

Karin Weimann, Cathleen Hoffmann

Ressourceneffizienz im Betonrecycling – Rahmen und Möglichkeiten in Deutschland und der Schweiz

Aufgrund der großen anfallenden Massenströme ist die Wiederverwertung von Baurestmassen in Industrienationen von besonderer Bedeutung. Auch vor dem Hintergrund der Ressourceneffizienz wird beispielsweise die Nutzung des in Bauschutt vorhandenen Wertstoffpotentials zunehmend wichtiger.

Eine besondere Rolle spielt dabei die Wiederverwertung von Altbeton. Ein Grund hierfür ist der deutliche Anstieg des seit Mitte des letzten Jahrhunderts im Bauwesen verbrauchten Betons und die damit verbundene – zeitlich versetzte – Zunahme des Altbetonanteils im Bauschutt. Darüber hinaus ist das Wertstoffpotential von Altbeton im Vergleich zu anderen Abbruchmaterialien besonders groß, denn Altbeton kann unter bestimmten Bedingungen sehr hochwertig auch als rezyklierte Gesteinskörnung wieder in der Betonherstellung eingesetzt werden. Damit kann ein Kreislauf im Sinne eines Closed-loop-Recycling verwirklicht und Altbeton damit hochwertig wiederverwertet werden.

In Hinblick auf Ressourceneffizienz kann das Betonrecycling in zweifacher Hinsicht sinnvoll sein: zum einen werden Reststoffe wieder verwertet und damit aus dem Abfallstrom entfernt, andererseits entfallen durch die Substitution von Primärgesteinskörnungen die damit verbundenen Umweltwirkungen wie z.B. der Flächenverbrauch. Demgegenüber stehen die Umweltwirkungen, die durch die Aufbereitung und den Wiedereinsatz der rezyklierten Gesteinskörnung verursacht werden. Deshalb ist es sinnvoll den Einsatz der rezyklierten Gesteinskörnungen vor dem Hintergrund der jeweiligen Anwendung zu betrachten, denn in Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen, z.B. langen Transportentfernungen, können negative Effekte des Einsatzes dieses RC-Baustoffs überwiegen.

Rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz von RC-Beton

Neben den in Hinblick auf die Nachhaltigkeit von Produkten zu bewertenden ökonomischen, ökologischen und sozialen Aspekten stehen im Baubereich zudem die technischen Anforderungen an Funktionalität und Qualität im Zentrum der Bewertung [1]. Diese sind insbesondere für alle sicherheitstechnischen Aspekte unerlässlich und damit Voraussetzung für die Eignung von rezyklierten Gesteinskörnungen als Ersatz für natürliche Gesteinskörnungen. Diese technischen Anforderungen werden über die in den technischen Regelwerken formulierten Qualitätskriterien für RC-Baustoffe festgelegt. Grundlage dieser Anforderungen bilden zahlreiche Forschungsprojekte zu den Baustoffeigenschaften von rezyklierten Gesteinskörnungen und den daraus hergestellten RC-Betonen [2-5].

Aufgrund der im Vergleich zu natürlichen Gesteinskörnungen ungünstigeren Materialeigenschaften wurden zusätzliche Anforderungen an die RC-Baustoffe festgelegt. In Deutschland wurde auf Basis der bis dahin durchgeführten Forschungsarbeiten im Jahr 1998 vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton die „DAfStb-Richtlinie für Beton mit rezykliertem Zuschlag“ erstellt und in den darauf folgenden Jahren weiter entwickelt [6-8]. Dabei wurde speziell auf die beobachtete Inhomogenität von RC-Gesteinskörnungen aus Altbeton und auf die durch den Altzementstein veränderten Materialeigenschaften eingegangen.

Wesentliche Inhalte waren Vorgaben zu Maximalgehalten an Stör- und Schadstoffen sowie Anforderungen an vom Altzementstein beeinflusste Materialeigenschaften wie Mindestdichten und maximale Wasseraufnahmen. Mit den Fassungen aus den Jahren 2003/2004 wurden die rezyklierten Gesteinskörnungen in zwei Typen unterschieden und Brechsande < 2 mm von der Herstellung von RC-Beton ausgeschlossen. Weiterhin gab es Vorgaben zur Überwachung der Produktion und zur Kennzeichnung von rezyklierten Gesteinskörnungen. Die enthaltenen Angaben zur Bemessung von RC-Betonen enthielten Höchstanteile für rezyklierte Gesteinskörnungen in Bezug auf Betonklassen und Bauteile.

Seit 2002 wurden – zunächst in der DIN 4226-100 – die Anforderungen an die Materialeigenschaften von rezyklierten Gesteinskörnungen auch normativ erfasst. In Ergänzung zu den DIN-Normen für normale und schwere bzw. für leichte Gesteinskörnungen wurden hier Anforderungen an die stofflichen Eigenschaften der RC-Gesteinskörnungen formuliert [9-11]. Dabei wurde, in Abhängigkeit von der mineralischen Zusammensetzung und enthaltenen Störstoffen, zwischen vier Liefertypen unterschieden. Mindestanforderungen wurden auch hier wiederum an Dichte und Wasseraufnahmen sowie in Bezug auf störende oder schädliche Inhaltsstoffe gestellt. Zudem erfolgten Vorgaben für Raum- und Frostbeständigkeit sowie für die Überwachung und Kennzeichnung.

Mit der Verabschiedung der DIN EN 12620 „Gesteinskörnungen für Beton“ (in Deutschland 2008) wurde schließlich eine einheitliche europäische Norm für die verschiedenen Typen von Gesteinskörnungen geschaffen, in der auch die Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen enthalten sind [12].

Unter Berücksichtigung der nationalen strategischen Vorgaben und Umsetzungen gewinnt auch in der Schweiz die Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung zur Herstellung von sogenanntem Recyclingbeton zunehmend an Bedeutung. Grundsätzlich wird hier zwischen zwei Arten von rezyklierter Gesteinskörnung unterschieden: Betongranulat (C) und Mischgranulat (M).

Die Mindestanforderungen bei der petrographischen Zusammensetzung von Betongranulat und Mischgranulat sind im technischen Merkblatt SIA 2030 des Schweizer Ingenieur- und Architektenverein (SIA) aufgeführt. Für Recycling-

beton gelten die Anforderungen der Norm SN EN 206-1, die auf das Merkblatt SIA 2030 verweist. Darin wird eine Einschränkung der Verwendung von Recyclingbeton nach Eigenschaften aufgrund von dauerhaftigkeitsrelevanten Aspekten vorgenommen. Recyclingbeton hergestellt mit Betongranulat (RC-C) kann im Hochbau als Konstruktionsbeton nach dem Merkblatt SIA 2030 eingesetzt werden.

Hingegen wird empfohlen, den Recyclingbeton hergestellt mit Mischgranulat (RC-M) ausschliesslich für Betonbauteile mit mässiger oder hoher Feuchte oder für vor Regen geschützte Betonbauteile im Freien zu verwenden. Die Verwendung von RC-M mit einem Gehalt von mehr als 25 M.-% Rb ist ohne entsprechende Voruntersuchungen nur für die Expositionsklasse XC1(trocken) zulässig. Für Spannbeton und ermüdungsgefährdete Bauteile sind für Recyclingbeton RC-M und RC-C zwingend Vorversuche zum Nachweis der gewünschten Eigenschaften durchzuführen.

Ressourceneffizienz im Bauwesen

Die Nutzung des Rohstoffpotentials von Massengütern wie Baurestmassen rückte in Deutschland mit der Einführung des Indikators der Rohstoffproduktivität in den Fokus der Aufmerksamkeit. Im Jahr 2002 benannte die Bundesregierung zudem das Ziel die Rohstoffproduktivität bis 2020 im Vergleich zu 1994 zu verdoppeln. Eine Steigerung der Rohstoffeffizienz in Deutschland war in den vergangenen Jahren auch festzustellen [13], ob das Ziel einer Verdoppelung der Rohstoffproduktivität bis 2020 tatsächlich erreicht werden kann, ist noch fraglich.

Die Bedeutung der Ressourceneffizienz ist erst vor wenigen Jahren in den Fokus des öffentlichen Interesses gerückt. Auf Basis der im Oktober 2010 verabschiedeten Deutschen Rohstoffstrategie wurde im Februar 2012 das Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) vom Bundeskabinett beschlossen. Das Programm soll unter anderem Strategien und Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz beschreiben und den hierfür erforderlichen Handlungsbedarf über verschiedene Handlungsansätze entlang der Wertschöpfungskette identifizieren. Dabei beziehen sich die Vorgaben auf abiotische, nichtenergetische Rohstoffe sowie auf die stoffliche Nutzung biotischer Rohstoffe [14]. In diesem Programm wird auch explizit auf das Ressourcenschonungspotential durch den Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen als Substitut für Primärrohstoffe hingewiesen.

Kriterien zur Bewertung der Ressourceneffizienz werden bereits in verschiedenen Bereichen des Bauwesens angewandt. So sind beispielsweise die Indikatoren Flächeninanspruchnahme und Energieverbrauch schon Bestandteil verschiedener Bewertungssysteme für Ökobilanzen und werden auch im Baubereich und speziell auch für die Bewertung des Betonrecycling angewandt. Das vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung geschaffene Bewertungssystem bnb (Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude)

beinhaltet neben technischen und ökonomischen Qualitätskriterien auch den Themenbereich Ressourceninanspruchnahme in dem – unter anderem – wiederum Energiebedarf und Flächeninanspruchnahme als Einzelkriterien enthalten sind.

Speziell zur Ressourceneffizienzanalyse wird zurzeit vom Verein Deutscher Ingenieure (VDI) eine branchenübergreifende Methodik entwickelt. Ziel der Arbeiten ist ein VDI-Handbuch „Ressourceneffizienz“, das als Ergänzung zu bestehenden Richtlinien oder Normen wie z.B. zur Ökobilanzierung weitere Aspekte des nachhaltigen Umgangs mit Ressourcen beinhaltet. Anders als im Falle von Ökobilanzierungen, mit denen die Einflüsse von Prozessen oder Produkten auf die Umwelt quantifiziert werden, kann in einer Ressourceneffizienzanalyse der Verbrauch von Ressourcen in Bezug auf einen bestimmten Nutzen, z.B. ein Produkt oder eine Funktion, ermittelt werden. In Abbildung 1 ist das Konzept zum Richtlinienaufbau dargestellt.

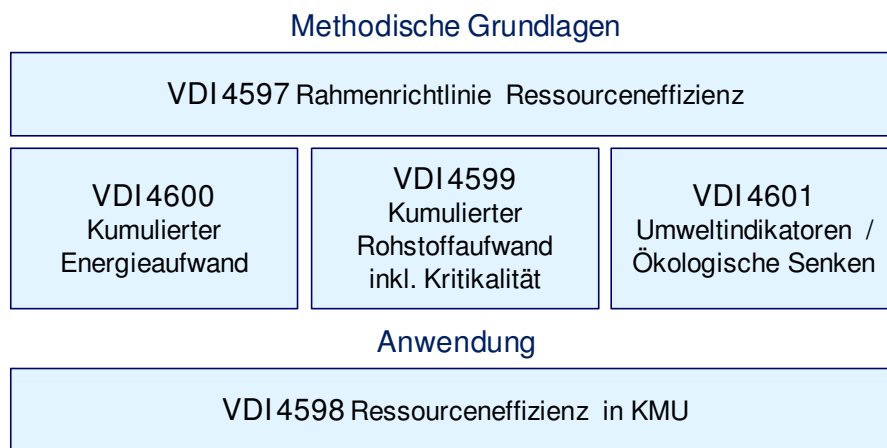


Abb. 1: Methodisches Konzept der VDI-Richtlinien zur Ressourceneffizienz

Als Kernstück des VDI-Handbuchs wird seit Anfang 2011 die VDI 4597 Rahmenrichtlinie Ressourceneffizienz erarbeitet. In dieser Rahmenrichtlinie werden, Zielsetzung und Bilanzierungsgrundsätze sowie Strategien zur Umsetzung von Ressourceneffizienzmaßnahmen definiert. Wichtig ist hierbei auch das Zusammenspiel mit anderen Normen und Regelwerken, wie z.B. mit den Normen zur Ökobilanzierung DIN ISO 14040 ff.

Richtlinie VDI 4600 enthält Begriffe und Berechnungsmethoden zur Bilanzierung des „Kumulierten Energieaufwandes“ (KEA). Für die Ermittlung des kumulierten Rohstoffaufwands (KRA) wird in der Richtlinie VDI 4599 neben der Erstellung einer Sachbilanzierungsvorschrift für Rohstoffe auch deren Kritikalität berücksichtigt. Zur Bewertung von relevanten Umweltwirkungen auf der Basis der beiden vorgenannten Richtlinien in der VDI 4601 „Umweltindikatoren“ werden Methodik und Berechnungsvorschriften erarbeitet. Ein Schwerpunkt der Arbeiten ist dabei die Identifikation geeigneter Indikatoren. Ergänzend werden in der VDI-Richtlinie 4598 „Ressourceneffizienz in KMU“ Strategien zur Umset-

zung von Ressourceneffizienzmaßnahmen für produzierende Unternehmen, insbesondere KMU, geschaffen.

Die Thematik der Ressourceneffizienz ist in der Schweiz eine der zehn Schlüsselherausforderungen, welche der Schweizer Bundesrat in seiner «Strategie Nachhaltige Entwicklung 2012-2015» aufführt. Entsprechend wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Maßnahmen auf unterschiedlicher Akteurs-ebene umgesetzt. Beispiele hierfür sind:

- Kantone, Städte: Das nachhaltige Bauen wurde Bestandteil der Leistungsaufträge der kantonalen und städtischen Hochbauämter: Umwelt- und energiegerechtes Bauen ist hier als Vorgabe bei der Realisierung von Bauvorhaben definiert.
- Standards, Label, Instrumente: Normen, Dokumente und Empfehlungen sowie Nachhaltigkeitsstandards wie beispielsweise MINERGIE-ECO® wurden erarbeitet. Mit diesen wird die verbindliche Umsetzung einer nachhaltigen und Ressourcen schonenden Bauweise - unter Berücksichtigung nachhaltiger Baumaterialien - bereits in der Planungs- und Realisierungsphase vorgegeben.

Ansätze zu ökobilanziellen Bewertungen im Betonrecycling

In Ökobilanzen und ökobilanziellen Bewertungen können Produkte und Verfahren mittels einheitlicher Bewertungssysteme in Hinblick auf ihre Umweltwirkungen miteinander verglichen werden. Im Baubereich und im Betonrecycling ist dieses Instrument schon seit Jahren etabliert und wird zur Bewertung sowohl einzelner Verfahrensschritte bei der Altbetonaufbereitung als auch für die Bereitstellung von Betonen und RC-Betonen oder auch für unterschiedliche Verfahrenswege bei der Entsorgung/Verwertung von Altbetonen eingesetzt.

Untersuchungen zu Umweltwirkungen bei der Herstellung von RC-Betonen

Im Auftrag des Umweltbundesamtes wurde im Rahmen des Umweltforschungsplans eine Untersuchung zu Abbruch- und Aufbereitungstechniken in Hinblick auf eine optimierte Schadstoffentfrachtung mit dem Schwerpunkt Sulfatentfernung durchgeführt. Sulfatgehalte in Bauschutt werden zunehmend zum Problem bei der Verwertung von RC-Baustoffen. Beim Abbruch von Gebäuden gelangen Sulfate aus gipshaltigen Innenausbaumaterialien in den Bauschutt. Infolge des starken Anstiegs der in Gebäuden verbauten Gipsprodukte in den vergangenen Jahrzehnten ist mit einem weiteren Anstieg gipshaltiger Bauabfälle in den kommenden Jahren zu rechnen [15]. Gleichzeitig ist eine Verschärfung der Grenzwerte für Sulfat im Eluat von RC-Baustoffen in der Diskussion. Vor diesem Hintergrund wurde diese Studie konzipiert und von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung in Zusammenarbeit mit der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt.

Ein wesentlicher Aspekt der Studie war die ökobilanzielle Bewertung der unterschiedlichen Verfahrensweisen zur Generierung von schad- und störfarmen rezyklierten Gesteinskörnungen aus Altbeton. Ziel der Untersuchung waren die Ermittlung und der Vergleich der Umweltwirkungen einer selektiven und einer konventionellen Vorgehensweise beim Abbruch von Gebäuden und der anschließenden Bauschuttzubereitung. Diese Verfahrensabläufe wurden am Beispiel von drei unterschiedlichen, überwiegend aus Beton bestehenden Modellgebäuden (Einfamilienhaus, Mehrfamilien-Plattenbau, Industriegebäude) untersucht. Diese Modellgebäude wurden mit praxisnahen Anteilen an gips-haltigen Innenausbaumaterialien wie Estrichen und Wandbauplatten entworfen [16].

Die ökobilanzielle Bewertung der unterschiedlichen Modellszenarien wurde unter Nutzung der Software Umberto und der Datenbank Ecoinvent durchgeführt [17], [18]. Dabei wurden die Umweltwirkungen nach der Bewertungsmethode CML 2001 in den Wirkungskategorien Klimawandel, Ressourcenverbrauch, Landverbrauch, stratosphärischer Ozonabbau, Überdüngungspotential und Versauerungspotential evaluiert. Als funktionelle Einheit wurde eine Tonne rezyklierte Gesteinskörnung festgelegt.

Für alle drei betrachteten Modellgebäude waren die Umweltwirkungen bei der Vorgehensweise mit selektiven Abbruchverfahren geringer als bei den Vergleichsszenarien ohne selektive Verfahrensschritte. In der Wirkungskategorie Klimawandel bzw. Treibhauseffekt wurden dabei in allen Szenarien die höchsten Absolutwerte erreicht. In der Wirkungskategorie Landverbrauch waren hingegen die größten Differenzen zwischen den Ergebnissen für selektive und nicht selektive Vorgehensweisen zu verzeichnen. In Abbildung 2 sind die Ergebnisse für die Modellgebäude Mehrfamilienhaus (MFH) und Industriegebäude in diesen Wirkungskategorien dargestellt.

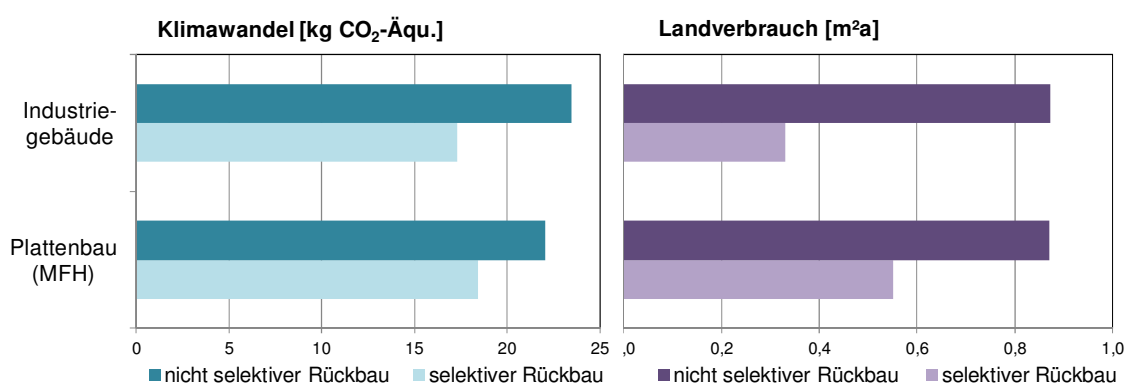


Abbildung 2: Ergebnisse der Umweltwirkungen in den Wirkungskategorien Klimawandel und Landverbrauch beim selektiven bzw. nicht selektiven Abbruch/Rückbau von zwei Modellhäusern.

Werden ausschließlich die Umweltwirkungen der Abbruch- bzw. Rückbauarbeiten betrachtet, so zeigt sich, dass der Aufwand bei der selektiven Vorgehensweise höher ist als bei konventionellen Verfahrensschritten. Dies liegt an dem zusätzlichen Maschineneinsatz für die Separierung der gipshaltigen Innenausbauteile. Werden jedoch die Aufwendungen für Transporte, Bauschuttzubereitung und Deponierung von Reststoffen in die Bewertung mit einbezogen, so überwiegen die Umweltwirkungen der nicht selektiven Verfahrenswesen. Dies liegt an einer geringeren Menge an zu deponierenden Reststoffen und zum Teil geringeren Aufwendungen bei der Bauschuttzubereitung in der Gesamtbilanz der selektiven Vorgehensweisen. Auch in dieser Untersuchung zeigte sich, dass die in der Bilanzierung enthaltenen Materialtransporte einen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben können.

Ein ökobilanzieller Vergleich zwischen einem RC-Beton mit einem Anteil von 20 % rezyklierter Gesteinskörnung (aus dem Szenario selektiver Abbruch Modellgebäude Plattenbau) an der gesamten Gesteinskörnung und einem Referenzbeton gleicher Rezeptur zeigten sich bezogen auf die Emissionen nur geringe Unterschiede zwischen den Betonen. Demgegenüber steht jedoch ein reduzierter Landverbrauch, der sowohl aus der möglichen Einsparung von Deponieraum, als auch aus einer Verringerung des Verbrauchs der natürlichen Gesteinskörnungen resultiert. In Abbildung 3 sind die Umweltwirkungen Klimawandel und Landverbrauch nach den Anteilen, welche die einzelnen im Beton eingesetzten Rohstoffe an der jeweiligen Umweltwirkung haben, aufgeschlüsselt.

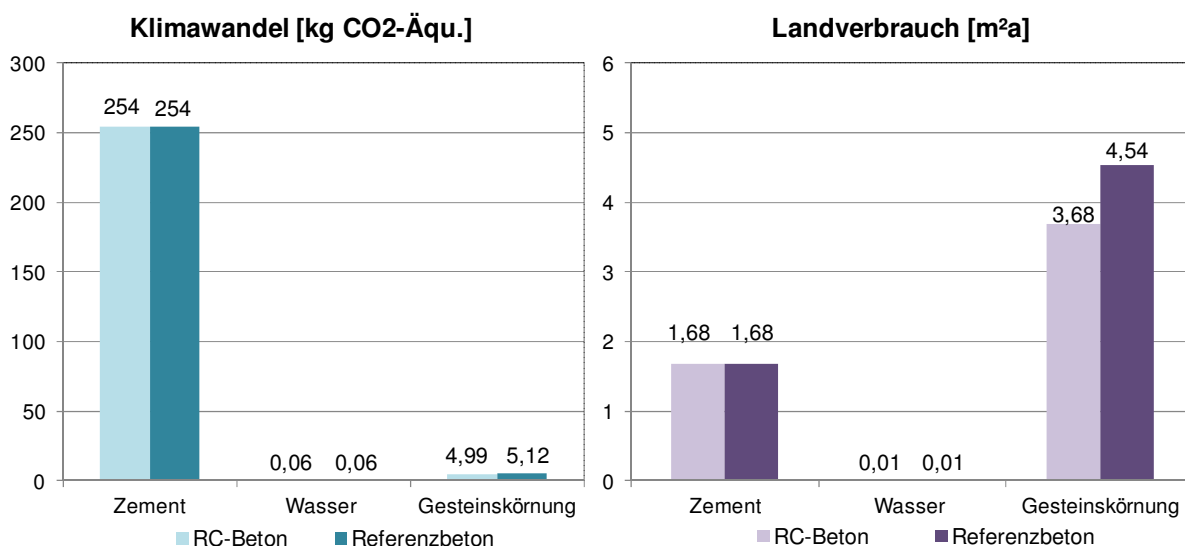


Abbildung 3: Vergleich der Wirkungskategorien Klimawandel (GWP 100) und Landverbrauch für die Herstellung von 1 m³ RC-Beton und 1 m³ Referenzbeton

In einer von der Holcim (Schweiz) AG in Auftrag gegebenen Studie [19] wurde die ökologische Nachhaltigkeit des Einsatzes von rezyklierter Gesteinskörnung und Recyclingbeton untersucht. Ziel des Projektes war es, durch die Analyse

von vergleichenden Ökobilanzen für den Einsatz von Recycling-Gesteinskörnung und natürlicher Gesteinskörnung an ausgewählten Beispielen Informationen über die ökologische Bewertung des Einsatzes von Recycling-Gesteinskörnung in Betonen zu gewinnen. Zu diesem Zweck wurde u.a. die Ökobilanz für Gesteinskörnungen und für ausgewählte Betone erstellt. Für die Wirkungsabschätzung wurden die folgenden sechs Wirkungskategorien ausgewählt: Energieressourcen, Treibhauseffekt, Versauerung, Atemwegserkrankungen, Ökosystem-Schadenspotenzial durch Landnutzung und Kiesabbau.

Bezogen auf die Prozesskette der Betonherstellung lassen sich zur ökologischen Beurteilung des Einsatzes von Recycling-Gesteinskörnung zwei Gruppen von Wirkungskategorien unterscheiden:

- 1) Die Knappheit von Kies und der Ökosystem-Lebensraum: Diese Wirkungskategorien werden durch den Einsatz von Recycling-Gesteinskörnung deutlich beeinflusst. Durch den Einsatz von Recycling-Gesteinskörnung
 - werden die natürlichen Kiesressourcen geschont und die damit verbundene Inanspruchnahme von Land reduziert
 - wird das zu deponierende Abfallvolumen vermindert und dadurch die Umwelt entlastet.
- 2) Die Umweltbelastungen aus der Verbrennung fossiler Energieträger bzw. der Zementherstellung (hier: verschiedene Luftemissionen und der Verbrauch energetischer Ressourcen): Hier trägt der Einsatz von Recycling-Gesteinskörnung nur zu einem geringen Teil zur Gesamtbelastung in der Prozesskette der Betonherstellung bei, und der Ersatz von natürlicher Gesteinskörnung durch Recycling-Gesteinskörnung führt zu keinem erkennbaren Unterschied in diesen Wirkungen. Vielmehr beeinflussen die Wahl des Zementes (Zementgehalt und Zementart), die Klinkerherstellung sowie die Transportaufwendungen die Ergebnisse der Wirkungskategorie „Treibhauseffekt“ deutlich.

Die Ergebnisse der Studie verdeutlichen, dass der Zement, insbesondere der Klinkergehalt den grössten Einfluss auf die Ökobilanz der Betonherstellung hat. So bietet neben dem vermehrten Einsatz von Sekundärbrennstoffen die Reduktion des Klinkerfaktors das grösste Verbesserungspotential zur Verminderung der Umweltbelastungen in der Prozesskette der Betonherstellung.

Umweltproduktinformationen zu ausgewählten Zementen erarbeitete der Verband der Schweizerischen Zementindustrie (Cemsuisse) in diesem Jahr für die Zementarten CEM I, CEM II/A, CEM II/B und einen Durchschnittszement. Diese Zementdaten basieren auf einem nationalen Durchschnittsklinker, welcher die branchenbezogene Klinkerproduktion in der Schweiz abbildet, und auf den jährlichen Marktanteilen der unterschiedlichen Zementarten beruht.

Zusammenfassung

Die Wiederverwertung von Altbeton ist aufgrund der großen und auch weiterhin steigenden Mengen besonders wichtig für die Umsetzung des Kreislaufwirtschaftsgedankens. Daher wurde sowohl in Deutschland und der Schweiz als auch in anderen Industrienationen schon vor einigen Jahren damit begonnen die Anwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen und RC-Betonen durch normative und regulierende Vorgaben abzusichern. Mittlerweile sind die Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen auch europaweit normativ festgelegt.

Das Bestreben nach ressourceneffizientem Umgang mit Gesteinskörnungen zur Schonung natürlicher Kieslagerstätten ist erst seit einigen Jahren ins öffentliche Bewusstsein getreten. Der Prozess zur Formulierung der Anforderungen an einen umwelt- und ressourcenschonenden Umgang mit Produkten und Systemen ist daher noch nicht abgeschlossen. Das Instrument der Ökobilanzierung zur Bewertung von Umweltwirkungen ist demgegenüber schon etabliert und es liegen im Bereich des Betonrecycling schon verschiedene Ergebnisse vor, die eine ökologische Bewertung des Einsatzes von RC-Gesteinskörnungen und RC-Betonen ermöglichen.

Auch die hier vorgestellten Ergebnisse einer deutschen und einer schweizer Studie bestätigen, dass das Recycling von Beton ökologisch vorteilhaft sein kann. Dabei steht die Reduzierung des Kiesverbrauchs bzw. des Flächenverbrauchs als Beitrag zur Ressourcenschonung im Vordergrund. Der Verbrauch von Energie bzw. der Ausstoß von klimarelevanten Emissionen ist bei der Herstellung von RC-Beton von untergeordneter Bedeutung, da diese Umweltwirkung weniger von den eingesetzten Gesteinskörnungen, sondern vor allem von der Zementherstellung dominiert wird. Grundsätzlich kann der Einsatz von RC-Beton einen Beitrag zum ressourcenschonenden Bauen leisten, jedoch müssen bei der Bewertung die jeweiligen Randbedingungen, wie z.B. Transportentfernungskilometer berücksichtigt werden.

Quellen

- 1 Graubner, C.-A., *Nachhaltigkeitsbeurteilung baulicher Lösungen aus Beton - Projekt A*, (2007). in *Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens "Nachhaltig Bauen mit Beton"* Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Editor. Beuth-Verlag: Berlin. 340 Seiten.
- 2 Hansen, T.C., *Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945-1985*. (1986). *Materials and Structures / Materiaux et Constructions*, 18: S. 201-246.
- 3 Grübl, P. und Rühl, M., *Der Einfluß von Recyclingzuschlagen aus Bauschutt auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften und die*

- Bewertung hinsichtlich der Eignung für Baustellen- und Transportbeton nach DIN 1045.* (1998). 09/98 TP E03: 7 Seiten.
- 4 Topcu, I.B., *Properties of concretes produced with waste concrete aggregate.* (2004). Cement and Concrete Research, 34: S. 1307-1312.
 - 5 Müller, A. *Chancen und Grenzen des Betonrecyclings - ein Überblick* (2012). in *18. Ibausil, 12.-15.09.2012*. Weimar. 33 Seiten.
 - 6 Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, *DAfStb-Richtlinie "Beton mit rezykliertem Zuschlag" Teil 1 und Teil 2.* (1998). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Bonn.
 - 7 Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, *DAfStb-Richtlinie "Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100" Teil 1.* (2003). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Berlin.
 - 8 Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, *DAfStb-Richtlinie "Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100".* (2004). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Berlin. 5 Seiten.
 - 9 DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 4226-1, Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel, Teil 1: Normale und schwere Gesteinskörnungen.* (2001). Beuth-Verlag: Berlin. S. 118-151.
 - 10 DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 4226-100, Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel, Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen.* (2002). Beuth-Verlag: Berlin. S.205-233.
 - 11 DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 4226-2, Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel, Teil 2: Leichte Gesteinskörnungen (Leichtzuschläge).* (2002). Beuth-Verlag: Berlin. S. 165-183.
 - 12 DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 12 620 Gesteinskörnungen für Beton; Deutsche Fassung EN 12620:2002+A1:2008.* (2008). Beuth Verlag: Berlin. 58 Seiten.
 - 13 Flasbarth, J., *Rohstoffeffizienz: Wirtschaft entlasten, Umwelt schonen,* (2012). in *Jahrbuch Ökologie 2012*. Hrsg. Leitschuh, H., Michelsen, G., Simonis, U. E., Sommer, J., Weizsäcker, E. U. v. S. 49-55.
 - 14 *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgResS).* (2012). Kabinettsbeschluss vom 29.02.2012, Editor. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. 124 Seiten.
 - 15 Müller, A., Schnellert, T., und Kehr, K., *Gips im Griff - Gipsbestandteile in Betonrezyklaten - Herkunft, Auswirkungen und Abtrennung mittels Setztechnik. Teil 1.* (2010). AT Technical Solutions, 51 (6): S. 34-43.
 - 16 Weimann, K., et al., *Optimierung des Rückbaus/Abbruchs von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung.* (2012). UFOPLAN: FKZ 3709 33 317: 225 Seiten.

- 17 ifu. *Umberto*. [Internet] (2010); Website: <http://www.umberto.de/de/>.
- 18 Ecoinvent, *The Life Cycle Inventory Data v 2.2*. (2010). in *Ecoinvent v2.2*, Althaus et al., Editor. Swiss Centre for Life Cycle Inventories: St. Gallen.
- 19 Holcim (Schweiz) AG, *Forschungsbericht "Ökobilanzen rezyklierter Gesteinskörnung für Beton"*. (2010). ISBN 978-3-9523727-0-8.