

## Ökologische Positionsbestimmung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen

### Forschungskontext

Stoffstromanalyse und Ökobilanzierung werden auch im Baubereich genutzt, um das ökologische Profil einzelner Baustoffe bzw. Bauprodukte unter Berücksichtigung ihres Einsatzes in Bauwerken zu untersuchen, das Profil zu beschreiben und Informationen darüber insbesondere zu Zwecken der umweltgerechten Optimierung bereitzustellen. Forschungsarbeiten zielen darauf ab, Methoden, die den gesamten Lebensweg der Baustoffe bzw. den Lebenszyklus der Bauwerke überstreichen, unmittelbar in der Technikentwicklung sowie der materialwissenschaftlichen Forschung des Baubereichs einzusetzen (Abbildung 1). Dabei sollen auch verfahrenstechnische Entwicklungsschritte direkt in die stoffstromanalytische Gesamtbetrachtung integriert und dabei auf ökologische Relevanz überprüft werden, um Hinweise für die unter Umweltaspekten einzuschlagende Entwicklungsrichtung zu erhalten.

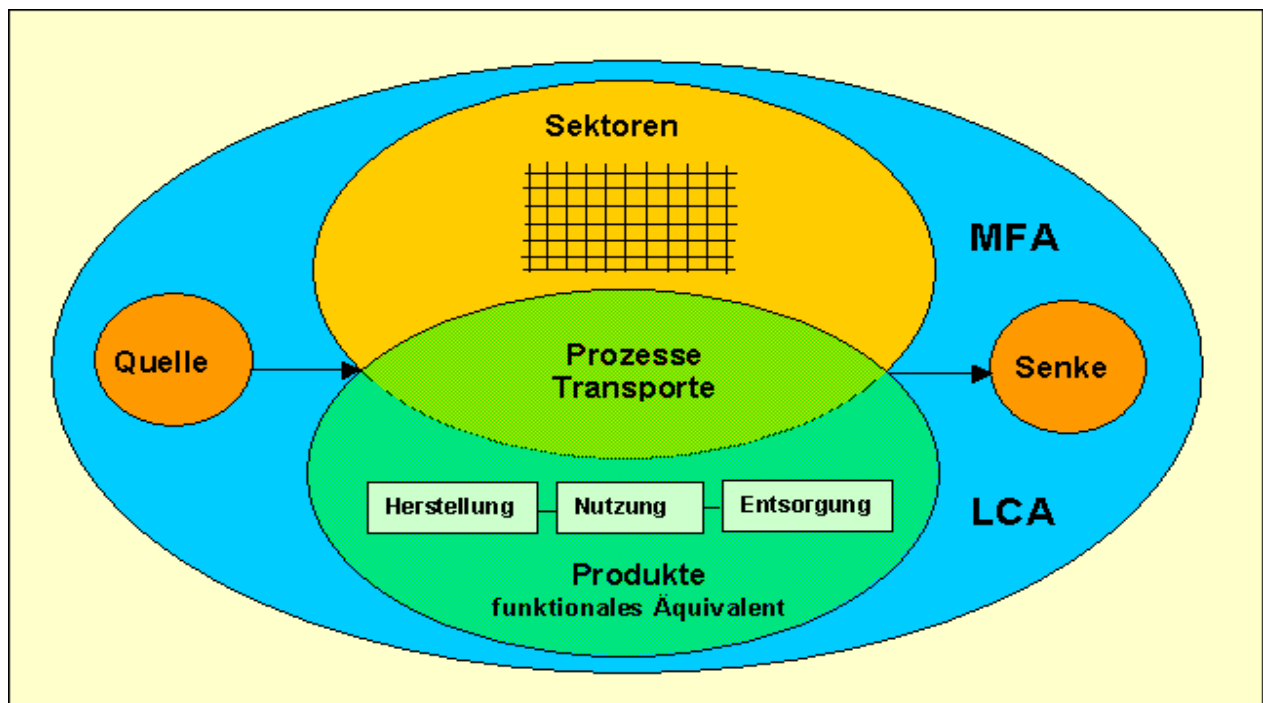


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Systemgrenzen und Untersuchungsgegenstände von Ökobilanz (LCA) und Stoffstromanalyse (MFA)

## **Ökobilanz und Stoffstromanalyse**

Bei der Analyse von Umweltgewinnen und Umweltbelastungen durch Recycling von Stoffen im Baubereich sind sowohl die Prozesse über den gesamten Lebensweg von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung, Nutzung und Entsorgung der Bauprodukte/-stoffe zu betrachten als auch deren Einbettung in den Markt.

Es reicht deshalb nicht aus, Umweltbilanzen allein auf der Prozessebene durchzuführen. Hinzukommen müssen Betrachtungen der tatsächlichen oder möglichen Anteile der mit den Prozessen verbundenen bzw. durch Nachfrage ausgelösten Stoffströme am Gesamtgeschehen. Hierin sind sowohl Prozesse als auch Marktverhältnisse regulierenden Rahmenbedingungen unterworfen, die beachtet werden müssen. Als Analyseinstrumente für solche komplementären Aufgabenstellungen kommen Ökobilanzen für die Prozess- bzw. Produktebene in Betracht und Stoffstromanalysen für die Ermittlung gesamtwirtschaftlicher Effekte oder von Effekten in bestimmten wirtschaftlichen Sektoren und in der Umwelt (Abbildung 1).

Die Ökobilanz nach DIN ISO 14040ff [1] wird zur umweltbezogenen Bewertung von Produkten, Dienstleistungen sowie Prozessen über den gesamten Lebensweg von der Wiege bis zur Bahre (from cradle to grave) eingesetzt. Ein wichtiges Anliegen ist hierbei die umweltbezogene Verbesserung der Produkt- und Verfahrensentwicklung. Ein besondere Eignung der Ökobilanz besteht darin vergleichende Bewertung zu ermöglichen. Entweder derart, dass zwei alternativ einsetzbare Verfahren bzw. Produkte miteinander verglichen werden oder zwei unterschiedliche Zustände des untersuchten Systems. Hierbei erfolgt die Bilanzierung mit der entscheidenden Bedingung der Nutzengleichheit z.B. des Massendurchsatzes der zu vergleichenden Systeme. Dabei wird der Nutzen auch als funktionelle Einheit bezeichnet. Besteht keine Nutzengleichheit der zu vergleichenden Systeme sollen sie jeweils um fehlende Prozesse so ergänzt werden, dass mittels einer Systemraumerweiterung eine Nutzengleichheit erzielt wird. Ist dies nicht möglich, müssen die Inputs und Outputs der Systeme so auf Haupt- und Zusatznutzen aufgeteilt werden (Allokation), dass zumindest die Vergleichbarkeit beim Hauptnutzen gewährleistet ist. Das Allokationsverfahren hat zunächst nach physikalische Größen wie z.B. die Masse bzw. Energie zu erfolgen. Jedoch kann auch in begründeten Fällen eine ökonomische Größe zur Allokation herangezogen werden.

Die Stoffstromanalyse wird auf der Makroebene eingesetzt, um den Strom von bestimmten Stoffen in einem Sektor, hier im Baubereich, in seinen Verflechtungen und Abhängigkeiten zu untersuchen (Stoffmengen pro Zeiteinheit, meistens pro Jahr). Sektoren können nach wirtschaftlichen, geographischen oder sozialen Gesichtspunkten ausgewählt werden. Gewöhnlich werden dazu Statistiken herangezogen oder die Input-Output-Tabellen des Statistischen Bundesamtes.

## Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung für Beton im Hochbau

Die Richtlinie "Beton mit rezykliertem Zuschlag" des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [2] und die Norm DIN 4226-100 für rezyklierte Gesteinskörnungen [3] ermöglichen die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen für die Herstellung von Beton im konstruktiven Bereich. Dabei ersetzen die rezyklierten Gesteinskörnungen einen Anteil ( $\alpha_R$ ) an natürlichen Gesteinskörnungen in der Beton-Rezeptur (Abbildung 2). Die technische Machbarkeit der Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen für Betonanwendungen im konstruktiven Bereich wurde in verschiedenen Demonstrationsprojekten baupraktisch unter Beweis gestellt [4].

Bislang wurden rezyklierte Gesteinskörnungen nahezu vollständig im Tiefbau eingesetzt. Durch die Richtlinie wurde ein neuer Recyclingpfad (close-loop) für aufbereitete Bau- und Abbruchabfälle im Hochbau eröffnet, durch den sowohl primäre Ressourcen eingespart als auch in der Konsequenz Deponiekapazität geschont werden können. Dieser neue Recyclingpfad wurde genauer untersucht [5].

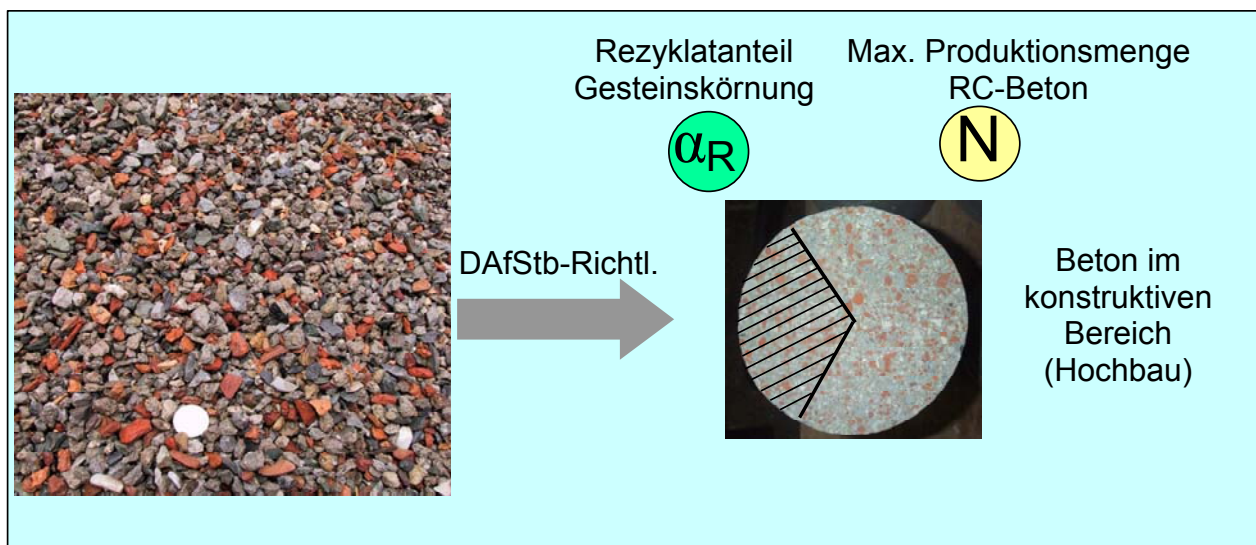


Abbildung 2: Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung für die Herstellung von RC-Beton

Der hierzu benötigte produktspezifische Vergleich von herkömmlichem Kies-Beton mit RC-Beton wird mit Hilfe einer verkürzten Ökobilanz durchgeführt.

Begrenzungen des Einsatzes von RC-Beton auf Grund von existierenden Normen und Richtlinien und insbesondere die Einbettung der Nutzung rezyklierter Gesteinskörnung im Hochbau in das Gesamtsystem des Recyclings von Bauschutt sowie die Frage nach der Verfügbarkeit des Rezyklats selbst und der daraus resultierenden maximal möglichen Ressourcenschonung werden mit Hilfe einer Stoffstromanalyse behandelt.

## Systemgrenzen der ökobilanziellen Untersuchungen

Für den produktspezifischen Vergleich von herkömmlichem Kies-Beton mit Beton unter Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung ergibt sich folgender Systemrahmen: Das System „RC-Beton“ unterscheidet sich neben der Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen und der dafür notwendigen Aufbereitung vom System „Kies-Beton“ durch die zusätzliche Gewinnung von geringen Mengen Eisenschrott, der durch die Verwendung von Stahlbeton in Bauwerken in die Aufbereitung von Bauschutt gelangt und hier wieder ausgeschleust werden kann (Abbildung 3).

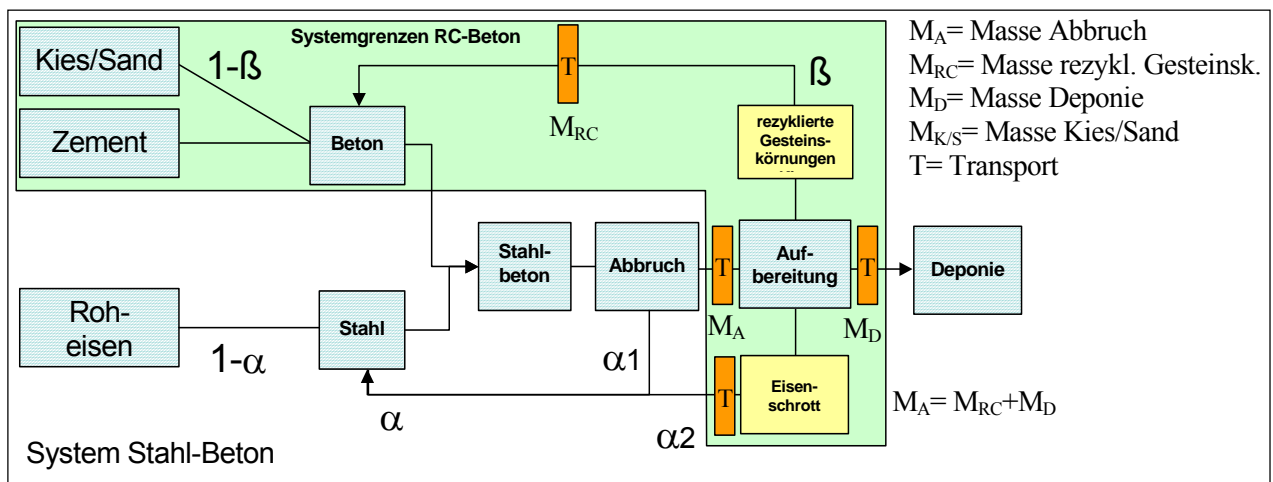


Abbildung 3: System „RC-Beton“ eingebettet in das System „Stahlbeton“ (ohne Bauwerke)

Im System „Kies-Beton“, gibt es keine Aufbereitung und folglich innerhalb der gewählten Systemgrenzen weder Rezyklat noch anfallenden Eisenschrott. Rezyklat wird durch Mehrförderung von Kies „ersetzt“. Der Zusatznutzen Eisenschrott im System „RC-Beton“ muss im System „Kies-Beton“ zur Herstellung der methodisch geforderten Systemäquivalenz durch einen anderen Prozess erzeugt und das System so ergänzt werden. Dazu geeignet ist die Herstellung von "Eisenschwamm".

## Ökobilanzieller Vergleich von Beton mit und ohne rezyklierten Gesteinskörnungen

Innerhalb des ökobilanziellen Vergleichs wurden drei bereits in der Praxis erprobte RC-Betonrezepturen zwei entsprechende Rezepturen mit natürlichen Gesteinskörnungen (Kies, Splitt) gegenübergestellt. Die Rezepturen der drei RC-Betone unterscheiden sich sowohl im Zementgehalt, als auch im Anteil an rezyklierten Gesteinskörnungen. Für jeden Beton einer bestimmten Klasse gibt es eine vorgeschriebene Mindestzementmenge, die aber nicht automatisch schon die zur Verarbeitung des Betons notwendige Konsistenz oder die geforderten Festbetoneigenschaften garantiert. In der Praxis wird häu-

fig mehr Zement<sup>1</sup> zugegeben, um die gewünschten Verarbeitungseigenschaften einzustellen.

Für den Kies-Beton wurde eine Rezeptur ausgewählt, die mit der Mindestzementmenge von 240 kg auskommt. Ergänzend wurde ein Splitt-Beton bilanziert, dessen Zementgehalt um 30 kg über der Mindestzementmenge liegt.

Alle fünf untersuchten Betone besitzen die gleiche funktionelle Einheit. Sie wurde auf 1 m<sup>3</sup> Frischbeton für den konstruktiven Bereich festgelegt und durch die Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie den Einsatzbereich der Betone definiert:

- Druckfestigkeitsklasse: C20/25 (B25)
- Ausbreitklasse: F3 (K3)
- Expositionsklasse: XC1 (Innenbauteil)

Zur Erstellung der Sachbilanz wurden die Prozessketten für Beton mit natürlichen Gesteinskörnungen und RC-Beton modelliert. Hinsichtlich der enthaltenen Einzelprozesse unterscheiden sich diese nur durch den Herstellungsprozess der eingesetzten Gesteinskörnungen. Der wegen der Systemäquivalenz an sich notwendige Prozess „Eisenschwamm“ (vgl. Abbildung 3) wurde wegen des geringen Beitrages vernachlässigt.

Als Indikatoren für die Wirkungsabschätzung wurden der Kumulierte Energieaufwand (KEA) [5], das Treibhauspotential (GWP) und der Verbrauch primärer mineralischer Rohstoffe (VMR) ausgewählt. Der KEA kann als Leitindikator für energiebedingte Umwelteffekte angesehen werden. Da bei der Zementherstellung Treibhausgas-Emissionen nicht nur aus dem Energieverbrauch, sondern auch aus der Entsäuerungsreaktion des Kalksteins stammen, wurde zusätzlich zum KEA das GWP ausgewiesen.

## **Sachbilanz**

Die Sachbilanzergebnisse der Betone sind in Abbildung 4 dargestellt. Im Hinblick auf den Verbrauch primärer mineralischer Rohstoffe (VMR) zeigt sich: 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 zu den eingesparten Rohstoffen durch den Rezyklatanteil klein.

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

---

<sup>1</sup> Alternativ besteht auch die Möglichkeit der Zugabe von Betonzusatzstoffen (z.B. Flugasche) und/oder Betonzusatzmittel (z.B. Verflüssiger).

Die Einsparung an primären mineralischen 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.

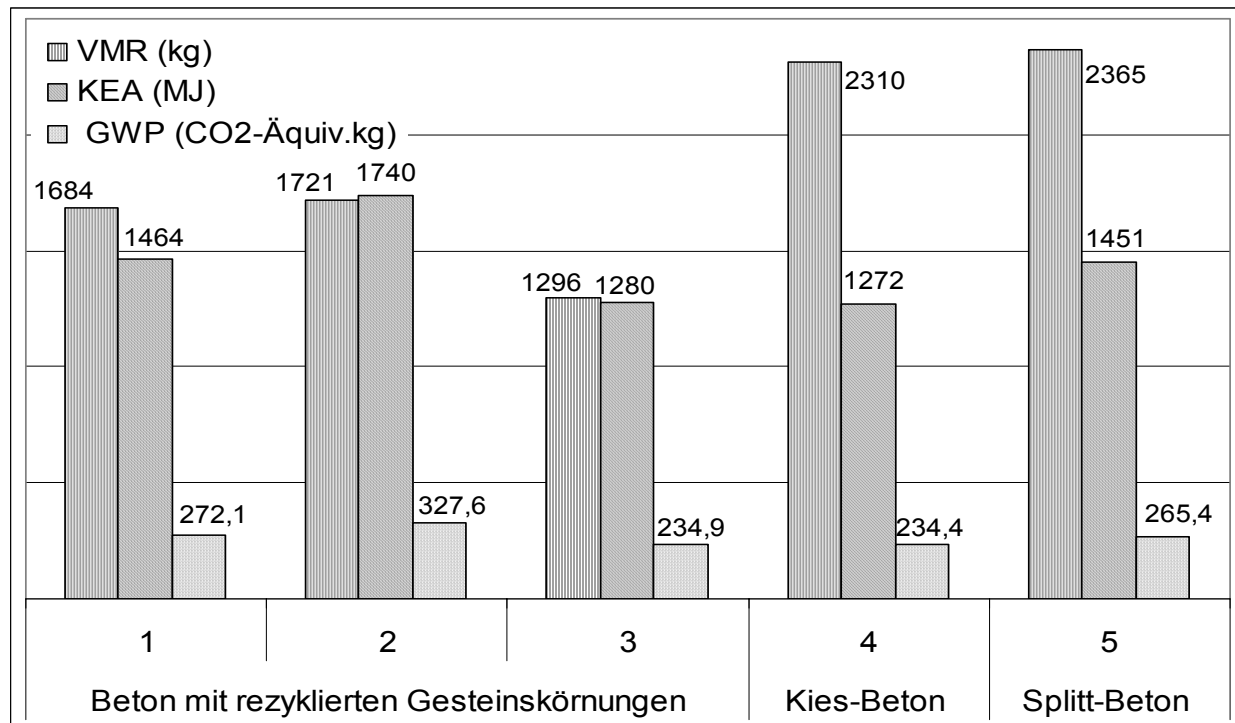


Abbildung 4: Ergebnisse des ökobilanziellen Vergleichs von Betonen mit und ohne rezyklierte Gesteinskörnungen. (pro m<sup>3</sup> Beton) sowie gleichen Transportentfernungen der natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen

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 Abbildung 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.

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 betontechnologisch ein ähnlicher Effekt erreicht werden wie durch den Mehrzement, ohne dass dies ökobilanziell bei den hier zugrundeliegenden Indikatoren zu Buche schlägt.

## Transportszenarien für Gesteinskörnungen

Während rezyklierte Gesteinskörnungen regional immer verfügbar sind, müssen Kies und Sand aufgrund der unterschiedlichen regionalen Verfügbarkeit und aufgrund von Nutzungskonflikten um die Fläche in einigen Gebieten auch über weite Transportdistanzen angeliefert werden. Steigt die Kies-Transportentfernung ( $d_{\text{Kies}}$ ) verglichen mit der Transportentfernung der rezyklierten Gesteinskörnung ( $d_{\text{RC}}$ ), so können sich die Indikatoren KEA und GWP des Kies-Betons soweit erhöhen, dass ein RC-Beton selbst bei erhöhten Zementgehalten gesamtökologische Vorteile im Hinblick auf alle drei Indikatoren (KEA, GWP, VMR) aufweist. Für die Identifizierung ökologisch vorteilhafter Einsatzgebiete von RC-Beton wurde unter Berücksichtigung verschiedener Parameter (Anteil rezyklierter Gesteinskörnungen im RC-Beton, Transportentfernung der RC-Gesteinskörnung, Transportmedium der Gesteinskörnung, Wasseranspruch bzw. Zementgehalt RC-Beton) für den Grenzzustand

$$\text{GWP Kies-Beton} = \text{GWP RC-Beton}$$

den break-even point (Grenzentfernung) für den Kiestransport zum Betonwerk berechnet, vgl. Abbildung 5 [4].

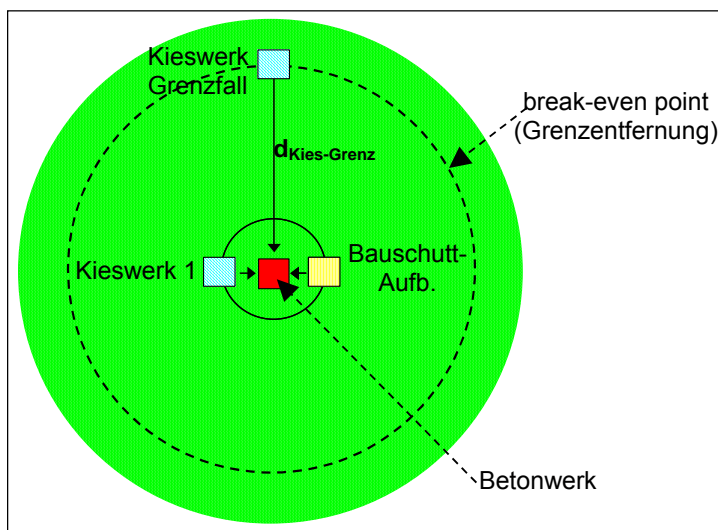


Abbildung 5: Veranschaulichung der zu ermittelnden Grenzentfernung für Kies aus Sicht des Betonwerkes

Liegt der reale Kiestransport zum Betonwerk oberhalb der berechneten Grenzentfernung, so ist aus ökologischer Sicht (KEA, GWP, VMR) die Herstellung von RC-Beton zu empfehlen. Liegt allerdings der Kiestransport zum Betonwerk unterhalb der berechneten Grenzentfernung, so kann die Herstellung von RC-Beton nur in Abwägung von Vorteil (Ressourcenschonung) und Nachteilen (Energieverbrauch, Treibhausgas-Emissionen) erfolgen.

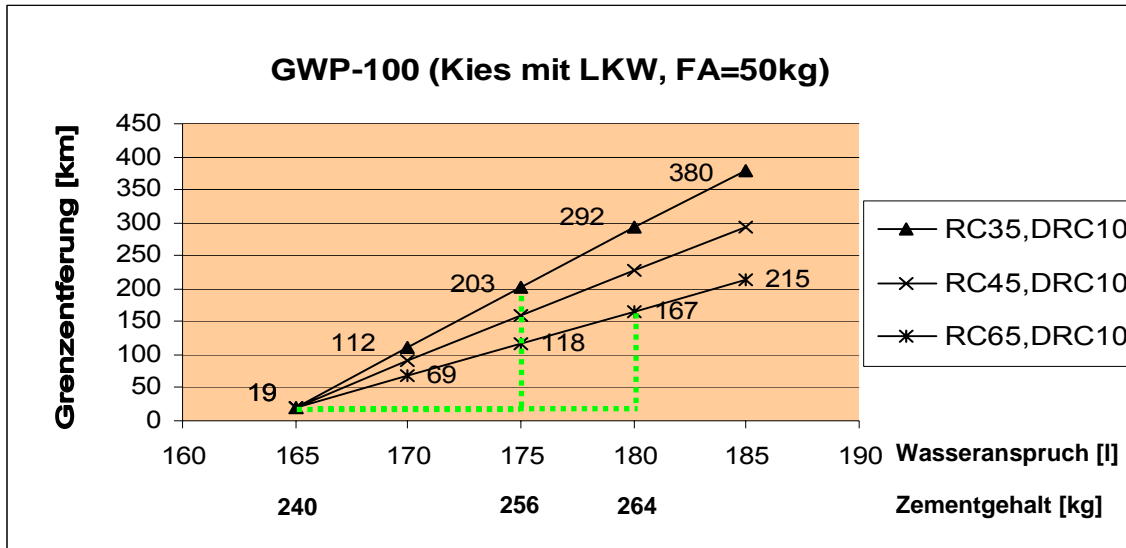


Abbildung 6: Grenzentfernung für Kies-Transport (LKW) in Abhängigkeit vom Wasseranspruch, bzw. Zementgehaltes des RC-Betons bei unterschiedlichen Anteilen an RC-Gesteinskörnung (35 Vol.-%, 45 Vol.-%, 65 Vol.-%), Transportdistanz der RC-Gesteinskörnungen LKW 10 km, sowie konstanter Flugaschenmenge.

Berechnungen zeigen, dass bei minimalem Zementgehalt vorteilhafte Einsatzbereiche des RC-Betons (bei LKW-Transportentfernungen der rezyklierten Gesteinskörnungen von 10 km und einem Rezyklat-Anteil von 35%) in Gebieten liegen, in denen die natürlichen Gesteinskörnungen aus größeren Entfernungen als 19 km durch LKW-Transport dem Betonwerk angeliefert werden (Abbildung 6). Wird der Zementgehalt des RC-Betons gegenüber dem des Kies-Betons erhöht, so steigt der Wert der Grenzentfernung je nach Anteil an rezyklierten Gesteinskörnung um 6-11 km/kg-Zement an (Steigung der Geraden in Abbildung 6).

### Stoffstromanalyse

Um der Frage nachzugehen, welche Mengen an rezyklierten Gesteinskörnungen für die Produktion von RC-Beton zur Verfügung stehen, bzw. dort eingesetzt werden können, wurden eine Stoffstromanalyse der mineralischen Stoffströme im Hoch- und Tiefbau durchgeführt. Dazu wurden Inputströme (Kies, Sand, Kalk, Gips, etc.) und Outputströme (gemischte mineralische Bauabfälle) erhoben. Die Inputströme basieren auf den statistische Daten zu Produktion [6], die Outputströme auf den Bauabfalldaten für das Jahr 1998 des Statistischen Bundesamtes [7], die mithilfe von Informationen von Institutionen und Verbänden ergänzt wurden [4]. Zwischenzeitlich liegen auch Daten über Bau- und Abbruchabfälle für das Jahr 2000 vor, die aber aufgrund einer neuen Abfallerfassung mittels des Europäischen Abfallkataloges (EAK) [8] nicht mehr den Sektoren Hoch- und Tiefbau eindeutig zugeordnet werden können und deshalb hier nicht Ver-

wendung fanden. Da sowohl die Gesamtmenge nahezu gleich geblieben ist, als auch keine Hinweise auf Veränderungen in der Verteilung auf die Sektoren Hoch- und Tiefbau vorliegen, haben die quantitativen Ergebnisse dieser Arbeit auch weiterhin Bestand. Die mineralischen Stoffströme des Bausektors sind in Abbildung 7 vereinfacht dargestellt.

Die mineralischen Inputströme in den Hochbausektor betragen pro Jahr insgesamt 263 Mio.t, davon 144 Mio.t Kies und Sand (einschließlich 22 Mio.t gebrochene natürliche Gesteinskörnung) für Beton und Betonprodukte, die durch rezyklierte Gesteinskörnungen ersetzt werden könnten, sowie 34,5 Mio.t Kalkstein und 1 Mio.t Gips für Zement [7]. Hinzukommen im Hochbau ca. 0,5 Mio.t rezyklierte Gesteinskörnung aus Bau- und Abbruchabfällen die Kies und Sand bei der Herstellung von Bauprodukten ersetzen [5].

Die Inputströme in den Tiefbau betragen 474,8 Mio.t. Davon werden 269 Mio.t Kies und Sand in Frost- Trag- und Deckschichten des Straßenbaus und 63 Mio. t für Beton und Betonprodukte verwendet. Insgesamt 67,7 Mio.t rezyklierte Gesteinskörnungen finden Verwendung im Erd- und Straßenbau.

Die Analyse der Outputströme im Bausektor zeigte, dass die Hauptquelle der Recycling-Baustoffe aufbereitete Abbruchabfälle aus dem Hochbau sind. Aus den im Hochbau angefallenen 49,7 Mio.t Abbruchabfällen wurden 32,7 Mio.t Recycling-Baustoffe hergestellt und praktisch ausschließlich im Erd- und Straßenbau (Tiefbau) eingesetzt. 17 Mio.t der Abbruchabfälle werden in Baustoff-„Senken“ (z.B. Hausmülldeponien, Bauschuttdeponien, Rekultivierungsmaßnahmen im Bergbau) aus Qualitäts- oder Kostengründen zur Ablagerung gebracht.

Im Tiefbau werden 18,5 Mio.t von insgesamt 30,6 Mio.t Bauabfällen direkt in den Tiefbau zurückgeführt (close-loop). Weitere 10 Mio.t werden nach gegenwärtiger Praxis gemeinsam mit Abbruchabfällen aus dem Hochbau aufbereitet und wieder im Tiefbau eingesetzt. Erdaushub, der aus der Bautätigkeit in Hoch- und Tiefbau resultiert, gelangt zu einem großen Anteil (121 Mio.t) in die Baustoffsenken. Nur 7 Mio.t aufbereiteter Erdaushub wird bislang im Tiefbau als Baustoff wieder eingesetzt.

Abbildung 7 zeigt quantitativ, dass insgesamt 67,7 Mio.t (32,2 Mio.t +10 Mio.t +18,5 Mio.t + 7 Mio.t) rezyklierte Gesteinskörnungen im Tiefbau eingesetzt werden.

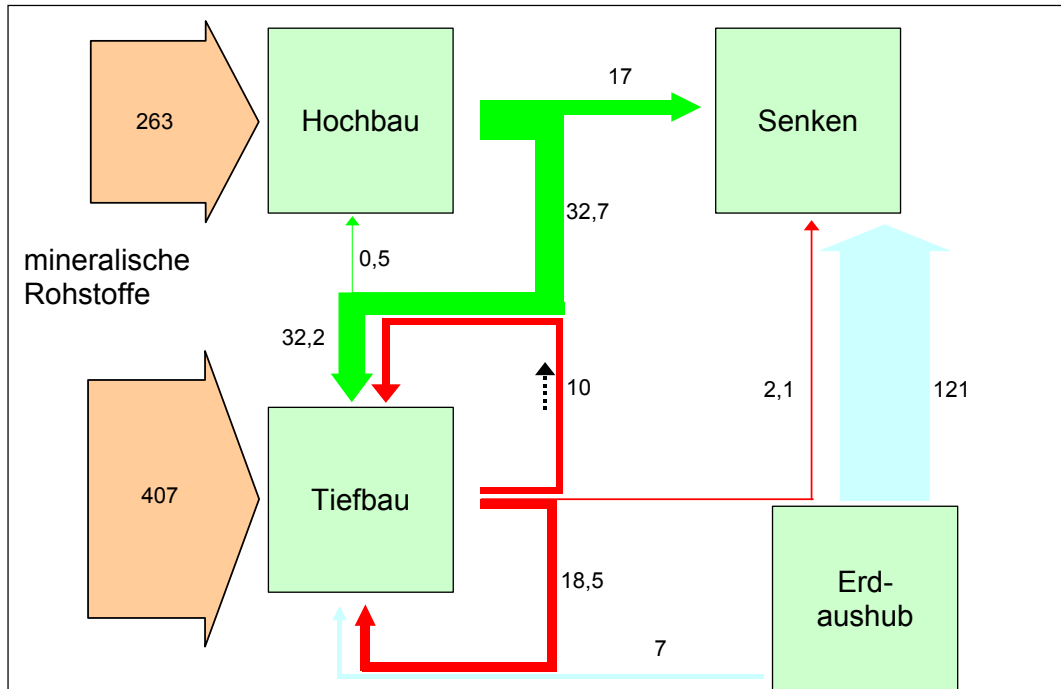


Abbildung 7: Mineralische Stoffströme im Bausektor, Deutschland 1998

### Close-loop Recycling im Hochbau

Im Folgenden werden die Stoffströme behandelt, die für eine Mengenabschätzung der im Hochbau rezyklierbaren Gesteinskörnung notwendig sind.

Um ein close-loop Recycling im Hochbau zu ermöglichen dürfen Bau- und Abbruchabfälle aus dem Tiefbau nicht mit Bau- und Abbruchabfällen aus dem Hochbau gemischt werden (10 Mio.t, Abbildung 7), d.h. sie sind separat aufzubereiten und ausschließlich wieder im Tiefbau einzusetzen. Hierdurch kann sichergestellt werden, dass möglicherweise chloridbelastete rezyklierte Gesteinskörnungen aus dem Tiefbau nicht in den Hochbau gelangen und dort die Dauerhaftigkeit des RC-Betons gefährden.

Zusätzlich wird angenommen, dass aus dem Teil der Bau- und Abbruchabfälle aus dem Hochbau, der in den Baustoffsenken zur Ablagerung gebracht wird (17 Mio.t, Abbildung 7) keine Gesteinskörnungen für Betonanwendungen zu gewinnen sind. Dies begründet sich durch die starke Heterogenität dieser mineralischen Abfälle. Somit kommen 32,7 Mio.t rezyklierbare Bau- und Abbruchabfälle aus dem Hochbau für ein close-loop Recycling im Hochbau in Frage. Für die Herstellung von Beton sind die darin enthaltenen Alt-Beton und Ziegelanteile von ausschließlicherem Interesse.

Hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung sind in dem Mengenstrom von 32,7 Mio.t Abbruchabfällen maximal 22 Mio.t Alt-Beton und 7 Mio.t Ziegel enthalten (Weil 2004). Es wird angenommen, dass diese Beton- und Ziegelmengen entsprechend sortenrein aus dem Bauschutt gewonnen werden können. Regional unterschiedliche Beton/Ziegel-Verhältnisse werden nicht berücksichtigt.<sup>2</sup>

Sollen diese insgesamt 29 Mio.t verwendet werden, müssen weitere Einschränkungen beachtet werden:

Für die Herstellung von RC-Beton können zukünftig zwei nach DIN 4226-100 (2002) definierte Liefertypen eingesetzt werden. Die RC-Gesteinskörnung des Liefertyps 1 muss einen Mindestanteil von 90 M-% Betonsplitt haben und darf nicht mehr als 10 M-% Ziegelsplitt enthalten. Für den Liefertyp 2 sind es mindestens 70 M-% Betonsplitt und maximal 30 M-% Ziegelsplitt. Andere Komponenten, wie beispielsweise mineralische Leichtbaustoffe oder Keramik, sind auf weniger als 1 M-% beschränkt.

Der maximale Anteil Rezyklat an der Gesteinskörnung für den Einsatz im Hochbau ist entsprechend der Richtlinie (DAfStb ,6.E. 2002) begrenzt auf 45 % bei Liefertyp 1 (genormt und zugelassen) bzw. auf 35% bei Liefertyp 2 (genormt, aber noch nicht zugelassen).

Durch die mechanische Zerkleinerung der Bau- und Abbruchabfälle fallen neben den gewünschten Gesteinskörnungen auch feinkörniger Brechsand (Anteil ca. 32 %) an (Weil 2004). Aufgrund seiner ungenügenden Qualität kann dieser nicht bei der Betonherstellung verwendet werden. Dadurch reduziert sich der verwertbare Anteil bei Alt-Beton von 22 Mio.t auf 15 Mio.t, bei Ziegel von 7 Mio.t auf 4,8 Mio.t, d.h. auf insgesamt 19,8 Mio.t (Tabelle 1). Bestehen keine weiteren Recycling-Optionen für Beton- und Ziegelbrechsand (9,2 Mio.t), müssen diese geordnet deponiert werden (Abbildung 8).

---

<sup>2</sup> Aus den verfügbaren Statistiken kann entnommen werden, dass in den neuen Bundesländern und in Städten mit großen Anteilen an historischen Gebäuden aus der Gründerzeit deutliche höher Ziegelanteile in den Abbruchabfällen auftreten als im Bundesdurchschnitt (vgl. Weil 2004)..

Tabelle 1: Betonproduktion mit rezyklierten Gesteinskörnungen (Rohdichte Betonrezyklat: 2,32 kg/dm<sup>3</sup>, Ziegelrezyklat: 1,83 kg/dm<sup>3</sup>, Kies: 2,65 kg/dm<sup>3</sup> sowie 0,72 m<sup>3</sup> Gesteinskörnung/m<sup>3</sup> Beton)

Liefertyp	Zusammen- setzung Liefertyp M-%	Zusammen- setzung Liefertyp kg/m <sup>3</sup>	Höchst- grenze Verwendung im Beton V-%	rezyklierte Gesteins- körnung Beton kg/m <sup>3</sup>	Verfügbare rezyklierte Gesteins- körnung Mio.t	limited element	Verbrauch rezyklierter Gesteins- körnung Mio.t	Beton- produktion mit rezyklierter Gesteinsk. Mio.m <sup>3</sup>	Ersatz natürlicher Gesteins- körnungen Mio.t
<b>Variante 1</b>									
<b>Typ 1</b>									
Beton	90	2033	45	658,7	15	Beton	15		
Ziegel	10	226		73,2	4,8		1,7		
insgesamt Variante 1					19,8		16,7	22,8	19,6
<b>Variante 2</b>									
<b>Typ 2</b>									
Beton	70	1503	35	378,8	15		11,2		
Ziegel	30	644		162,3	4,8	Ziegel	4,8		
					19,8		16,0	29,6	19,8
und zusätzlich									
<b>Typ 1</b>									
Beton	100	2320	45	751,7	3,8	Beton	3,8	5,1	4,4
Ziegel	0	0		0	0		0		
insgesamt Variante 2							19,8	34,7	24,2

Auf Basis der genannten Einschränkungen wurde der mögliche Einsatz an rezyklierten Gesteinskörnungen bzw. der mögliche Ersatz an Kies bei der Betonherstellung in zwei Varianten berechnet (Tabelle 1).

In der Variante 1 kann der Recyclingpfad im Hochbau beim ausschließlichen Einsatz von Liefertyp 1 insgesamt 16,7 Mio.t (15 Mio.t Beton und 1,7 Mio.t Ziegel) der sonst im Tiefbau eingesetzten Bau- und Abbruchabfälle aufnehmen. Aufgrund der geringeren Dichte von rezyklierten Gesteinskörnungen können hierdurch 19,6 Mio.t Kies im Hochbau ersetzt werden (Variante 1, Tabelle 1). Die verbleibenden 3,1 Mio. t Ziegel können nicht weiter für die Betonherstellung verwendet werden.

In der Variante 2 können beim Einsatz von Liefertyp 2 zunächst 16 Mio.t rezyklierte Gesteinskörnung für die Betonherstellung eingesetzt (11,2 Mio.t Beton und 4,8 Mio.t Ziegel) und hierdurch 19,8 Mio.t Kies ersetzen werden. Im Gegensatz zu Variante 1 verbleibt in diesem Fall ein Überschuss von 3,8 Mio.t Beton, der als Liefertyp 1 für die Betonherstellung verwendet werden kann. Hierdurch können nochmals 4,4 Mio.t Kies ersetzt werden (Variante 2, Tabelle 1), d.h. insgesamt 24,2 Mio.t (Abbildung 8). Bezogen auf den Einsatz von Kies und Sand für Betonanwendungen im Hochbau (144 Mio.t) sind dies 16,8 %, und am Gesamtverbrauch primärer mineralischer Ressourcen im Hochbau (263 Mio.t) kann das close-loop Recycling einen Beitrag von 9,2 % leisten.

Aufgrund der Vorteile der Variante 2 empfiehlt es sich unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen zunächst den ziegelreicheren Liefertyp 2 für die Betonherstellung heranzuziehen, wenn das close-loop Recyclingpotential voll ausgeschöpft werden soll. Hierdurch wird die größte Menge an primären Gesteinskörnungen bei der Betonproduktion substituiert. Das setzt voraus, dass Liefertyp 2 in der Richtlinie [10] zugelassen wird.

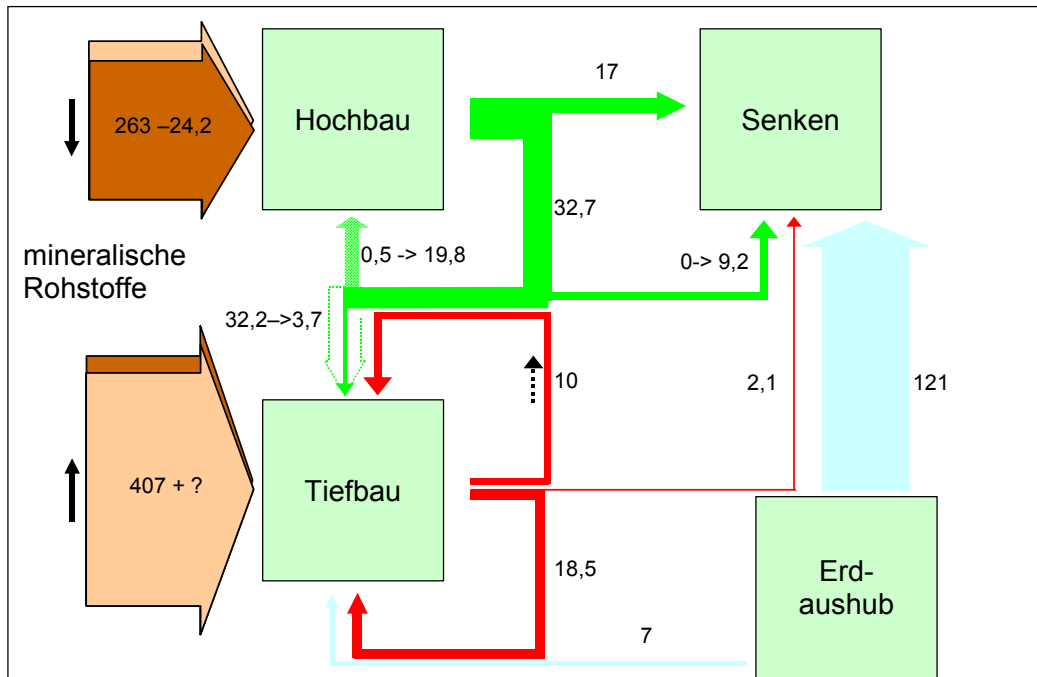


Abbildung 8: Veränderte Mineralische Stoffströme im Bausektor, Deutschland 1998

## Zusammenfassung

Ein Vergleich der ökobilanziellen Ergebnisse für Beton mit und ohne rezyklierten Gesteinskörnungen zeigt, dass durch den Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen bei der Betonherstellung der Verbrauch primär mineralischer Ressourcen (VMR) um bis zu 44 % reduziert werden kann.

Werden bei der Herstellung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen höhere Zementmengen als bei einem vergleichbaren Beton mit natürlichen Gesteinskörnungen eingesetzt, so liegen die Bilanzergebnisse bei KEA und GWP um bis zu 36 % bzw. 39% über denen von Beton mit natürlichen Gesteinskörnungen.

Ein lohnender Ansatzpunkt zur Optimierung der RC-Betonherstellung liegt damit in der Verringerung des Zementgehaltes in Richtung Mindestzementgehalt.

Werden anstelle einer höheren Zementmenge zur Erreichung einer hinreichenden Verarbeitbarkeit zusätzlich oder verstärkt Flugasche und Betonverflüssiger eingesetzt, so können nahezu gleiche Bilanzergebnisse wie beim Kies-Beton erreicht werden.

Doch selbst im Fall eines erhöhten Zementeinsatzes gibt es Gebiete, in denen der RC-Beton gegenüber dem Kies-Beton gesamtökologisch Vorteile (KEA, GWP, VMR) aufweist. Um diese Gebiete zu identifizieren wurde ein Rechen-Tool entwickelt. Ergebnisse von Rechenszenarien zeigen, dass vorteilhafte Einsatzbereiche von RC-Beton mit erhöhten Zementgehalten in kiesarmen Gebieten liegen, da hier, im Gegensatz zu den rezyklierten Gesteinskörnungen, die natürlichen Gesteinskörnungen aus weiten Entfernungen angeliefert werden müssen.

Ein Variantenvergleich innerhalb der stoffstromanalytischen Untersuchungen zeigt, dass es vorteilhaft ist, bevorzugt ziegelreiche rezyklierte Gesteinskörnungen für die Herstellung von Beton einzusetzen, wenn die maximal mögliche mineralische Ressourcenschonung von 24,2 Mio.t im Hochbau erreicht werden soll. Hierfür ist es aber zwingend notwendig, dass die in der DIN 4226-100 definierte ziegelreichere Gesteinskörnung (Liefertyp 2) auch in der neuen Richtlinie für die Herstellung von Beton mit rezyklierten Gesteinkörnungen [5] berücksichtigt wird.

Würden die Beton- und Ziegelanteile der Bau- und Abbruchabfälle in den Hochbau zurückgeführt, so würden bei der Aufbereitung 9,2 Mio.t Brechsand anfallen, die das close-loop Recycling nach den gegenwärtigen Regelwerken selbst nicht aufnehmen kann. Können für den Brechsand keine neuen Verwertungspfade gefunden werden, so muss dieser deponiert werden.

Die ermittelte maximal mögliche Ressourcenschonung beruht auf der Annahme, dass die verwertbaren Beton und Ziegelanteile aus den Bau- und Abbruchabfällen des Hochbaus entsprechend sortenrein gewonnen werden können. Bisher sind die bestehenden Aufbereitungsanlagen nur auf die Entfernung von Leichtbaustoffen und nichtmineralischen Störstoffe ausgerichtet und weniger auf die Trennung der einzelnen mineralischen Fraktionen. Sollen zukünftig in größerem Umfang aufbereitet Bau- und Abbruchabfälle in den Hochbau zurückgeführt werden, so müssten die verschiedenen mineralischen Altbaustoffe stärker als bislang bereits auf der Baustelle getrennt werden, was durch einen selektiven Abbruch des Gebäudes oder der Konstruktionen erreichbar ist.

#### **Literaturverzeichnis:**

- [1] Deutsches Institut für Normung -DIN- EN ISO 14040ff (1997): Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen
- [2] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton - DAfStb - Richtlinie (1998): Beton mit rezykliertem Zuschlag. Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), Beuth, Berlin, August 1998

- [3] Deutsches Institut für Normung -DIN- 4226-100 (2002): Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel - Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen.
- [4] Grübl, P., Rühl, M. (1998): Der Einfluß von Recyclingzuschlägen aus Bauschutt auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften und die Bewertung hinsichtlich der Eignung für Baustellen- und Transportbeton nach DIN 1045. Baustoffkreislauf im Massivbau (BIM), Teilprojekt E/03, <http://www.b-i-m.de>
- [5] Weil, M. (2004): Ressourcenschonung und Umweltentlastung bei der Betonherstellung durch Nutzung von Bau- und Abbruchabfällen. WAR-Serie 160, TU-Darmstadt, Dissertation
- [6] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 4600 (1995): Kumulierter Energieaufwand Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden.
- [7] Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden -BBSE- (2000): Der Bedarf an mineralischen Baustoffen – Gutachten über den künftigen Bedarf an mineralischen Rohstoffen unter der Berücksichtigung des Einsatzes von Recycling-Baustoffen
- [8] Statistisches Bundesamt Deutschland (2002): Erhebung über die Aufbereitung und Verwendung von Bauschutt, Baustellenabfälle, Bodenaushub und Straßenaufbruch 1998. April 2002
- [9] Europäischer Abfallkatalog -EAK- (1996): Verordnung zur Einführung des Europäischen Abfallkatalogs. September 1996
- [10] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton - DAfStb - 6.Entwurf Richtlinie (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. Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), Beuth, Berlin, Oktober 2002

**Verfasser:**

Dr.-Ing. Marcel Weil, Dr.-Ing. Udo Jeske  
Institut für Technische Chemie  
Zentralabteilung Technikbedingte Stoffströme (ITC-ZTS)  
Forschungszentrum Karlsruhe  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen  
e-mail: [Marcel.Weil@itc-zts.fzk.de](mailto:Marcel.Weil@itc-zts.fzk.de)  
Tel. 07247/82-6718 oder -4189