

Untersuchungsergebnisse zu den Eigenschaften der entwickelten RC-Betonrezepturen

Bau- und umwelttechnische Untersuchungsergebnisse:

- **RC-Gesteinskörnung**
- **Frisch- und Festbetonprüfung**

zum Forschungsprojekt:

Einsatz von Recycling-Material aus mineralischen Bau- stoffen Zuschlag in der Betonherstellung

(gefördert von der DBU; FKZ: AZ 26101-23)

Brandenburgische Technische Universität Cottbus,
Fakultät Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik,
Lehrstuhl Altlasten
Fachgruppe Bauliches Recycling

Lehrstuhlinhaber:	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Spyra
Projektleiterin:	Dr.-Ing. Angelika Mettke Fachgruppenleiterin Bauliches Recycling Tel.: 0355-69-2270, Fax: 0355-69-3171 E-Mail: mettke@tu-cottbus.de
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. Sören Heyn Dr.-Ing. Angelika Mettke

Cottbus, 30.11.2009

Inhalt

0	Einleitende Bemerkungen	2
1	Ergebnisse der Untersuchungen der RC-Gesteinskörnungen	3
1.1	Gesteinsspezifische Eigenschaften	3
1.1.1	Stoffliche Kennzeichnung nach DIN 4226-100:2002-02	3
1.1.2	Kornrohichte nach DIN EN 1097-6:2005-12	5
1.1.3	Wasseraufnahme nach DIN 4226-100:2002-02	5
1.1.4	Kornform nach DIN EN 933-4:2008-06	6
1.1.5	Korngrößenverteilung nach DIN EN 933-1:2006-01	7
1.2	Alkali-Kieselensäure-Reaktion (AKR)	9
1.3	Umweltverträglichkeit	12
2	Untersuchte RC- Betone	13
3	Ergebnisse der RC-Beton-Untersuchungen	14
3.1	Frischbetoneigenschaften	14
3.2	Festbetoneigenschaften	15
3.2.1	Betondruckfestigkeit nach DIN EN 12390-3:2002-04	16
3.2.2	Biegezugfestigkeit nach DIN EN 12390-5:2001-02	18
3.2.3	Elastizitätsmodul (E-Modul) in Anlehnung an DIN 1048-5:1991-06	20
3.2.4	Wasserundurchlässigkeit / Wassereindringtiefe nach LOHMEYER	21
3.2.5	Untersuchung des Schwindverhaltens	22
4	Schlussfolgerungen	25
	Literatur	26

0 Einleitende Bemerkungen

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Einsatz von Recycling-Material aus mineralischen Baustoffen Zuschlag in der Betonherstellung“ wurden bautechnische und Umweltverträglichkeitsuntersuchungen an RC-Gesteinskörnungen und zu entwickelten RC-Betonrezepturen durchgeführt, die für den Einsatz von Beton im sog. Haus Nummer 3 der neuen Rheinuferbebauung Ludwigshafen vorgesehen sind.

Die Untersuchungen erfolgten im Auftrag und unter Mitwirkung der Fachgruppe Bauliches Recycling in Kooperation mit:

- der FMPA Forschungs- und Materialprüfanstalt Cottbus, RAP Stra-Prüfstelle zu gesteins- und gemischspezifischen Eigenschaften der RC-Gesteinskörnung nach DIN 4226-100:2002-02 und DIN EN 12620:2008-07,
- der FMPA Forschungs- und Materialprüfanstalt Cottbus, Fachgruppe Baustoffe, chem.-physik. Analytik zum Mörtelschnelltest-Referenzverfahren nach DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton; Teil 3: Gebrochene Alkaliempfindliche Gesteinskörnung“ Ausgabe Febr. 2007, Pkt. 5.2,
- der KIWA Bautest GmbH zur Umweltverträglichkeitsprüfung gemäß DIN 4226-100:2002-02 und DIN 38414-04:1984-10 (S4-Verfahren im Wasser/Feststoffverhältnis 10:1),
- der TBS Transportbeton Service Mannheim zur Herstellung der Probekörper nach DIN EN 12390-7:2001-02, zur Prüfung von Frischbeton nach DIN EN 12350-1:2000-03, -5:2000-06, -6:2000-03, zur Bestimmung der Druckfestigkeit nach 1, 2 und 7 Tagen nach DIN EN 12390-3:2002-04,
- der FMPA Forschungs- und Materialprüfanstalt Cottbus, Fachgruppe Betontechnologie zur Herstellung der Probekörper nach DIN EN 12390-7:2001-02 und zu den Festbetonprüfungen: Druckfestigkeit nach 28 und 56 Tagen nach DIN EN 12390-3:2002-04, Biegezugfestigkeit nach DIN EN 12390-5:2001-02, Festbetonrohddichte nach DIN EN 12390-7:2001-02, Wassereindringtiefe nach LOHMEYER, E-Modul in Anlehnung an DIN 1048-5:1991-06, Schwindverhalten.

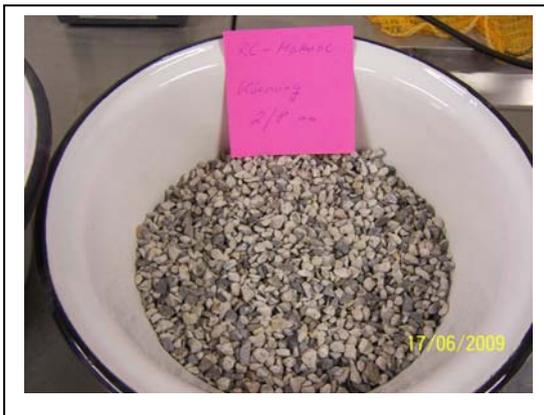
Untersucht wurden RC-Gesteine der Körnungen 2/8 mm und 8/16 mm (gewaschener Betonsplitt) der Fa. Scherer + Kohl GmbH & Co.KG, Ludwigshafen und acht entwickelte RC-Betonrezepturen der Fa. TBS Transportbetonservice Mannheim nachstehender Festigkeitsklassen/Anforderungen:

- C 8/10 (C1),
- C 12/15 (C1),
- C 12/15 (F3),
- C 20/25 (F3),
- C 25/30 (F3),
- C 25/30 (F3, wu),
- C 30/37 (F3),
- C 35/45 (F3)

Im Pilotprojekt Haus Nummer 3 wird ausschließlich RC-Beton der Festigkeitsklasse C 30/37 für Innenbauteile wie Wände, Stützen, Decken usw. sowie für die Tragschalen der Außenwände, ohne direkten Kontakt zur Außenluft, eingesetzt. Dies entspricht der Expositionsklasse XC1 gemäß DIN 1045-2, Tab. 1..¹

1 Ergebnisse der Untersuchungen der RC-Gesteinskörnungen

Die untersuchten RC-Gesteinskörnungen, gewaschene Betonsplitt der Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm der Fa. Scherer + Kohl GmbH & Co.KG, Ludwigshafen, sind nachfolgend abgebildet.



Betonsplitt 2/8 mm



Betonsplitt 8/16

Die Probenahme erfolgte durch die Fa. Scherer + Kohl GmbH & Co.KG Ludwigshafen.

1.1 Gesteinsspezifische Eigenschaften

1.1.1 Stoffliche Kennzeichnung nach DIN 4226-100:2002-02

Gemäß DIN 4226-100:2002-02 Tab. 1 werden vier Liefertypen entsprechend der stofflichen Zusammensetzung unterschieden.

- Typ 1: Betonsplitt / Betonbrechsand
- Typ 2: Bauwerkssplitt / Bauwerksbrechsand,
- Typ 3: Mauerwerkssplitt / Mauerwerksbrechsand,
- Typ 4: Mischsplitt / Mischbrechsand.

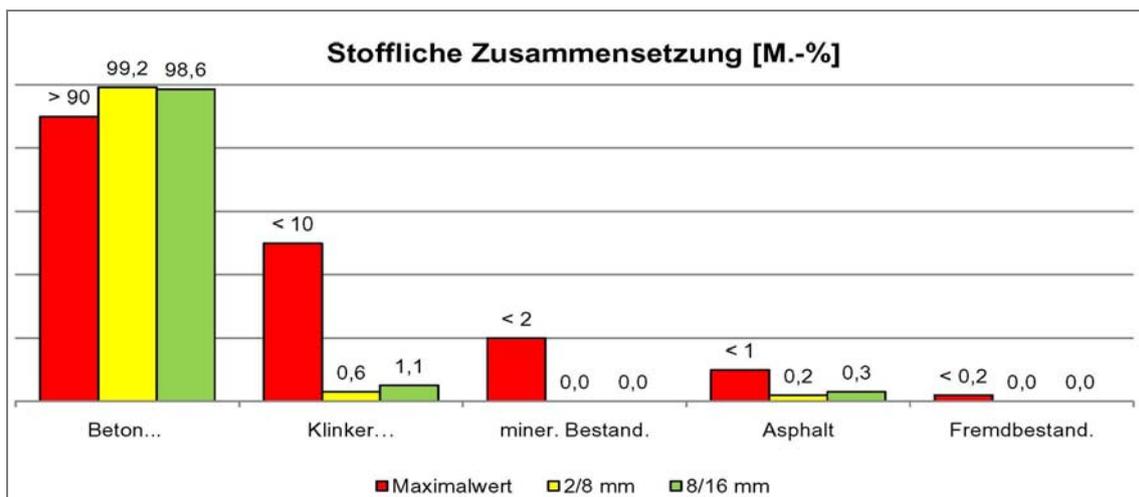
Für die Herstellung und Verarbeitung von Beton dürfen entsprechend der DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100, Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN 1045-1“ ausschließlich rezyklierte, sortenrein Gesteinskörnungen der Liefertypen 1 und 2 verwendet werden.

Die stoffliche Zusammensetzung wird durch Auswägen der nach Augenschein bestimmten Bestandteile bestimmt. Die dazu erforderlichen repräsentativen Proben müssen bei einer Korngröße < 8mm mind. 1.000 g, bei einer Korngröße > 8 mm mind. 2.500 g betragen.

¹ Planungsunterlagen vom 08.10.2008 und Absprache der Bauleitung und der Projektpartner vom 01.09.2009.

Die Untersuchungen der RC-Gesteinskörnungen ergaben folgendes Ergebnis:

Stoffgruppe	Anteile > 4 mm in M.-%			
	Mindestanforderung nach DIN 4226-100, Tab, 1		Ist-Wert	
	Liefertyp 1	Liefertyp 2	2/8 mm	8/16 mm
Beton und Gesteinskörnungen	≥ 90	≥ 70	99,2	98,6
Klinker, nicht porosierter Ziegel	≤ 10	≤ 30	0,6	1,1
Kalksandstein				
andere mineralische Bestandteile	≤ 2	≤ 3	0	0
Asphalt	≤ 1	≤ 1	0,2	0,3
Fremdbestandteile	≤ 0,2	≤ 0,5	0	0
Anforderungen erfüllt für:			Liefertyp 1	Liefertyp 1



Ergebnis:

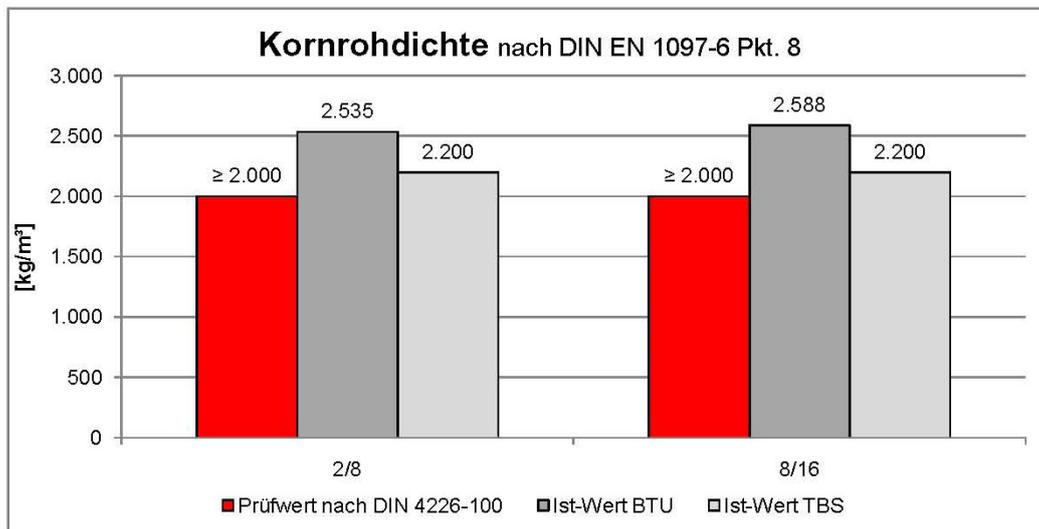
Die untersuchten RC-Gesteinskörnungen entsprechen dem Liefertyp 1 nach DIN 4226-100:2002-02.

1.1.2 Kornrohichte nach DIN EN 1097-6:2005-12

Die Untersuchungen zur Kornrohichte der RC-Gesteinskörnungen an der FMPA Cottbus erfolgten nach dem Pyknometer-Verfahren für Gesteinskörnungen zwischen 4 mm und 31,5 mm. Die Mindestmassen der Messproben betragen für eine maximale Korngröße von 8 mm 1 kg und von 16 mm 2 kg.

Die so erzielten Untersuchungsergebnisse der FMPA Cottbus sind in nachfolgender Tabelle und Diagramm dem Prüfwert nach DIN 4226-1100:2002-02 und den Angaben der Mischungsberechnung der Transportbetonfirma TBS Mannheim gegenübergestellt.

Prüfkörnung in mm	Prüfwert nach	Ist-Wert	
	DIN 4226-100, Tab. 2	TBS	BTU Cottbus
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
2/8	≥ 2.000	2.200	2.535
8/16	≥ 2.000	2.200	2.588



Ergebnis:

Die untersuchten RC-Gesteinskörnungen entsprechen den Anforderungen der DIN 4226-100:2002-02.

1.1.3 Wasseraufnahme nach DIN 4226-100:2002-02

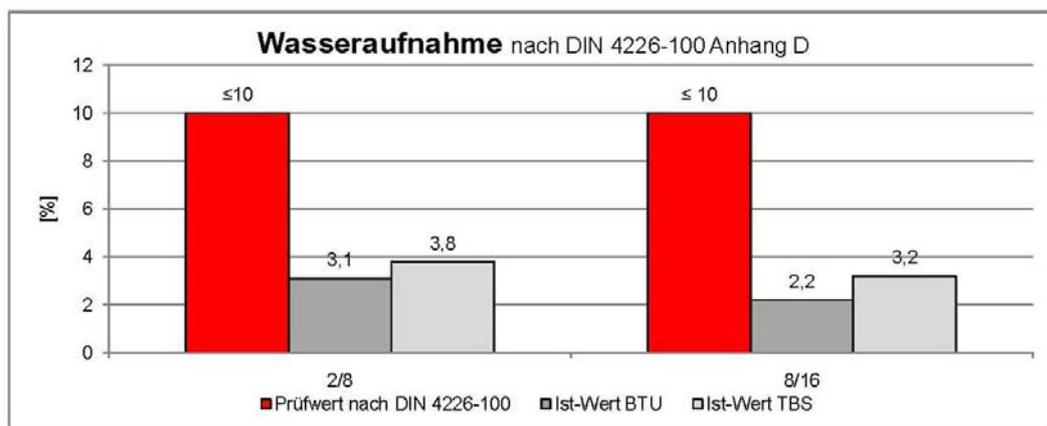
Parallel zu den Untersuchungen zur Wasseraufnahme der Gesteinskörnungen (durch die Fachgruppe Bauliches Recycling in der FMPA Cottbus) erfolgten im Zuge der Rezeptentwicklung Prüfungen durch die TBS Mannheim. Die Wasseraufnahme nach 10 min wird benötigt, um den Einfluss des Wassersaugens der Gesteinskörnung auf den wirksamen Wasserzementwert zu berücksichtigen.

Die Probemenge beträgt mind. das 50-fache des Zahlenwertes des Größtkorns in g, aber mind. 500 g. Somit müssen für die Korngruppe 2/8 mm mind. 500g für die Korngruppe 8/16 mm mind. 800 g verwendet werden. Die Gesteinskörnungen werden bis zur Massekonstanz getrocknet, gewogen, 10

Minuten unter Wasser mit Raumtemperatur gelagert, leicht abgetrocknet und abermals gewogen. Die Wasseraufnahme ist der prozentuale Anteil des aufgenommenen Wassers zur Trockenmasse. Maßgebend ist das Mittel aus zwei Einzelwerten.

Die Untersuchungsergebnisse der FMPA Cottbus sind in nachfolgender Tabelle und im Diagramm dem Prüfwert nach DIN 4226-100:2002-02 für den Liefertyp 1 und den Angaben der Mischungsbe-
rechnung der Transportbetonfirma TBS Mannheim gegenübergestellt.

Korngruppe d/D in mm	Prüfwert nach		Ist-Wert	
	DIN 4226-100, Typ 1, Tab. 2		TBS	BTU Cottbus
	[%]		[%]	[%]
2/8	≤ 10		3,8	3,1
8/16	≤ 10		3,2	2,2



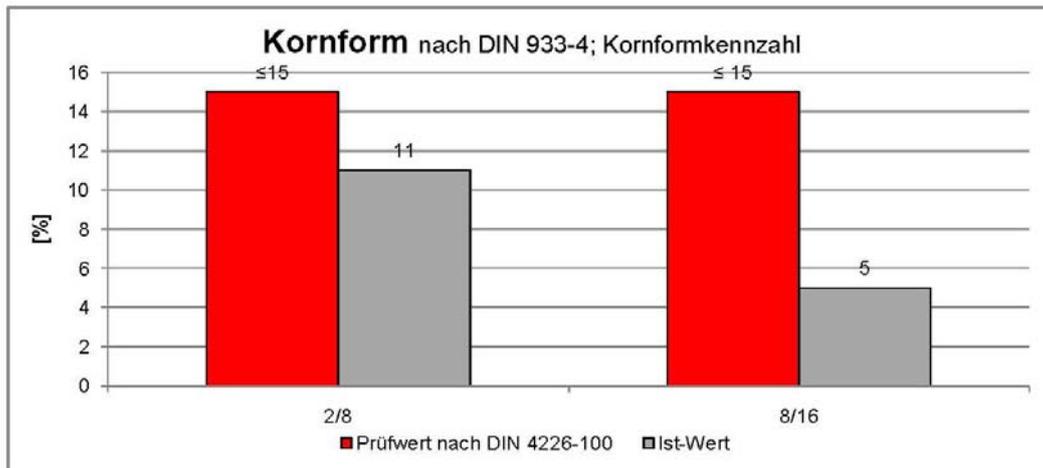
Ergebnis:

Die untersuchten RC-Gesteinskörnungen entsprechen den Anforderungen der DIN 4226-100:2002-02.

1.1.4 Kornform nach DIN EN 933-4:2008-06

Aus einer Probe grober Gesteinskörnung werden die einzelnen Körner nach dem Verhältnis ihrer Kornlänge L zu ihrer Korndicke E eingestuft. Der prozentuale Massenanteil der Körner mit einem Verhältnis $L/E > 3$ bezogen auf die Gesamttrockenmasse der geprüften Körner wird als Kornformkennzahl angegeben. Die Messung erfolgt mit einem Kornform-Messschieber. Die Masse der Messproben muss bei einem Größtkorn 8 mm mind. 0,1 kg, bei einem Größtkorn 16 mm mind. 1 kg betragen. Körner der Korngröße < 4 mm sind zuvor vollständig abzutrennen.

Korngruppe d/D in mm	Kornformkennzahl <i>SI</i>		
	Ist-Anteil	Kornform-	Kategorie nach
	[M-%]	kennzahl	DIN EN 12620, Tab.9
2/8	11	≤ 15	<i>SI</i> ₁₅
8/16	5	≤ 15	<i>SI</i> ₁₅



Ergebnis:

Die untersuchten RC-Gesteinskörnungen entsprechen den Anforderungen der DIN 4226-100:2002-02.

1.1.5 Korngrößenverteilung nach DIN EN 933-1:2006-01

Die Prüfung besteht im Aufteilen und Trennen von Material mit Hilfe einer Serie von Sieben in unterschiedliche Kornklassen mit abnehmenden Größen. Das ausgewählte Prüfverfahren besteht aus Waschen und Trockensiebung.

Für beide Korngruppen wurde der Grundsiebsatz plus der Ergänzungssiebsatz 1 gemäß DIN EN 12620:2008-07 Tab. 1 also die Siebe 22,4 mm, 16 mm, 11,2 mm, 8 mm, 5,6 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm und 0,063 mm verwendet. Die Anteile < 0,063 mm wurden durch Nasssiebung ermittelt. Die Mindestmasse der Messprobe für ein Größtkorn von 8 mm beträgt 0,6 kg, für ein Größtkorn 16 mm 2,6 kg.

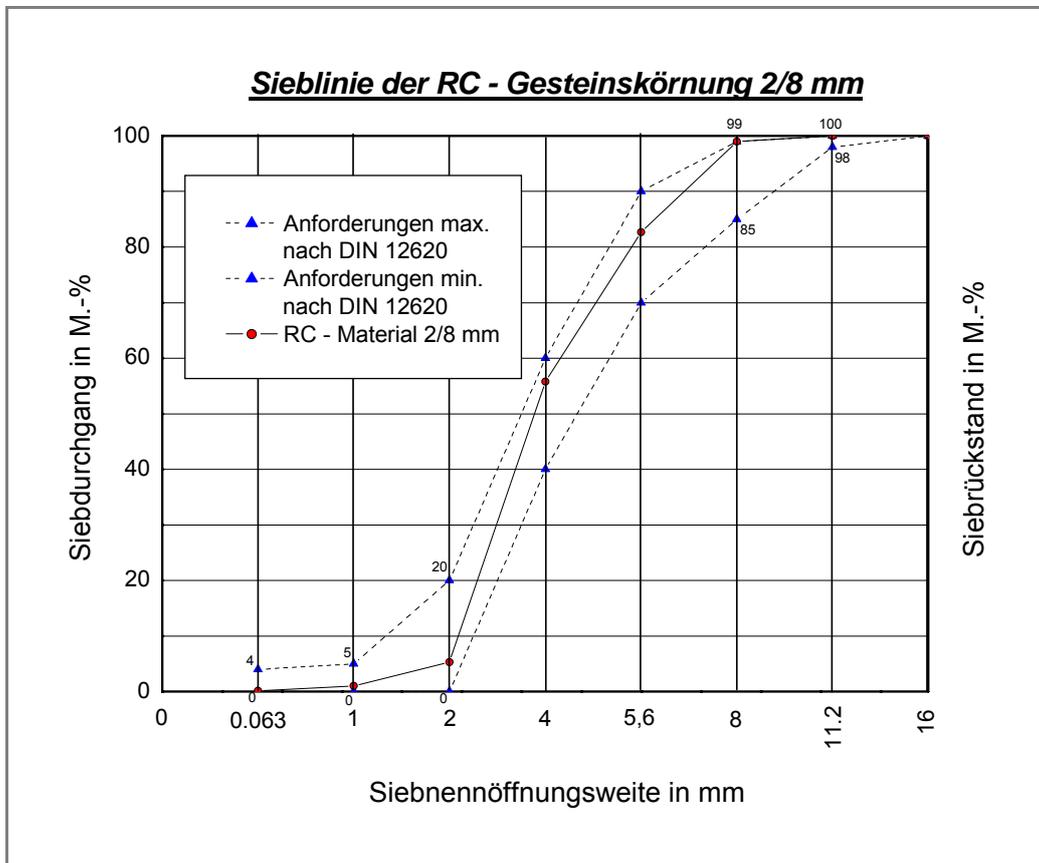
Die Untersuchungen zur Korngrößenverteilung zeigen folgende Ergebnisse:

Korngrößenverteilung nach DIN EN 933-1:2006-01

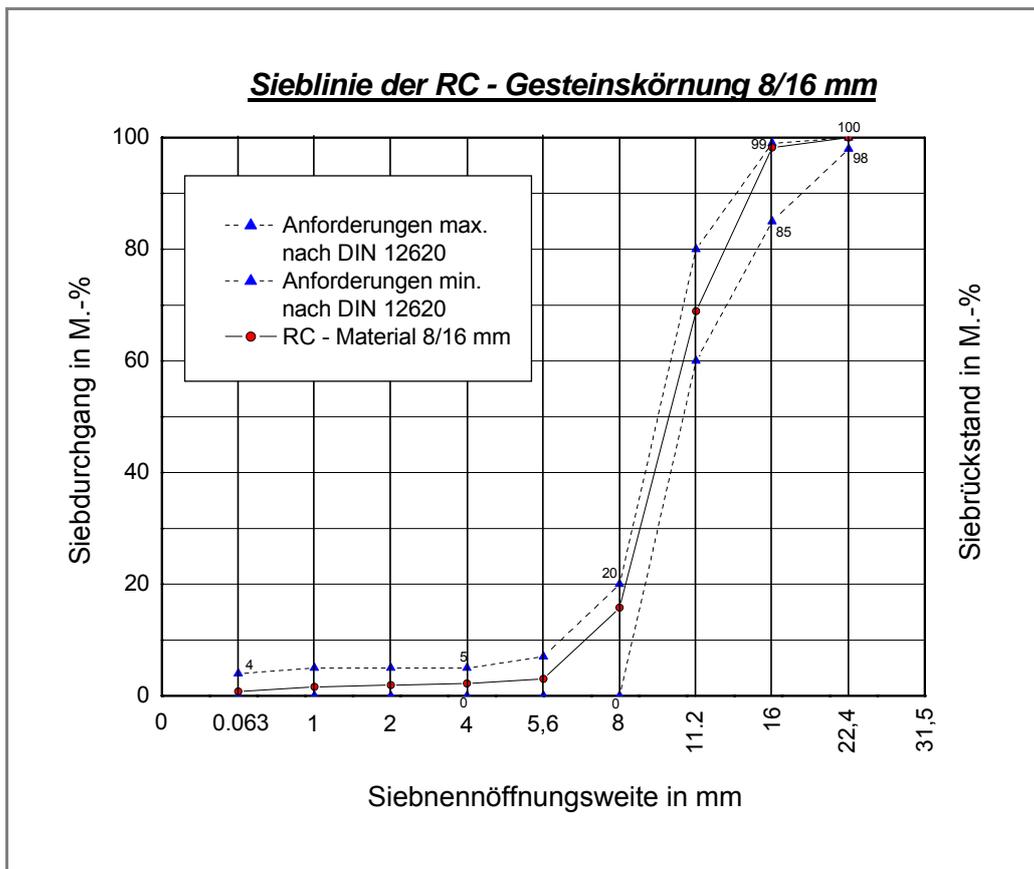
Prüfsieb [mm]	Siebdurchgang [M.-%]							
	Körnung 2/8 mm				Körnung 8/16 mm			
	Anforderungen nach DIN 12620		Ist	Anforderungen erfüllt	Anforderungen nach DIN 12620		Ist	Anforderungen erfüllt
min	max	min			max			
22,4			100,0		98	100	100,0	
16		100	100,0	ja	85	99	98,2	ja
11,2	98	100	100,0	ja			68,9	
8	85	99	99,0	ja	0	20	15,8	ja
5,6			82,7				3,0	
4			55,8		0	5	2,2	ja
2	0	20	5,3	ja			1,9	
1	0	5	1,0	ja			1,6	
0,063 ¹	0	4	0,1	ja		4	0,8	ja
Kategorie nach DIN EN 12620 Tab. 2			G _C 85/20				G _C 85/20	
Kategorie nach DIN 4226-100		G _{DS}	G _{DS}	ja		G _{DS}	G _{DS}	ja

¹ Einstufung des Gehaltes an Feinanteilen gemäß DIN 4226-100 in Kategorie f₄ (Siebdurchgang 0,063 mm ≤ 4 M.-%)

Sieblinie der RC-Gesteinskörnung 2/8 mm:



Sieblinie der RC-Gesteinskörnung 8/16 mm:

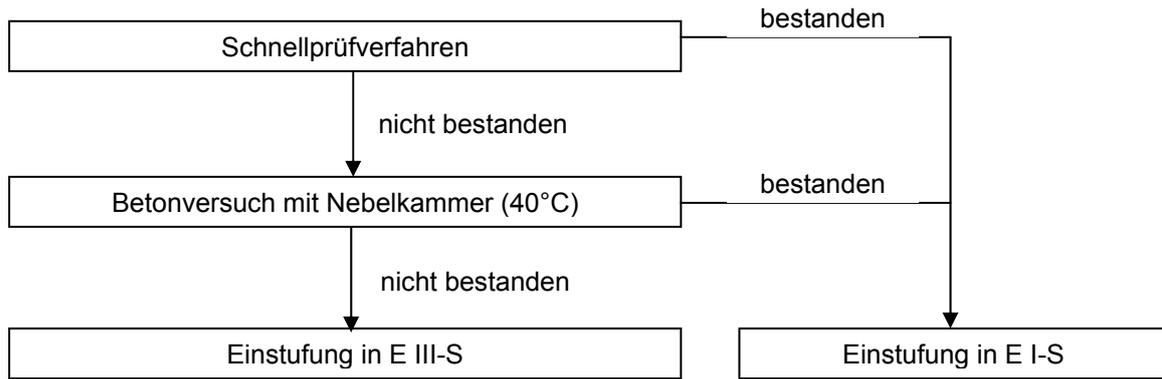


Ergebnis:

Die Anforderungen an die Korngrößenverteilung der untersuchten RC-Gesteinskörnungen 2/8 mm und 8/16 mm nach DIN 12620:2008-07 sind erfüllt.

1.2 Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)

Die Prüfung der Gesteinskörnung erfolgt durch ein gestuftes Vorgehen entsprechend nachfolgender Abbildung. Wird das Schnellprüfverfahren nicht bestanden, ist der Betonversuch mit Nebelkammer (40°C) durchzuführen. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn das Schnellprüfverfahren oder die Prüfung in der Nebelkammer (40°C) bestanden ist. Die bestandene Prüfung bedeutet eine Einstufung der Gesteinskörnung in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S (unbedenklich hinsichtlich Alkalireaktion). Für den Einsatz in den Feuchtigkeitsklassen WO, WF und WA müssen keine vorbeugenden Maßnahmen ergriffen werden.



[DAfStb-Richtlinie „Alkali-Reaktion“, Bild 3-1]

Mörtelschnelltest (Referenzprüfverfahren) gemäß DAfStb-Richtlinie „Alkali-Reaktion“ Teil 3:

Untersucht wurde das gewaschene RC-Material der Körnung 8/16 mm gemäß der DAfStb-Richtlinie „Alkali-Reaktion“ Teil 3 (Ausgabe Februar 2007).

Mit dem Schnellprüfverfahren können einzelne Lieferkörnungen mit Korngrößen ≥ 2 mm geprüft werden. Bei gebrochenem Festgestein ist die Prüfung der Lieferkörnung 8/16 mm für die Einstufung aller Korngruppen ausreichend.

Die Kornanteile < 2 mm der Gesteinskörnung 8/16 mm sind abzusieben. Mit einem Labor-Backenbrecher wurde die zu untersuchende Körnung auf ≤ 4 mm schonend zerkleinert und anschließend gewaschen. Die erhaltenen Fraktionen sind abzusieben ($\leq 0,25$ mm ist nass zu sieben) und entsprechend nachfolgender Tabelle in fünf Prüfkornklassen zur Sollsieblinie neu zusammzusetzen.

	1	2	3
	Siebgröße		Anteile in M.-%
	Siebdurchgang	Siebrückstand	
1	4 mm	2 mm	10
2	2 mm	1 mm	25
3	1 mm	0,5 mm	25
4	0,5 mm	0,25 mm	25
5	0,25 mm	0,125 mm	15

Die erstellte Gesteinskörnung ist bei 60°C bis zur Massekonstanz zu trocknen, die Wasseraufnahme ist zu ermitteln und bei der Mörtelherstellung zu berücksichtigen.

Bei der Mörtelzusammensetzung wurden folgende Stoffparameter eingehalten [Pkt. 5.2.3 Alkalirichtlinie]:

- Zement: CEM I 32,5 R nach DIN EN 197-1,
- Na_2O -Äquivalent: $(1,3 \pm 0,1)$ M.-%,
- Gesteinskörnung/Zement-Verhältnis: 2,25:1 Masseteile,
- Wasserzementwert: $w/z = 0,47$ und Verwendung von Leitungswasser.

Hergestellt wurden 3 Mörtelprismen (40 x 40 x 160 mm) der Gesteinskörnung 8/16 mm. Diese sind abgedeckt und im Klimaschrank bzw. über Wasser bei $20,0^{\circ}\text{C} \pm 2,0^{\circ}\text{C}$ gelagert worden. In die Stirnseiten der Mörtelprismen sind Messzapfen zur Messung der Längenänderung einbetoniert worden. Die Prismen wurden nach 24 Stunden ausgeschalt und die Mantelflächen mit 320 SiC Nassschleifpapier je Seite rd. 15 Sekunden geschliffen. Für weitere 24 h wurden die Prismen in einem dicht verschlossenem Behälter in entionisiertem Wasser bei $80,0^{\circ}\text{C} \pm 2,0^{\circ}\text{C}$ im Trockenschrank gelagert.

Unmittelbar danach erfolgte die Nullmessung mit einem Dehnmessgerät nach DIN 52450 mit einer Messgenauigkeit von 0,001 mm. Die weitere Lagerung erfolgte in $1,00 \pm 0,01$ molarer, $80,0^{\circ}\text{C} \pm 2,0^{\circ}\text{C}$ heißer NaOH-Lösung (Volumenverhältnis Natronlauge zu Prismen $4,0 \pm 0,5$) im Trockenschrank.



Die Längenmessungen erfolgen am 1., 4. oder 5., 8. oder 9. und 13. Tag nach der Nullmessung. Die Dehnung (Längenänderung) wird ins Verhältnis zur Prismenlänge gesetzt. Ausschlaggebend ist der Mittelwert der Messwerte aus 3 Proben nach 13 Tagen. Auftretende Risse und Abplatzungen sind zu dokumentieren.

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurden folgende Ergebnisse erzielt

Dehnung ϵ [mm/m]		Körnung 8/16 mm			
Tage	Datum	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_{mittel}
0	25.06.2009	-	-	-	-
1	26.06.2009	0,131	0,038	0,025	0,07
5	30.06.2009	0,338	0,188	0,244	0,26
8	03.07.2009	0,475	0,356	0,413	0,42
13	08.07.2009	1,013	1,113	0,988	1,04
Grenzwert gemäß Tab. 3-1 Alkalirichtlinie		1,0 mm/m			

Bei der visuellen Betrachtung der Prismenoberflächen am 13. Tag (nach der Entnahme und letzten Messung) konnten keine Beschädigungen oder sichtbaren Veränderungen festgestellt werden. Der für den Mörtelschnelltest „Referenzverfahren“ angegebene Grenzwert für die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S von $\epsilon \leq 1,0$ mm/m wie auch die maximal 10 %ige Abweichung der Einzelmesswerte vom Mittelwert wurden eingehalten.² Anschlussprüfungen sind somit nicht erforderlich.

Ergebnis:

Die geprüfte RC-Gesteinskörnung wird im Rahmen der Erstprüfung als alkali-unempfindlich bzw. als unbedenklich eingestuft (E I-S).

² FMPA Cottbus, Fachgruppe Baustoffe; chem.-physikal. Analytik: Untersuchungsbericht 09-077-102, Prüfung einer Gesteinskörnung nach DAfStb-Richtlinie Alkalireaktion; Teil 3: Gebrochene alkaliempfindliche Gesteinskörnungen, Pkt. 5.2: Mörtelschnelltest-Referenzverfahren, Untersuchungsbeginn 17.08.2009.

1.3 Umweltverträglichkeit

Die Untersuchungen erfolgten an gewaschenem RC-Material der Körnung 2/8 mm und 8/16 mm gemäß der DIN 4226-100:2002-02 Anhang G (vgl. Pkt. 1). Das Eluat wurde im Schüttelverfahren S4 im Wasser/Feststoffverhältnis 10:1 nach DIN 38414-4(DEV S4):1984-10 hergestellt.

Die Prüfergebnisse stellen sich wie folgt dar:

Parameter		DIN 4226-100	Prüfergebnisse (DEV S4)	
Eluat		Höchstwerte	RC 2/8 mm	RC 8/16 mm
pH-Wert ¹	---	12,5	12,6	12,3
elektr. Leitfähigkeit ¹	µS/cm	3.000	3.110	1.567
Phenolindex	µg/l	100	18	17
Chlorid	mg/l	150	21,3	14,2
Sulfat	mg/l	600	28	17
Arsen	µg/l	50	0,26	< 0,2
Blei	µg/l	100	< 20	< 20
Cadmium	µg/l	5	< 2	< 2
Chrom	µg/l	100	< 10	< 10
Kupfer	µg/l	200	< 10	< 10
Nickel	µg/l	100	< 10	< 10
Quecksilber	µg/l	2	0,17	0,11
Zink	µg/l	400	< 10	< 10
Feststoff		Höchstwerte	RC 2/8 mm	RC 8/16 mm
Kohlenwasserstoffe (H18)	mg/kg	1.000	< 100	< 100
PAK nach EPA	mg/kg	75	0,15	< BG**
EOX	mg/kg	10	< 1	< 1
PCB	mg/kg	1	< 0,01	< 0,01
Höchstwerte			eingehalten	eingehalten

¹ kein Ausschlusskriterium

** BG - Bemessungsgrenze

Ergebnis:

Alle untersuchten Parameter halten die vorgegebenen Höchstwerte der Inhaltsstoffe ein. Die geringfügig erhöhte elektrische Leitfähigkeit wie auch der pH-Wert der Gesteinskörnung 2/8 mm stellen gemäß DIN 4226-100 kein Ausschlusskriterium dar. D.h. es gibt hinsichtlich der Umweltverträglichkeit keine Bedenken, die untersuchten Gesteinskörnungen im Beton zu verwenden.

2 Untersuchte RC- Betone

Im Vorfeld des Pilotprojektes wurden durch die Fa. TBS in Mannheim 8 verschiedene Betonrezepturen unterschiedlicher Festigkeitsklassen, Konsistenz, Expositionsklassen und Anforderungen entwickelt.

Entwickelte Betonrezepturen der Fa. TBS Mannheim

Festigkeitsklasse	Konsistenz	Expositionsklasse, entspr. Mischungsbeziehung	Eigenschaften	Überwachungs-kategorie	Anteil an rezykliertem Gesteinskörnung [M.%]
C 8/10	C1	X0		Ü1	68 %
C 12/15	C1	X0		Ü1	68 %
C 12/15	F3	X0		Ü1	68 %
C 20/25	F3	XC1, XC2		Ü1	45 %
C 25/30	F3	XC4, XF1, (XA1 bei Ü2)		Ü1	35 %
C 25/30	F3	XC4, XF1, (XA1 bei Ü2)	wasserundurchlässig	Ü1	35 %
C 30/37	F3	XC4, XF1, XA1, XD1, XM1		Ü2	30 %
C 35/45	F3	XC4, XF2, XA2, XD2, XM2		Ü2	25 %

Konsistenz, s. DIN 1045-2:2008-08, Abschn. 4.2.1

Expositionsklassen, s. DIN 1045-2:2008-08, Abschn. 4.1

Überwachungsklassen, s. DIN 1045-3:2008-08, Abschn. 11.5

Die entwickelten Rezepturen setzen sich wie folgt zusammen:

Festigkeitsklasse	C 8/10	C 12/15	C 12/15	C 20/25	C 25/30	C 25/30 wu	C 30/37	C 35/45
Konsistenz	C1	C1	F3	F3	F3	F3	F3	F3
Expositionsklasse	X0	X0	X0	XC1/XC2	XC4/XF1, XA1 bei Ü2	XC4/XF1, XA1 bei Ü2	XC4/XA1 XD1/XM1	XC4/XF2/XA2/XD2, XM2
Rezepturzusammensetzung								
Zement*	155 + 25 Asche	210	260	310	330	340	360	360
Wasser	140	168	195	192	191	180	187	173
0-2 mm Natursand	651	623	591	577	574	579	566	576
2-8 mm Naturkies				270	359	362	354	360
2-8 mm Betongranulat	512	490	465	227	151	152	149	151
8-16 mm Naturkies				144	233	235	318	414
8-16 mm Betongranulat	649	521	589	454	377	380	297	227
RC-Gesteinskörnung [Vol.-%]	68	68	68	45	35	35	30	25
w/z-Wert	0,90	0,80	0,75	0,62	0,58	0,53	0,52	0,48

*CEM II/B-V42,5R, CEM IV/B-V32,5R, CEM II/B-V52,5R

Erläuterungen zur Zementklasse:

- CEM II/B-V 42,5 R ist ein Portlandflugaschezement der Zementfestigkeitsklasse 42,5 mit einer hohen Anfangsfestigkeit. Der Anteil an Portlandzementklinker liegt bei 65 – 79 %, der Anteil an kieselsäurereicher Flugasche bei 21 – 35 %.
- CEM IV/B-V 32,5 R ist ein Puzzolanzement der Zementfestigkeitsklasse 32,5 mit einer hohen Anfangsfestigkeit. Der Anteil an Portlandzementklinker liegt bei 45 – 64 %, der Anteil an kieselsäurereicher Flugasche bei 36 – 55 %.
- CEM II/B-V 52,5 R ist ein Portlandflugaschezement der Zementfestigkeitsklasse 52,5 mit einer hohen Anfangsfestigkeit. Der Anteil an Portlandzementklinker liegt bei 65 – 79 %, der Anteil an kieselsäurereicher Flugasche bei 21 – 35 %.

Die Zementmenge variiert in Abhängigkeit der Festigkeitsklasse und beträgt beim C30/37, dem zu verarbeitenden Beton für das Haus Nummer 3, 360 kg/m³.

3 Ergebnisse der RC-Beton-Untersuchungen

Die Untersuchungen aller entwickelten Betonrezepturen erfolgten an Proben und Probekörper, welche durch die Fa. TBS Mannheim als auch unter Mitwirkung der Fachgruppe Bauliches Recycling in Kooperation mit der FMPA Cottbus, Fachgruppe Betontechnologie hergestellt wurden.

Die Frischbetonuntersuchungen sowie die Ermittlung der Frühfestigkeiten nach 1, 2 und 7 Tagen wurden durch das Betonprüflabor der Fa. TBS durchgeführt. Die weiteren Untersuchungen an Festbetonprobekörpern erfolgte an der FMPA der BTU Cottbus, Fachgruppe Betontechnologie im Auftrag und unter Mitwirkung der Fachgruppe Bauliches Recycling.

3.1 Frischbetoneigenschaften

Im Rahmen der Frischbetonuntersuchungen wurden durch die Fa. TBS für die entwickelten Rezepturen folgende Parameter bestimmt:

- Temperatur (Luft/Beton),
- Konsistenz nach DIN EN 12350-5:2000-06,
- Entmischungsneigung,
- Frischbetonrohddichte DIN EN 12350-6:2000-03.

Rezeptur	Zielkonsistenz*		Konsistenz Ausbreitmaß [cm]	Alter bei Prüfung [min]	Temperatur		Entmischung- neigung
	Klasse	Werte			Luft [°C]	Beton [°C]	
C 8/10	C1 (steif)	≤ 34	-	-	-	-	nein
C 12/15	C1 (steif)	≤ 34	-	-	-	-	nein
C 12/15	F3 (weich)	42 - 48	50,0	7	12,0	18,0	nein
C 20/25	F3 (weich)	42 - 48	49,0	5	11,5	18,0	nein
C 25/30	F3 (weich)	42 - 48	47,0	5	13,0	21,0	nein
C 25/30 wu	F3 (weich)	42 - 48	45,0	5	17,0	23,0	nein
C 30/37	F3 (weich)	42 - 48	49,0	5	15,0	22,4	nein
C35/45	F3 (weich)	42 - 48	48,5	5	15,0	22,0	nein

*Ausbreitmaß gemäß DIN EN 12350-5:2000-06

Rezeptur	Rezepturgewicht gemäß Mischungsberechnung [kg/m³]	ermittelte Frischbetonrohndichte der Probekörper						
		1	2	3	4	5	6	Mittelwert
		[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]
C 8/10	2.132	2.140	2.160	2.170	2.140			2.153
C 12/15	2.112	2.340	2.350	2.350	2.340	2.360		2.348
C 12/15	2.100	2.320	2.330	2.330	2.340			2.330
C 20/25	2.175	2.350	2.330	2.350	2.330	2.350		2.342
C 25/30	2.218	2.320	2.320	2.320	2.320			2.320
C 25/30 wu	2.233	2.340	2.320	2.340	2.340	2.320		2.332
C 30/37	2.236	2.350	2.330	2.360	2.370	2.370	2.350	2.355
C35/45	2.266	2.330	2.330	2.340	2.310	2.320		2.326



Ergebnis:

Die ermittelten Konsistenzen und Frischbetonrohndichten liegen im oberen Bereich der angestrebten Zielwerte.

3.2 Festbetoneigenschaften

Im Rahmen der Festbetonuntersuchungen wurden durch die Fa. TBS und die Fachgruppe Bauliches Recycling in Kooperation mit der FMPA Cottbus, Fachgruppe Betontechnologie für die entwickelten Rezepturen folgende Parameter bestimmt:

- Druckfestigkeitsprüfungen nach 1, 2, 7, 28 und 56 Tagen nach DIN EN 12390-3:2002-04,
- Festbetonrohndichte entspr. Druckfestigkeitsprüfungen nach DIN EN 12390-7:2001-02,
- Untersuchung zur Biegezugfestigkeit nach DIN EN 12390-5:2001-02,
- Elastizitätsmodul in Anlehnung an DIN 1048-5:1991-06,

- Wasserundurchlässigkeit nach LOHMEYER,
- Untersuchung des Schwindverhaltens.

3.2.1 Betondruckfestigkeit nach DIN EN 12390-3:2002-04

Die Ermittlung der Frühfestigkeiten nach 1, 2 und 7 Tagen wurde durch das Betonprüflabor der Fa. TBS durchgeführt. Die weiteren Untersuchungen an Festbetonprobekörpern erfolgte an der FMPA der BTU Cottbus, Fachgruppe Betontechnologie.

		1	2	3	4	5	6	7	8
Festigkeitsklasse		C 8/10	C 12/15	C 12/15	C 20/25	C 25/30	C 25/30 wu	C 30/37	C 35/45
Konsistenzklasse		C1	C1	F3	F3	F3	F3	F3	F3
Druckfestigkeit $f_{ci,cube}$ nach 1 Tag	[N/mm ²]	0,8	8,8	3,5	6,6	5,7	7,1	6,2	7,1
Druckfestigkeit $f_{ci,cube}$ nach 2 Tagen	[N/mm ²]	3,7	18,6	7,5	13,3	13,7	15,5	15,4	16,4
Druckfestigkeit $f_{ci,cube}$ nach 7 Tagen	[N/mm ²]	8	33,3	19,1	24,9	26,1	24,4	28,9	32,9
Druckfestigkeit $f_{ci,cube}$ nach 28 Tagen	[N/mm ²]	15,0	39,5	20,5	35,0	40,5	42,0	51,0	61,0
	[N/mm ²]	16,0	42,0	19,5	36,5	40,0	41,0	52,5	61,5
Druckfestigkeit $f_{ci,cube}$ nach 56 Tagen	[N/mm ²]	19,5	48,0	22,5	38,0	42,5	47,5	52,5	64,0
	[N/mm ²]	18,0	48,5	22,5	39,0	43,0	45,5	55,0	61,5
Mittelwert f_{cm} nach 28 und 56 Tagen	[N/mm ²]	17,1	44,5	21,3	37,1	41,5	44,0	51,8	61,3
Konformitätsnachweis Druckfestigkeit Erstprüfung ¹⁾									
Kriterium 1: $f_{cm} \geq f_{ck} + 4$									
$f_{ck} + 4$ [N/mm ²]		14	19	19	29	34	34	41	49
Anforderungen Kriterium 1		erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt
Kriterium 2: $f_{ci} \geq f_{ck} - 4$									
$f_{ck} - 4$ [N/mm ²]		6	11	11	21	26	26	33	41
Anforderungen Kriterium 2		erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt
Maximal erfüllte Festigkeitsklasse		C 8/10	C 30/37	C 12/15	C 25/30	C 30/37	C 30/37	C 35/40	C 45/55

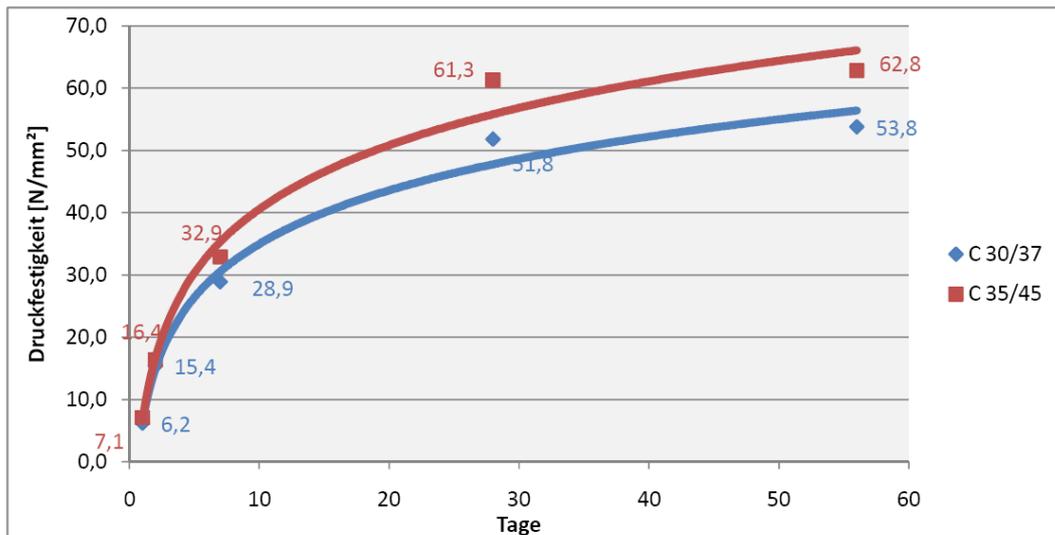
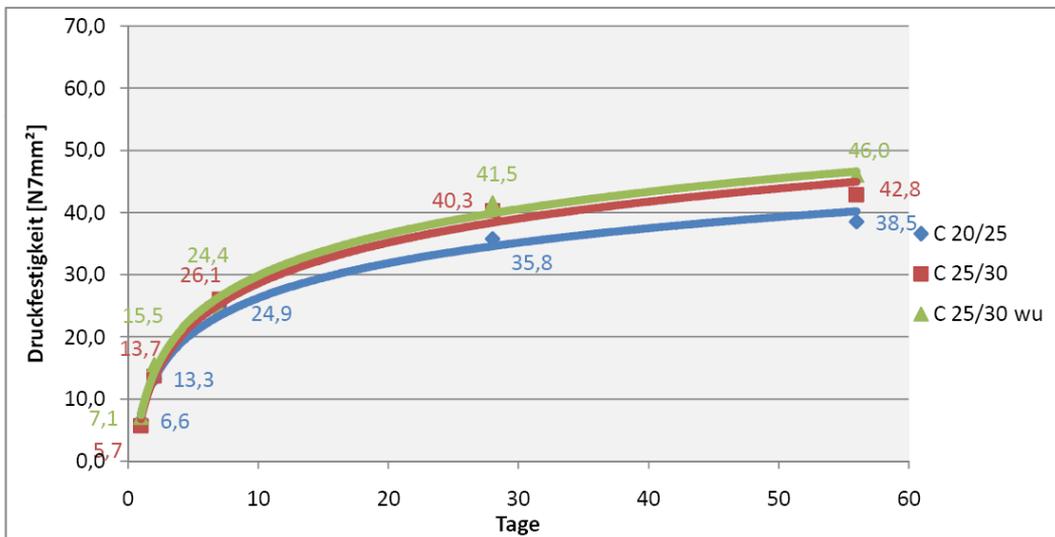
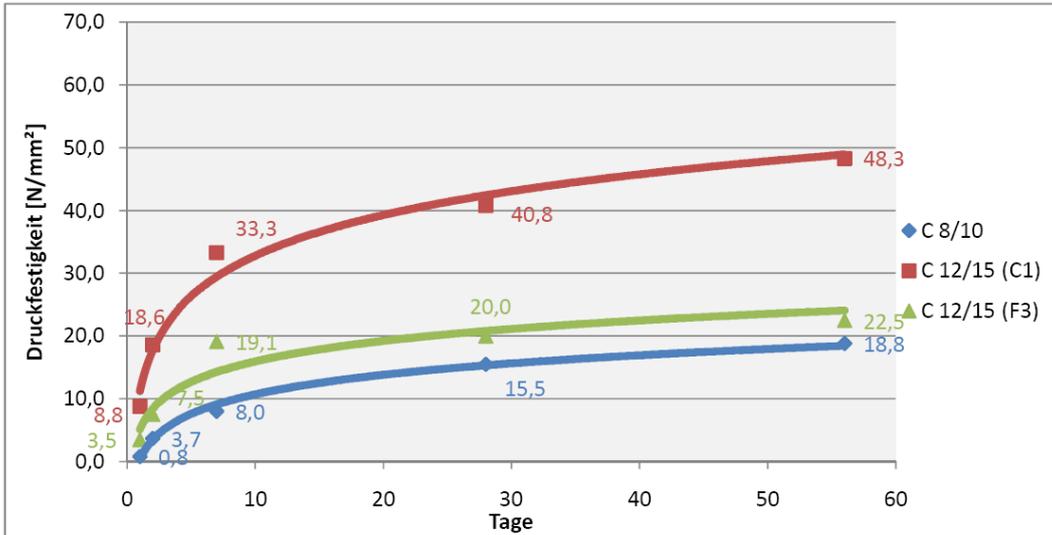
¹⁾ Eifert, H.; Bethae, W.: Beton - Prüfen nach Norm. Schriftenreihe Bauberatuna Zement. Hrsg. BDZ. 2005.

f_{ci} - Druckfestigkeitsmesswert
 f_{cm} - Mittelwert der Druckfestigkeitsmesswerte
 f_{ck} - Nennfestigkeit



Ergebnis:

Alle Rezepturen erfüllen mit hoher Sicherheit die Anforderungen der jeweiligen Festigkeitsklasse. Ab der Festigkeitsklasse C20/25 liegen die ermittelten Festigkeiten mind. eine Festigkeitsklasse höher. Die Rezeptur C12/15 (C1) liegt dabei extrem deutlich über den Anforderungen. Hier kann der Zementanteil deutlich reduziert werden. Alle Rezepturen zeigen auch eine schnelle Festigkeitsentwicklung in den ersten Tagen, welche einem schnellen Baufortschritt zu Gute kommt. Die Festigkeitsentwicklung stellt sich wie folgt dar:



3.2.2 Biegezugfestigkeit nach DIN EN 12390-5:2001-02

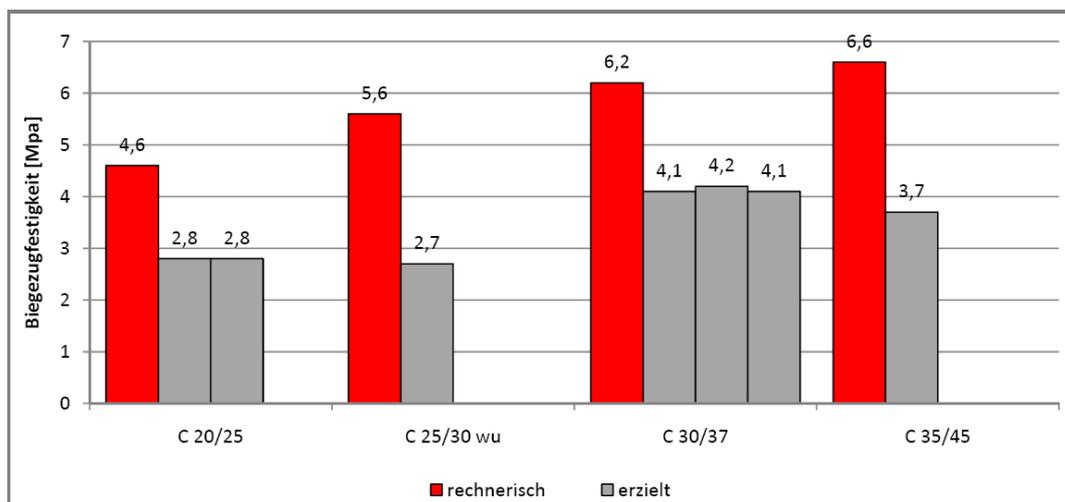
Die Biegezugfestigkeit ist maßgeblich für auf Biegung beanspruchte, unbewehrte bzw. gering bewehrte Betonbauteile, wie z.B. für Betonfahrbahnplatten und Gehwegplatten. Näherungsweise beträgt die Druckfestigkeit f_c das 5- bis 9-fache der Biegezugfestigkeit $f_{ct(BZ)}$.

Die Untersuchungen erfolgten an Prismen 700 x 150 x 150 mm nach DIN EN 12390-5:2001-02 an ausgewählten Betonrezepturen: C 20/25, C 25/30 wu, C 30/37, C 35/45. Dabei erfolgte jedoch keine ganzzweilige Wasserlagerung der Prismen, wie in der DIN festgelegt ist. Denn die Austrocknung des Betons führt in den Randzonen zu Schwindzugspannungen. Die Ergebnisse der Prüfungen zur Biegezugfestigkeit in diesem Stadium können um 10 bis 50 % abgemindert sein³.

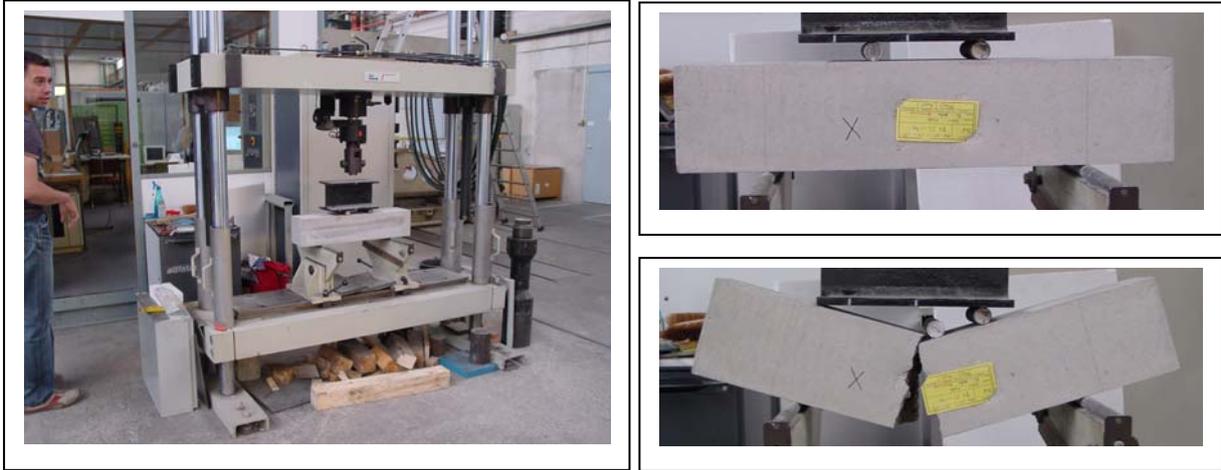
Biegezugfestigkeit $f_{ct(BZ)}$		C 20/25	C 25/30 wu	C 30/37	C 35/45
Nennwert f_{ck}	N/mm ²	25	30	37	45
Mittlerer Verhältniswert $f_c/f_{ct(BZ)}$ ¹⁾		5,4	5,4	6	6,8
rechnerisch $f_{ct(BZ)}$ aus f_{ck} für Splittbeton	N/mm ²	4,6	5,6	6,2	6,6
erzielte Biegezugfestigkeit $f_{ct(BZ)}$	N/mm ²	2,8	2,7	4,1	3,7
	N/mm ²	2,8		4,2	
	N/mm ²			4,1	
maximale Differenz	N/mm ²	-1,8	-2,9	-2,0	-2,9
prozentuale Abweichung	%	-40%	-51%	-32%	-44%

¹⁾ nach: Betontechnischen Daten, Ausgabe 2009, HeidelbergCement, S 166, Tab. 11.2.11.a, Splittbeton.

f_{ck} - Nennfestigkeit
 $f_{ct(BZ)}$ - Biegezugfestigkeit



³ Grübel, P.; Weigler, H.; Karl, S.: Beton-Arten, Herstellung und Eigenschaften, 2001, S. 364.



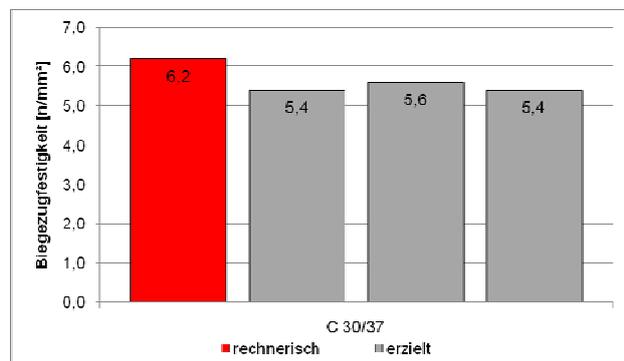
Ergebnis:

Die ermittelten Biegezugfestigkeiten liegen mit 34 – 51 % deutlich unter den aus der Druckfestigkeit abgeleiteten Werten nach DIN 1045-2 für Normalbeton. Ursachen hierfür werden in der nicht normgerecht ausgeführten Lagerung der Prüfkörper gesehen. Aufgrund der nicht normgerechten Lagerung der Prüfkörper und der damit nicht auswertbaren Prüfergebnisse wurden die Prüfungen an der im Pilotprojekt eingesetzten Betonrezeptur C 30/37 wiederholt.

Versuchswiederholung:

Die Prüfkörper wurden am 08.10.2009 durch das Betonlabor der TBS Mannheim aus dem im Pilotprojekt eingesetzten RC-Beton C 30/37 hergestellt und normgerecht vom 2. – 28. Tag im Wasserbad gelagert. Für den Transport von Mannheim zur Prüfstelle in Cottbus (nach 7 Tagen) wurden die feuchten Prüfkörper in Plastikfolie gehüllt und danach sofort wieder ins Wasserbad gegeben. Es war hierbei keine Austrocknung der Prüfkörper visuell erkennbar. Die Prüfung auf Biegezugfestigkeit nach 28 Tagen zeigte folgende Ergebnisse:

Biegezugfestigkeit $f_{ct(BZ)}$		C 30/37
Nenndruckfestigkeit f_{ck}	N/mm ²	37
Mittlerer Verhältniswert $f_t/f_{ct(BZ)}$		6
rechnerisch $f_{ct(BZ)}$ aus f_{ck} für Splittbeton	N/mm ²	6,2
erzielte Biegezugfestigkeit $f_{ct(BZ)}$	N/mm ²	5,4
	N/mm ²	5,6
	N/mm ²	5,4
maximale Differenz	N/mm ²	-0,6
prozentuale Abweichung	%	-9%



Die ermittelten Biegezugfestigkeiten der Versuchswiederholung liegen mit 9 % nur noch knapp unter den aus der Druckfestigkeit abgeleiteten Werten nach DIN 1045-2 für Normalbeton.

Die deutliche Abminderung der Werte aus der 1. Versuchsdurchführung kann somit durchaus auf die nicht normgerechte Lagerung der Versuchskörper zurückgeführt werden. Eine betontechnische Ur-

che der starken Abminderung der ermittelten Biegezugfestigkeitswerte durch den Einsatz von RC-Gesteinskörnung kann ausgeschlossen werden.

3.2.3 Elastizitätsmodul (E-Modul) in Anlehnung an DIN 1048-5:1991-06

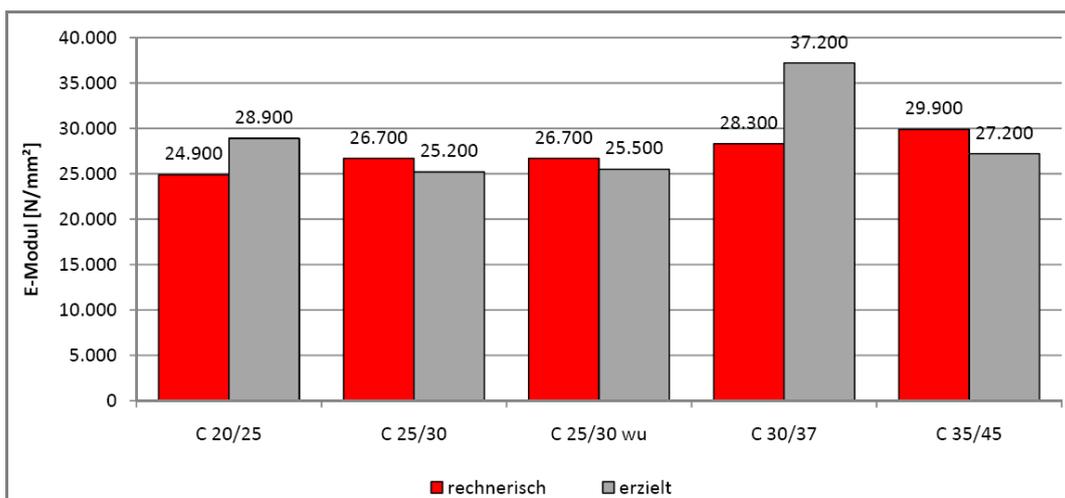
Die Untersuchungen erfolgten an zylindrischen Prüfkörpern $\varnothing 99,5 / 140$ mm in Anlehnung an DIN 1048-5:1991-06 an ausgewählten, entwickelten RC-Betonrezepturen unterschiedlicher Festigkeitsklassen. Die Zylinder wurden aus Kernbohrungen hergestellter Prüfwürfel gewonnen. Die Messstrecke beträgt 80 mm.



E-Modul E_b		C 20/25	C 25/30	C 25/30 wu	C 30/37	C 35/45
rechnerisch aus f_{ck} für Normalbeton ¹⁾	[N/mm ²]	24.900	26.700	26.700	28.300	29.900
erzielter E-Modul E_b	[N/mm ²]	28.900	25.200	25.500	37.200	27.200
maximale Differenz	[N/mm ²]	4.000	-1.500	-1.200	8.900	-2.700
rechnerische Werte erreicht		ja	nein	nein	ja	nein
prozentuale Abweichung	[%]	16%	-6%	-4%	31%	-9%

¹⁾ nach DIN 1045-1:2008-08, Tab. 9

f_{ck} - Nennfestigkeit



Ergebnis:

Die gemessenen Werte des statischen E-Moduls der RC-Betone liegen überwiegend unterhalb der rechnerisch ermittelten E-Moduli für Normalbeton. Die aus den Druckfestigkeiten abgeleiteten Werte für den E-Modul von Normalbeton gemäß DIN 1045-1:2008-08 konnten für die Rezeptur C 20/25 und

die im Pilotprojekt eingesetzte Rezeptur C 30/37 erreicht werden. Für die Rezepturen C25/30, C25/30 wu als auch C 35/45 wurden die rechnerischen Werte um 4 - 9 % unterschritten. Der Vergleich des Rechenwertes der E-Moduli von Normalbeton mit den geprüften E-Moduli der RC-Betone zeigt, dass die Abweichung vom Rechenwert in der gleichen Größenordnung liegt wie für Normalbeton.

3.2.4 Wasserundurchlässigkeit / Wassereindringtiefe nach LOHMEYER

Nach DIN EN 206-1, 5.5.3 muss das Verfahren zur Prüfung zum Widerstand gegen Eindringen von Wasser in Probekörper und die Konformitätskriterien zwischen dem Verfasser der Festlegungen und dem Hersteller vereinbart werden. Solange kein vereinbartes Prüfverfahren festgelegt ist, darf der Wassereindringwiderstand indirekt durch Grenzwerte für die Betonzusammensetzung festgelegt werden. Hierfür schreibt die DIN 1045-2, 5.5.3 folgende Kriterien fest:

- bei Bauteildicken > 40 cm: w/z-Wert $\leq 0,70$,
- bei Bauteildicken ≤ 40 cm: w/z-Wert $\leq 0,60$, Zementgehalt ≥ 280 kg/m³ (270 kg/m³ bei Anrechnung von Zusatzstoffen, Mindestdruckfestigkeitsklasse C 25/30).

Die DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie) weist zudem die Konsistenzklasse F3 oder weicher aus, um eine ausreichende Verarbeitbarkeit des Frischbetons zu gewährleisten. Weitere Festlegungen der WU-Richtlinie begründen sich u.a. in der Bauteildicke, der Beanspruchungsklasse und verschiedener Randbedingungen wie Witterung und Temperatur. Diese müssen im Einzelfall des jeweiligen Betoneinsatzes angepasst werden.

Die indirekte Untersuchung des Wassereindringwiderstandes erfolgt an den entwickelten RC-Betonen C 25/30 wu und C 30/37.

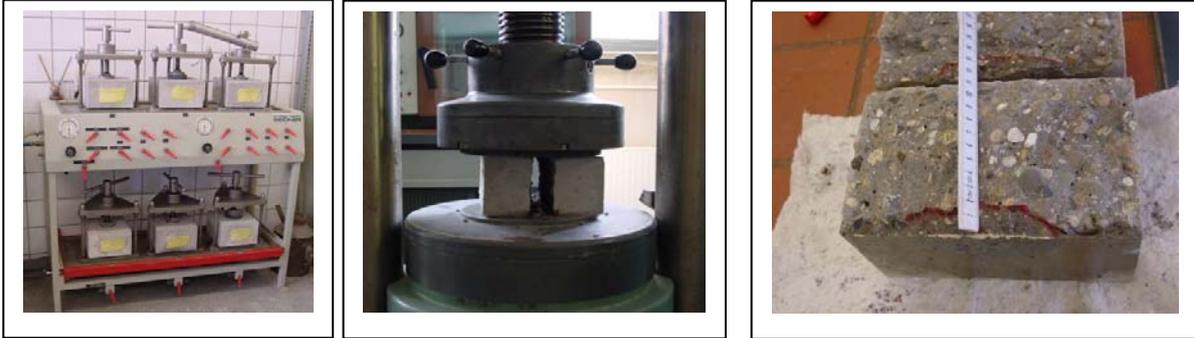
Parameter	Grenzwerte	C 25/30 wu	C 30/37	Anforderungen
w/z-Wert	$\leq 0,60$	0,53	0,52	erfüllt
Zementgehalt	≥ 280	340	360	erfüllt
Festigkeitsklasse	C 25/30	C 25/30	C 30/37	erfüllt
Konsistenzklasse	F3	F3	F3	erfüllt

Die Anforderungen für die Betonzusammensetzung nach DIN 1045-2, 5.5.3 als auch der WU-Richtlinie sind eingehalten.

Für den direkten Nachweis der Wasserundurchlässigkeit wurden Untersuchung nach LOHMEYER für die RC-Betone C 25/30 wu, C 30/37 an Prüfkörpern 200 x 200 x 120 mm durchgeführt.

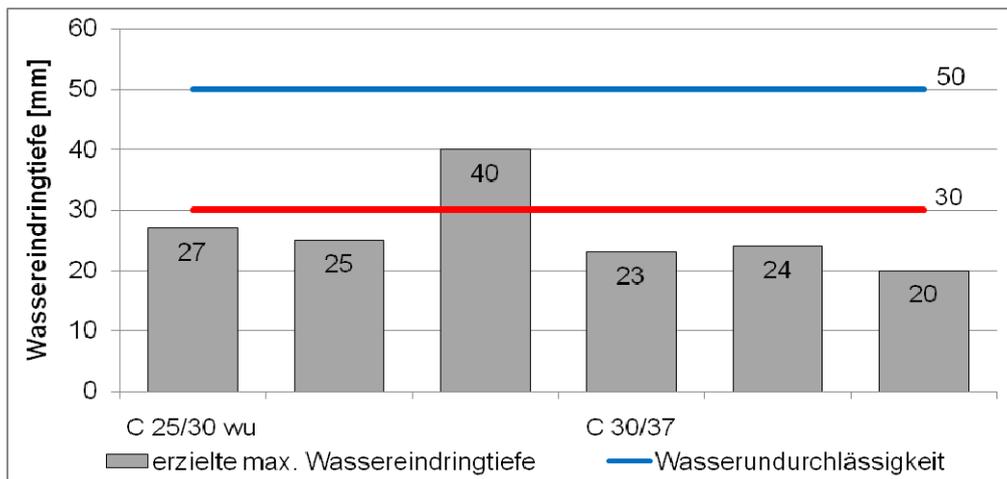
Das Verfahren nach LOHMEYER ist wie folgt gekennzeichnet:

- Probekörper in Prüfrichtung einspannen und 72 h lang einem konstanten Wasserdruck von 5 bar aussetzen,
- Probekörper 7 Tage drucklos unter Wasser lagern,
- Probekörper nach DIN 1048-5:1991-06, Abschn. 7.6 prüfen (72 h bei 5 bar).



Wassereindringtiefe [mm]		C 25/30 wu			C 30/37		
Anforderung nach DAfStb-WU-Richtlinie	[mm]	50	50	50	50	50	50
erzielte max. Wassereindringtiefe	[mm]	27	25	40	23	24	20
Verteilung		gleichmäßig	gleichmäßig	ungleichmäßig	gleichmäßig	gleichmäßig	gleichmäßig
Anforderungen erfüllt		ja	ja	ja	ja	ja	ja

Verlauf der Wassereindringtiefe



Ergebnis:

Die beiden untersuchten Betonrezepturen, Betonfestigkeitsklassen C 25/30 wu und C 30/37, können als wasserundurchlässig eingestuft werden.

3.2.5 Untersuchung des Schwindverhaltens

Untersucht wurden Prüfkörper 300 x 100 x 100 mm an RC-Betonen: C 20/25, C 25/30, C 25/30 wu, C 35/45. Die Lagerung der nach 24 Stunden ausgeschalteten Prüfkörper erfolgte in einem Klimaraum mit einer Lufttemperatur von $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ und einer Luftfeuchtigkeit von $50\% \pm 5\%$.

In die Probekörperoberfläche wurden Messzapfen einbetoniert und zusätzlich mit Kleber gesichert. Die Nullmessung erfolgte am 1. Tag nach dem Ausschalen der Prismen. Die Messung erfolgte mit einem Dehnmessgerät mit einer Messgenauigkeit von 0,001 mm nach 2, 3, 6, 8, 14 und 18 Tagen.

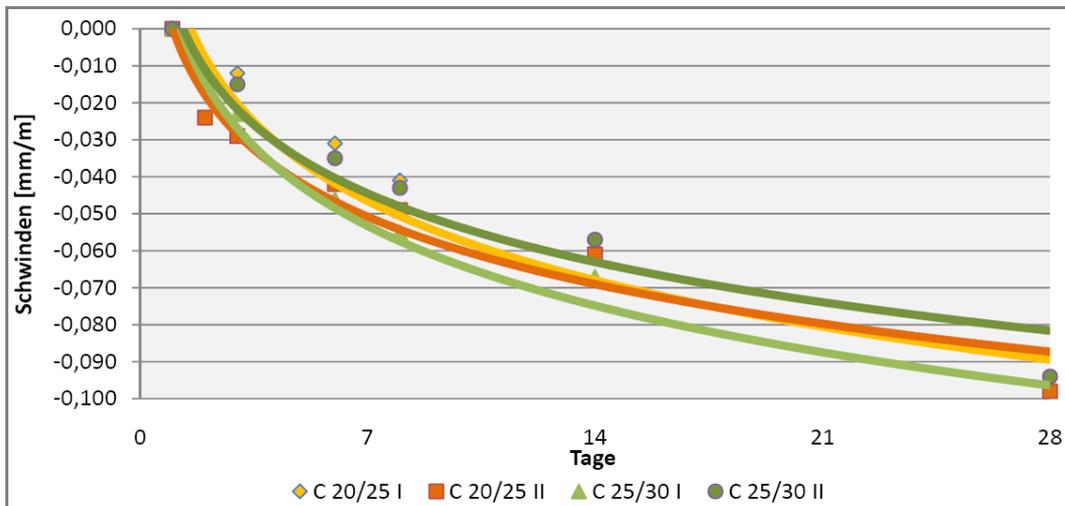


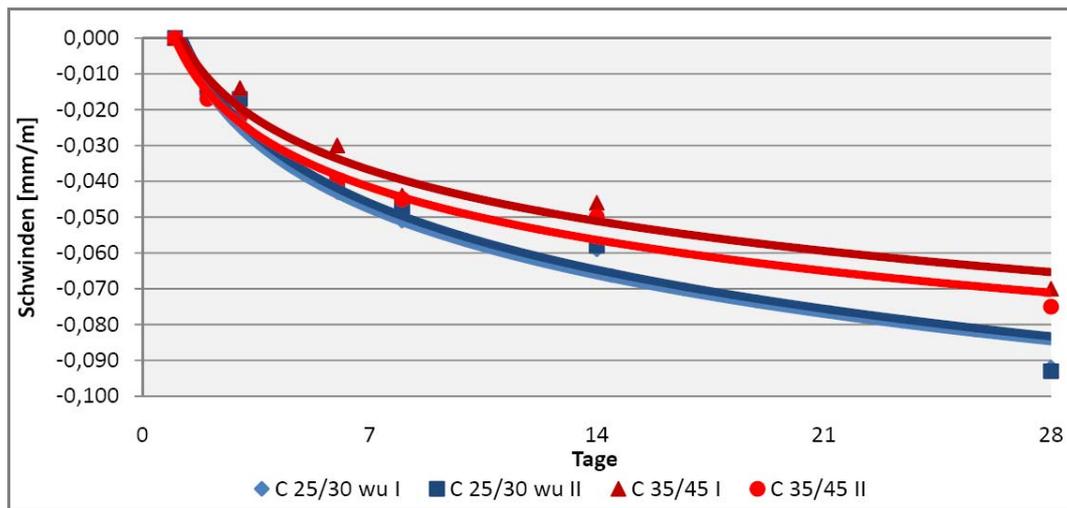
Die Untersuchungen ergaben folgende Ergebnisse:

Schwinden Δl [mm/m]	C 20/25		C 25/30		C 25/30 wu		C 35/45	
	I	II	I	II	I	II	I	II
nach 1 Tag	0	0	0	0	0	0	0	0
nach 2 Tagen	-0,010	-0,024	-0,013	-0,014	-0,015	-0,014	-0,013	-0,017
nach 3 Tagen	-0,012	-0,029	-0,023	-0,015	-0,022	-0,017	-0,014	-0,022
nach 6 Tagen	-0,031	-0,042	-0,046	-0,035	-0,043	-0,040	-0,030	-0,040
nach 8 Tagen	-0,041	-0,049	-0,055	-0,043	-0,051	-0,047	-0,044	-0,045
nach 14 Tagen	-0,061	-0,061	-0,067	-0,057	-0,059	-0,058	-0,046	-0,050
nach 28 Tagen	-0,109	-0,098	-0,107	0,094	-0,092	-0,093	-0,070	-0,075
Anhaltswert ¹⁾ für Endschwindmaß	0,1 - 0,5 mm/m							

¹⁾ nach: Betontechnischen Daten, Ausgabe 2009, HeidelbergCement, S. 141, Tab. 9.6.3.a, genaue Berechnung nach DIN 1045-1, Abschn. 9.1.4.

Die Entwicklung der Längenänderung stellt sich grafisch wie folgt dar:





Ergebnis:Die ermittelten Längenverkürzungen durch das Schwinden liegen unter den Anhaltswerten für das Endschwindmaß von 0,1 – 0,5 mm/m.⁴

⁴ nach: Betontechnischen Daten, Ausgabe 2009, HeidelbergCement, S. 141, Tab. 9.6.3.a, genaue Berechnung nach DIN 1045-1, Abschn. 9.1.4.

4 Schlussfolgerungen

Die untersuchten RC-Gesteinskörnungen entsprechen allen Anforderungen der DIN 4226-100:2002-02 und somit auch der DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierter Gesteinskörnung nach DIN 4226-100“ Ausgabe: 2004-12.

Entsprechend DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton“ Teil 3: Gebrochene Alkaliempfindliche Gesteinskörnung“ Ausgabe Oktober 2007 kann die untersuchte RC-Gesteinskörnung ohne erforderliche vorbeugende Maßnahmen ohne festgelegten Zementgehalt für die Feuchtigkeitsklassen WO (trocken), WF (feucht) und WA (feucht + Alkalizufuhr von außen) verwendet werden. Sie entspricht der Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S.

Die vorgegebenen maximalen Anteile an RC-Gesteinskörnungen gemäß DIN 4226-100 der entwickelten RC-Betone sind eingehalten. Die Anforderungen an die Frischbetoneigenschaften hinsichtlich der Konsistenz (Verarbeitbarkeit), Entmischungsneigung und Frischbetonrohichte werden erfüllt. Ebenso die Anforderungen an die Druckfestigkeit als maßgebender Parameter zur Klassifizierung des Betons. Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Biegezugfestigkeit an der im Pilotprojekt verwendeten RC-Betonrezeptur C 30/37 liegen nur leicht unter den rechnerischen Werten für Beton mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen. Die ermittelten Werte der Elastizitätsmoduli liegen im Toleranzbereich von Normalbeton. Die untersuchten RC-Betone C 25/30 wu und C 30/37 können als wasserundurchlässig eingestuft werden. Die ermittelten Schwindmaße liegen im Bereich der Anhaltswerte für Beton mit ausschließlich natürlicher Gesteinskörnung.

Die o.a. RC-Betonrezepturen erfüllen alle Anforderungen der DIN EN 206-1:2001-07, DIN 1045-2:2008-08 als auch der DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierter Gesteinskörnung nach DIN 4226-100“ Ausgabe: Dezember 2004. Daher spricht nichts gegen eine Anwendung der entwickelten Betonrezepturen im Hochbau.

Literatur

Betontechnische Daten, Ausgabe 2009 inklusive DIN 1045:2008-08, Hrsg. HeidelbergCement AG.

DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkali-reaktion im Beton (Alkali-Reaktion)“ Ausgabe Februar 2007, Beuth-Verlag GmbH; Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG, Technische Baubestimmungen, 2008.

DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100, Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN 1045-1“ Ausgabe Dezember 2004, Hrsg. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – DafStb im DIN Deutsches Institut für Normung e.V..

DAfStb-Richtlinie „Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie)“ Ausgabe November 2003, Hrsg. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – DafStb im DIN Deutsches Institut für Normung e.V..

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

DIN 1048-5:1991-06 Prüfverfahren für Beton - Teil 5: Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper.

DIN 38414-4:1984-10 Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S) – Teil 4: Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4).

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

DIN EN 1097-6:2005-12 Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme.

DIN EN 12350-1:2000-03 Prüfung von Frischbeton – Teil 1: Probenahme.

DIN EN 12350-1:2009-08 Prüfung von Frischbeton – Teil 1: Probenahme.

DIN EN 12350-5:2000-06 Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß.

DIN EN 12350-5:2009-08 Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß.

DIN EN 12350-6:2000-03 Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischbetonrohddichte.

DIN EN 12350-6:2009-08 Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischbetonrohddichte.

DIN EN 12390-1:2001-02 Prüfung von Festbeton – Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen.

DIN EN 12390-2:2001-06 Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für die Festbetonprüfung.

DIN EN 12390-2:2009-08 Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für die Festbetonprüfung.

DIN EN 12390-3:2002-04 Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern.

- DIN EN 12390-3:2009-07 Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern.
- DIN EN 12390-5: 2001-02 Prüfung von Festbeton – Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern.
- DIN EN 12390-5: 2009-07 Prüfung von Festbeton – Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern.
- DIN EN 12390-7:2001-02 Prüfung von Festbeton – Teil 7: Dichte von Festbeton.
- DIN EN 12390-7:2009-07 Prüfung von Festbeton – Teil 7: Dichte von Festbeton.
- DIN EN 12620:2008-07 Gesteinskörnungen für Beton.
- DIN EN 206-1:2001-07 Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.
- DIN EN 933-1:2006-01 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren.
- DIN EN 933-4:2008-06 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 4: Bestimmung der Kornform – Kornformkennzahl.
- Ebeling, Karsten; Knopp, Wolfgang; Pickhardt, Roland: Beton – Herstellung nach Norm: Die neue Normengeneration, Schriftenreihe der Bauberatung Zement, Hrsg.: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, Verlag Bau + Technik, Düsseldorf, 2004.
- Eifert, Helmut; Bethge, Wolfgang: Beton – Prüfung nach Norm: Die neue Normengeneration, Schriftenreihe der Bauberatung Zement, Hrsg.: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, Verlag Bau + Technik, Düsseldorf, 2005.
- FMPA Cottbus, Fachgruppe Baustoffe; chem.-physikal. Analytik: Untersuchungsbericht 09-077-102, Prüfung einer Gesteinskörnung nach DAfStb-Richtlinie Alkali-reaktion; Teil 3: Gebrochene alkaliempfindliche Gesteinskörnungen, Pkt. 5.2: Mörtelschnelltest-Referenzverfahren, Untersuchungsbeginn 17.08.2009.
- FMPA Cottbus, Fachgruppe Betontechnologie: Prüfbericht Nr. 09-077-201, Bestimmung von Materialkennwerten an Beton, RC-Beton, Prüfstelleneingang 25.04.2009.
- FMPA Cottbus, Fachgruppe Betontechnologie: Prüfbericht Vorabinformation 4, Bestimmung der Druckfestigkeit und das Schwinden von Beton, RC-Beton, Prüfstelleneingang 25.04.2009.
- FMPA Cottbus, Fachgruppe Betontechnologie: Prüfbericht Vorabinformation, Bestimmung der Druckfestigkeit und der Biegezugfestigkeit von Beton, RC-Beton, Prüfstelleneingang 25.04.2009.
- FMPA Cottbus, Fachgruppe Betontechnologie: Prüfbericht Vorabinformation 3, Bestimmung der Druckfestigkeit und das Schwinden von Beton, RC-Beton, Prüfstelleneingang 25.04.2009.
- FMPA Cottbus, Fachgruppe Betontechnologie: Prüfbericht Vorabinformation, Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls und der Wasserundurchlässigkeit, RC-Beton, Prüfstelleneingang 25.04.2009.
- FMPA Cottbus, RAP Stra-Prüfstelle: Untersuchung von Betonrecycling, Untersuchung von RC-Baustoffen nach DIN 4226-100 und DIN EN 12620, Probenahme vom 10.06.2009.

Grübel, Peter; Weigler, Helmut; Karl, Siegwart: Beton-Arten, Herstellung und Eigenschaften, Verlag Ernst & Sohn, 2. Auflage, 2001.

KIWA Bautest GmbH, Prüfbericht Auftragsnr.: LS 1177 / 2009, Umweltverträglichkeitsprüfung im Rahmen der Verbundforschung, RC-Material und natürliche Gesteinskörnung, Spremberg, 14.08.2009.

TBS Transportbetonservice Mannheim: Frisch- und Festbetonprüfung zu RC-Betonrezepturen, 2009.

TBS Transportbetonservice Mannheim: Mischungsberechnungen zu RC-Betonrezepturen, 2009.