

**IAB - Institut für Angewandte Bauforschung
Weimar gGmbH**

**Entwicklung von ressourceneffizienten Bausystemen
für den seriellen und kostengünstigen Wohnungsbau
– innovative Verwertungslösungen für gemischten
Mauerwerkabbruch**

Phase 1

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 33674/01-23 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Min. Michael Bach

Weimar, Dezember 2017

**IAB - Institut für Angewandte Bauforschung
Weimar gGmbH**

**Entwicklung von ressourceneffizienten Bausystemen
für den seriellen und kostengünstigen Wohnungsbau
– innovative Verwertungslösungen für gemischten
Mauerwerkabbruch**

Phase 1

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 33674/01-23 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Min. Michael Bach

Weimar, Dezember 2017

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Az **33674/01-23**

Referat

Fördersumme

124.872 €

Antragstitel **Entwicklung von ressourceneffizienten Bausystemen für den seriellen und kostengünstigen Wohnungsbau – innovative Verwertungslösungen für gemischten Mauerwerkabbruch**

Stichworte

Laufzeit

Projektbeginn

Projektende

Projektphase(n)

12 Monate**01.01.2017****31.12.2017****1**

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger Büscher GmbH & Co.KG
Bült 54
48619 Heek

Tel 02568/388140

Bearbeiter
Jürgen Büscher

Kooperationspartner IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH
Über der Nonnenwiese 1
99428 Weimar

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Die wachsenden Anforderungen an die Recyclingfähigkeit und damit die Verwertung am Nutzungsende von Bauprodukten sowie die Frage der Ressourceneffizienz steht im Mittelpunkt des vom Bundeskabinett im März 2012 beschlossenen Ressourceneffizienzprogramms. So soll die Einsatzquote von Recycling-Gesteinskörnungen bei der Betonherstellung bis 2030 deutlich erhöht werden.

Dementsprechend hat dieses Vorhaben folgende Ziele:

- Entwicklung von ressourceneffizienten Wandelementen auf der Basis von Mauerwerksbruch für tragende- und nichttragende Innenbauteile, innovative Werkstoffentwicklung
- Entwicklung Low-Cost-Bausystem für den kostengünstigen Wohnungsbau
- Nutzung von Mauerwerksbruch als Rohstoffkomponente, Einsparung von nichterneuerbaren Rohstoffressourcen wie natürliche Gesteine
- Schutz der Umwelt durch Ressourceneinsparung und Schließung von Stoffkreisläufen

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die Phase 1 dieses Projektes zur innovativen Verwertung von gemischtem Mauerwerkabbruch in Fertigteil-Bausystemen für den seriellen Wohnungsbau beinhaltet folgende Arbeitsschritte:

- Analyse der Ausgangssituation bezüglich technischer Vorgaben, Baustoffe, Bausysteme; Erarbeitung eines Lastenhefts
- Aufbereitung und Analyse des Recyclingmaterial
- Betonentwicklung im Labormaßstab

Ergebnisse und Diskussion

In diesem Projekt wird die Möglichkeit einer Verwendung von RC-Gesteinskörnung in Fertigteilen aus Beton für den seriellen Wohnungsbau untersucht, d.h., auch in Mengenanteilen, die über das in den derzeit geltenden Vorschriften zulässige Maß hinausgehen.

Durch die Fa. Büscher wurde RC-Gesteinskörnung aus gemischtem Beton- und Mauerwerksabbruch hergestellt.

Dieses Material wurde in zwei Prüfinstituten hinsichtlich seiner Eigenschaften untersucht und erfüllt die Anforderungen der entsprechenden Normen und Richtlinien.

Weiterhin wurde der Einfluss von Schwankungen in der stofflichen Zusammensetzung von RC-Gesteinskörnung untersucht. Dazu wurden Betonversuche mit verschiedenen Anteilen von gebrochenem Kalksandstein bzw. Ziegeln durchgeführt.

Zur vergleichenden Beurteilung der Auswirkungen der Verwendung von RC-Material auf die Betoneigenschaften wurde ein Referenzbeton mit rein natürlicher Gesteinskörnung hergestellt.

Folgende Effekte wurden im Rahmen der Untersuchungen festgestellt:

- Schnelleres Ansteifen des Frischbetons
- Moderater Rückgang der Druckfestigkeit um 15-20% bei RC-Gehalten über 50%
- Deutlicher Rückgang des statischen E-Moduls um bis zu 50% bei vollständigem Ersatz
- Deutliche Erhöhung von Kriechen und Schwinden

Die beiden erstgenannten Auswirkungen sind durch geeignete technologische Maßnahmen bzw. Rezepturoptimierungen gut zu beherrschen.

Der verminderte E-Modul und das verstärkte Schwinden müssen in der Bauteilstatik berücksichtigt werden.

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass sich auch bei vollständigem Ersatz der Gesteinskörnung durch RC-Material ein Beton entsprechend DIN EN 206-1 produzieren lässt, der die gestellten Anforderungen erfüllt.

Vorbehaltlich einer entsprechenden bauaufsichtlichen Zulassung ist es möglich >50% der für die Herstellung von Betonfertigteilen benötigten Gesteinskörnung durch Recyclingmaterial zu ersetzen.

Aus umwelttechnischer Sicht können somit folgende Ziele erreicht werden:

- Einsparung von natürlichen Gesteinen als nichterneuerbaren Rohstoffressource
- Entlastung der Umwelt durch verminderten CO₂ Ausstoß infolge geringeren Transportaufwandes da Abbruchmaterial in der näheren Umgebung verfügbar ist

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Für das ressourceneffiziente Bausystem, basierend auf Betonelementen aus gemischtem Mauerwerksabbruch wird eine Zulassung vom DiBT angestrebt. Am 12.02.2016 erfolgte bereits eine Vorstellung der Projektidee beim Bundesministerium für Umwelt und Bauen in Berlin unter Anwesenheit vom DiBT. Die notwendigen Schritte für eine Zulassung wurden besprochen.

Fazit

Es wird möglich sein, einen qualitätsgerechten Beton auch mit höheren Gehalten an rezyklierter Gesteinskörnung herzustellen, als derzeit zulässig.

Eine genauere Spezifizierung der technologischen Grenzen des RC Einsatzes kann erst nach konstruktiver Betrachtung der zu planenden Bauteile unter Berücksichtigung der in dieser Projektphase ermittelten Materialeigenschaften erfolgen. Dieses wird Bestandteil der Phase 2 dieses Projektes sein.

Inhalt

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen	6
Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen	7
Zusammenfassung	8
Einleitung	9
Hauptteil	10
Untersuchungen und Ergebnisse	10
1 Analyse der Ausgangssituation bezüglich technischer Vorgaben, Baustoffe, Bausysteme / Erarbeitung Lastenheft	10
1.1 Konstruktive Anforderungen an nichttragende Innenwände	10
1.1.1 Mineralstoffplatten für den allgemeinen Wohnungsbau innerhalb einer Wohnung ..	10
1.1.2 Eigenschaften der Mineralstoffplatten im Keller	11
1.1.3 Allgemeine Anforderungen für Transportanker	11
1.2 Anforderungen an den Beton	11
1.3 Herstellungsverfahren	11
2 Aufbereitung Recyclingmaterial	12
3 Analyse der Betonausgangsstoffe	13
3.1 Natürliche Gesteinskörnung	13
3.2 RC-Baustoffgemisch	13
3.2.1 Korngrößenverteilung	13
3.2.2 Kornrohichte und Wasseraufnahme	14
3.2.3 Stoffliche Zusammensetzung	15
3.3 Kalksandstein und Ziegel	16
3.3.1 Kornverteilung	17
3.3.2 Kornrohichte und Wasseraufnahme	17
4 Entwicklung RC-Werkstoff im Labormaßstab	18
4.1 Mischungsentwürfe	18
4.2 Frischbetoneigenschaften	19
4.3 Festbetoneigenschaften	19
4.3.1 Druckfestigkeit	19
4.3.2 E-Modul	21
4.3.3 Schwinden	21
4.4 Frostwiderstand	23
Fazit und Ausblick	25
Literaturverzeichnis	26

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Aufgabe Ausgangsmaterial in Brecher	12
Bild 2: Siebdeck und Materialabwurf	12
Bild 3: Kalksandstein 8/22	12
Bild 4: Dachziegel 8/22	12
Bild 5: Mauerwerksziegel 8/22	12
Bild 6: Korngrößenverteilung RC 0/8	14
Bild 7: Korngrößenverteilung RC 8/22	14
Bild 8: Pycnometerverfahren	14
Bild 9: Pycnomatic ATC	14
Bild 10: stoffliche Zusammensetzung Fraktion 0/8	15
Bild 11: stoffliche Zusammensetzung Fraktion 8/22	15
Bild 12: Kornverteilung 0/8 (KSS, Ziegel)	17
Bild 13: Kornverteilung 8/22 (KSS, Ziegel)	17
Bild 14: Korngrößenverteilung Probemischungen	18
Bild 15: Druckfestigkeit RC-Mischungen	20
Bild 16: Druckfestigkeit Mischungen mit KSS und Ziegeln	20
Bild 17: E-Moduli	21
Bild 18: Schwindmessung IAB	22
Bild 19: Schwindrinnen	22
Bild 20: Schwindmessung IAB	22
Bild 21: CDF/CIF Prüfanlage	23
Bild 22: Abwitterung nach Frostbeanspruchung	24
Bild 23: Verlauf relativer dynamischer E-Modul im CIF-Test	24

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schallschutzanforderungen	10
Tabelle 2: stoffliche Zusammensetzung IAB	15
Tabelle 3: stoffliche Zusammensetzung Uni Essen-Duisburg	16
Tabelle 4: Wasseraufnahmen und Rohdichten	17
Tabelle 5: Schwindmessung Uni Essen-Duisburg	22

Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

$R'w$	bewertetes Schalldämm-Maß in dB
ρ_d	Rohdichte in kg/m^3
XC1 bis XC4	Expositionsklassen für Korrosionsgefahr, ausgelöst durch Karbonatisierung
XF1 bis XF4	Expositionsklassen für Gefahr von Frostangriff mit oder ohne Taumittel
$\varepsilon_{s,t}$	Schwindmaß zum Zeitpunkt t
Gesteinskörnung:	für die Verwendung in Beton geeigneter gekörnter, mineralischer Stoff, der natürlich, künstlich, wiedergewonnen oder recycelt sein kann
recycelte Gesteinskörnung:	Gesteinskörnung, die durch Aufbereitung von vorher beim Bauen verwendeten anorganischen Stoffen gewonnen wird
Betonzusatzmittel:	Stoff, der während des Mischvorgangs des Betons in kleinen Mengen, bezogen auf den Zementgehalt, zugegeben wird, um die Eigenschaften des Frischbetons oder Festbetons zu verändern
Korngruppe:	Bezeichnung einer Gesteinskörnung mittels unterer (d) und oberer (D) Siebgröße, angegeben als d/D
Frischbeton:	Beton, der fertig gemischt ist, sich noch in einem verarbeitbaren Zustand befindet und durch das gewählte Verfahren verdichtet werden kann
Wasserzementwert:	auch w/z-Wert; Masseverhältnis des wirksamen Wassergehaltes zum Zementgehalt im Frischbeton
Schwinden:	Längenänderung einer Betonprobe durch Feuchtigkeitsabgabe
Schwindmaß	auf die Messlänge bezogene Längenänderung des Betons
E-Modul:	Materialkennwert für das elastische Verformungsverhalten eines durch Druck oder Zug beanspruchten Werkstoffs

Zusammenfassung

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wird die Möglichkeit einer Verwendung von RC-Gesteinskörnung in Fertigteilen aus Beton für den seriellen Wohnungsbau untersucht.

Besondere Aspekte waren dabei:

1. Die Verwendung von RC-Material auch in Mengenanteilen, die über das in den derzeit geltenden Vorschriften zulässige Maß hinausgehen.
2. Die Untersuchung des Einflusses von Schwankungen in der stofflichen Zusammensetzung von RC-Gesteinskörnung

Durch die Fa. Büscher wurde RC-Gesteinskörnung aus gemischtem Beton- und Mauerwerksabbruch hergestellt.

Dieses Material wurde in zwei Prüfinstituten hinsichtlich seiner Eigenschaften untersucht und erfüllt die Anforderungen der entsprechenden Normen und Richtlinien.

Zur Untersuchung der Einfluss von Schwankungen in der stofflichen Zusammensetzung von RC-Gesteinskörnung wurden Betonversuche mit verschiedenen definierten Anteilen von gebrochenem Kalksandstein bzw. Ziegeln durchgeführt.

Zur vergleichenden Beurteilung der Auswirkungen der Verwendung von RC-Material auf die Betoneigenschaften wurde ein Referenzbeton mit rein natürlicher Gesteinskörnung hergestellt.

Folgende Effekte wurden im Rahmen der Untersuchungen festgestellt:

- Schnelleres Ansteifen des Frischbetons
- Moderater Rückgang der Druckfestigkeit um 15-20 % bei RC-Gehalten über 50 %
- Deutlicher Rückgang des statischen E-Moduls um bis zu 50% bei vollständigem Ersatz
- Deutliche Erhöhung von Kriechen und Schwinden

Die beiden erstgenannten Auswirkungen sind durch geeignete technologische Maßnahmen bzw. Rezepturoptimierungen gut zu beherrschen.

Der verminderte E-Modul und das verstärkte Schwinden müssen in der Bauteilstatik berücksichtigt werden.

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass sich auch bei vollständigem Ersatz der Gesteinskörnung durch RC-Material ein Beton entsprechend DIN EN 206-1 produzieren lässt, der die gestellten Anforderungen erfüllt.

Vorbehaltlich einer entsprechenden bauaufsichtlichen Zulassung ist es möglich >50 % der für die Herstellung von Betonfertigteilen benötigten Gesteinskörnung durch Recyclingmaterial zu ersetzen.

Aus umwelttechnischer Sicht können somit folgende Ziele erreicht werden:

- Einsparung von natürliche Gesteinen als nichterneuerbaren Rohstoffressource
- Entlastung der Umwelt durch verminderten CO₂ Ausstoß infolge geringeren Transportaufwandes da Abbruchmaterial in der näheren Umgebung verfügbar ist

Der Anteil an Ziegel und Kalksandstein im RC-Gemisch ist zu beschränken, da diese Komponenten sich stark auf das Schwinden und den E-Modul auswirken.

Zur Realisierung des Projekts haben sich die folgenden Partner aus Industrie und Forschung zusammengeschlossen:

Büscher GmbH & Co.KG mit dem Teilvorhaben 1 „Entwicklung und Fertigung serieller Bausysteme aus gemischtem Mauerwerksbruch“

IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH mit dem Teilvorhaben 2 „Werkstoffuntersuchungen, Bauteiluntersuchungen“

Das Projekt wird durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert (Az: 33674/01-23).

Einleitung

Die wachsenden Anforderungen an die Recyclingfähigkeit und damit die Verwertung am Nutzungsende von Bauprodukten sowie die Frage der Ressourceneffizienz steht im Mittelpunkt des vom Bundeskabinett im März 2012 beschlossenen Ressourceneffizienzprogramms. So soll die Einsatzquote von Recycling-Gesteinskörnungen bei der Betonherstellung bis 2030 deutlich erhöht werden.

Um die nachhaltige und effiziente Materialverwendung in der Entwicklung von Betonfertigteilen durchsetzen zu können, müssen die technischen Voraussetzungen für die Anwendung der Abfallstoffe geschaffen werden. Dazu gehören die Entwicklung von Aufbereitungstechnologien des gemischten Bauschuttes, die Entwicklung von Betonrezepturen auf der Basis von Recyclingmaterial als Substitut für natürliche Gesteinskörnungen, einschließlich der notwendigen Performanceuntersuchungen mit dem Ziel der nachhaltigen Verbesserung der Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft. Eine Verwertung ist aus umweltpolitischer und wirtschaftlicher Sicht dringend erforderlich.

Ziel dieses von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsprojekts ist die Entwicklung von Fertigteil-Bausystemen unter Verwendung von Recyclingmaterial als innovative Verwertungsmöglichkeit für Beton- und Mauerwerksabbruch.

In Hinsicht auf eine hohe Ressourceneffizienz sollen auch Rezepturen mit Gehalten an Recyclingmaterial außerhalb des derzeit normativ zulässigen Bereichs untersucht werden.

Dementsprechend hat dieses Vorhaben folgende konkreten Ziele:

- Entwicklung von ressourceneffizienten Wandelementen auf der Basis von Mauerwerksbruch für tragende- und nichttragende Innenbauteile, innovative Werkstoffentwicklung
- Entwicklung Low-Cost-Bausystem für den kostengünstigen Wohnungsbau
- Nutzung von Mauerwerksbruch als Rohstoffkomponente, Einsparung von nichterneuerbaren Rohstoffressourcen wie natürliche Gesteine
- Schutz der Umwelt durch Ressourceneinsparung und Schließung von Stoffkreisläufen

Zur Realisierung dieses Ziels haben sich die folgenden Partner aus Industrie und Forschung zusammengeschlossen:

Büscher GmbH & Co.KG

Teilvorhaben 1: Entwicklung und Fertigung serieller Bausysteme aus gemischtem Mauerwerksbruch

IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH

Teilvorhaben 2: Werkstoffuntersuchungen, Bauteiluntersuchungen

Ergänzende Untersuchungen werden durch die Universität Duisburg-Essen, Institut für Massivbau im Unterauftrag der Fa. Büscher ausgeführt.

Die in diesem Bericht behandelte erste Projektphase mit einer Laufzeit vom 01.01.2017 bis 31.12.2017 umfasst im Wesentlichen folgende Arbeiten:

- Analyse der Ausgangssituation bezüglich technischer Vorgaben, Baustoffe, Bausysteme; Erarbeitung eines Lastenhefts
- Aufbereitung und Analyse des Recyclingmaterial
- Betonentwicklung im Labormaßstab

Hauptteil

Untersuchungen und Ergebnisse

Für die Realisierung des Entwicklungsziels „Entwicklung von ressourceneffizienten Bausystemen für den seriellen und kostengünstigen Wohnungsbau – innovative Verwertungslösungen für gemischten Mauerwerkabbruch“ ist folgender Lösungsansatz vorgesehen:

Betonentwicklung:

- Entwicklung Recyclingwerkstoff auf der Basis von aufbereiteten Bauschutt
- Sichere Aussortierung schädlicher Bestandteile wie Gips
- Dauerhaftigkeit für Innenbauteile in Performanceuntersuchungen nachgewiesen

Wandelemente:

- Fertigung als tragende/nichttragende Innenwände aus hydraulisch gebundenem Mauerwerksbruch (Mauerwerksersatz)
- hohe Oberflächenqualität (spachtel- / tapezierfähig)

Bausystem:

- Entwicklung serielles Bausystem auf der Basis horizontal und vertikal kombinierter Raummodule
- Low-Cost Bausystem für den sozialen Wohnungsbau

1 Analyse der Ausgangssituation bezüglich technischer Vorgaben, Baustoffe, Bausysteme / Erarbeitung Lastenheft

Zu Beginn der Projektbearbeitung stand eine eingehende Analyse der Ausgangssituation bzgl. der normativen, konstruktiven und stofflichen Anforderungen an Fertigteile aus RC-Material im Fokus der Arbeiten. Durch die Projektpartner erfolgte dazu eine eingehende Analyse der zur Verfügung stehenden Materialien.

Im Ergebnis dessen wurde im weiteren Projektverlauf planmäßig ein Lastenheft mit der Definition der notwendigen statisch-konstruktiven, werkstofflichen und fertigungstechnischen Anforderungen erstellt.

Angestrebt wurden Fertigteile aus RC-Material für Wände in Innenbereich, worauf auch die Anforderungen ausgerichtet wurden.

1.1 Konstruktive Anforderungen an nichttragende Innenwände

Aus konstruktiver Sicht bestehen Anforderungen an die Fertigteile bezüglich Schallschutz, Wärmedämmung und Brandschutz.

1.1.1 Mineralstoffplatten für den allgemeinen Wohnungsbau innerhalb einer Wohnung

Schallschutz:

Tabelle 1: Schallschutzanforderungen

Beiblatt 2 zu DIN 4109 (1989)		DEGA-Empfehlung 103	
Normaler Schallschutz	Erhöhter Schallschutz	EW1	EW2
erf. $R'w = 40$ dB	erf. $R'w = 47$ dB	erf. $R'w = 42$ dB	erf. $R'w = 47$ dB
Wand $d=12$ cm (ohne Putz)			
$\rho_d \geq 1200$ kg/m ³	$\rho_d \geq 2000$ kg/m ³	$\rho_d \geq 1200$ kg/m ³	$\rho_d \geq 2000$ kg/m ³

Wärmeschutz: keine besonderen Anforderungen

Brandschutz: mind. nicht brennbar

1.1.2 Eigenschaften der Mineralstoffplatten im Keller

Schallschutz: Keine Anforderungen an den Schallschutz

Wärmeschutz:

Trennwände innerhalb des Kellers: keine besonderen Anforderungen

Trennwände zum Heizungsraum: keine besonderen Anforderungen

Trennwände zum Treppenhaus: Zusätzlich mit Dämmung (nach genauer Absprache)

Brandschutz:

Trennwände innerhalb des Kellers: mind. nicht brennbar

Trennwände zum Heizungsraum: mind. F30 oder F90

Trennwände zum Treppenhaus: mind. F90

1.1.3 Allgemeine Anforderungen für Transportanker

Am Markt übliche Transportanker für Betonelemente sind nach Richtlinie VDI-BV-BS 6205 bemessen.

Ein Vergleich der Verankerung zugelassenen Transportanker in neuen außerhalb der Betonnorm hergestellten Elemente, ist nicht möglich.

Somit müssen durch Versuche neue Werte ermittelt werden.

Für Spannschlösser gilt gleiches.

1.2 Anforderungen an den Beton

Aus betontechnologischer Sicht wurde eine Expositionsklasse von maximal XC3 angenommen, was Innenräumen mit hoher Luftfeuchtigkeit entspricht.

Daraus ergeben sich für den Beton eine Festigkeitsklasse von mindestens C20/25 mit einem Mindestzementgehalt von 260 kg/m³ und einem maximalen w/z-Wert von 0,65. Für die Betondeckung der Bewehrung gilt entsprechend ein Nennmaß von $c_{nom}=35$ mm.

Bei den Ausgangsstoffen Zement, Zusatzmittel und ggf. natürliche Gesteinskörnung sollte ebenfalls auf die derzeit für Normalbeton verwendeten Materialien zurückgegriffen werden.

1.3 Herstellungsverfahren

Bezüglich des Fertigungsverfahrens wurde angestrebt, soweit als möglich ohne Modifikationen an der Beton-Mischanlage sowie der Einbau- und Verdichtungstechnik der Firma Büscher auszukommen.

2 Aufbereitung Recyclingmaterial

Das RC-Material wird in der zugelassenen Abfallbehandlungsanlage auf dem Werksgelände des Unternehmens Büscher aufbereitet, gebrochen und in Kornfraktionen gesiebt.

Als Ausgangsmaterial für die RC-Gesteinskörnung diente von der Firma Büscher angenommener gemischter Bauwerksabbruch. Die Anlieferung der Materialien erfolgt i. d. R. aus der näheren Umgebung des Werksitzes.

Die genaue Herkunft und Zusammensetzung ist jeweils auf den Wägescheinen (Eingangserfassung über geeichte Waagen) mit zugehörigem Abfallschlüssel dokumentiert und in der EDV archiviert.

Pro Aufbereitungszyklus (Dauer ca. 7 Tage, je nach Bedarf ca. 1 x Monat) können ca. 3000 t Rohmaterial für die Verwendung im Beton aufbereitet werden.

Bei der Anlieferung erfolgen zusätzliche Kontrollen bzgl. der Zusammensetzung der Materialien. (Videoüberwachung, Sichtkontrollen, Abkippen vor den Einlagerungsbereichen).

Fremd- und Störstoffe gelangen nicht in den Aufbereitungsbereich für den Betoneinsatz. Insbesondere werden Metall, Kunststoff, Holz und Gips in einer Vorsortierung entfernt.

Das Brechen des Materials erfolgt in einer mobilen Brechanlage auf ein Größtkorn von 45 mm.

Das gebrochene Material wurde mittels Siebung in die Korngruppen 0/8, 8/22 und 22/45 geteilt, wobei nur die beiden ersteren in diesem Projekt Verwendung fanden.



Bild 1: Aufgabe Ausgangsmaterial in Brecher



Bild 2: Siebdeck und Materialabwurf

Im Februar 2016 wurde mit dem DIBT in Berlin eine Beratung durchgeführt, mit dem Ergebnis Modellmischungen herzustellen und zu untersuchen. Die Modellmischungen sollen aus Ziegel und Kalksandsteinmaterial bestehen mit Mengenanteilen von 0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 100 %.

Daher wurden aus sortenreinem Ausgangsmaterial von Kalksandstein, Dachziegeln und Mauerwerkshohlziegeln ebenfalls die Korngruppen 0/8 und 8/22 hergestellt.



Bild 3: Kalksandstein 8/22



Bild 4: Dachziegel 8/22



Bild 5: Mauerwerksziegel 8/22

3 Analyse der Betonausgangsstoffe

Folgende Betonausgangsstoffe kamen in diesem Projekt zum Einsatz:

Natürliche Gesteinskörnung:	Natursand 0/2, Kalksteinsplitt 2/8, 8/16 und 16/22
RC-Baustoffgemisch	Korngruppen 0/8 und 8/22
Kalksandstein (KSS) gebrochen	Korngruppen 0/8 und 8/22
Dachziegel (DZ) gebrochen	Korngruppen 0/8 und 8/22
Mauerwerkshohlziegel (GZ) gebrochen	Korngruppen 0/8 und 8/22
Zement	CEM II/A-S 52,5R (Holcim)
Zusatzmittel	Fließmittel MasterEase 5020 (BASF)

3.1 Natürliche Gesteinskörnung

Die angelieferte Natürliche Gesteinskörnung wurde in Weimar auf folgende Parameter untersucht:

- Kornverteilung
- Kornrohddichte
- Wasseraufnahme

Es wurde eine Kornrohddichte von $\sim 2,64 \text{ kg/m}^3$ und von $\sim 2,70 \text{ kg/m}^3$ für die Kalksteinsplitt bestimmt. Die Wasseraufnahme lag durchweg bei 0,2 - 0,3 M.-%.

Alle untersuchten Eigenschaften entsprechen den Vorgaben der DIN EN 12620 und der Leistungserklärung des Herstellers.

3.2 RC-Baustoffgemisch

Die Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton sind in DIN 4226-101 „Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620“ geregelt. Hier sind in Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung vier Typen für RC-Gesteinskörnungen definiert.

Die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen der Typen 1 und 2 nach dieser Norm und DIN EN 12620 ist in DIN EN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045-2 unter Beachtung der DAfStb-Richtlinie "Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620" geregelt.

Anwendungsbezogene bautechnische Anforderungen an die Typen 3 und 4 nach dieser Norm werden auf Grundlage der DIN EN 12620:2008-07 gesondert ausgewählt.

Das gebrochene Material wurde dem Dienstleistungsauftragnehmer IAB Weimar zur Untersuchung übergeben.

Das angelieferte RC-Material wurde in Weimar auf folgende Parameter untersucht:

- Kornverteilung
- Kornrohddichte
- Wasseraufnahme
- Stoffliche Zusammensetzung

3.2.1 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung des RC-Materials wurde mehrfach von verschiedenen Prüfstellen untersucht. Proben aus einem Aufbereitungszyklus im Mai 2017 wurden parallel vom IAB Weimar und der Universität Duisburg-Essen untersucht. Proben aus einem späteren Aufbereitungszyklus im Juli 2017 wurden durch die Eigenüberwachung der Fa. Büscher (Roxeler Baustoffprüfstelle) untersucht.

Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt:

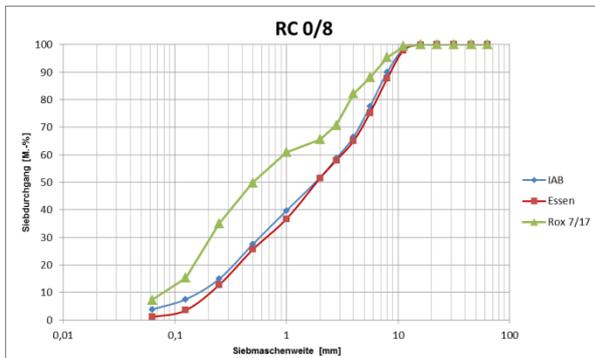


Bild 6: Korngrößenverteilung RC 0/8

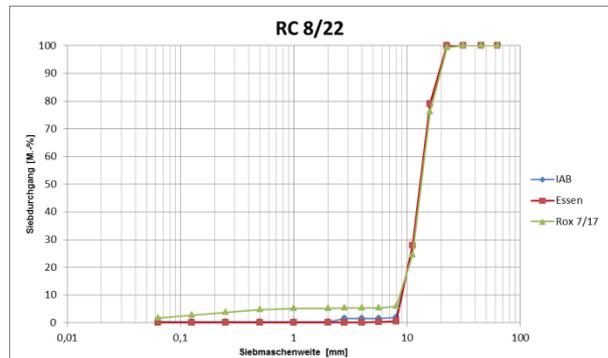


Bild 7: Korngrößenverteilung RC 8/22

Bezüglich der Kornverteilung zeigten alle untersuchten Fraktionen eine stetige Sieblinie mit Über- und Unterkornanteilen im zulässigen Bereich gemäß DIN EN 12620.

Allerdings sind Abweichungen zwischen den verschiedenen Aufbereitungszyklen festzustellen. Der Aufbereitungszyklus aus dem Juli 2017 zeigt eine deutlich feinere Kornverteilung in der Fraktion 0/8 sowie einen erhöhten Feinkornanteil in der Fraktion 8/22.

3.2.2 Kornrohichte und Wasseraufnahme

Kornrohichte und Wasseraufnahme wurden am IAB und der Universität Duisburg-Essen im Pycnometerverfahren nach DIN EN 1097-6 bzw. DIN 4226 -100 bestimmt. An der Universität Duisburg-Essen wurde zusätzlich die Rohdichte mit einem automatischen Messgerät Pycnomatic ATC (Automatik Temperature Control) gemessen.



Bild 8: Pycnometerverfahren

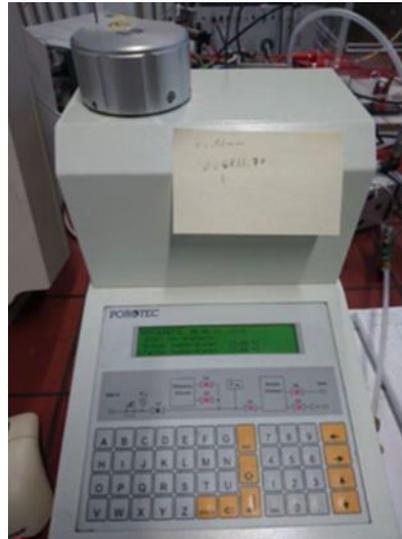


Bild 9: Pycnomatic ATC

Die Kornrohichte lag mit $\sim 2,35 \text{ g/cm}^3$ deutlich über der Anforderung von $>2,00 \text{ g/cm}^3$.

Die Wasseraufnahme von 4,5-6 M.-% lag ebenfalls deutlich unter den zulässigen Grenzwerten gemäß DAfStb-Richtlinie (10 M.-% Typ 1 bzw. 15 M.-% Typ 2). (siehe auch **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)

3.2.3 Stoffliche Zusammensetzung

Bei der stofflichen Zusammensetzung sind nach den gültigen Vorschriften folgende Parameter zu untersuchen:

- R_c Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton
- R_u ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein, hydraulisch gebundene Gesteinskörnung
- R_b Mauerziegel (d. h. Mauersteine und Ziegel), Kalksandsteine, nicht schwimmender Porenbeton
- R_a bitumenhaltige Materialien
- R_g Glas
- X sonstige Materialien, wie bindige Materialien (d. h. Ton und Boden), Metalle (Eisen- und Nichteisenmetalle), nicht schwimmendes Holz, Kunststoff, Gummi, Gips
- FL schwimmendes Material im Volumen.

Die stoffliche Zusammensetzung des RC-Materials erfolgte sowohl bei IAB Weimar als auch an der Uni Essen-Duisburg. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 2 und 3 dargestellt.

Tabelle 2: stoffliche Zusammensetzung IAB

Bestandteile		0/8 M.-%	8/22 M.-%	Grenzwerte DIN 4226			
				Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
Ungebundene Gesteinskörnung	R _u	20,3	11,6	≥ 90 M.-%	≥ 70 M.-%	≤ 20 M.-%	R _{cu} +R _b ≥ 80 M.-%
Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton	R _c	68,3	76,9				
	R _u +R _c	88,6	88,5				
Ziegel-Mauersteine (nicht porosiert), Klinker, Mauer- und Dachziegel	R _b	5,4	3,1	≤ 10 M.-%	≤ 30 M.-%	≥ 80 M.-%	
Kalksandstein-Mauersteine, Leichtbeton, nicht schwimmender Porenbeton		3,0	4,6				
Steinzeug		1,6	2,6				
	ΣR _b	10,0	10,2	≤ 10 M.-%	≤ 30 M.-%	≥ 80 M.-%	
Bitumenhaltige Materialien, Asphalt	R _a	1,2	1,2	≤ 1 M.-%	≤ 1 M.-%	≤ 1 M.-%	≤ 20 M.-%
Glas	R _g	0,0	0,0	≤ 1 M.-%	≤ 2 M.-%	≤ 2 M.-%	≤ 2 M.-%
verschiedene sonstige Materialien: Metalle, nicht schwimmendes Holz, Kunststoff, Gummi, Gips	X	0,2	0,2				
	R _g +X	0,2	0,2				
schwimmendes Material	FL	0,3	0,1	≤ 2 Vol.-%	≤ 2 Vol.-%	≤ 2 Vol.-%	≤ 5 Vol.-%



Bild 10: stoffliche Zusammensetzung Fraktion 0/8



Bild 11: stoffliche Zusammensetzung Fraktion 8/22

Tabelle 3: stoffliche Zusammensetzung Uni Essen-Duisburg

Bestandteile		Fraktion 0/8		Fraktion 8/22	
		Probe: 1000 g		Probe: 1000 g	
		Messprobe mit $d \geq 4$ mm: 377,1 g (100 %)		Messprobe mit $d \geq 4$ mm: 999,9 g (100 %)	
R _c	Masse [g]	236,4		621,1	
	Anteil [%]	62,689		62,116	
R _u	Masse [g]	76,7		276,5	
	Anteil [%]	20,339		27,653	
R _c +R _u	Masse [g]	313,1		897,6	
	Anteil [%]	83,028		89,769	
R _b	Masse [g]	54,6		70,0	
	Anteil [%]	14,479		7,001	
R _a	Masse [g]	5,4		31,6	
	Anteil [%]	1,432		3,160	
R _g	Masse [g]	3,0		0,0	
	Anteil [%]	0,796		0,000	
X	Masse [g]	0,8		0,4	
	Anteil [%]	0,212		0,040	
FL	Masse [g]	0,2		0,3	
	Anteil [%]	0,053		0,030	

Die Sortieranalyse wurde an gewaschenem Material durchgeführt, von dem Bestandteile < 4 mm abgetrennt wurden.

Beide Prüfinstitute kommen zu ähnlichen Ergebnissen für die stoffliche Zusammensetzung des RC-Materials.

Im Anlieferungszustand entsprach das Material dem Typ 4 nach DIN 4226-101. Wenn allerdings die geringe Überschreitung um 0,2 M.-% des Grenzwerts für Asphalt vernachlässigt wird, verbessert sich die Einstufung auf Typ 2.

3.3 Kalksandstein und Ziegel

Kalksandstein und Ziegel wurden analog zur natürlichen Gesteinskörnung wurde auf folgende Parameter untersucht:

- Kornverteilung
- Kornrohichte
- Wasseraufnahme

Diese Untersuchungen erfolgten nur am IAB Weimar.

3.3.1 Kornverteilung

Die Ergebnisse der Siebanalysen der gebrochenen Ziegel- und Kalksandsteinmaterialien sind in Bild 12 und Bild 13 dargestellt. Zu Vergleichszwecken sind auch die Ergebnisse der RC-Materialien mit aufgeführt.

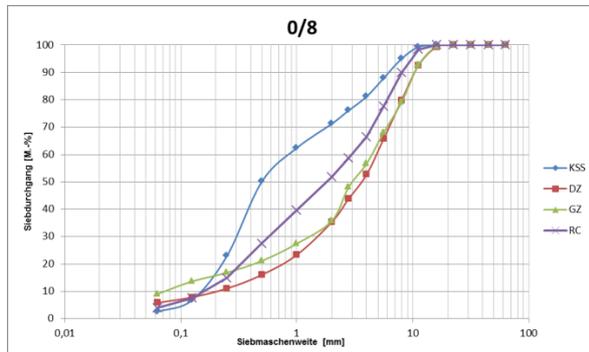


Bild 12: Kornverteilung 0/8 (KSS, Ziegel)

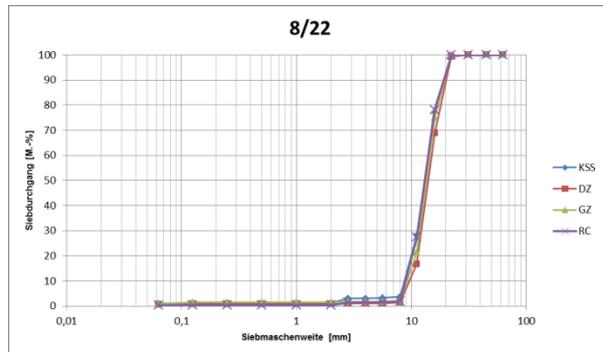


Bild 13: Kornverteilung 8/22 (KSS, Ziegel)

Die einzelnen Materialien unterscheiden sich in der Fraktion 0/8 signifikant.

Der Kalksandstein zeigt gegenüber dem RC-Gemisch insgesamt einen deutlich feineren Verlauf der Kornverteilung.

Beide untersuchten Ziegeltypen zeichnen sich dagegen durch einen insgesamt gröberen Verlauf der Sieblinie aus. Gleichzeitig zeigen diese insbesondere bei den Mauerwerkshohlziegeln (GZ) deutlich erhöhte Gehalte an Feinkorn (< 63 µm). Der Feinkornanteil liegt deutlich über dem zulässigen Wert für feine Gesteinskörnung nach DIN EN 12620.

In der Fraktion 8/22 weisen alle untersuchten Materialien ähnliche Kornverteilungen mit Über- und Unterkornanteilen im zulässigen Bereich gemäß DIN EN 12620 auf.

3.3.2 Kornrohddichte und Wasseraufnahme

Die Bestimmung von Kornrohddichte und Wasseraufnahme von gebrochenem Kalksandstein und Ziegeln erfolgte am IAB Weimar analog zu natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung im Pyknometerverfahren nach DIN EN 1097-6. Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Wasseraufnahmen und Rohdichten

Probe	Kornrohddichte ρ_{ssd} [g/cm ³]	Wasseraufnahme WA ₂₄ [M.-%]
RC 0/8	2,33	4,4
RC 8/22	2,36	4,5
KSS 0/8	2,17	8,4
KSS 8/22	2,16	10,1
DZ 0/8	2,24	10,6
DZ 8/22	2,21	10,6
GZ 0/8	2,17	14,2
GZ 8/22	2,12	15,0

Ziegel und Kalksandstein zeigen eine hohe bis sehr hohe Wasseraufnahme.

Die Wasseraufnahmen von Kalksandstein und Dachziegeln liegen noch im zulässigen Bereich für RC-Gesteinskörnung Typ 2 gemäß DAfStb-Richtlinie (WA₂₄ ≤ 15 M.-%). Die Wasseraufnahme von gebrochenen Mauerwerkshohlziegeln liegt allerdings deutlich über dem Grenzwert.

In jedem Fall sind aber derart hohe Wasseraufnahmen problematisch für die Kontrolle des w/z-Wertes sowie der Konsistenz von Beton.

4 Entwicklung RC-Werkstoff im Labormaßstab

4.1 Mischungsentwürfe

Gemäß DAfStb-Richtlinie beträgt für die gewählte Expositionsklasse XC3 und die ermittelten Eigenschaften des RC-Materials der maximal zulässige Anteil rezyklierter Gesteinskörnungen 45 Vol.-% der gesamten Gesteinskörnung.

Im Hinblick auf eine angestrebte bauaufsichtliche Zulassung auch für höhere Anteile rezyklierter Gesteinskörnung wurden auch entsprechende Mischungen entworfen.

Zur Untersuchung des Einflusses der Zugabe von rezyklierter Gesteinskörnung auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften wurden verschiedene Beton-Mischungen mit schrittweiser Substitution von natürlicher durch rezyklierte Gesteinskörnung bzw. Ziegel oder Kalksandstein hergestellt. An diesen wurden die Frischbetoneigenschaften bestimmt und es wurden Probekörper für die Bestimmung der Festbetoneigenschaften sowie der Dauerhaftigkeit hergestellt.

Im Untersuchungszeitraum wurden folgende Probemischungen ausgeführt:

RC-0:	100 % natürliche Gesteinskörnung
RC-25:	25 % RC-Material, 75 % natürliche Gesteinskörnung
RC-50:	50 % RC-Material, 50 % natürliche Gesteinskörnung
RC-75:	75 % RC-Material, 25 % natürliche Gesteinskörnung
RC-100:	100 % RC-Material
KSS-30:	30 % Kalksandstein, 70 % natürliche Gesteinskörnung
KSS-50:	50 % Kalksandstein, 50 % natürliche Gesteinskörnung
KSS-80:	80 % Kalksandstein, 20 % natürliche Gesteinskörnung
DZ-30:	30 % Dachziegel, 70 % natürliche Gesteinskörnung
DZ-50:	50 % Dachziegel, 50 % natürliche Gesteinskörnung
DZ-80:	80 % Dachziegel, 20 % natürliche Gesteinskörnung
GZ-30:	30 % Mauerwerkshohlziegel, 70 % natürliche Gesteinskörnung
GZ-50:	50 % Mauerwerkshohlziegel, 50 % natürliche Gesteinskörnung
GZ-80:	80 % Mauerwerkshohlziegel, 20 % natürliche Gesteinskörnung

Die Zielfestigkeitsklasse der Probemischungen war C25/30, um ein ausreichendes Vorhaltemaß gegenüber der Anforderung C20/25 zu haben und die Option einer Herstellung von Außenbauteilen der Expositionsklassen XC4, XF1 zu prüfen.

Die Zusammensetzung der Mischungen wurde dahingehend optimiert, dass die kombinierten Sieblinien der Gesteinskörnung möglichst gleich sind und nahe der Sieblinie der Referenzmischung RC-0 liegen.

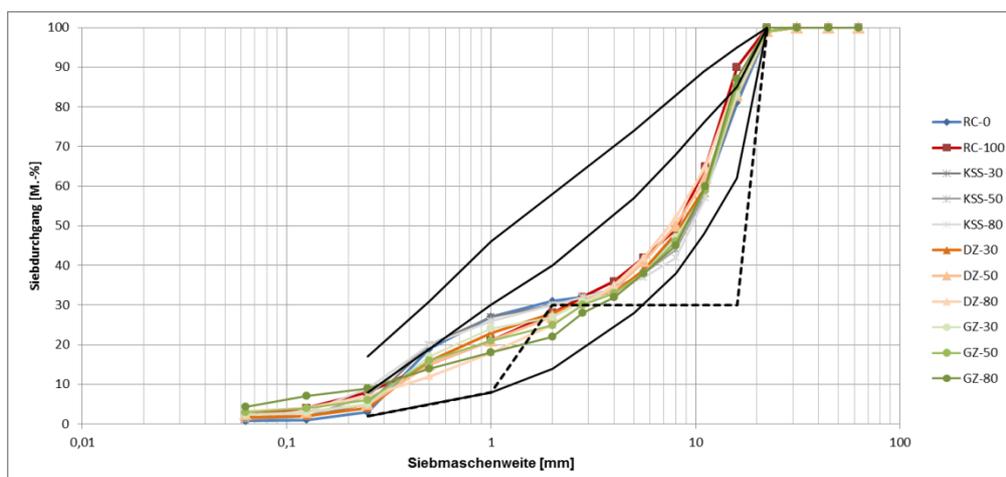


Bild 14: Korngrößenverteilung Probemischungen

Im Untersuchungszeitraum erfolgten folgende Untersuchungen an den Probemischungen:

IAB 17117

Frischbeton: - Konsistenz (Ausbreitmaß)
- zeitlicher Verlauf der Konsistenz
- Frischbetonrohddichte
- Luftporengehalt

Festbeton: - Druckfestigkeit nach 7 und 28 Tagen
- Rohddichte
- E-Modul
- Schwinden

Weiterhin wurde an allen Mischungen die Dauerhaftigkeit mittels Frostprüfung nach DIN EN 12390-9 bestimmt.

Frostprüfung: - CF-Versuch (Mischungen RC-0, RC-25, RC-50, RC-75)
- CIF-Versuch (Mischung RC-100)

4.2 Frischbetoneigenschaften

Als Anfangskonsistenz wurde für alle Probemischungen ein Ausbreitmaß von 520-550 mm (F4) angestrebt. Es zeigte sich ein mit zunehmendem RC-Anteil leicht steigender Wasseranspruch. Bis zu einem RC-Gehalt von 50 % konnte dieses durch eine Erhöhung der Fließmitteldosierung kompensiert werden. Darüber hinaus musste die Wasserzugabe leicht erhöht werden (+6 kg/m³) und demzufolge zur Beibehaltung des w/z-Wertes auch der Zementgehalt (+10 kg/m³).

Bei allen Mischungen mit Ausnahme der Referenzmischung RC-0 trat gleichermaßen ein deutlicher Rückgang des Ausbreitmaßes auf 350-380 mm innerhalb von 30 Minuten auf. Diese kann nur als tolerierbar angesehen werden, wenn kurze Transportwege und eine schnelle Verarbeitung des Betons im Fertigteilwerk innerhalb dieses Zeitraumes eingehalten werden.

Höhere Anteile an Kalksandstein und Ziegel erschweren aufgrund ihrer hohen Wasseraufnahme nochmals die Einstellung der Konsistenz und verstärken das Ansteifen.

Der Luftporengehalt, gemessen nach DIN EN 12350-7 im Druckausgleichsverfahren (LP-Topf), ist mit 3,5-8 Vol.-% in allen Mischungen hoch.

Ein direkter Zusammenhang mit dem Gehalt an RC-Material ist aber nicht festzustellen. Hier spiegelt sich eher der Grad der Wassersättigung des Ausgangsmaterials wieder. Bei normaler Lagerung im Freien liegt der natürliche Wassergehalt insbesondere von Ziegel und Kalksandstein unterhalb des Sättigungswassergehaltes. Während des Mischvorgangs des Betons kommt es noch nicht zur vollständigen Sättigung. Bedingt durch das Messverfahren werden bei der LP-Messung auch die in der RC-Gesteinskörnung verbliebenen Luftporen mitgemessen.

Infolge der gegenüber natürlicher Gesteinskörnung geringeren Dichte des RC-Materials geht die Frischbetonrohddichte erwartungsgemäß mit zunehmendem RC-Gehalt proportional zurück.

4.3 Festbetoneigenschaften

4.3.1 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit wurde gemäß DIN EN 12390-3 bestimmt. Als Probekörper kamen Würfel mit 150 mm Kantenlänge (IAB) bzw. Zylinder mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Länge von 300 mm (Uni Essen Duisburg) zum Einsatz. Gemessen wurde die Festigkeit nach 7 und 28 Tagen.

Alle Mischungen erreichen die erforderliche Festigkeit für einen Beton C25/30 mit ausreichendem Vorhaltemaß, und liegen damit deutlich über der im Lastenheft spezifizierten Festigkeitsklasse C20/25.

Die Vergleichsmischung RC-0 erreichte eine Druckfestigkeit von 48,7 N/mm² nach 28 Tagen. Bis zu einer Substitution von bis zu 50 % Gesteinskörnung durch RC-Material (Mischungen RC-25, RC-50) wurde mit ~46 N/mm² keine signifikante Änderung der Druckfestigkeit festgestellt. Erst ab einem RC-Gehalt von 75 % kommt es zu einem messbaren Rückgang der Druckfestigkeit auf 38-40 N/mm².

Die Ergebnisse der RC-Mischungen sind in Bild 15 dargestellt.

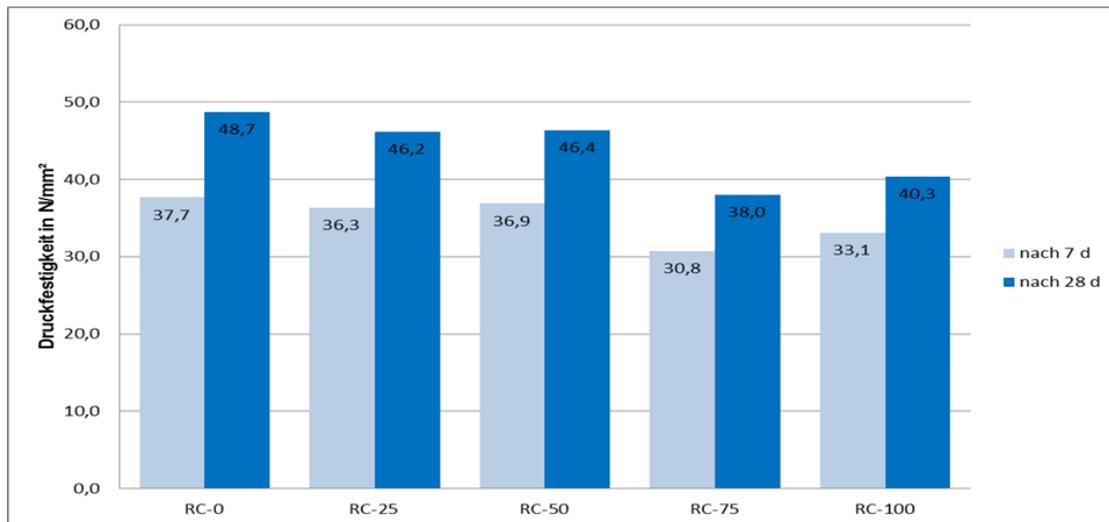


Bild 15: Druckfestigkeit RC-Mischungen

Der Einfluss höherer Gehalte an Kalksandstein bzw. Ziegel wirkt sich folgendermaßen aus:

Anteile von $\geq 50\%$ gebrochenem Kalksandstein oder Dachziegeln vermindern die Druckfestigkeit gegenüber der Mischung aus 100% RC-Gemisch (RC-100) um nochmals 15 bis 20 % insbesondere im frühen Betonalter.

Die Mischung mit einem Kalksandsteingehalt von 30 % (KSS-30) erreicht eine Druckfestigkeit im Bereich der Mischung RC-100.

Die übrigen Mischungen (GZ-50, DZ-30, GZ-30) erreichen Festigkeiten im Bereich der Referenzmischung RC-0.

Die Ergebnisse der Mischungen mit Kalksandstein bzw. Ziegel sind in Bild 16 dargestellt.

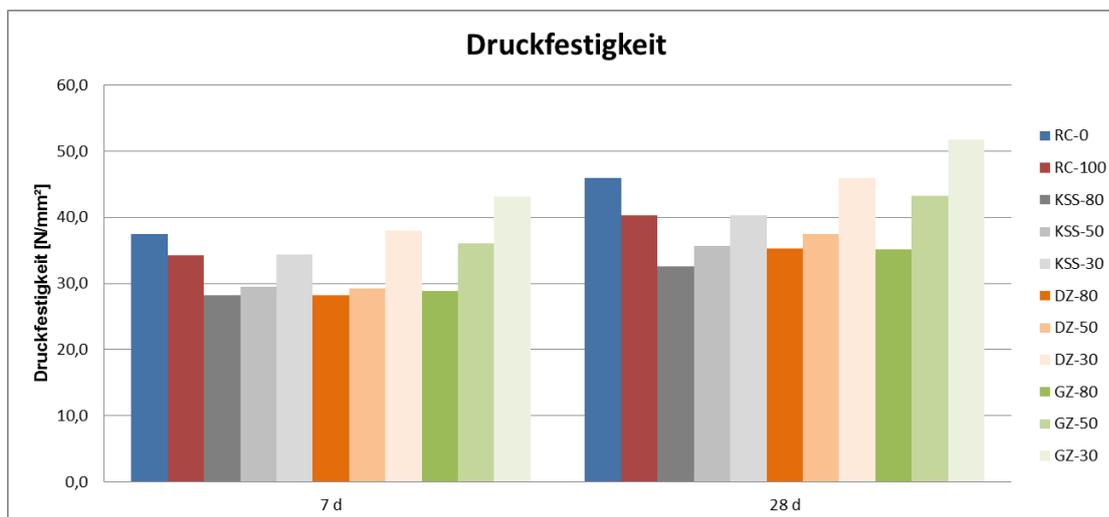


Bild 16: Druckfestigkeit Mischungen mit KSS und Ziegeln

4.3.2 E-Modul

Der statische E-Modul wurde gemäß DIN 1048-5 an Zylindern mit 150 mm Durchmesser und einer Höhe von 300 mm bestimmt. Das Prüfalter betrug 28 Tage.

Jede Zugabe von RC-Material sowohl RC-Gemisch als auch Kalksandstein und Ziegel führt zu einer deutlichen Verminderung des statischen E-Moduls.

Besonders ausgeprägt ist dieses bei höheren Gehalten an Ziegeln insbesondere der untersuchten Dachziegel.

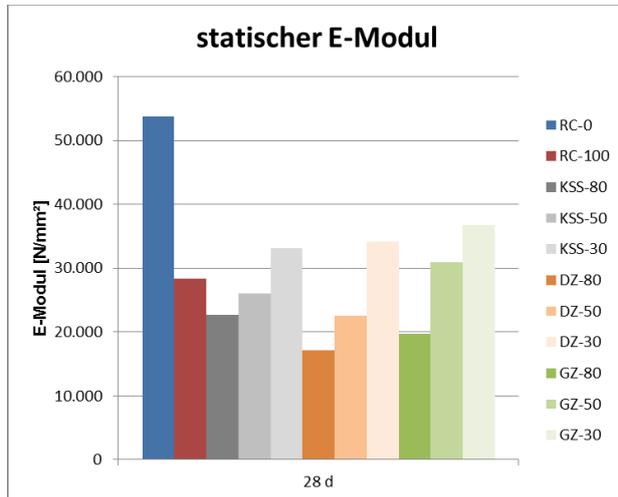


Bild 17: E-Moduli

4.3.3 Schwinden

Die Messung des Schwindens der untersuchten Betonmischungen erfolgte auf Grundlage von DIN 1048-5 und DAfStb Heft 422 "Prüfung von Beton: Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zur DIN 1048".

Als Probekörper wurden Prismen mit den Abmessungen 360 mm x 100 mm x 100 mm hergestellt (IAB).

Die Uni Essen-Duisburg verwendet Zylinder mit 100 mm Durchmesser und einer Höhe von 300 mm. Für die Messung des Frühschwindens kommen Schwindrinnen zum Einsatz.

Das Schwindmaß errechnet sich aus der Längenänderung über den Messzeitraum.



Bild 18: Schwindmessung IAB



Bild 19: Schwindrinnen

Längenmessungen erfolgen jeweils nach 1, 2, 3, 7, 14, 28, 56, 90 und 180 Tagen nach vorheriger 7-tägiger Vorlagerung der Probekörper unter Wasser. Die Schwindmessungen sind zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts noch nicht abgeschlossen.

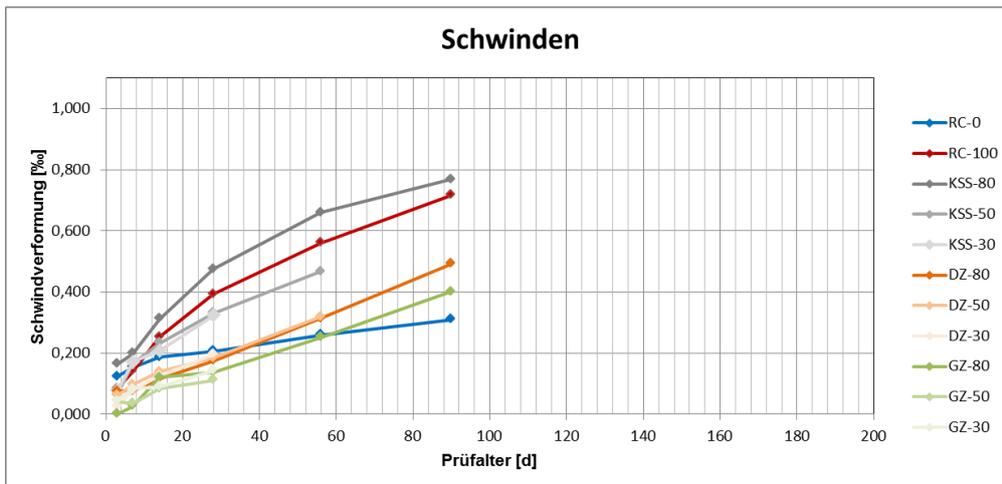


Bild 20: Schwindmessung IAB

Tabelle 5: Schwindmessung Uni Essen-Duisburg

	RC-Beton ungew.		RC-Beton gew.		Referenzbeton	
Schwinddehnung nach 70d	-0,918	-0,928	-1,110	-1,078	-0,407	-0,430
$\epsilon_{s,70d}$ [‰]	-0,960		-1,107		-0,470	
	-0,907		-1,017		-0,413	

Bereits zum jetzigen Zeitpunkt zeigt sich, dass die Zugabe von RC-Material das Schwinden des Betons deutlich erhöht. Die untersuchten Recycling-Betone haben im Vergleich zum Referenzbeton nach 70 bzw. 90 Tagen das ca. 2 - 2,5 fache Schwindmaß.

Tendenziell kommen IAB und die Uni Essen-Duisburg zum gleichen Ergebnis, wobei die Absolut-Werte bei der Uni etwas höher sind, was wahrscheinlich auf die unterschiedlichen Probekörper zurückzuführen ist.

Von der Universität Essen-Duisburg wurde zusätzlich das Kriechen des Betons untersucht. Auch hier laufen die Messungen noch. Nach dem gegenwärtigen Stand erhöht sich auch das Kriechen durch die Zugabe von RC-Material deutlich auf das 3 - 3,5 fache.

Bei den untersuchten reinen Komponenten war folgendes festzustellen:

Kalksandstein:	starke Erhöhung des Schwindmaßes
Dachziegel:	zunächst moderates Schwinden, danach aber bis 90 Tage kein Abflachen der Schwindkurve wie bei der Referenz- und den Kalksandstein-Mischungen
Mauerwerkshohlziegel:	noch kein eindeutiger Trend

4.4 Frostwiderstand

Mit Blick auf eine optionale Verwendung des RC-Betons auch für Außenbauteile wurden auch Frostversuche durchgeführt.

Zur Bestimmung der Frostbeständigkeit des untersuchten RC-Betons wurden Frost-Tau-Wechselversuche nach DIN EN 12390-9 und BAW Merkblatt "Frostprüfung von Beton" (Ausgabe 2012) durchgeführt.



Bild 21: CDF/CIF Prüfanlage

Da eine Tausalzbelastung bei der Festlegung der Anforderungen an die Wandelemente auf der Basis von Mauerwerksbruch ausgeschlossen wurde, erfolgte die Prüfung des Frostwiderstands als CF-Versuch nach DIN CEN/TS 12390-9.

Hierbei wird die Abwitterung, d.h. der durch Frost-Tau-Beanspruchung verursachte Materialverlust der Oberfläche des Betons gemessen. Die Probekörper wurden insgesamt 56 Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt.

Zusätzlich erfolgte an der Mischung RC-100 eine Bestimmung der inneren Schädigung mittels CIF-Versuch nach dem BAW Merkblatt "Frostprüfung von Beton".

Innere Schädigung ist die Schädigung des inneren Betongefüges (auch ohne sichtbare äußere Schäden), die zu einer Veränderung der Betoneigenschaften führt (z. B. eine Verminderung des dynamischen Elastizitätsmoduls, der Biegezugfestigkeit und der Dichtigkeit der Betonrandzone gegenüber Schadstoffen). Beim CIF-Versuch wird die Änderung des dynamischen E-Moduls anhand der Ultraschalllaufzeiten beim Durchschallen der Probekörper bestimmt.

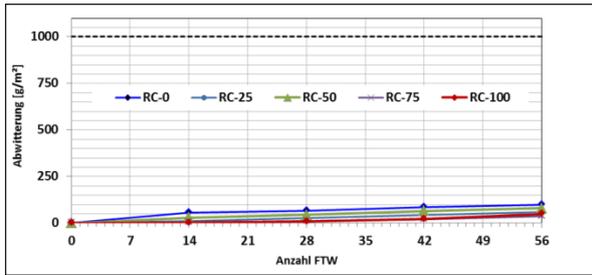


Bild 22: Abwitterung nach Frostbeanspruchung

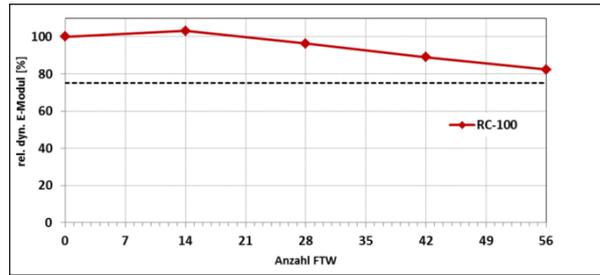


Bild 23: Verlauf relativer dynamischer E-Modul im CIF-Test

Wie die Messdaten zeigen, liegt die Abwitterung aller geprüften Mischungen weit unterhalb des Grenzwertes von 1000 g/m² nach 28 Frost-Tau-Wechseln gemäß BAW Merkblatt "Frostprüfung von Beton".

Gleichfalls ist kein Zusammenhang zwischen der Abwitterung und dem Anteil von RC-Material feststellbar.

Das Abnahmekriterium für die innere Schädigung des Betons von ≥ 28 Frost-Tau-Wechseln bis zur Unterschreitung eines relativen dynamischen E-Moduls von 75 % wird von der geprüften Betonmischung RC-100 sicher erfüllt.

Fazit und Ausblick

Es wird möglich sein, einen qualitätsgerechten Beton auch mit höheren Gehalten an rezyklierter Gesteinskörnung herzustellen, als derzeit zulässig.

Eine genauere Spezifizierung der technologischen Grenzen des RC Einsatzes kann erst nach konstruktiver Betrachtung der zu planenden Bauteile unter Berücksichtigung der in dieser Projektphase ermittelten Materialeigenschaften erfolgen. Dieses wird Bestandteil der Phase 2 dieses Projektes sein.

Für das ressourceneffiziente Bausystem, basierend auf Betonelementen aus gemischtem Mauerwerksbruch wird eine Zulassung vom DiBT angestrebt.

Literaturverzeichnis

- [1] **DIN 4109.** "Schallschutz im Hochbau". November 1989.
- [2] **Beiblatt 2 zu DIN 4109.** „Schallschutz im Hochbau“. November 1989.
- [3] **DAfStb. Richtlinie** "Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620". September 2010.
- [4] **DIN 1048-5.** Prüfverfahren für Beton – Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper. Juni 1991.
- [5] **DIN 4226-101.** „Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 - Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen“. August 2017.
- [6] **DIN CEN/TS 12390-9.** „Prüfung von Festbeton - Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand - Abwitterung. Dezember 2016.
- [7] **DIN EN 12620.** „Gesteinskörnungen für Beton“. Juli 2013.
- [8] **DIN EN 206-1.** „Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“. Januar 2017.
- [9] **DAfStb. Heft 422** "Prüfung von Beton: Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zur DIN 1048" . Ausgabe 1991.
- [10] **Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. DEGA-Empfehlung 103** „Schallschutz im Wohnungsbau - Schallschutzausweis“. März 2009.
- [11] **Bundesanstalt für Wasserbau. BAW Merkblatt** "Frostprüfung von Beton (MFB)". Ausgabe 2012.