

# Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung – eine Ökobilanz

U. Jeske, J. Buchgeister, L. Schebek, M. Weil, ITC

## Einleitung

Der Verbrauch natürlicher Gesteinskörnung Kies- und Sand für den Bausektor beträgt in den letzten Jahren zwischen 370 und 400 Mio. t [Steine & Erden 2000]. Über den Abbruch von Bauwerken gelangen derzeit jährlich 70-80 Mio. t mineralische Abfälle zur Verwertung oder auf die Deponie [KWTB 2001]. Zur Eröffnung eines neuen Recyclingpfades wurde im Projekt „Baustoffkreislauf im Massivbau“ [BIM] die Verwendung betonreicher rezyklierter Gesteinskörnung anstelle von Kies oder Splitt im Hochbau erprobt und in den letzten Jahren normiert [DIN 4226-100]. Rezyklierte Gesteinskörnung aus aufbereitetem mineralischem Bauschutt kann bei der Betonherstellung nach Richtlinie [DAfStb-Richtl. 1998] einen Anteil der natürlichen Gesteinskörnungen Kies oder Splitt ersetzen. Dies ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Die Richtlinie befindet sich derzeit in Überarbeitung [DAfStb Richtl 6.Entw. 2002].

## Fragestellungen

Der vorliegende Beitrag will die folgenden Fragestellungen beantworten: Wird die Schonung natürlicher Gesteinskörnung durch die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung innerhalb des gewählten Systemrahmens durch gegenläufige Effekte, d.h. erhöhten Materialeinsatz an anderer Stelle der Herstellung von Recyclingbeton, vermindert? Tritt bei der Herstellung von Recyclingbeton ein erhöhter Energieverbrauch auf, und wenn ja, durch welche Einzelprozesse?

Wo liegen möglicherweise Optimierungspotentiale bei der Betonherstellung unter Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung?

## Vorgehensweise

Zur Beantwortung der Fragestellungen wird eine vergleichende Ökobilanz der Betonherstellung mit und ohne rezyklierte Gesteinskörnung unter Berücksichtigung der in Normen, Richtlinien und Zulassungen niedergelegten Beschränkungen nach Norm [DIN EN ISO 14040 ff] durchgeführt. Unter Einschluss eigener Datenerhebungen zu Bauschuttaufbereitungsanlagen werden die tatsächlich resultierenden Einsparungen mineralischer Ressourcen sowie die im Herstellungsprozess auftretenden Treibhausgas-Emissionen bilanziert. Die eigenen Datenerhebungen zu Bauschuttaufbereitungsanlagen waren deshalb notwendig, weil in der Literatur für die Herstellung rezyklierter Gesteinskörnung zum einen nur Energieaufwendungen zu finden sind [Herbschleb, E. 1999], [Müller, Ch. 2001], die dazu noch stark differieren und die Werte zum anderen im Vergleich zu denen der Kies- und Splitt-Gewinnung um eine Größenordnung höher liegen. Die bekannten Verfahrensunterschiede rechtfertigen dies nicht, weshalb die Daten weder verlässlich noch plausibel erschienen.

Adressaten dieser Untersuchung sind die Akteure der Bau- und Baustoffrecyclingbranche. Darüber hinaus sind es die Entwickler neuartiger Recycling-Technologien [FRANKA 2000]. Ihnen können die Untersuchungsergebnisse Si-



Abb. 1: Verwendung eines Anteils rezyklierter Gesteinskörnung für Beton (schematisch).

cherheit bei wichtigen zu berücksichtigenden Vergleichsparametern wie dem Energieverbrauch der herkömmlichen Aufbereitungsanlagen vermitteln.

## Systemrahmen der Ökobilanz

Die zu vergleichenden Systeme unterscheiden sich nur in der Aufbereitung und Verwendung von rezyklerten Gesteinskörnungen. Bei der Aufbereitung fallen zusätzlich geringe Mengen Eisenschrott an. Die Systemgrenzen für die Herstellung von Beton mit einem Anteil an rezyklerten Gesteinskörnungen sind in Abb. 2 dargestellt. Sie umfassen: Herstellung von natürlichen Gesteinskörnungen (V1.1 und V1.2), Herstellung von Betonverflüssiger (BV) und Fließmittel (FM) (V3), Bereitstellung von Flugasche (V4), Herstellung von Zement (V5) Transport der Betonkomponenten zum Transportbetonwerk (Prozess), Mischung der Betonkomponenten (Herstellprozess), Herstellung rezyklierter Gesteinskörnungen (V2).

Diesen Hauptprozessen sind weitere Prozesse vorgelagert: Gewinnung von Rohstoffen (z.B.

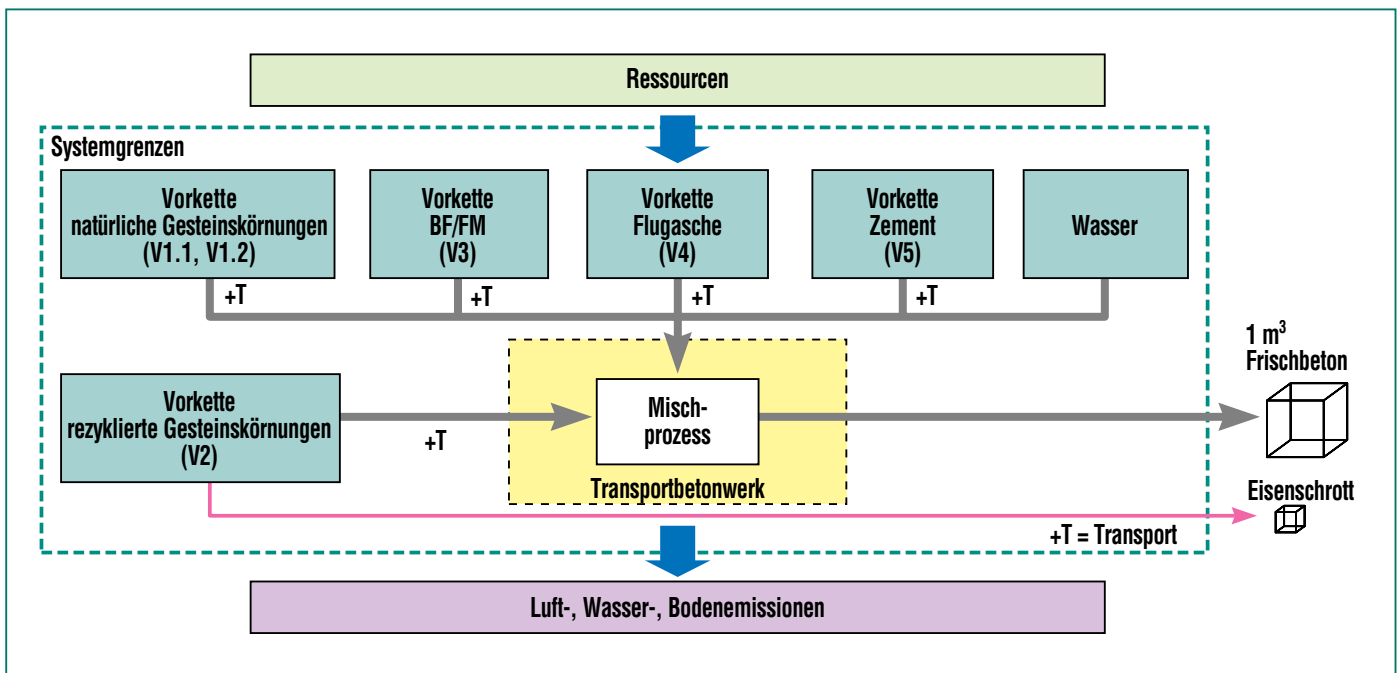


Abb. 2: Systemgrenzen der Beton-Herstellung mit einem Anteil an rezyklierten Gesteinskörnungen.

Kalkstein), Bereitstellung von elektrischer Energie oder Energieträgern, Herstellung von Zwischenprodukten (z.B. Melamin für BV), Herstellung von Hilfs- und Betriebsstoffe (z.B. Schmieröl, Stahl, PU-Schaum).

Bei der Ökobilanz erfolgt die Bilanzierung mit der entscheidenden Bedingung der Nutzengleichheit der zu vergleichenden Systeme. Dabei wird der Nutzen auch als funktionelle Einheit bezeichnet. Für die weitere Untersuchung wurde die funktionelle Einheit auf 1 m<sup>3</sup> Frischbeton für den konstruktiven Bereich festgelegt. Berücksichtigt wurden hierbei: Festigkeitsklasse: B25 (Nennfestigkeit 25 N/mm<sup>2</sup>, an einem Würfel zu messen), Konsistenz: KR (weich, Ausbreitmaß: 42 bis 48 cm), Verwendung als Innenbauteil. Die zusätzlich anfallenden Mengen Eisenschrott konnten bei

der Festlegung der funktionellen Einheit vernachlässigt werden.

Für die Wirkungsabschätzung müssen Umweltindikatoren ausgewählt werden, die die wesentlichen Ressourcenverbräuche und Umweltbelastungen abbilden.

Ein Screening ergab folgendes Bild: Als Ressourcenverbrauch hat der mineralische Stoffstrom eine besondere Bedeutung und für die Umweltbelastung ist der Energieeinsatz die Hauptquelle. Dessen Höhe wird im Wesentlichen durch die Zementherstellung bestimmt.

Als Ergebnis wurden die folgenden Indikatoren festgelegt:

1. Verbrauch primärer mineralischer Rohstoffe (VMR) Der Verbrauch primärer mineralischer Rohstoffe (VMR) umfasst hier neben der natürlichen Gesteinskörnung auch die zur

Zementherstellung benötigten mineralischen Rohstoffe.

2. Kumulierter Energieaufwand (KEA). Der KEA gibt die Gesamtheit der primärenergetisch bewerteten Energieaufwendungen an [VDI 4600].
3. Zusätzlich wurde das Treibhauspotential (GWP) ausgewählt, da bei der Zementherstellung Treibhausgas-Emissionen nicht nur aus dem Energieverbrauch stammen, was durch den KEA abgedeckt wäre, sondern auch aus der Entsäuerungsreaktion des Kalksteins ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ), was im KEA nicht berücksichtigt werden kann.

Beim GWP werden die Treibhauspotentiale der emittierten Gase ermittelt. Über Äquivalenzfaktoren werden die Potentiale der verschiedenen Gase auf CO<sub>2</sub>-Äquivalente (kg) umgerechnet.

## Sachbilanz: Vorkette rezyklierte Gesteinskörnungen (V2)

Untersucht wurden insgesamt 12 verschiedene Aufbereitungsanlagen für Bau- und Abbruchabfälle zur Erzeugung rezyklierter Gesteinskörnung. Sie unterscheiden sich hinsichtlich Größe, eingesetzten Brechereinheiten (Anzahl, Typ), Reinigungseinheiten (trocken, nass), internem Transport bzw. Verladung (z.B. Radlader, Förderband, Verladestation) und Art der Produkte. Aus der eigenen Erhebung wurden am Ende zwei stationäre Bauschutt aufbereitungsanlagen mit trockener und nasser Aufbereitungstechnik bilanziert (RC-Anlage B und D), die technisch in der Lage sind,

hochwertige, gut gereinigte rezyklierte Gesteinskörnungen zu erzeugen. Für diese Anlagen sind detaillierte Anlagendaten mittels eines Fragebogens erhoben worden. Hergestellt werden Körnungen der Klassen 0-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm, 16-32 mm. Werk B hat eine Produktionskapazität von über 200.000 t/Jahr, Werk D von ca. 100.000 t/Jahr.

Darüber hinaus wurden 7 Datensätze aus einer Befragung der Universität Stuttgart [Kümmel, J. 2001] zur Ergänzung der eigenen Untersuchungen aufbereitet und bilanziert.

Die Systemgrenzen der Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen sind in Abb. 3 dargestellt.

Bei der Modellierung der Werke wurden berücksichtigt: die Vorzerkleinerung und Beschickung, die Zerkleinerung (Brechen), das Entfernen von Störstoffen sowie die Klassierung (Siebung) und Verladung der Produkte. Wasser wird in beiden Anlagen für Maßnahmen der Staubminderung insbesondere im Sommer eingesetzt, bei der nass betriebenen Aufbereitungsanlagen auch für die Entfernung von Feinst- und Leichtstoffen.

In Tab. 1 sind die Sachbilanzdaten der RC-Anlagen B und D ausgewiesen. Dargestellt sind der KEA, die durch den Energieverbrauch verursachten Treibhausgase, soweit sie einen Beitrag zum GWP leisten und der Wasserverbrauch pro t rezyklierter

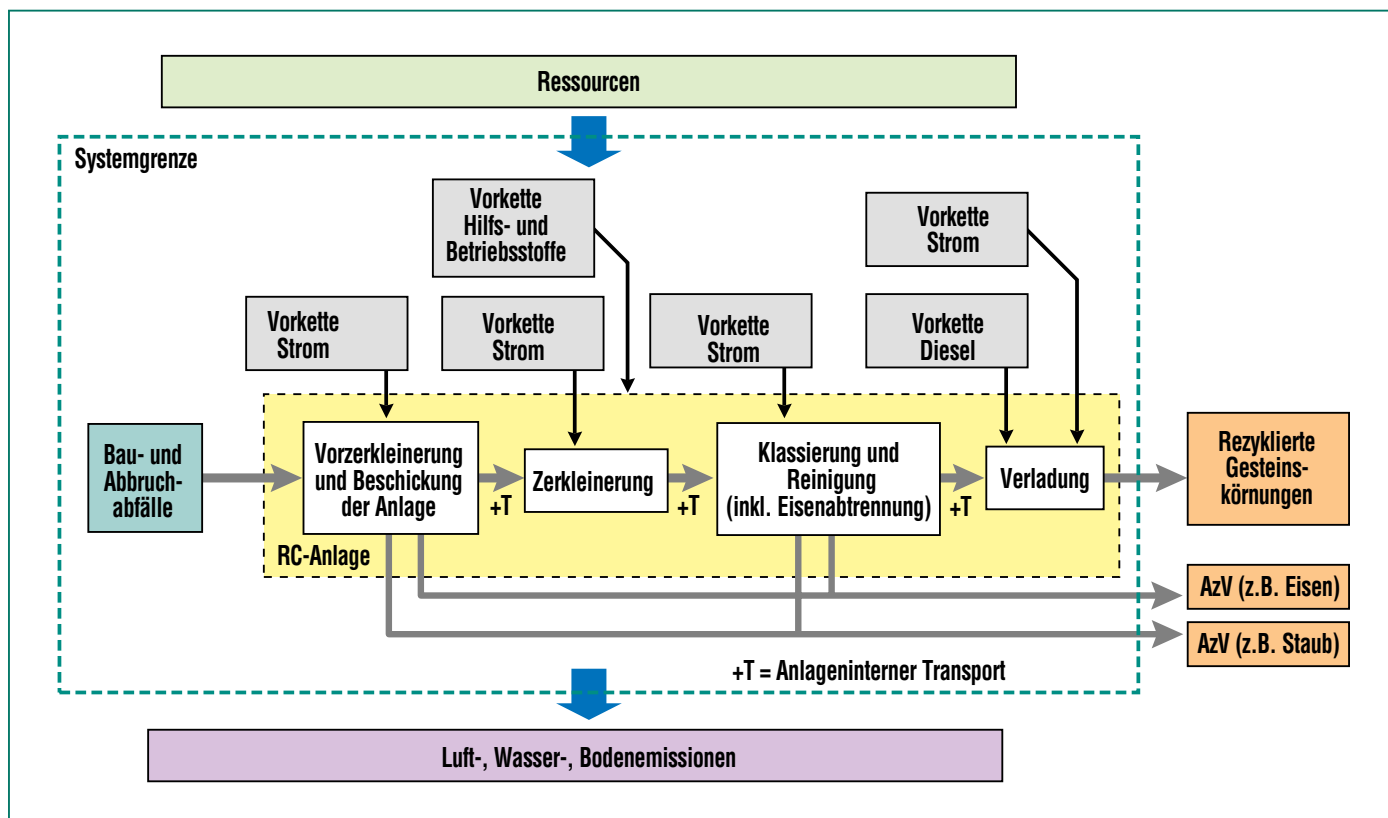


Abb. 3: Systemgrenzen der Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen (V2).

Alle Angaben auf eine t Produkt bezogen	RC-Anlage B	RC~Anlage D	Datensatz Uni. Stuttgart [Kümmel, J. 2001]	[Müller, Ch. 2001]	[Herbschleb 1999] <sup>*)</sup>
CO <sub>2</sub> (g)	2910,0	3520,0	3220,0		
CH <sub>4</sub> (g)	4,7	5,7	4,9		
N <sub>2</sub> O (g)	0,1	0,1	0,1		
Eisenschrott – AZV – (kg)	4,5	0,8	2,4		
Wasser Verbrauch (kg)	33,9	283,0	19,0		
KEA (MJ)	43,1	55,0	47,4	200,0	500,0

\*) 500 MJ/t wird alleine für die Zerkleinerung angegeben

**Tab. 1: Kumulierter Energieaufwand (KEA) und Luftemissionen bei der Herstellung von 1 t rezyklierter Gesteinskörnung für die Betonproduktion.**

Gesteinskörnung. Gegenübergestellt sind zwei Literaturangaben über den KEA für rezyklierte Gesteinskörnungen und das mittlere Sachbilanzergebnis für die 7 stationären Anlagen auf Basis der Daten der Uni Stuttgart.

Die Unterschiede der in Tab. 1 ausgewiesenen Sachbilanzwerte der Luftemissionen erklären sich durch unterschiedliche Strom- und Dieselanteile am Gesamtenergieverbrauch der Anlagen. Die eigenen 3 KEA-Werte zwischen 43,1 MJ/t und 55 MJ/t basieren auf zwei von einander unabhängigen Datenerhebungen und können dadurch als gesichert gelten. Sie lassen die bisher schon nicht nachvollziehbaren um einen Faktor 5-10 höheren Werte aus Literaturangaben [Herbschleb, E. 1999], [Müller, Ch. 2001] als unhaltbar erscheinen. Dies gilt insbesondere für den KEA-Wert von 500 MJ/t [Herbschleb, E. 1999], den auch [Müller, Ch. 2001] herangezogen hat [Weil 2002].

In gleicher Weise ist der zitierte Wert von 200 MJ [Müller, Ch. 2001] kritisch zu sehen, zumal der Autor sich auf die Angabe von [Herbschleb, E. 1999] bezieht.

Für die weitere Bilanzierung der Betonherstellung werden die Vorkettendaten der Anlage D verwendet, Tab. 2. Diese Anlage erzeugt kontinuierlich Gesteinskörnung, die den hohen Anforderungen für Beton genügen, sodass die ermittelten Durchschnittsdaten zutreffend sind.

Benötigt werden noch Vorkettendaten für die natürlichen Gesteinskörnungen Kies und Splitt, die in den Tabellen 3 und 4 zum Vergleich angegeben sind. Für Splitt wurde hilfsweise das Modul Kalksplitt verwendet. Die weiteren verwendeten Vorkettendaten zu Flugasche, Betonverflüssiger und Transporten finden sich in [Weil 2004].

Die KEA- und GWP-Werte der RC-Anlage D sind als gegenläufi-

Alle Angaben auf eine t Produkt bezogen	RC-Anlage D
KEA (MJ)	55,0
GWP (kg)	3,7
VMR (kg)	–

**Tab. 2: Indikatorenwerte des Moduls V2 für rezyklierte Gesteinskörnungen.**

Alle Angaben auf eine t Produkt bezogen	Kieswerk A
KEA (MJ)	34,5
GWP (kg)	2,2
VMR (kg)	1001,0

**Tab. 3: Indikatorenwerte des Moduls V1.1 für Kies und Sand.**

Alle Angaben auf eine t Produkt bezogen	Kalksplitt (ohne Sprengstoffeinsatz)
KEA (MJ)	44,6
GWP (kg)	3,1
VMR (kg)	1000,0

**Tab. 4: Indikatorenwerte des Moduls V1.2 für Kalksplitt.**

ger Effekt um einen Faktor 1,6 bzw. 1,4 größer als die des Kieswerkes A. Dies erklärt sich durch die höhere Aufwendung (Zerkleinerung, Reinigung) bei der Aufbereitung der Bau- und Abbruchabfällen.

### Sachbilanz: Betonherstellung

Für jeden Beton einer bestimmten Klasse gibt es eine vorgeschriebene Mindestzementmenge, die aber nicht automatisch schon die zur Verarbeitung des Betons notwendige Konsistenz garantiert. In der Praxis wird häufig mehr Zement zugegeben, um die gewünschten Verarbeitungseigenschaften einzustellen.

Für die Bilanzierung wurden drei in der Baupraxis erprobte RC-Betonrezepturen und zwei entsprechende Rezepturen mit natürlichen Gesteinskörnungen (Kies, Splitt) ausgewählt. Die Rezepturen

der RC-Betone unterscheiden sich sowohl im Zementgehalt als auch im Anteil an rezyklierten Gesteinskörnungen. Für Kies-Beton wurde eine Rezeptur gewählt, die mit der Mindestzementmenge von 240 kg auskommt. Ergänzend wurde ein Splitt-Beton bilanziert, dessen Zementgehalt um 30 kg über der Mindestzementmenge liegt.

Die Ergebnisse in Abb. 4 zeigen: Auch wenn bei RC-Beton mit einem erhöhten Zementeinsatz ein entsprechend höherer Einsatz an Rohstoffen verbunden ist (Faktor 1,6 beim Durchschnittszement), so bleibt dieser Anteil als gegenläufiger Effekt im Verhältnis zum Rezyklatanteil klein.

So hat RC-Beton immer einen geringeren Verbrauch primärer mineralischer Rohstoffe (VMR) zur Folge, als ein Beton mit natürlichen Gesteinskörnungen. Die Einsparung an primären minerali-

schen Rohstoffen variiert bei RC-Beton je nach Anteilen an Gesteinskörnung und Zementgehalt zwischen 24-44 M-% gegenüber dem Kies-Beton.

Im gewählten Systemrahmen haben die RC-Betone leicht bis deutlich höhere KEA- und GWP-Werte als der Kies-Beton. Ursächlich dafür ist der erhöhte Zementgehalt, der auch die höheren Werte des Splitt-Betons gegenüber dem Kies-Beton erklärt. Demgegenüber von untergeordneter Bedeutung sind die übrigen Vorkettenprozesse. Nennenswerte Anteile (ca.-Werte) der einzelnen Prozesse an den Treibhausgas-Emissionen (GWP) für den Kies-Beton in Abb. 4 sind: 95% durch Zementherstellung, 2 % durch Erzeugung der RC-Körnung, 1% durch Erzeugung von Kies/Sand, je 1% durch Transporte der RC-Körnung (20 km), Kies/Sand (20 km) und Flugasche (120 km).

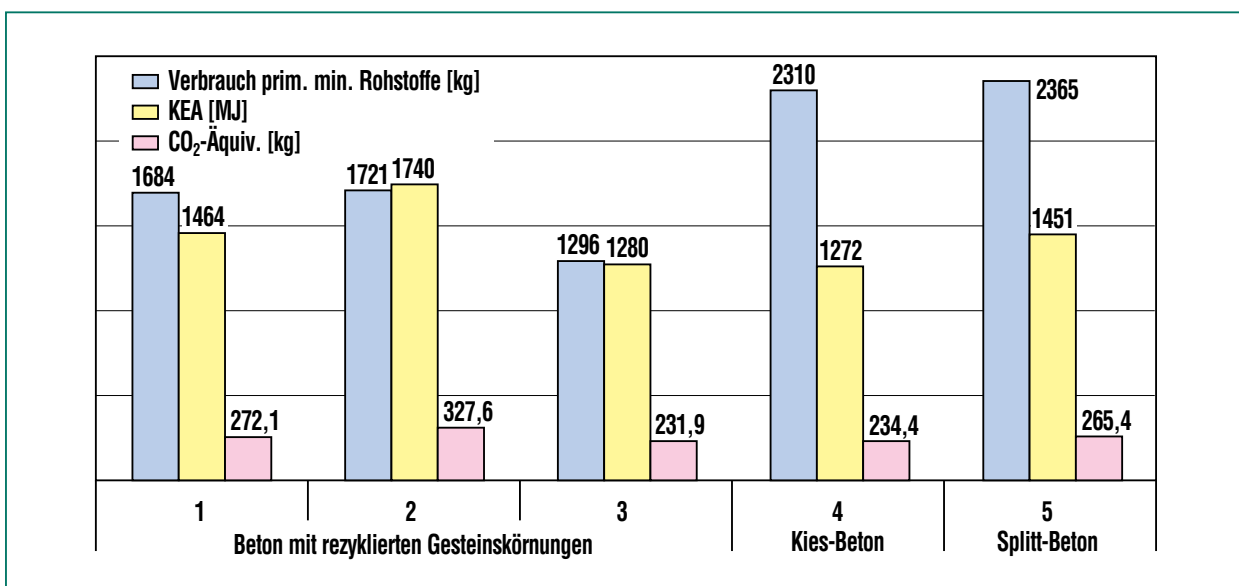


Abb. 4: Ergebnisse des ökobilanziellen Vergleichs von Betonen mit und ohne rezyklierte Gesteinskörnungen (pro m<sup>3</sup> Beton) sowie gleichen Transportentfernungen der natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen.

Ein lohnender Ansatzpunkt zur Optimierung der RC-Betonherstellung liegt damit in der Verringerung des Zementgehaltes in Richtung Mindestzementgehalt. Durch Zugabe von Flugasche bzw. Betonverflüssiger kann beton-technologisch ein ähnlicher Effekt erreicht werden wie durch den Mehrzement, ohne dass dies ökobilanziell bei den hier zugrundeliegenden Indikatoren zu Buche schlägt.

## Zusammenfassung

Es wurde eine vergleichende Ökobilanz der Betonherstellung mit und ohne rezyklierte Ge-

steinskörnung unter Einschluss eigener Datenerhebungen zu Bauschutttaufbereitungsanlagen durchgeführt

Entgegen den Erwartungen aufgrund bisheriger Literaturwerte zeigen die Ergebnisse, dass es durch die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung nur geringfügige gegenläufige Effekte zur Ressourcenschonung gibt.

So hat die RC-Anlage gegenüber dem Kieswerk einen 1,6-fach erhöhten Energieverbrauch.

Auch durch erhöhten Zementeinsatz bei nach Richtlinie hergestellten RC-Betonen gibt es bei Treibhausgas-Emissionen und

Verbrauch mineralischer Ressourcen gegenläufige Effekte. Sie können durch Optimierung der Betonrezeptur vermieden werden. Dies zeigt der bilanzierte Kies-Beton, der über den Weg einer Einzelzulassung hergestellt und unter ökonomischen Aspekten optimiert wurde.

Zukünftige Forschungsarbeiten für die Optimierung der Herstellung von Recycling-Beton sollten sich daher vor allem auf die Einflussfaktoren konzentrieren, die für den Zementbedarf der RC-Betone ausschlaggebend sind.

## Literatur

- [BIM]  
*Baustoffkreislauf im Massivbau (BIM).*  
<http://www.b-i-m.de>
- [FRANKA 2000]  
H. Bluhm, W. Frey, H. Giese,  
P. Hoppe, C. Schultheiss,  
R. Strässner,  
*Application of pulsed HV discharges to material fragmentation and recycling.*  
*IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 7(2000)  
S.625-636
- [DIN EN ISO 14040]  
*Ökobilanz – Prinzipien und allgemeine Anforderungen.* Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.). Beuth, Berlin August 1997
- [DIN 4226-100]  
*Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel – Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen.* Deutsches Institut für Normung DIN e.V. (Hrsg.), Beuth, Berlin Februar 2002
- [DAfStb-Richtl.1998]  
*DAfStb-Richtlinie „Beton mit rezyklisiertem Zuschlag“.*  
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), Beuth, Berlin, August 1998
- [DAfStb Richtl 6.Entw. 2002]  
*Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach 4226-100. Teil 1: Anforderungen an die Betonzusammensetzung für die Bemessung nach DIN 1045-1. 6. Entwurf, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb).* Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), Beuth, Berlin, Oktober 2002.
- [Herbschleb, E. 1999]  
Herbschleb, E.: *Die Energie-Kennzahl: Standardisiertes Verfahren zur Ermittlung des Gesamtenergieaufwandes für die Herstellung von Baustoffen.* In *Tagungshandbuch: Unipor-Fachtagung, München, 1999*
- [KWTB 2001]  
Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (2001): *Monitoring-Bericht Bauabfälle., Folgebericht, Teil 2 – Erhebung: 1998.* Berlin, November 2001.
- [Kümmel, J. 2001]  
Persönliche Mitteilung von Herrn J. Kümmel. Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 01/2001. Datensätze entstammen einer mitbetreuten Diplomarbeit von Stephan Raichle (1998).
- [Müller, Ch. 2001]  
Müller, Ch. (2001): *Beton als kreislaufgerechter Baustoff.* Dissertation  
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.), Heft 513. Beuth, Berlin 2001
- [Steine & Erden 2000]  
*Der Bedarf an mineralischen Baustoffen – Gutachten über den künftigen Bedarf an mineralischen Rohstoffen unter der Berücksichtigung des Einsatzes von Recycling-Baustoffen.* Bundesverband Baustoffe- Steine und Erden e.V. (Hrsg.). Frankfurt/Main 2000
- [VDI 4600]  
Verein Deutscher Ingenieure: *Kumulierter Energieaufwand Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden.* VDI-Richtlinie 1995
- [Weil 2002]  
persönliche Auskunft durch Ch. Müller
- [Weil 2004]  
Weil, M.: *Ressourcenschonung und Umweltentlastung bei der Betonherstellung durch Nutzung von Bau- und Abbruchabfällen,* Dissertation, Darmstadt 2004