Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt

Berlin

Dokumentation zum Einsatz von ressourcenschonendem Beton

beim „Neubau des Forschungs- und Laborgebäudes für Lebenswissenschaften der Humboldt-Universität zu Berlin“ in Berlin-Mitte

Berlin, März 2015

Impressum

Herausgeber:

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Referat Abfallwirtschaft
Brückenstr. 6
10179 Berlin

http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/abfall/index.shtml

Inhaltliche Konzeption / Koordination:
Heidelinde Mehner
Thomas Schwilling

Externe wissenschaftliche Bearbeitung:
Brandenburgische Technische Universität Cottbus – Senftenberg
Fakultät Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik
PD Dr.-Ing. habil. Angelika Mettke
Fachgruppe Bauliches Recycling
Siemens-Halske-Ring 8
03046 Cottbus

eMail: mettke@b-tu.de

Tel.: 0355 / 69 22 70
Fax: 0355 / 69 31 71

Mitarbeit:
Dipl.-Ing. Stephanie Schmidt
Steffen Jacob B.Sc.

Titelfoto:
Steffen Jacob

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung 5

2 Anlass 8

3 Aufgabenstellung / Zielsetzung 9

4 Normative Grundlagen, Regelwerke 10

5 Erster Bauabschnitt – Errichtung der Trogbaugrube / Schlitzwand 15

5.1 Spezifische Anforderungen an die Betoneigenschaften mit RC-Gesteinskörnungen 15

5.2 Untersuchungsergebnisse und Bewertung der RC-Gesteinskörnung 17

5.3 Untersuchungsergebnisse und Bewertung des RC-Betons 20

5.4 Einbau RC-Beton zur Herstellung der Schlitzwand 24

5.5 Bewertung 25

6 Zweiter Bauabschnitt – Errichtung des Tragwerks für den Hochbau 26

6.1 Spezifische Anforderungen an die Betoneigenschaften mit RC-Gesteinskörnungen 26

6.2 Untersuchungsergebnisse und Bewertung der RC-Gesteinskörnung 27

6.3 Untersuchungsergebnisse und Bewertung des RC-Betons 30

6.4 Bewertung 33

7 Kostenbetrachtung RC-Beton im Vergleich zum Primärbeton 34

8 Ökobilanzielle Betrachtung und Stoffflussdiagramm 37

8.1 Stoffflussbetrachtung – Herstellung der RC-Gesteinskörnung 38

8.2 Energetische Aufwendungen für die Bereitstellung der RC-GK im Vergleich zur Kiesgewinnung 43

8.3 CO_2-Emissionen für die Bereitstellung der untersuchten Gesteinskörnungen 46

8.4 Synopse der energetischen Aufwendungen von RC-Beton und Primärbeton 48

8.5 Synopse von RC-Beton gegenüber Primärbeton 51

8.6 Flächeninanspruchnahme 53

9 Empfehlungen für den Einsatz von RC-Beton im Hochbau 55

10 Abbildungsverzeichnis 57

11 Tabellenverzeichnis 59

12 Abkürzungsverzeichnis 61

13 Literaturverzeichnis 62

1 Zusammenfassung

Erstmalig erfolgte im Land Berlin eine Ausschreibung von der öffentlichen Hand zum Bau einer Schlitzwand und eines Tragwerks unter Verwendung von ressourcenschonendem Beton, d.h. Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen (kurz RC-Beton). Es handelt sich hierbei um den Neubau des Forschungs- und Laborgebäudes für Lebenswissenschaften der Humboldt-Universität zu Berlin. Dieses „Pilotprojekt“ wurde von der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt ins Leben gerufen. Die Fachgruppe Bauliches Recycling der BTU Cottbus – Senftenberg wurde mit der wissenschaftlichen Begleitung der Baumaßnahme beauftragt.

In Vorbereitung der produktneutralen Ausschreibung wurden die beteiligten Akteure (Bauherr, Architekten, Tragwerksplaner, Anlagenbetreiber für RC-Gesteinskörnungen (RC-GK), Transportbetonproduzenten, Laboranten) über die rechtlichen Grundlagen, spezifischen Anforderungen und zu beachtenden Besonderheiten der Herstellung und der Eigenschaften der RC-Gesteinskörnungen und des RC-Beton informiert. In der Ausschreibung wurde für den RC-Betoneinsatz gegenüber der Primärbetonverwendung eine Umweltgutschrift bzw. ein monetärer Anreiz in Höhe von 10 €/t eingeräumt.

Die frühzeitige Kommunikation in der Planungsphase hat sich bewährt und zum gewünschten Ergebnis geführt, denn RC-Beton war bis zu diesem Zeitpunkt nicht im Lieferprogramm der Betonproduzenten im Land Berlin enthalten gewesen.

Die Betonhersteller benötigten zur Akquisition der RC-Gesteinskörnung, Entwicklung von neuen Betonrezepturen und für die erforderlichen Prüfungen einen zeitlichen Vorlauf vor Beginn der Baumaßnahme.

Die RC-GK-Lieferanten wiederum produzieren derzeit fast ausschließlich Körnungen für den Straßen- und Wegebau; also hauptsächlich Lieferkörnungen für Frostschutzschichten und Schottertragschichten in den Körnungen 0/45, 0/56, 0/63. Die stoffliche Zusammensetzung ist in der TL Gestein-StB 04 (Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau) oder durch Erlasse oder in länderspezifischen Vorgaben wie bspw. im Land Brandenburg nach BTR RC-StB geregelt. Die Körnungsabstufungen im Betonbau hingegen sind 0/2, 2/8, 8/16, 16/32. D.h., die herkömmliche Produktion der RC-GK für ungebundene Einsatzzwecke im Straßen-, Tief- und Erdbau war durch die Anschaffung / Installation von zusätzlichen Sieben entsprechend auf die Produktion von RC-GK für den Einsatz in Betonen umzustellen. Die Investitionen dafür sind jedoch überschaubar bzw. wirtschaftlich zumutbar.

Das Bauvorhaben wurde in die Bauabschnitte Schlitzwanderstellung und Hochbaumaßnahme unterteilt. Beide Bauabschnitte wurden unter Einsatz von Transportbeton mit rezyklierten

Gesteinskörnungen vom Liefertyp 1 unter anteiliger Verwendung der Lieferkörnung 8/16 mm errichtet. Die jeweils an der Bauausführung beteiligten Akteure (Produzent der rezyklierten Gesteinskörnung, Transportbetonproduzent, bauausführende Firma) sowie ausgewählte Eckdaten der Bauvorhaben, sind in nachfolgender Abb. 1-1 zusammenfassend dargestellt.

<table>
<tr><td colspan="2">Öffentlicher Bauherr
Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt
Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt | be Berlin
+
Wissenschaftliche Begleitung
btu Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg</td></tr>
<tr><td>1. Bauabschnitt - Schlitzwand

TRABET TRANSPORTBETON BERLIN
EUROVIA VINCI
KELLER FRANKI GRUNDBAU
ARGE BG HUB Lebenswissenschaften Berlin</td><td>2. Bauabschnitt - Tragwerk

HEIM CEMEX NB Nezaj Bau GmbH</td></tr>
<tr><td>1.700 m³ RC-Beton
Festigkeitsklasse C25/30
Expositionsklasse XA1, XC4
Substitutionsanteil Kies
25 Vol.-%
(≙ 392 kg RC-GK pro m³ RC-Beton;
insgesamt: ~ 667 Tonnen RC-GK 8/16)</td><td>3.800 m³ RC-Beton
Festigkeitsklasse C30/37
Expositionsklasse XC3
Substitutionsanteil Kies
40 Vol.-%
(≙ 576 kg RC-GK pro m³ RC-Beton;
insgesamt: ~ 2190 Tonnen RC-GK 8/16)</td></tr>
</table>

Abbildung 1-1: Gegenüberstellung beider Bauabschnitte hinsichtlich beteiligter Akteure und Materialeinsatz

Insgesamt konnte im Rahmen des Berliner „Pilotprojektes“ (erneut) der Nachweis erbracht werden, dass

- die Recycler in der Lage sind, eine qualitativ hochwertige rezyklierte Gesteinskörnung für den Einsatz im Beton zu produzieren und termingerecht zu liefern,
- die rezyklierte der natürlichen Gesteinskörnung qualitativ in keinem Punkt nachsteht,

- die Transportbetonproduzenten problemlos RC-Beton mit den geforderten Eigenschaften (Festigkeitsklasse, Konsistenz) nach normativen Vorgaben herstellen und liefern können und
- der RC-Beton beim Einbau genauso gehandhabt werden kann wie Primärbeton.

Wird RC-Beton kontinuierlich abgerufen, verringern sich die beim Berliner Pilotprojekt für den RC-Beton angefallenen Mehrkosten für einen erhöhten Prüfaufwand (vgl. Pkt. 7). Basierend auf den Erfahrungen aus Projekten u.a. in Ludwigshafen / Mannheim ist davon auszugehen, dass RC-Beton bei kontinuierlicher Nachfrage zu den gleichen Kosten wie Primärbeton hergestellt und geliefert werden kann.

Durch den erstmals in Berlin eingesetzten ressourcenschonenden Beton für die Herstellung der Schlitzwand der Trogbaugrube sowie für die Bauhauptarbeiten wurde ein nachhaltiger Beitrag für den Ressourcenschutz geleistet. So konnte eine Flächeninanspruchnahme durch Kiesabbau vermieden sowie eine Verringerung der Umweltbelastung durch Transport, insbesondere in Ballungsgebieten erreicht werden.

Durch den erfolgreichem Abschluss dieses Pilotprojekts strebt das Land Berlin perspektivisch an, bei allen öffentlichen Hochbauvorhaben – sofern normativ zugelassen - Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung einzusetzen.

2 Anlass

Die Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt hat für den Planungszeitraum 2010 bis 2020 erstmalig ein verbindliches Abfallwirtschaftskonzept (AWK) beschlossen.[1] Es enthält entscheidende Vorgaben, die Berliner Abfallwirtschaft in eine zukunftsorientierte Kreislaufwirtschaft weiterzuentwickeln. Diese Zielstellung soll u.a. durch eine hochwertige und klimaschonende Verwertung von Abfällen sowie durch die Verpflichtung im Ausschreibungs- und Vergabegesetz Berlin, Umweltschutzkriterien bei der Vergabe u.a. auch von Bauleistungen und -produkten anzuwenden, erreicht werden.

Im Abfallwirtschaftskonzept wird auch die hochwertige Verwertung von Recycling-Baustoffen (RC-Baustoffen) thematisiert. Im Land Berlin fallen jährlich rund 1 Mio. Tonnen Betonbruchmassen aus Hoch- und Tiefbaumaßnahmen an. Die daraus in RC-Anlagen hergestellten Betonsplitte sind am Markt stark nachgefragt und werden derzeit hauptsächlich im Straßen- und Erdbau eingesetzt. D.h. ein bedeutender Mengenanteil an RC-Gesteinskörnungen wird nicht adäquat, den ursprünglichen Materialanforderungen entsprechend, verwendet. Mit Blick auf das o.a. höherwertige Verwertungsziel strebt das Land Berlin jedoch an, zukünftig verstärkt Betonsplitte zur Herstellung von Beton einzusetzen. Diese sog. RC-Betone sollen in der Tragwerkskonstruktion bei Hochbauvorhaben - also als Konstruktionsbeton - verbaut werden, weil dadurch ein wichtiger Beitrag zur Steigerung der Ressourceneffizienz geleistet werden kann[2]. Genau hier setzen die begleitenden wissenschaftlichen Untersuchungen an: zum einen bedarf es der intensiven Aufnahme und Verarbeitung der Analysen und Erfahrungen, die vorbereitend und bei der praktischen Umsetzung gesammelt wurden und zum anderen sollen als Konsequenz aus dieser Bewertung der Einsatz von RC-Beton am Markt im Land Berlin platziert und Erkenntnisfortschritte aufgezeigt werden.

[1] Abfallwirtschaftskonzept für das Land Berlin - Planungszeitraum 2010 bis 2020 - nach Zustimmung des Abgeordnetenhauses vom 12. Mai 2011

[2] Akteursschreiben der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt „Zum Einsatz von RC-Beton in Hochbauvorhaben“ vom 03.12.2012

3 Aufgabenstellung / Zielsetzung

Die Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin hat die Fachgruppe Bauliches Recycling der BTU Cottbus – Senftenberg beauftragt, das „Pilotprojekt“ zum Einsatz von RC-Beton zum Bau des Forschungs- und Laborgebäudes für Lebenswissenschaften (HU) in Berlin-Mitte wissenschaftlich zu begleiten. Die Hochbaumaßnahme, der Bau des Forschungs- und Laborgebäudes, wird von einer technisch und technologisch bedingten Baugrubenumschließung - ausgeführt als Schlitzwand - flankiert. Sowohl die Tragwerkskonstruktion des Hochbaus als auch die Schlitzwand sind aus RC-Beton zu errichten. Zu bewerten ist die Qualität der RC-Betone im Vergleich zu Primärbetonen unter Einbeziehung der Aufbereitungs- und Betonherstellungsprozesse. Das Modellvorhaben dient in erster Linie dazu, vorhandene Vorbehalte gegenüber dem RC-Beton abzubauen resp. den Einsatz von RC-Betonen als innovative, hochwertige Verwertungsmaßnahme zu fördern. Auf der Grundlage des hier vorliegenden Berichtes sollen im Rahmen der Berliner Verwaltungsvorschrift „Beschaffung und Umwelt – VwVBU“[3] in einem „Leistungsblatt zum Einsatz von RC-Beton“ die Mindestanforderungen zur Gewinnung und Aufbereitung von Betonbruch sowie zum Einsatz von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen verbindlich geklärt werden, um zukünftig RC-Beton bei allen öffentlichen Bauvorhaben im Land Berlin zu etablieren.

Die Untersuchungen konzentrierten sich auf folgende Schwerpunktaufgaben:

- fachliche Unterstützung/Beratung der verantwortlichen Akteure (Vertreter des Bauherren, der Planer, Aufbereiter, Prüflabore, Betonproduzenten, Bauausführende) in Vorbereitung der Ausschreibung sowie zur Herstellung und zum Einsatz von Recyclingbeton inkl. zu logistischen Fragestellungen,
- Sichtung und Bewertung der Prüfprotokolle,
- stichprobenartige organoleptische Kontrolle der verwendeten RC-Gesteinskörnungen sowie der RC-Betone,
- kontinuierliche Vorortaufnahmen des Baufortschritts und Beurteilung des Einbaus / der Verarbeitbarkeit der RC-Betone,
- Darstellung der Stoffströme zur Herstellung der RC-Betone im Vergleich zu Primärbetonen; ökobilanzielle Betrachtungen,
- Bewertung der ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen für den Einsatz von RC-Beton.

[3]Vom Senat beschlossen am 23.10.2012, in Kraft getreten am 01.01.2013.

4 Normative Grundlagen, Regelwerke

Einen Überblick zu den europäischen Produktnormen in der deutschen Fassung und zu den mit geltenden deutschen Regelwerken zur Verwendung von RC-Gesteinskörnungen in Beton (RC-Beton) gibt Abb. 4-1.

Abbildung 4-1: Überblick zu europäischen Produktnormen / deutsche Fassung und zu den mitgeltenden deutschen Normen und Regelwerken zur Verwendung von RC-Gesteinskörnungen zur Herstellung von Beton [Mettke]

Regelwerke für RC-GK und RC-Beton (Stand 2013)

Europäische Produktnorm / Deutsche Fassung	**Mitgeltende deutsche Normen und Regelwerke**
Gesteinskörnungen für Beton	**Gesteinskörnungen für Beton**
EN 12620:2002+A1:2008 (D) **DIN EN 12620:2008-07** legt → Eigenschaften von GK fest, die durch Aufbereitung natürlicher, industriell hergestellter oder rezyklierter Materialien als Betonzuschlag gewonnen werden → QS-System zur WPK und für Konformitätsnachweis fest → für alle Betonsorten einschließlich Beton nach EN 206-1 und Straßenbeton, Betonfertigteile	**DIN 4226-100:2002-02** **Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel –** Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen *(bautechnische Anforderungen ersetzt durch DIN EN 12620:2008-07)* → Festlegung spezifischer baustofflicher und umweltverträglicher Anforderungen **DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktionen im Beton (Alkali-Reaktion)“, Teil 3,** Ausgabe 2007-02 + Berichtigungen April 2010 / April 2011 → derzeit erfolgt Notifizierung der neuen Richtlinie Ausgabe 2013
Beton	**Beton**
EN 206-1:2000-12 **DIN EN 206-1:2001-07** **+A1:2004 +A2:2005** Teil 1: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität	**DIN 1045-2:2008-08** **Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton** Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zur DIN EN 206-1 **DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“** Ausgabe 2010-09; Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN1045-1 nach DIN EN 1992-1-1

Gemäß der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb-Richtlinie) „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“[4] können klassifizierte rezyklierte/aufbereitete Gesteinskörnungen (RC-GK) zur Herstellung von RC-Beton bis zur Druckfestigkeitsklasse C30/37 verwendet werden. Für den Einsatz von RC-GK zur Herstellung von Leicht- und Spannbeton existieren keine Zulassungen. In Abhängigkeit der Expositionsklasse und der Feuchtigkeitsklasse des Betoneinbauortes (Klassifizierung der Umgebungsbedingungen für den Beton hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf eine schädigende

[4]DAfStb-Richtlinie (kurz: DAfStb-Rili) „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Ausgabe September 2010, Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1, Hrsg. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V.

Alkali-Kiesel-Säure-Reaktion nach Alkali-Richtlinie)[5] schwankt die zulässige Substitutionsrate der natürlichen Gesteinskörnungen (s. Tab. 4-1).

Tabelle 4-1: Übersicht zu den max. zulässigen Anteilen an RC-Gesteinskörnungen in Abhängigkeit der Anwendungsbereiche (Expositions- und Feuchtigkeitsklassen) des RC-Betons inkl. ausgewählter bautechnischer Regelanforderungen [Mettke]

Restriktionen	**Anwendungsbereich**		**DIN EN 12620**	
▪ **zulässige Anteile rezyklierter GK > 2 mm, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung (Vol.-%)** ▪ **bis C30/37** ▪ **keine Verwendung von rezyklierten GK für Spannbeton und Leichtbeton nach DIN 1045**	Alkali-Rili (Betonkorrosion infolge AKR)	DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 Expositionsklassen	Gesteins-körnungs**typ 1**	Gesteins-körnungs**typ 2**
	WO (trocken)	Karbonatisierung XC1	**≤ 45 Vol.-%**	**≤ 35 Vol.-%**
	WF [1)] (feucht)	kein Korrosionsrisiko X0 Karbonatisierung XC1 bis XC4		
		Frost ohne Taumitteleinwirkung XF 1 [1)] und XF3 [1)] und in Beton mit hohem Wassereindringwiderstand	**≤ 35 Vol.-%**	**≤ 25 Vol.-%**
		chemischer Widerstand (XA1)	**≤ 25 Vol.-%**	**≤ 25 Vol.-%**
	[1)] zusätzliche Anforderungen s. Abschnitt 1, (3) und (4) DAfStb-Rili hinsichtlich Nachweis einer unbedenklichen Alkalempfindlichkeitsklasse			
Regelanforderungen für rezyklierte GK nach DIN EN 12620	Kornrohdichte		**≥ 2.000 kg/m³**	
	Schwankungsbreite Kornrohdichte		**± 150 kg/m³**	
Wasseraufnahme nach 10´	höchstzulässige Wasseraufnahme nach 10 min		**10 M.-%**	**15 M.-%**
chemische Anforderungen	säurelösliches Chlorid		**≤ 0,04 M.-%**	
	säurelösliches Sulfat		**≤ 0,8 M.-%**	

Der Ausschluss der Verwendung von Brechsanden < 2 mm und die Begrenzung des Anteils der rezyklierten Gesteinskörnungen mit definierter Zusammensetzung (RC-Gesteinskörnungen der Liefertypen 1: Betonsplitt und 2: Bauwerksplitt (Tab. 4-2)) ermöglicht es, RC-Betone nach den Regeln für Primärbeton zu bemessen. Im Vergleich zum Primärbeton unterscheidet sich RC-Beton lediglich dahingehend, dass natürliche Gesteinskörnungen > 2mm (Kiese, Splitte) zu bestimmten Anteilen substituiert werden (Abb. 4-2).

[5]DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkali-Reaktion im Beton“, Ausgabe Februar 2007, Hrsg. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V.: Klassifizierung der Gesteinskörnung durch Alkaliempfindlichkeitsklassen

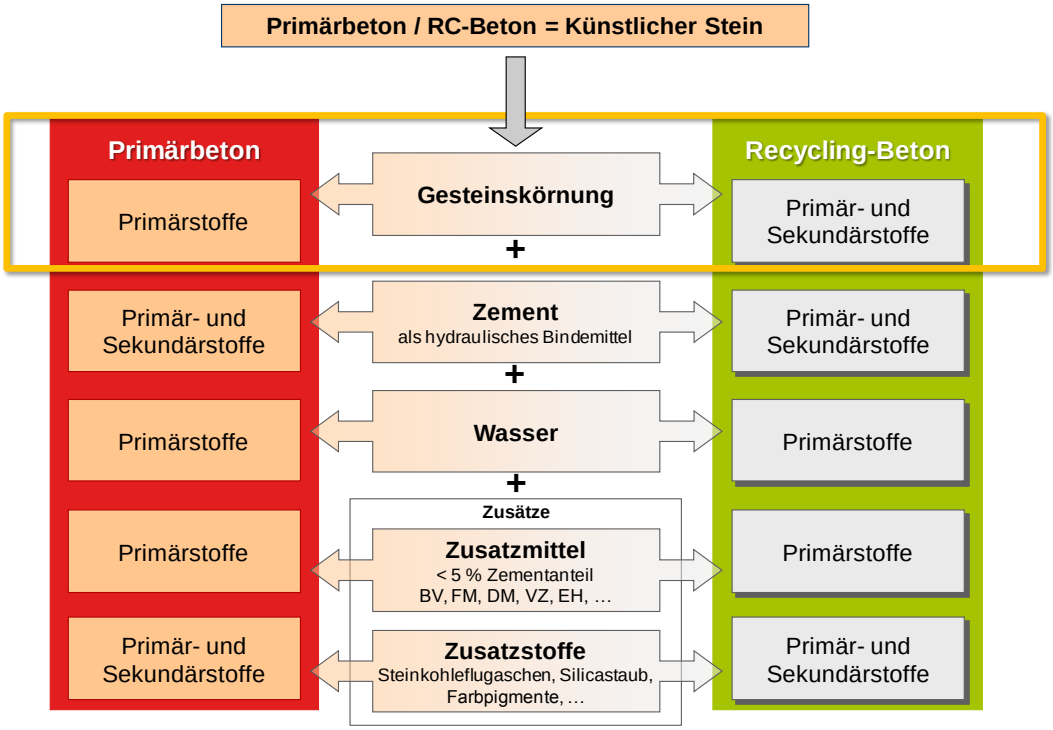

Abbildung 4-2: Synopse Zusammensetzung Primärbeton mit RC-Beton [Mettke]

Tabelle 4-2: Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung nach DIN EN 12620:2008-07, Abschnitt 5.8 [Mettke]

Rezyklierte GK > 2 mm

Typ 1: Betonsplitt | **Typ 2: Bauwerkssplitt**

RC-Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620:2008-07 Abschn. 5.8			
Bestandteile	**Beschreibung**	**Kategorie der Gesteinskörnung** Zusammensetzung Massenanteil [%]	
		Typ 1 (Betonsplitt)	**Typ 2** (Bauwerksplitt)
Rc + Ru	**Rc :** Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton **Ru :** ungebundenen Gesteinskörnungen, Naturstein, hydr. geb. GK	Rcu_{90} ≥ 90 M.-%	Rcu_{70} ≥ 70 M.-%
Rb	**Rb :** Mauerziegel (d.h. Mauersteine und Ziegel), Kalksandstein, nicht schwimmender Porenbeton	Rb_{10-} ≤ 10 M.-%	Rb_{30-} ≤ 30 M.-%
Ra	**Ra :** Bitumenhaltige Materialien	Ra_{1-} ≤ 1 M.-%	
X + Rg	**X :** sonst. Materialien: bindige Materialien (d.h. Ton und Boden), verschiedene sonst. Materialien: Metalle (Eisen- und Nichteisenmetalle), nicht schwimmendes Holz, Kunststoff und Gummi, Gips **Rg :** Glas	XRg_{1-} ≤ 1 M.-%	XRg_{2-} ≤ 2 M.-%
FL	**FL :** Schwimmendes Material im Volumen	FL_{2-} ≤ 2 cm³/kg	

Die harmonisierte technische Spezifikation DIN EN 12620:2008-07 legt die bautechnischen Eigenschaften von Gesteinskörnungen zur Herstellung von Beton fest und bildet die Grundlage

für die erforderliche CE-Kennzeichnung der Gesteinskörnungen. Darüber hinaus dürfen nach DAfStb-Rili nur rezyklierte Gesteinskörnungen verwendet werden, wenn diese keine umweltschädlichen Auswirkungen, insbesondere auf Grundwasser und Boden, haben. Mit der Bauregelliste A, Teil 1 des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBT), Ausgabe 2012/2 wurde bekannt gemacht, dass RC-Beton ein geregeltes Bauprodukt ist. Der Nachweis der Umweltunbedenklichkeit ist nach DIN 4226-100:2002-02, Anhang G zu erbringen. Zwischenzeitlich (dies betraf die Hochbaumaßnahme: den Neubau des Forschungs- und Laborgebäudes) erfolgte eine Änderung hinsichtlich des Nachweises zur Umweltverträglichkeit für rezyklierte Gesteinskörnungen in der Form, dass gemäß der Bauregelliste B, Teil 1 die Umweltverträglichkeit mit einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) oder einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) nachzuweisen ist. Diese Nachweispflicht ist mit einem zusätzlichen Aufwand an Arbeit, Kosten und Zeit verbunden und wird als hemmender Faktor für die Herstellung von RC-Beton gesehen. Daher muss diese Regelungslücke dringendst und schnellstmöglich geschlossen werden, um die hochwertige Verwendung von Rezyklaten zur Herstellung von Beton nicht massiv zu beeinträchtigen oder gar zu stoppen resp. die politischen Zielvorgaben zur Ressourceneffizienz nicht zu konterkarieren. Aktuell überarbeitet der DIN-Ausschuss die DIN 4226-100[6]. Der Zeitpunkt des voraussichtlichen Inkrafttretens kann jedoch nicht benannt werden. Daneben ist jedoch auch davon auszugehen, dass zukünftig auf europäischer Ebene die zu untersuchenden Parameter zur Umweltverträglichkeit der RC-GK vereinheitlicht werden (müssen) bspw. durch eine Erweiterung und Notifizierung der DIN EN 12620.

In Deutschland nimmt das Interesse und die Bereitschaft seitens der Bauherren im Allgemeinen zu, RC-Beton zu verbauen. Bauherren aus dem süddeutschen Raum sind besonders aktiv.[7] Allerdings schränkt die o.a. Regelungslücke zum Nachweis der Umweltverträglichkeit und der damit verbundene erhöhte Aufwand für den RC-Betoneinsatz das Engagement öffentlicher und privater Bauherren erheblich ein.

Die Schweiz hingegen hat bereits umfassend den Einsatz von RC-Beton im Hochbau unter Beweis gestellt. Die Substitution der natürlichen Gesteinskörnungen durch Beton- oder Mischabbruchgranulat erfolgt hier bis zu 100%. Im Rahmen einer Empa-Studie[8] (Schweiz) wurde nachgewiesen, dass die Auslaugungen von Magerbeton aus Primärmaterial im Vergleich zu RC-

[6]Um die Regelungslücke zu schließen ist u.a. die Auftragnehmerin aktiv geworden und unterstützt den DIN Ausschuss bei der Überarbeitung der DIN 4226-100 in der Form, dass gegenwärtig Auslaugversuche an Festbetonen unter Verwendung von RC-GK durchgeführt werden. Die Untersuchungsergebnisse werden Ende I. Quartal 2015 zur Verfügung stehen.

[7]Zahlreiche Informationen zum Einsatz von RC-Beton sind unter www.rc-beton.de sowie auf der Homepage des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg unter Publikationen abrufbar.

[8]Hoffmann, Cathleen; Figi, Renato; Blüm, Werner: Umweltrelevanz bei der Wiederverwendung von Bauabfällen, aus Recyclingbeton werden kaum Schadstoffe ausgewaschen, in: UMWELTPRAXIS NR.45/ Juli 2006

Magerbeton aus Betongranulat und RC-Magerbeton aus Mischgranulat vergleichbare Konzentrationen aufweisen. Analysiert wurden die umwelt- und humantoxisch relevanten Schwermetalle, ausgewählte Salze sowie einige organische Schadstoffe. Die Untersuchungen belegen zudem, dass die freigesetzten umweltrelevanten Schadstoffanteile im Rahmen der gesetzlich vorgegebenen Grenzwerte der Technischen Verordnung über Abfälle (TVA) der Schweiz liegen. Die Autoren der genannten Empa-Studie schlussfolgern für den qualitätsspezifisch höher eingestuften Konstruktionsbeton unter Einsatz von Recyclingmaterial eine Unterschreitung oder zumindest Bestätigung dieser Ergebnisse.

Bereits 1994 erschien die Empfehlung SIA 162/4 „Recyclingbeton“. Das SIA-Merkblatt 2030 „Recyclingbeton“, Ausgabe 2010[9], präzisiert die SIA 162/4 - Empfehlungen und regelt die Bemessung von RC-Beton. Durch die Schaffung dieser Grundlage wird die Anwendung von RC-Beton in der Schweiz weiter gefördert.

Die öffentlichen Bauherren bspw. im Kanton Zürich erlauben nur dann den Einsatz von Primärbeton, wenn nachweislich RC-Beton nicht die bautechnischen Anforderungen erfüllt.

[9]SIA-Merkblatt 2030 „Recyclingbeton“, 2010, Hrsg. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein

5 Erster Bauabschnitt – Errichtung der Trogbaugrube / Schlitzwand

Der 2013 und 2014 geplante Neubau des Forschungs- und Laborgebäudes Lebenswissenschaften der Humboldt-Universität erforderte aufgrund des anstehenden Grundwassers zunächst den Bau einer schwerwasserdurchlässigen Baugrube, bestehend aus einer Schlitzwand als vertikale sowie einer Düsenstrahlsohle als horizontale Baugrubensicherung. In nachstehender Tab. 5-1 sind die Eckdaten zur Schlitzwand aufgeführt.

Tabelle 5-1: Ausgewählte Daten zur Schlitzwand[10]

Parameter	Menge / Umfang
Schlitzwandfläche	ca. 2.600 m²
Länge	ca. 200 m
Tiefe	14 m
Breite	0,6 m
Betonierabschnitte	24 Stck.
Transportbetonmenge	1.700 m³

Im Vorfeld der Ausschreibung wurde die FG Bauliches Recycling beratend tätig und erläuterte die Rahmenbedingungen zum Einsatz von RC-Beton gegenüber den Vertretern des Bauherrn, der beauftragten Architekten und Tragwerksplaner. Um die beteiligten Akteure rechtzeitig auf die RC-Betonproduktion vorzubereiten, hat die Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt bereits im Dezember 2012 die Baustoff-Recyclingunternehmen und Betonproduzenten in Berlin mit einem Schreiben (sog. Akteursschreiben[11]), auf den geplanten Einsatz von RC-Beton vorbereitend hingewiesen. Danach wurden in Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber Vorortgespräche mit potenziellen RC-Gesteinsproduzenten und Transportbetonherstellern geführt, um bereits vor der Ausschreibung der Baumaßnahme die Liefersicherheit der RC-GK und des RC-Betons zu gewährleisten.

5.1 Spezifische Anforderungen an die Betoneigenschaften mit RC-Gesteinskörnungen

Gemäß den Ausschreibungsunterlagen[12] wurden für die Ausführung des Auftrags zur Herstellung der Schlitzwand folgende besondere Bedingungen definiert:

[10]Quellen: Auftragsbekanntmachung des Bauauftrages Schlitzwand vom 24.05.2013; Planungsunterlage: Amtlicher Lageplan, erstellt durch öffentlich bestellte Vermessungsingenieure Zech, Ruth; Planungsunterlage: Baugrubenstatik, Teil 1, Ingenieurservice Grundbau GmbH vom 06.09.2013

[11]Akteursschreiben der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt „Zum Einsatz von RC-Beton in Hochbauvorhaben“ vom 03.12.2012

[12]Auftragsbekanntmachung des Bauauftrages Schlitzwand vom 24.05.2013 durch die Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt

- „Der Einsatz von „Ortbeton mit rezyklierter Gesteinskörnung aus aufbereitetem Betonbruch nach DIN EN 12620 und DAfStb…“ wird aus ökonomischen und ökologischen Gründen gefordert“
- Z 1.2 nach LAGA,
- „Der Auftraggeber entscheidet sich mit Auftragsentscheidung, ob „Ortbeton mit rezyklierter Gesteinskörnung aus aufbereitetem Betonabbruch nach DIN EN 12620 und DAfStb…“ gegenüber „Ortbeton mit ausschließlich natürlicher Gesteinskörnung“ zur Ausführung kommt.“
- Für den RC-Betoneinsatz wird gegenüber der Primärbetonverwendung ein Bonus für Umweltvorteile (Nichtinanspruchnahme von Abbauflächen und Verringerung der Umweltbelastung durch Transporte) in Höhe von 10 €/t gewährt.

Die Anforderungen, die an die Zusammensetzung und die Eigenschaften des Schlitzwandbetons gestellt wurden, sind in Tabelle 5-2 wiedergegeben.

Mit der Ausführung der Schlitzwand wurde die FRANKI Grundbau GmbH & Co.KG beauftragt. Als Unterauftragnehmer der ARGE BG HUB Lebenswissenschaften Berlin - Keller Grundbau GmbH und Franki Grundbau GmbH & Co.KG ist für die Betonherstellung die Firma TRABET Transportbeton Berlin GmbH eingebunden worden. Der Betonproduzent hat für die Lieferung der RC-GK die Fa. EUROVIA Industrie GmbH betraut.

Aufgrund der beschränkten Lagerungskapazität für die Betonausgangsstoffe in der Transportbetonmischanlage der TRABET Transportbeton Berlin GmbH wurde entschieden, nur eine Körnungsgruppe, die RC-GK 8/16 zu verwenden. In der Transportbetonmischanlage Westhafen wurde die „Reserve-/Havariebox“ für die RC-GK 8/16 in Vorbereitung der Beschickung des Mischers genutzt.

Tabelle 5-2: Anforderungen an die Zusammensetzung und die Eigenschaften des Schlitzwandbetons[13,14]

Festlegungen (gemäß DIN EN 206-1:2001-07, DIN 1045-2:2008-08, Alkali-Rili)	**Expositionsklasse XC3** (mäßige Feuchte)	
	Feuchtigkeitsklasse W0 (Beton, der nach normaler Nachbehandlung nicht längere Zeit feucht und nach dem Austrocknen während der Nutzung weitgehend trocken bleibt)	
	Konsistenz F3 (Ausbreitmaß 420 – 480 mm) (für Transport- und Baustellenbeton müssen gemäß DIN EN 206-1:2001-07, Pkt. 4.2 Anforderungen an die Konsistenzklasse oder den Zielwert der Konsistenz festgelegt werden)	
Empfohlene Grenzwerte für die Zusammensetzung und Eigenschaften von Beton	**Maximaler w/z-Wert** (gemäß DIN EN 206-1:2001-07 , Tabelle F.1)	**0,55**
	Mindestdruckfestigkeitsklasse (gemäß DIN EN 206-1:2001-07, Tabelle F.1)	**C30/37**
	Mindestzementgehalt (gemäß DIN EN 206-1:2001-07, Tabelle F.1)	**280 kg/m³**

5.2 Untersuchungsergebnisse und Bewertung der RC-Gesteinskörnung

Das Untersuchungsergebnis der stofflichen Kennzeichnung der RC-Gesteinskörnung zeigt, dass die Sollwerte des Liefertyps 1 uneingeschränkt erfüllt werden (Tab. 5-3; Abb. 5-1).

Tabelle 5-3: Untersuchungsergebnis der stofflichen Kennzeichnung der RC-GK

Bestandteile	**SOLL** Kategorie der RC-Gesteinskörnung Zusammensetzung (M.-%) **Typ 1** Betonsplitt/Betonbrechsand	**IST** Zusammensetzung der RC-Gesteinskörnung [Massenanteil]	**Ergebnis Soll-Ist-Vergleich**
$R_c + R_u$	**Rcu_{90} (≥ 90 M.-%)**	94,5 M.-%	✓
R_b	**Rb_{10} (≤ 10 M.-%)**	4,4 M.-%	✓
R_a	**Ra_1 (≤ 1 M.-%)**	1 M.-%	✓
X + R_g	**XRg_1 (≤ 1 M.-%)**	0,1 M.-%	✓
FL	**FL_2 (≤ 2 cm³/kg)**	0,04 cm³/kg	✓
✓ Anforderung sicher erfüllt			

Die **Analyseergebnisse der geometrischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften** der RC-GK 8/16 sind in nachstehender Tab. 5-4 zusammengefasst.

[13]Mellwitz, Roland; Fuhrmann, Bert; Krüger, Elke: Recyclingbeton – Berliner Pilotprojekt zur Förderung einer abfallarmen Kreislaufwirtschaft“, in: Das bundesweite Baumagazin, Ausgabe Mai 2014, S.22, 23

[14]Zum Zeitpunkt der Schlitzwanderstellung galt die DIN EN 206-1, Ausgabe Juli 2001. Spezielle Anforderungen an den Schlitzwandbeton sind in der DIN EN 1538:2010-12 „Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Schlitzwände“ geregelt. In der DIN EN 1538:2010-12, Kap. 5.2 werden „besondere Anforderungen“ bei der Ausführung von Schlitzwänden definiert.

Tabelle 5-4: Bautechnische Untersuchungsergebnisse der RC-GK 8/16 mm [Bolab Analytik Ingenieurgesellschaft mbH, Prüfbericht Nr. 13 – 18180/2 vom 1.10.2013]

Parameter	Sollwert	Istwert	Ergebnis Soll- Ist-Vergleich
Korngrößenverteilung	G_C85/20	G_C85/20	✓
Gehalt an Feinanteilen [M.-%]	≤ 4	0,61	✓✓
Stoffliche Zusammensetzung	Liefertyp 1	Liefertyp 1	✓
Kornrohdichte [kg/m³]	≥ 2000	2270	✓
Wasseraufnahme (nach 10 min) [M.-%]	≤ 10	4,3	✓✓
Kornformkennzahl	≤ SI_{55}	SI_{15}	✓✓
Wasserlösliches Chlorid [M.-%]	≤ 0,15	0,011	✓✓
Säurelösliches Chlorid [M.-%]	≤ 0,04	0,023	✓
Wasserlösliches Sulfat [M.-%]	≤ 0,2	0,094	✓✓
Säurelösliches Sulfat [M.-%]	≤ 0,8	0,574	✓
Gehalt an Gesamtschwefel [M.-%]	≤ 1	0,2	✓✓
Gehalt an organischen Bestandteilen	max. gelbe Färbung	hellgelbe Färbung	✓
Alkaliempfindlichkeitsklasse	E III-S	**Anmerkung siehe u.a. Text**	

✓ Anforderung sicher erfüllt
✓✓ Anforderung weit unterschritten

Gemäß der DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton“ erfolgte die Einstufung der RC-GK in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S (bedenklich hinsichtlich der Alkalireaktion). Um das Potenzial einer schädigenden Alkali-Kieselsäure- Reaktion bei der Verwendung der RC-GK 8/16 auszuschließen, erfolgte in Übereinstimmung mit der DIN 1164-10 entsprechend der Alkalirichtlinie als vorbeugende Maßnahme die Verwendung eines NA-Zementes zur Herstellung des RC-Betons. (s. Tab. 5-6).

Die Bewertung der Inhaltsstoffe der RC-GK 8/16 hinsichtlich der **Umweltverträglichkeit** erfolgt prinzipiell nach DIN 4226-100, Anhang G[15]. Für das Berliner „Pilotprojekt“ wurden besondere Sicherheitsvorkehrungen getroffen und die einzuhaltenden Grenzwerte von Z 2 auf Z 1.2 der LAGA M20 verschärft. Die Ergebnisse sind Tab. 5-5 entnehmbar. Feststellbar ist, dass die analysierten Werte alle gestellten Anforderungen erfüllen.

[15]**Die in der DIN 4226-100 aufgeführten Prüfparameter und Orientierungswerte für die Eluat- und Feststoffmessungen entsprechen der LAGA M20; Z2-Einbauklasse.**

Tabelle 5-5: Ergebnisse der Bewertung der Umweltverträglichkeit [Bolab Analytik Ingenieurgesellschaft mbH, Prüfbericht Nr. 13 – 18180/2 vom 1.10.2013]

Parameter	Einheit	Höchstwert (nach Z 1.2 der LAGA M20)	Istwert	Ergebnisse
Eluat				
pH-Wert		12,5[a]	11,8	✓
elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	2500 [a]	1730	✓
Chlorid	mg/l	40	2	✓✓
Sulfat	mg/l	300	8,9	✓✓
Arsen	µg/l	40	< 10	✓
Blei	µg/l	100	< 10	✓✓
Cadmium	µg/l	5	< 0,5	✓✓
Chrom (gesamt)	µg/l	75	6	✓✓
Kupfer	µg/l	150	< 1	✓✓
Nickel	µg/l	100	< 2	✓✓
Quecksilber	µg/l	1	< 0,2	✓✓
Zink	µg/l	300	5	✓✓
Phenolindex	µg/l	50	< 10	✓✓
Feststoff				
Kohlenwasserstoffe	mg/kg	500[b]	< 20	✓✓
PAK nach EPA	mg/kg	15 (50)[c]	0,83	✓✓
EOX	mg/kg	5	< 0,5	✓✓
PCB	mg/kg	0,5	< 0,01	✓✓

[a] Kein Ausschlusskriterium
[b] Überschreitungen, die auf Asphaltanteile zurückzuführen sind, stellen kein Ausschlusskriterium dar.
[c] Im Einzelfall kann bis zu dem in Klammern genannten Wert abgewichen werden.
✓ zulässigen Höchstwert unterschritten
✓✓ zulässigen Höchstwert weit unterschritten

Ergebnis:

Abbildung 5-1: RC-GK 8/16 der EUROVIA Industrie GmbH, Liefertyp 1 [Schmidt, 04.11.2013]

Die im Rahmen der Erstprüfung **geprüfte stoffliche Zusammensetzung der RC-GK 8/16** (s. Abb. 5-1) belegt die Deklaration des **Liefertyps 1 (Betonsplitt).** Die Prüfung der baustofflichen, -technischen und chemischen Parameter wie auch die Parameter zur Umweltverträglichkeit der RC-GK 8/16 ergab, dass **alle gestellten Anforderungen sicher erfüllt werden.**

5.3 Untersuchungsergebnisse und Bewertung des RC-Betons

Die Stoffraumberechnung des **RC-Betons der Festigkeitsklasse C25/30 (Zielgröße) unter Verwendung der RC-GK 8/16 des Liefertyps 1** erfolgte durch die TRABET Transportbeton Berlin GmbH; die Rezeptur stellt sich wie folgt dar:

Tabelle 5-6: Betonrezeptur für den Schlitzwandbeton[16]

Bestandteil	Hersteller	Anteil
Sand 0/2 mm	Sand- und Kieswerk Parey	765 kg/m³ (45 Vol.-%)
Kies 2/8 mm	Kieswerk Rogätz GmbH	340 kg/m³ (20 Vol.-%)
Kies 8/16 mm	Kieswerk Rogätz GmbH	171 kg/m³ (10 Vol.-%)
RC-GK 8/16 mm	**EUROVIA Industrie GmbH, Schönerlinde**	**392 kg/m³ (25 Vol.-%)[17]**
CEM III/A 32,5 N-LH/NA	Zementwerk Bernburg SCHWENK Zement KG	325 kg/m³[18]
Flugasche	Kraftwerk Dolna Odra	80 kg/m³
Fließmittel Glenium Sky 693	BASF Admixtures Deutschland GmbH	2,11 kg/m³ (0,65 Vol.-% v. Zement)
Wasser		198 kg/m³

Die für den neuen Beton nach Eigenschaften durchzuführende erweiterte Erstprüfung umfasste die Erstprüfung nach DIN EN 206-1:2001-07 und DIN 1045-2:2008-08 sowie die unter DAfStb-Rili[19] aufgeführten Prüfungen der Konsistenz und die Bestimmung des Feuchtegehaltes der Gesteinskörnung. Diese Prüfung erfolgte durch die TBR Technologiezentrum GmbH & Co.KG. Nach den in den geltenden Regelwerken aufgeführten Prüfungen wurden drei Prüfkörper aus jeweils drei Chargen geprüft. Die ermittelten Durchschnittswerte sind in der Tab. 5-7 zusammengefasst.

Im Ergebnis der Untersuchungen wird festgestellt, dass die geprüften Parameter der Erstprüfung uneingeschränkt die Sollwerte nach DIN EN 206-1 erfüllen. Der RC-Beton entspricht den durch Tragwerksplaner und Normen geforderten Anforderungen.

Im Rahmen der **Konformitäts- und Produktionskontrolle** sind im Laufe der Produktion entsprechend der DIN EN 206-1 Probenahmen zur Überprüfung der Konformitätskriterien durchgeführt worden. Gemäß DIN EN 206-1, Tab. 17 wurden aus den ersten 50 m³ der Produktion

[16] Mischungsberechnungen vom 27.09.2013, erstellt durch den Prüfstellenleiter Dipl.-Ing. Krüger der TBR Technologiezentrum GmbH & Co.KG

[17] zul. Substitutionsanteil Anteil vgl. Tab. 4-1

[18] Entspricht den Vorgaben der Alkali-Richtlinie zur Verwendung von NA-Zementen als vorbeugende Maßnahme gegen schädigende Alkalireaktion (s. Pkt. 4.2)

[19] DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1, Ausgabe September 2010

drei Proben und im Anschluss eine Probe je 200 m³ entnommen. Diese Vorgehensweise ist bei der Erstherstellung von Beton solange vorgeschrieben, bis 35 Prüfergebnisse verfügbar sind. Danach reduziert sich die Prüfhäufigkeit auf eine Probe je 400 m³ Beton.

Während des Lieferzeitraumes sind insgesamt 63 Proben gezogen und geprüft worden. Folgende Mittelwerte wurden bestimmt:[20]

- Ausbreitmaß 640 mm (s. Abb.4-3)
- Luftporengehalt 1,4 Vol.-% (s. Abb.4-4 und 4-5)
- Frischbetonrohdichte 2.270 kg/m³ (s. Abb.4-2)
- Festbetonrohdichte 2.240 kg/m³
- Betondruckfestigkeit [56 d] 46,3 N/mm².

Somit wurde nachgewiesen, dass der RC-Beton zuverlässig die geforderten Eigenschaften (s. Tab. 5-2 und 5-7) erfüllt.

[20]Mellwitz, Roland; Fuhrmann, Bert; Krüger, Elke: Recyclingbeton – Berliner Pilotprojekt zur Förderung einer abfallarmen Kreislaufwirtschaft“, in: Das bundesweite Baumagazin, Ausgabe Mai 2014, S.22, 23

Tabelle 5-7: Geprüfte Parameter im Rahmen der erweiterten Erstprüfung [Mischungsberechnungen vom 27.09.2013, erstellt durch die Prüfstellenleiterin Frau Dipl.-Ing. Krüger der TBR Technologiezentrum GmbH & Co.KG]

	Parameter	Sollwert nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2	Istwert geprüft nach DIN EN 12350-1, DIN EN 12350-5, DIN EN 12390-3	Ergebnis Soll-Ist-Vergleich
Erstprüfung (gemäß DIN EN 206-1:2001-07 und DIN 1045-2:2008-08)	Prüfbedingung			
	Frischbeton-temperatur [°C]	15 - 22	**21**	✓
	Kriterien zur Annahme der Erstprüfung			
	Druckfestigkeit (nach 28 Tagen) [N/mm²]	$f_{cm} \geq f_{ck}+4$ (30 + 4)	**41,5**	✓
	Konsistenz (Ausbreitmaß) [mm]	F5 560 - 620	**erfüllt**	✓

	Parameter		Istwert geprüft nach DIN EN 12350-5 und DIN EN 1097-6
Prüfungen im Rahmen der erweiterten Erstprüfung (gemäß DAfStb-Rili)	Konsistenz (Ausbreitmaß) [mm]	nach 10‘	**630**
		nach 45‘	**590**
		nach 90‘	**530**
	Feuchtegehalt der Gesteinskörnung [%]	Kernfeuchte	**3,8**
		Oberflächenfeuchte	**3,8**

Ergebnis:

Die im Rahmen der erweiterten Erstprüfung nach DAfStb-Rili „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1“ **analysierten Parameter zur RC-Betonherstellung** in der geforderten Festigkeitsklasse **C 25/30** erfüllten alle gestellten Anforderungen. Eingesetzt wurde eine RC-GK 8/16 vom Liefertyp 1 zu 25 Vol-% bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung. Die **Qualität des RC-Betons entsprach uneingeschränkt einem Primärbeton.**

Abbildung 5-2: Herstellung eines Betonprüfkörpers zur Bestimmung der Frisch- und Festbetonrohdichte sowie der Druckfestigkeit [Mettke, 04.11.2013]

Abbildung 5-3: links: Bestimmung des Ausbreitmaßes im Betonwerk [Mettke, 04.11.2013] und rechts: Bestimmung des Ausbreitmaßes auf der Baustelle [Schmidt, 22.11.2013]

Abbildung 5-4: RC-Beton im Luftporentopf in Vorbereitung der Bestimmung des Luftporengehaltes [Mettke, 04.11.2013]

Abbildung 5-5: Bestimmung des Luftporengehaltes [Mettke, 04.11.2013]

5.4 Einbau RC-Beton zur Herstellung der Schlitzwand

Die Schlitzwand ist in 24 Betonierabschnitte resp. Einzelabschnitte jeweils mit einer Länge von 7 bis 10 m, 14 m tief, 0,60 m breit ausgeführt worden. Bis auf die Errichtung der Leitwand wurde die Schlitzwand aus RC-Beton hergestellt. Jeder Betonierabschnitt setzt sich aus drei Schlitzwandlamellen zusammen. Der Betoniervorgang eines Betonierabschnittes erfolgte gleichzeitig über drei separate Schütttrichter (s. Abb. 5-6) im Kontraktorverfahren. Je Betonierabschnitt wurden ca. 100 m³ Beton benötigt. Für den Bau der Schlitzwand wurden ~ 1.700 m³ Transportbeton verbaut.[21]

Abbildung 5-6: Betonage eines Schlitzwandabschnittes [Schmidt, 04.11.2013]

Auf der Baustelle wurden, entsprechend den Vorgaben aus DIN EN 206-1:2001-07, Anhang A, vor dem Einbau des RC-Betons von jeder Lieferung/jedem Betonfahrmischer das Ausbreitmaß von Mitarbeitern der ARGE BG HUB Lebenswissenschaften Berlin - Keller Grundbau GmbH und Franki Grundbau GmbH & Co.KG geprüft (s. Abb. 5-3 rechts). Der RC-Beton ließ sich einwandfrei einbauen. Die fertiggestellte Schlitzwand belegt die hervorragende Qualität des RC-Betons (s. Abb. 5-7).

Abbildung 5-7: Fertige Schlitzwand, [Mettke, 22.02.2014 und 05.03.2014]

<u>Ergebnis:</u> Der Einbau des RC-Betons erfolgte vorschriftsmäßig und qualitätsgerecht, der RC-Beton ist gegenüber dem Primärbeton absolut gleichwertig.

[21] Vgl. Mellwitz, Roland; Fuhrmann, Bert; Krüger, Elke: Recyclingbeton – Berliner Pilotprojekt zur Förderung einer abfallarmen Kreislaufwirtschaft“, in: Das bundesweite Baumagazin, Ausgabe Mai 2014, S. 22**,** 24

5.5 Bewertung

Die Schlitzwand aus RC-Beton wurde in 2013 erfolgreich und termingerecht errichtet. Die Fa. EUROVIA Industrie GmbH lieferte zuverlässig die RC-GK 8/16 in der geforderten Qualität (Liefertyp 1). Der von der Fa. TRABET Transportbeton Berlin GmbH entwickelte und produzierte **RC-Beton** (vgl. Abb. 5-8) erreichte **mit hoher Sicherheit** die geforderte Druckfestigkeit **C25/30** (s. Tab. 5-7). Zudem erfüllten alle **im Rahmen der erweiterten Erstprüfung geprüften Parameter die geforderten Qualitätskriterien.**

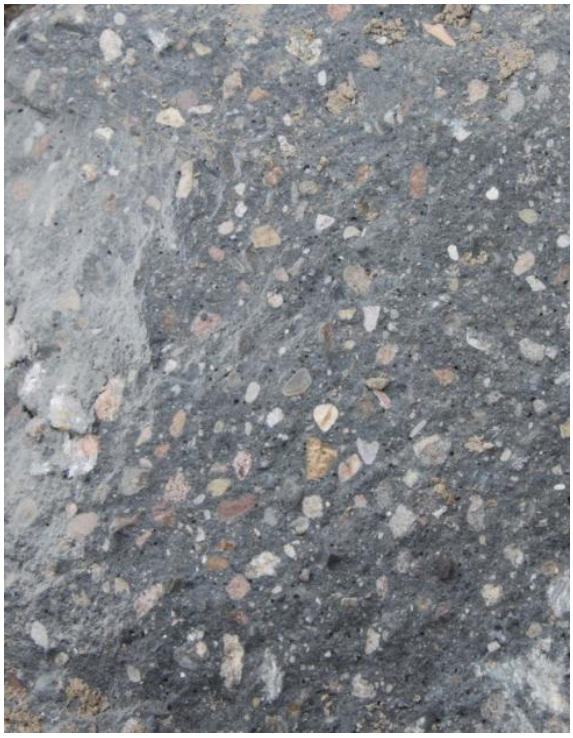

Abbildung 5-8: Aufgebrochener Schlitzwandbeton [Jacob, 25.07.2014]

Die ausgezeichneten Untersuchungsergebnisse sowie der reibungslose Ablauf bei der Herstellung und dem Einsatz der RC-Gesteinskörnung und des RC-Betons belegen, dass sowohl die Recycling- als auch die Betonindustrie in der Lage sind, qualitativ hochwertige Produkte unter Verwendung sekundärer Rohstoffe herzustellen.

Der eingesetzte **RC-Beton** weist - ohne Einschränkungen - **die gleichen Eigenschaften wie Primärbeton / konventioneller Transportbeton auf.** Selbst die **speziellen o.g. Anforderungen**, die an einen Schlitzwandbeton gestellt werden, wurden von dem RC-Beton **absolut verlässlich erfüllt**.

6 Zweiter Bauabschnitt – Errichtung des Tragwerks für den Hochbau

Analog zur Erstellung der Schlitzwand (s. Pkt. 5) ist auch die Errichtung des Tragwerks für den Hochbau unter vorzugsweiser Verwendung von RC-Beton ausgeschrieben worden. Die Grundsteinlegung der Baumaßnahme erfolgte am 8. April 2014, das Richtfest anlässlich der Fertigstellung des Rohbaus / der Tragwerkskonstruktion fand am 05. September 2014 statt.

6.1 Spezifische Anforderungen an die Betoneigenschaften mit RC-Gesteinskörnungen

Gemäß den Ausschreibungsunterlagen[22] wurden für die Ausführung des Auftrags folgende besondere Bedingungen - im Wesentlichen identisch mit dem RC-Beton für die Schlitzwand - definiert:

- „Der Einsatz von „Ortbeton mit rezyklierter Gesteinskörnung aus aufbereitetem Betonbruch nach DIN EN 12620 und DAfStb-Rili…“ wird aus ökonomischen und ökologischen Gründen gefordert“.
- Der Auftraggeber entscheidet sich mit Auftragsentscheidung, ob „Ortbeton mit rezyklierter Gesteinskörnung aus aufbereitetem Betonabbruch nach DIN EN 12620 und DAfStb-Rili…“ gegenüber „Ortbeton mit ausschließlich natürlicher Gesteinskörnung“ zur Ausführung kommt.“
- Für den RC-Betoneinsatz wird gegenüber der Primärbetonverwendung ein Bonus für Umweltvorteile in Höhe von 10 €/t RC-GK bei 35 % RC-GK-Verwendung gewährt.

Für den Rohbau der **Tragkonstruktion** wurde ein Beton der Festigkeitsklasse **C30/37** im **Umfang von ca. 3.800 m³ Ortbeton - bestehend aus rezyklierter und natürlicher Gesteinskörnung -** gefordert. Die Anforderungen, die an die Zusammensetzung und die Eigenschaften des Frisch- und Festbetons gestellt wurden, sind in Tab. 6-1 aufgeführt.

Mit der Ausführung des Tragwerks / der Rohbaumaßnahme wurde die Nezaj Bau GmbH beauftragt. Als Unterauftragnehmer für die Betonherstellung ist die Firma CEMEX Deutschland AG eingebunden worden. Der Betonproduzent hat für die Lieferung der RC-GK 8/16 die Fa. HEIM Deponie Recycling GmbH betraut.

[22] Auftragsbekanntmachung des Bauauftrages Tragwerk vom 26.07.2013 durch die Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt

Tabelle 6-1: Anforderungen an die Zusammensetzung und die Eigenschaften des Frisch- und Festbetons[23]

Festlegungen (gemäß DIN EN 206-1:2001-07, DIN 1045-2:2008-08, Alkali-Rili)	**Expositionsklasse XC3** (mäßige Feuchte)	
	Feuchtigkeitsklasse W0 (Beton, der nach normaler Nachbehandlung nicht längere Zeit feucht und nach dem Austrocknen während der Nutzung weitgehend trocken bleibt)	
	Konsistenz F3 (Ausbreitmaß 420 – 480 mm) (für Transport- und Baustellenbeton müssen gemäß DIN EN 206-1:2001-07, Pkt. 4.2 Anforderungen an die Konsistenzklasse oder den Zielwert der Konsistenz festgelegt werden)	
Empfohlene Grenzwerte für die Zusammensetzung und Eigenschaften von Beton	**Maximaler w/z-Wert** (gemäß DIN EN 206-1:2001-07 , Tabelle F.1)	**0,55**
	Mindestdruckfestigkeitsklasse (gemäß DIN EN 206-1:2001-07, Tabelle F.1)	**C30/37**
	Mindestzementgehalt (gemäß DIN EN 206-1:2001-07, Tabelle F.1)	**280 kg/m³**

6.2 Untersuchungsergebnisse und Bewertung der RC-Gesteinskörnung

Das Untersuchungsergebnis der stofflichen Kennzeichnung der RC-Gesteinskörnung zeigt, dass die Sollwerte des Liefertyps 1 uneingeschränkt erfüllt werden (Tab. 6-2; Abb. 6-1).

Tabelle 6-2: Ergebnis der stofflichen Kennzeichnung [Bolab Analytik Ingenieurgesellschaft mbH, Prüfbericht Nr. 14 – 19746-1 vom 03.02.2014 sowie vom 27.03.2014]

Bestandteile	**SOLL** Kategorie der RC-Gesteinskörnung Zusammensetzung (M.-%) **Typ 1** Betonsplitt/Betonbrechsand	**IST** Zusammensetzung der RC-Gesteinskörnung [Massenanteil]	**Ergebnis Soll-Ist-Vergleich**
$R_c + R_u$	**Rcu_{90} (≥ 90 M.-%)**	94,9 M.-%	✓
R_b	**Rb_{10} (≤ 10 M.-%)**	4,0 M.-%	✓
R_a	**Ra_{1} (≤ 1 M.-%)**	1 M.-%	✓
X + R_g	**XRg_{1} (≤ 1 M.-%)**	0,1 M.-%	✓
FL	**FL_{2} (≤ 2 cm³/kg)**	0,0 cm³/kg	✓
✓ Anforderung sicher erfüllt			

Die **Analyseergebnisse der geometrischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften** der RC-GK 8/16 sind in nachstehender Tab. 6-3 zusammengefasst.

Tabelle 6-3: Bautechnische Untersuchungsergebnisse der RC-GK 8/16 mm [Bolab Analytik Ingenieurgesellschaft mbH, Prüfbericht Nr. 14 – 19746-1 vom 03.02.2014]

Parameter	**Sollwert**	**Istwert**	**Ergebnis**

[23]Prüfbericht, Prüfstelle E Berlin CEMEX Deutschland AG vom 11.04.2014

			Soll- Ist-Vergleich
Korngrößenverteilung	G_C85/20	G_C85/20	✓
Gehalt an Feinanteilen [M.-%]	≤ 4	0,12	✓✓
Stoffliche Zusammensetzung	Liefertyp 1	Liefertyp 1	✓
Kornrohdichte [kg/m³]	≥ 2000	2210	✓
Wasseraufnahme (nach 10 min) [M.-%]	≤ 10	6,3	✓✓
Kornformkennzahl	≤ SI_{55}	SI_{15}	✓✓
Wasserlösliches Chlorid [M.-%]	≤ 0,15	0,009	✓✓
Säurelösliches Chlorid [M.-%]	≤ 0,04	0,012	✓
Wasserlösliches Sulfat [M.-%]	≤ 0,2	0,19	✓✓
Säurelösliches Sulfat [M.-%]	≤ 0,8	0,6	✓
Gehalt an Gesamtschwefel [M.-%]	≤ 1	0,2	✓✓
Gehalt an organischen Bestandteilen	max. gelbe Färbung	hellgelbe Färbung	✓
Alkaliempfindlichkeitsklasse	E III-S	**Anmerkung siehe u.a. Text**	

✓ Anforderung sicher erfüllt
✓✓ Anforderung weit unterschritten

Gemäß der DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton“ erfolgte die Einstufung der RC-GK in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S (bedenklich hinsichtlich der Alkalireaktion). Da für den Beton der Tragwerkskonstruktion die Feuchtigkeitsklasse W0 festgelegt wurde, sind laut Tabelle 6 dieser Richtlinie keine vorbeugenden Maßnahmen hinsichtlich Alkalireaktion im Beton notwendig.

Die entsprechenden umwelttechnischen Prüfungen der RC-GK wurden durch den RC-Produzenten in Auftrag gegeben. Die Analysen zur Bewertung der Inhaltsstoffe der RC-GK 8/16 hinsichtlich der **Umweltverträglichkeit** erfolgten adäquat zur RC-GK, die im RC-Beton zur Errichtung der Schlitzwand zum Einsatz kam. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tab. 6-4 zusammengefasst. Feststellbar ist, dass die analysierten Werte alle gestellten Anforderungen erfüllen.

Tabelle 6-4: Ergebnisse der Bewertung der Umweltverträglichkeit [Bolab Analytik Ingenieurgesellschaft mbH, Prüfbericht Nr. 14 – 19746-1 vom 03.02.2014 sowie vom 27.03.2014]

Parameter	**Einheit**	**Höchstwert** (nach Z 1.2 der LAGA M20)	**Istwert**	**Ergebnisse**
Eluat				
pH-Wert		12,5[a]	12,0	✓
elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	2500 [a]	1695	✓
Chlorid	mg/l	40	16	✓
Sulfat	mg/l	300	67	✓✓
Arsen	µg/l	40	< 10	✓
Blei	µg/l	100	< 10	✓✓
Cadmium	µg/l	5	0,5	✓✓
Chrom (gesamt)	µg/l	75	16	✓✓
Kupfer	µg/l	150	2	✓✓
Nickel	µg/l	100	< 2	✓✓
Quecksilber	µg/l	1	< 0,2	✓✓
Zink	µg/l	300	8	✓✓
Phenolindex	µg/l	50	< 10	✓✓
Feststoff				
Kohlenwasserstoffe	mg/kg	500[b]	45	✓✓
PAK nach EPA	mg/kg	15 (50)[c]	0,28	✓✓
EOX	mg/kg	5	< 0,5	✓✓
PCB	mg/kg	0,5	< 0,01	✓✓

[a] Kein Ausschlusskriterium
[b] Überschreitungen, die auf Asphaltanteile zurückzuführen sind, stellen kein Ausschlusskriterium dar.
[c] Im Einzelfall kann bis zu dem in Klammern genannten Wert abgewichen werden.
✓ zulässigen Höchstwert unterschritten
✓✓ zulässigen Höchstwert weit unterschritten

Wie bereits in Pkt. 4 aufgeführt, sind rezyklierte Gesteinskörnungen derzeit keine geregelten Bauprodukte für den Einsatz in Beton entsprechend den in der Bauregelliste A Teil 1 bekannt gemachten technischen Regeln. Anwendung findet momentan die Bauregelliste B, Teil 1, die unter lfd. Nr. 1.1.3.1 in Verbindung mit Anlage 1/1.3 für den Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen in Beton den Nachweis der Umweltverträglichkeit durch die Zustimmung im Einzelfall verlangt. Entsprechend dieser Forderungen wurden die Prüfergebnisse/-zeugnisse der Obersten Bauaufsicht, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, zur Prüfung vorgelegt.

Am 31. März 2014 wurde die Zustimmung im Einzelfall Nr. 98/14 nach §§ 20 bzw. 21 BauO Bln erteilt und damit die RC-GK der Fa. HEIM Deponie und Recycling GmbH für den Einsatz im Beton bei dem Bauvorhaben „Neubau des Forschungs- und Laborgebäudes der HU Berlin“ zugelassen.

Ergebnis:

Die im Rahmen der Erstprüfung **geprüfte stoffliche Zusammensetzung der RC-GK 8/16** (siehe Abb. 6-1) belegt die Deklaration des **Liefertyps 1 (Betonsplitt).** Die Prüfung der baustofflichen, -technischen und chemischen Parameter wie auch die Parameter zur Umweltverträglichkeit der RC/GK 8/16 ergab, dass **alle gestellten Anforderungen sicher erfüllt wurden.**

Abbildung 6-1: RC-GK 8/16 der HEIM Deponie Recycling GmbH [Schmidt, 07.04.2014]

6.3 Untersuchungsergebnisse und Bewertung des RC-Betons

Um die o.a. Eigenschaften des RC-Betons zu erreichen, wurden im Vorfeld der Betonlieferung Betonrezepturen durch CEMEX Deutschland AG entwickelt und erprobt. Die Beschränkung auf die RC-GK 8/16 mm ist - wie auch im Pkt. 5.1 erläutert – auf die begrenzt verfügbare Lagerkapazität für die Zuschlagstoffe im Transportbetonwerk zurückzuführen. Temporär wurde das „Reservesilo“ für die rezyklierte Gesteinskörnung bereitgestellt.

Folgende Rezeptur ist für die Produktion des **RC-Betons der Festigkeitsklasse C30/37 unter Verwendung der RC-GK 8/16 des Liefertyps 1** zugrunde gelegt worden:

Tabelle 6-5: Betonrezeptur für die Tragwerkskonstruktion [24]

Bestandteil	Hersteller	Anteil
Sand 0/2 mm	SKBB Sand + Kies Union GmbH, Ruhlsdorf	688 kg/m³ (40 Vol.-%)
Kies 2/8 mm	Elbekies GmbH, Mühlberg	341 kg/m³ (20 Vol.-%)
RC-GK 8/16 mm	**HEIM Deponie & Recycling GmbH**	**576 kg/m³ (40 Vol.-%)**
CEM II/B-M(S-LL) 42,5 N-AZ	CEMEX Ost Zement GmbH Werk Rüdersdorf	350 kg/m³
Flugasche	Heizkraftwerk Reuter West	50 kg/m³
Fließmittel Isoflecx FM 833	CEMEX Admixtures GmbH	2,45 kg/m³ (0,7 M.-% v. Zement)
Wasser		180 kg/m³

Bei Betrachtung der Betonrezeptur fällt auf, dass die GK 8/16 komplett durch die RC-GK 8/16 substituiert wurde. Der zulässige Anteil der RC-GK - nach normativen Vorgaben entsprechend Tab. 4-2 - in Höhe von 45 Vol.-% wurde demnach um 5 Vol.-% unterschritten. Die maximal mögliche Substitutionsrate in Abhängigkeit der Expositions- und Feuchtigkeitsklasse ist somit eingehalten.

Wie bereits in Kapitel 5.3 erläutert wurde, ist für RC-Beton gemäß der DAfStb-Rili[25] eine erweiterte Erstprüfung durchzuführen. Die für diese Prüfung erforderlichen Untersuchungen wurden von der Prüfstelle E Berlin der CEMEX Deutschland AG durchgeführt. Die Durchschnittswerte der dabei ermittelten Frisch- und Festbetoneigenschaften sind in Tab. 6-6 zusammengefasst. Im Ergebnis dieser Untersuchungen wird festgestellt, dass die im Rahmen der Erstprüfung ermittelten Parameter uneingeschränkt die Sollwerte nach DIN EN 206-1 erfüllen.

[24] Prüfbericht, Prüfstelle E Berlin CEMEX Deutschland AG vom 11.04.2014
[25] DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1, Ausgabe September 2010

Tabelle 6-6: Geprüfte Parameter im Rahmen der erweiterten Erstprüfung, Betonprüfergebnisse nach DIN EN 12350 und DIN EN 12390 [Prüfstelle E Berlin der CEMEX Deutschland AG vom 11.04.2014]

	Parameter	Sollwert nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2	Istwert geprüft nach DIN EN 12350-1, DIN EN 12350-5 und DIN EN 12390-3	Ergebnis Soll-Ist-Vergleich
Erstprüfung (gemäß DIN EN 206-1:2001-07 und DIN 1045-2:2008-08)	Prüfbedingung			
	Frischbeton-temperatur [°C]	15 - 22	**16**	✓
	Kriterien zur Annahme der Erstprüfung			
	Druckfestigkeit (nach 28 Tagen) [N/mm²]	$f_{cm} \geq f_{ck}+4$ (37 + 4)	**43,6**	✓
	Konsistenz (Ausbreitmaß) [mm]	F3 420 - 480	**473**	✓

	Parameter		Istwert geprüft nach DIN EN 12350-5 und DIN EN 1097-6
Prüfungen im Rahmen der erweiterten Erstprüfung (gemäß DAfStb-Rili)	Konsistenz (Ausbreitmaß) [mm]	nach 10‘	**530**
	Feuchtegehalt der Gesteinskörnung [%]	Kernfeuchte	**3,8**
		Oberflächenfeuchte	**3,8**

Im Rahmen der **Konformitäts- und Produktionskontrolle** sind im Laufe der Produktion entsprechend der DIN EN 206-1 Probenahmen zur Überprüfung der Konformitätskriterien – adäquat zum Schlitzwandbeton (vgl. Kap. 5.3) - durchgeführt worden.

Insgesamt sind während des Lieferzeitraums im Transportbetonwerk 44 Proben gezogen und geprüft worden. Folgende Mittelwerte wurden im Rahmen der Konformitätsprüfungen bestimmt:

- Ausbreitmaß 530 mm
- Luftporengehalt 2,1 Vol.-%
- Frischbetonrohdichte 2.290 kg/m^3
- Festbetonrohdichte 2.280 kg/m^3
- Betondruckfestigkeit [28 d] 47,7 N/mm^2.

Zusätzlich wurde auf der Baustelle die Qualität des gelieferten Transportbetons durch die Fläming Baustofflabor GmbH (FBL) überwacht. Während der Bauarbeiten wurden 49 Prüfkörper hergestellt, an denen im Prüfalter von 28 Tagen die Druckfestigkeit bestimmt wurde. Deren Mittelwert lag für den gesamten Lieferzeitraum zuverlässig zwischen 43 und 44 N/mm^2.

Somit **wurde nachgewiesen, dass der RC-Beton zuverlässig die geforderten Eigenschaften** (vgl. Tab. 6-1 und 6-6) **erfüllt.**

Ergebnis:

Die im Rahmen der **erweiterten Erst- und Konformitätsprüfung** nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 sowie DAfStb-Rili **analysierten Parameter zur RC-Betonherstellung** der geforderten Festigkeitsklasse **C30/37** unter anteiliger Verwendung der **RC-GK 8/16 Liefertyp 1 (Betonsplitt), in Höhe von 40 Vol.-%,** bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung, **erfüllten uneingeschränkt alle gestellten Anforderungen. Die Qualität des RC-Betons entspricht damit der eines Primärbetons.**

6.4 Bewertung

Abbildung 6-2: Schnitt durch RC-Beton-Prüfkörper [Jacob, 17.11.2014]

Der Rohbau des Forschungs- und Laborgebäudes wurde erfolgreich erstellt.

Adäquat dem Bauvorhaben der Schlitzwand konnte gezeigt werden, dass RC-Beton in keiner Weise dem Beton mit Naturstoffen nachsteht. Die Gesteinskörnung ist den normativen Vorgaben entsprechend und termingerecht von der Fa. HEIM Deponie Recycling GmbH geliefert worden, die Herstellung des RC-Betons durch die Fa. CEMEX Deutschland AG und dessen Einbau durch die Fa. Nezaj Bau GmbH erfolgte problemlos. Mehrfach ist durch den Polier auf der Baustelle bestätigt worden, dass der RC-Beton wie Primärbeton gehandhabt werden kann.

7 Kostenbetrachtung RC-Beton im Vergleich zum Primärbeton

Wie unter Pkt. 5.1 und 6.1 ausgeführt, wurde als Impulsgeber für die Einführung und erstmalige Verwendung von RC-Beton im Land Berlin gegenüber der Primärbetonverwendung ein monetärer Anreiz für Umweltvorteile (Nichtinanspruchnahme von Abbauflächen und Verringerung der Umweltbelastung durch Transporte) eingeräumt. Die „Umweltgutschrift“ laut Ausschreibung soll zudem mögliche Mehraufwendungen kompensieren. Nachfolgend wird hierauf Bezug genommen.

Die Herstellung des Liefertyps 1 (s. Tab. 4-1) erfordert eine definierte, reproduzierbare stoffliche Zusammensetzung der Gesteinskörnung. Zur Absicherung dieser Forderung ist es notwendig, bereits auf der Abbruch-/Rückbaustelle die mineralische Stofffraktion Beton getrennt vom Mauerwerksbruch zu erfassen. Sortenreiner Betonbruch/-schutt lässt sich mit einem relativ geringen technologischen Aufwand (Brechen, Klassieren) zu einem qualitätsgerechten regelkonformen Baustoff aufbereiten.

Für einen solchen verwertungsorientierten Rückbau ist im Vergleich zum konventionellen Abbruch jedoch ein Mehraufwand einzuplanen. Erfolgt keine Stoffselektion auf der Baustelle, ist die gemischte mineralische Fraktion bestehend aus Beton- und Mauerwerksschutt (Gemische aus verschiedenen Ziegeln mit verschiedenen anorganischen Anhaftungen, Putzen, keramischen Materialien etc.) auf der RC-Anlage zu selektieren. Der Mehraufwand für die Sortierung wäre dann allerdings unwirtschaftlich, denn naturgemäß lassen sich einzelne Stofffraktionen aus heterogen zusammengesetzten Bauabfällen nur mit einem großen Aufwand separieren. D.h., die Aufbereitungskosten hängen ganz entscheidend von der Qualität des Eingangsmaterials/Inputs ab. Dies spiegelt sich auch in den Annahmegebühren des Inputs wieder. Für die Stofffraktion Beton ist die Gebühr geringer im Vergleich zur Stofffraktion gemischter Bauschutt. In einigen Regionen wird für sortenrein angelieferten Betonbruch an der RC-Anlage sogar ein Erlös gezahlt.

Die **Mehrkosten zur Herstellung der RC-GK** sind in erster Linie auf folgende Positionen zurückzuführen:

- **die Aufbereitung der etwa 5 bis 6-fachen Menge an Betonbruch, um 1 Tonne Betonsplitt der Korngröße 8/16 herzustellen**[26] und
- die erhöhten Kosten zur Prüfung des Materials resultierend u.a. aus der Eingangskontrolle der Betonbruchfraktion, aber v.a. aus dem Nachweis der Umweltverträglichkeit der RC-GK.

[26]Aussage Fa. HEIM Deponie & Recycling GmbH am 07.04.2014

Die RC-GK wurde nach Angaben der HEIM Deponie & Recycling GmbH zum Preis in Höhe von 16,10 €/t an den Betonproduzenten verkauft. (Zum Vergleich: Kies wird in Berlin derzeit zu etwa 15 €/t (frei Transportbetonwerk)[27] bezogen.

Darüber hinaus wurde es aufgrund der derzeitigen Regelungslücke bzgl. der Umweltverträglichkeit von RC-GK zur Herstellung des RC-Betons für die Hochbaumaßnahme erforderlich, eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) bei der obersten Bauaufsichtsbehörde zu beantragen (vgl. Pkt.4). Damit verbunden war ein erheblicher Zeitaufwand bis zur Genehmigungserteilung. Für die ZiE der Hochbaumaßnahme sind 930 € entrichtet worden.

Die **Mehrkosten des RC-Beton**s lassen sich vornehmlich zurückführen auf:

- die begrenzte Kapazität für die Zwischenlagerung der Gesteinskörnungen in den jeweiligen Transportbetonwerken und
    - ggf. die damit verbundene Freimachung einer (Zuschlagstoff-)Box oder eines Silos resp. Auslagerung eines Produktes bzw. einer Gesteinskörnung oder
    - die Installierung einer zusätzlichen (Zuschlagstoff-)Box oder eines Silos
- die höheren Kosten für die RC-GK im Vergleich zum Kies[28] wie o.a. (höhere Materialkosten) sowie Sichtkosten für jede Lieferung und
- die zusätzlichen Prüfkosten[29].

Die Mehrkosten für den RC-Beton - resultierend hauptsächlich aus den zuvor genannten Positionen inkl. des Aufwandes für die Herstellung der RC-Gesteinskörnung - beliefen sich nach Auswertung der Angebote der beauftragten Firmen für die Tragkonstruktion[30] auf 5,73 €/m³ für den C30/37 – Beton sowie für die Schlitzwand[31] auf 5,30 €/m³ für den C25/30 - Beton.

[27] Vogt, Regine; Reinhardt, Joachim: Stoffstrom-, Klimagas- und Umweltbilanz 2012 für die Nutzung von Berliner Abfällen als Ressource, Endbericht, Heidelberg Okt. 2013, S.204

[28] bei einem Vergleich gegenüber dem Einsatz von Splitt ist die RC-GK kostengünstiger

[29] Nach DAfStb-Rili „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezykliertern Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ sind im Rahmen der Produktionskontrolle (Pkt. 5) des Betonherstellers zusätzlich zur DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 folgende Prüfungen durchzuführen:
- Sichtprüfung der stofflichen Zusammensetzung der rezyklierten Gesteinskörnung jedes Lieferfahrzeugs,
- in jeder Produktionswoche Ermittlung der Kornrohdichte (ofentrocken) und der Wasseraufnahme nach zehn Minuten,
- Ermittlung des Wassergehaltes der rezyklierten Gesteinskörnung bei Änderung der Feuchtebedingungen sowie
- im Rahmen des Festigkeitsnachweises für den Beton müssen der Luftgehalt am Frischbeton und die Frischbetonrohdichte bestimmt werden.

[30] erfolgte durch das Ingenieurbüro Peter Widell, Berlin

[31] Aktennotiz vom 21.01.2014 Trabet Transportbeton Berlin

Die oben aufgeführten Ursachen für die erhöhten Herstellungskosten resultieren vor allem aus der erstmaligen Herstellung der Produkte sowie den damit verbundenen Untersuchungen zur Qualitäts- und Umweltsicherung. Wird RC-Beton kontinuierlich abgerufen, verringern sich diese Kosten. Erhöht sich die Menge der insgesamt einzusetzenden RC-GK, verringert sich u.a. der Anteil der Prüf- und Zertifizierungskosten deutlich. Dadurch könnte der Verkaufspreis der RC-GK herabgesetzt werden - was sich beim Betonproduzenten und ggf. beim Kunden/Bauunternehmen/Bauherrn positiv auswirkt.

Basierend auf den Erfahrungen aus Projekten u.a. in Ludwigshafen / Mannheim ist davon auszugehen, dass RC-Beton bei kontinuierlichem Abruf quasi zu den gleichen Kosten wie Primärbeton hergestellt und geliefert werden kann. Die Preisspanne wird sich bei ± 1 € einpegeln, wie aus den Folgeprojekten im süddeutschen Raum hervorgeht.

8 Ökobilanzielle Betrachtung und Stoffflussdiagramm

Die im Rahmen dieser wissenschaftlichen Begleitung durchgeführten ökobilanziellen Betrachtungen beschränken sich im Wesentlichen auf die Rohstoffeinsätze, Energieverbräuche und Transportprozesse des betrachteten Systems. Gegenübergestellt werden die Stoffströme sowie die dazugehörigen Prozesse in Vorbereitung der Herstellung von RC-Beton und Primärbeton inkl. der damit verbundenen Umweltwirkungen. Die nachfolgende Bewertung erhebt nicht den Anspruch einer Lebenszyklusanalyse. Da lediglich Unterschiede in der Zusammensetzung der Gesteinskörnung beim Beton bestehen, werden die Gewinnung Rohstoffe RC-GK und Kies betrachtet. Daran schließt sich die Betrachtung der Betonherstellung: RC-Beton zu Primärbeton an.

Nachstehendes Schema vermittelt einen Überblick zu den festgelegten Systemgrenzen, unterteilt in Systemgrenze Primärbeton und Systemgrenze RC-Beton (s. Abb. 8-1).

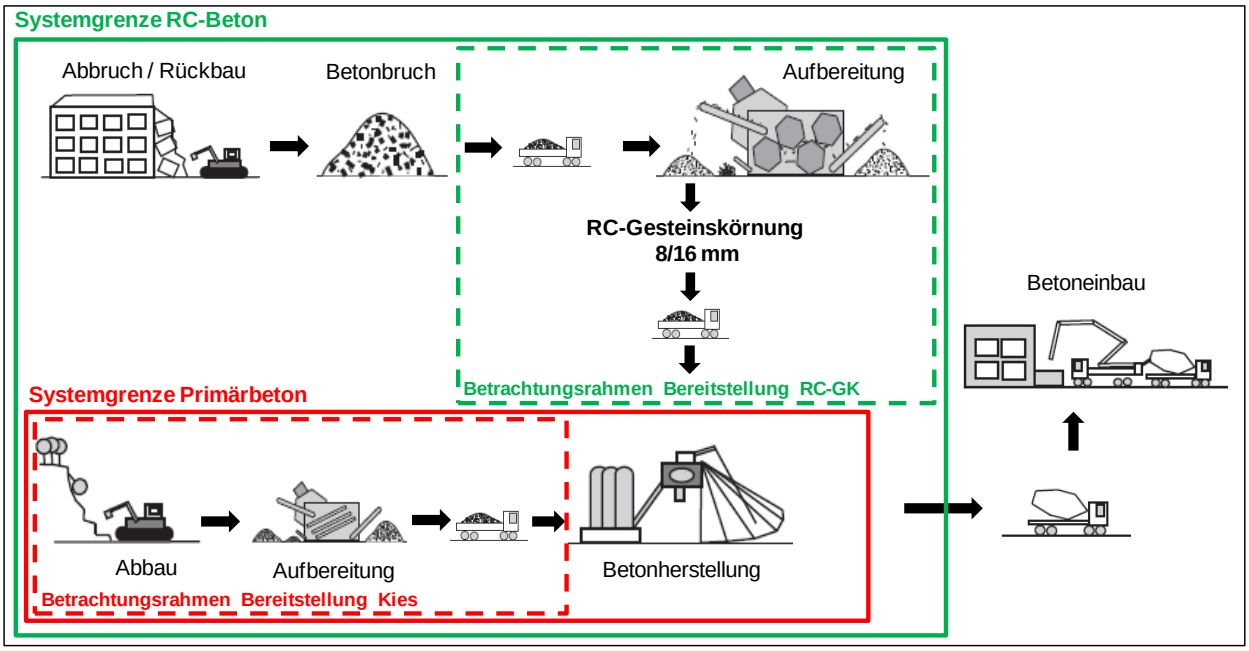

Abbildung 8-1: Überblick zur Herstellung von Primärbeton im Vergleich zum und RC-Beton

Ausgangspunkt beider Systemgrenzen ist die Gewinnung und Aufbereitung der Gesteinskörnung.

- **Generelles zur Gewinnung und Aufbereitung von Kies**

In Berlin genutzte Sand- und Kieslagerstätten wurden Anfang der 1990er Jahre stillgelegt, so dass ein Import dieser Rohstoffe aus den umliegenden Bundesländern und aus dem Nachbarland Polen notwendig ist.[32] Die Fa. CEMEX Deutschland AG bezieht ihren Kies aus Lagerstätten des

[32]Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Steine- und Erden-Rohstoffe in der Bundesrepublik Deutschland, Geologisches Jahrbuch, Sonderhefte, Heft SD 10; Hannover 2012, S.44 ff.

„Berliner Elbelaufes“ im Mühlberger Raum (Brandenburg). Diese haben mit einer durchschnittlichen Mächtigkeit von 30 m (deutschlandweit liegt die Mächtigkeit im Durchschnitt bei 7–8 m)[33] und einem Kiesanteil (Korngröße von 2-63 mm) von z.T. 50 M.-% eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung für die Versorgung mit Baurohstoffen.[34] Aus Gesprächen mit Betonherstellern ging hervor, dass der Anteil der Korngröße 8/16 in den Kiesvorkommen rückläufig ist. Auf Rückfrage bei der Elbekies GmbH liegt der Anteil der Korngröße 8/16 mm bei ca. 10 - 12 M.-%.

- **Generelles zur Bereitstellung von Betonbruch und dessen Aufbereitung zu Betonsplitt**

Für die Herstellung der RC-Gesteinskörnung wird vorausgesetzt, dass beim Abbruch/Rückbau sortenreiner, schadstofffreier Betonbruch erzeugt und dieser als homogene Fraktion der RC-Anlage angeliefert wird (vgl. Pkt. 7). Der Unterschied des verbauten RC-Betons gegenüber Primärbeton bestand beim Pilotprojekt „Neubau des Forschungs- und Laborgebäudes der HU Berlin“ darin, dass natürliche Gesteinskörnung (8/16) durch 25 Vol.-% RC-GK für Schlitzwandbeton und durch 40 Vol.-% RC-GK für den Konstruktionsbeton (Tragwerk) ausgetauscht wurde (vgl. Tab. 5-6 und Tab. 6-5). Da die Substitution der natürlichen durch rezyklierte Gesteinskörnung anteilig erfolgt, schließt die Systemgrenze RC-Beton die des Primärbetons mit ein. Exemplarisch werden nachfolgend die Szenarien RC-Beton- und Primärbetonherstellung für die Errichtung des Forschungs- und Laborgebäudes (Konstruktionsbeton) dargestellt und aus ökologischer Sicht bewertet. Die verwendeten Daten basieren auf Statistiken, eigenen Berechnungen aus dem Forschungsprojekt in Ludwigshafen/Mannheim zum Einsatz von RC-Beton[35] sowie im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung durchgeführter Befragungen der beteiligten Akteure.

8.1 Stoffflussbetrachtung – Herstellung der RC-Gesteinskörnung

Auf Grund der Mengenrelevanz werden die ökobilanziellen Betrachtungen für die im Tragwerk eingesetzten RC-GK und dem damit produzierten RC-Beton durchgeführt.

Der Betonbruch, der für das Tragwerk des „Pilotprojektes“ in der stationären RC-Anlage der Fa. HEIM Deponie Recycling GmbH aufbereitet wurde, stammt aus dem Abbruch eines Hochbaus

[33] vgl. http://de.wikipedia.org/wiki/Kiesabbau_Mittelweser, aufgerufen am 25.02.2015
[34] vgl. http://www.geobasis-bb.de/GeoPortal1/produkte/fachkarten/lbgr/pdf/4_Geoatlas_Thieke_50-51.pdf, aufgerufen am 25.02.2015
[35] Mettke, Angelika; Heyn, Sören: Ökologische Prozessbetrachtungen – RC-Beton (Stoffffluss, Energieaufwand, Emissionen) zum Forschungsprojekt: „Einsatz von Recycling-Material aus mineralischen Baustoffen Zuschlag in der Betonherstellung, 2010

samt Fundament im Umfang von ca. 13.000 t. Das Abbruchobjekt befand sich in unmittelbarer Nähe zum Standort der RC-Anlage (ca. 1 km entfernt).

Der Aufbereitungsprozess der Fa. HEIM Deponie Recycling GmbH ist in der Abb. 8-2 schematisch dargestellt. Vor Aufgabe des Abbruchmaterials in den Aufgabebunker der RC-Anlage, wurde dieser unter Zuhilfenahme eines Baggers mit Anbaugerät vorzerkleinert, um eine Kantenlänge ≤ 60 cm einzuhalten. Die Beschickung der RC-Anlage mit dem vorzerkleinerten Input erfolgt(e) mittels Radlader. Der Feinanteil wird nach Aufgabe über ein Vorsieb „ausgetragen“. Die installierte Brechereinheit ist zweistufig ausgelegt. Sie besteht aus einer Schlagwalze als Vorbrecher und einer nachgeschalteten Prallmühle. Die Klassierung erfolgt über Siebe, das Überkorn > 45 mm wird zur Prallmühle zurückgeführt und erfährt somit einen 2. Durchlauf in der Prallmühle.

Für die Produktion der RC-GK - als Lieferkörnung für den Betonbau - ist die vorhandene Aufbereitungstechnik (lediglich) um eine Siebanlage zur Fraktionierung der gängigen Körnungen (2/8, 8/16, 16/32; s. Abb. 8-2 rot umrandet) erweitert worden.

Ursprünglich war es vorgesehen, die drei genannten Lieferkörnungen zur RC-Betonherstellung zu produzieren. Wie unter Pkt. 6.3 erläutert, wurde jedoch aufgrund der technischen und technologischen Restriktionen des Transportbetonwerkes vereinbart, ausschließlich die Körnung 8/16 für den RC-Beton C30/37 herzustellen bzw. zu liefern. Daher wurde es auf der RC-Anlage nicht mehr erforderlich, die erzeugte Körnung 0 – 8 mm weitergehend zur Verwendung im Beton zu klassieren.

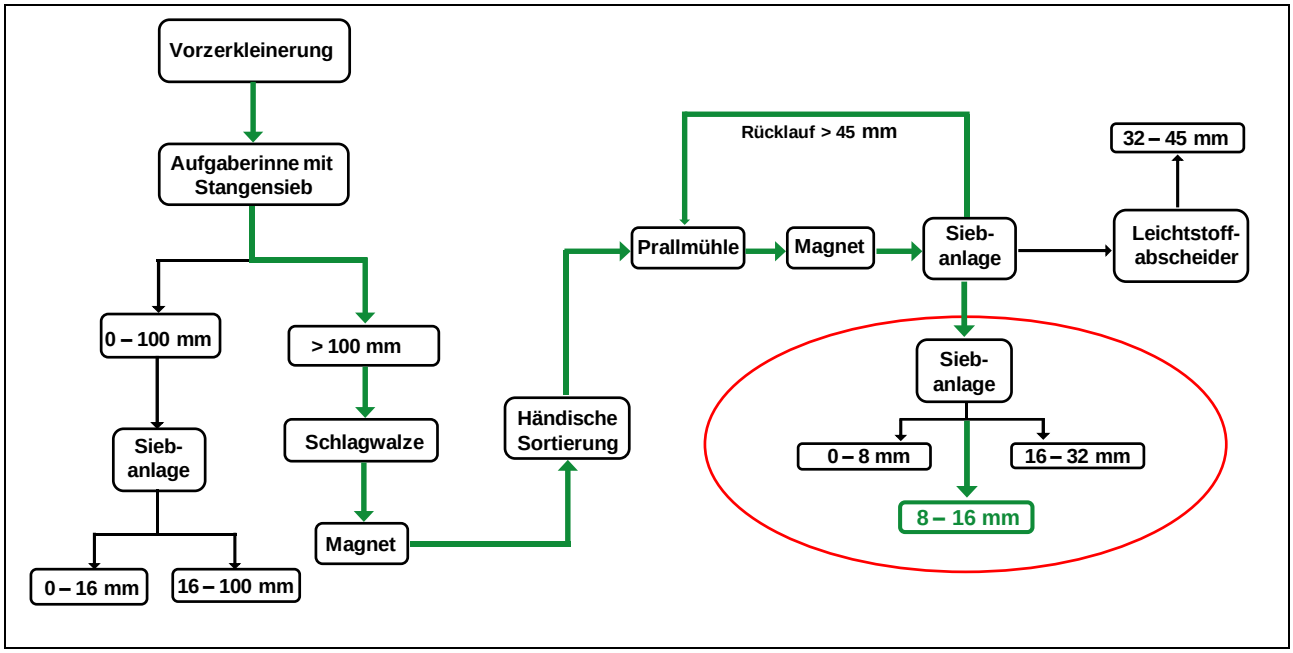

Abbildung 8-2: Fließbild der Aufbereitung der Fa. HEIM Deponie & Recycling GmbH [Jacob in Abstimmung mit Fa. HEIM Deponie & Recycling GmbH]

Im Folgenden wird der **Stoffstrom der Aufbereitung** mit Zuordnung zu den Aggregaten betrachtet (Abb. 8-3). Ausgang bildet 1 Tonne Inputmaterial Betonbruch, die angegebenen Werte sind Durchschnittswerte.

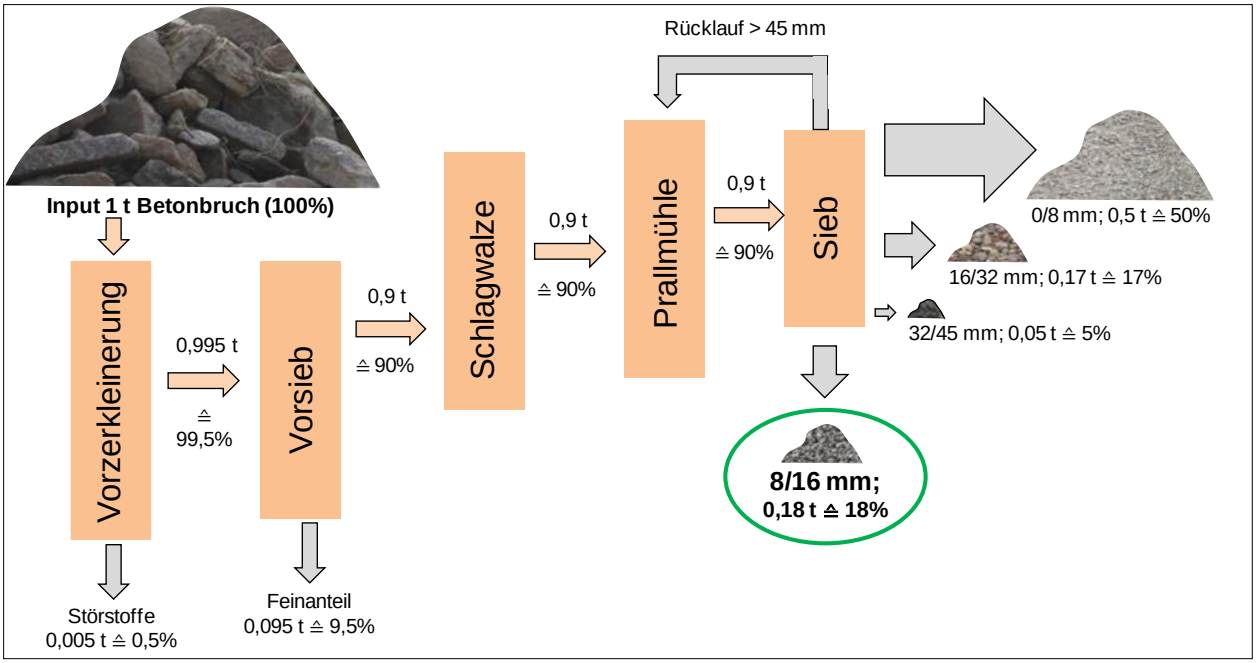

Abbildung 8-3: Stoffstrom der Aufbereitung nach Angaben der Fa. HEIM Deponie & Recycling GmbH

Im Ergebnis ist festzustellen, dass im Durchschnitt 180 kg RC-GK 8/16 pro Tonne Input erzeugt wurden. Im Umkehrschluss ist demnach die 5,5-fache Menge an Betonbruch (5,5 t) aufzugeben, um 1 Tonne RC-GK der Körnung 8/16 zu erhalten. Unter der Berücksichtigung von Abweichungen der Zusammensetzung des Inputs von ± 2 % beläuft sich der Schwankungsbereich zwischen dem 5- bis 6-fachen des Aufgabegutes Betonbruch (vgl. Pkt. 7). Bei Betrachtung des gesamten Stoffstroms ist feststellbar, dass der ausgewiesene sehr geringe Störstoffanteil die Sortenreinheit des Inputmaterials wiederspiegelt. Neben der Zielfraktion sind weitere verkaufsfähige Produkte/RC-GK produzierbar.

In der **Tragkonstruktion** sind **576 kg RC-GK 8/16 für die Herstellung von 1 m³ RC-Beton** (vgl. Tab. 6-5) eingesetzt worden. D.h. ca. 2,9 - 3,5 t Betonbruch wurden aufbereitet, um 576 kg erzeugen zu können. Hochgerechnet auf die verbaute Gesamtmenge von 3.800 m³ RC-Beton für die Tragkonstruktion bestand ein Bedarf von rund 11.000 t bis 13.300 t (i.M. 12.200 t) Inputmaterial. Die nicht bei diesem Hochbauvorhaben eingesetzten RC-Mengen wurden nach weiterer Aufbereitung im Straßenbau verwendet.

Die abgerufene rezyklierte Gesteinskörnung in der geforderten Qualität (Liefertyp 1) konnte auf der RC-Anlage der HEIM Deponie & Recycling GmbH problemlos produziert und termingerecht geliefert werden. Anfängliche Bedenken, die geforderte stoffliche Reinheit (Liefertyp 1; s. Tab. 4-2) zu gewährleisten, haben sich als unbegründet erwiesen. Die Qualität der RC-GK steht dem Kies in keinem Punkt nach.

Im Betonbau werden definierte Korngemische durch dosiertes Mischen von feinen Gesteinskörnungen (Sand) und groben Gesteinskörnungen z.B. Korngruppen 2/8, 8/16 oder/und 16/32 erforderlich[36] (s. bspw. Tab. 6-5). Ursprünglich war darauf orientiert worden, Kies der genannten Körnungen durch RC-GK für den Beton zu ersetzen. Zum Einsatz kam jedoch - erläutert im Pkt. 6.3 – ausschließlich die Körnung 8/16.

Primär werden RC-GK jedoch ungebunden im Straßen- und Wegebau in Frostschutz- und Tragschichten eingesetzt. D.h. überwiegend kommen Korngemische der Körnungen 0/32, 0/45 oder 0/56 zum Einsatz (vgl. TL Gestein-StB, TL SoB-StB, Erlasse der Länder). Der Ausschluss der Verwendung von RC-GK 0/2 zur Herstellung von Konstruktionsbeton unter Verwendung von RC-GK sowie die o.a. spezifische Abstufung der Körnungen bedingen generell eine technologische Anpassung des Aufbereitungsprozesses in Form der Installation von zusätzlichen Sieben auf der RC-Anlage (s. Abb.8-2).

[36]Bei einem günstigen Kornaufbau wird zur Herstellung von Beton ein Minimum an Zement und Wasser (Zementleim) zur Verarbeitung und Erzielung einer bestimmten Festigkeit benötigt. [Scholz/Hiese: Baustoffkenntnis, 15.Auflage, S. 231]

Die im Pilotprojekt verwendete Körnung 8/16 wurde aus dem sortenrein aufbereiteten Körnungsgemisch 0/45 (Betonsplittproduktion) abgesiebt. Die fehlenden Anteile 8/16 im verbleibenden Körnungsgemisch 0/45 sind kompensierbar, indem das Überkorn > 45 mm nochmals aufbereitet wird.

Die Fa. HEIM Deponie & Recycling GmbH führt bspw. das Überkorn wieder dem Prallbrecher zu.

Die Fa. Scherer & Kohl GmbH & Co.KG gleicht die fehlenden Anteile im Stoffstrom durch die Aufbereitung des Überkorns > 56 mm in einem Kegelbrecher auf. Der Kegelbrecher ist von Vorteil, weil der erzeugte Feinanteil < 2 mm gering ist.

Die Hoffmann Firmengruppe bspw. bricht den sortenrein angelieferten Betonbruch vor bis auf eine Korngröße von < 150 mm. Vor der Aufgabe des vorgebrochenen Betonbruchs in den Backenbrecher wird der Feinanteil < 10 mm abgesiebt. Der zerkleinerte Betonsplitt (Lieferkörnung 1) wird anschließend mittels Siebanlage in mehrere Körnungsgruppen fraktioniert. Die Körnungen 0/16 und 16/32 werden entsprechend den Anforderungen im Straßenbau dosiert. Die Körnung > 32 mm wird einem Prallbrecher (mit Siebeinheit und Rückführband fürs Überkorn) zugeführt und auf die Korngröße 0/16 zerkleinert. Der Brechsand 0/2 wird abgesiebt und es verbleibt die Fraktion 2/16, die wiederum in die Fraktionen 2/8 und 8/16 klassiert werden kann.

Auch die Fa. EUROVIA Industrie GmbH produziert den Betonsplitt aus sortenreinem Betonbruch in den Körnungsgrößen, die für den Betonbau - w.o. dargestellt - abgerufen werden. Kommt nur eine Körnungsgruppe zum Einsatz, werden die anderen erzeugten Körnungen wie bspw. die 0/8-Fraktion dem gesondert aufbereitetem Körnungsgemisch für den Straßenbau (z.B. der Frostschutzschicht) anteilig gemäß den u.a. Regelwerk beigemischt.

D.h. technologisch betrachtet gibt es mehrere Möglichkeiten, die Fraktion 8/16 herzustellen ohne den Absatz der restlich hergestellten Körnungen zu gefährden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die fehlende Körnung 8/16 im Körnungsgemisch für den Straßenbau durch Zumischung von Ziegelsplitt gemäß TL Gestein-StB, Anhang B, Tab. B 1 auszugleichen. In der Schweiz bspw. besteht die Diskussion der Absatzmöglichkeiten der „verbleibenden Körnungen“ nicht, denn generell ist der Brechsand zur Herstellung von Konstruktionsbeton verwertbar wie auch ungebundene Recycling-Kiesgemische in bestimmter Zusammensetzung (RC-Euro Kiesgemisch B, RC-Euro Betongranulatgemisch, RC-Kies B (Beton)). zu Substitutionsanteilen von 100%, gemäß dem SIA-Merkblatt MB 2030 „Recyclingbeton“ in Ergänzung der Tragwerksnorm SIA.

Schlussendlich wird festgestellt, dass Recyclingunternehmen wie bspw. Scherer & Kohl GmbH & Co. KG (www.scherer-kohl.de) oder Heinrich Feeß GmbH Co. KG (www.feess.de), beweisen, dass RC-GK für den Einsatz im Konstruktionsbeton wirtschaftlich produzierbar sind und die

Vermarktung der weiteren produzierten Körnungen uneingeschränkt möglich ist. Aus Sicht der Recyclingunternehmen ist es umso wirtschaftlicher RC-GK für den Einsatz im Konstruktionsbeton herzustellen, wenn 2 oder mehr Korngrößen (z.B. 2/8, 8/16 und 16/32) kontinuierlich abgerufen werden.

8.2 Energetische Aufwendungen für die Bereitstellung der RC-GK im Vergleich zur Kiesgewinnung

- **Aufbereitung RC-GK**

Der spezifische Energieverbrauch für die Aufbereitung der RC-GK wurde aufgrund unvollständiger Daten vereinfachend den Untersuchungsergebnissen, die im Rahmen der ökologischen Bewertung für den RC-Beton im „Leuchtturmprojekt“ in Ludwigshafen[37] ermittelt wurden, gleichgesetzt. Die Trockenaufbereitung der RC-Gesteinskörnung in der Fa. Scherer & Kohl GmbH, Ludwigshafen erfolgte ebenfalls zweistufig. Lediglich anstelle des Schlagwalzenbrechers ist bei der Fa. Scherer & Kohl GmbH ein Backenbrecher als Vorbrecher installiert. Die eigenen Berechnungen zum Energieaufwand der Trockenaufbereitung belegen, dass pro t Betonsplitt 19,5 MJ[38] benötigt werden. Nach Prozessen untergliedert entfällt bspw. auf den innerbetrieblichen Transport 56 % der Energieaufwendungen und 31 % auf den Zerkleinerungsprozess.

Unter Berücksichtigung, dass - wie o.a. - bei der Aufbereitung von 1 Tonne Betonbruch ca. 18 % Betonsplitt der Fraktion 8/16 erzeugt werden bzw. im Durchschnitt 5,5 t Input aufzugeben ist, um **eine Tonne 8/16** Betonsplitt herzustellen, werden **~110 MJ**[39] benötigt.

- **Gewinnung Kies**

Für die Bereitstellung von einer Tonne Kies wird von einem Energieaufwand von 35 MJ ausgegangen[40]. Anzumerken ist, dass auch der Kies eine unterschiedliche anteilige Korngrößenverteilung aufweist. Nach Herstellerangaben beträgt der Anteil der Körnung 8/16 im Kies etwa 10 – 12 %[41] (entspr. 100 bis 120 kg/t; vgl. Pkt. 8). Folglich beläuft sich der Energieaufwand für **eine Tonne Kies** der Körnung **8/16** zwischen 292 MJ und 350 MJ; i.M. auf **~320 MJ.**

[37]Mettke, Angelika; Heyn, Sören: Ökologische Prozessbetrachtungen – RC-Beton (Stoffffluss, Energieaufwand, Emissionen) zum Forschungsprojekt: „Einsatz von Recycling-Material aus mineralischen Baustoffen Zuschlag in der Betonherstellung, 2010
[38]Ebenda S. 37
[39]5,5 t x 19,5 MJ/t = 107,3 MJ ~ 110MJ
[40]Eyerer, P. & Reinhardt, H.-W., Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden – Wege zur ganzheitlichen Bilanzierung, S.56
[41]Angaben der Elbekies GmbH

- **Synopse des energetischen Aufwandes für die Produktion von RC-GK im Vergleich zum Kies**

Unter Berücksichtigung des Anteils der Körnung 8/16 in der jeweilig produzierten Gesteinskörnung, erfordert die RC-GK im Vergleich zum Kies nur etwa ein Drittel an Energie (~35 %).

Da in der Literatur bisher dieser Aspekt bei ökologischen Betrachtungen nie herangezogen wurde, wird es zum ersten Male sehr deutlich, dass der Energieaufwand zur Herstellung der RC-GK - sortenreiner Betonbruch trocken aufbereitet - geringer ist als zur Produktion von Kies. Käme anstelle von Kies Splitt im Beton zum Einsatz, würde sich der energetische Aufwand um ein Vielfaches erhöhen. Für eine Tonne Splittproduktion beträgt der Energieaufwand 116 MJ[42] ohne Berücksichtigung der Korngrößenanteile.

- **Transportaufwendungen**

In nachfolgender Abb. 8-4 werden die Entfernungen für die Transporte der Gesteinskörnungen schematisch aufgezeigt.

Die Transportdistanz vom Abbruchobjekt zur RC-Anlage der Fa. HEIM Deponie & Recycling GmbH beträgt etwa 1 km. Der Transportbetonhersteller ist ca. 3 km von der RC-Anlage entfernt.

Abbildung 8-4: Darstellung der Transportwege

[42]Mettke, Angelika; Heyn, Sören: Ökologische Prozessbetrachtungen – RC-Beton (Stoffffluss, Energieaufwand, Emissionen) zum Forschungsprojekt: „Einsatz von Recycling-Material aus mineralischen Baustoffen Zuschlag in der Betonherstellung, 2010,S.42

Unter Nutzung der Datenbank vom Umweltbundesamt[43] ergeben sich unter dem Ansatz von 0,996 MJ/t*km (~1 MJ/t*km) für den LKW-Transport) **für 3 km LKW-Transport ~ 3 MJ** für **eine** zu transportierende **Tonne** Material.

Die Anlieferung des Kieses aus Mühlberg (Elbe) zum Transportbetonwerk CEMEX Deutschland AG, Werk Gehrenseestr. erfolgt in Kombination Bahn und LKW. Nach Recherchen beträgt die Strecke **per Bahn etwa 100 km und per LKW ~ 6 km**. Damit ergibt sich ein Transportenergieverbrauch von **18 MJ/t[44].**

- **Bewertung der energetischen Aufwendungen für die Bereitstellung der untersuchten Gesteinskörnungen**

In nachstehender Tab. 8-1 sind die ermittelten Energieaufwendungen zur Herstellung und zum Transport der Gesteinskörnungen resp. zur Bereitstellung dieser am Transportbetonwerk zusammengefasst.

Tabelle 8-1: Übersicht zu den Energieaufwendungen zur Bereitstellung der RC-GK und des Kieses (Werte gerundet)

Material	Herstellungsenergie [MJ/t]	Transportenergie [MJ/t]	Gesamtenergiebedarf [MJ/t]
RC-GK (8/16)	110	3	**113**
Kies (8/16)	320	18	**338**

In Abb. 8-5 sind die ermittelten Ergebnisse grafisch dargestellt.

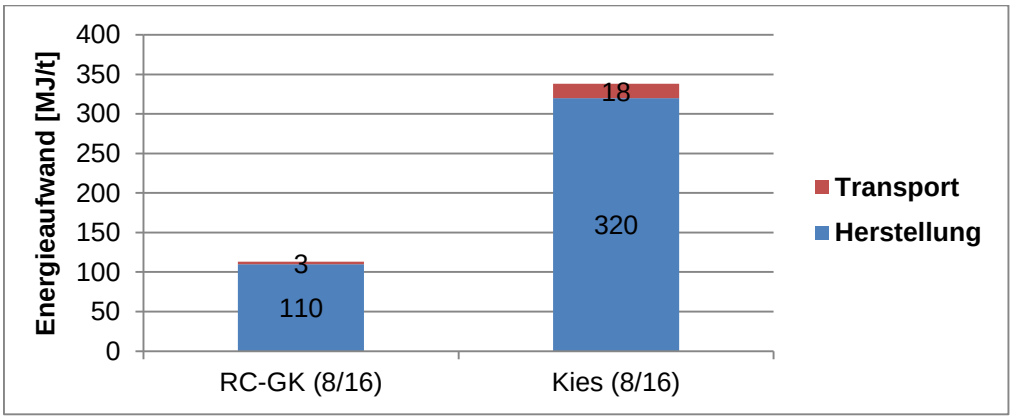

Abbildung 8-5: Energieaufwand zur Bereitstellung der rezyklierten und natürlichen Gesteinskörnung (8/16)

Im Ergebnis der Berechnungen wird festgestellt, dass sich nicht nur die kurzen Transportwege der RC-GK, sondern sich außerdem der energetische Aufwand zur Produktion der RC-GK

[43]www.probas.umweltbundesamt.de, aufgerufen am 27.02.2015

[44]www.probas.umweltbundesamt.de: 0,122 MJ/t*km (für Bahntransport) x 100 km + 0,996 MJ/t (für LKW-Transport) x 6 km = 12,2 MJ/t + 5,976 MJ/t = 18,176 MJ/t ~ 18 MJ/t

vorteilhaft gegenüber der Kiesbereitstellung auswirkt: die **Verwendung von Kies ist im Vergleich zur RC-GK-Bereitstellung deutlich energieaufwändiger.** Die Energieeinsparung ergibt sich hier zu 66 % bzw. beträgt nur etwa 1/3.

Der berechnete hohe energetische Aufwand für die Bereitstellung (Herstellung und Transport) von Kies resultiert aus der Berücksichtigung des nur ca. 10 – 12 %-igen Anteils der Körnung 8/16. Dieser Aspekt wurde im Vergleich zu den Untersuchungsergebnissen in der Literatur und auch den eigenen, welche z.B. im Projekt Boardinghouse in Ludwigshafen für Kies ermittelt wurden (82 MJ/t für Kiesbereitstellung), nicht in Erwägung gezogen. Daher liegt der energetische Aufwand für Kies auch bedeutend niedriger. Gleiches trifft für die RC-GK zu.

Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass die Menge und die Körnung der Rezyklate sowie die zu realisierenden Transportwege und eingesetzten Transportmittel entscheidend sind für die Höhe des energetischen Aufwandes. Insbesondere in Ballungsgebieten wie Berlin liegen hierzu günstige Voraussetzungen vor.

8.3 CO_2-Emissionen für die Bereitstellung der untersuchten Gesteinskörnungen

Aus den energetischen Aufwendungen ableitend (Pkt.8.2), lassen sich die CO_2-Emissionen berechnen. Folgende Datensätze wurden zur Bereitstellung der Betonausgangsstoffe zugrunde gelegt:

- für die Trockenaufbereitung **RC-GK** 8/16 **110 MJ/t** (Ansatz: 52% Strom, 48% Diesel[45]); s. Tab. 8-1,
- für **Kies 320 MJ/ t;** s. Tab. 8-1.

Die Berechnung der CO_2-Emissionen erfolgte auf der Grundlage der Daten der ProBas-Datenbank sowie dem o.a. Ansatz, dass der Anteil elektrisch betriebener Aggregate bei 52 % liegt und 48 % durch Diesel (Einsatz des Baggers zum Vorzerkleinern und des Radladers für den innerbetrieblichen Transport) betrieben werden. Die Berechnung ist in Tab. 8-2 dargestellt.

Tabelle 8-2: Berechnung der CO_2 Emissionen bei der Herstellung der RC-GK

Konventionelle Aufbereitung	Anteil Energieträger: Strom		Anteil Energieträger: Diesel		Gesamt
Durchsatz		57,2 MJ/t		52,8 MJ/t	110 MJ/t

[45]Mettke, Angelika; Heyn, Sören: Ökologische Prozessbetrachtungen – RC-Beton (Stoffffluss, Energieaufwand, Emissionen) zum Forschungsprojekt: „Einsatz von Recycling-Material aus mineralischen Baustoffen Zuschlag in der Betonherstellung, 2010, Tab. 11, S.37

CO_2-Emissionen	140 g/MJ[46]	8.008 g/t	11 g/MJ[47]	581 g/t	**8.589 g/t**

Die Emissionswerte der Kiesgewinnung betragen nach ProBas-Datenbank 7.460 g/t. Die Emissionen für den Transport berechnen sich wie folgt:

energetischer Aufwand des Transportmittels (MJ/t) x Emissionswert des Transportmittels (g/MJ) der jeweiligen Gesteinskörnung

Daraus folgt für die RC-GK: 3 MJ/t (s. Tab.8-1) x 11 g/MJ (ProBas) = 33 g/t;

für den Kies: 6 MJ/t für den Transport per LKW, 12 MJ/t für den Transport per Bahn:

6 MJ/t x 11 g/MJ + 12 MJ/t x 140 g/MJ = 1.746 g/t

In Tab. 8-3 sind die Ergebnisse zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 8-3: Gegenüberstellung CO_2-Emissionen bei der Produktion von 1 t Gesteinskörnung (8/16)

Art der Gesteinskörnung	Herstellung [g/t]	Transport [g/t]	Gesamt [g/t]
RC-GK (8/16)	8.589	33[48]	**8.622**
Kies (8/16)	7.460[49]	1.746[50]	**9.206**

Die Berechnung zeigt, dass bei der Produktion **einer Tonne RC-GK gegenüber dem Kies** eine **CO_2-Einsparung von ~ 0,6 kg** (rund 7 %) erzielt wird. Dies wird in Abb. 8-6 grafisch dargestellt.

[46]Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme (ProBas), Netz-el-DE-lokal-HH/KV-2015, http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id={C849B857-A7BA-454D-8371-A2AD6B3CFEF1} aufgerufen am 17.03.2015

[47]ProBas,TankstelleDiesel-DE-2020 (inkl. Bio), http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id={5C5F79A1-3CFC-4CEE-80C5-72986840D900} aufgerufen am 17.03.2015

[48]3MJ/t * 11 g/MJ CO_2 = 35 g CO_2 /t

[49]ProBas, Xtra-AbbauKies-DE-2020, http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id={805A535E-0242-4306-8B6C-A6BBEC27101E}, aufgerufen am 17.03.2015

[50]6 MJ/t * 11 g/MJ CO_2 + 12 MJ/t * 140 g/MJ CO_2= 1.746 g CO_2 /t

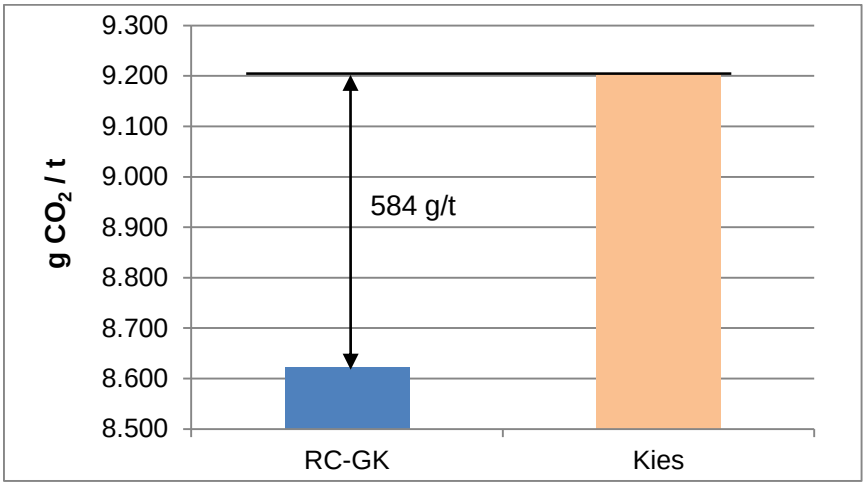

Abbildung 8-6: CO_2 Emissionen bei der Bereitstellung von 1 t Gesteinskörnung (8/16)

- **Bewertung der CO_2-Emissionen bei der Herstellung der RC-GK im Vergleich zur Kiesgewinnung**

Die berechneten CO_2-Emissionen spiegeln die Ergebnisse der energetischen Aufwendungen bei der Herstellung der RC-GK sowie dem Kies wieder. Die **Herstellung der rezyklierten Gesteinskörnung setzt im Vergleich zum Kiesabbau weniger CO_2-Emissionen frei.** Durch den Einsatz von **2.200 t RC-GK** zur Herstellung des RC-Betons **für die Tragkonstruktion konnten die CO_2-Emissionen um** etwa **1,3 t reduziert werden.** Die CO_2-Einsparungen sind auf die Verkürzung der Transportwege im städtischen Raum zurückzuführen. Ein adäquates Ergebnis – im Verhältnis betrachtet - haben die Untersuchungen in Ludwigshafen/Mannheim beim Bau des Gästewohnhauses[51] gezeigt.

8.4 Synopse der energetischen Aufwendungen von RC-Beton und Primärbeton

Bevor die energetischen Aufwendungen betrachtet werden, erfolgt eine Gegenüberstellung des eingesetzten RC-Betons mit dem zum Zeitpunkt der Baumaßnahme eingesetzten Primärbeton von der CEMEX Deutschland AG. In Abb. 8-7 ist diese direkte Gegenüberstellung der eingesetzten Ausgangsstoffe dargestellt.

[51]Mettke, Angelika; Heyn, Sören: Ökologische Prozessbetrachtungen – RC-Beton (Stoffffluss, Energieaufwand, Emissionen) zum Forschungsprojekt: „Einsatz von Recycling-Material aus mineralischen Baustoffen Zuschlag in der Betonherstellung, 2010, S.64

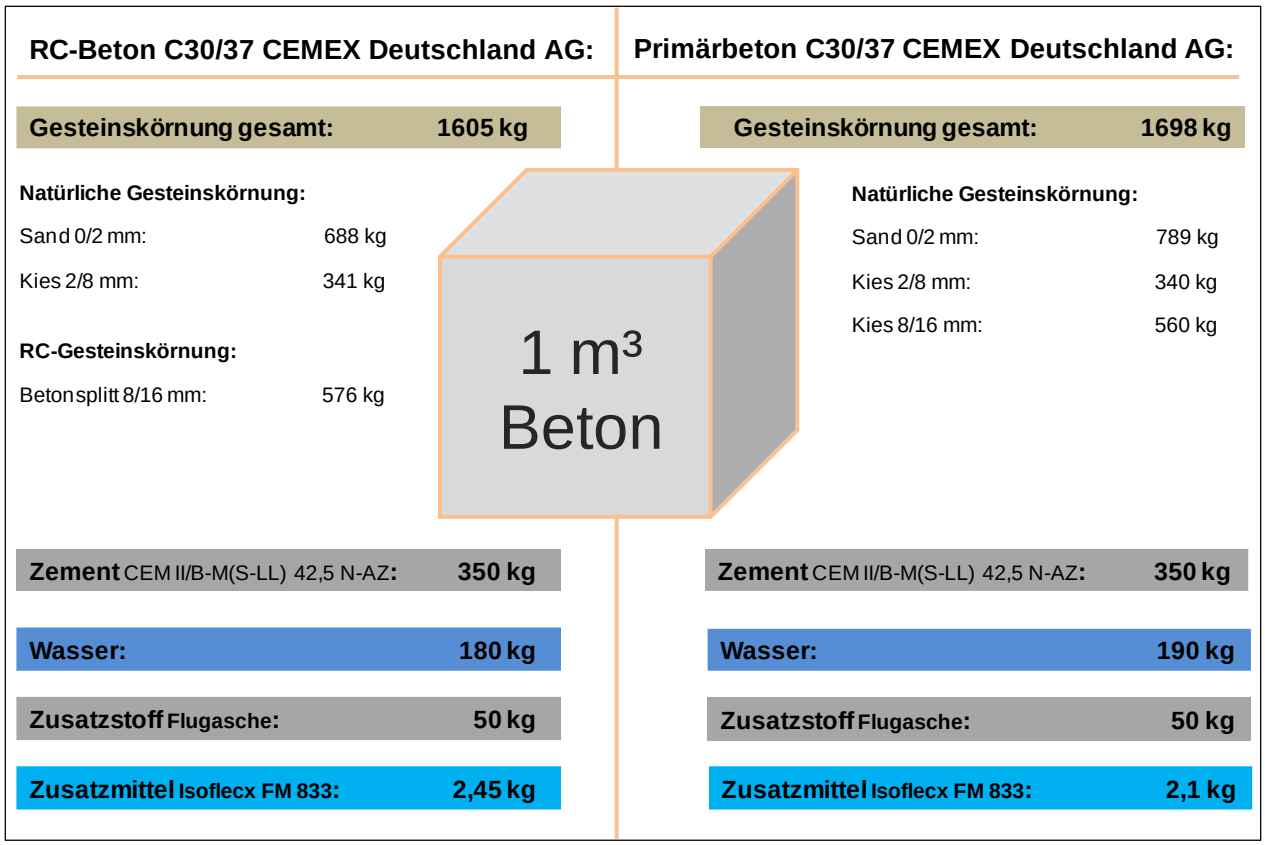

Abbildung 8-7: Gegenüberstellung Ausgangsstoffe RC-Beton / Primärbeton der CEMEX Deutschland AG für die Tragwerkskonstruktion

Nachfolgend werden die energetischen Aufwendungen für den RC-Beton dem o.a. Primärbeton gegenüber gestellt. Nachstehende Berechnung für Kies und die RC-GK erfolgt auf der Basis der ermittelten Daten in Pkt. 8.2. Alle weiteren Daten basieren auf der ÖKOBAUDAT Datenbank (s. Tab. 8-4).

Tabelle 8-4: Bereitstellungsaufwände der Ausgangsstoffe zur Herstellung von 1 m³ RC- und Primärbeton C30/37 der Fa. CEMEX Deutschland AG (Werte gerundet)

Ausgangsstoffe	Bereitstellungs-aufwand (Gewinnung und Transport) [MJ/t][52]	Zusammensetzung		Energieaufwand	
		RC-Beton [t/m³]	Primärbeton [t/m³][53]	RC-Beton [MJ/m³]	Primärbeton [MJ/m³]
Sand 0/2	153 (bei 40km Transport)	0,688	0,798	88	102
Kies 2/8	128 (bei 100km Transport)	0,341	0,34	52	52
Kies 8/16	**338**	**-**	**0,56**	**-**	**85**
RC-GK 8/16	**113**	**0,58**	**-**	**65**	**-**
Zement, Durchschnitt	3.447	0,35	0,35	1.214	1214
Flugasche	3.863	0,05	0,05	194	194
Zusatzmittel	30.830	0,00245	0,0021	76	65
Wasser		0,18	0,19	0	0
Gesamt				**1.689**	**1.712**

Im Ergebnis der Berechnungen ist feststellbar, dass der **energetische Aufwand für den RC-Beton C30/37 um 23 MJ/m³ (1,3 %) geringer** ist **gegenüber dem Primärbeton**. Grafisch lassen sich die Bereitstellungsaufwände zur Herstellung von 1 m³ RC-Beton im Vergleich zum Primärbeton wie folgt darstellen:

[52] Daten aus ÖKOBAUDAT Datenbank des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
[53] nach Angaben der CEMEX Deutschland AG

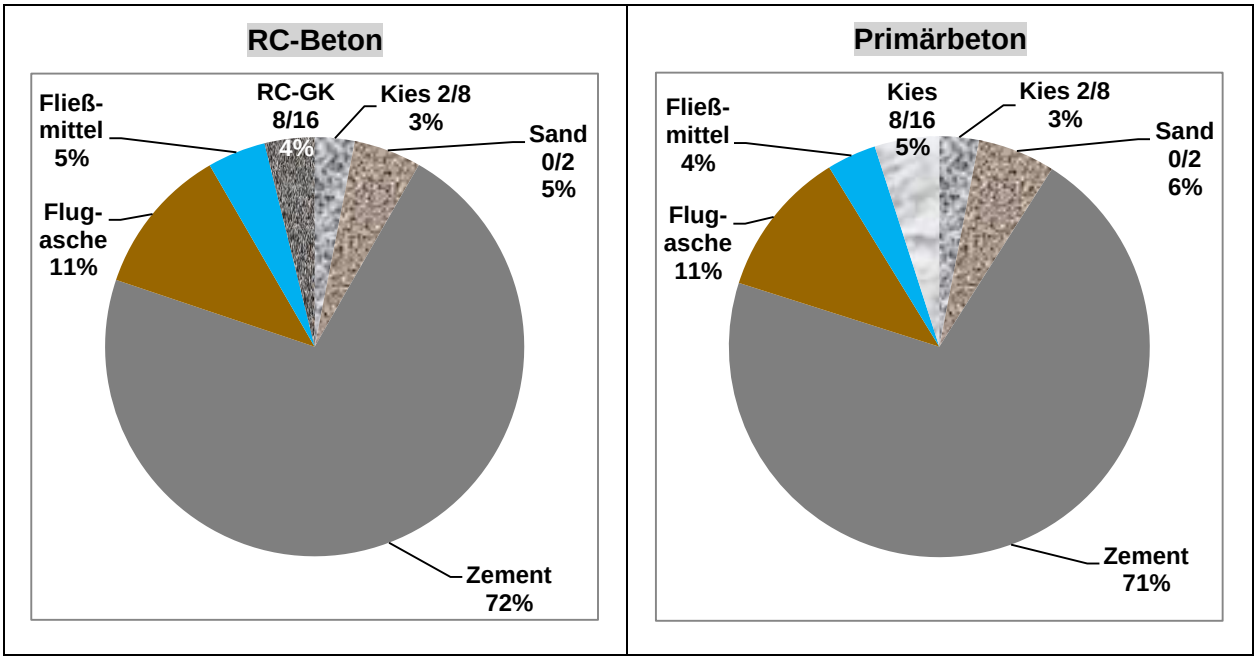

Abbildung 8-8: Gegenüberstellung Bereitstellungsaufwand zur Herstellung 1 m³ RC-Beton und Primärbeton

Zu erkennen ist, dass – bekanntermaßen - der Großteil der Energie (jeweils rund 70 %) für den Ausgangsstoff Zement aufgewendet wird. Die Bereitstellung der RC-GK bzw. des Kieses beläuft sich auf lediglich 4 bzw. 5 %. Generell lässt sich sagen, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den energetischen Aufwendungen des RC-Betons und Primärbetons bestehen.

- **Bewertung der energetischen Aufwendungen von RC-Beton gegenüber Primärbeton**

Der RC-Beton kann im Vergleich zum Primärbeton mit weniger Energie (23 MJ/m³) hergestellt werden. Dieses Ergebnis gleicht etwa bspw. dem Ergebnis der Untersuchungen in Ludwigshafen „Leuchtturmprojekt“[54]. Dort konnten 11 MJ/m³ eingespart werden.

8.5 Synopse von RC-Beton gegenüber Primärbeton

Nachfolgend werden die CO_2- Emissionen für den RC-Beton dem o.a. Primärbeton gegenüber gestellt. Nachstehende Berechnung für Kies und die RC-GK erfolgt auf der Basis der ermittelten Daten in Pkt. 8.3. Alle weiteren Daten basieren auf der ÖKOBAUDAT Datenbank (s. Tab. 8-5).

[54]Mettke, Angelika; Heyn, Sören: Ökologische Prozessbetrachtungen – RC-Beton (Stoffffluss, Energieaufwand, Emissionen) zum Forschungsprojekt: „Einsatz von Recycling-Material aus mineralischen Baustoffen Zuschlag in der Betonherstellung, 2010, S.47: Die Differenz der Ergebnisse resultieren aus der Verwendung unterschiedlicher Datenbanken. Im hier vorliegenden Bericht wurde auf die aktuelle ÖKOBAUDAT zurückgegriffen; im angeführten Bericht wurden Daten aus nachhaltiges-bauen.de und ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbeton (BTB, 2007) verwendet.

Tabelle 8-5: Darstellung der Emissionen bei der Herstellung von 1 m³ RC- und Primärbeton

Ausgangsstoff	Entstehende CO_2-Emissionen [g/t] [55]	RC-Beton [g/m³]		Primärbeton [g/m³]	
		Zusammensetzung [t/m³]	CO_2-Emissionen [g/m³]	Zusammensetzung [t/m³]	CO_2-Emissionen [g/m³]
Sand 0/2	8.773	0,688	6.036	0,798	7.000
Kies 2/8	8.773	0,341	2.992	0,34	2.982
RC-GK (8/16)	8.622	0,576	4.966	-	-
Kies 8/16	9.206	-	-	0,56	5.155
Flugasche	269.400	0,05	13.470	0,05	13.470
Zement	761.500	0,35	256.025	0,35	256.025
Gesamt CO_2-Emission [g/m³]			**283.489**		**284.634**

Zu erkennen ist, dass bei der **Herstellung von RC-Beton** im Vergleich zum Primärbeton **geringere CO_2-Emissionen freigesetzt werden**.

In Abb. 8-9 werden die berechneten CO_2-Emissionen des RC-Betons und des Primärbetons grafisch dargestellt.

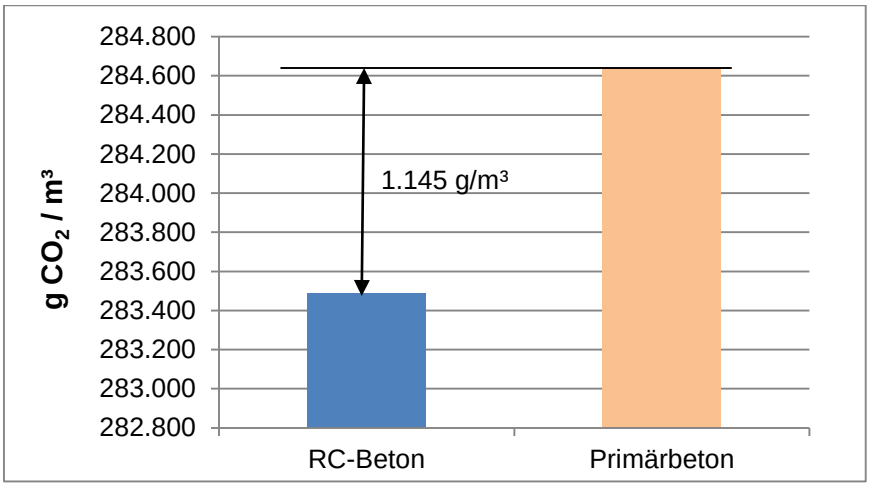

Abbildung 8-9: CO_2 -Emissionen bei der Herstellung von 1 m³ RC- und Primärbeton

[55] Ermittlung der Daten aus ÖKOBAUDAT Datenbank des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

- **Bewertung der CO_2-Emissionen bei der Herstellung von RC-Beton und Primärbeton**

Für **ein Kubikmeter RC-Beton können CO_2- Einsparungen in Höhe von rund 1 kg** dokumentiert werden. Diese Einsparungen resultieren zum einen aus der eingesetzten RC-GK, zum anderen aus dem geringeren Sandanteil im Vergleich zum Primärbeton. **Insgesamt wurden durch die Verwendung von ~ 3.800 m³ RC-Beton in der Tragwerkskonstruktion 4,4 t CO_2 im Vergleich zum Primärbeton eingespart.**

Grundlegend ist, dass bei der Herstellung von RC-Beton gegenüber dem Primärbeton weniger Emissionen ausgestoßen werden.

8.6 Flächeninanspruchnahme

Für die Ermittlung der Flächeninanspruchnahme werden Daten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) zugrunde gelegt. Als Zuschlagstoffe zur Betonherstellung kommen Kiese u./o. gebrochene Natursteine zum Einsatz. In unserem untersuchten Fall sind Kiese zum Einsatz gekommen. Die mit dem Kiesabbau bedingte Flächeninanspruchnahme hängt von der Abbaumächtigkeit ab. Nach Angaben des Bundesverbands der deutschen Sand- und Kiesindustrie liegt bei durchschnittlicher flächenmäßiger Betrachtung für den Kiesabbau die Abbautiefe bei rund acht Metern und damit die Ausbeute bei 15 t/m². Im Einzelfall können jedoch bei einigen Abbaugebieten auch Abbautiefen von über 40 Metern erreicht werden. Durchschnittlich haben Kiestagebaue eine Flächenausdehnung von 50 bis 300 Meter. Die Kiesausbeute nach BGR von 27 t/m² entspricht einer Abbaumächtigkeit von 15 Metern.

Unter dem Ansatz der Kiesausbeute von 27 t Kies pro m² und unter Berücksichtigung, dass der Anteil der Fraktion 8/16 bei natürlichen Kiesvorkommen lediglich 10 – 12 % ausmacht, ergibt sich für das Pilotprojekt in Berlin folgende Berechnung:

Der Anteil der Fraktion 8/16 beläuft sich auf rund 3,24 t/m² (entspricht 12 % von 27 t/m²).

Bei der Errichtung der Schlitzwand kamen insgesamt ca. 667 t RC-GK 8/16 und bei der Erstellung des Tragwerks 2190 t RC-GK 8/18 zum Einsatz. Daraus ergibt sich insgesamt eine Flächenersparnis in Höhe von ca. 880 m² (2857 t RC-GK 8/16 dividiert durch 3,24 t/m²). Nachstehende Tab. 8-6 gibt die o.a. Werte zur Nichtinanspruchnahme resp. Einsparung an Fläche durch den Einsatz von RC-Beton beim Pilotprojekt „Neubau des Forschungs- und Laborgebäudes der HU Berlin“ im Überblick wieder.

Tabelle 8-6: Übersicht vermiedener Flächeninanspruchnahme durch den Einsatz von RC-Beton

	Schlitzwand	**Tragwerk**	**Pilotprojekt insgesamt**
Einsatz RC-GK 8/16	667 Mg	2.190 Mg	2.857 Mg
Flächeneinsparung bei 3,24 Mg Kies der Körnung 8/16 pro m²	~ 206 m²	~ 676 m²	**~ 882 m²**

Durch die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen anstelle von Kies **im Beton** wurde eine **Abbaufläche von ~ 880 m² geschont** resp. nicht in Anspruch genommen.

9 Empfehlungen für den Einsatz von RC-Beton im Hochbau

Mit der Errichtung des ersten „Pilotprojektes“ zum Einsatz von RC-Beton in Berlin wurde ein Grundstein für die hochwertige Verwertung mineralischer Bauabfälle und damit auch ein Beitrag für das nachhaltige Bauen im Öffentlichen Hochbau gelegt. Um den Einsatz von RC-Beton nachhaltig in der Region Berlin zu verankern, ist die Umsetzung der im Folgenden aufgeführten Empfehlungen essentiell.

- Nachfrage

Ständige Nachfrage der öffentlichen Auftraggeber durch Ausschreibung von RC-Beton für den Hochbau. Durch die Verwaltungsvorschrift Beschaffung und Umwelt – VwVBU besitzt das Land Berlin ein geeignetes Umsetzungsinstrument. Sobald die RC-Gesteinskörnung wieder ohne Zustimmung im Einzelfall bzw. bauaufsichtliche Zulassung (Umweltverträglichkeit) normiert ist, soll ein entsprechendes Leistungsblatt in die VwVBU einfließen. Dadurch könnten perspektivisch pro Jahr rund 100.000 m^3 Primärbeton durch RC-Beton ersetzt werden.

- Markt RC-Beton

Im Ergebnis der v.a. wirtschaftlichen Betrachtung wurde deutlich, dass sich die Produktion von rezyklierten Betonlieferkörnungen erst bei einem **Absatz größerer Mengen** rentiert. Dies gilt ebenso für den Transportbetonproduzenten, für den die Errichtung zusätzlicher Aufgabebunker erst bei **kontinuierlicher Abfrage** von RC-Beton wirtschaftlich vertretbar ist. Durch die o.g. Nachfrage könnten künftig die öffentlichen Bauvorhaben in Berlin gezielt produktneutral ausgeschrieben werden. Auf diesem Weg kann einerseits RC-Beton erfolgreich am Markt platziert werden. Andererseits entspricht dies den Forderungen der Beschaffungsrichtlinie, auch und gerade - aufgrund der Massenrelevanz - im Bausektor nachhaltig mit den natürlichen Ressourcen umzugehen.

- Bauprodukt RC-Beton

Die Novellierung der DIN 4226-100: Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel, Teil 100: „Rezyklierte Gesteinskörnungen“ ist unabdingbar, um die „Regelungslücke“ zur Verwendung von RC-Gesteinskörnungen im Beton zu schließen. Die derzeit erforderliche Zustimmung im Einzelfall (ZiE) oder allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) kostet nicht nur Geld und Zeit, sondern hält die am Bau beteiligten Akteure ab, RC-Beton herzustellen bzw. zu verbauen. Sobald RC-Beton wieder als geregeltes Bauprodukt in der Bauregelliste A des Deutschen Instituts für Bautechnik geführt wird, ist davon auszugehen, dass die derzeit bestehenden Hemmnisse hinfällig sind.

- Öffentlichkeitsarbeit

Die Transparenz der Ergebnisse: der erfolgreiche Einsatz von RC-Beton zum Bau der Schlitzwand als Dichtungswand und im Hochbau als Konstruktionsbeton ist wichtig, um die beteiligten Akteure (Bauherren, Planer, Recycler, Betonproduzenten, Laboranten etc.) zu motivieren, viele weitere „Leuchttürme“ in Berlin zu errichten. Dies kann in Form von Beiträgen in Fachzeitschriften, Weiterbildungsveranstaltungen, Fachtagungen und dgl. erfolgen. Außerdem wird angeregt, die im Rahmen dieses Projektes gesammelten Erfahrungen öffentlich über eine Internetplattform publik bzw. zugänglich zu machen.

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Gegenüberstellung beider Bauabschnitte hinsichtlich beteiligter Akteure und Materialeinsatz 6

Abbildung 4-1: Überblick zu europäischen Produktnormen / deutsche Fassung und zu den mitgeltenden deutschen Normen und Regelwerken zur Verwendung von RC-Gesteinskörnungen zur Herstellung von Beton [Mettke] 10

Abbildung 4-2: Synopse Zusammensetzung Primärbeton mit RC-Beton [Mettke] 12

Abbildung 5-1: RC-GK 8/16 der EUROVIA Industrie GmbH, Liefertyp 1 [Schmidt, 04.11.2013] 19

Abbildung 5-2: Herstellung eines Betonprüfkörpers zur Bestimmung der Frisch- und Festbetonrohdichte sowie der Druckfestigkeit [Mettke, 04.11.2013] 23

Abbildung 5-3: links: Bestimmung des Ausbreitmaßes im Betonwerk [Mettke, 04.11.2013] und rechts: Bestimmung des Ausbreitmaßes auf der Baustelle [Schmidt, 22.11.2013] 23

Abbildung 5-4: RC-Beton im Luftporentopf in Vorbereitung der Bestimmung des Luftporengehaltes [Mettke, 04.11.2013] 23

Abbildung 5-5: Bestimmung des Luftporengehaltes [Mettke, 04.11.2013] 23

Abbildung 5-6: Betonage eines Schlitzwandabschnittes [Schmidt, 04.11.2013] 24

Abbildung 5-7: Fertige Schlitzwand, [Mettke, 22.02.2014 und 05.03.2014] 24

Abbildung 5-8: Aufgebrochener Schlitzwandbeton [Jacob, 25.07.2014] 25

Abbildung 6-1: RC-GK 8/16 der HEIM Deponie Recycling GmbH [Schmidt, 07.04.2014] 30

Abbildung 6-2: Schnitt durch RC-Beton-Prüfkörper [Jacob, 17.11.2014] 33

Abbildung 8-1: Überblick zur Herstellung von Primärbeton im Vergleich zum und RC-Beton 37

Abbildung 8-2: Fließbild der Aufbereitung der Fa. HEIM Deponie & Recycling GmbH [Jacob in Abstimmung mit Fa. HEIM Deponie & Recycling GmbH] 40

Abbildung 8-3: Stoffstrom der Aufbereitung nach Angaben der Fa. HEIM Deponie & Recycling GmbH 40

Abbildung 8-5: Darstellung der Transportwege 44

Abbildung 8-6: Energieaufwand zur Bereitstellung der rezyklierten und natürlichen Gesteinskörnung (8/16) 45

Abbildung 8-7: CO_2 Emissionen bei der Bereitstellung von 1 t Gesteinskörnung (8/16) 48

Abbildung 8-8: Gegenüberstellung Ausgangsstoffe RC-Beton / Primärbeton der CEMEX Deutschland AG für die Tragwerkskonstruktion 49

Abbildung 8-9: Gegenüberstellung Bereitstellungsaufwand zur Herstellung 1 m³ RC-Beton und Primärbeton 51

Abbildung 8-10: CO_2 -Emissionen bei der Herstellung von 1 m³ RC- und Primärbeton 52

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Übersicht zu den max. zulässigen Anteilen an RC-Gesteinskörnungen in Abhängigkeit der Anwendungsbereiche (Expositions- und Feuchtigkeitsklassen) des RC-Betons inkl. ausgewählter bautechnischer Regelanforderungen [Mettke] 11

Tabelle 4-2: Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung nach DIN EN 12620:2008-07, ... 12

Tabelle 5-1: Ausgewählte Daten zur Schlitzwand 15

Tabelle 5-2: Anforderungen an die Zusammensetzung und die Eigenschaften des Schlitzwandbetons 17

Tabelle 5-3: Untersuchungsergebnis der stofflichen Kennzeichnung der RC-GK 17

Tabelle 5-4: Bautechnische Untersuchungsergebnisse der RC-GK 8/16 mm [Bolab Analytik Ingenieurgesellschaft mbH, Prüfbericht Nr. 13 – 18180/2 vom 1.10.2013] 18

Tabelle 5-5: Ergebnisse der Bewertung der Umweltverträglichkeit [Bolab Analytik Ingenieurgesellschaft mbH, Prüfbericht Nr. 13 – 18180/2 vom 1.10.2013] 19

Tabelle 5-6: Betonrezeptur für den Schlitzwandbeton 20

Tabelle 5-7: Geprüfte Parameter im Rahmen der erweiterten Erstprüfung [Mischungsberechnungen vom 27.09.2013, erstellt durch die Prüfstellenleiterin Frau Dipl.-Ing. Krüger der TBR Technologiezentrum GmbH & Co.KG] 22

Tabelle 6-1: Anforderungen an die Zusammensetzung und die Eigenschaften des Frisch- und Festbetons 27

Tabelle 6-2: Ergebnis der stofflichen Kennzeichnung [Bolab Analytik Ingenieurgesellschaft mbH, Prüfbericht Nr. 14 – 19746-1 vom 03.02.2014 sowie vom 27.03.2014] 27

Tabelle 6-3: Bautechnische Untersuchungsergebnisse der RC-GK 8/16 mm [Bolab Analytik Ingenieurgesellschaft mbH, Prüfbericht Nr. 14 – 19746-1 vom 03.02.2014] 27

Tabelle 6-4: Ergebnisse der Bewertung der Umweltverträglichkeit [Bolab Analytik Ingenieurgesellschaft mbH, Prüfbericht Nr. 14 – 19746-1 vom 03.02.2014 sowie vom 27.03.2014] 29

Tabelle 6-5: Betonrezeptur für die Tragwerkskonstruktion 31

Tabelle 6-6: Geprüfte Parameter im Rahmen der erweiterten Erstprüfung, Betonprüfergebnisse nach DIN EN 12350 und DIN EN 12390 [Prüfstelle E Berlin der CEMEX Deutschland AG vom 11.04.2014] 32

Tabelle 8-1: Übersicht zu den Energieaufwendungen zur Bereitstellung der RC-GK und des Kieses (Werte gerundet) 45

Tabelle 8-2: Berechnung der CO_2 Emissionen bei der Herstellung der RC-GK 46

Tabelle 8-3: Gegenüberstellung CO_2-Emissionen bei der Produktion von 1 t Gesteinskörnung (8/16) 47

Tabelle 8-4: Bereitstellungsaufwände der Ausgangsstoffe zur Herstellung von 1m³ RC- und Primärbeton C30/37 der Fa. CEMEX Deutschland AG (Werte gerundet) 50

Tabelle 8-5: Darstellung der Emissionen bei der Herstellung von 1 m³ RC- und Primärbeton 52

Tabelle 8-6: Übersicht vermiedener Flächeninanspruchnahme durch den Einsatz von RC-Beton 54

12 Abkürzungsverzeichnis

abZ	allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
AWK	Abfallwirtschaftskonzept
AKR	Alkali-Kieselsäure-Reaktion
Abschn.	Abschnitt
Abb.	Abbildung
BauO Bln	Bauordnung Berlin
DAfStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
DIBT	Deutsches Institut für Bautechnik
Fa.	Firma
FBL	Fläming Baustoff Labor GmbH
GK	Gesteinskörnung
HU	Humboldt Universität
hydr.	hydrologisch
Kap.	Kapitel
lfd. Nr.	laufende Nummer
Pkt.	Punkt
QS	Qualitätssicherung
RC	Recycling
RC-GK	rezyklierte Gesteinskörnung
Rili	Richtlinie
Tab.	Tabelle
TVA	Technische Verordnung über Abfälle
Vgl.	Vergleich
WPK	Werkseigene Produktkontrolle
ZiE	Zustimmung im Einzelfall

13 Literaturverzeichnis

Bolab Analytik Ingenieursgesellschaft mbH: Prüfbericht Nr. 14 – 19746/1, vom 03.02.2014

Bolab Analytik Ingenieursgesellschaft mbH: Prüfbericht Nr. 14 – 19746/1, vom 27.03.2014

Bolab Analytik Ingenieursgesellschaft mbH: Prüfbericht Nr. 13 – 18180/2, vom 01.10.2013

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Steine- und Erden-Rohstoffe in der Bundesrepublik Deutschland, Geologisches Jahrbuch, Sonderhefte, Heft SD 10; Hannover 2012

Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (BTB): Ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbeton, 2007

CEMEX Deutschland AG: Daten der WPK, vom 10.09.2014

CEMEX Deutschland AG: Mischungsberechnung Primärbeton C30/37

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V.: Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Ausgabe September 2010, Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V.: Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkali-Reaktion im Beton“, Ausgabe Februar 2007

DIN 1045-2:2008-08, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1

DIN 4226-100:2002-02: Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel - Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen

DIN EN 206:2014-07, Beton – Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013

DIN EN 12620:2008-07, Gesteinskörnungen für Beton; Deutsche Fassung EN 12620:2002+A1:2008

Eyerer, P. & Reinhardt, H.-W., Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden – Wege zur ganzheitlichen Bilanzierung, 2000, S.56, Birkhäuser Verlag

Fläming Baustoff Labor GmbH: Daten der Fremdüberwachung, vom 03.03.2014

HeidelbergCEMENT: Betontechnische Daten, Ausgabe 2014

http://de.wikipedia.org/wiki/Kiesabbau_Mittelweser, aufgerufen am 25.02.2015

http://www.geobasis-bb.de/GeoPortal1/produkte/fachkarten/lbgr/pdf/4_Geoatlas_Thieke_50-51.pdf, aufgerufen am 25.02.2015

http://www.nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/, aufgerufen am 18.03.2015

http://www.oekobaudat.de/datenbank/browser-oekobaudat.html, aufgerufen am 18.03.2015

http://www.probas.umweltbundesamt.de, aufgerufen am 27.02.2015

Hoffmann, Cathleen; Figi, Renato; Blüm, Werner: Umweltrelevanz bei der Wiederverwendung von Bauabfällen, aus Recyclingbeton werden kaum Schadstoffe ausgewaschen, in: UMWELTPRAXIS NR.45/ Juli 2006

Mellwitz, Roland; Fuhrmann, Bert; Krüger, Elke: Recyclingbeton – Berliner Pilotprojekt zur Förderung einer abfallarmen Kreislaufwirtschaft, in: Das bundesweite Baumagazin, Ausgabe Mai 2014, S.22 – 24

Mettke, Angelika; Heyn, Sören: Ökologische Prozessbetrachtungen – RC-Beton (Stoffffluss, Energieaufwand, Emissionen) zum Forschungsprojekt: „Einsatz von Recycling-Material aus mineralischen Baustoffen Zuschlag in der Betonherstellung, gefördert von der DBU, FKZ: AZ 26101-23, 2010

Norbert K. Peter: Lexikon Bautechnik – 15.000 Begriffsbestimmungen, Erläuterungen und Abkürzungen, 2005, S. 392, VDE Verlag

Prüfstelle E Berlin der CEMEX Deutschland AG: Betonprüfergebnisse nach DIN EN 12350 und DIN EN 12390, datiert vom 11.04.2014, unterzeichnet durch den Prüfstellenleiter Hölzgen

Scholz, Wilhelm; Hiese, Wolfram: Baustoffkenntnis, Werner Verlag, 15. Auflage, 2003

Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein: SIA-Merkblatt 2030 „Recyclingbeton“, 2010

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt: Auftragsbekanntmachung des Bauauftrages Schlitzwand vom 24.05.2013

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt: Auftragsbekanntmachung des Bauauftrages Tragwerk vom 26.07.2013

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt: Akteursschreiben an Baustoffrecyclingunternehmen und Lieferanten „Zum Einsatz von RC-Beton in Hochbauvorhaben“ vom 03.12.2012

Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz: Abfallwirtschaftskonzept für das Land Berlin - Planungszeitraum 2010 bis 2020 - nach Zustimmung des Abgeordnetenhauses vom 12. Mai 2011

TBR Technologiezentrum GmbH & Co.KG: Mischungsberechnungen RC-Schlitzwandbeton, datiert vom 27.09.2013, unterzeichnet durch den Prüfstellenleiter Krüger

Vogt, Regine; Reinhardt, Joachim: Stoffstrom-, Klimagas- und Umweltbilanz 2012 für die Nutzung von Berliner Abfällen als Ressource, Endbericht, Heidelberg Okt. 2013

Zech, Ruth; Planungsunterlage: Baugrubenstatik, Teil 1, Ingenieurservice Grundbau GmbH vom 06.09.2013