninterner Transport zur BMA	17368	33000	16500	27574	0,836
	Leistung [kW]	265		1,900	0,040	21,000	0,500
	Durchsatz [to/h]	25,13		to/m ³	h/to	kg/h	km
Datensatz aus ecoinvent: transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4							
Summe Diesel Gesamt			154006 Liter				

Für die Modellierung der mobilen Recyclinganlage wurde der Datensatz „machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor“ verwendet. Dieser wurde aufgrund der Auslastung und des Dieselverbrauchs je Stunde (37,6 l/h) ausgewählt. Die Referenzeinheit ist eine Betriebsstunde. Die zu erwartende Lebensdauer der Anlage wurde in Rücksprache mit der Fa. Ettengruber von 4.500 h (ecoinvent) auf 10.000 h (Betriebsstunden) erhöht. Dadurch wird im Vergleich zum ecoinvent-Datensatz der Einfluss der Herstellung und Instandhaltung der Maschine (Infrastruktur anteilig bezogen auf die Referenzeinheit) verringert. Für den Maschinenbetrieb des mobilen Prallbrechers der Fa. Ettengruber stehen Daten zur Durchsatzleistung [t/h] je Arbeitstag zur Verfügung. Die tageweise erfassten Daten wurden über 92 Arbeitstage (18.12.2019 bis 19.06.2020) hinweg gesammelt, getrennt nach drei verschiedenen Materialarten. Aus diesen Daten stammt die Menge an RC-GK (Beton gebrochen) von 33.000 t, mit denen die Prozesse modelliert wurden. Die aus den tageweisen Aufzeichnungen berechneten durchschnittlichen Durchsätze (Körnung 0/16: 70 t/h; Körnung 0/32: 46 t/h) liegen deutlich unterhalb der an verschiedenen Stellen in der Literatur genannten Werte (0/16: 100 t/h bzw. 0/32: 140 t/h). Grund hierfür ist vermutlich die tageweise und nicht stunden-genaue Erfassung der Betriebsdaten der Recyclinganlage. Die aus der tageweisen Erfassung berechneten maximalen Durchsätze (Körnung 0/16: 133 t/h; Körnung 0/32: 139 t/h) liegen hingegen in der Größenordnung der Werte aus der Literatur. Deshalb wurde die Modellierung dieses Prozesses mit den Durchsätzen aus der Literatur durchgeführt.

Für die Umlagerung des RC-Materials mit dem LKW (Teilprozess 7) wird aufgrund des zulässigen Gesamtgewichts (Zuladung 18 t) angenommen, dass vier Tage für 500 m³ (Dumper: 3 Tage für 500 m³) benötigt werden. Hierbei wird ein Treibstoffverbrauch von 25 l/h aufgrund der Kurzstrecke (500 m) angesetzt.

2.3 Abbruch und Deponierung

Betrachtet werden sämtliche Abbruch-, Zerkleinerungs- und Transportprozesse einschließlich des Transports des Betonbruchs über 20 km zur Deponie (Produktsystem 1). Für die Modellierung der Beseitigung auf Deponien wurde angenommen, dass es sich um Bauabfälle der Abfallschlüssel AVV 17 01 01 „Beton“ oder AVV 17 01 07 „Gemische aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 01 06 fallen“ handelt und diese Abfälle auf Inertabfall-Deponien (DK 0 - Deponien) nach den Vorgaben der DepV entsorgt werden können.

Zur Modellierung des Abbruchs und der Deponierung wurden die gleichen sieben Teilprozesse verwendet wie in Tabelle 2 dargestellt, jedoch wurden die Aufwands- und Leistungswerte der Prozesse entsprechend angepasst:

- 1. Teilprozess Hydraulikbagger Abbruch: Bei der Modellierung wurde von einem geringeren Aufwand beim Komplettabbruch im Vergleich zum selektiven Rückbau ausgegangen. Zum Abbruch der 33.000 t wurden nur 75% (\cong 1.831 h bzw. 53.846 l Diesel) der zeitlichen Aufwendung der Recyclingvariante (\cong 2.442 h bzw. 71.795 l Diesel) angesetzt.
- 5. Teilprozess Brecher- und Sortieranlage: Gemäß den Erfahrungsberichten der Fa. Ettengruber wurde für die grobe Zerkleinerung des Abbruchmaterials in die Fraktion 0/56 für

Inertdeponien 40% weniger Aufwand (188 h bzw. 3.501 l Diesel) im Vergleich zur Recyclingvariante (313 h bzw. 5.836 l Diesel) bilanziert. Der resultierende Leistungswert von ca. 170 t/h entspricht gemäß Literatur dem oberen Maximalwert.

- 7. Teilprozess Transport zur Deponie: Da das Inertmaterial nun über eine größere Distanz von 20 km transportiert werden muss, wird ein Verbrauch von 50 l/100 km angesetzt. Mit einer Zuladung von 18 t und einer Strecke von 40 km (Hin- und Rückfahrt) ergeben sich 36.667 l Diesel (Recyclingvariante: 27.574 l Diesel).

Bei den vier verbleibenden Teilprozessen wurde davon ausgegangen, dass diese für beide Wirtschaftsmodelle gleich sind, da es sich um Umschlag- und Verladearbeiten handelt, deren Aufwandswerte unabhängig von der späteren Verwertungsvariante sind. Die Errichtung sowie der Betrieb der Deponie wurde nicht berücksichtigt. Die in die Software eingearbeiteten Daten sind in Tabelle 3 zusammengefasst (quantitativen Referenzgrößen in Rot).

Tabelle 3: Teilprozesse 1 bis 7 für den Gebäudeabbruch und den Transport des aufbereiteten Betonbruchs zur Deponie

Nr.	Bayerkaserne (L, Produkts. 1)		quantitative Referenzgröße für Inputs/ Outputs				
	Herstellung 33000 to Inertmat.		Hilfswerte				
1	Typ	Hydraulikbagger	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	Caterpillar 336	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Abbruch Stahlbeton (Hydraulikgreifer)	17368	33000	1831	53846	1,632
	Leistung [kW]	232		1,900	0,056	29,400	h/At
	Durchsatz [to/h]	18,02		to/m ³	h/to	kg/h	9,000
	Datensatz aus ecoinvent: excavation, hydraulic digger						
2	Typ	Hydraulikbagger	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	CAT 325	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Beladung Dumper nach Abbruch	17368	33000	469	7878	0,239
	Leistung [kW]	129		1,900	0,014	16,800	h/At
	Durchsatz [to/h]	70,37		to/m ³	h/to	kg/h	9,000
	Datensatz aus ecoinvent: excavation, hydraulic digger						
3	Typ	Dumper	Volumen	Tonage	Tonnenkilometer	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	Volvo A25G	m ³	to	to*km	kg	kg/to
	Tätigkeit	baustelleninterner Transport	17368	33000	16500	21884	0,663
	Leistung [kW]	235,00		1,900	0,028	23,333	0,500
	Durchsatz [to/h]	35,19		to/m ³	h/to	kg/h	km
	Datensatz aus ecoinvent: transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5						
4	Typ	Hydraulikbagger	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	HITACHI 350	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Aufgabe Brechgut in Brecher	17368	33000	313	9191	0,279
	Leistung [kW]	210		1,900	0,009	29,400	9,000
	Durchsatz [to/h]	105,56		to/m ³	h/to	kg/h	h/At
	Datensatz aus ecoinvent: excavation, hydraulic digger						
5	Typ	mobile Recyclinganlage	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	Hazemag III	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Zerkleinerung und Eisenseparation	17368	33000	188	3501	0,106
	Leistung [kW]	330		1,900	0,006	18,667	9,000
	Durchsatz [to/h]	175,93		to/m ³	h/to	kg/h	h/At
	Datensatz aus ecoinvent: machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor						
6	Typ	großer Radlader	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	CAT 966H	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Laden nach Brecher auf LKW	17368	33000	469	9848	0,298
	Leistung [kW]	195		1,900	0,014	21,000	9,000
	Durchsatz [to/h]	70,37		to/m ³	h/to	kg/h	h/At
	Datensatz aus ecoinvent: excavation, skid-steer loader						
7	Typ	LKW	Volumen	Tonage	Tonnenkilometer	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	Mercedes Arocs	m ³	to	to*km	kg	kg/to
	Tätigkeit	Transport zur Deponie	17368	33000	660000	36667	1,111
	Leistung [kW]	265		1,900	0,040	21,000	20,000
	Durchsatz [to/h]	25,132		to/m ³	h/to	kg/h	km
	Datensatz aus ecoinvent: transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4						
Summe Diesel Gesamt			142816 Liter				

2.4 RC-Beton mit 100% RC-Anteil Bayernkaserne (RC-B100, RC-B100V)

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführte CO₂-Bilanzierung entspricht den Phasen der elementaren Produktherstellung A1 bis A4 (Gewinnung/Aufbereitung Betonausgangsstoffe, Transporte zum Betonwerk, Betonherstellung, Transporte zur Baustelle).

Das Ende des Produktsystems 1 stellt das aufbereitete und abgekippte RC-Material in der Lagerbucht der mobilen Betonmischanlage (BMA) auf dem Gelände der Bayernkaserne dar. Der Radlader, der die Betonmischanlage mit der RC-GK bestückt, wurde nicht gesondert modelliert, da das Beladen der mobilen Mischanlage mit einem geringen Aufwand verbunden ist (1,742 t GK entspricht maximal drei Schaufelhüben). Darüber hinaus werden im für die Betonherstellung verwendeten Datensatz Energie-Inputs wie in Kapitel 2.5.1 angesetzt. Der Datensatz ist vom Prinzip identisch zu dem Datensatz der Recyclinganlage aufgebaut, sodass lediglich noch die Ausgangsstoffe der jeweiligen Betonrezeptur ergänzt werden müssen. Diese sind in Tabelle 4 für den RC-Beton RC-B100 zusammengefasst.

Tabelle 4: Zusammensetzung des RC-Betons der Bayernkaserne (RC-B100)

RC-Beton Bayernkaserne C20/25 100% RC-Anteil		
Bestandteile	Volumen [dm ³]	Masse [kg/m ³]
RC 0/16	-	1.742,0
VarioCEM W4	-	335,0
Wasser (inkl. Restwasser)	-	154,0
BV/FM	-	0,67
LP	-	2,01

Die Daten für Luftporenbildner wurden aus einem anderen Datensatz für einen Beton C20/25 entnommen. Dort wurde ein gleichwertiges Produkt aufgeführt, das die gleichen Emissionen verursacht:

- „Fatty alcohol“: entspricht Luftporenbildner; anrechenbare Menge = 1,1 kg für standardisierte/ durchschnittliche Rezepturen

Der RC-Beton C20/25 mit 100% rezyklierter Gesteinskörnung und dem gesondert hergestellten Bindemittel VarioCEM W4 verfügt über eine Zustimmung im Einzelfall durch die Oberste Bayerische Baubehörde. Nach 56 d lässt sich auch die Festigkeitsklasse C25/30 (28 d C20/25) nachweisen. Das Bindemittel besteht aus 65% CEM II/A-S 42,5 R, 25% Hüttensand und 10% Kalksteinmehl. Für CEM II-Zemente wurde in dieser Studie angenommen, der Portlandzementklinkergehalt betrage 84,5%. Für die in Tabelle 4 genannte Betonzusammensetzung ergibt sich somit ein Gehalt an Portlandzementklinker von $0,65 \times 335 \text{ kg/m}^3 \times 0,845 = 184 \text{ kg/m}^3$. Die in der ecoinvent-Datenbank verfügbaren CEM II-Zemente enthalten 79% Portlandzementklinker, so dass für die in dieser Studie betrachteten Betone der Zementgehalt jeweils hochskaliert wurde. Im Falle des o.g. Betons wurden für die Berechnung der CO₂-Bilanz demnach

184 kg/m³ / 0,79 = 232,9 kg/m³ eines CEM II/A-S aus ecoinvent angesetzt. Somit wurde der tatsächliche Gehalt an Portlandzementklinker in den CO₂-Bilanzen berücksichtigt.

Gemäß der Rezeptur werden 1.742 kg/m³ RC-GK als gesamte Gesteinskörnungsmenge benötigt. Der Output der Prozesskette des Produktsystem 1 (Herstellung 33.000 t RC-GK) wurde als Input der Betonherstellung (1,742 / 33.000 \approx 0,000053%) verwendet und bildet somit emissionstechnisch die gesamte Gesteinskörnung ab.

Da es sich bei dem Bindemittel VarioCEM W4 um optimiertes zementreduziertes Sonderbindemittel handelt, wurde als Vergleich ein weiterer RC-Beton (RC-B100V) mit einer Zusammensetzung des Bindemittels wie beim Beton RC-M25 bzw. RC-M35 (siehe Kapitel 2.5.2 bzw. 2.5.3, Gehalt an Portlandzementklinker: rd. 266 kg/m³, CEM II/A-LL) analysiert, siehe Tabelle 5.

Tabelle 5: Zusammensetzung des RC-Betons der Bayernkaserne mit genormten Zement (RC-B100V)

RC-Beton Bayernkaserne mit genormten Bindemittel C20/25 100% RC-Anteil		
Bestandteile	Volumen [dm ³]	Masse [kg/m ³]
RC 0/16	-	1.742,0
CEM II/A-LL	-	315,0
Flugasche	-	25,0
Wasser (inkl. Restwasser)	-	154,0
BV/FM	-	0,67
LP	-	2,01

Um die mobile Betonmischanlage (on-site mixing plant) abzubilden, wurde der Datensatz „concrete production, [...], self-construction, with cement, alternative constituents [...]“ verwendet. Die verwendeten Datensätze umfassen somit den gesamten Herstellungsprozess auf der Baustelle. Der Prozess wurde mit einem anschließenden Transport-Prozess verlinkt, da auch bei einer baustelleninternen Produktion der Beton zum Einbauort transportiert werden muss (500 m). Damit wurde auch die Infrastruktur (LKW-Mischer) berücksichtigt, um die Vergleichbarkeit zum herkömmlichen Transportbeton zu gewährleisten.

2.5 RC-Betone und Normalbeton Fa. Märker (Vergleichsbetone)

2.5.1 Vorbemerkungen

Da von der mobilen Mischanlage der Bayernkaserne kein Normalbeton als Vergleich zum RC-B100 vorlag und die Zusammensetzung des Bindemittels dieses Betons gesondert für die dortige Anwendung hergestellt wird, wurden im Rahmen dieser Studie Vergleichsbetone eines in der Nähe der Bayernkaserne befindlichen Transportbetonwerkes betrachtet. Als Vergleichsbetone wurden ein Normalbeton (NB-M) und zwei RC-Betone (RC-M25 und RC-M35, unterschiedliche Anteile an rezyklierter Gesteinskörnung) analysiert.

Von der Fa. Märker wurden Daten zum Energiebedarf und den Produktionsvolumina von vier bayerischen Transportbetonwerken zur Verfügung gestellt. Daraus ergab sich für die Betonherstellung im Mittel ein spezifischer elektrischer Energiebedarf von 3,27 kWh/m³ (2,61 bis 3,75 kWh/m³) sowie ein durchschnittlicher Bedarf an Heizöl/Treibstoffen in Höhe von 1,16 kWh/m³ (0,41 bis 2,03 kWh/m³). In Summe betrug der Energiebedarf je Werk zwischen 4,11 und 4,70 kWh/m³. Für die Modellierung der Herstellung der Transportbetone wurden beide Energieformen mit dem o.g. Mittelwert wie folgt berücksichtigt:

- 3,27 kWh/m³ elektrische Energie (Datensatz: electricity, medium voltage)
- 1,16 kWh/m³ (entspricht 4,176 MJ) Brennstoffe (Datensatz: diesel, burned in building machine)

Außerdem wird bei jeder der drei Betonvarianten der Transport des Frischbetons mittels LKW-Mischerfahrzeug zur Baustelle mit aufgenommen. In Rücksprache mit der Fa. Märker wird von einer durchschnittlichen Lieferentfernung von 15 km ausgegangen. Mit einer Dichte von 2,5 t/m³ ergibt dies eine Transportleistung von 37,5 Tonnenkilometer (t km). Für den LKW-Mischer wurde folgender ecoinvent-Datensatz verwendet:

- Transport, Fracht, LKW 7,5-16 Tonnen, EURO4 (Schadstoffklasse): Dieserverbrauch von 4,6 l für 37,5 t km

2.5.2 RC-Beton C25/30 25% RC-Anteil (RC-M25)

Der RC-Beton RC-M25 (C25/30 mit 25% RC-Anteil) dient als Vergleich zum Beton der Bayernkaserne. Die Betonzusammensetzung ist in Tabelle 6 zusammengefasst. RC-Sand wird nicht verwendet, es handelt sich um einen normkonformen RC-Beton.

Tabelle 6: Zusammensetzung des RC-Betons C25/30 25% RC-Anteil (RC-M25)

RC-Beton C25/30 25% RC-Anteil		
Bestandteile	Volumen [dm ³]	Masse [kg/m ³]
Sand 0/4	339,6	922,0
Kies 4/8	67,9	186,0
RC 4/16	169,8	436,0
Kies 8/16	101,9	278,0
CEM II/A-LL 32,5 R	101,6	315,0
Flugasche	10,0	25,0
Wasser (inkl. Restwasser)	192,3	200,0
BV/FM	0,9	0,95
LP	1,1	1,26

Der Anteil an Portlandzementklinker wurde für den CEM II/A-LL analog zu Kapitel 2.4 mit 84,5% angenommen. Somit ergibt sich ein Gehalt an Portlandzementklinker von rd. 266 kg/m³. Flugasche wurde bei den Bilanzierungen vernachlässigt, da dieser Zusatzstoff im Hinblick auf die CO₂-Bilanz von untergeordneter Bedeutung ist. Die rezyklierte Gesteinskörnung (hier 4/16) wurde anhand der Daten der Bayernkaserne (0/16) modelliert; eine Anpassung aufgrund des unterschiedlichen unteren Korndurchmessers wurden nicht vorgenommen. Somit ergeben sich die in Abbildung 2 dargestellten Teilprozesse für die Modellierung des RC-Betons.

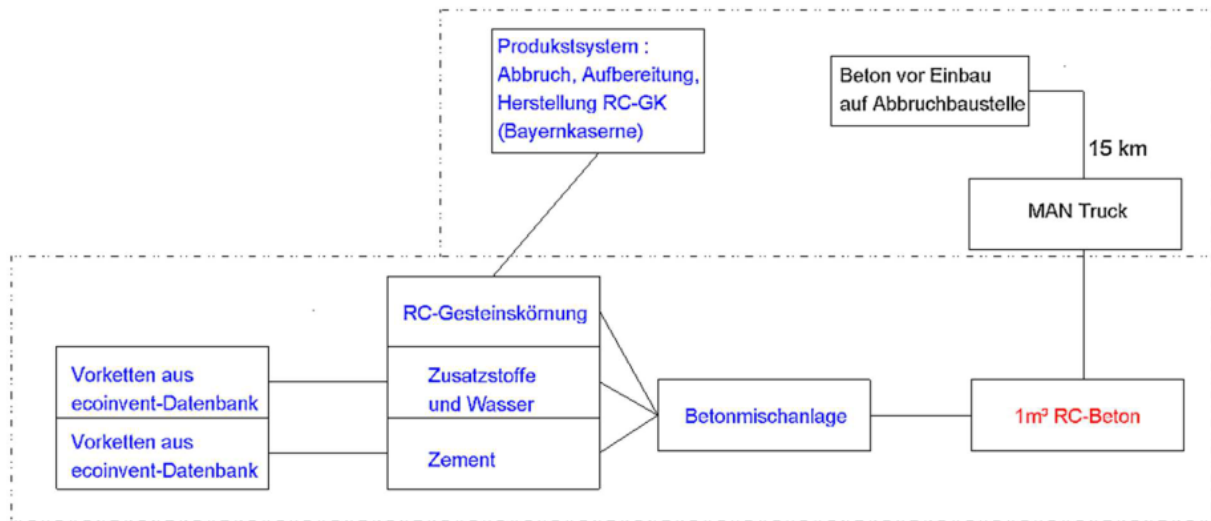


Abbildung 2: Teilprozesse der Herstellung von RC-Beton C25/30 (Transportbeton)

2.5.3 RC-Beton C25/30 35% RC-Anteil (RC-M35)

Für den RC-Beton RC-M35 (C25/30 mit 35% RC-Anteil) gelten grundsätzlich die in Kapitel 2.5.2 gemachten Angaben, die Zusammensetzung ist in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Zusammensetzung des RC-Betons C25/30 RC-Anteil 35% (RC-M35)

RC-Beton C25/30 35% RC-Anteil		
Bestandteile	Volumen [dm ³]	Masse [kg/m ³]
Sand 0/4	339,4	921,0
RC 4/16	237,6	611,0
Kies 8/16	101,8	278,0
CEM II/A-LL 32,5 R	101,6	315,0
Flugasche	10,0	25,0
Wasser (inkl. Restwasser)	192,3	200,0
BV/FM	1,2	1,26
LP	1,1	1,26

2.5.4 Normalbeton C25/30 (Vergleichsbeton NB-M)

Für den Normalbeton C25/30 (NB-M) wurde die folgende Zusammensetzung zugrunde gelegt, siehe Tabelle 8.

Tabelle 8: Zusammensetzung des Normalbetons (NB-M)

Normalbeton C25/30		
Bestandteile	Volumen [dm ³]	Masse [kg/m ³]
Sand 0/4	313,2	898,0
Kies 4/8	136,2	385,0
Kies 8/16	231,5	631,0
CEM II/A-LL 32,5 R	98,4	305,0
Flugasche	12,0	30,0
Wasser (inkl. Restwasser)	192,3	200,0
BV/FM	1,4	1,53

Die für die Herstellung des Normalbetons berücksichtigten Teilprozesse sind in Abbildung 3 dargestellt.

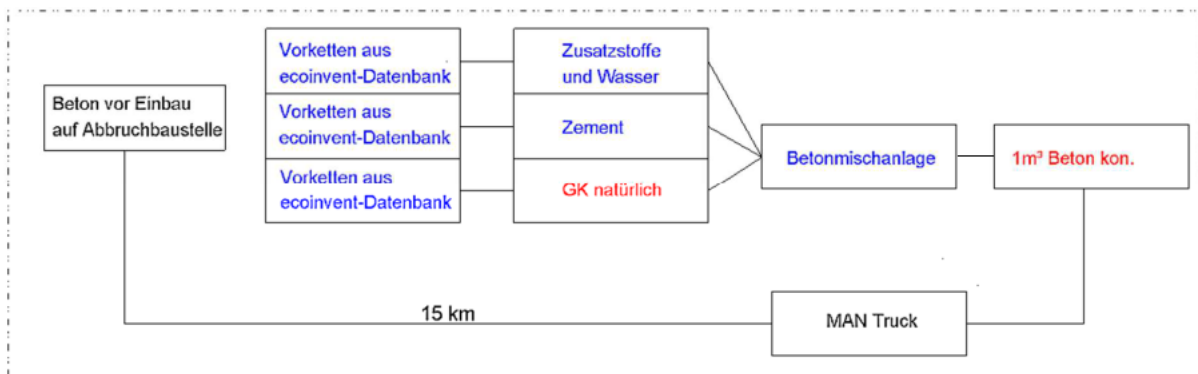


Abbildung 3: Teilprozesse der Herstellung von Normalbeton C25/30 (Transportbeton)

2.6 CO₂-Bilanz

2.6.1 Vorbemerkungen

Zur Durchführung der CO₂-Bilanzen wurde im Rahmen der Wirkungsabschätzung die CML IA baseline-Methode verwendet. Mit Hilfe der Methode wurden die äquivalenten CO₂-Emissionen (global warming potential GWP100a in kg CO₂-Äquivalenten) berechnet.

2.6.2 Produktsystem 1 (Abbruch, Aufbereitung bzw. Transport zur Deponie)

In Abbildung 4 sind die CO₂-Bilanzen für die beiden Varianten (zirkulär und linear) des Produktsystems 1 (jeweils bezogen auf 33.000 t Abbruchmaterial) dargestellt. Dabei wurden die CO₂-Emissionen auch getrennt für jeden der sieben Teilprozesse angegeben. Beim Gebäudeabbruch und der Aufbereitung der Abbruchmassen zu 100% rezyklierter Gesteinskörnung (zirkuläres Wirtschaftssystem) entstehen rd. 153,9 t CO₂-Äquivalente. Im Vergleich hierzu belaufen sich die CO₂-Emissionen beim linearen Wirtschaftssystem auf rd. 250,8 t CO₂-Äquivalente. Die Ergebnisse beziehen sich auf 33.000 t Betonabbruchmaterial. Die Einsparung an CO₂-Emissionen in Höhe von rd. 97 t CO₂-Äquivalente sind im Wesentlichen auf die wegfallenden Transporte zur Deponie zurückzuführen. Durch den Wegfall des Transports zur Deponie können somit – trotz eines dann höheren Zeit-/Energiebedarfs beim Abbruch und der Aufbereitung zu 100% rezyklierter Gesteinskörnung – die CO₂-Emissionen um rd. 39% reduziert werden.

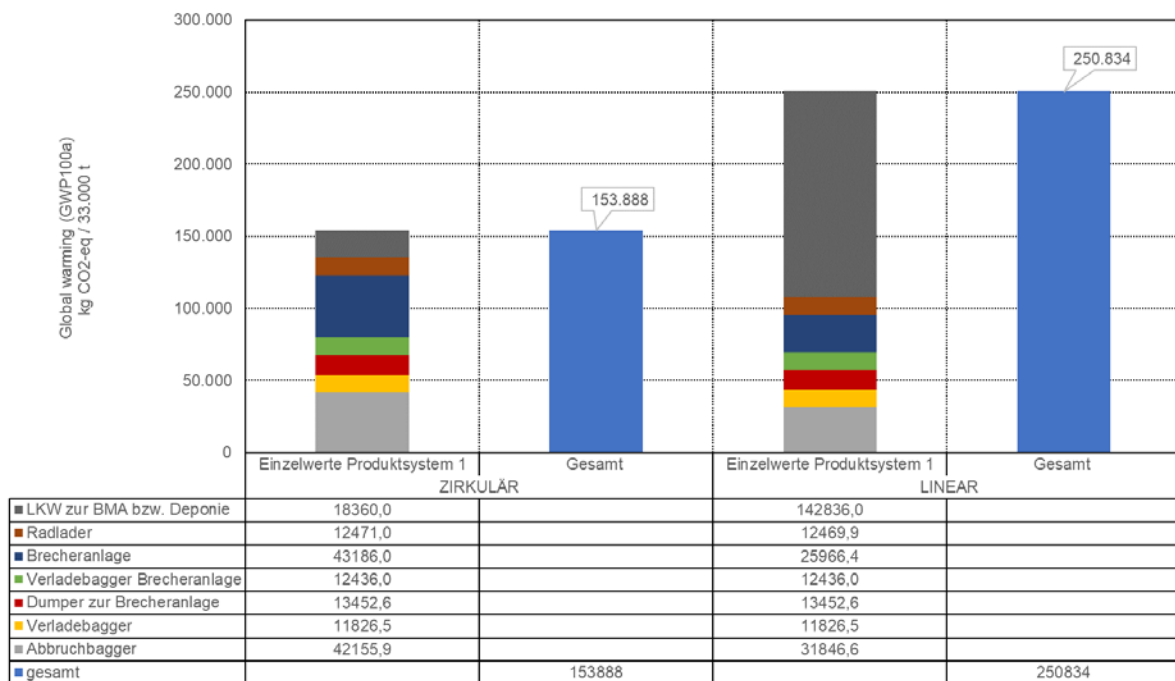


Abbildung 4: CO₂-Äquivalente für die beiden Varianten des Produktsystems 1

Im zirkulären Wirtschaftssystem sind mit jeweils rd. 28% der CO₂-Emissionen die beiden Teilprozesse Abbruch und Brecheranlage dominierend. Die verbleibenden Teilprozesse sind für jeweils rd. 8% (Verladen des Abbruchs) bis rd. 12% (Transport der rezyklierten Gesteinskörnung zur BMA) verantwortlich.

Im Falle des linearen Wirtschaftssystems dominiert mit rd. 57% der Transport des Abbruchmaterials zur Deponie die gesamten CO₂-Emissionen. An zweiter Stelle steht mit rd. 13% der Teilprozess des Abbruchs. Der Betrieb der Brecheranlage trägt zu rd. 10% zu den CO₂-Emissionen bei. Pro Tonne Abbruchmaterial entstehen inkl. Transport zur Deponie (Distanz: 20 km) CO₂-Emissionen in Höhe von 7,60 kg CO₂-Äquivalente.

2.6.3 Produktsystem 2 linear und zirkulär (Herstellung von 1 m³ Frischbeton)

Produktsystem 2 stellt die Bereitstellung von 1 m³ Frischbeton auf der Baustelle im zirkulären bzw. linearen Wirtschaftssystem dar.

Für das zirkuläre Wirtschaftssystem wurden zwei unterschiedliche Betone der Mischanlage in der Bayernkaserne betrachtet, welche sich lediglich in der Zusammensetzung des Bindemittels (RC-B100: VarioCEM W4 mit rd. 184 kg/m³ PZK und RC-B100V: CEM II/A-LL mit rd. 266 kg/m³ PZK) unterscheiden. Der Gehalt an rezyklierter Gesteinskörnung beträgt bei beiden Betonsorten 100%, es wurde angenommen, dass kein Abbruchmaterial deponiert werden muss. Der Transportweg vom Ort der Betonherstellung zur Baustelle beträgt im zirkulären Wirtschaftssystem nur 500 m, da die Betone vor Ort in einer Baustellenmischanlage (BMA) hergestellt werden.

Im linearen Wirtschaftssystem wurden drei Betone analysiert, wobei als Vergleichsbeton für das zirkuläre Wirtschaftssystem vorrangig der Normalbeton NB-M fungiert. Für diesen Beton wurde ein Transport zur Baustelle über 15 km sowie der Abbruch und die Deponierung (Transportdistanz: 20 km) von 1.742 kg Beton (dies entspricht der Menge an GK für die RC-Betone der Bayernkaserne) bei der CO₂-Bilanz berücksichtigt.

Die Ergebnisse der CO₂-Bilanz pro Kubikmeter Frischbeton sind für die fünf betrachteten Betone in Abbildung 5 dargestellt.

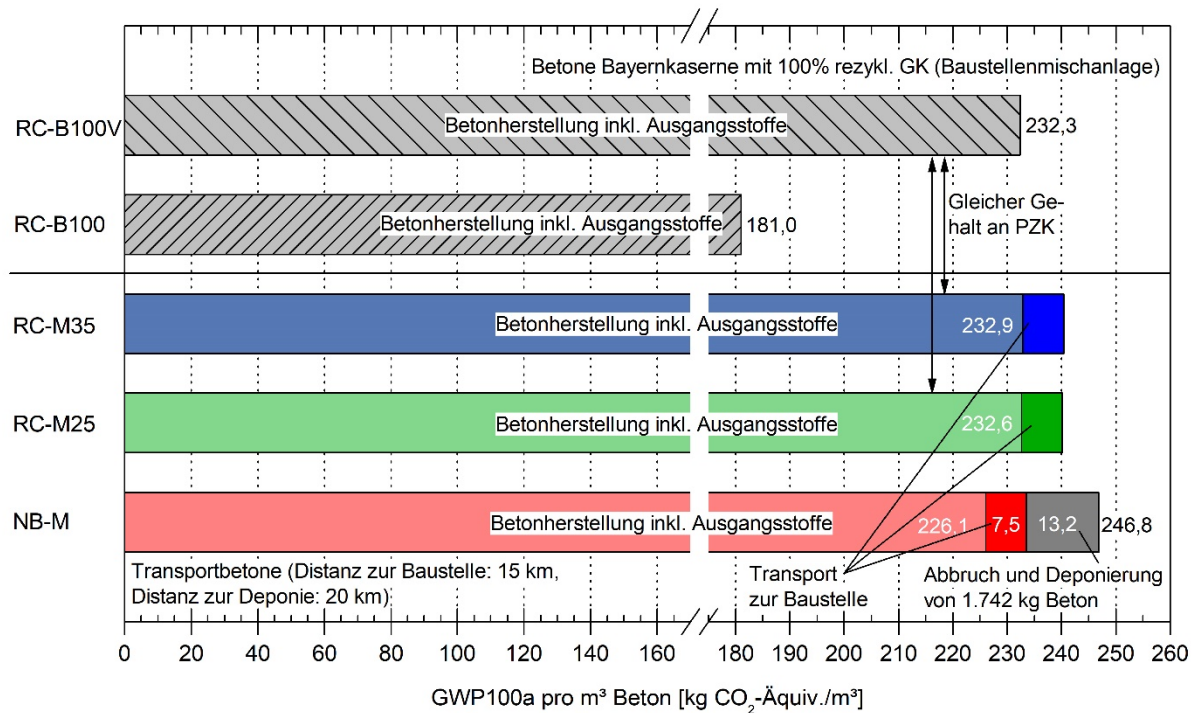


Abbildung 5: CO₂-Bilanz für das Produktsystem 2

Erwartungsgemäß weist der Beton RC-B100 der Bayernkaserne mit dem optimierten klinker-reduzierten Bindemittel (rd. 184 kg/m³ PZK) die niedrigsten CO₂-Emissionen auf. Die Verwendung eines konventionellen Bindemittels (RC-B100V: rd. 266 kg/m³ PZK) resultiert in rd. 28% (entspricht 50 kg CO₂-Äquivalente/m³) höheren CO₂-Emissionen.

Die Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung und die damit üblicherweise geringfügige Erhöhung des Bindemittel- bzw. Zementgehalts führt – nur bei Betrachtung der Betonherstellung inkl. der Ausgangsstoffe – in allen hier analysierten Fällen (siehe RC-B100V, RC-M25 und RC-M35 im Vergleich zu NB-M) zu etwas höheren CO₂-Emissionen (ca. 6,5 kg CO₂-Äquivalente/m³).

Die höheren CO₂-Emissionen bei üblichen RC-Betonen werden in etwa egalisiert, wenn Transporte vom Transportbetonwerk zur Baustelle berücksichtigt werden und diese bei RC-Betonen wegen der Herstellung in einer Baustellenmischanlage wegfallen. Der im Rahmen dieser Studie angesetzte Transportweg (15 km) ist pro Kubikmeter Frischbeton mit rd. 7,5 kg CO₂-Äquivalente verbunden. Die Herstellung von RC-Betonen am Ort des Abbruchs und der Aufbereitung der rezyklierten Gesteinskörnung sollte demnach angestrebt werden.

Werden im Vergleich zu RC-Beton beim Normalbeton die CO₂-Emissionen des Betonabbruchs sowie des Transports zur Deponie entsprechend dem Gehalt an Gesteinskörnung mit angesetzt (hier: 1.742 kg/m³), so schneiden die RC-Betone bzgl. der CO₂-Emissionen etwas besser als der Normalbeton ab. Der Abbruch und der Transport zur Deponie (hier: 20 km) von 1.742 kg/m³ Betonabbruch ist mit rd. 13,2 kg CO₂-Äquivalente verbunden. Die Errichtung und der Betrieb einer Inertdeponie wurde bei diesen Betrachtungen außen vor gelassen, da die damit verbundenen CO₂-Emissionen stark von den tatsächlichen Gegebenheiten der jeweiligen

Deponie abhängig sind. Die hier angesetzten 1.742 kg/m³ Betonabbruch liegen etwas unterhalb des exakten Gehalts an Gesteinskörnung bei den Betonen NB-M, RC-M25 bzw. RC-M35; demnach lägen die gesamten CO₂-Emissionen pro Kubikmeter Frischbeton beim Vergleichsbeton NB-M unter Berücksichtigung der korrekten Menge an Gesteinskörnung noch geringfügig höher. Aus den 33.000 t rezyklierter Gesteinskörnung lassen sich rd. 18.944 m³ RC-Beton herstellen. Wird diese Betonkubatur vor Ort zur Errichtung neuer Gebäude auf dem Gelände der Bayernkaserne verbaut, so wäre dies bei Verwendung des Betons RC-B100V mit einer Verringerung von CO₂-Emissionen in Höhe von rd. 275 t verbunden.

Aus den durchgeführten Analysen lässt sich in modifizierter Darstellung ableiten, ab welchen Transportdistanzen zur Baustelle oder zur Deponie sich die Verwendung eines RC-Betons mit Baustellenmischanlage bzgl. der CO₂-Emissionen im Vergleich zu einem Normalbeton (ohne Berücksichtigung von Abbruch und Deponierung) lohnt. Hierfür wurden in Abbildung 6 die CO₂-Emissionen für die Betonsorten RC-B100V und NB-M mit dem Einfluss des Transportweges zur Baustelle dargestellt. Die beim RC-B100V festgestellten höheren zementbedingten CO₂-Emissionen werden ab einer Transportdistanz des Normalbetons zur Baustelle von rd. 12,5 km egalisiert.

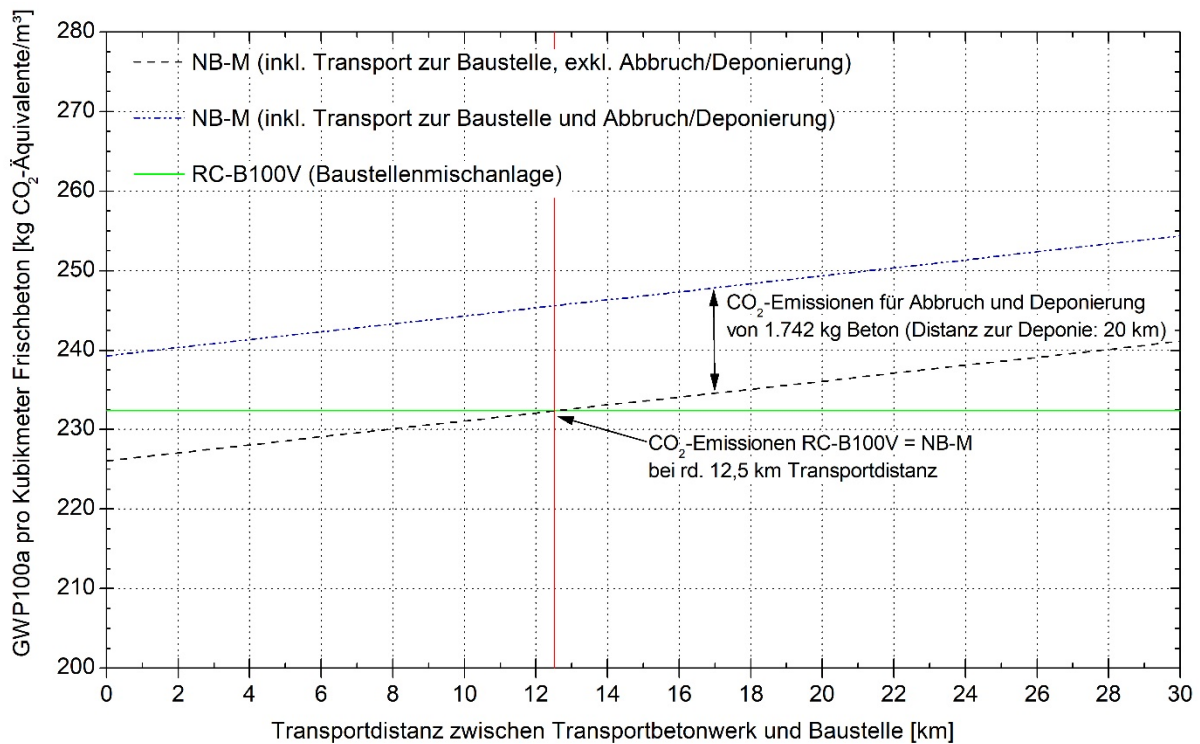


Abbildung 6: Einfluss der Transportdistanz zwischen Transportbetonwerk und Baustelle auf die CO₂-Bilanz für das Produktsystem 2

In Abbildung 7 ist der Einfluss der Transportdistanz zwischen der Abbruchbaustelle und der Deponie auf die CO₂-Bilanz dargestellt. Die Aufbereitung und Verwendung der rezyklierten Gesteinskörnung vor Ort ist unabhängig von der Entfernung zur Deponie immer mit geringeren CO₂-Emissionen verbunden (Distanz vom Transportbetonwerk zur Baustelle: 15 km).

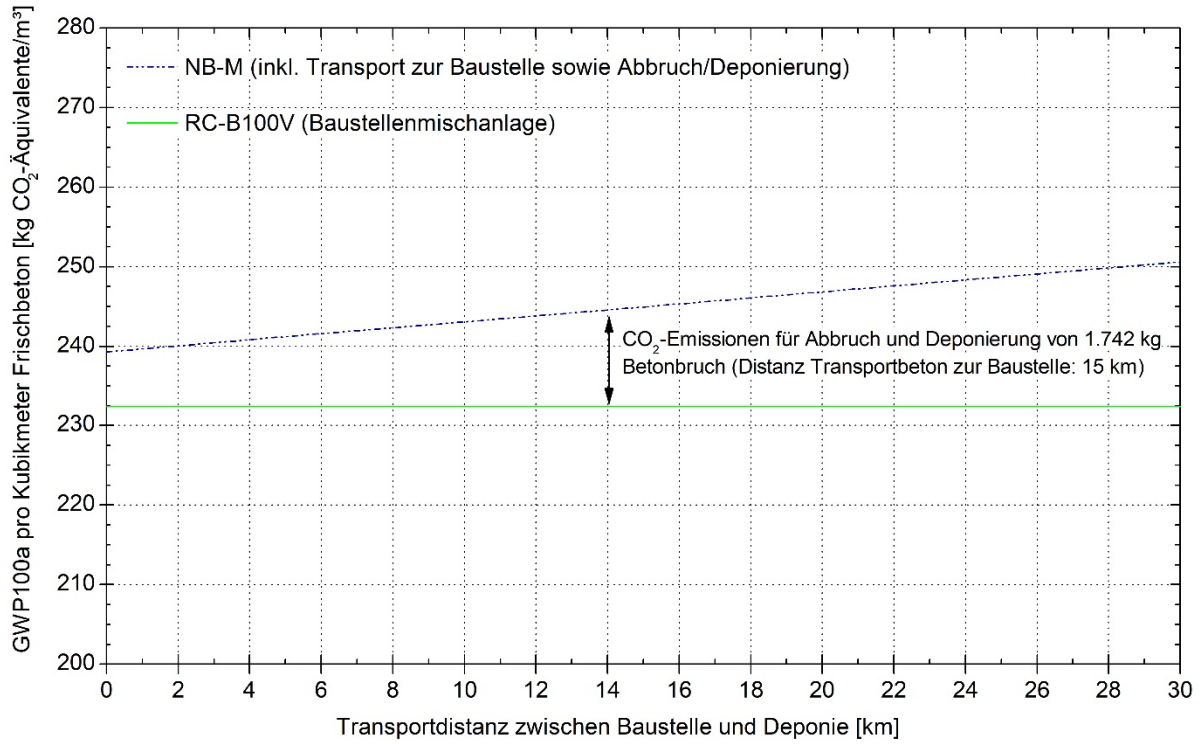


Abbildung 7: Einfluss der Transportdistanz zwischen Baustelle und Deponie auf die CO₂-Bilanz für das Produktsystem 2

3 ABRUCH DER MAINFLUTBRÜCKE

3.1 Vorbemerkungen

Im Rahmen des zweiten Praxisbeispiels wurde eine CO₂-Bilanz für den Abbruch der Mainflutbrücke zwischen Breitengüßbach und Baunach an der B279 und die Aufbereitung des Abbruchmaterials zu Hinterfüllmaterial (RC-Schotter 0/56) modelliert. Durchgeführt wurde der Abbruch und die Aufbereitung durch die Firma RAAB Baugesellschaft mbH & Co KG bzw. durch den Subunternehmer Fa. Schlick GmbH. Der Ansprechpartner bezüglich der Datenbeschaffung ist die Fa. RAAB (Herr Rainer Hetzel). Beim Abbruch der Spannbetonbrücke mit Mittelpfeiler und den beiden Widerlagern (inklusive Fundamente) wurden ca. 2.500 t RC-Schotter hergestellt. Die Aufbereitung des Abbruchmaterials und Verwendung als Hinterfüllmaterial wurde verglichen mit der Deponierung und Verwendung natürlicher Gesteinskörnung für die Hinterfüllung. Die abzubrechende Mainflutbrücke ist in Abbildung 8 dargestellt.



Abbildung 8: Aufnahme der abzubrechenden Mainflutbrücke an der B279 zwischen Breitengüßbach und Baunach (Quelle: Fa. RAAB Baugesellschaft mbH & Co KG)

In Abstimmung mit der Fa. RAAB wurden für die Sachbilanzen der Recyclingvariante (zirkulär) und der Deponierungsvariante (linear) der Mainflutbrücke die Teilprozessdaten der Bayernkaserne verwendet. Bis auf einzelne unterschiedliche Treibstoffverbräuche bzw. Leistungsklassen von Baumaschinen sind die Prozessabläufe auf beiden Abbruchbaustellen nahezu identisch. Die vorhandenen Unterschiede können mit der ecoinvent-Datenbank nicht erfasst werden, da der Detaillierungsgrad der unterschiedlichen Datensätze nicht ausreichend hoch ist. Die baustelleninternen Transporte der Bayernkaserne decken sich mit den Kurzdistanzen zum Lagerplatz neben der Mainflutbrücke. Für die Modellierung des Praxisbeispiels Mainflutbrücke wurden jedoch sämtliche Massen und ggf. zusätzlichen Teilprozesse entsprechend auf das Abbruchvorhaben angepasst.

In der zirkulären Betrachtungsweise wird das Primärmaterial (Kies/Schotter 0/56) vollständig durch das Rezyklat ersetzt, wohingegen im Fall der Deponierung des Materials (linear) der

Primärkies in Gruben abgebaut und zur Baustelle transportiert werden muss. Bei beiden Varianten wird von einer Abbruch- bzw. Hinterfüllmenge von 2.500 t ausgegangen.

3.2 Abbruch- und Aufbereitungsprozesse (Herstellung RC-Material für Hinterfüllung)

Der RC-Schotter der Körnung 0/56 mm wurde zertifiziert und zur Bauwerksverfüllung der neu hergestellten Brückenwiderlager verwendet. Betrachtet werden sämtliche Rückbau-, Sortier-, Transport-, Zerkleinerungs- und Aufbereitungsprozesse (Produktsystem 1) zur Herstellung von RC-Schotter. Das Abbruchmaterial wird 500 m zu einem Lagerplatz transportiert, gebrochen und in Mieten aufgesetzt. Nach Neuerrichtung der Brücke wird das RC-Material rücktransportiert und zur Verfüllung der Widerlager verwendet. Der Beginn des gesamten Produktsystems ist der Abbruch der Spannbetonbrücke und endet nach Abkippen des RC-Materials auf der Baustelle. Da keine weiteren Informationen vorlagen, wurde angenommen, dass 100% des Abbruchmaterials als RC-Schotter für die Hinterfüllung verwendet werden kann. Die betrachteten Teilprozesse und Systemgrenzen sind in Abbildung 9 dargestellt.

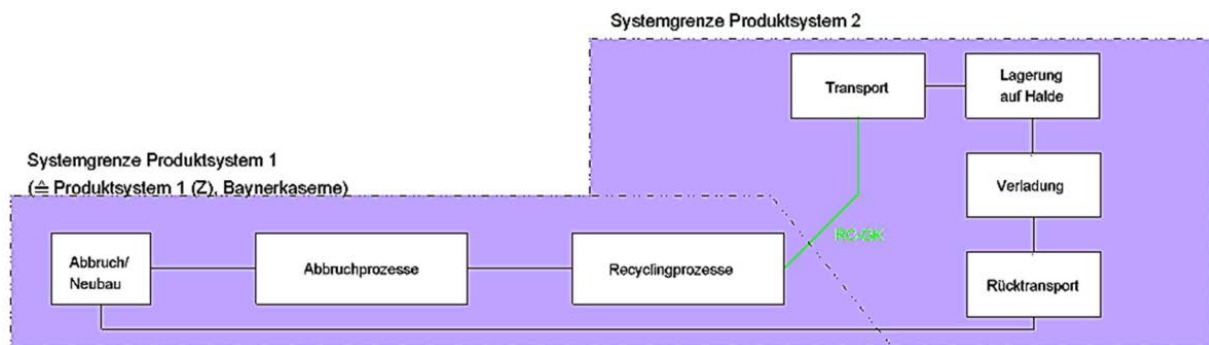


Abbildung 9: Teilprozesse des Abbruchs und der Herstellung von RC-Schotter 0/56

Im Unterschied zu den Betrachtungen zur Bayernkaserne ersetzt das RC-Material hierbei vollständig den Primärbaustoff, der zur Verfüllung der neu errichteten Brückenwiderlager notwendig wäre. Die Abbruch- und Aufbereitungsmaßnahmen wurden mit Hilfe von 9 Teilprozessen modelliert, siehe Tabelle 9.

Tabelle 9: Teilprozesse 1 bis 9 für den Brückenabbruch und die Aufbereitung des Betonbruchs zu Hinterfüllmaterial

Nr.	Mainflutbrücke (Z, Produkts. 1 und 2)		quantitative Referenzgröße für Inputs/ Outputs				
	Herstellung 2500 to RC-Schotter		Hilfswerte				
	Typ	Hydraulikbagger	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
1	Name	Caterpillar 336	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Abbruch Stahlbeton (Hydraulikgreifer)	1316	2500	185	5439	2,176
	Leistung [kW]	232		1,900	0,074	29,400	h/At
	Durchsatz [to/h]	13,51		to/m ³	h/to	kg/h	9,000
	Datensatz aus ecoinvent: excavation, hydraulic digger						
2	Typ	Hydraulikbagger	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	CAT 325	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Beladung Dumper nach Abbruch	1316	2500	36	597	0,239
	Leistung [kW]	129		1,900	0,014	16,800	h/At
	Durchsatz [to/h]	70,37		to/m ³	h/to	kg/h	9,000
Datensatz aus ecoinvent: excavation, hydraulic digger							
3	Typ	Dumper	Volumen	Tonage	Tonnenkilometer	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	Volvo A25G	m ³	to	to*km	kg	kg/to
	Tätigkeit	baustelleninterner Transport	1316	2500	1250	1658	0,663
	Leistung [kW]	235,00		1,900	0,028	23,333	0,500
	Durchsatz [to/h]	35,19		to/m ³	h/to	kg/h	km
Datensatz aus ecoinvent: transport, freight, lorry >32 metric ton, EUROS							
4	Typ	Hydraulikbagger	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	HITACHI 350	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Aufgabe Brechgut in Brecher	1316	2500	24	696	0,279
	Leistung [kW]	210		1,900	0,009	29,400	9,000
	Durchsatz [to/h]	105,56		to/m ³	h/to	kg/h	h/At
Datensatz aus ecoinvent: excavation, hydraulic digger							
5	Typ	mobile Recyclinganlage	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	Hazemag III	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Zerkleinerung und Eisenseperation	1316	2500	14	265	0,106
	Leistung [kW]	330		1,900	0,006	18,667	9,000
	Durchsatz [to/h]	175,93		to/m ³	h/to	kg/h	h/At
Datensatz aus ecoinvent: machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor							
6	Typ	großer Radlader	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	CAT 966H	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Laden nach Brecher auf LKW	1316	2500	36	746	0,298
	Leistung [kW]	195		1,900	0,014	21,000	9,000
	Durchsatz [to/h]	70,37		to/m ³	h/to	kg/h	h/At
Datensatz aus ecoinvent: excavation, skid-steer loader							
7	Typ	LKW	Volumen	Tonage	Tonnenkilometer	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	Mercedes Arocs	m ³	to	to*km	kg	kg/to
	Tätigkeit	Transport zur Miete	1316	2500	1250	2089	0,836
	Leistung [kW]	265		1,900	0,040	21,000	0,500
	Durchsatz [to/h]	25,132		to/m ³	h/to	kg/h	km
Datensatz aus ecoinvent: transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4							
8	Typ	großer Radlader	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	CAT 966H	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Laden von Halde auf LKW	1316	2500	36	746	0,298
	Leistung [kW]	195		1,900	0,014	21,000	9,000
	Durchsatz [to/h]	70,37		to/m ³	h/to	kg/h	h/At
Datensatz aus ecoinvent: excavation, skid-steer loader							
9	Typ	LKW	Volumen	Tonage	Tonnenkilometer	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	Mercedes Arocs	m ³	to	to*km	kg	kg/to
	Tätigkeit	Rücktransport zur Baustelle	1316	2500	1250	2089	0,836
	Leistung [kW]	265		1,900	0,040	21,000	0,500
	Durchsatz [to/h]	25,132		to/m ³	h/to	kg/h	km
Datensatz aus ecoinvent: transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4							
Summe Diesel Gesamt			14325 Liter				

3.3 Abbruch- und Deponierung, Gewinnung und Antransport von Kies als Hinterfüllmaterial

Der Deponierungsfall der Abbruchmaterialien stellt ein fiktives Szenario dar. Betrachtet werden sämtliche Abbruch-, Zerkleinerungs- und Transportprozesse einschließlich des Transports des Betonbruchs über 20 km zur Deponie (Produktsystem 1). Für die Modellierung der Deponierung wurde angenommen, dass es sich jeweils um zertifiziertes Recyclingmaterial, das im Falle der Deponierung/ Verfüllung in Inertabfall-Deponien (max. Deponieklasse 0, kleiner Einbauklasse Z2) entsorgt werden kann, handelt. Außerdem wurde die Annahme getroffen, dass die Aufwendungen für Abbruch und Aufbereitung identisch zur Recyclingvariante sind, da die Körnung des RC-Materials dieselbe ist, wie wenn das Material in Inertdeponien entsorgt wird (0/56 mm). Der Unterschied liegt zum zirkulären System liegt somit im Transport zur Deponie (20 km) und der zusätzlichen Bereitstellung des Primärmaterials (Produktsystem 2). Der Beginn von Produktsystem 2 ist der Kiesabbau in der Grube und anschließend die Verladung und der Transport über 30 km zum Baustellengelände. Die betrachteten Teilprozesse und Systemgrenzen sind in Abbildung 9 dargestellt.

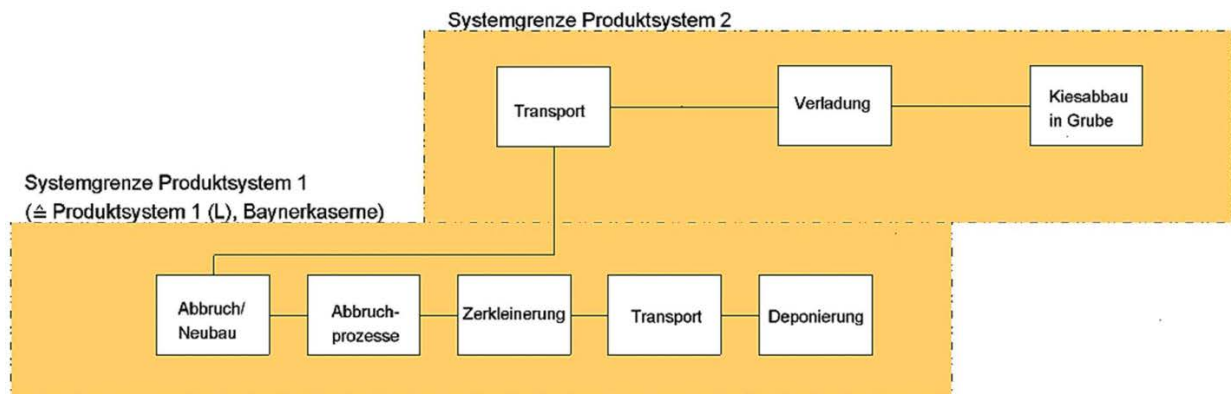


Abbildung 10: Teilprozesse des Abbruchs, der Deponierung und Gewinnung natürlichen Hinterfüllmaterials (Kies 0/56)

Die Abbruch- und Deponierungsmaßnahmen wurden mit Hilfe von 7 Teilprozessen modelliert, siehe Tabelle 10: Die Gewinnung der natürlichen Gesteinskörnung und der Transport zur Baustelle wurde mit 3 Teilprozessen modelliert, siehe Tabelle 11.

Tabelle 10: Teilprozesse 1 bis 7 für den Brückenabbruch und Transport zur Deponie

Nr.	Mainflutbrücke (L, Produkts. 1)		quantitative Referenzgröße für Inputs/ Outputs				
	Herstellung 2500 to Inertmat.		Hilfswerte				
1	Typ	Hydraulikbagger	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	Caterpillar 336	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Abbruch Stahlbeton (Hydraulikgreifer)	1316	2500	185	5439	2,176
	Leistung [kW]	232		1,900	0,074	29,400	h/At
	Durchsatz [to/h]	13,51		to/m ³	h/to	kg/h	9,000
	Datensatz aus ecoinvent: excavation, hydraulic digger						
2	Typ	Hydraulikbagger	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	CAT 325	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Beladung Dumper nach Abbruch	1316	2500	36	597	0,239
	Leistung [kW]	129		1,900	0,014	16,800	h/At
	Durchsatz [to/h]	70,37		to/m ³	h/to	kg/h	9,000
	Datensatz aus ecoinvent: excavation, hydraulic digger						
3	Typ	Dumper	Volumen	Tonage	Tonnenkilometer	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	Volvo A25G	m ³	to	to*km	kg	kg/to
	Tätigkeit	baustelleninterner Transport	1316	2500	1250	1658	0,663
	Leistung [kW]	235,00		1,900	0,028	23,333	0,500
	Durchsatz [to/h]	35,19		to/m ³	h/to	kg/h	km
	Datensatz aus ecoinvent: transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5						
4	Typ	Hydraulikbagger	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	HITACHI 350	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Aufgabe Brechgut in Brecher	1316	2500	24	696	0,279
	Leistung [kW]	210		1,900	0,009	29,400	9,000
	Durchsatz [to/h]	105,56		to/m ³	h/to	kg/h	h/At
	Datensatz aus ecoinvent: excavation, hydraulic digger						
5	Typ	mobile Recyclinganlage	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	Hazemag III	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Zerkleinerung und Eisenseparation	1316	2500	14	265	0,106
	Leistung [kW]	330		1,900	0,006	18,667	9,000
	Durchsatz [to/h]	175,93		to/m ³	h/to	kg/h	h/At
	Datensatz aus ecoinvent: machine operation, diesel, >= 74.57 kW, high load factor						
6	Typ	großer Radlader	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	CAT 966H	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Laden nach Brecher auf LKW	1316	2500	36	746	0,298
	Leistung [kW]	195		1,900	0,014	21,000	9,000
	Durchsatz [to/h]	70,37		to/m ³	h/to	kg/h	h/At
	Datensatz aus ecoinvent: excavation, skid-steer loader						
7	Typ	LKW	Volumen	Tonage	Tonnenkilometer	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	Mercedes Arocs	m ³	to	to*km	kg	kg/to
	Tätigkeit	Transport z. Deponie	1316	2500	50000	2778	1,111
	Leistung [kW]	265		1,900	0,040	21,000	20,000
	Durchsatz [to/h]	25,132		to/m ³	h/to	kg/h	km
	Datensatz aus ecoinvent: transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4						
Summe Diesel Gesamt			12179 Liter				

Tabelle 11: Teilprozesse 1 bis 3 für den die Gewinnung und den Transport zur Baustelle der natürlichen Gesteinskörnung

Nr.	Mainflutbrücke (L, Produkts. 2)		quantitative Referenzgröße für Inputs/ Outputs				
	Abbau und Lieferung nat. GK		Hilfswerte				
1	Prozess	Kiesabbau in Grube	Tonage to 2500				
	Datensatz aus ecoinvent: gravel and sand quarry operation gravel, round						
2	Typ	großer Radlader	Volumen	Tonage	Stunden	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	CAT 966H	m ³	to	h	kg	kg/to
	Tätigkeit	Laden nach Brecher auf LKW	1316	2500	36	746	0,298
	Leistung [kW]	195		1,900	0,014	21,000	9,000
	Durchsatz [to/h]	70,37		to/m ³	h/to	kg/h	h/At
	Datensatz aus ecoinvent: excavation, skid-steer loader						
3	Typ	LKW	Volumen	Tonage	Tonnenkilometer	Verbrauch	Verbrauch bezogen
	Name	Mercedes Arocs	m ³	to	to*km	kg	kg/to
	Tätigkeit	Transport zur Baustelle	1316	2500	75000	4167	1,667
	Leistung [kW]	265		1,900	0,040	21,000	30,000
	Durchsatz [to/h]	25,132		to/m ³	h/to	kg/h	km
Datensatz aus ecoinvent: transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4							
Summe Diesel Gesamt			4913 Liter				

3.4 CO₂-Bilanz

Zur Durchführung der CO₂-Bilanzen wurde im Rahmen der Wirkungsabschätzung die CML IA baseline-Methode verwendet. Mit Hilfe der Methode wurden die äquivalenten CO₂-Emissionen (global warming potential GWP100a in kg CO₂-Äquivalenten) berechnet.

Die Ergebnisse der CO₂-Bilanzierungen für die beiden Wirtschaftssysteme der Mainflutbrücke sind in Abbildung 11 dargestellt.

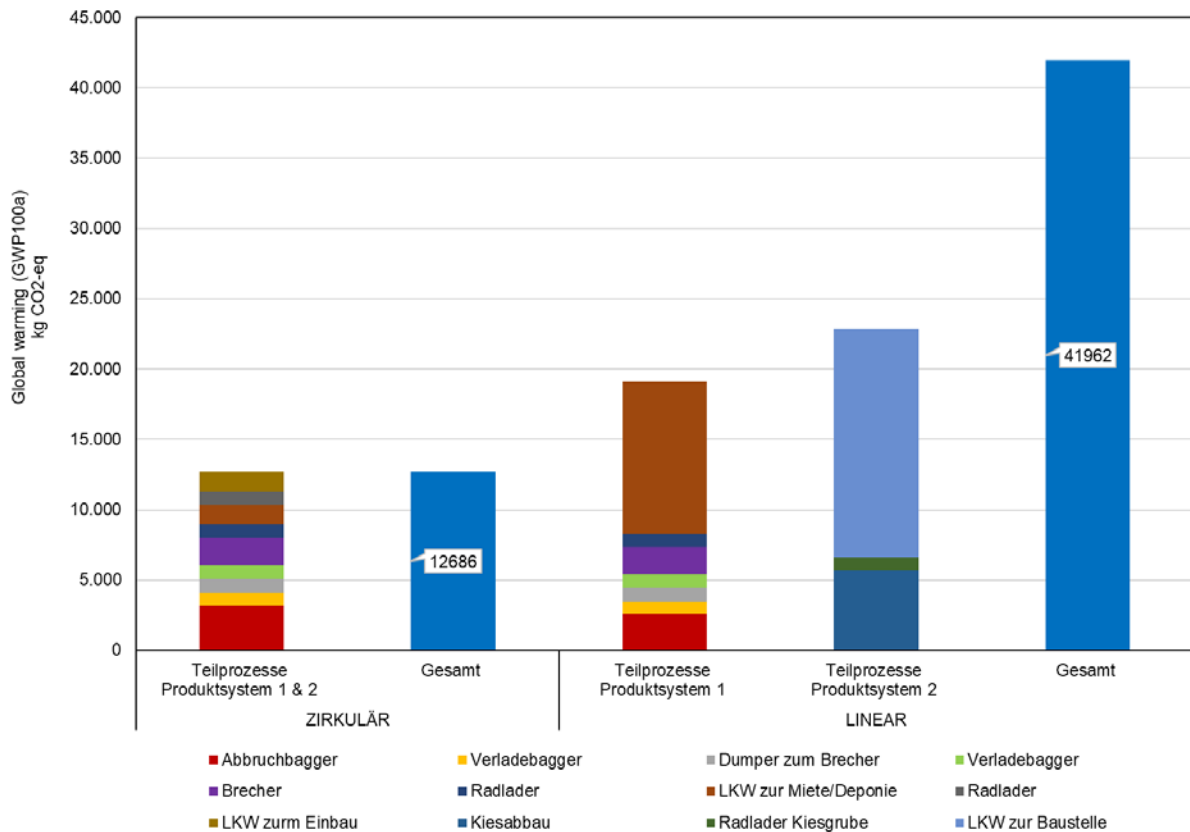


Abbildung 11: CO₂-Äquivalente für das zirkuläre und lineare Wirtschaftssystem bei der Mainflutbrücke

Die Aufbereitung des Betonbruchs vor Ort und die Wiederverwertung als Hinterfüllmaterial (zirkuläres Wirtschaftssystem) führt zu etwa 29 t weniger CO₂-Emissionen im Vergleich zum linearen Wirtschaftssystem (Deponierung des Abbruchs und Verwendung von Naturkies). Diese Verringerung der CO₂-Emissionen entspricht rd. 70% bezogen auf die gesamten Emissionen des linearen Wirtschaftssystems.

Der Einfluss des Transportes des Naturkieses zur Baustelle bzw. des Abbruchmaterials zur Deponie ist in Abbildung 12 dargestellt. Für den Einfluss der Transportdistanz zur Deponie ergibt sich dieselbe Geradensteigung.

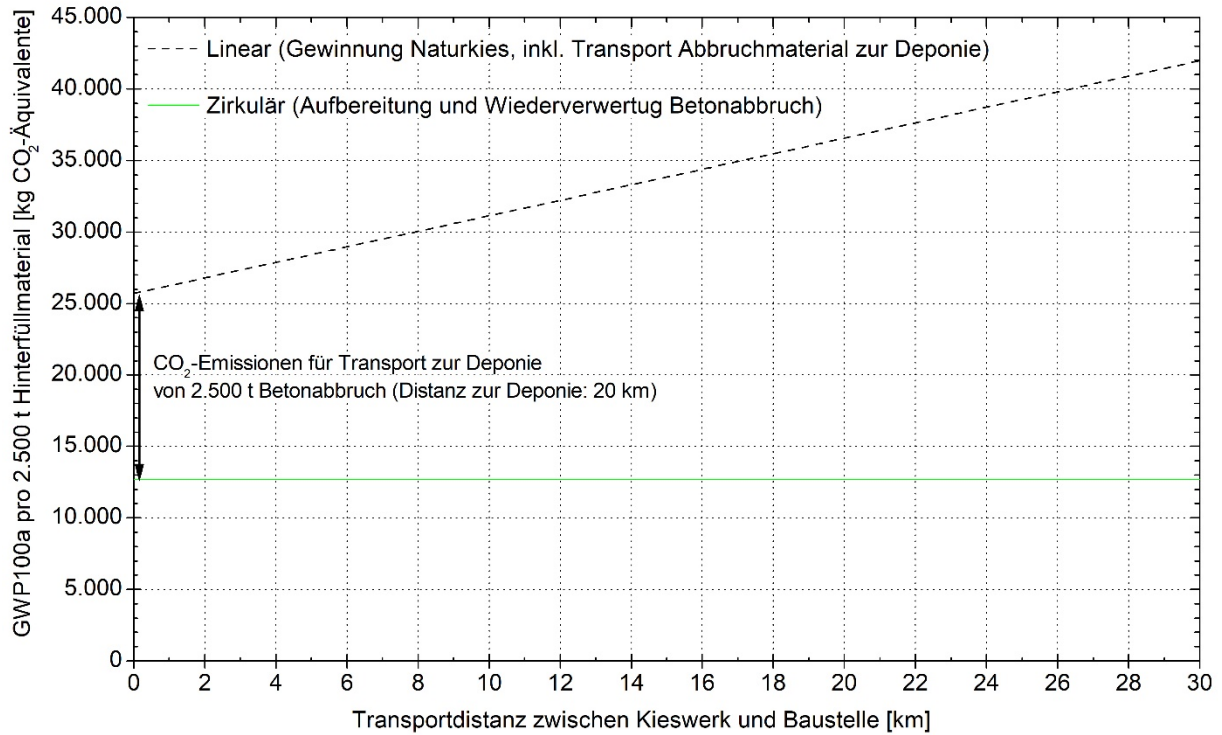


Abbildung 12: Einfluss der Transportdistanz zwischen Kieswerk und Baustelle auf die CO₂-Emissionen für das zirkuläre und lineare Wirtschaftssystem bei der Mainflutbrücke

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN AUS DEN DURCHGEFÜHRTEN ÖKO-BILANZIERUNGEN

4.1 Verwendung von Betonabbruch als rezyklierte Gesteinskörnung in Beton

Aus den durchgeführten Analysen für das Projekt Bayernkaserne München lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Kann Betonabbruch ortsnah als rezyklierte Gesteinskörnung für Beton aufbereitet und verwendet werden (zirkuläres Wirtschaftssystem), so lassen sich die CO₂-Emissionen pro Tonne Betonabbruch um rd. 2,94 kg CO₂-Äquivalente verringern. Hierbei ist ein etwas höherer Aufwand bei der Aufbereitung zu RC-Körnung und 20 km Transportdistanz zu einer Deponie berücksichtigt. Die geringen CO₂-Emissionen sind auf die wegfallenden/verkürzten Transportwege zurückzuführen.
2. Aufgrund des geringfügig höheren Zementgehalts weist RC-Beton nur bei Betrachtung der Herstellung der Ausgangsstoffe etwas höhere CO₂-Emissionen als Normalbeton auf (ca. 6 kg CO₂-Äquivalente/m³ bzw. rd. 3%).
3. Kann RC-Beton ortsnah unter Verwendung von vor Ort gewonnener rezyklierter Gesteinskörnung hergestellt werden (zirkuläres Wirtschaftssystem), so liegen die CO₂-Emissionen im Vergleich zu Normalbeton (lineares Wirtschaftssystem) 14,5 kg CO₂-Äquivalente/m³ niedriger (ca. 6% niedriger). Hierbei ist ein Transportweg des Normalbetons zur Baustelle von 15 km sowie ein Transportweg zur Deponie von 20 km berücksichtigt.
4. Pro Kilometer Transportweg entstehen für 1 m³ Frischbeton 0,50 kg CO₂-Äquivalente. Pro Kilometer Transportweg entstehen für 1 t Abbruchmaterial rd. 0,21 kg CO₂-Äquivalente.

Zur Verringerung der CO₂-Emissionen im Zusammenhang mit Abbruch- und Neubaumaßnahmen sollte demnach möglichst eine ortsnahe Aufbereitung und Wiederverwertung der Abbruchmaterialien angestrebt werden.

4.2 Verwendung von Betonabbruch als rezykliertes Hinterfüllmaterial

Aus den durchgeführten Analysen für das Projekt Mainflutbrücke Breitengüßbach lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Durch die Aufbereitung und Wiederverwertung des Abbruchmaterials vor Ort lassen sich die CO₂-Emissionen für die Hinterfüllung der Brückenwiderlager um rd. 70% verringern. Hierbei ist ein Transportweg für den Naturkies zur Baustelle von 30 km sowie ein Transportweg zur Deponie von 20 km berücksichtigt.
2. Bei wegfallendem Transportweg für den Naturkies zur Baustelle wären die CO₂-Emissionen aufgrund der Deponierung des Abbruchmaterials beim linearen Wirtschaftssystem rd. doppelt so hoch als im Vergleich zum zirkulären Wirtschaftssystem.

Wo möglich sollte zur Verringerung von CO₂-Emissionen vor Ort aufbereitete und wiederverwertete rezyklierte Gesteinskörnung anstelle von natürlicher Gesteinskörnung verwendet werden.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden CO₂-Bilanzierungen für zwei Abbruchmaßnahmen (Betonabbruch) erstellt. Ziel war hierbei die Beantwortung der Frage, inwiefern eine Aufbereitung von Abbruchmassen zu rezyklierter Körnung und Wiederverwertung (RC-Körnung für Beton bzw. RC-Körnung als Hinterfüllmaterial) im Vergleich zur Verwendung von natürlicher Gesteinskörnung unter Berücksichtigung der notwendigen Transportwege bzgl. der CO₂-Emissionen sinnvoll ist.

Für die Abbruchmaßnahmen an der Bayernkaserne in München wurde der Abbruch, die Aufbereitung und die Wiederverwertung rezyklierter Gesteinskörnung (33.000 t) im RC-Beton analysiert. Hierbei zeigte sich, dass sich die CO₂-Emissionen bei ortsnaher Aufbereitung und Wiederverwertung als rezyklierte Gesteinskörnung um rd. 2,94 kg CO₂-Äquivalente pro Tonne Abbruchmaterial verringern lassen. Unter Berücksichtigung üblicher Transportwege für die Anlieferung von Transportbeton und den Abtransport zur Deponie lassen sich die CO₂-Emissionen bei Verwendung von RC-Beton um rd. 6% verringern. Diese Verringerung steht ausschließlich mit den wegfallenden Transportwegen in Zusammenhang. Die Analysen zeigen somit, dass eine ortsnahe Aufbereitung und Wiederverwertung angestrebt werden sollte.

Für die Abbruchmaßnahme der Mainflutbrücke bei Breitengüßbach wurde der Abbruch, die Aufbereitung und die Wiederverwertung von rezyklierter Gesteinskörnung (2.500 t) als Hinterfüllmaterial für neue Brückenwiderlager analysiert. Die ortsnahe Aufbereitung und Wiederverwertung hat zu einer Verringerung der CO₂-Emissionen in Höhe von rd. 70% geführt. Selbst bei unmittelbar neben der Baustelle liegendem Kieswerk läge aufgrund des Transports der Abbruchmaterialien zur Deponie (hier: 20 km) die Verringerung der CO₂-Emissionen noch bei rd. 50%.



Prof. Dr.-Ing. Thorsten Stengel



Prof. Dr.-Ing. Andrea Kustermann