

Zum Einsatz von Recyclingbeton in tragenden Fertigteilen

Recycling-Beton (R-Beton) wird in Deutschland noch immer nur in geringem Umfang für tragende Bauteile realisiert, obwohl normative Grundlagen existieren und ökologische Anreize gegeben sind. Auch Betonfertigteilwerke haben bislang ihr Produktsortiment noch nicht auf dieses Portfolio angepasst. Entsprechend zeigt dieser Beitrag einen Überblick über die Herausforderungen, die von Betonfertigteilwerken bei der Umsetzung von R-Beton zu meistern sind und beschreibt, wie Recycling-Beton für tragende Betonfertigteile einzusetzen ist.

Kurze Hinweise zur Marktentwicklung

Schon im Jahre 2000 wurde von dem Künstler Friedensreich Hundertwasser mit der „Waldspirale“ in Darmstadt ein vielversprechendes Gebäude mit R-Beton erstellt, wenn auch noch mit einem verhältnismäßig geringen Anteil an recycelter Gesteinskörnung. Weitere Projekte in den folgenden Jahren (Quelle u. a.: www.rc-beton.de) wiesen, bis auf wenige Ausnahmen, ein Volumen unter 1.000 m³ auf, was den Anteil von R-Beton in Deutschland nicht spürbar steigen ließ.

Die folgenden größeren Projekte sind inzwischen publik geworden:

- 2016: Forschungs- und Laborgebäude Humboldt Universität in Berlin
- 2017: Kreishaus in Ludwigsburg (Beton- und Stahlbeton)
- 2018: Leonardo-da-Vinci-Gymnasium in Berlin-Buckow
- 2018: Technisches Rathaus in Tübingen

Diese Zurückhaltung in Sachen R-Beton ist in unseren Nachbarländern so nicht anzutreffen. Dort ist die Bekanntheit des Materials und das Vertrauen deutlich ausgeprägter. In der Schweiz etwa wird der Einsatz von Recyclingbeton gar nicht mehr gesondert gekennzeichnet. Ein Anteil von mindestens 15% bei öffentlichen Baumaßnahmen soll einen Beitrag dazu leisten, dass Recyclingbetone auch mit Mauerwerksbruch im Hochbau eingesetzt werden.

Aktuelle Fördermaßnahmen, z. B. das EU-Projekt „Secondary Raw Materials for Concrete Precast Products“ (SeRaMCo),



Bild 1 Mobile Brechanlage

setzen hier an und bieten im internationalen Austausch eine Wissensplattform mit dem Ziel, weitere Pilotprojekte auszuführen. Das SySpro-Mitglied Beton-Betz ist Hauptpartner in SeRaMCo mit dem derzeitigen Fokus, die erforderlichen Baugenehmigungen für tragende Bauteile zu erhalten.

Brechtechnik

In dem Projekt SeRaMCo ist Best Practice ein wesentlicher Punkt. So widmete sich Beton-Betz im ersten Schritt den eigenen Betonresten, die im Produktionsprozess anfallen bzw. sich aus Fehlbestellungen ergeben. Über Jahre gesammelt, kamen hier über 2.000 t zustande, was nach der Rückführung über 2.000 m³ R-Beton bzw. 100 Betonkeller ergeben kann. Eine Herausforderung!

Für die praktische Anwendung wurde bei Beton-Betz über SeRaMCo entsprechendes Know-how gesammelt. Der erste Fokus galt der Brechtechnik. Vorgaben für schonende Vorgänge und wirtschaftliche Abläufe wurden von SeRaMCo adaptiert und bei der Vergabe der Brecharbeiten zugrunde gelegt. Betonreste aus der eigenen Produktion können demnach mit einem mobilen Backenbrecher und einer Aufbereitungsanlage mit drei Decks für die Fraktionen 0/2, 3/16 und 17/50 mm einer Wiederverwendung zugeführt werden. Die so gewonnenen Sand- und Kornfraktionen lagern auf dem Betriebsgelände und können in den Produktionsprozess eingegliedert werden. (Bild 1)

Eine wesentliche Hürde beim Brechen sind Staub und Lärm; daher ist mit der Überwachungsbehörde (für Industrieanlagen nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz) eine entsprechend frühzeitige Abstimmung zwingend. Immerhin dauert der Vorgang etwa zwei Wochen inklusive des Vorbrechens und der Extraktion der Stahlteile mit ca. 30 t/Stunde, also deutlicher langsamer als der Brechvorgang mit über 300 t/Stunde. Damit ist ersichtlich, dass – wie bekannt – der Aufwand nicht unwirtschaftlich ist. (Bild 2)

Auch das reale Ergebnis überraschte nicht: Von den etwa 2.000 t Material ergaben sich etwa 50% an Brechsand, der, wie sich später herausstellte, sehr fein ausfiel und einen erhöhten Wasseranspruch erforderte und Einfluss auf andere Eigenschaften nahm.

Normative Anforderungen an den R-Beton

Die Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ gilt für



Bild 2 Einblick über die gewonnenen Kornfraktionen nach der Aufbereitung

Tab. 1 DAfStb 2010: zulässige Anteile rezyklierter Gesteinskörnung
Permissible proportions of recycled aggregate

	1	2	3	4
	Anwendungsbereich		Kategorie der Gesteinskörnung	
	Alkalirichtlinie	DIN EN 206-1 und DIN 1045-2	Typ 1	Typ 2
1	WO (trocken)	Karbonatisierung XC1	≤ 45	≤ 35
2	WF (feucht)	Kein Korrosionsrisiko X0 Karbonatisierung XC1 bis XC4		
3		Frostangriff ohne Taumittleinwirkung XF1 und XF3 und in Beton mit hohem Wassereindringungswiderstand	≤ 55	≤ 25
4		Chemischer Angriff (XA1)	≤ 25	≤ 25

Bild 3
Auszug aus der DAfStb-Richtlinie

die sortenreine Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen > 2 mm der Typen 1 und 2 zur Herstellung und Verarbeitung von Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 bis zu einer Druckfestigkeitsklasse von C30/37.

Der gewonnene Zuschlag kann in Typ 1 nach DAfStb-Richtlinie eingestuft werden: Typ 1 muss mindestens 90% Beton, Mörtel, Mauersteine aus Beton und max. 10% Mauerziegel, Kalksandsteine, Porenbeton enthalten. (Bild 3)

Nach DIN 1045-2 sind Gesteinskörnungen in Alkaliempfindlichkeits- und Feuchtigkeitsklassen einzuordnen. Im Anwendungsbereich der Klasse WF nach Alkalirichtlinie dürfen Betone bis Expositionsklasse XC4 und XF1 sowie auch Betone mit hohem Wassereindringungswiderstand nach DIN 1045-2, Abschnitt 5.5.3, verwendet werden.

Damit sind nach DAfStb-Richtlinie die üblichen Decken- und Wandbauteile des Wohn- und Gewerbebaus herstellbar, sofern der Anteil des Zuschlags auf 35 Vol.% beschränkt ist.

Dabei wird vorausgesetzt, dass die Herkunft der recycelten Gesteinskörnung bekannt ist. Anhand ihrer Herkunft kann die im Altbeton enthaltene Gesteinskörnung eindeutig einer unbedenklichen Alkaliempfindlichkeitsklasse zugeordnet werden. Der Hersteller muss gegenüber dem Verwender die hinsichtlich der Alkaliempfindlichkeitsklasse unbedenkliche Herkunft nachweisen

Betontechnologie

Neben der Brechtechnik spielt die Entwicklung der Betonrezeptur eine wesentliche Rolle. Auch hier kamen von den Experten der SeRaMCo-Partner entscheidende Hinweise.

Anhand der Laborstudien zeigten sich optimale Ergebnisse bis zu einer Beimischung von maximal 10% Brechsand zu den avisierten 35 Vol.% Brechkies, die auf der sicheren Seite liegend auf 30 Vol.% beschränkt wurden.

Die nun gefundene Rezeptur weicht also von den Möglichkeiten in derzeitigen deutschen Normen ab, insbesondere da Brechsand in der DAfStb-Richtlinie nicht vorgesehen ist.

a) Brechkies

Für die natürliche Gesteinskörnung ist grundlegend der Verwendungsnachweis von Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 gefordert, deren Konformität nach dem System 2+ nachgewiesen wurde unter Beachtung der Regelanforderungen nach

Tabelle U.1 aus DIN 1045-2: 2008-08 für alle verwendeten Korngruppen.

Neben der stofflichen Zusammensetzung sind somit nach Tabelle 2 in Abschnitt 5.8 von DIN EN 12620:2008-07 etwa 20 Eigenschaften zu überprüfen, z. B.:

- Kornform
- Muschelschalengehalt
- Feinanteile der groben Gesteinskörnung
- Schwankungsbreite der Kornrohddichte
- Frostbeanspruchung nach DIN 1367-1

Für die Kornrohddichte 2/16 wurde ein Wert von 2,36 kg/dm³ festgestellt, was unter dem natürlichen Material mit 2,56 kg/dm³ für Rheinkies 2/8 bzw. 2,64 kg/dm³ für 8/16 lag.

Die Frostprüfung an der Korngröße 8/16 mm als Hauptkriterium ergab einen Masseverlust von 2,54 Masse-% und entspricht somit der Klasse F4 nach DIN EN 12620 als Regelanforderung; für die Expositionsklasse XF3 ist die Klasse F2, also 2%, nicht ganz eingehalten. Für die natürliche Körnung wurde knapp 1 Masse-% bestimmt, also F1-Klasse.

b) Brechsand

Der Nachweis der Eigenschaften des Brechsands erfolgt analog zu DIN EN 12620 für feine Gesteinskörnungen. Für die Kornrohddichte wurde ein Wert von 2,30 kg/dm³ festgestellt, was ebenfalls unter dem natürlichen Material mit 2,63 kg/dm³ lag.

Für die Verwendung von Brechsand ist ferner der Nachweis zu erbringen, dass die Bemessung nach EC2 gegeben ist. Hierzu sind Verbundversuche vergleichend zwischen Normalbeton und R-Beton durchzuführen als Pull-out-Versuch an 20 cm-Würfeln nach RILEM (siehe Grafik).

Das Ergebnis der Prüfungen zeigt, dass die Verankerungs- bzw. Übergreifungslängen der Betonstäbe größer zu wählen sind als nach EC2. (Bild 4)

c) Beton

Die in der DAfStb-Richtlinie für Beton vorgesehenen Prüfungen bzw. Nachweise sind zusätzlich zu den in DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 genannten zu erbringen:

- Vorlage des Betonierkonzepts, insbesondere Ermittlung des erforderlichen Zugabewassers in Abhängigkeit von der Feuchte der Gesteinskörnung unter Berücksichtigung der Wasseraufnahme zur Einhaltung des angestrebten Wasserzementwerts

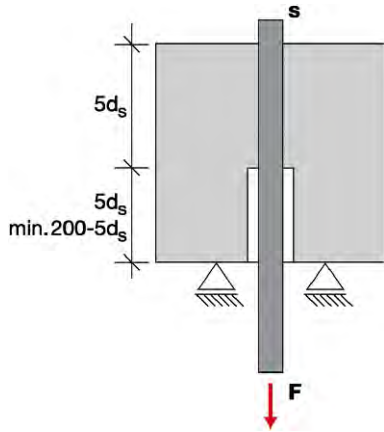


Bild 4
Aufbau der Verbundversuche

- Erweiterte Erstprüfung mit Veränderung der Konsistenz, Erhöhung des Konsistenzmaßes nach erstellter Dosiertabelle, Feuchtegehalt der Gesteinskörnung (Kernfeuchte und Oberflächenfeuchte)
- Produktionskontrolle je Produktionswoche bezüglich Kornrohdichte, Wassergehalt, Wasseraufnahme, Luftgehalt und Festigkeit

Folgende weitere Prüfungen wurden von Gutachterseite im Rahmen der erweiterten Erstprüfung empfohlen:

- Spaltzugfestigkeit nach DIN EN 12390-6
- Elastizitätsmodul nach DIN EN 12390-13
- Betonproben zum Nachweis des Frostwiderstandes der rezyklierten Körnungen
- Wassereindringtiefe nach DIN EN 12390-8

Wichtige Eigenschaften des R-Betons nach DAfStb-Richtlinie entsprechen im Wesentlichen denen von Normalbeton. Wird Brechsand zusätzlich verwendet, dann erfordert die Verarbeitbarkeit einen erhöhten Zementanteil. Schon bei geringem Anteil von Brechsand weichen die Betoneigenschaften von den normativen Zahlenwerten ab, insbesondere der Elastizitätsmodul sowie Kriech- und Schwindeffekte.

Folgende Tendenz wurde beispielweise für die 3-Tage-Festigkeit (wichtig für Fertigteilwerke) für C25/30 erkannt:

- Nullbeton (w/z=0,58, 280 kg Zement): $\beta_{c,cube,3d} = 34,5$ MPa (Dieser Wert ergab sich knapp auch für R-Beton mit 30% R-Kies)
- R-Beton mit zusätzlich 10% R-Sand (w/z=0,60, 310 kg Zement): $\beta_{c,cube,3d} = 21,2$ MPa

Bei Reduktion des Brechsandes auf einen Anteil von 5% ergab sich eine 3-Tage-Festigkeit, die nur 10% unter der Festigkeit des Nullbetons lag. Die 28 Tage Festigkeit lag dann bei 40,1 MPa und war damit auch nur knapp 10% unter dem Nullbeton mit 44,5 MPa.

Für die Wassereindringtiefe ergab sich ein Maximalwert von 18 mm für den R-Beton, was um etwa 15% niedriger ist als der Nullbeton und mit den erhöhten Feinanteilen in Verbindung steht.

Der E-Modul reduziert sich von 32.000 MPa für den Nullbeton auf 29.100 MPa. Nach EC2 beträgt der Rechenwert $E_{cm} = 31.000$ MPa; der Nullbeton erreicht somit knapp die Festigkeitsklasse C30/37 mit $E_{cm} = 33.000$ MPa, wobei der R-Beton als C16/20 einzuordnen ist.



Bild 5 Verunreinigung des Brechkies

Der Tragwerksplaner hat diesen Einfluss zu berücksichtigen. In diesem Fall kann es zu größeren Werten bei der Schalungsüberhöhung kommen. Längere Einschulfristen oder eine angepasste Nachbehandlung werden aber in der Regel nicht erforderlich.

Um Schwindeinflüsse an den Betonoberflächen aufzuzeigen, wurden im Herbst 2017 kleinformatige Deckenbauteile aus Recycling-Beton (30% Brechkies und 10% Brechsand) hergestellt und auf dem Lagerplatz von Beton-Betz bewittert. Nach dem zweiten Winter zeigten sich an der Deckenunterseite keine signifikanten Unterschiede zu Normalbeton.

Eine wichtige Aufgabe für die zukünftige Serienproduktion ist allerdings die Kontrolle der Untersichten hinsichtlich der Reste von Bindedrähten, die analog der geschredderten E-Rohre und Abstandhalter und anderen Einbauteilen beim Rütteln nach oben aufschwimmen sollten. Das Bild 5 zeigt die Spitze eines schwarzen Kunststoffnagels.

Das Kriechverhalten wurde ebenfalls anhand von Deckenbauteilen untersucht als Vergleich mit 18 cm dicken Hohldecken (gefertigt als Doppelwand mit 7 cm Schalen ohne Kernbeton) in C25/30 und R-Beton 30% Brechkies plus 10% Brechsand. (Bild 6)

Anhand von Stahlcoils konnten verschiedene Lastszenarien aufgebracht werden. Letztlich startete im April 2019 ein Dauerstand mit 5 kN Auflast in Deckenmitte. Infolge dieser Dauerlast wurde eine Stahlspannung von 250 MPa erzeugt, also etwa Vollastniveau erreicht. Die rechnerische Betonspannung lag bei 8 MPa.

Aufgrund des niedrigeren E-Moduls und der geringeren Zugfestigkeit lag die anfängliche Durchbiegung bei 22 mm und damit deutlich über Normalbeton mit 12 mm. Nach 15 Wochen hatten sich die Verformungen für beide Betone fast genau verdoppelt. (Bild 7)



Bild 6 Prüfung zum Kriechverhalten: Versuchsaufbau als Einfeldträger auf Kanthölzern mit 5,40 m Spannweite



Bild 7 Prüfung zum Kriechverhalten: die in Feldmitte gemessene Durchbiegung nach 7 Wochen Dauerlast von 5 kN.

Ein unterschiedlicher Kriecheinfluss ist somit nicht zu erkennen. Jedoch muss der Tragwerksplaner die Durchbiegung gemäß EC2 nach Zustand II für die aktuellen Materialeigenschaften ermitteln.

Bauaufsichtliche Zulassung

Die zuständige Baubehörde hatte zusätzlich zu den üblichen Dokumenten wie Ausführungsplänen und Statik auch Gutachten über die Betontechnologie und die Bemessung nach EC2 gefordert. Es sollen Außen- und Innenwände mit 20 cm Dicke und 18 cm dicke Decken zum Einsatz kommen.

Bauteile aus Beton, die unter Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen nach der DAfStb-Richtlinie hergestellt werden, dürfen nach EC2 also DIN EN 1992-1-1 bemessen werden. Wesentlich sind die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit, die Konstruktionsregeln für die Verankerungslängen und die Beschränkung der Verformungen.

Für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit gemäß Abschnitt 6.1 von EC2 ergibt sich kein Unterschied zu Normalbeton, da hier die Festigkeitswerte maßgebend sind.

Die vergrößerten Verankerungslängen nach 9.2.1.4 und 9.2.15 von EC2 betreffen die Decken, da die Wände als unbewehrt bzw. gering bewehrt nach Abschnitt 12.6.5.2 zu betrachten sind.

Die Beschränkung der Verformungen betrifft die Decken (Verformung mit direkter Berechnung nach Abschnitt 7.4.3 der Norm). Die Nachrechnung des Bauteilversuches zeigt eine gute Übereinstimmung mit diesem Rechenverfahren. Wesentlich für die Durchbiegung ist demnach ein Verteilungsbeiwert nach Gleichung 7.19 von EC2, der die gerissenen und ungerissenen Teilbereiche des Bauteils beschreibt.

Zusätzlich bedarf die Bemessung des Bauzustandes in Sonderfällen eine besondere Aufmerksamkeit. Im Bauzustand spielt bei größeren (ab 12 mm) Gitterträgerobergurten der Elementdecken die Durchbiegung ebenfalls eine Rolle. Die Durchbiegung ist nach Zulassung auf 1 cm begrenzt, wobei hier der E-Modul des jungen Betons eingeht. Auf der sicheren Seite liegend wird, bis entsprechend genaue Zulassungsversuche vorliegen, die Montagestützweite um 20% reduziert. (Bild 8)

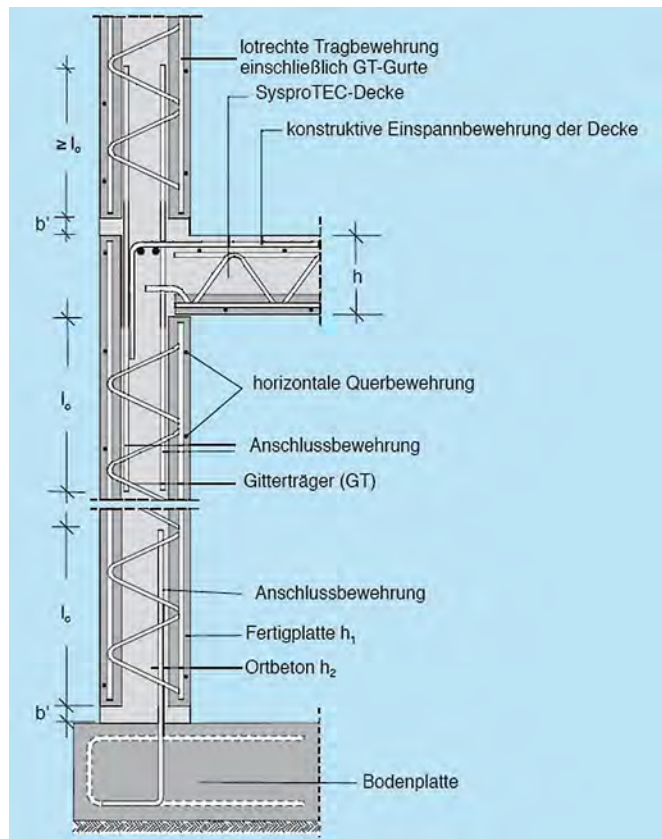


Bild 8 Schnitt durch die Konstruktion des Referenzprojektes mit Elementdecke und Doppelwand

Fazit

Mit der Vorbereitung eines Referenzprojekts wurde gezeigt, dass es den Betonfertigteilwerken keinen besonders hohen Aufwand abverlangt, auch tragende Bauteile in R-Beton auszuführen. Entscheidend ist, die bauaufsichtliche Zustimmung frühzeitig einzuholen, um dem Aufwand der Güteüberwachung rechtzeitig begegnen zu können.

Nach weiteren Referenzprojekten und Aussagen über die Gebrauchstauglichkeit kann in einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung ein zugeschräftes Überwachungsprozedere verankert werden, sodass die Wirtschaftlichkeit der zusätzlichen Aufwendungen eingefangen wird. Dabei können auch ökologische Aspekte von innovativen Betonrezepturen für den Zementersatz integriert werden, da ohnehin die R-Betonherstellung mit besonderen Aspekten verbunden ist.

Unter Einhaltung der oben genannten Randbedingungen muss in der Planungsphase die Festlegung auf R-Beton nicht frühzeitig erfolgen. Es bleibt genügend Zeit, die Beteiligten auf die Randbedingungen hinzuweisen. Die Kosten dürften sich jetzt schon nicht deutlich über denen von Normalbeton bewegen. Selbst bei erhöhten Kosten liegen die ökologischen Vorteile auf der Hand. Neben der Schonung von Kieslagern sowie der Deponiekapazitäten reduzieren sich die Transportwege.

*Dr.-Ing. Herbert Kahmer,
Alexandra Busch Dipl.-Ing. Architektur*

www.syspro.de

Fotos/Abb.: Beton-Betz/Syspro