



Bericht zum Einsatz von RC-Beton beim Bauvorhaben „Neubau PEGASUS, Praktikums- und Laborgebäude für das Institut Biochemie der Universität Stuttgart“

Externe wissenschaftliche Bearbeitung:

Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg
Fakultät 2 Umwelt und Naturwissenschaften
Arbeitsgebiet Bauliches Recycling

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Angelika Mettke
Dipl.-Ing. Stephanie Schmidt

Cottbus, Januar 2017

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	4
1 Angaben zum Bauvorhaben	5
2 Aufgabenstellung / Zielsetzung	6
3 Ausschreibung zum Einsatz von RC-Beton (Auszug).....	7
4 Methodisches Vorgehen	8
5 Bautechnische und umweltverträgliche Anforderungen an RC-Beton inkl. der eingesetzten RC-GK.....	10
6 Errichtung des Tragwerks für den Neubau „Pegasus“	19
6.1 Allgemeines.....	19
6.2 Rezyklierte Gesteinskörnung der Fa. Heinrich Feeß GmbH & Co. KG	20
6.3 Bewertung des RC-Splitts Typ 1 der Firma H. Feeß GmbH & Co. KG	23
6.4 RC-Beton der Transportbeton Waiblingen GmbH & Co. KG	27
6.5 Bewertung der RC-Betone der Transportbeton Waiblingen GmbH & Co. KG	30
6.6 Einbau des RC-Betons bei der Herstellung des Tragwerks	32
7 Stoffflussbetrachtung	35
8 Zusammenfassung und Ausblick	39
9 Anhang	44
9.1 Zusammenfassende Darstellung der Frisch- und Festbetonuntersuchungen an den RC-Betonen.....	44
9.2 Gegenüberstellung von Zuordnungs- / Grenzwerten für die Verwertung von mineralischen Abfällen (Bauschutt) anhand verschiedener Regelwerke	45
9.3 Hinweise zur Überwachung der Betonqualität auf der Baustelle.....	46
10 Literaturverzeichnis.....	49

Abkürzungsverzeichnis

abZ	allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
AKR	Alkali-Kieselsäure-Reaktion
AN	Auftragnehmer
DAfStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
EG	Erdgeschoss
OG	Obergeschoss
RC-Beton	Recycling-Beton resp. ressourcenschonender Beton; gleichbedeutend mit Beton unter Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung > 2 mm
RC-GK	rezyklierte Gesteinskörnung
UBA	Universitätsbauamt
UG	Untergeschoss
VBBW	Vermögen und Bau Baden-Württemberg
ZiE	Zustimmung im Einzelfall

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Stufen des Bauablaufs Bauvorhaben Neubau „Pegasus“ [Universitätsbauamt Stuttgart und Hohenheim, Bauwerk 28221200, Plan- Nr. A101 Übersicht Ansichten, 22.04.2015]	5
Abbildung 2: Zeitlicher Ablauf der im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung durchgeführten Maßnahmen.....	8
Abbildung 3: Prüfschema gemäß DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton“, Schlusssentwurf 03. Juni 2013, S. 34, ergänzt um Angaben zur Fremdüberwachung	16
Abbildung 4: GF Walter Feeß mit RC-GK Liefertyp 2 [Foto: Mettke]	20
Abbildung 5: Schüttgutlager Fa. Heinrich Feeß GmbH & Co. KG [Foto: Mettke, 10.11.2015]	20
Abbildung 6: sortenreiner Betonbruch [Foto: Mettke, 10.11.2015]	20
Abbildung 7: Fließschema Aufbereitungsprozess RC-Splitt Typ 1 [Schmidt]	21
Abbildung 8: Rezyklierte Gesteinskörnung Liefertyp 1 [Aufnahme vom 10.11.2015, Mettke]	21
Abbildung 9: Auszug aus der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung der RC-Splitt Typ 1 und Typ 2.....	22
Abbildung 10: Aufnahme vom Rohbau zum Zeitpunkt der Abnahme [Foto: Wanner].....	28
Abbildung 11: Betonkunst im Bereich Treppenhaus [Foto: Wanner]	28
Abbildung 12: Betonkunst – Waschbeton (links) und Wandrelief (rechts)	29
Abbildung 13: Probenahme aus der laufenden Produktion (links), Bestimmung des Ausbreitmaßes (Mitte), Herstellung von Probekörpern zur Bestimmung der Druckfestigkeit (rechts) [Foto: Mettke, 14.01.16,].....	31
Abbildung 14: Betonierarbeiten bei der Errichtung des Tragwerks.....	32
Abbildung 15: Ausbreitmaße des RC-Betons über die gesamte Lieferzeit	33
Abbildung 16: Druckfestigkeiten des RC-Betons	33
Abbildung 17: Synopse Zusammensetzung Primär- mit RC-Beton [Mettke].....	35
Abbildung 18: Produktionsablauf zur Aufbereitung von Muschelkalk	35
Abbildung 19: Systemgrenze zur Herstellung von RC-Beton	36
Abbildung 20: Transportdistanzen zwischen Recyclinganlage, Betonwerk und Baustelle [Auszug google maps]	37
Abbildung 21: Potenzielle Transportbetonproduzenten und Lieferanten von RC-GK für Beton im Raum Stuttgart – Ergebnis einer Telefonumfrage / Momentaufnahme Stand 7. KW 2017	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Empfehlungen zur Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen im Beton in Abhängigkeit der Anwendungsbereiche gemäß DAfStb-Richtlinie [Mettke]	10
Tabelle 2: Stoffliche Zusammensetzung von RC-GK Liefertyp 1 und 2.....	12
Tabelle 3: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton [Auszug aus Alkali-Richtlinie Tab. 6, S. 22]	17
Tabelle 4: Zu prüfende Parameter an RC-GK für den Einsatz im Beton	17
Tabelle 5: Bewertung der Inhaltsstoffe rezyklierter Gesteinskörnungen – Höchstwertegemäß DIN 4226-100, Anhang G	18
Tabelle 6: Anforderungen an die Zusammensetzung und die Eigenschaften des Frisch- und Festbetons [Schmidt].....	19
Tabelle 7: Soll-Ist-Vergleich der stofflichen Zusammensetzungen der rezyklierten Gesteinskörnungen Typ 1, 2/16 mm	23
Tabelle 8: Soll-Ist-Vergleich der chemischen und physikalischen Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnungen Typ 1, 2/16 mm.....	24
Tabelle 9: Soll-Ist-Vergleich der Parameter zur Bewertung der Umweltverträglichkeit der rezyklierten Gesteinskörnungen Liefertyp 1, 2/16 mm.....	26
Tabelle 10: Betonrezepturen der RC-Betone	27
Tabelle 11: Ergebnisse der erweiterten Erstprüfungen der RC-Betone 37h23C4 und 37h63C4	30
Tabelle 12: Untersuchungsergebnisse der RC-Betone der Qualitätsüberwachung auf der Baustelle	32

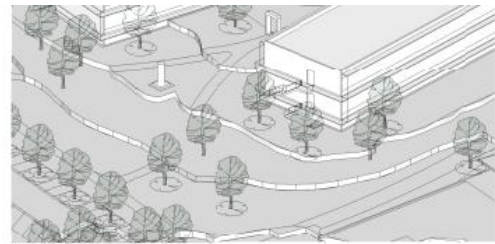
1 Angaben zum Bauvorhaben

Der Neubau „Pegasus“ – **Praktikumsergänzungsgebäude** **Ausbau Universität Stuttgart** - ist ein 3-geschossiger Anbau zur Erweiterung des Instituts für Bioverfahrenstechnik auf dem Campus der Universität Stuttgart-Vaihingen. Der Anbau an das bestehende Institutsgebäude erfolgt auf der Süd/Westseite (siehe nebenstehende Abbildung 1).

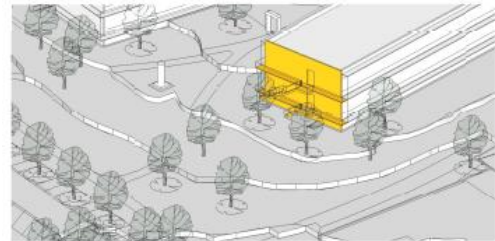
Bauherr ist der Landesbetrieb Vermögen und Bau Baden-Württemberg (VBBW), vertreten durch das Universitätsbauamt (UBA) Stuttgart und Hohenheim in 70569 Stuttgart (Vaihingen).

Die Größe des Anbaus beläuft sich auf ca. 7.345 m³ Bruttorauminhalt (BRI), verteilt auf 3 Geschosse (UG, EG und OG) mit je ca. 560 m², d.h. einer gesamten Bruttogeschossfläche von ~1683 m².

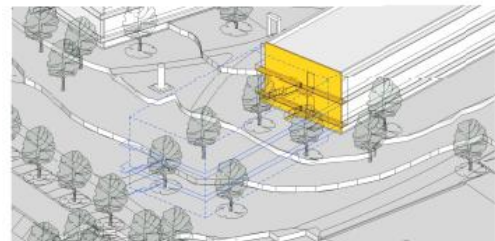
Innovativ bei diesem Bauvorhaben ist, dass ab Oberkante Decke Untergeschoss für die Errichtung des Tragwerks erstmalig Recycling-Beton (kurz RC-Beton) einzusetzen ist bzw. zum Einsatz kam. Insgesamt wurden ca. 500 m³ RC-Beton der Festigkeitsklasse C30/37, der einen Anteil von 45 Vol.-% rezyklierter Gesteinskörnung enthält, verbaut.



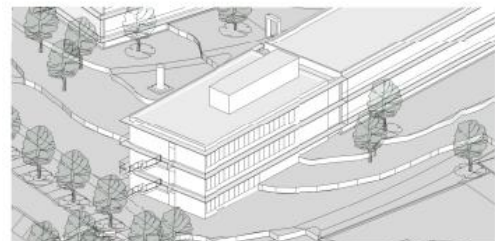
1 - BESTAND



2 - ABBAU BESTEHENDEN FLUCHTTREPPE UND FASSADE



3 - ERGÄNZUNGSSCHEMA



4 - ENTWURF PEGASUS

Abbildung 1: Stufen des Bauablaufs
Bauvorhaben Neubau
„Pegasus“ [Universitätsbauamt
Stuttgart und Hohenheim,
Bauwerk 28221200, Plan-Nr.
A101 Übersicht Ansichten,
22.04.2015]

2 Aufgabenstellung / Zielsetzung

Das Universitätsbauamt Stuttgart und Hohenheim hat das Arbeitsgebiet Bauliches Recycling der BTU Cottbus – Senftenberg (BTU C-S) beauftragt, das unter Kapitel 1 erläuterte „Pilotprojekt“ wissenschaftlich zu begleiten. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf folgende Schwerpunktaufgaben:

- fachliche Unterstützung und Beratung der verantwortlichen Akteure (wie Planer, Architekten, Bauausführende),
- Sichtung und Bewertung der Unterlagen (z.B. Leistungsbeschreibung, Protokolle der Fremd- und Eigenüberwachung, Eignungsprüfung) sowie stichprobenartige Kontrolle der RC-GK und des RC-Betons im Rahmen von Werksbesuchen und Vor-Ort-Terminen auf der Baustelle,
- Beurteilung der Verarbeitbarkeit des RC-Betons (Ausbreitmaß, Verdichtbarkeit, usw.) inkl. fotografischer Dokumentation,
- Bewertung des Einsatzes von RC-Beton und Ableitung von Empfehlungen für einen künftigen umfassenderen Einsatz von RC-Beton im Landesbau.

Die Zielstellung besteht darin, die Akzeptanz von RC-Beton zu steigern bzw. RC-Beton am Markt zu etablieren.

3 Ausschreibung zum Einsatz von RC-Beton (Auszug)

Gemäß Leistungsverzeichnis – Rohbauarbeiten zur Baumaßnahme „Pegasus“, erstellt von Ackermann Architekten mit Sitz in München, wurde als Teilleistung der Einsatz von RC-Beton wie folgt beschrieben:

„... bei den Stahlbetonbauteilen ab Decke ü. UG, soll RC-Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung aus aufbereitetem Betonabbruch nach DIN EN 12620, DAfStb-Richtlinie und natürlicher Gesteinskörnung zum Einsatz kommen.

RC-Beton Typ 1 nach EN mit maximal möglichem Zuschlagsanteil aus rezyklierter Gesteinskörnung.

Der Verwendbarkeitsnachweis der Gesteinskörnungen durch den Zuschlagslieferanten ist zu erbringen.“¹

Bezüglich der (zu diesem Zeitpunkt) notwendigen Zustimmung im Einzelfall (ZiE) oder einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung² (abZ) wurde folgende Passage in die Leistungsbeschreibung aufgenommen:

„... Für den Einsatz von Beton mit Gesteinskörnung aus aufbereitetem Betonabbruch hat der Auftragnehmer die notwendigen Unterlagen und Dokumentationen als Nachweis der Verwendbarkeit bereitzustellen.

Der Auftraggeber beantragt bei Erfordernis die Zustimmung im Einzelfall (ZiE) unmittelbar nach Vergabe und trägt die Gebühren.“³

Für die Errichtung des Rohbaus wurde, entsprechend den Anforderungen an das jeweils betroffene Bauteil, RC-Beton in zwei Qualitäten verlangt. Zum einen

„...Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen bis max. C30/37 DIN EN 206-1, DIN 1045-2, Gesteinskörnung Typ 1, DIN EN 12620, DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Bauregelliste B Teil 1 Anlage 1/1.3, Umweltverträglichkeit der Gesteinskörnung (abZ oder Nachweise für ZiE), ...“

und zum anderen *„...Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen bis max. C20/25 ...“⁴*

Anmerkung: *Aufgrund der geringen Menge (0,5 m³) des Betons der Festigkeitsklasse C20/25 wurde für die Errichtung dieses Bauteils (Fundament) ebenfalls der RC-Beton der Festigkeitsklasse C30/37 eingesetzt.*

¹ Ackermann Architekten: Leistungsverzeichnis – Rohbauarbeiten Bauvorhaben „Pegasus“ vom 05.05.2015, S. 83 ff.

² abZ werden für solche Bauprodukte oder Bauarten erteilt, für die es keine anerkannten Regeln der Technik, insbesondere keine Normen des DIN existieren oder von diesen wesentlich abweichen [www.dibt.de/de/Service/abZ-Zulassungsbereiche.html]. Wenn keine allgemeine baurechtliche Zulassung bzw. kein allgemeines baurechtliches Prüfzeugnis vorliegt, ist für die Verwendung dieser Bauprodukte (hier RC-Beton) oder Bauarten gemäß §20 Abs. 1 und § 21 Abs. 1 LBO Baden-Württemberg eine ZiE erforderlich. [Merkblatt ZiE Fassung 18.10.2012!; Hrsg.: Baden-Württemberg, Regierungspräsidium Tübingen, Landesstelle für Bautechnik] Seit dem 16.10.2016 entfällt gemäß des EuGH-Urteils C-100/3 die Verpflichtung des Nachweises einer abZ oder ZiE. Die CE-Kennzeichnung der RC-GK bleibt davon unberührt. Näheres s. Kap.5 Nachweis der Umweltverträglichkeit.

³ Ackermann Architekten: Leistungsverzeichnis – Rohbauarbeiten Bauvorhaben „Pegasus“ vom 05.05.2015, S. 83 ff.

⁴ ebd., S. 87

4 Methodisches Vorgehen

Die wissenschaftliche Begleitung des Projekts „Pegasus“ erfolgte durch nachstehend aufgeführte Aktivitäten:

a) Projekttreffen, Vorortaufnahmen und Baustellenbegehungen. Nachfolgend sind ausgewählte Eckdaten grafisch dargestellt:

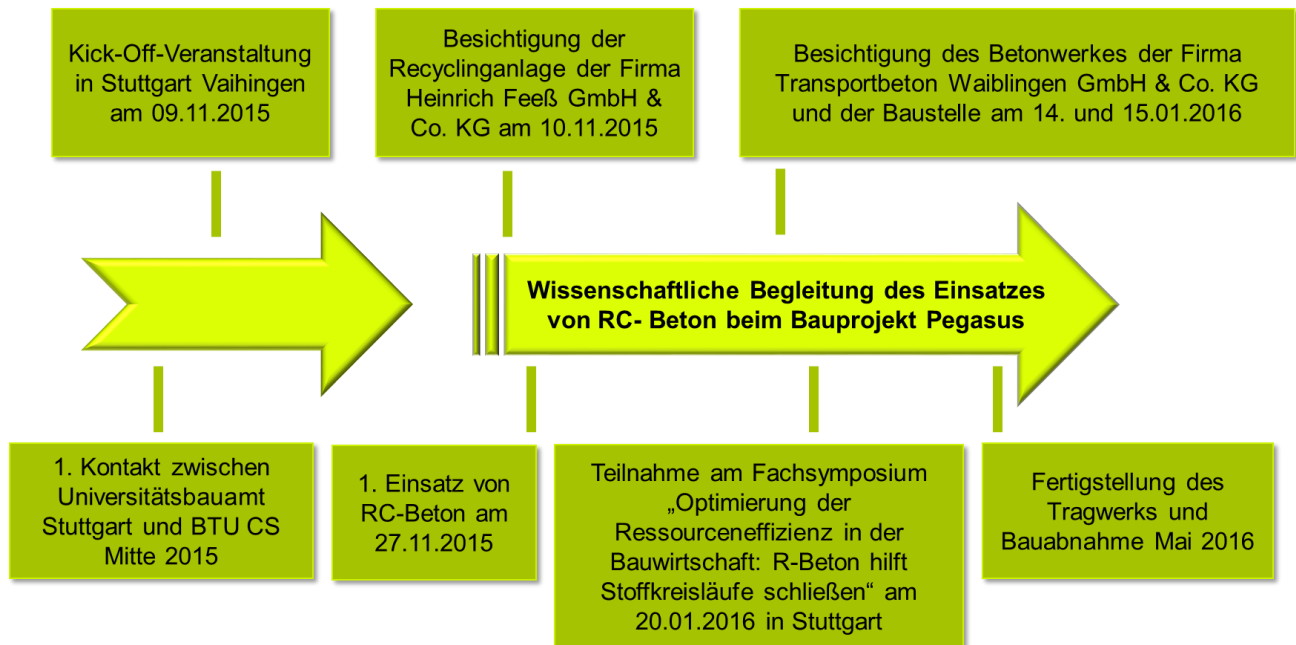


Abbildung 2: Zeitlicher Ablauf der im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung durchgeführten Maßnahmen

An der Kick-Off-Veranstaltung nahmen Vertreter von allen am Bauvorhaben beteiligten Akteuren (UBA, Betriebsleitung VBBW, Fa. Pfirmann, BTU CS, Krieger Beton-Technologiezentrum GmbH, dk Architekten, Schreiber Ingenieure) teil. Die Besichtigungstermine waren jeweils mit entsprechenden wissenschaftlichen Aufnahmen gekoppelt und erfolgten in Abstimmung sowie Begleitung von Frau Dipl.-Ing. (FH) Architektin Wanner vom Universitätsbauamt Stuttgart.

b) Sichtung und Auswertung:

- i. der Ausschreibungsunterlagen vom 05.05.2015,
- ii. der Prüfberichte der rezyklierten Gesteinskörnung vom Typ 1 (Beton Splitt), Korngruppe 2/16 der Heinrich Feeß GmbH & Co. KG aus dem Zeitraum 03/2012 – 09/2015,
- iii. der Erstprüfungen / Mischungsberechnungen der RC-Betone Nummer 37h23C4 (Größtkorn 22 mm) und 37h63C4 (Größtkorn 16 mm) der Firma Transportbeton Waiblingen GmbH & Co. KG (erstellt 11/2015),
- iv. der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (Geltungsdauer 02/2015 – 2/2020) der rezyklierten Gesteinskörnung der Heinrich Feeß GmbH & Co. KG „RC-Splitt Typ 1“ und „RC-Splitt Typ 2“ der Korngruppe 2/16 mm,
- v. des Überwachungsberichts zum Einbau von Beton der Überwachungsklassen 2 und 3 nach DIN EN 13670 und DIN 1045-3 vom 22.03.2016,

- vi. des Betoniertagebuchs der Firma Pfirmann, Industriebau GmbH & Co. KG; Zeitraum 26.10.2015 bis 26.02.2016,
- vii. der Prüfprotokolle der Frisch- und Festbetonprüfungen nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 im Rahmen der Eigen- und Fremdüberwachung über die gesamte Lieferzeit zur Qualitätsbewertung der rezyklierten Gesteinskörnung und zum RC-Beton.

5 Bautechnische und umweltverträgliche Anforderungen an RC-Beton inkl. der eingesetzten RC-GK

Grundlegende Vorgaben / Empfehlungen zur Herstellung von RC-Beton enthält die Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Ausgabe 2010, Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1, herausgegeben vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton. Die wesentlichen Inhalte zu den Anforderungen an die RC-GK im Beton sind in der folgenden Übersicht zusammengefasst.

Tabelle 1: Empfehlungen zur Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen im Beton in Abhängigkeit der Anwendungsbereiche gemäß DAfStb-Richtlinie [Mettke]

Restriktionen	Anwendungsbereich		Kategorie der Gesteinskörnung	
▪ zulässige Anteile rezyklierter GK > 2 mm, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung (in 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	Gesteinskörnungstyp 1	Gesteinskörnungstyp 2
	WO (trocken)	Karbonatisierung XC1	≤ 45 Vol.-%	≤ 35 Vol.-%
	WF ¹⁾ (feucht)	kein Korrosionsrisiko X0 Karbonatisierung XC1 bis XC4		
		Frost ohne Taumittleinwirkung XF1 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 Alkaliempfindlichkeitsklasse				
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.-%	

Die anteilige Substitution von natürlichen Gesteinskörnungen (Kiesen, Splitten) ist in Abhängigkeit des Anwendungsbereiches des Betons durch rezyklierte Gesteinskörnungen mit definierter Zusammensetzung (Gesteinskörnungstyp resp. Liefertyp 1 Betonsplitt oder Liefertyp 2 Bauwerksplitt) ohne veränderte Bemessungsgrundlagen möglich. D.h., in Abhängigkeit der Zusammensetzung bzw. Kategorie der Gesteinskörnungen (Liefertyp 1 oder 2), der Expositionssowie der Feuchtigkeitsklasse des Betons bzw. am Einbauort schwankt die zulässige Substitutionsrate der natürlichen Gesteinskörnungen (siehe rechte Spalten in Tabelle 1). RC-Beton ist demnach in den Expositionsklassen XS1, XS2, XS3; XD1, XD2, XD3; XF2, XF4; XA2, XA3; XM1, XM2 und XM3 nicht anwendbar bzw. im Umkehrschluss in den Expositionsklassen X0, XC1 bis XC4, XF1, XF3 und XA1 anwendbar.

Bei der erstmaligen Herstellung von RC-Beton sind vor dessen Verwendung vom Betonproduzenten die entsprechenden Rezepturen - nach o.a. Vorgaben der DAfStb-Richtlinie und DIN EN 206-1⁵ sowie DIN 1045-2 – zu entwickeln und zu prüfen. Die Zusammensetzung des Betons bzw. Eignung des RC-Betons ist anhand einer **Erst- und erweiterten Erstprüfung** nach Abschnitt 4 der o.a. DAfStb-Rili nachzuweisen. Im Rahmen der Erstprüfung nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 ist zu belegen, in welcher Zusammensetzung der frische und erhärtete Beton die vorgegebenen Anforderungen mit einem ausreichendem Vorhaltemaß erfüllt. Erweiterte Erstprüfung bedeutet, dass neben den Standarduntersuchungen (Überprüfung der Temperatur des Frischbetons (i.d.R. 15 bis 22°C), der Konsistenz zum voraussichtlichen Zeitpunkt des Betoneinbaus oder der Betonübergabe und der Druckfestigkeit an mind. 3 Probekörpern aus jeweils 3 Chargen) zusätzlich der Feuchtegehalt der RC-GK zu bestimmen und bei der Festlegung der Mischungsanteile zu berücksichtigen ist. Außerdem ist die Konsistenz des Frischbetons in Abhängigkeit der Zeit nach 10, 45 und 90 Minuten festzustellen (siehe Kapitel 6.5).

Im Rahmen der Produktionskontrolle des Betonherstellers sind **zusätzlich zur DIN EN 206-1 und DIN 1045-2** nachstehend aufgeführte Prüfungen durchzuführen:

- Sichtprüfung der stofflichen Zusammensetzung der RC-GK (Liefertyp 1 oder 2) in jedem Lieferfahrzeug,
- Ermittlung der Kornrohddichte (ofentrocken) nach DIN EN 1097-6 in jeder Produktionswoche,
- Ermittlung der Wasseraufnahme der RC-GK nach 10 Minuten in jeder Produktionswoche,
- Ermittlung des Wassergehalts der rezyklierten Gesteinskörnung bei Änderung der Feuchtebedingungen,
- Ermittlung des Luftgehalts am Frischbeton und der Frischbetonrohddichte im Rahmen des Festigkeitsnachweises für den Beton.⁶

Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen für den Einsatz im Beton

Die Anforderungen, die an die rezyklierte Gesteinskörnung hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung gestellt werden, sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Liefertyp 1: Betonsplitt unterscheidet sich vom **Liefertyp 2: Bauwerkssplitt** insbesondere durch die limitierten Anteile an R_{cu} und R_b (siehe Tabelle 2). Während der Liefertyp 1 mind. 90 M.-% an aufbereitetem Betonbruch enthalten muss und der Ziegelanteil max. 10 M.-% betragen darf, kann der Liefertyp 2 bis zu 30 M.-% Ziegel aufweisen. Dies hat Auswirkungen für das Input an der RC-Anlage in der Form, dass Betonbruch getrennt von Ziegelbruch anzuliefern und selektiv aufzubereiten ist. Dies wiederum hat Auswirkungen auf den Abbruch bzw. Rückbau der Bausubstanz hinsichtlich der getrennten Erfassung der verschiedenen verbauten Baustoffe. Diese

⁵ Aktuell gilt die DIN EN 206:2017-01, welche jedoch erst mit Novellierung der deutschen Anwendungsnorm DIN 1045-2:2008-08 bauaufsichtlich eingeführt wird.

⁶ Auszug aus DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Ausgabe September 2010, Abschnitt 4 und 5

Forderung geht konform mit der novellierten Gewerbeabfallverordnung Abschnitt 3, § 8, mit deren Abschluss im Frühjahr 2017 zu rechnen ist.⁷

Tabelle 2: Stoffliche Zusammensetzung von RC-GK Liefertyp 1 und 2

RC-Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620:2008-07 Abschn. 5.8			
Bestandteile	Beschreibung	Kategorie der Gesteinskörnung Zusammensetzung Massenanteil [%]	
		Liefertyp 1	Liefertyp 2
Rc + Ru	Rc : Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton	Rcu ₉₀	Rcu ₇₀
	Ru : ungebundenen Gesteinskörnungen, Naturstein, hydr. geb. GK	≥ 90 M.-%	≥ 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	XRg ₁₋ ≤ 1 M.-%	XRg ₂₋ ≤ 2 M.-%
	Rg : Glas		
FL	FL : Schwimmendes Material im Volumen	FL ₂₋ ≤ 2 cm³/kg	

Die produzierten RC-GK müssen ebenso wie natürliche Gesteinskörnungen den Vorgaben der DIN EN 12620:2008-07 entsprechen. Diese Norm bildet die Grundlage für die erforderliche CE-Kennzeichnung der RC-GK in Vorbereitung der Vermarktung gemäß Bauproduktenverordnung vom 01.Juli 2013. Zusätzlich sind nach o.a. DAfStb-Richtlinie und DIN EN 12620 an rezyklierten Gesteinskörnungen folgende Parameter zu prüfen:

- stoffliche Zusammensetzung,
- säurelösliche Chloride,
- wasserlösliche Sulfate,
- Bestandteile, die den Erstarrungsbeginn des Zementleims beeinflussen.

Neben der Überprüfung der bautechnischen Kenngrößen ist die rezyklierte Gesteinskörnung hinsichtlich ihrer Inhaltsstoffe zu bewerten und somit der Nachweis der Umweltverträglichkeit zu erbringen. Es muss sichergestellt sein, dass eine schadlose und ordnungsgemäße Verwertung erfolgt.

⁷ Die Novelle der Gewerbeabfallverordnung regelt die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bauabfällen in dergestalt, dass diese getrennt nach Stoffen zu erfassen sind in Vorbereitung ihrer Wiederverwendung und der Aufbereitung in RC-Anlagen.

Nachweis der Umweltverträglichkeit

In Deutschland dürfen RC-GK nach DIN EN 12620 nur dann verwendet werden, wenn sie keine umweltschädigenden Auswirkungen, insbesondere auf Boden und Grundwasser, haben. Ursprünglich enthielt die nationale Anwendungsnorm DIN 4226-100 aus dem Jahr 2002 Grenzwerte zum Nachweis der Umweltverträglichkeit von rezyklierten Gesteinskörnungen. Diese Norm ist momentan im Zuge der „europäischen Harmonisierung“ entsprechend der DIN EN 12620 überarbeitet worden und regelt zudem zukünftig die ordnungsgemäße und schadlose Verwertung von rezyklierten Gesteinskörnungen. Seit September 2016 liegen folgende Normenentwürfe⁸ vor:

- E DIN 4226-101 „Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton – Teil 101: Umweltanforderungen und Liefertypen (nach DIN EN 12620)“ und
- E DIN 4226-102 „Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton – Teil 102: Qualitätssicherung (Typ-Prüfung und Werkseigene Produktionskontrolle)“.

Zur Zeit der Baumaßnahme „Pegasus“ bis zum 15. Oktober 2016 musste die Umweltverträglichkeit von RC-GK für das Bauprodukt RC-Beton mit einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) durch das DIBt⁹ oder mit einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE)¹⁰ nachgewiesen werden. Für den Nachweis der Umweltverträglichkeit wurden die Prüfparameter untersucht, die in der DIN 4226-100, Anhang G aufgeführt sind (vgl. Tabelle 5), welche den Z 2-Prüfwerten nach LAGA M 20 entsprechen. Sie finden sich auch im Entwurf DIN 4226-101 wieder, jedoch mit einer Reduzierung des zulässigen Höchstwertes an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK). Anstelle von 75 mg/kg im Feststoff (DIN 4226-100, Anhang G) sind maximal 25 mg/kg zulässig (E DIN 4226-101, Tabelle 2).

Angemerkt wird an dieser Stelle, dass eine abZ oder ZiE mit einem nicht unerheblichen zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden ist. Deshalb wurde seinerzeit empfohlen, in einem frühen Planungsstadium das entsprechende Verfahren einzuleiten. Für eine abZ zum Einsatz von RC-GK zur Herstellung von RC-Beton bewegten sich die Gebühren gemäß Gebührenverzeichnis des Deutschen Instituts für Bautechnik¹¹ in einem Bereich von 250 bis 15.000 € bei einer befristeten Geltungsdauer i.d.R. von 5 Jahren. Erfahrungsgemäß belaufen sich die Kosten für eine abZ auf etwa 5.000 €. Entsprechend dem herausgegebenen Merkblatt der Landesstelle für Bautechnik in Baden-Württemberg, Regierungspräsidium Tübingen (Merkblatt ZiE-Fassung 18.10.2012) wird in Verbindung mit der Gebührenverordnung des Umweltministeriums vom 28.02.2012 (GABL.S.147) eine Gebühr zwischen 150 und 7.500 € für eine ZiE festgesetzt. Als Bemessungsgrundlage werden

⁸ Die Einspruchssitzung zu den Normenentwürfen findet am 12.01.2017 statt.

⁹ Das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) erteilt als deutsche Zulassungsstelle abZ für Bauprodukte und Bauarten.

¹⁰ In Baden-Württemberg wurden die Befugnisse für Entscheidungen über ZiE dem Regierungspräsidium Tübingen, Referat 27 - Landesstelle für Bautechnik übertragen. (Merkblatt ZiE, Fassung 18.10.2012; Hrsg. Landesstelle für Bautechnik, Regierungspräsidium Tübingen, Baden-Württemberg)

¹¹ Gesetz, Abkommen und Satzung über das Deutsche Institut für Bautechnik, nichtamtliche Lesefassung, S. 19; abrufbar unter https://www.dibt.de/de/DIBt/data/DIBt-Gesetz_Abkommen_und_Satzung.pdf

der Verwaltungsaufwand, die Bedeutung des Zustimmungsgegenstandes und das wirtschaftliche oder sonstige Interesse des Antragstellers herangezogen.

Aktuelles

Seit dem 16.10.2016 sind für europäisch harmonisierte Bauprodukte nach der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 (Bauproduktenverordnung) / mit CE-Zeichen (dazu zählen RC-Gesteinskörnungen, die in RC-Betonen verbaut sind) keine zusätzlichen nationalen Verwendbarkeits- und Übereinstimmungsnachweise mehr erforderlich (entsprechend dem Urteil des Europäischen Gerichtshofs EuGH-Urteil C-100/13 vom 16.10.2014). Aus diesem Anlass hat die Bauministerkonferenz im Mai 2016 die Musterbauordnung (MBO) novelliert (vgl. §16c).

D.h., seitens des DIBt wird keine abZ mehr erteilt¹², ZiE's sind ebenfalls nicht mehr für den Einsatz von RC-Betonen mit CE-Kennzeichnung erforderlich. Hinsichtlich des Nachweises der Inhaltsstoffe wird bis zum Inkrafttreten der Entwürfe der Normen E DIN 4226-101 und E DIN 4226-102 empfohlen, weiterhin die Parameter aus umweltverträglicher Sicht zu prüfen, die bis zu diesem Zeitpunkt für die abZ oder ZiE zugrunde gelegt worden sind.

Zwischenfazit:

Für die Herstellung von RC-Betonen existieren Normen und Regelwerke. Nachzuweisen ist neben den sonst üblichen Prüfungen von Normalbetonen die umweltverträgliche Eignung der RC-GK.

¹² vgl. Stellungnahme des DIBt vom 18. August 2016

Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton

Der Einsatz von RC-GK zur Herstellung von Beton erfordert außerdem die Einhaltung der Vorgaben der DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton“ (kurz Alkali-Richtlinie), Schlussfassung Juni 2013.

Hintergrund

Bei einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) reagiert das aus der reaktiven Gesteinskörnung gelöste amorphe u./o. schlecht kristallisierte SiO_2 unter Feuchteeinwirkung mit den Alkalihydroxiden (NaOH , KOH) der Porenlösung des erhärteten Betons bzw. mit denen, die von außen eindringen. Die zum Ablauf der Reaktion benötigten Alkalien können zum einen aus dem Zement, den Betonzusatzstoffen, den Betonzusatzmitteln und der Gesteinskörnung stammen, zum anderen auch von außen aus dem Meerwasser oder Tausalzen in den Beton eingetragen werden. Als Reaktionsprodukt entsteht ein Alkalisilikat-Gel.¹³ Bei einer weiteren Wasseraufnahme quellen diese Gele stark auf und verursachen Treiberscheinungen im Beton, welche zu Abplatzungen und Rissbildungen führen. Im schlimmsten Fall kommt es zur Zerstörung von ganzen Bauteilen.¹⁴ Diese chemische Reaktion bzw. deren Ausmaß hängt insbesondere von folgenden Faktoren ab:

- den Eigenschaften der alkaliempfindlichen Gesteinskörnung (Art, Menge, Korngröße und Verteilung),
- dem Gehalt an Alkalihydroxid in der Porenlösung (hoher pH-Wert) und
- den Feuchtigkeits- und Temperaturbedingungen des erhärteten Betons.¹⁵

Eine schädigende AKR kann verhindert werden, wenn mindestens ein Faktor von den drei genannten ausgeschaltet wird und daraus alle weiteren Maßnahmen zur Vermeidung einer schädigenden AKR getroffen werden.

Die Maßnahmen zur Vermeidung einer AKR sind in o.a. Richtlinie des DAfStb festgelegt. Ausgangspunkt bildet die Prüfung der Gesteinskörnung hinsichtlich ihrer Alkaliaktivität. Rezyklierte Gesteinskörnungen größer 2 mm sind gemäß Anhang B Alkali-Richtlinie zu prüfen und in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse einzustufen (E I-S: Gesteinskörnungen, für die keine vorbeugenden Maßnahmen erforderlich sind; E III-S: Gesteinskörnungen, für die ggf. vorbeugende Maßnahmen erforderlich sind). Zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit des Betons ist die verwendete Gesteinskörnung entweder mittels dem Schnellprüfverfahren und/oder dem Betonversuch zu untersuchen. Da die AKR stark vom Feuchtigkeitsangebot abhängt, sind Betonbauteile gemäß DIN

¹³ vgl. G. Neroth; D. Vollenschaar (2011): Wendehorst Baustoffkunde „Grundlagen – Baustoffe – Oberflächenschutz“; S. 157 ff.; Scholz, Yvonne: Dauerhaftigkeit von Beton – Wirkungsweisen von Betonzusatzstoffen zur Vermeidung einer AKR, Diss. 2016, BTU C-S, S. 3

¹⁴ vgl. S. Röhling, H. Eifert, M. Jablinski (2012): Betonbau „Zusammensetzung – Dauerhaftigkeit – Frischbeton“; S. 65 ff.

¹⁵ vgl. G. Neroth; D. Vollenschaar (2011): Wendehorst Baustoffkunde „Grundlagen – Baustoffe – Oberflächenschutz“; S. 157 ff.

1045-2 in Abhängigkeit der zu erwartenden Umwelteinflüsse definierten Feuchtigkeitsklassen (WO, WF, WA, WS) zuzuordnen.

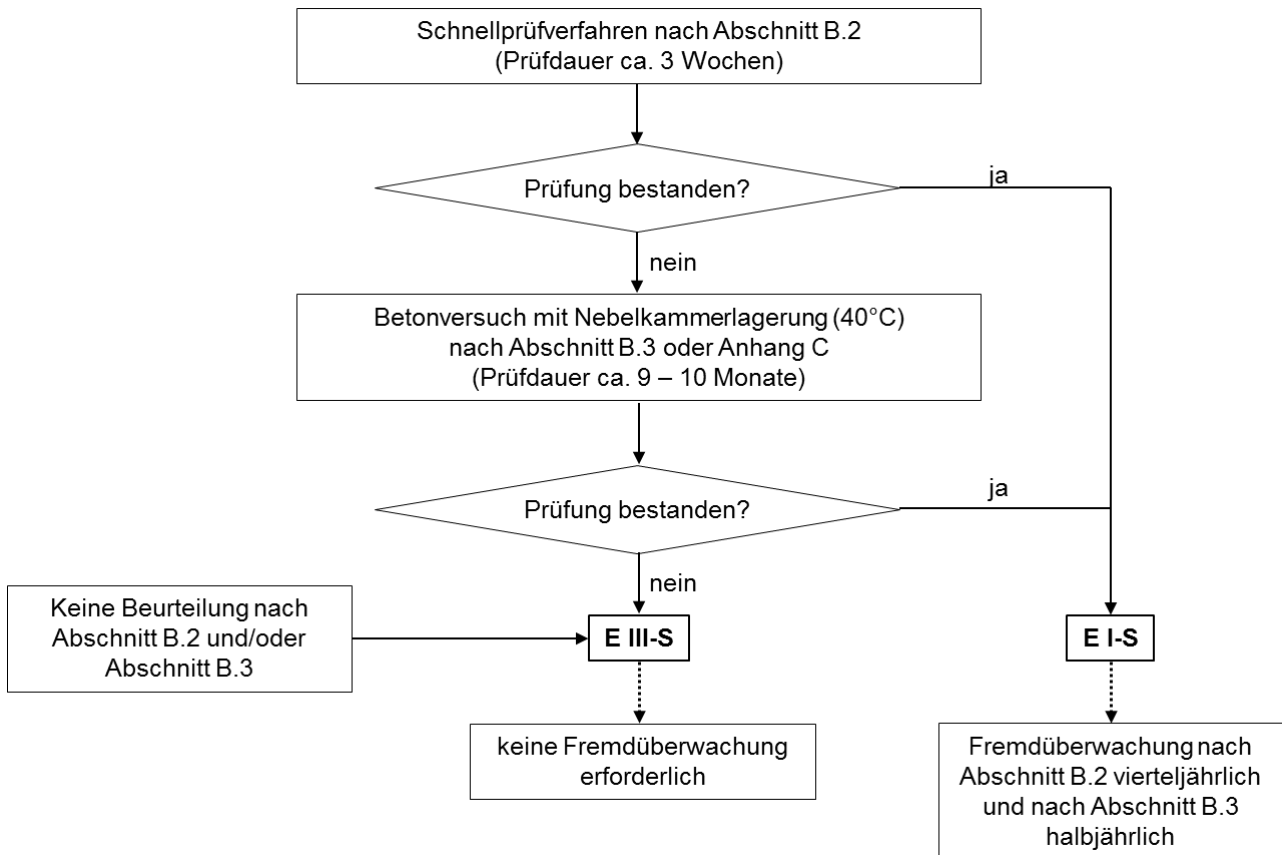


Abbildung 3: Prüfschema gemäß DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton“, Schlussentwurf 03. Juni 2013, S. 34, ergänzt um Angaben zur Fremdüberwachung¹⁶

Wird eine rezyklierte Gesteinskörnung der Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S im Beton eingesetzt, müssen in Abhängigkeit von der Feuchtigkeitsklasse und dem Zementgehalt gegebenenfalls vorbeugende Maßnahmen getroffen werden. Einen Überblick erforderlicher Maßnahmen liefert die folgende Tabelle 3.

¹⁶ Beim Schnellprüfverfahren sind drei Mörtelprismen mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm herzustellen, an denen zur Beurteilung möglicher Treiberscheinungen durch Alkali-Kieselsäure-Reaktion Dehnungsmessungen durchgeführt werden. Nach der Nullmessung werden die Probekörper für 13 Tage in etwa 80°C heißer Natriumhydroxidlösung gelagert und weitere Dehnungsmessungen am 1., 4. o. 5., 8. o. 9. und 13. Tag durchgeführt. Gemäß Alkali-Richtlinie, Tabelle 3 muss für eine Einstufung in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S die Dehnung der Mörtelprismen nach 13 Tagen unter 1,00 mm/m liegen. Für den Betonversuch mit 40°C Nebelkammerlagerung sind Prismen mit den Abmessungen 100 mm x 100 mm x 500 mm für die Dehnungsmessung sowie ein Würfel mit den Kantenlängen 300 mm für die Beobachtung möglicher Rissbildungen herzustellen. Die Dehnungs- und Rissbreitenmessungen erfolgen unmittelbar vor dem Einbringen in die Nebelkammer (sog. Nullmessung), im Alter von 2, 7 und 28 Tagen sowie nach jeweils weiteren 28 Tagen bis zum Alter von 252 Tagen (36 Wochen). Die letzte Messung ist nach 270 Tagen (spätestens nach 273 Tagen) durchzuführen. Gemäß Alkali-Richtlinie, Tabelle 3 muss für eine Einstufung in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S die Dehnung der Mörtelprismen nach 270 Tagen Nebelkammerlagerung unter 0,6 mm/m und die Rissbreiten im Würfel unter 0,2 mm liegen. Werden die Grenzwerte nicht eingehalten, erfolgt die Einstufung in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S.

Tabelle 3: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton [Auszug aus Alkali-Richtlinie Tab. 6, S. 22]

Alkaliempfindlichkeitsklasse	Zementgehalt kg/m³	Erforderliche Maßnahmen für die Feuchtigkeitsklasse		
		WO (trocken)	WF (feucht)	WA (feucht + Alkalizufuhr von außen)
E III-S	≤ 300	keine	keine	keine
	≤ 350	keine		NA-Zement oder gutachterliche Stellungnahme ^a
	> 350	keine	NA-Zement oder gutachterliche Stellungnahme ^a	Austausch der Gesteinskörnung oder gutachterliche Stellungnahme ^a
^a Für die Erstellung einer gutachterlichen Stellungnahme sind besonders fachkundige Personen einzuschalten.				

In der nachfolgenden Tabelle 4 sind die an den RC-GK zu prüfenden Parameter zusammengefasst.

Tabelle 4: Zu prüfende Parameter an RC-GK für den Einsatz im Beton¹⁷

Parameter	Kategorie der Gesteinskörnung	
	Typ 1	Typ 2
Stoffliche Zusammensetzung	siehe Tabelle 2	
Korngrößenverteilung	Gc85/20	Gc80/20
Gehalt an Feinanteilen [M.-%]	≤ 4	
Kornrohddichte [kg/m³]	≥ 2000	
Wasseraufnahme (nach 10 min) [M.-%]	≤ 10	≤ 15
Kornformkennzahl	≤ SI ₅₅ oder FI ₅₀	
Wasserlösliches Chlorid [M.-%]	≤ 0,15	
Säurelösliches Chlorid [M.-%]	≤ 0,04	
Wasserlösliches Sulfat [M.-%]	≤ 0,2	
Säurelösliches Sulfat [M.-%]	≤ 0,8	
Gehalt an Gesamtschwefel [M.-%]	≤ 1	
Gehalt an organischen Bestandteilen	max. gelbe Färbung	
Alkaliempfindlichkeitsklasse	siehe Abbildung 3	

Tabelle 5 enthält Prüfparameter, die im Eluat und im Feststoff zur Bewertung der Umweltverträglichkeit inklusive der zulässigen Höchstwerte zu prüfen sind.

¹⁷ nach DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“

Tabelle 5: Bewertung der Inhaltsstoffe rezyklierter Gesteinskörnungen – Höchstwerte gemäß DIN 4226-100, Anhang G

Eigenschaft	Höchstwerte	Analyseverfahren
Eluat		
pH-Wert	12,5 ^a	DIN 38404-5
Elektrische Leitfähigkeit ^a	3 000 µS/cm	DIN EN 27888
Chlorid	150 mg/l	DIN 38405-1
Sulfat	600 mg/l	DIN 38405-5
Arsen	50 µg/l	DIN EN ISO 11885 DIN EN ISO 11969
Blei	100 µg/l	DIN 38406-6 DIN 38406-16 DIN EN ISO 11885
Cadmium	5 µg/l	DIN 38406-16 DIN EN ISO 11885
Chrom gesamt	100 µg/l	DIN 38406-2 DIN EN ISO 11885
Kupfer	200 µg/l	DIN 38406-7 DIN 38406-16 DIN EN ISO 11885
Nickel	100 µg/l	DIN 38406-11 DIN 38406-16 DIN EN ISO 11885
Quecksilber	2 µg/l	DIN EN 1483
Zink	400 µg/l	DIN 38406-8 DIN 38406-16 DIN EN ISO 11885
Phenolindex	100 µg/l	DIN 38409-16
Feststoff		
Kohlenwasserstoffe (H18) ^b	1 000 mg/kg	DIN 38409-18
PAK nach EPA	75 mg/kg	Soxhlet-Extraktion 3 h mit Cyclohexan, Analyse des Extraktes analog U.S. EPA 610
EOX	10 mg/kg	DIN 38414-17
PCB	1 mg/kg	DIN 38414-20
^a Kein Ausschlusskriterium		
^b Überschreitungen, die auf Asphaltanteile zurückzuführen sind, stellen kein Ausschlusskriterium dar.		

Unter Zugrundelegung des Entwurfs der DIN 4226-101:2016-09 ist für PAK nach EPA der Höchstwert auf 25 mg/kg reduziert worden.

6 Errichtung des Tragwerks für den Neubau „Pegasus“

6.1 Allgemeines

Gemäß Leistungsverzeichnis – Rohbauarbeiten wurde für die Errichtung des Tragwerks ab Decke über Untergeschoss der Einsatz von RC-Beton ausgeschrieben (vgl. Kapitel 1 und 3).

Aus dem Einbauort des RC-Betons im Gebäude (Umgebungsbedingungen und statische Beanspruchungen) ergeben sich hinsichtlich der Frisch- und Festbetoneigenschaften nachstehend gelistete Eigenschaften (siehe Tabelle 6).

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

Festlegungen	Expositionsklassen (gemäß DIN 1045-2:2008-08) XC1 für Innenwände und XC 3 für Außenwände	
	Feuchtigkeitsklassen (gemäß Alkali-Richtlinie) WO für Innenwände (Beton, der nach normaler Nachbehandlung nicht längere Zeit feucht und nach dem Austrocknen während der Nutzung weitgehend trocken bleibt) WF für Außenwände (Beton, der während der Nutzung häufig oder längere Zeit feucht ist.)	
	Konsistenz F3 (Ausbreitmaß 420 - 480 mm) (für Transport- und Baustellenbeton müssen gemäß DIN EN 206-1:2001-07, Pkt. 6.2.2 Anforderungen an die Konsistenzklasse oder der Zielwert der Konsistenz festgelegt werden)	
	Mindestdruckfestigkeitsklasse C30/37 (gemäß DIN EN 206-1:2001-07, Tabelle F.1)	
Empfohlene Grenzwerte für die Zusammensetzung des geforderten Betons	Maximaler w/z-Wert (gemäß DIN EN 206-1:2001-07, Tabelle F.1)	XC1 : 0,65 XC3 : 0,55
	Mindestzementgehalt (gemäß DIN EN 206-1:2001-07, Tabelle F.1)	XC1: 260 kg/m ³ XC3: 280 kg/m ³

Mit der Ausführung des Tragwerks / der Rohbaumaßnahme wurde die Fa. Pfirmann Industriebau GmbH & Co. KG beauftragt. Als Unterauftragnehmer für die Betonherstellung wurde die Transportbeton Waiblingen GmbH & Co. KG eingebunden. Der Betonproduzent hat die rezyklierten Gesteinskörnungen vom Liefertyp 1 – wie in der Ausschreibung gefordert (vgl. Kapitel 3) - von der Heinrich Feeß GmbH & Co. KG bezogen.

Vor Baubeginn fand – wie o.a. - im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung eine Kick-Off-Besprechung zum Einsatz von RC-Beton beim Neubau „Pegasus“ mit allen beteiligten Akteuren (Bauherr, Architekten, Bauausführende, Betonproduzent) statt (vgl. Kapitel 4). Bei diesem Gespräch wurden nach entsprechenden Erläuterungen seitens des AN's vorhandene Unsicherheiten bei den beteiligten Akteuren aus dem Weg geräumt und die weitere Begleitung der Baumaßnahme terminlich abgestimmt.

6.2 Rezyklierte Gesteinskörnung der Fa. Heinrich Feeß GmbH & Co. KG

Schon vor rund zwanzig Jahren hat Geschäftsführer Walter Feeß das enorme Potenzial, welches im Baustoffrecycling steckt, erkannt. Im Sinne der Firmenphilosophie und des Kreislaufwirtschaftsgesetzes „Verwertung vor Beseitigung“ ist die Heinrich Feeß GmbH & Co. KG stets bemüht, mehr und mehr Materialien und Baustoffe in die Kreislaufwirtschaft zurück zu führen bzw. im Wirtschaftskreislauf zu halten. Die Verwendung von RC-Baustoffen ist nicht nur ökologisch sinnvoll, da natürliche Rohstoffe, Deponie- und Abbauf Flächen geschont werden können, sondern auch ökonomisch interessant v.a. in städtischen Ballungsgebieten - wie in eigenen Untersuchungen des AN's ermittelt.

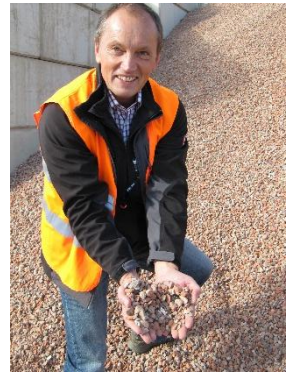


Abbildung 4: GF Walter Feeß mit RC-GK Liefertyp 2 [Foto: Mettke]



Abbildung 5: Schüttgutlager Fa. Heinrich Feeß GmbH & Co. KG [Foto: Mettke, 10.11.2015]



Abbildung 6: sortenreiner Betonbruch [Foto: Mettke, 10.11.2015]

Seit 2010 betreibt die Heinrich Feeß GmbH & Co. KG im Gewerbegebiet Rabialen den Recyclingpark Kirchheim/Teck. Dort werden rund 15 verschiedene, eigen- und fremdüberwachte und teils zertifizierte sowie QRB-geprüfte¹⁸ Qualitäts-Recyclingprodukte von RC-Sand, RC-Splitt bis RC-Schotter aus Bau- und Abbruchabfällen produziert und vermarktet. Die nebenstehende Abbildung 5 zeigt die zahlreichen Schüttgutboxen zur Lagerung der verschiedenen am Markt nachgefragten Recyclingbaustoffe bzw. -produkte.

Für den Neubau „Pegasus“ wurde eine RC-GK vom **Liefertyp 1** der Korngröße **2/16 mm** hergestellt (siehe Abbildung 8). Als Ausgangsmaterial ist ausschließlich sortenreiner Betonbruch – nahezu ohne Störstoffe wie Holz, Folien, etc. (siehe Abbildung 6) aufbereitet worden. Abbruch und Aufbereitung in einer Hand, so wie es bei der Fa. Feeß betrieben wird, hat erhebliche

¹⁸ Der QRB-Verein (Qualitätssicherungssystem Recycling-Baustoffe Baden-Württemberg e.V.) eröffnet Recycling-Baustoff-Betrieben die Möglichkeit, für Recycling-Baustoffe den Produktstatus zu erlangen und dient der Umsetzung des Erlasses „Vorläufige Hinweise zum Einsatz von Baustoffrecyclingmaterial vom 13. April 2004 des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg. [www.qrb-bw.de/home, aufgerufen am 23.08.2016]

Vorteile. Bereits auf der Abbruchbaustelle wird auf die sortenreine Erfassung der verschiedenen Materialien geachtet, denn dort wird der Grundstock für hochwertige Recyclingprodukte gelegt. Eine spätere Sortierung erfordert zusätzliche Aufbereitungsschritte, verursacht weitere Kosten und die Qualität der RC-Produkte ist i.d.R. trotzdem geringer gegenüber der Aufbereitung von reinem Betonbruch zu Betonsplitt, d.h. Liefertyp 1.

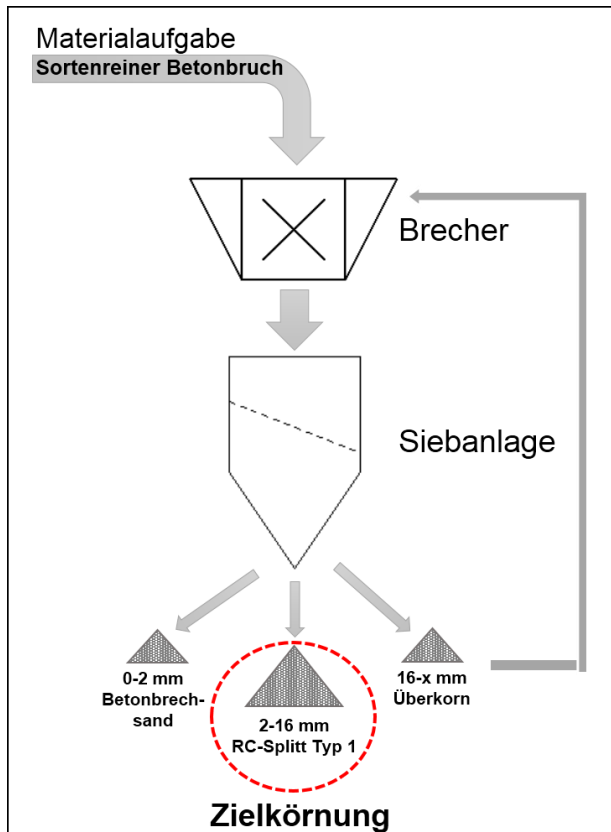


Abbildung 7: Fließschema Aufbereitungsprozess RC-Splitt Typ 1 [Schmidt]

Der Aufbereitungsprozess zur Gewinnung der RC-GK 2/16 mm vom Liefertyp 1 ist in der nebenstehenden Abbildung 7 schematisch dargestellt.

Im ersten Schritt wird der Betonbruch mittels einem Prallbrecher auf unter 63 mm gebrochen. Das gebrochene Material wird anschließend in die 3 Fraktionen 0/2 mm, 2/16 mm und 16/63 mm gesiebt. Die Fraktion 0/2 mm wird als sogenannter Betonsand oder Betonbrechsand z.B. als Sand zur Rohrverlegung vermarktet. Die Körnung 2/16 mm ist die Zielkörnung zur Betonherstellung. Das Material > 16 mm - auch als Überkorn bezeichnet - wird erneut dem Brecher zugeführt. Bei diesem Aufbereitungsprozess wird eine Recyclingquote von 99,9 % erreicht. Gewonnen werden etwa **70 % RC-Splitt vom Liefertyp 1** (siehe Abbildung 8) und **30 % Betonsand**.

30 % Betonsand.

Seit dem 09. Februar 2015 sind die rezyklierten Gesteinskörnungen „RC-Splitt Typ 1“ und „RC-Splitt Typ 2“¹⁹ der Heinrich Feeß GmbH & Co. KG durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) zur Herstellung von Beton bauaufsichtlich zugelassen. Die Zulassung erstreckt sich auf die Korngruppe 2/16 mm und ist für insgesamt 5 Jahre gültig (siehe Zulassungsbescheid Abbildung 9).



Abbildung 8: Rezyklierte Gesteinskörnung Liefertyp 1 [Aufnahme vom 10.11.2015, Mettke]

¹⁹ RC-Splitt Typ 2 wird nach DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ als Typ 2: Bauwerkssplitt bezeichnet.

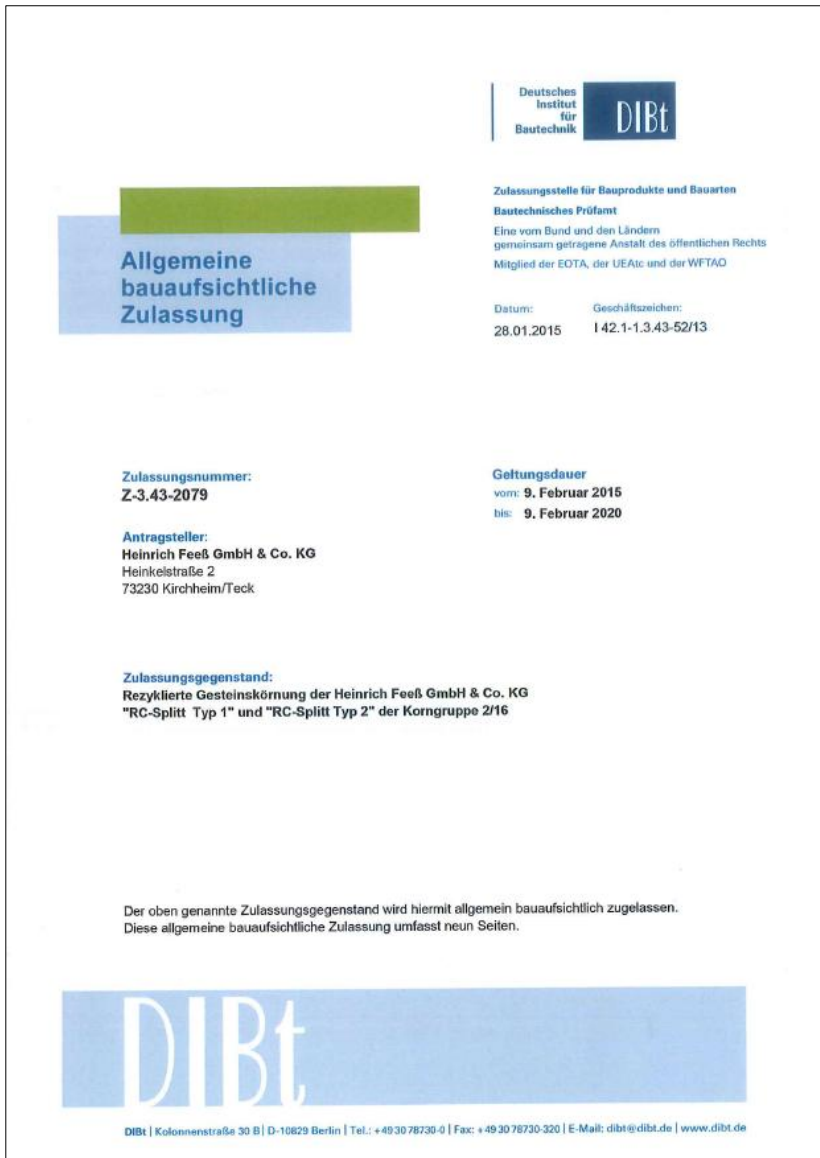


Abbildung 9: Auszug aus der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung der RC-Splittes Typ 1 und Typ 2

Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung wurden zudem die Protokolle der Fremdüberwachung der letzten vier Jahre (2012 – 2015) gesichtet und die Untersuchungsergebnisse der verschiedenen Parameter tabellarisch zusammengefasst und mit den Soll-Werten nach DIN EN 12620, DAfStb-Rili sowie DIN 4226-100 abgeglichen (siehe Kapitel 6.3, Tabellen 7, 8 und 9).

Für die Errichtung des Tragwerks des Neubaus „Pegasus“ wurden insgesamt ca. 400 Tonnen RC-Splitt vom Typ 1 an die Transportbeton Waiblingen GmbH & Co. KG geliefert.

6.3 Bewertung des RC-Splitts Typ 1 der Firma H. Feeß GmbH & Co. KG

Von der Firma Heinrich Feeß GmbH & Co. KG wurden dem AN 7 Prüfberichte der Fremdüberwachung des RC-Splitts Typ 1 vom Institut Dr. Haag aus dem Zeitraum 03/2012 bis 09/2015 für die Qualitätsbewertung zur Verfügung gestellt. Die Prüfungen an den RC-Gesteinskörnungsproben erfolgten gemäß der DIN EN 12620 Gesteinskörnungen für Beton und die Umweltverträglichkeit gemäß den Vorgaben des DIBt (entsprechen der DIN 4226-100 bzw. LAGA M 20, Z 2). Die Untersuchungsergebnisse sind in den nachfolgenden Tabellen 7 bis 9 erfasst und wurden den Soll-Werten gegenübergestellt. Die Mindestprüfhäufigkeiten für allgemeine Eigenschaften der Gesteinskörnungen sind in den Tabelle H.1, H.2 und H.3 (S.44 bis 46) der DIN EN 12620:2008-07 festgelegt. Bspw. ist die Kornzusammensetzung sowie der Gehalt an Feinanteilen mindestens 1x wöchentlich zu prüfen, die Kornform 1x im Monat, Kornrohdichte und Wasseraufnahme 1x im Jahr. Verantwortlich für die zeitgemäße Durchführung der Prüfungen ist der Hersteller.

In der folgenden Tabelle 7 wird die stoffliche Zusammensetzung des RC-Splitts Typ 1 bewertet. Die Ergebnisse belegen die **absolut homogene Zusammensetzung der rezyklierten Gesteinskörnungen des Liefertyps 1 der Fa. Heinrich Feeß GmbH & Co. KG**. Mit einem Anteil von nahezu 100 % Beton (Rc) und Naturstein (Ru) wird die bestmögliche Qualität erreicht.

Tabelle 7: Soll-Ist-Vergleich der stofflichen Zusammensetzungen der rezyklierten Gesteinskörnungen Typ 1, 2/16 mm

Bestand- teile	IST Zusammensetzung der RC-Gesteinskörnung							SOLL Typ 1* Kategorie der RC- Gesteinskörnung Zusammensetzung	Ergebnis Soll-Ist- Vergleich
	Prüfbericht								
	23.03.2012	13.12.2012	12.04.2013	02.06.2014	05.09.2014	07.07.2015	22.09.2015		
	[M.-%]								
Rc+Ru	99,9	99,6	97,9	99,5	99,9	99,3	98,5	≥ 90	✓✓
Rb	0	0,3	1,6	0	0	0,3	0,7	≤ 10	✓✓
Ra	0,1	0,1	0,5	0,3	0,1	0,1	0,4	≤ 1	✓✓
X+Rg	0	0	0	0	0	0,3	0,4	≤ 1	✓✓
Fl	0	0	0	0,2	0	0,4	0,2	≤ 2	✓✓
*gemäß DIN EN 12620, Abschnitt 5.8 und DAfStb-Richtlinie Abschnitt 2.1.1									
✓✓Anforderung mit hoher Sicherheit erfüllt									

Neben der definierten stofflichen Zusammensetzung müssen die rezyklierten, ebenso wie die natürlichen Gesteinskörnungen, weiteren Anforderungen gerecht werden. Denn bestimmte chemische und physikalische Eigenschaften der Gesteinskörnungen wie beispielsweise die Kornrohdichte und die Wasseraufnahmefähigkeit können die Betonqualität erheblich beeinflussen und müssen aus diesem Grund bekannt sein. Die Untersuchungsergebnisse der verschiedenen Parameter sind in der Tabelle 8 zusammengefasst. Der anschließend durchgeführte Soll-Ist-Vergleich (siehe letzte Spalte) zeigt, dass vom **RC-Splitt Typ 1 stets alle Anforderungen mit einem hohen Maß an Sicherheit erfüllt** werden.

Tabelle 8: Soll-Ist-Vergleich der chemischen und physikalischen Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnungen Typ 1, 2/16 mm

Parameter	Einheit	Ist-Werte							Sollwert*	Ergebnis Soll-Ist- Vergleich
		Prüfbericht								
		23.03.2012	13.12.2012	12.04.2013	02.06.2014	05.09.2014	07.07.2015	22.09.2015		
Kornrohdichte auf ofentrockener Basis (2/16)	[kg/m³]	2.582	2.581	2.608	2.370	2.380	2.430	2.420	≥ 2000	✓✓
Kornform, Anteil plattiger Körner	[M.-%]	4	10	9	6	10	5	3	< 55	✓✓
Wasseraufnahme nach 10 Minuten (2/16)	[M.-%]	4,1	3,8	3	3,1	3,5	3,2	2,9	≤ 10	✓✓
Frost-Tau-Widerstand (4/16), Absplitterung Mittelwert aus 3 Versuchen	[M.-%]	3,9	3,3	3,9	3,7	3,8	2,7	1,9	≤ 4	✓
Gehalt wasserlösliche Chloride	[M.-%]	0,029	0,0009	0,002	0,0004	0,0037	0,0069	0,0012	≤ 0,15	✓✓
Gehalt säurelösliche Chloride	[M.-%]	< 0,005	0,01	0,009	0,019	0,019	0,04	0,01	≤ 0,04	✓
Gehalt säurelösliches Sulfat	[M.-%]	0,29	0,215	0,2	0,3	0,318	0,14	0,33	≤ 0,8	✓✓
Gehalt wasserlösliches Sulfat	[M.-%]	0,0004	0,0023	0,0028	0,0062	0,0026	0,0016	0,001	≤ 0,2	✓✓
Gesamtschwefelgehalt	[M.-%]	0,96	0,111	0,1	0,13	0,166	0,062	0,13	≤ 1,0	✓
Leichtgewichtige organische Verunreinigungen	[M.-%]	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	< 0,1	✓
Alkaliempfindlichkeitsklasse		E III-S							**	
* gemäß DIN EN 12620, Abschnitt 5.8; DAfStb-Richtlinie, Tabelle 2; DIN 1045-2 Anhang U										
**vorbeugende Maßnahmen entsprechend der Alkalirichtlinie sind einzuhalten (siehe Tabelle 3)										
✓Anforderung sicher erfüllt										
✓✓Anforderung bestens / mit hoher Qualität erfüllt										

Die Untersuchungsergebnisse zur Umweltverträglichkeit sind in der Tabelle 9 zusammengefasst und den zulässigen Höchstwerten gegenübergestellt. Die Höchstwerte entsprechen - wie o.a. - den Anforderungen des DIBt bzw. der DIN 4226-100, Anhang G bzw. den Z 2-Werten der LAGA Mitteilung 20 „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln“.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass die **Anforderungen an die Umweltverträglichkeit uneingeschränkt und mit großer Sicherheit von allen untersuchten rezyklierten Gesteinskörnungen erfüllt** wurden. Nach LAGA M20 entspricht der RC-Splitt Liefertyp 1, bis auf eine Ausnahme (Probe vom 07.07.2015), - sogar einer Zuordnungsklasse Z 1.1 (gefordert wird lediglich die Einhaltung der Z 2-Werte). Hierbei verhindern einzig die etwas erhöhten Werte der elektrischen Leitfähigkeit²⁰ eine Einstufung in die Zuordnungsklasse Z 0. Materialien dieser Zuordnungsklasse sind als unbelastet einzustufen und können daher uneingeschränkt zum Wiedereinbau verwendet werden.

Die Einstufung von RC-GK für den ungebundenen Einsatz ist nach dem Erlass des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg „Vorläufige Hinweise zum Einsatz von

²⁰ Die höhere Leitfähigkeit ist typisch bei frisch gebrochenem Beton, da die Bruchstellen freien Kalk enthalten, welcher für die erhöhten Leitfähigkeitswerte verantwortlich ist. In der Regel nehmen die Werte mit der Zeit ab, da durch Reaktionen mit dem Kohlendioxid in der Luft schwer lösliche Carbonate gebildet werden. In Laboren kann diese Reaktion durch gezieltes Begasen mit Kohlendioxid beschleunigt werden.

Baustoffrecyclingmaterial“ vom 13.04.2004 der Einstufung nach LAGA M 20 ähnlich. Die Zuordnungswerte der verschiedenen Regelwerke sind im Anhang 9.2 nur vergleichsweise gegenübergestellt; jedoch **nicht** relevant für RC-Beton.

Tabelle 9: Soll-Ist-Vergleich der Parameter zur Bewertung der Umweltverträglichkeit der rezyklierten Gesteinskörnungen Liefertyp 1, 2/16 mm

Parameter	Einheit	zulässige Höchstwerte*	Prüfbericht							Z 1.1 nach LAGA M20	Z 1.1 nach Erlass Bad.-W. für den ungebundenen Einbau**
			23.03.2012	13.12.2012	12.04.2013	02.06.2014	05.09.2014	07.07.2015	22.09.2015		
Feststoff											
Kohlenwasserstoffe	mg/kg	1.000	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	570	< 50	300	200
PAK nach EPA	mg/kg	75	0,1	0,1	0,537	n.n.	n.n.	0,98	n.n.	5	10
EOX	mg/kg	10	< 0,5	< 0,05	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	3	3
PCB	mg/kg	1	n.n.	< 0,005	< 0,005	n.n.	n.n.	0,035	n.n.	-	-
Eluat											
pH-Wert	-	12,5	11,39	11,63	11,59	11,3	12,11	11,83	11,8		
elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	3.000	689	1.381	748	527	1.442	1.222	1.143	1.500	2.500
Chlorid	mg/l	150	2,99	2,32	3,43	1,88	0,6	10,3	2,9	20	100
Sulfat	mg/l	600	17,2	23,3	28,7	12,1	19,3	8,79	9,7	150	250
Arsen	µg/l	50	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	10	15
Blei	µg/l	100	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	40	40
Cadmium	µg/l	5	< 0,5	< 0,5	< 0,1	< 0,1	< 0,05	< 0,1	< 0,1	2	2
Chrom gesamt	µg/l	100	4	8	4	2	5	6	4,1	30	30
Kupfer	µg/l	200	4	4	2	2	3	2	1,9	50	50
Nickel	µg/l	100	< 1,0	6	1	< 1	1	< 1	< 1	50	50
Quecksilber	µg/l	2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,3	< 0,1	0,2	0,5
Zink	µg/l	400	41	52	< 1	77	85	2	1,22	100	150
Phenolindex	µg/l	100	< 10	10	< 10	< 10	< 10	90	< 10	10	20
Einstufung nach LAGA M20			Z 1.1	Z 1.1	Z 1.1	Z 1.1	Z 1.1	Z 2	Z 1.1	-	-
*gemäß Z2-Werte nach LAGA M20 und DIN 4226-100, Anhang G											
**wird nur alternativ aufgeführt, sofern die RC-GK in ungebundener Form z.B. als Schottertragschicht im Straßenbau eingesetzt werden soll											

6.4 RC-Beton der Transportbeton Waiblingen GmbH & Co. KG

Der RC-Beton für dieses Bauvorhaben wurde von der Transportbeton Waiblingen GmbH & Co. KG geliefert. Die Firma ist Teil eines Betonverbundes, welcher sich selbst als „Gruppe selbständiger, mittelständischer Unternehmen im Raum Stuttgart“²¹ bezeichnet. Beteiligt am Betonverbund sind die Firmen:

- Heinrich Krieger u. Söhne KG, Remseck;
- HKS Betonwerk West GmbH & Co. KG, Kornwestheim;
- Transportbeton Schorndorf GmbH & Co. KG, Schorndorf;
- Winnender Frischbeton GmbH & Co. KG, Winnenden sowie
- Transportbeton Waiblingen GmbH & Co. KG, Waiblingen.

Im Technologiezentrum des Betonverbundes werden stets innovative und qualitativ hochwertige Baustoffe, wie beispielsweise hochfeste, faserverstärkte aber auch ressourcenschonende Betone (RC-Betone), entwickelt.

Beim Neubau „Pegasus“ kamen 2 verschiedene RC-Betone mit folgenden Bezeichnungen zum Einsatz:

- Nr. **37h23C4** mit 22 mm Größtkorn und
- Nr. **37h63C4** mit 16 mm Größtkorn für schmale bzw. bewehrungsintensive Bauteile.

Die jeweiligen Betonrezepturen weisen folgende Zusammensetzung auf:

Tabelle 10: Betonrezepturen der RC-Betone²²

Bestandteil	Betonnummer 37h23C4 (Größtkorn 22 mm)	Betonnummer 37h63C4 (Größtkorn 16 mm)
	Zusammensetzung von 1 m³ RC-Beton	
Sand 0/2 mm	318 kg/m³ (18 Vol.-%)	340 kg/m³ (20 Vol.-%)
Brechsand 0/2 mm*	326 kg/m³ (18 Vol.-%)	349 kg/m³ (20 Vol.-%)
RC-GK 2/16 mm	794 kg/m³ (45 Vol.-%)²³	765 kg/m³ (45 Vol.-%)²⁴
Splitt 8/16 mm	-	266 kg/m³ (15 Vol.-%)
Splitt 16/22 mm	348 kg/m³ (19 Vol.-%)	-
Zement (CEM II/A-LL 42,5 R)	320 kg/m³	330 kg/m³
Fließmittel	3,52 kg/m³	3,63 kg/m³
Verzögerer	0,64 kg/m³	0,66 kg/m³
Flugasche	40 kg/m³	60 kg/m³
Kalksteinmehl	20 kg/m³	20 kg/m³
Wasser	178 kg/m³	191 kg/m³
* kein Sekundärrohstoff; firmeninterne Bezeichnung		

²¹ <http://www.betonverbund.de/ueber-uns.html> aufgerufen am 18.04.2016

²² Mischungsberechnung vom 10.11.2015, erstellt durch Herrn Dipl.-Geologe Bernhard Dziadek, Leiter des Krieger Beton-Technologiezentrums

²³ entspr. zulässige Substitutionsanteile gemäß Tabelle 1

²⁴ ebd.

Die Vorgaben der DAfStb-Richtlinie wurden bei beiden RC-Betonen mit einem maximal zulässigen Substitutionsanteil von 45 Vol.-% rezyklierter Gesteinskörnung anstelle von Kies oder Splitten pro m³ Beton eingehalten bzw. ausgeschöpft (vgl. Tabelle 1).

Der Rohbau mit dem verbauten RC-Beton ist in nachstehender Abbildung 10 zu sehen.



Abbildung 10: Aufnahme vom Rohbau zum Zeitpunkt der Abnahme [Foto: Wanner]



Abbildung 11: Betonkunst im Bereich Treppenhaus [Foto: Wanner]

Die Verwendung von RC Beton sollte auch nach Fertigstellung des Gebäudes noch erkennbar bleiben. Dabei ergab sich die Idee, ein künstlerisches Konzept in Zusammenarbeit mit dem Künstler Harald Braun, der für seine Arbeiten mit Beton bekannt ist, zu entwickeln.

Im Eingangsbereich des Anbaues wurde die Wand zum Bestand über 3 Geschosse mit Sichtbetonqualität S3 gemäß DBV/VDZ-Merkblatt „Sichtbeton“, Fassung Juni 2015 hergestellt. Auf den Betonschalttafeln

wurden Lackanstriche und Folien appliziert. Im Betongussprozess entstanden Wandreliefs (siehe Abbildungen 11 und 12). Bei Betrachtung des Waschbetons (siehe Abbildung 12) wird die eingesetzte rezyklierte Gesteinskörnung deutlich.



Abbildung 12: Betonkunst – Waschbeton (links) und Wandrelief (rechts)

Grundsätzlich kann Sichtbeton in 4 Klassen eingeteilt werden, für die bestimmte Ausführungsbedingungen und Einzelkriterien zur Ergebnisbeurteilung formuliert sind. Die Sichtbetonklassen sind:

- SB1 – geringe Anforderungen, Betonflächen mit geringen gestalterischen Anforderungen (z.B. Kellerwände),
- SB2 – normale Anforderungen, Betonflächen mit normalen gestalterischen Anforderungen (z.B. Treppenhäuseräume, Stützwände),
- **SB3 – besondere Anforderungen, Betonflächen mit hohen gestalterischen Anforderungen²⁵ (z.B. Fassaden) sowie**
- SB4 – besondere Anforderungen, Betonflächen mit besonders hohen gestalterischen Anforderungen (z.B. repräsentative Bauteile im Hochbau).²⁶

²⁵ Z.B. Kriterium Farbtongleichmäßigkeit: unzulässig sind Schmutzflecken, unterschiedliche Arten und Vorbehandlung der Schalungshaut sowie Betonausgangsstoffe verschiedener Art und Herkunft

²⁶ Peck, M.; Bosold, D.; Bose, T.; Technik des Sichtbetons – Planung und Ausführung von Sichtbetonflächen, 2. überarbeitete Auflage, Schriftenreihe der Zement- und Betonindustrie, Herausgeber: InformationsZentrum Beton GmbH, 2016, S. 44, 45

6.5 Bewertung der RC-Betone der Transportbeton Waiblingen GmbH & Co. KG

Mit Bezug auf Kapitel 5 werden nachfolgend die Prüfergebnisse i.R. der erweiterten Erstprüfung zum RC-Beton bewertet. Die Prüfungen der RC-Betone der Transportbeton Waiblingen GmbH & Co. KG wurden im Beton-Technologiezentrum der Fa. Krieger durchgeführt. Die Soll- und Istwerte der geprüften Parameter sind in der Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Ergebnisse der erweiterten Erstprüfungen der RC-Betone 37h23C4 und 37h63C4²⁷

	Parameter	Sollwert	Istwert	
			37h23C4	37h63C4
Erstprüfung (gemäß DIN EN 206-1:2001-07 und DIN 1045-2:2008-08)	Frischbetontemperatur [°C]	15-22	23	-
	Druckfestigkeit nach 28 Tagen [N/mm ²]	$f_{cm} \geq (f_{ck}+4)$	44	45
	Frischbetonrohddichte [kg/m ³]	-	2.374	2.315
	Luftgehalt [Vol.-%]	-	1,3	1,8
Prüfungen im Rahmen der erweiterten Erstprüfung (gemäß DAfStb-Rili)	Feuchtegehalt der Gesteinskörnung [M.-%]	-	3,1 - 3,3	
	Konsistenz / Ausbreitmaß nach 10 min [mm]	480	530	540
	Konsistenz / Ausbreitmaß nach 45 min [mm]	-	480	490
	Konsistenz / Ausbreitmaß nach 90 min [mm]	-	420	450
f_{cm} mittlere Druckfestigkeit des Betons				
f_{ck} charakteristische Betondruckfestigkeit (Zielfestigkeit 37 N/mm ²)				

Im Ergebnis der Erstprüfung lässt sich feststellen, dass die Zieldruckfestigkeit C 30/37 von beiden Betonrezepturen (37h23C4 mit einem Größtkorn von 22 mm und 37h63C4 mit einem Größtkorn von 16 mm) sicher erreicht wurde. Die gemessenen Luftporengehalte von 1,3 und 1,8 Vol.-% belegen, dass es sich um gut verdichtbare Frischbetone handelt. Ein gut verdichteter Frischbeton hat im Allgemeinen einen Luftporengehalt von 1 - 2 Vol.-%; ein höherer Luftporengehalt beeinflusst die Dichtigkeit und Festigkeit des Betons negativ; mit jedem Vol.-% mehr Luftporen fällt die Druckfestigkeit um etwa 7 - 8 % ab.²⁸

Die Prüfergebnisse der Konsistenz im Rahmen der erweiterten Erstprüfung zeigen für beide Betonrezepturen ein ähnliches Verhalten. Die Fahrtzeit vom Betonwerk zur Baustelle wurde mit etwa 45 Minuten angesetzt. Daraus folgt, dass die Ausbreitmaße mit den Sollwerten absolut übereinstimmen.

Der zusätzliche Aufwand, den der Betonhersteller bei der Verwendung von RC-GK hat (Sichtprüfung je Lieferfahrzeug bei Anlieferung; Bestimmung Kornrohddichte, Wasseraufnahme und Wassergehalt sowie Luftgehalt am Frischbeton), wird von dem Betontechnologen der Krieger Beton-Technologiezentrum GmbH als nicht nennenswert angegeben und auf einen

²⁷ Labor Transportbeton Waiblingen, Prüfstelle E: Beton Mischungsberechnung Erstprüfung – Rezept-Nr. 37h23C4 vom 10.11.2015 und Beton Mischungsberechnung Erstprüfung – Rezept-Nr. 37h63C4 vom 10.02.2016

²⁸ G. Neroth, D. Vollenschaar: Wendehorst Baustoffkunde, S. 279 ff.

zeitlichen Umfang von ca. 2 Stunden geschätzt. Bei der ausführenden Person muss es sich um einen qualifizierten Baustoffprüfer mit Einweisung / Erfahrung im Umgang mit RC-Material handeln.²⁹

Im Zuge der Konformitäts- und Produktionskontrolle sind im Laufe der Produktion entsprechend der DIN EN 206-1 Probenahmen zur Überprüfung der Konformitätskriterien durchgeführt worden. Folgende Mittelwerte sind an 9 Proben der Betonsorte 37h63C4 i.R. der Konformitätsprüfungen bestimmt worden:³⁰

- Ausbreitmaß nach 5 Minuten 500 mm
- Luftporengehalt 1,5 Vol.-%
- Frischbetonrohddichte 2.350 kg/m³
- Festbetonrohddichte 2.343 kg/m³
- Betondruckfestigkeit [28d] 47,9 N/mm²

Die Ergebnisse belegen, dass alle Anforderungen sicher erreicht wurden.



Abbildung 13: Probenahme aus der laufenden Produktion (links), Bestimmung des Ausbreitmaßes (Mitte), Herstellung von Probekörpern zur Bestimmung der Druckfestigkeit (rechts) [Foto: Mettke, 14.01.16,]

Auf der Baustelle wurden die Qualitäten der gelieferten RC-Betone durch die GBQ mbH & Co. KG Baustoffprüfung überwacht. Während der Bauarbeiten wurden 26 RC-Beton-Prüfkörper (14 Betonwürfel Betonsorte 37h63C4 und 12 Betonwürfel Betonsorte 37h23C4) hergestellt, an denen im Prüfalter von 28 Tagen die Druckfestigkeit bestimmt wurde. Im Zuge der Probenahme wurden ebenfalls das Ausbreitmaß / die Konsistenz sowie die Rohddichte

²⁹ Dipl.-Ing. Ralf Lieber, Betontechnologe der Krieger Beton-Technologiezentrum GmbH; E-Mail vom 10.06.2016

³⁰ Ausführliche Prüfberichte liegen für den Beton 37h63C4 vor; insgesamt wurden 9 Proben in dem Zeitraum 27.11.2015 – 11.02.2016 untersucht. Für beide RC-Betone liegt das Protokoll der Konformitätsprüfung vor, bei dem aber lediglich die Druckfestigkeit erfasst wurde. Die angegebenen Mittelwerte beziehen sich auf die 9 Prüfungen des RC-Beton 37h63C4.

bestimmt. Die Durchschnittswerte sind in der folgenden Tabelle 12 zusammengefasst. Ein tabellarischer Überblick aller Einzelwerte befindet sich im Anhang 9.1.

Tabelle 12: Untersuchungsergebnisse der RC-Betone der Qualitätsüberwachung auf der Baustelle

Parameter	Einheit	Durchschnittswerte der Untersuchungsergebnisse	
		37h63C4 (Größtkorn 16 mm)	37h23C4 (Größtkorn 22 mm)
Konsistenz	mm	460	460
Rohdichte	kg/m ³	2.290	2.300
Druckfestigkeit	N/mm ²	46,3	50,2

Alle Ergebnisse belegen, dass Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen in einer gleichbleibenden, hohen Qualität hergestellt und geliefert werden kann.

6.6 Einbau des RC-Betons bei der Herstellung des Tragwerks

Die Errichtung des Tragwerks für den Neubau „Pegasus“ erfolgte im Zeitraum vom 26.10.2015 bis 26.02.2016 (entspr. Betoniertagebuch). Wie auf den folgenden Abbildungen zu sehen ist, kam bei den Betonierarbeiten ein Krankübel mit Schlauch (auch Schlauchkübel genannt) zum Einsatz. Insgesamt wurden ca. 500 m³ RC-Beton verbaut und das Tragwerk erfolgreich erstellt.



Abbildung 14: Betonierarbeiten bei der Errichtung des Tragwerks

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 bestimmt. Die Auswertung (siehe Abbildung 15) zeigt, dass sich bis auf einen Ausreißer (Ausbreitmaß 585 mm, entspricht der Konsistenzklasse F5) alle ermittelten Einzelwerte sowie die errechneten Durchschnittswerte bei Mehrfachprüfungen im vorgegebenen Bereich (420 – 480 mm) der Konsistenzklasse F3 befinden.

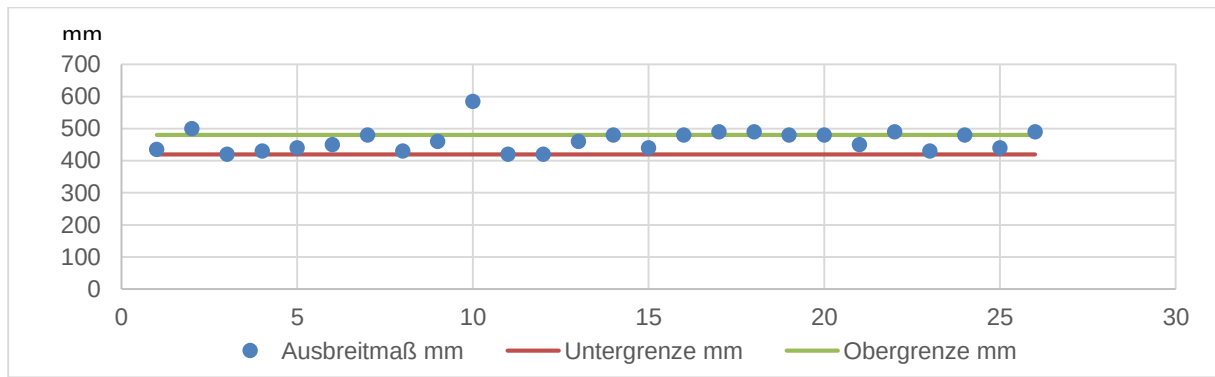


Abbildung 15: Ausbreitmaße des RC-Betons über die gesamte Lieferzeit

Parallel zu den Ausbreitmaßen wurden Probekörper mit den Abmessungen 150 mm x 150 mm x 150 mm in Vorbereitung der Überprüfung der Druckfestigkeit hergestellt. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 16 grafisch dargestellt. Die vorgegebene Mindestdruckfestigkeit von 37 N/mm² wurde von allen Proben sicher erreicht bzw. zum Teil weit übertroffen.

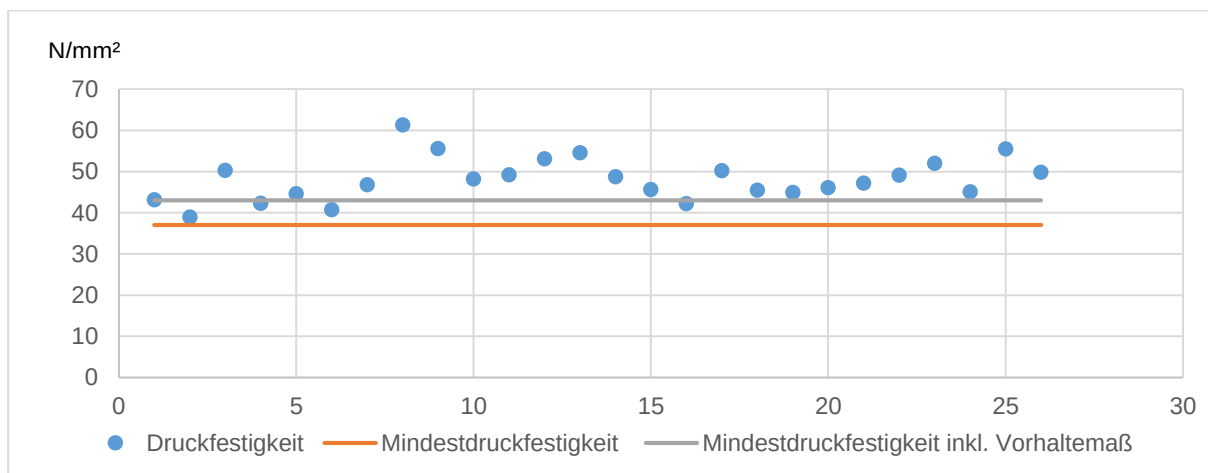


Abbildung 16: Druckfestigkeiten des RC-Betons

Bei der Verarbeitung des RC-Betons sind keine Unterschiede im Vergleich zum Normalbeton festzustellen. Die üblichen Einbau- und Verdichtungsmethoden sind zur Anwendung gekommen. Die Kontrollen des Ausbreitmaßes bei jedem Lieferfahrzeug haben gezeigt, dass die Konsistenz der RC-Betone teilweise etwas schwankte. Dies ist allerdings auf die relativ langen Anfahrtszeiten (vgl. Abbildung 18) und dem daraus resultierenden Einsatz von Verzögerungsmitteln zurückzuführen.

Im Obergeschoss ist eine homogene Sichtbetonoberfläche der Sichtbetonklasse SB 3 erstellt worden. Damit wurde gezeigt, dass mit RC-Betonen Betonflächen mit hohen gestalterischen Anforderungen (SB3) hergestellt werden können. Nur kleinere Mängel wie Kiesnester um die Türöffnung sind zu erkennen und müssen noch „kosmetisch“ nachbearbeitet werden. Dies ist jedoch nicht auf das Material (RC-Beton), sondern auf die unzureichende Verdichtung des RC-Betons zurück zu führen.

Die im Objekt erstellten Wände aus RC-Beton ohne besondere Anforderungen sind mit üblichen Trennmitteln behandelt und zeigen das gleiche Schalbild wie bei der Verwendung von Normalbeton.³¹

Anmerkung:

Die Qualität von Sichtbetonflächen hängt maßgeblich von den handelnden Personen ab, deshalb sind die Auswahl und die Planung des Personals von besonderer Bedeutung³². Generell, die entsprechende Sorgfalt und Umsicht der beteiligten Arbeitskräfte vorausgesetzt, sind drei negative Haupteinflüsse für Qualitätseinbußen des Sichtbetons verantwortlich. Dabei handelt es sich maßgeblich um:

- *die Steifigkeit und Dichtigkeit der Schalung,*
- *der maximale Schutz der Flächen gegen Wasser aller Art und*
- *den Einfluss niedriger Außentemperaturen auf die Farbtongleichmäßigkeit von glatten Sichtbetonflächen.³³*

Beim Einbau des Betons – unerheblich ob Normal- oder RC-Beton - ist auf eine ausreichende Verdichtung zu achten. Für diese ist die Wahl des Rüttlers mit passendem Durchmesser und Frequenz sowie dessen Eintauchstellen mit jeweils ausreichenden Überschneidungen der Wirkungskreise (Abstand normalerweise 10-facher Durchmesser der Rüttelflasche) entscheidend³⁴.

Sichtbare Beeinträchtigungen der Flächen können bereits bei geringen Verzögerungen oder Abweichungen entstehen. Deshalb sind beim Eintreffen des Betons alle baubetrieblichen Arbeiten zuverlässig und mit großer zeitlicher Genauigkeit und Sicherheit durchzuführen.³⁵

³¹ Angaben von Herrn Nerlich der Pfirmann Industriebau GmbH & Co. KG im Schreiben vom 27.04.2016

³² Peck, M.; Bosold, D.; Bose, T.: Technik des Sichtbetons – Planung und Ausführung von Sichtbetonflächen, 2. überarbeitete Auflage, Schriftenreihe der Zement- und Betonindustrie, Herausgeber: InformationsZentrum Beton GmbH, 2016, S.84

³³ ebd. S.87

³⁴ Bauer, Herrmann: Baubetrieb, 3. überarbeitete Auflage, 2007, S. 250

³⁵ Peck, M.; Bosold, D.; Bose, T.: Technik des Sichtbetons – Planung und Ausführung von Sichtbetonflächen, 2. überarbeitete Auflage, Schriftenreihe der Zement- und Betonindustrie, Herausgeber: InformationsZentrum Beton GmbH, 2016, S.125

7 Stoffflussbetrachtung

Stellt man die Rezepturen von Primärbeton und RC-Beton gleicher Betonsorte gegenüber, wird deutlich, dass kaum Unterschiede bei den Anteilen an Zement, Wasser und Zusätzen zu verzeichnen sind. Lediglich bei dem Einsatz von Gesteinskörnung gibt es Abweichungen zwischen Primär- und RC-Beton (siehe Abbildung 17). Aus diesem Grund beschränken sich die nachfolgenden ökobilanziellen Betrachtungen auf die eingesetzten Gesteinskörnungen größer 2 mm.

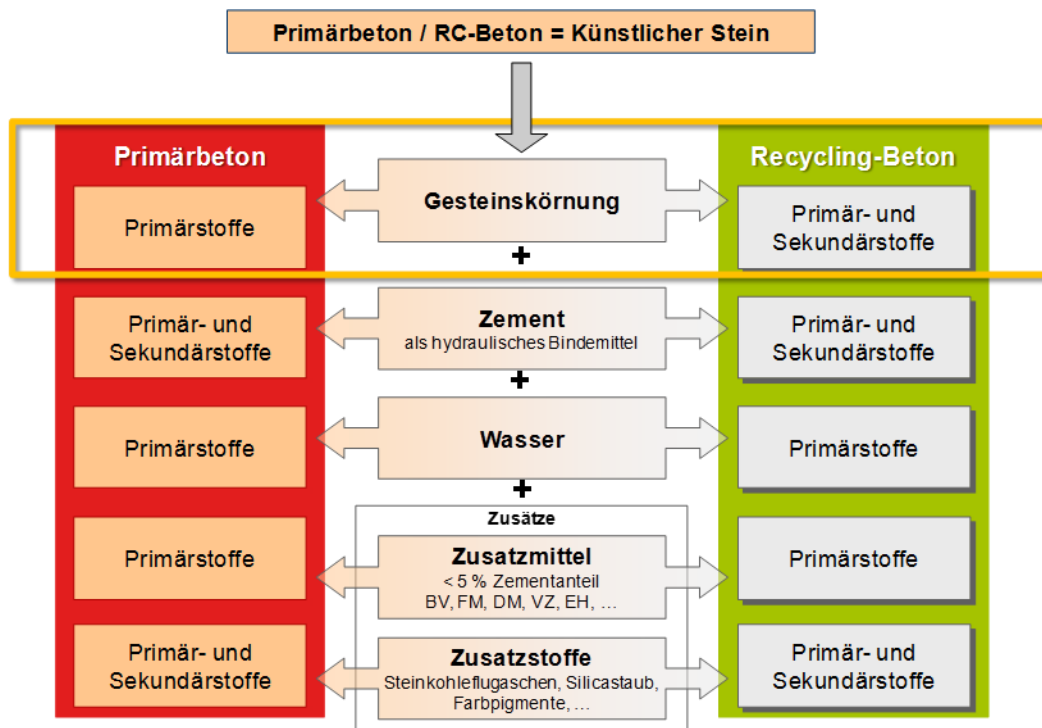


Abbildung 17: Synopse Zusammensetzung Primär- mit RC-Beton [Mettke]

Bei der Herstellung des RC-Betons für die Rohbaukonstruktion wurde mit den rezyklierten Gesteinskörnungen der Fa. Feeß der Primärrohstoff Muschelkalksplitt der Fa. Lukas Gläser GmbH & Co. KG substituiert.

Die Herstellung von Muschelkalksplitt läuft in der Regel nach folgendem Schema ab:

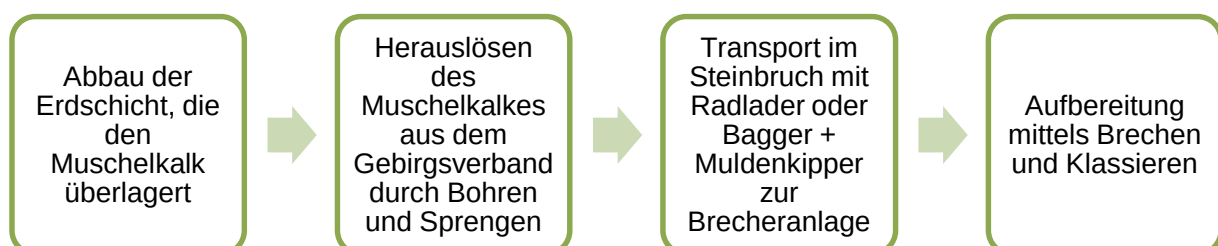


Abbildung 18: Produktionsablauf zur Aufbereitung von Muschelkalk³⁶

³⁶ www.schoen-hippelein.de; aufgerufen am 09.11.2016

Der Aufbereitungsprozess der Fa. Feeß zur Produktion der rezyklierten Gesteinskörnung vom Liefertyp 1 ist in Abbildung 7 dargestellt.

In der Abbildung 19 ist die Bereitstellung der RC-Gesteinskörnung zur Herstellung des RC-Betons und die Bereitstellung von Muschelkalksplitt zur Herstellung von Normalbeton in einem Schema veranschaulicht:

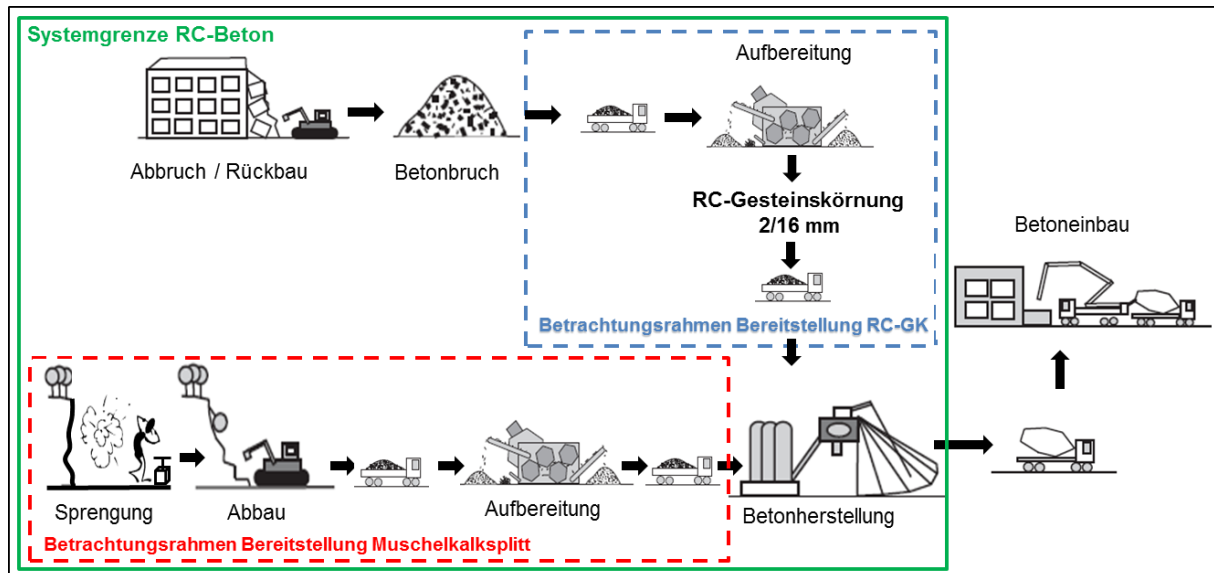


Abbildung 19: Systemgrenze zur Herstellung von RC-Beton

Die Abbildung 19 verdeutlicht den Betrachtungsrahmen und grob die Verfahrensschritte zur Herstellung von RC-GK im Vergleich zur Gewinnung und Bereitstellung von Muschelkalksplitt. Der Abbruch / Rückbau eines Gebäudes sowie der Transport der Abbruchabfälle wird nicht in den Betrachtungsrahmen zur Bereitstellung der RC-Gesteinskörnung einbezogen, da Gebäude nicht zur Gewinnung von RC-Gesteinskörnung abgebrochen werden.

Anfragen bei den jeweiligen Herstellern der Gesteinskörnungen zu den energetischen Aufwendungen blieben offen. Insofern ist es nicht möglich, eine entsprechende Berechnung durchzuführen. Generell wirkt sich jedoch die Verwendung von RC-Gesteinskörnungen zur Herstellung von Beton mehrfach positiv auf die Umwelt aus, da

- natürliche Ressourcen geschont werden,
- die Materialeffizienz verbessert wird,
- die Flächeninanspruchnahme durch den Abbau von Primärrohstoffen reduziert wird,
- kein Deponieraum für die Ablagerung der Abbruchabfälle in Anspruch genommen werden muss,
- der Energieverbrauch zur Bereitstellung der RC-GK und die damit verbundenen CO₂-Emissionen vermindert werden können,
- die Verkehrsbelastungen durch Schwerlasttransporte über große Transportdistanzen vermindert werden.

Bauschutt als Ausgangsstoff für die Produktion von RC-Gesteinskörnungen fällt insbesondere in städtischen Ballungszentren an; dort wo Gebäude zu erneuern sind und eine hohe Baunachfrage besteht, so dass durch die Verwendung von Recyclingbaustoffen Transportwege verkürzt werden können.

Bei ausschließlicher Betrachtung der Transportwege speziell zum Bauvorhaben „Pegasus“ ergibt sich allerdings kein entscheidender ökologischer Vorteil durch den Einsatz von RC-GK. Die Transportdistanz von der RC-Anlage Heinrich Feeß GmbH & Co. KG mit Sitz in Kirchheim bis zum Transportbetonwerk Waiblingen GmbH & Co. KG beträgt ca. 40 km (siehe Abbildung 20). Die Anlieferung der RC-GK erfolgte per LKW-Transport. Die natürliche Gesteinskörnung wurde von etwa 25 km Entfernung (Abbau von Muschelkalk im Steinbruch Lukas Gläser GmbH & Co. KG in Kirchberg-Zwingelhausen) bis zum Transportbetonwerk antransportiert. Die Transportentfernung vom Betonwerk bis zur Baustelle „PEGASUS“ beträgt rund 25 km.

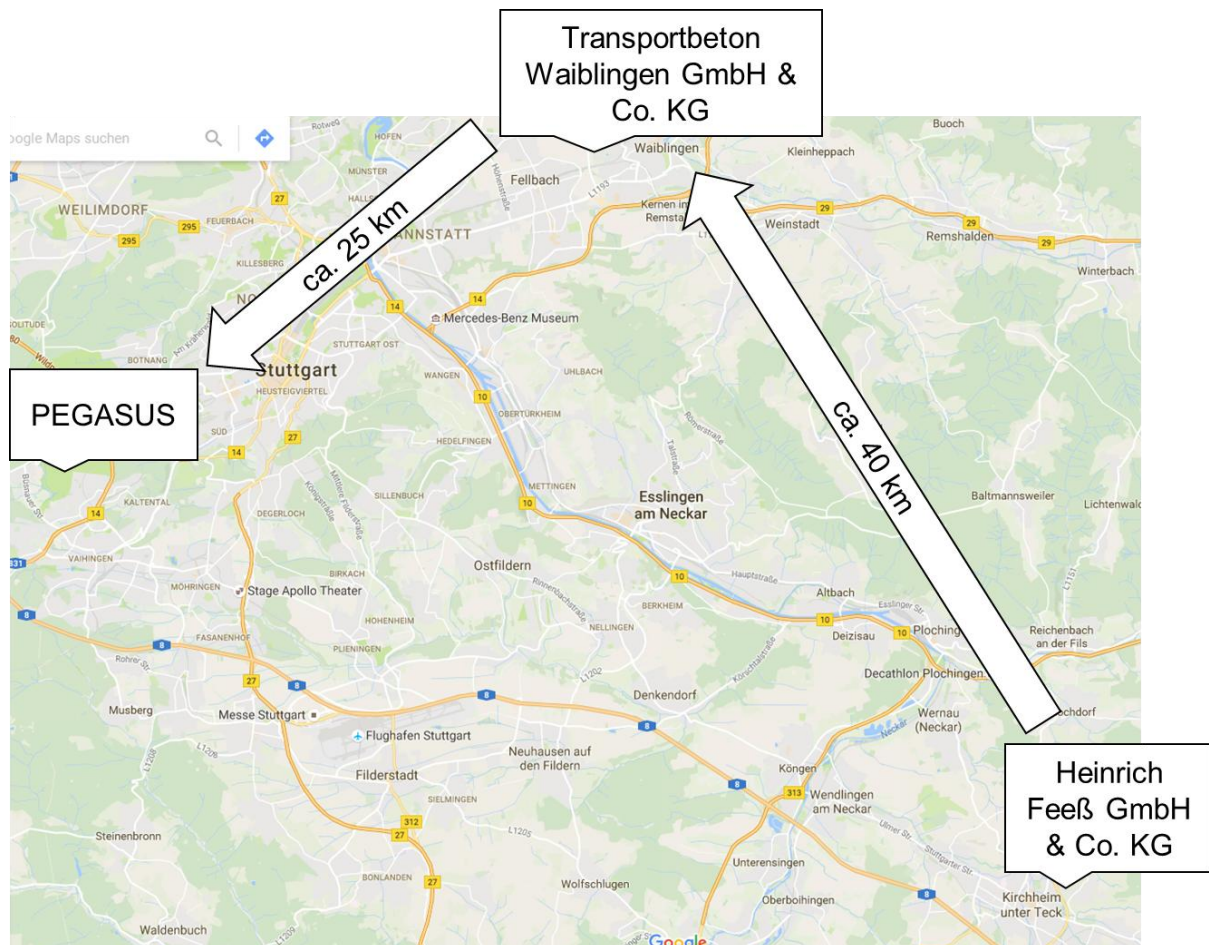


Abbildung 20: Transportdistanzen zwischen Recyclinganlage, Betonwerk und Baustelle [Auszug google maps]

Ökonomische und ökologische Vorteile resultieren im Allgemeinen aus den kurzen Transportdistanzen zwischen Abbruchstandort, Recyclinganlage, Betonwerk und Neubauort.

Es wird empfohlen zu untersuchen, wie kurze Transportdistanzen realisiert werden können. Die Ifeu-Studie „Untersuchungs- und Demonstrationsvorhaben zur Intensivierung der Verwendung von aufbereitetem Bauschutt als Betonzuschlagstoff“³⁷ zeigt diesbezüglich erste Lösungsansätze auf:

- Produktion der RC-GK auf den Rückbau-Baustellen bei Erzeugung / Anfall von sortenreinem Betonbruch,
- Bereitstellung von Flächen in städtischer Randlage für die Aufbereitung von Bauschutt für eine befristete Zwischennutzung.

Fazit:

Mineralische Rohstoffe sind, wie konventionelle Energierohstoffe, nicht erneuerbar bzw. nicht unendlich verfügbar. Schon heute gibt es gebietsweise Engpässe bei der Lieferung bestimmter Gesteinskörnungsgrößen und Qualitäten. In der Vergangenheit hat sich gezeigt, dass verbrauchernahe Lagerstätten entweder weitgehend erschöpft oder mangels Abbaugenehmigung aufgrund konkurrierender Nutzungsansprüche vielfach nicht nutzbar sind.³⁸ Daher ist eine Steigerung der Ressourcen- und Energieeffizienz von Materialien und Konstruktionen unabdingbar. Der Verwendung von Recyclingbaustoffen muss deshalb eine immer größere Bedeutung zukommen.

Auch bisher noch ausreichend verfügbare Massenbaustoffe wie Kies (Korngröße größer 2 mm abgestuft bis 63 mm) und Sand (Korngröße 0,063 mm bis 2 mm) sind wertvolle Ressourcen, die sparsam einzusetzen sind. RC-Beton anstelle von Normalbeton zu verbauen, leistet dazu einen erheblichen Beitrag.

³⁷ Knappe, Florian; Reinhardt, Joachim; SCHORB; Achim, Theis, Stefanie: Untersuchungs- und Demonstrationsvorhaben zur Intensivierung der Verwendung von aufbereitetem Bauschutt als Betonzuschlagstoff, i.A. des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft in Baden-Württemberg, Februar 2016, S.89

³⁸ Vgl. Tatort Erde: Menschliche Eingriffe in Naturraum und Klima, hrsg. von Günter Warnecke, Monika Huch, Klaus Germann, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1991, S. 25

8 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der Errichtung des Neubaus „Pegasus“ – Praktikumsergänzungsgebäude Ausbau Universität Stuttgart – wurde ein weiterer Leuchtturm³⁹ zum Einsatz von Betonen mit rezyklierten Gesteinskörnungen geschaffen. Es konnte nachgewiesen werden, dass ein gut vorbereitetes innovatives Konzept zur Verwendung von RC-Beton im Hochbau unter Einbindung der Akteure der Bauwirtschaft mit einer intelligenten Vernetzung von Produktions- und Wertschöpfungsprozessen erfolgreich umsetzbar ist. Der Einsatz von RC-Beton leistet einen Beitrag zum nachhaltigen Umgang mit Ressourcen im Bausektor.

Im Vergleich zum Normalbeton sind für die Verwendung von RC-Beton geringe zusätzliche Aufwendungen einzuplanen und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- a) Wie bereits im Kapitel 5 aufgeführt, müssen rezyklierte Gesteinskörnungen ebenso wie natürliche Gesteinskörnungen den bautechnischen Anforderungen gemäß DIN EN 12620 entsprechen.

An rezyklierten Gesteinskörnungen sind zusätzlich folgende Parameter zu prüfen:

- stoffliche Zusammensetzung,
- säurelösliche Chloride,
- wasserlösliche Sulfate,
- Bestandteile, die den Erstarrungsbeginn des Zementleims beeinflussen,

sowie die folgenden Nachweise zu erbringen:

- Umweltverträglichkeit und
- Alkaliempfindlichkeit.

- b) Bei der Herstellung von RC-Beton hat der Betonhersteller die Vorgaben der DAfStB-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ zu beachten (vgl. Kapitel 5). Nach dieser Richtlinie ist RC-Beton für die Expositionsklassen X0, XC1 bis XC4, XF1, XF3 und XA1 anwendbar, jeweils unter Beachtung der empfohlenen Substitutionsraten. Ausgeschlossen ist die Verwendung von RC-Beton bei der Herstellung von Spannbeton und Leichtbeton sowie Betonen mit Festigkeitsklassen > C30/37. Zudem dürfen nur rezyklierte Gesteinskörnungen mit einem Korndurchmesser > 2 mm für die Herstellung von Beton eingesetzt werden. Werden diese Vorgaben eingehalten, kann der RC-Beton nach den Bemessungsgrundlagen für Normalbeton hergestellt werden.

³⁹ „Leuchtturm“ steht für Sichtbarkeit, für eine große menschliche und technische Leistung, für ein Abheben aus der grauen Masse... sind als Instrument der Markteinführung zu verstehen“ [Rennings, Klaus: Innovationspolitische Instrumente zur Förderung von Materialeffizienz und Ressourcenschonung, Maßnahmenvorschläge zur Ressourcenpolitik zur Gestaltung der Rahmenbedingungen (MaRess), Paper 3.8, Wuppertal 2010, S. 20]

Die Eignung des RC-Betons ist anhand einer erweiterten Erstprüfung nachzuweisen, d.h. neben den Standarduntersuchungen (Erstprüfung nach DIN EN 206-1 sowie DIN 1045-2) ist

- der Feuchtegehalt der rezyklierten Gesteinskörnung (Kernfeuchte und Oberflächenfeuchte) zu bestimmen und bei der Festlegung der Mischungsanteile zu berücksichtigen,
- die Konsistenz des Frischbetons nach 10, 45 und 90 Minuten zu überprüfen,
- eine Dosieranweisung für die nachträgliche Zugabe von Fließmitteln zu erstellen.

Zusätzlich müssen im Rahmen der Produktionskontrolle nachstehende Prüfungen vom Betonhersteller durchgeführt werden:

- Sichtprüfung der stofflichen Zusammensetzung der RC-GK (Liefertyp 1 oder 2) bei jedem Lieferfahrzeug,
- Ermittlung der Kornrohddichte (ofentrocken) nach DIN EN 1097-6 in jeder Produktionswoche,
- Ermittlung der Wasseraufnahme der RC-GK nach 10 Minuten in jeder Produktionswoche,
- Ermittlung des Wassergehalts der rezyklierten Gesteinskörnung bei Änderung der Feuchtebedingungen,
- Ermittlung des Luftgehalts am Frischbeton und der Frischbetonrohddichte im Rahmen des Festigkeitsnachweises für den Beton.⁴⁰

Welche Maßnahmen zur Überwachung der Betonqualität auf der Baustelle ergriffen werden müssen und in wessen Verantwortungsbereich diese fallen, ist im Anhang 9.3 zusammengefasst.

- c) Im Leistungsverzeichnis sollte bereits zu Beginn, bspw. unter dem Punkt „Allgemeine Informationen“, auf den Einsatz von RC-Beton hingewiesen werden.

Um Kontinuität und somit auch Sicherheit bei den ausschreibenden Stellen sowie den bauausführenden Unternehmen im Umgang mit RC-Beton zu erzeugen, wird folgendes Ausschreibungsmuster zur Verwendung von RC-Beton empfohlen:

Ergänzende Ausschreibungstexte des Leistungsverzeichnisses

Hinweis in den Vorbemerkungen:

Besondere Anforderungen:

Ortbeton ist als Normalbeton nach DIN EN 206, DIN 1045-2 und/oder - soweit zulässig – unter der Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 herzustellen. Es sind die Regelungen

⁴⁰ Auszug aus DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Ausgabe September 2010, Abschnitt 4 und 5

gemäß 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 2010-09, Herausgeber: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – DAfStb anzuwenden.

Muster Ausschreibungstext:

Gewerk: 13 Betonarbeiten

013... ... m³ ... €/m³ ... €

Ortbeton Außenwand Stahlbeton C 25/30, Dicke 25 cm

Ortbeton der Außenwände, als Stahlbeton, Recyclingbeton C 25/30, XC4, XF1, GK 16 mm mit rezyklierter Gesteinskörnung, Dicke 25 cm

Die baubegleitenden Untersuchungen sowie die Auswertung der durchgeführten Prüfungen an den RC-Gesteinskörnungen und dem RC-Beton führen zu dem Ergebnis, dass

- **die untersuchten RC-Gesteinskörnungen für den Einsatz im Beton hervorragende bautechnische Eigenschaften besitzen und aus umwelttechnischer Sicht absolut unbedenklich sind,**
- **RC-Beton hinsichtlich der Qualität und Verarbeitbarkeit dem Normalbeton in keinem Punkt nachsteht.**

Ausblick

Im Jahr 2015 wurden allein in Deutschland 47,2 Mio. m³ Transportbeton produziert. Das sind 15 % mehr als im Jahr 2008 verbaut worden sind.⁴¹ Wohn- und Nichtwohngebäude werden hauptsächlich in Stahlbeton ausgeführt. Durch die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen anstelle von Primärrohstoffen kann ein riesiges Ressourcenschonungspotenzial erschlossen und zukünftig kontinuierlich gesteigert werden.

Derzeit beschränkt sich der Einsatz von RC-Beton noch auf einzelne Bauvorhaben, aber vor allem in den Bundesländern Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Berlin etabliert sich RC-Beton bereits schrittweise auf dem Markt. Nur durch Leuchttürme wie „Pegasus“, Transparenz der Ergebnisse und stetige Kommunikation mit den beteiligten Akteuren können vorhandene Hemmnisse erfolgreich abgebaut und das Vertrauen in den Baustoff RC-Beton gestärkt werden.

Aus Sicht des RC-Gesteinskörnungs-Produzenten rentiert sich die Produktion von Lieferkörnungen für Beton bei einem Absatz größerer Mengen. Daher ist es von Bedeutung, dass die öffentliche Hand für ihre Beschaffungs- bzw. Baumaßnahmen den Einsatz von RC-Beton gegenüber Normalbeton favorisieren. D.h., die Ausschreibungen sind dementsprechend

⁴¹ <http://www.transportbeton.org/branche/wirtschaftsdaten/>; aufgerufen am 03.01.2017

auszurichten. Als Ausschreibungshilfe wird empfohlen, den Leitfaden „Ausschreibung“⁴² heranzuziehen.

Aus Gesprächen mit Transportbetonproduzenten geht hervor, dass Unternehmen bereit sind, RC-Beton in ihr Portfolio aufzunehmen (siehe Abbildung 21), wenn eine stetige Nachfrage gesichert wird. Denn erst bei kontinuierlicher Abfrage von RC-Beton rentiert sich bspw. eine Investition in zusätzliche Aufgabebunker und kann RC-Beton zu gleichen Preisen wie Normalbeton angeboten werden. Aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht wird es interessant, wenn die Transportproduzenten die RC-GK aus naher Entfernung beziehen können. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass die Transportentfernung zwischen RC-GK-Produzent und Transportbetonwerk nicht weiter als 25 bis 30 km sein sollte. Bei längeren Transportwegen geht der ökonomische und ökologische Vorteil gegenüber den Primärrohstoffen (Kiese und Sande) verloren.

Im Rahmen einer Telefonumfrage im Stuttgarter Raum haben neben der Heinrich Feeß GmbH & Co. KG weitere Recyclingunternehmer erklärt, dass sie mit Inkrafttreten der normativen Regelung sowie bei Sicherstellung einer kontinuierlichen Abfrage, RC-GK für den Einsatz in Beton in ihr Portfolio aufnehmen würden (siehe Abbildung 21).

Der Wegfall der Regelung, dass die Umweltverträglichkeit der RC-Gesteinskörnungen im Rahmen einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) nachzuweisen ist (vgl. Kapitel 5), bedeutet für den RC-Gesteinskörnungs-Produzenten eine enorme finanzielle wie auch zeitliche Entlastung. Gleiches trifft für den Bauherren zu, der in der Vergangenheit eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) für den Einsatz von RC-Beton in Hochbaumaßnahmen zu beantragen hatte. Gegenwärtig handelt es sich bei der Prüfung der Umweltverträglichkeit um eine freiwillige Nachweisführung zur Umweltverträglichkeit der RC-GK seitens des Recyclers. Bereits vorhandene abZ's behalten ihre Gültigkeit. Die Prüfung der RC-GK hinsichtlich ihrer umwelttechnischen Eignung wird in naher Zukunft durch die Aufnahmen der DIN 4226-101 und DIN 4226-102 in die Liste der technischen Baubestimmungen, welche vom Deutschen Institut für Bautechnik herausgegeben wird, wieder normativ geregelt.

⁴² Empfehlung: Dageförde, Angela; Meetz, Michael; Mettke, Angelika: Steigerung der Ressourceneffizienz des Recyclings von mineralischen Abbruchabfällen, Leitfaden „Ausschreibungen“, i.A. des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg, 2017 [Download unter: <http://www.mlul.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.3310.de/Bauabfall-Leitfaden-Ausschreibungen.pdf>]

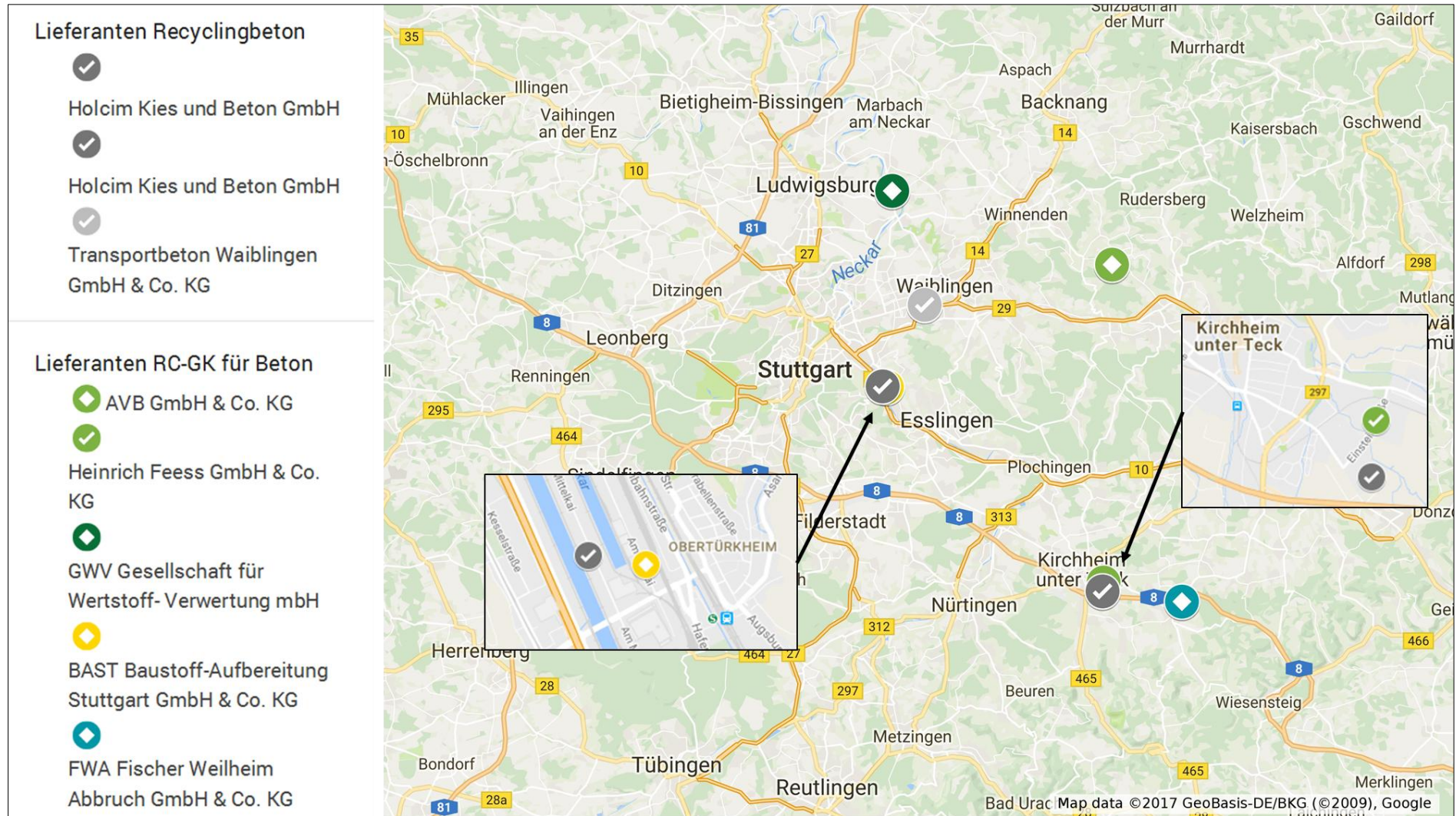


Abbildung 21: Potenzielle Transportbetonproduzenten und Lieferanten von RC-GK für Beton im Raum Stuttgart – Ergebnis einer Telefonumfrage / Momentaufnahme Stand 7. KW 2017

9 Anhang

9.1 Zusammenfassende Darstellung der Frisch- und Festbetonuntersuchungen an den RC-Betonen

(Betonnummern 37h63C4 und 37h23C4) nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 auf der Baustelle, ausgeführt durch die GBQ mbH & Co. KG
Baustoffprüfung

Betonnummer 37h63C4															
Probennummer	14	15	17	18	19	21	23	24	28	29	30	31	37	40	Ø
Herstelldatum	27.11.2015	30.11.2015	02.12.2015	04.12.2015	07.12.2015	12.12.2015	18.12.2015	14.01.2016	01.02.2016	03.02.2016	04.02.2016	11.02.2016	22.02.2016	26.02.2016	
Konsistenz (mm)	370	500	430	410	440	460	430	585	490	460	480	490	430	490	430
Rohdichte (kg/dm³)	2,29	2,27	2,28	2,28	2,28	2,29	2,35	2,25	2,3	2,3	2,31	2,3	2,28	2,29	2,29
Druckfestigkeit (N/mm²)	43,1	38,9	42,3	44,6	40,7	46,8	55,6	48,2	48,7	45,6	42,2	50,2	52	49,8	46,45

Betonnummer 37h23C4													
Probennummern	16	22	25	26	27	32	33	34	35	36	38	39	Ø
Herstelldatum	01.12.2015	18.12.2015	16.01.2016	26.01.2016	27.01.2016	16.02.2016	16.02.2016	16.02.2016	17.02.2016	19.02.2016	23.02.2016	24.02.2016	
Konsistenz (mm)	420	460	410	420	470	470	480	520	450	490	480	440	430
Rohdichte (kg/dm³)	2,34	2,39	2,27	2,28	2,34	2,29	2,3	2,31	2,28	2,29	2,3	2,3	2,32
Druckfestigkeit (N/mm²)	50,3	61,4	49,2	53,1	54,6	45,5	44,9	46,1	47,2	49,1	45,1	55,5	52,9

9.2 Gegenüberstellung von Zuordnungs- / Grenzwerten für die Verwertung von mineralischen Abfällen (Bauschutt) anhand verschiedener Regelwerke

[Tabelle 9 aus Habilitationsschrift von Mettke, A., 2010]

Parameter	Einheit	LAGA M20; Bb			LAGA EP			Ba-Wü			Bay		NRW		GFS	TrinkwV	ErsatzbaustoffV-E			DepV	Eigene Untersuchungsergebnisse Betonproben					
		Z 1.1	Z 1.2	Z 2	RC-1	RC-2	RC-3	Z 1.1	Z 1.2	Z 2	RW 1	RW 2	RCL I	RCL II			RC-1	RC-2	RC-3	DK 0 Mono-deponie	P1	P2	P3	P4	P4, Wf = 2,4	
		Feststoffanalyse																								
MKW	mg/kg	300	500	1.000	300	300	1.000	200	300	1.000	300	1.000								≤ 500	100	100	100			
PAK nach EPA		5	15	75	3	9	30	10	15	35	5	20	15	75						≤ 30	0,362					
EOX		3	5	10				3	5	10	3	15	3	5							0,1	0,1	0,1			
Eluatanalyse																										
elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	1.500	2.500	3.500	1.500	2.500	3.500	2.500	3.000	5.000	200	800	2.000	3.000		2.500	2.000	2.500	10.000	≤ 1.000	3.360	4.280	2.140	4.110	6.310	
Arsen	µg/L	10	40	50				15	30	60	10	60			10	10				≤ 40	1	1	1	< 10	< 10	
Blei		40	100	100				40	100	200	40	200	40	100	7	10				≤ 50	20	20	20	< 10	< 10	
Cadmium		2	5	5				2	5	6	2	10	5	5	0,5	5				≤ 4	2	2	2	< 1	< 1	
Chrom (ges.)		30	75	100	12,5	25	60	30	75	100	50	150			7	50	50	60	100	≤ 50	15	15	15	19	37	
Kupfer		50	150	200	20	60	100	50	150	200	50	300			14	200	40	70	100	≤ 150	20	20	20	< 5	< 5	
Nickel		50	100	100	15	20	70	50	100	100	50	200			14	20				≤ 40	20	20	20	16	< 5	
Quecksilber		0,2	1	2	0,5	1	2	0,5	1	2	0,5	2			0,2	1				≤ 1	0,2	0,2	0,2			
Zink		100	300	400	100	150	200	150	300	400	100	600	200	400	58					≤ 300				3,5	0,9	
Phenol-index		10	50	100	10	50	100	20	50	100	20	100	50	100							5	5	5			
Vanadium															4		30	50	100					< 5	< 5	
Chlorid	mg/L	20	40	150	30	40	100	100	200	300	125	300	40	150	250	250				≤ 80				0,16	0,28	
Sulfat		150	300	600	100	300	600	250	400	600	250	1.000	150	600	240	240	200 (350)	350 (700)	1.400	≤ 100				31,3	93,5	

 Abgleich der vorgegebenen Werte verschiedener länderspezifischer Regelungen mit der TrinkwV
 eigene Versuchsergebnisse
 entspr. Faktor des Perkolationsverfahrens gegenüber dem Schüttelversuch

9.3 Hinweise zur Überwachung der Betonqualität auf der Baustelle

Durch das Bauunternehmen ist für jede Anlieferung des Transportbetons die Übereinstimmung des Lieferscheines mit den bautechnischen Unterlagen zu überprüfen. Nicht ausreichend gekennzeichnete Baustoffe / Bauteile dürfen nicht eingebaut werden. [DIN EN 1045-3:2012-03]

Vor Entladen des Betons muss der Hersteller dem Verwender einen Lieferschein für jede Betonladung übergeben, auf dem mindestens folgende Angaben gedruckt, gestempelt oder handschriftlich eingetragen sind:

- Name des Transportbetonwerkes,
- Lieferscheinnummer,
- Datum und Zeit des Beladens, d.h. Zeitpunkt des ersten Kontakts zwischen Zement und Wasser,
- Kennzeichen des LKW oder Identifikation des Transportfahrzeugs,
- Name des Käufers,
- Bezeichnung und Lage der Baustelle,
- Einzelheiten oder Verweis auf die Festlegungen, z.B. Sortennummer oder Bestellnummer,
- Menge des Betons in Kubikmetern,
- Konformitätserklärung mit Bezug auf die Festlegungen und auf diese Europäische Norm,
- Name oder Zeichen der Zertifizierungsstelle, falls beteiligt,
- Zeitpunkt des Eintreffens des Betons auf der Baustelle,
- Zeitpunkt des Beginns des Entladens,
- Zeitpunkt des Beendens des Entladens. [DIN EN 206:2014-07, S.42]

Anmerkung aus DIN 1045-3:2012-03, S.19: Fahrmischer und Fahrzeuge mit Rührwerk sollten 90 min nach der ersten Wasserzugabe zum Zement vollständig entladen sein.

Zusätzlich muss der Lieferschein für Beton nach Eigenschaften folgende Einzelheiten enthalten:

- Festigkeitsklasse,
- Expositionsklasse,
- Klasse des Chlidgehaltes,
- Konsistenzklasse oder Zielwert der Konsistenz,
- Grenzwerte der Betonzusammensetzung, falls festgelegt,
- Art und Festigkeitsklasse des Zements, falls festgelegt,
- Art der Zusatzmittel und Zusatzstoffe, falls festgelegt,

- Art der Fasern und Fasergehalt oder Leistungsklasse von faserbewehrtem Beton, falls festgelegt,
- Besondere Eigenschaften, falls gefordert. [DIN EN 206:2014-07, S.43]

Gemäß DIN 1045-3:2012-03, Tabelle 3.NA erfolgt bei Beton der Überwachungsklasse 2 ($\geq$ C30/37 und $\leq$ C50/60) die Eigenüberwachung gemäß den Arbeitsanweisungen des Bauunternehmens sowie die zusätzliche Überwachung durch eine dafür anerkannte Überwachungsstelle (jeweils nach Anhang NA bis NE).

Neben den maßgebenden Frisch- und Festbetoneigenschaften sind für das Betonieren folgende Daten zu überprüfen und aufzuzeichnen:

- Lufttemperatur (Maximum / Minimum) und Witterungsverhältnisse während des Betonierens einzelner Abschnitte,
- Bauabschnitt und bauteil,
- Art und Dauer der Nachbehandlung.

Die Konformität mit den festgelegten Merkmalen muss zum Zeitpunkt der Verwendung des Betons oder im Falle von Transportbeton zum Zeitpunkt der Übergabe gegeben sein. [DIN EN 206:2014-07, S.36]

Im Folgenden ist der Überwachungsaufwand für Beton der Überwachungsklasse 2 zusammengefasst:

- Bei Transportbeton ist jede Lieferung hinsichtlich der Konsistenz augenscheinlich zu prüfen. Beim ersten Einbringen jeder Betonzusammensetzung, bei der Herstellung von Probekörpern für die Festigkeitsprüfung sowie in Zweifelsfällen ist die Konsistenzklasse gemäß DIN EN 12350-2 bis -5 zu bestimmen. [DIN 1045-3:2012-03, Anhang NB, Tabelle NB.1]
- Wird Beton in einem Fahrmischer oder in einem Fahrzeug mit Rührwerk geliefert, darf die Konsistenz an einer Stichprobe gemessen werden, die zu Beginn des Entladens entnommen wird. Die Stichprobe muss nach dem Entladen von etwa 0,3 m³ Beton nach EN 12350-1 „Prüfung von Frischbeton“ entnommen werden. [DIN EN 206-1:2001-07, S.31]

Da die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen die Konsistenz des Betons (sog. Ansteifen) beeinflussen kann, ist die Überprüfung des Ausbreitmaßes bei jeder Lieferung zu empfehlen.

- Die Gleichmäßigkeit des Betons ist bei jedem Lieferfahrzeug augenscheinlich zu prüfen. [DIN 1045-3:2012-03, Anhang NB, Tabelle NB.1]
- Die Frischbetontemperatur ist bei Lufttemperaturen zwischen +5°C und -3°C beim Einbau des Betons zu bestimmen. Die Frischbetontemperatur darf in diesem Fall +5°C nicht unterschreiten. Bei Temperaturen unter -3°C darf die

Frischbetontemperatur +10°C nicht unterschreiten und sollte anschließend wenigstens 3 Tage auf mindestens +10°C gehalten werden. [DIN 1045-3:2012-03, Anhang NB, Tabelle NB.1 sowie Absatz 9]

- Die Überprüfung der Druckfestigkeitsklasse erfolgt gemäß DIN 1045-3:2012-03, Anhang NB.2 und ist dort wie folgt festgelegt: Für jeden verwendeten Beton der Überwachungsklasse 2 sind mindestens 3 Proben zu nehmen und zwar jeweils für höchstens 300 m³ oder je 3 Betoniertage. Die Betonproben müssen etwa gleichmäßig über die Betonierzeit verteilt und aus verschiedenen Lieferfahrzeugen entnommen werden, wobei aus jeder Probe ein Probekörper herzustellen ist.

An den entnommenen Proben zur Herstellung der Probekörper sind außerdem die Konsistenz und die Frischbetonrohddichte nach DIN EN 12350-6 zu bestimmen.

Anmerkung aus DIN EN 206:2001-07, S.39: Falls dem Beton im Fahrmischer auf der Baustelle mehr Wasser oder Zusatzmittel zugegeben werden, als nach der Festlegung zulässig, sollte die Betoncharge oder –ladung im Lieferschein als „nicht konform“ bezeichnet werden. Der Beteiligte, der diese Zugabe veranlasste, ist für die Konsequenzen verantwortlich und sollte im Lieferschein angegeben werden.

10 Literaturverzeichnis

<http://www.betonverbund.de/ueber-uns.html>; am 18.04.2016 abgerufen

<http://www.schoen-hippelein.de>; am 09.11.2016 abgerufen

Ackermann Architekten. (05. 05 2015). Leistungsverzeichnis - Rohbauarbeiten Bauvorhaben "Pegasus" .

Bauer, H. (2007). *Baubetrieb*. 3. überarbeitete Auflage .

Dageförde, A., Meetz, M., Mettke, A. (2017). Steigerung der Ressourceneffizienz des Recyclings von mineralischen Abbruchabfällen. *Leitfaden „Ausschreibungen“*. i.A. des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg.

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton . (Ausgabe 2010). 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*.

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. (Schlussfassung Juni 2013). Richtlinie "Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton".

Deutsches Institut für Bautechnik. (18. 08. 2016). Stellungnahme zum EuGH-Urteil vom 16. Oktober 2014 (Rechtssache C-100/13). *Ergänzung der Stellungnahmen des DIBt vom 13. April 2015 und 17. Dezember 2015*.

Deutsches Institut für Bautechnik. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.43-2079. *Rezyklierte Gesteinskörnung der Heinrich Feeß GmbH & Co. KG "RC-Splitt Typ 1" und "RC-Splitt Typ 2" der Korngruppe 2/16*. (Geltungsdauer 02/2015 - 02/2020).

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 4226-101:2016-09. *Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton - Teil 101: Umwelanforderungen und Liefertypen (nach DIN EN 12620)*.

DIN 4226-102:2016-09. *Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton - Teil 102: Qualitätssicherung (Typ-Prüfung und Werkseigene Produktionskontrolle)*.

DIN EN 12620:2008-07. *Gesteinskörnungen für Beton*.

DIN EN 206-1:2001-07. *Beton Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*

Institut Dr. Haag GmbH. (23. 03. 2012). Prüfbericht Nr.: 282530B.

Institut Dr. Haag GmbH. (20. 11. 2012). Prüfbericht Nr.: 282540B.

Institut Dr. Haag GmbH. (20. 03. 2013). Prüfbericht Nr.: 282550B.

Institut Dr. Haag GmbH. (23. 04. 2014). Prüfbericht Nr.: 282570B.

Institut Dr. Haag GmbH. (15. 08. 2014). Prüfbericht Nr.: 282580B.

Institut Dr. Haag GmbH. (19. 08. 2015). Prüfbericht Nr.: 282500B.

Institut Dr. Haag GmbH. (05. 05. 2015). Prüfbericht Nr.: 282590B.

Knappe, F., Reinhardt, J., Schorb, A., Theis, S. (2016). Untersuchungs- und Demonstrationsvorhaben zur Intensivierung der Verwendung von aufbereitetem Bauschutt als Betonzuschlagstoff. i.A. des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft in Baden-Württemberg.

Labor Transportbeton Waiblingen Prüfstelle E. (10. 11. 2015). Beton Mischungsberechnung. *Erstprüfung Rezept-Nr.: 37h23C4.*

Labor Transportbeton Waiblingen Prüfstelle E. (10. 02. 2016). Beton Mischungsberechnung. *Erstprüfung Rezept-Nr.: 37h63C4.*

Labor Transportbeton Waiblingen Prüfstelle E. (Überwachungszeitraum 27.11.2015 - 11.02.2016). Prüfberichte Beton. *Frisch-/Festbeton.*

Lieber, D.-I. R. (10. 06. 2016). Betontechnologie der Krieger Beton-Technologiezentrum GmbH. (E-Mail, Interviewer)

Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20. (06. 11. 2003). Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen. *Technische Regeln.*

Nerlich, H., Pfirmann Industriebau GmbH & Co. KG. E-Mail vom 27. 04. 2016.

Neroth, G. & Vollenschaar, D. (2011). Wendehorst Baustoffkunde. *Grundlagen - Baustoffe - Oberflächenschutz.*

Peck, M., Bosold, D. & Bose, T. (2016). *Technik des Sichtbetons - Planung und Ausführung von Sichtbetonflächen*. InformationsZentrum Beton GmbH.

Pfirmann Industriebau GmbH & Co. KG. Betoniertagebuch. *Zeitraum 26.10.2015 - 26.02.2016.*

- Rennings, K. (2010). Innovationspolitische Instrumente zur Förderung von Materialeffizienz und Ressourcenschonung. Maßnahmvorschläge zur Ressourcenpolitik zur Gestaltung der Rahmenbedingungen (MaRess). Paper 3.8. Wuppertal.
- Röhling, S., Eifert, H. & Jablinski, M. (2012). Betonbau. *Zusammensetzung - Dauerhaftigkeit - Frischbeton*.
- Universitätsbauamt Stuttgart und Hohenheim. (22. 04 2015). Bauwerk 28221200, Plan Nr. A101 Übersicht Ansichten.
- Warnecke, G., Huch, M., Germann, K. (1991). Tatort Erde. Menschliche Eingriffe in Naturraum und Klima, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.