



Sonderdruck

Ergebnisse einer Dissertation

Einfluss der Wasseraufnahme von rezyklierten Gesteinskörnungen auf den Wasserzementwert von R-Beton

Julia Scheidt, Wiesbaden

Überreicht durch:

1 **Dyckerhoff**

Sonderdruck
aus beton 4/2020
Verlag Bau+Technik GmbH
www.verlagbt.de

Ergebnisse einer Dissertation

Einfluss der Wasseraufnahme von rezyklierten Gesteinskörnungen auf den Wasserzementwert von R-Beton

Julia Scheidt, Wiesbaden

Rezyklierte Gesteinskörnung besitzt durch ihre hohe Wasseraufnahme das Potenzial, den wirksamen Wasserzementwert des damit hergestellten Betons unkontrolliert zu verändern. Um den geforderten Wasserzementwert, die Dauerhaftigkeit des Betons und die gewünschten Frischbetoneigenschaften sicherzustellen, muss das Saugvermögen der rezyklierten Gesteinskörnung bei der Wasserdosierung korrekt berücksichtigt werden. Der Beitrag stellt zusammenfassend dar, wie die Wasseraufnahme rezyklierter Gesteinskörnungen in einer Betonzusammensetzung sich bei unterschiedlichen Feuchtezuständen auf den wirksamen Wasserzementwert auswirkt und welche optimale Wasserdosierung bei R-Betonen empfohlen werden kann, um einen gleichen wirksamen Wasserzementwert wie in Beton mit natürlichen Gesteinskörnungen zu erzielen.

1 Charakteristische Besonderheiten von rezyklierten Gesteinskörnungen – Randbedingungen für die Praxis

Rezyklierte Gesteinskörnungen, die in Deutschland für die Betonherstellung verwendet werden sollen, müssen einem der beiden über die gültigen Regelwerke zugelassenen Typen 1 oder 2 entsprechen. Die Gesteinskörnungen besitzen im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung eine höhere Porosität, dementsprechend auch eine höhere Wasseraufnahme und eine geringere Rohdichte. Die Rohdichte ist dabei stark vom Feuchtezustand abhängig, woraus sich für die Betonherstellung eine veränderte Problematik im Vergleich zur natürlichen Gesteinskörnung ergibt. Um Abweichungen im Stoffraum zu vermeiden, muss in der Praxis die Rohdichte von rezyklierten Gesteinskörnungen stets im jeweiligen Feuchtezustand ermittelt und in der Mischungsberechnung berücksichtigt werden.

1.1 Kornrohddichte von rezyklierten und natürlichen Gesteinskörnungen im Vergleich

Während die Variationsbreite der Trockenrohddichte natürlicher Gesteinskörnungen, die sich aus regionalen petrografischen Unterschieden in Deutschland ergibt, ca. $2,46 \text{ kg/dm}^3$ bis ca. $2,61 \text{ kg/dm}^3$ beträgt (Bilder 1 und 2), kann die Rohdichte rezyklierter Gesteinskörnung in weiteren Grenzen variieren.

Das Regelwerk [2] schreibt für rezyklierte Gesteinskörnungen eine Mindestrohddichte von $2,00 \text{ kg/dm}^3$ vor, die Rohdichte einer Praxiskörnung des Typs 1 kann jedoch durchaus bis zu $2,55 \text{ kg/dm}^3$ betragen. Dass die Rohdichten von rezyklierter Gesteins-

körnung eine größere Bandbreite aufweisen als für natürliche Gesteinskörnungen wird aus der Auswertung von Labor- und Praxisgemischen aus eigenen Versuchen, ergänzt mit Daten aus der Literatur, deutlich. Die geringste Trockenrohddichte einer rezyklierten Körnung des Typs 1 (Betonspalt $4/8 \text{ mm}$ aus [3]) lag bei $2,01 \text{ kg/dm}^3$, sie erfüllte somit nur knapp die Mindestanforderung an die Rohdichte von $2,00 \text{ kg/dm}^3$ gemäß [2]. Die höchste Trockenroh-

dichte, die an einer rezyklierten Gesteinskörnung des Typs 1 im Rahmen dieser Auswertung erfasst wurde, lag bei $2,55 \text{ kg/dm}^3$. Diese Kornrohddichte wurde an Betonspalt $8/16 \text{ mm}$ ermittelt, dessen Rohdichte damit in derselben Größenordnung natürlicher Gesteinskörnungen lag. Die an rezyklierten Gesteinskörnungen des Typs 2 ausgewerteten Trockenrohddichten lagen zwischen $2,10 \text{ kg/dm}^3$ und $2,34 \text{ kg/dm}^3$ (Tafel 1).



Bild 1: Gewinnungsstätten der ausgewerteten Kiese (grau) und gebrochenen Gesteinskörnungen (schwarz)

Karte erstellt mit umap.openstreetmap.fr

Die Autorin:

Dr.-Ing. Julia Scheidt studierte Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Kaiserslautern. Von 2014 bis 2019 war sie wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen an der Technischen Universität Kaiserslautern, wo sie auch promovierte. Der Themenschwerpunkt ihrer Dissertation lag auf der Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung im Beton. Von 2016 bis 2019 arbeitete sie im Arbeitsausschuss Gesteinskörnungen des DIN Normenausschuss Bauwesen (NABau) mit. Seit 2019 ist sie in der Abteilung Qualität und Technische Beratung der Dyckerhoff GmbH, Wiesbaden tätig.

Die große Spanne der möglichen Rohdichte resultiert aus unterschiedlich hohen Anteilen an porösem Ziegel oder Kalksandstein (bei Typ 1 zwischen 0 M.-% und 10 M.-%, bei Typ 2 zwischen 10 M.-% und 30 M.-%), sowie unterschiedlichen ursprünglichen Betonfestigkeitsklassen des enthaltenen Betonsplitts.

1.2 Kontinuität der Kornrohichte von Lieferung zu Lieferung

Es kann durch entsprechende Steuerung in der Aufbereitung aber gelingen, einen Massenstrom über längere Zeit so zu liefern, dass die Streuung zwischen einzelnen Lieferchargen eines Recyclers ähnlich sind wie bei natürlicher Gesteinskörnung. Über einen Zeitraum von 3,5 Jahren wurden insgesamt elf Chargen rezyklierter Gesteinskörnung eines Recyclingbetriebes charakterisiert (Lieferkörnungen 2/16 mm, 2/8 mm und 8/16 mm, sowohl in Form von Praxisgemischen der Typen 1 und 2, als auch in Form von Laborgemischen der Typen 1 und 2 zudem in sortenreiner Form als reine Betonsplitt und reine Mauerwerksplitt), um den Streubereich der Rohdichte für die Praxis bewerten zu können. Die Streubreiten für rezyklierte Gesteinskörnung dieses Herstellers wurden der Streubreite von Herstellern natürlicher Gesteinskörnung über einen Betrachtungszeitraum von fünf Jahren gegenübergestellt. Die Auswertung der Fremdüberwachung für insgesamt 95 Steinbrüche sowie 66 kiesproduzierende Betriebe in Deutschland [5–7] wurde dabei in Relation zur Auswertung des Recyclers gesetzt.

Die geografische Lage der ausgewerteten Gewinnungsstätten ist in Bild 3 dargestellt. Die Zusammenfassung in Bild 4 zeigt, dass die Streuungen in der Rohdichte über den Zeitraum von 3,5 Jahren zwar oberhalb der mittleren Streuung für natürliche Gesteinskörnungen, aber noch innerhalb des Bereichs liegen, der auch bei natürlichen Kiesen und Splitten in Kauf genommen werden muss.

Auf die im absoluten vom bekannten Naturstein abweichenden Eigenschaften muss ein Betonhersteller sich bei der

Tafel 1: Kornrohichten in Abhängigkeit vom Feuchtezustand von 106 ausgewerteten Datensätzen aus [4]

Art der Gesteinskörnung		ρ_{rd} [kg/dm ³]	ρ_{ssd} [kg/dm ³]	Differenz $\rho_{rd} - \rho_{ssd}$ je einzelner Körnung
Natürlich	min	2,46	2,51	0,01
	max	2,90	3,03	0,06
	Ø	2,57	2,62	0,04
Typ 1	min	2,01	2,24	0,05
	max	2,55	2,56	0,30
	Ø	2,31	2,43	0,13
Typ 2	min	2,10	2,27	0,12
	max	2,34	2,43	0,26
	Ø	2,24	2,38	0,17
Ziegelsplitt	min	1,56	1,98	0,25
	max	1,91	2,17	0,38
	Ø	1,76	2,08	0,32

Mischungsberechnung in gleicher Weise einstellen wie auf die Charakteristika der lokal verfügbaren natürlichen Körnung.

1.3 Wasseraufnahme rezyklierter Gesteinskörnung

Die Porenstruktur der Hauptbestandteile Betonsplitt (Rc) und Mauerwerksplitt (Rb) und ihre jeweilige Wechselwirkung mit Wasser unterscheiden sich grundlegend. Rezyklierte Gesteinskörnung des Typs 1 besteht zu mindestens 90 M.-%, in der Praxis zumeist vollständig aus Betonbruch, wohingegen in rezyklierter Gesteinskörnung des Typs 2 10 M.-% bis 30 M.-% Mauerwerksbaustoffe enthalten sind. Da Zementstein bzw. Betonbruch nur eine deutlich geringere Anzahl an Kapillarporen mit zudem geringeren Porenradien besitzt als alle Mauerwerksbaustoffe, ergeben sich für beide Typen Unterschiede in der Wechselwirkung mit Wasser. Je mehr Betonsplitt in der rezyklierten Gesteinskörnung enthalten ist, desto kleiner sind die Porenstrukturen. Entsprechend höher ist die physika-

lische Bindung von Wassermolekülen an die Oberflächen.

Feuchte rezyklierte Gesteinskörnung des Typs 1 wird aufgrund des höheren Anteils an kleinen Poren langsamer austrocknen als feuchte rezyklierte Gesteinskörnung des Typs 2. Umgekehrt wird sehr trockene rezyklierte Gesteinskörnung des Typs 1 aus

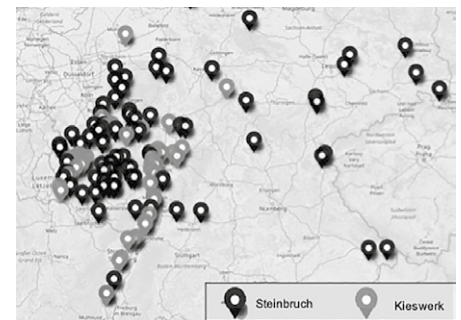


Bild 3: Lage der ausgewerteten Gewinnungsstätten natürlicher Gesteinskörnung
Karte erstellt mit umap.openstreetmap.fr

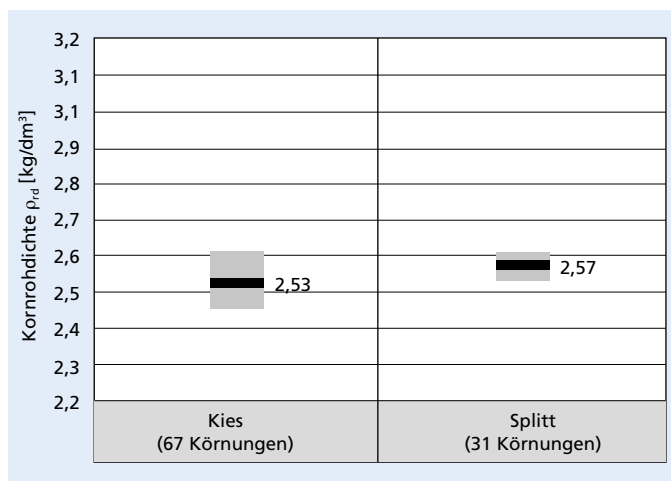


Bild 2: Kornrohichte im ofentrockenen (ρ_{rd}) Zustand von 67 ausgewerteten Kiesen und 31 gebrochenen natürlichen Gesteinskörnungen

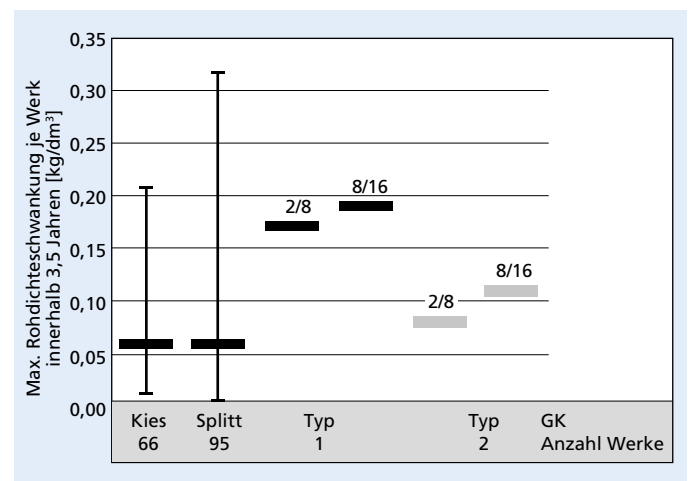


Bild 4: Maximale Streuung der Trockenrohichte bei rezyklierten und natürlichen Gesteinskörnungen je Werk

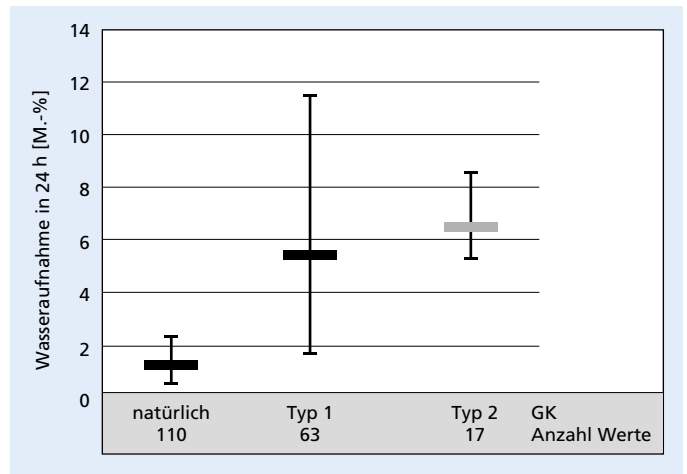
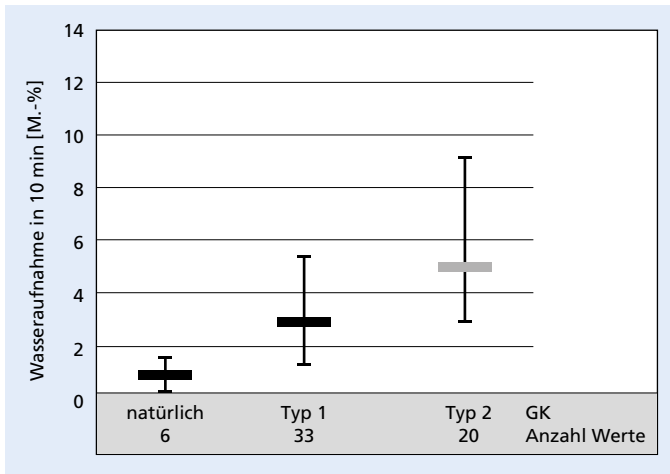


Bild 5: Wasseraufnahme Gesteinskörnungen in zehn Minuten von 59 Lieferkörnungen mit Daten zu WA_{10} aus [4]

Bild 6: Wasseraufnahme Gesteinskörnungen in 24 Stunden von 190 Lieferkörnungen mit Daten zu WA_{24} aus [4]

feuchter Umgebungsluft mehr Wasser durch Kapillarkondensation aufnehmen als rezyklierte Gesteinskörnung des Typs 2. In Kontakt mit flüssigem Wasser sinkt die Sauggeschwindigkeit mit dem Porendurchmesser. Entsprechend kann rezyklierte Gesteinskörnung des Typs 2 aufgrund der höheren Anteile an Mauerwerksbestandteilen mit seinen größeren Poren schneller Wasser auf-

nehmen als rezyklierte Gesteinskörnung des Typs 1.

Da gemäß [8] bei kleinporigen Gefügen der Wasseraufnahmekoeffizient mit zunehmender Anfangsfeuchte abnimmt, wohingegen bei grobporigen Gefügen eine vorhandene Anfangsfeuchtigkeit einen positiven Einfluss auf den Wasseraufnahmekoeffizienten besitzt, ist zu erwarten, dass bei rezyklierten Gesteinskörnungen des Typs 1

variierende Eigenfeuchten zu größeren Streuungen in den wirksamen Wasserzementwerten der damit hergestellten Betone führen, da die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme mit der Eigenfeuchte variiert. Ein vermindertes Wasseraufnahmevermögen infolge von vorhandener Eigenfeuchte könnte für die Betonherstellung ein Risiko bezüglich eines ungewollt höheren wirksamen Wasserzementwerts (als Massenverhältnis zwischen dem außerhalb der Gesteinskörnung für die Reaktion mit dem Bindemittel verbleibenden Wasser und dem Bindemittel) in der Zementsteinmatrix darstellen. Rezyklierte Gesteinskörnungen des Typs 2 sollten hingegen aufgrund der höheren Anteile an größeren Kapillarporen ein unvermindertes Wasseraufnahmevermögen besitzen.

Die Wasseraufnahme von rezyklierten Gesteinskörnungen, ermittelt nach DIN EN 1097-6 [9], ist, verglichen mit natürlichen Gesteinskörnungen, erwartungsgemäß größer. Zu diesem Ergebnis führt die Auswertung von Lieferkörnungen natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnungen aus eigenen Versuchen, sowie aus den Datensätzen von [10], die in den Bildern 5 und 6 dargestellt ist. Es zeigt sich, dass mit zunehmendem Gehalt von Mauerwerksbestandteilen die Wasseraufnahme sowohl nach zehn Minuten als auch nach 24 Stunden steigt. Auch wird deutlich, dass rezyklierte Gesteinskörnungen, die gemäß ihrer stofflichen Zusammensetzung demselben Liefertyp (1 oder 2) entsprechen, deutliche Unterschiede hinsichtlich ihres Wasseraufnahmevermögens aufweisen können. Unter allen ausgewerteten Lieferkörnungen des Typs 1 betrug die geringste Wasseraufnahme innerhalb von 24 Stunden lediglich 1,52 M.-% ihrer Trockenmasse, die höchste Wasseraufnahme 11,5 M.-%.

Die Wasseraufnahme von rezyklierter Gesteinskörnung erfolgt in zwei Phasen. In der ersten, schnellen Phase nimmt der Großteil der untersuchten Körnungen bereits 2/3 des gesamt aufnehmbaren Wassers auf. Ergebnisse in [4] bestätigen, dass rezyklierte Gesteinskörnung des Typs 1 gegenüber rezyklierter Gesteinskörnung des Typs 2 eine verringerte Sauggeschwindigkeit besitzt. Die zweite, langsamere Phase ist nach 24 Stunden praktisch vollständig abgeschlossen.

2 Berücksichtigung der Wasseraufnahme von rezyklierten Gesteinskörnungen bei der Herstellung von R-Beton

Darüber, dass die höhere Wasseraufnahme von rezyklierter Gesteinskörnung in der Mischungsberechnung berücksichtigt und ausgeglichen werden muss, herrscht in der Literatur Konsens. Die Art und Weise wie diese Kompensation und Berücksichtigung durchzuführen ist, stellte jedoch ein bislang nicht abschließend geklärtes Problem dar. Da bis-

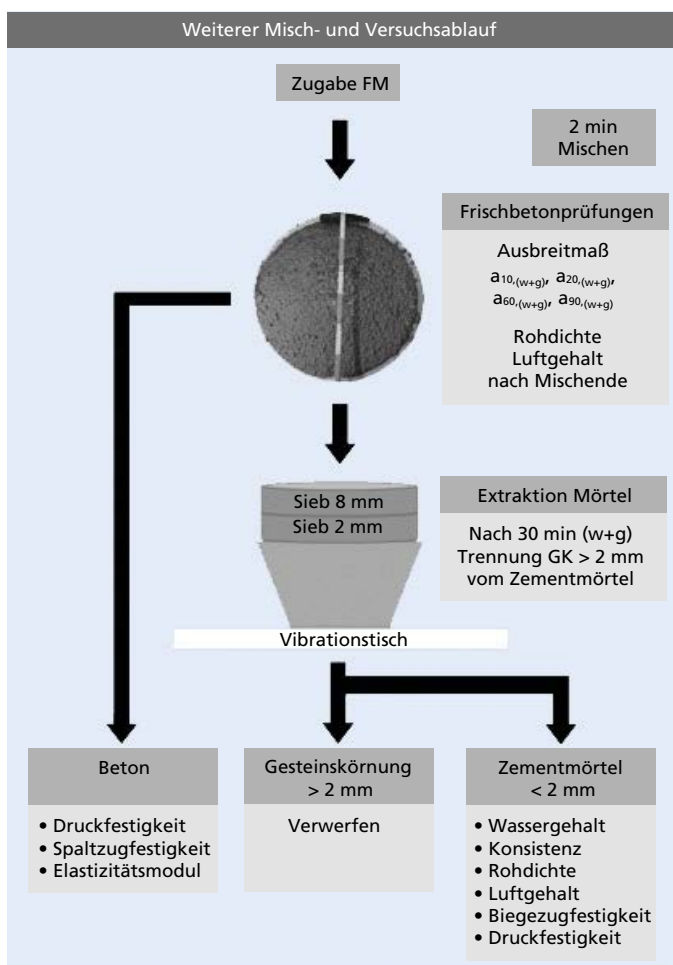


Bild 7: Versuchsablauf zur Ermittlung des wirksamen Wasserzementwerts von R-Beton

lang unter Laborbedingungen keine gesicherte Herstellung von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung mit definiertem wirksamem Wasserzementwert möglich war, bot sich auch für die industrielle Betonherstellung lediglich die Möglichkeit, auf der sicheren Seite liegende bzw. vereinfachende Annahmen zu treffen. Dass es problemlos möglich ist Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung, die die Anforderungen an die vereinbarten Festigkeits- und Konsistenzklassen erfüllen, industriell herzustellen, steht außer Frage. Lediglich der tatsächliche wirksame Wassergehalt, der die entscheidende Stellgröße für eine weitere Qualitätsoptimierung der Betone wäre, konnte bislang nicht zielsicher eingestellt werden und stellte eine große Unbekannte dar.

Wie nachfolgend dargestellt, wurde in Laborversuchen für Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung eine Überprüfung des wirksamen Wassergehalts durchgeführt. Die Versuche ermöglichten einen Vergleich zwischen Betonen mit natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung, da die Zusammensetzung des Zementmörtels und Zementsteins unter den Betonen vergleichbar waren.

Hierzu wurde die in Bild 7 schematisch dargestellte Versuchsanordnung verwendet, mit der es möglich war, den wirksamen Wasserzementwert in Betonen mit saugender Körnung zu bestimmen. Mit diesem Versuchsablauf wurde in Versuchen mit rezyklierten Gesteinskörnungen der erforderliche Gesamtwassergehalt zur Erzielung einer identischen Zementmörtelzusammensetzung wie bei Referenzmischungen aus natürlicher Gesteinskörnung ermittelt. Entgegen der üblichen Vorgehensweise bei der Prüfung von Betonen wurde im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen der zeitliche Nullpunkt zur Beschreibung des Zeitpunkts der Frischbetonuntersuchungen nicht auf den ersten Wasserkontakt des Zementes gelegt, sondern der Nullpunkt entsprach dem jeweils ersten Wasserkontakt der Gesteinskörnung (in Bild 7 mit dem Index (w+g) gekennzeichnet).

Im ersten Schritt wurde zunächst ausschließlich mit vollständig ofentrockneter Gesteinskörnung gearbeitet, um eine bestmögliche Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Im zweiten Schritt wurde dann der Einfluss der Gesteinskörnungsfuchte bei gleichem Gesamtwassergehalt auf den wirksamen Wasserzementwert analysiert.

2.1 Erforderliches Gesamtwasser zur Gewährleistung des vorgesehenen Wasserzementwerts in R-Beton

2.1.1 Mischungszusammensetzung und Prüfungen

In den Untersuchungen wurde ein Portlandhüttenzement CEM II/B-S 42,5 N verwendet. Die Betone enthielten keine Betonzusatzstoffe. Als verflüssigendes Betonzusatzmittel wurde das im Rahmen des BMBF-Verbundforschungsvorhabens „R-Beton“ [11] vom Projektpartner BASF Construction

Tafel 2: Wasseraufnahmen und Kornrohdichten der verwendeten Gesteinskörnungen

	Wasseraufnahme nach DIN EN 1097-6 [M.-%]			Rohdichten [kg/dm³]	
	10 min	60 min	24 h	ρ_{rd}	ρ_{ssd}
Typ 2	3,1	4,0	6,1	2,25	2,42
Betonsplitt	2,2	2,9	3,7	2,39	2,48
Naturkies	1,2	1,0	1,0	2,52	2,58
Natursplitt	0	0,3	0,3	2,59	2,64

Solutions GmbH entwickelte Zusatzmittel SR 1 (Produktname „MasterSuna RCA 2019“) eingesetzt.

Alle Versuche wurden mit der folgenden Gesteinskörnung aus der Produktion des Werks Ludwigshafen der Scherer + Kohl GmbH & Co KG durchgeführt: Lieferkörnung 2/16, rezyklierte Gesteinskörnung des Typs 1 (aus reinem Betonsplitt); rezyklierte Gesteinskörnung des Typs 2 (mit 70 M.-% Betonsplitt und 30 M.-% Ziegel-/Mauerwerksplitt); Naturkies (Rheinkies); Natursplitt (gebrochener Mikrodiorit). Die feine Gesteinskörnung bestand bei allen Mischungen aus Rheinsand 0/2 mm.

- Zementgehalt CEM II/B-S 42,5 N: 350 kg/m³
- Zugabewasser: 182 kg/m³
- Gesteinskörnung:
 - 41 Vol.-% Sand 0/2
 - 36 Vol.-% Gesteinskörnung 2/8
 - 23 Vol.-% Gesteinskörnung 8/16

Die verwendeten Gesteinskörnungen wurden hinsichtlich ihres zeitlichen Wasseraufnahmeverhaltens zunächst umfassend charakterisiert (Tafel 2). Für die Bestimmung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung wurden für alle Gesteinskörnungsvarianten Pyknometerversuche gemäß DIN EN 1097-6 [9] durchgeführt.

Die Mischungen mit gleichem Typ rezyklierter Gesteinskörnung unterschieden sich in der Menge des Zusatzwassers. Die Mischungszusammensetzung ist in Tafel 3 zusammengefasst.

Alle Gesteinskörnungen in der ersten Versuchsreihe wurden im ofentrockenen Zustand verwendet. Bei jeder Betonmischung wurden die Bestandteile Gesteinskörnung, Sand, Zement und Zugabewasser konstant gehalten, um den Gehalt und die Zusammensetzung des Mörtels in der Mischung nicht zu verändern. Lediglich das Zusatzwasser variierte je nach Mischung, um

Tafel 3: Wassergehalte der geprüften Betonvariante

Probenbezeichnung		Zugabewasser [kg/m³]	Anteil des Zusatzwassers am Zugabewasser (ca.-Werte) [%]	Zusatzwasser [kg/m³]	Gesamtwasser im Beton [l/m³]
natürliche Referenz	Kies	182	0	0,00	182,0
	Splitt	182	0	0,00	182,0
rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1	Typ 1 (+10 %)	182	10	17,83	199,8
	Typ 1 (+12 %)	182	12	22,00	204,0
	Typ 1 (+14 %)	182	14	26,17	208,2
	Typ 1 (+17 %)	182	17	30,33	212,3
rezyklierte Gesteinskörnung Typ 2	Typ 2 (+16 %)	182	16	28,67	210,7
	Typ 2 (+18 %)	182	18	32,83	214,8
	Typ 2 (+20 %)	182	20	37,00	219,0
	Typ 2 (+23 %)	182	23	41,17	223,2
	Typ 2 (+25 %)	182	25	45,33	227,3

Tafel 4: Frischmörtel- und Frischbetonergebnisse der Referenzmischungen mit nicht saugender Körnung

Probenbezeichnung	Kies	Splitt
Art der Gesteinskörnung	Kies	Splitt
Zusatzwasser [kg/m ³]	0,00	0,00
Gesamtwasser im Beton [l/m ³]	182,0	182,0
Verdichtungsmaß vor FM	1,21	1,37
Frischbetonrohddichte [kg/m ³]	2350	2340
Setzmaß Mörtel [mm]	240	210
Mörtelrohddichte [kg/m ³]	2171	2203
w/z _{ist} Mörtel	0,53	0,50
w/z _{SOLL}	0,53	0,50

unterschiedliche Wasserzementwerte zu erzielen und jeweils den wirksamen Wasserzementwert zu ermitteln. Tafel 3 gibt einen Überblick über die geprüften Varianten.

Dabei sollten im Ergebnis der Untersuchungen die Ziel-Betonzusammensetzungen gefunden werden, bei denen das Zusatzwasser vollständig durch die rezyklierte Gesteinskörnung aufgenommen wurde und das gesamte Zugabewasser zur Hydratation zur Verfügung steht.

Zur Validierung der gewählten Prüf- und Auswertungsverfahren zur Ermittlung des wirksamen Wasserzementwerts im Zementmörtel wurde eine Überprüfung anhand von Normmörtel vorgenommen. Als zusätzliche Überprüfung wurde der Versuchsablauf an zwei Referenzbetonen aus natürlicher Gesteinskörnung getestet und ausgewertet. Als Referenz bei der Mischungsberechnung diente ein Rheinkies. Anhand dieser Betonzusammensetzung wurde der Versuchsablauf überprüft. Zusätzlich wurde eine weitere Referenzkörnung aus Mikrodiorit verwendet, da rezyklierte Gesteinskörnung

aufgrund des Aufbereitungsprozesses eine gegenüber natürlichem Rundkorn deutlich größere Oberfläche besitzt und deshalb hinsichtlich ihres Wasseranspruchs besser mit gebrochener natürlicher Gesteinskörnung zu vergleichen ist.

Tafel 4 zeigt den Vergleich zwischen dem angestrebten und dem im Versuch ermittelten wirksamen Wasserzementwert. Die Ausgangsmischung wurde für natürlichen Kies und dessen Wasseranspruch erstellt. An dieser Kies-Referenzmischung konnte mit der gewählten Vorgehensweise am extrahierten Zementmörtel der angestrebte wirksame Wasserzementwert von 0,53 auch im Beton (auf zwei Nachkommastellen gerundet) übereinstimmend nachgewiesen werden. Ebenfalls geht aus Tafel 4 hervor, dass auch das für die gebrochene Referenzkörnung ermittelte Ergebnis des wirksamen Wasserzementwerts dem zu erwartenden Wert entspricht. Hier wurde angenommen, dass die gebrochene Körnung 2/16 mm aufgrund der größeren Oberfläche einen um 10 l/m³ erhöhten Wasseranspruch besitzt.

Da der Zementgehalt gegenüber der Mischung mit natürlichem Kies nicht verändert wurde, ergibt sich aus dem erhöhten Wasseranspruch von gebrochenem Korn somit eine Verringerung des wirksamen Wassergehalts. Somit konnte auch für nicht saugende Körnung die gewählte Vorgehensweise validiert werden.

Die an allen Betonen mit natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung ermittelten Wasserzementwerte sind in Bild 8 dargestellt.

Für den Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung des Typs 1

und einer Erhöhung des Gesamtwassers um 12 % der berechneten Zugabewassermenge wurde in den Untersuchungen ein Wasserzementwert von 0,50 ermittelt, was dem Messwert der Referenzmischung mit gebrochener natürlicher Gesteinskörnung entsprach (vgl. Bild 8). Die Erhöhung des Gesamtwassers entsprach bei diesem Beton dem Äquivalent der Wasseraufnahme in zehn Minuten, die für die verwendete rezyklierte Gesteinskörnung im Pyknometerversuch ermittelt wurde. Wenn der Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung des Typs 1 ähnliche Wasserzementwerte erreichen soll wie eine Ausgangsmischung aus runder natürlicher Gesteinskörnung, so ist im vorliegenden Fall mit einer Erhöhung des Gesamtwassers um 17 % ein Wasserzementwert ähnlich der Referenz mit natürlichem Kies erzielt worden.

Für die Mischungen mit rezyklierter Gesteinskörnung des Typs 2 konnte mit der geringsten geprüften Gesamtwasserzugabe, entsprechend einer Erhöhung des Gesamtwassers um 16 % gegenüber dem berechneten Zugabewasser, ein Wasserzementwert ähnlich der Referenzmischung aus natürlichem gebrochenem Korn erreicht werden. Der Wasserzementwert dieser Mischung liegt, wie Bild 8 zeigt, bei 0,51 und damit 0,01 oberhalb der Referenzmischung mit Splitt. Die Erhöhung des Gesamtwassergehalts um 16 % entspricht dabei dem Äquivalent der Wasseraufnahme in zehn Minuten, ermittelt im Pyknometerversuch. Mit einer Erhöhung des Gesamtwassers um 18 % bis 20 % resultierten in den Versuchsreihen Wasserzementwerte, die nahe dem Wasserzementwert eines Referenzsystems aus natürlichem Kies lagen.

Mit dem Äquivalent der Wasseraufnahme nach zehn Minuten im Pyknometerversuch konnten somit sowohl für rezyklierte Gesteinskörnung des Typs 1 als auch des Typs 2 mit ofentrockener Gesteinskörnung wirksame Wasserzementwerte erzielt werden, die der Zementsteinmatrix einer Vergleichsmischung aus natürlichem Splitt entsprachen. Verglichen mit einer Referenzmischung aus natürlichem Kies lieferte diese Wasserdosierung in den untersuchten Varianten stets gesicherte Ergebnisse.

Die Mischungen mit ähnlichem wirksamem Wasserzementwert wie die jeweiligen Referenzbetone wiesen auch in der Druckfestigkeitsprüfung der extrahierten Mörtel vergleichbare Eigenschaften nach 28 Tagen auf. Es kann somit erwartet werden, dass die Zementsteinmatrix vergleichbar zusammengesetzt ist, wenn die Festbetonkennwerte miteinander verglichen werden.

Aus Versuchen zum Einfluss der Betonkonsistenz (ausführliche Darstellung siehe [4]) auf den wirksamen Wasserzementwert zeigte sich zusammenfassend, dass der wirksame Wasserzementwert nicht durch Konsistenzunterschiede, die bei gleicher Wasserdosierung über die Zugabe von Fließmitteln eingestellt werden, verändert wird. Somit ist es für die Praxis möglich eine Betonsorte mit rezyklierter Gesteinskörnung in unter-

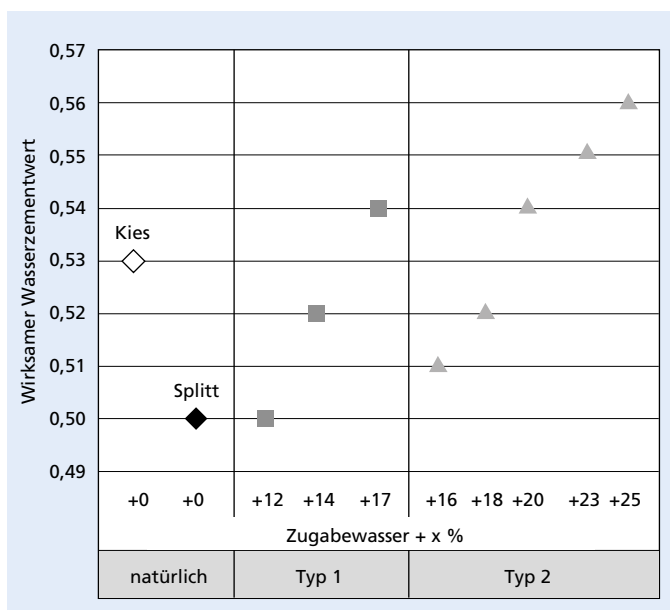


Bild 8: Ermittelte Einzelwerte der wirksamen Wasserzementwerte

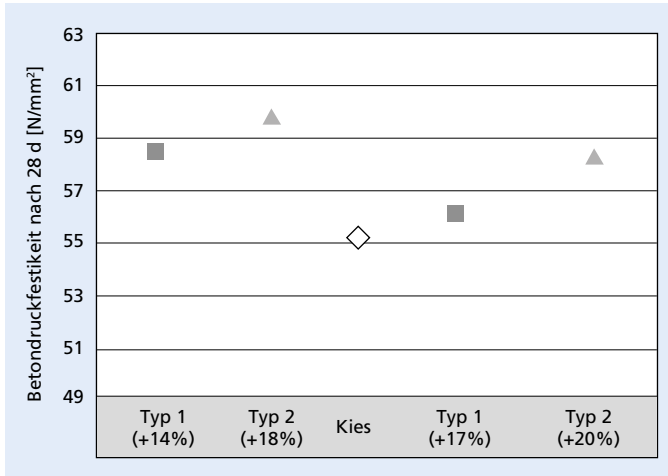


Bild 9: Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen der Vergleichsmischungen wie Kies

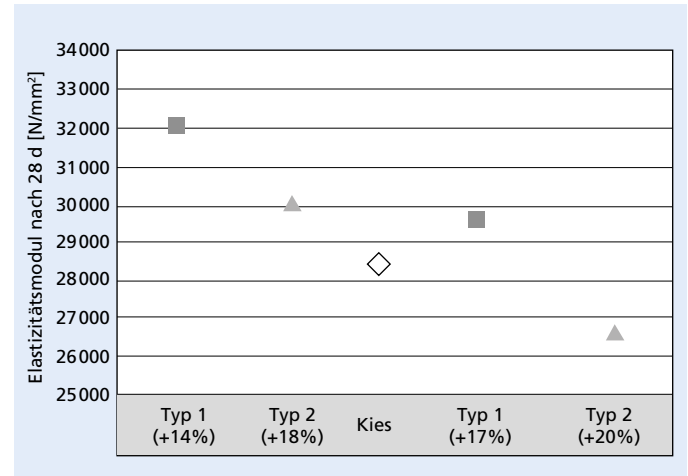


Bild 10: Elastizitätsmodul nach 28 Tagen der Vergleichsmischungen wie Kies

schiedlichen Lieferkonsistenzen anzubieten und herzustellen, ohne die Wasserdosierung aufgrund dieser unterschiedlichen Zielkonsistenzen anpassen zu müssen. Eine Anpassung der Wasserdosierung ist nur aufgrund unterschiedlicher Wasseraufnahmen der rezyklierten Gesteinskörnungen bzw. aufgrund schwankender Eigenfeuchte vorzunehmen.

Auf die Druckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit der Betone mit annähernd gleicher Zementsteinmatrix wirkte sich rezyklierte Gesteinskörnung in den Untersuchungen, unabhängig vom eingesetzten Gesteinskörnungstyp, nicht negativ aus. Verglichen mit gebrochener natürlicher Gesteinskörnung sind die Festigkeitseigenschaften praktisch gleich. Die Druckfestigkeit nach 28 Tagen der Referenzmischung mit natürlichem Splitt lag bei 61,0 N/mm², die der R-Betone mit vergleichbarem wirksamem Wasserzementwert bei 61,6 N/mm² mit rezyklierter Gesteinskörnung des Typs 1 bzw. 58,7 N/mm² mit rezyklierter Gesteinskörnung des Typs 2. Verglichen mit natürlichem Rundkorn sind die Festigkeitskennwerte der R-Betone tendenziell sogar besser (Bild 9).

In den Versuchen zum Elastizitätsmodul war im Vergleich mit dem verwendeten gebrochenen Naturkorn eine leichte Verringerung festzustellen. Der statische Elastizitätsmodul der Referenzmischung mit natürlichem Splitt lag nach 28 Tagen bei 33200 N/mm², die der R-Betone mit vergleichbarem wirksamem Wasserzementwert bei 31400 N/mm² mit rezyklierter Gesteinskörnung des Typs 1 bzw. 32000 N/mm² mit rezyklierter Gesteinskörnung des Typs 2. Beim Vergleich mit Rundkorn war in den untersuchten Gesteinskörnungsvarianten kein negativer Einfluss festzustellen (Bild 10).

Ein Austausch der Gesteinskörnung durch verschiedene Praxislieferungen aus weiteren Produktionschargen aus demselben Aufbereitungswerk führte in drei von vier untersuchten Fällen zu praktisch gleichen Festigkeiten der extrahierten Mörtel und somit zu vergleichbaren Eigen-

schaften in der Zementsteinmatrix. Die Betondruckfestigkeit der Betone wich um maximal ± 6,5 N/mm² von der Druckfestigkeit der Vergleichsmischung mit natürlichem Splitt ab. Bei wechselnder Gesteinskörnungsladung wurden in den Versuchen die Körnungsziffer und Korngrößenverteilung, der Mörtelgehalt sowie der Zementgehalt beibehalten. Die Wasserzugabe wurde bei allen Betonen um das jeweilige Äquivalent der Wasseraufnahme in zehn Minuten, geprüft an ofengetrockneter Gesteinskörnung im Pyknometerversuch nach DIN EN 1097-6 [9], erhöht.

3 Einfluss des Feuchtezustands der rezyklierten Gesteinskörnung auf den wirksamen Wasserzementwert

Um einen Transfer der Laborversuche mit ofengetrockneter Gesteinskörnung in die Praxis der Betonherstellung zu ermöglichen, wurden Untersuchungen mit feuchten rezyklierter Gesteinskörnungen (Bild 11) durchgeführt.

Diese Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Feuchtezustände (Bild 12) auf die Betoneigenschaften zeigten, dass die Ausgangskonsistenz von Betonen, bei denen die Gesteinskörnung im feuchten bis wassergesättigten Zustand eingesetzt wurde, bei gleichem Gesamtwasser aufgrund des um die Gesteinskörnungsfeuchte verringerten Zugabewassers steifer war als bei Verwendung von ofentrockener Gesteinskörnung. Der Konsistenzverlust über die Zeit war jedoch bei den Mischungen mit ofentrocken in den Mischprozess gegebener Gesteinskörnung deutlich stärker ausgeprägt.

Die Unterschiede im Wasserhaushalt zwischen Gesteinskörnung und Zementstein glichen sich im Beton mit der Zeit aus. Bei den Festigkeits-



Bild 11: Rezyklierte Gesteinskörnung des Typs 2 in unterschiedlichen Feuchtezuständen
Quelle: Technische Universität Kaiserslautern

prüfungen am Beton nach 7 und 28 Tagen waren die Unterschiede zwischen den einzelnen Mischungen mit unterschiedlichem Feuchtegehalt der Gesteinskörnung zum Mischzeitpunkt deutlich geringer als am Mörtel, der nach 30 Minuten aus dem Beton extrahiert wurde. Der Ausgleich des Wasserhaushalts und die damit verbundene Unempfindlichkeit gegenüber Feuchteschwankungen war bei rezyklierter Gesteinskörnung des Typs 2 deutlich stärker. Die Betone mit Gesteinskörnung des Typs 2 wiesen nach 28 Tagen ähnliche Festigkeiten auf wie die Referenzmischungen aus natürlicher

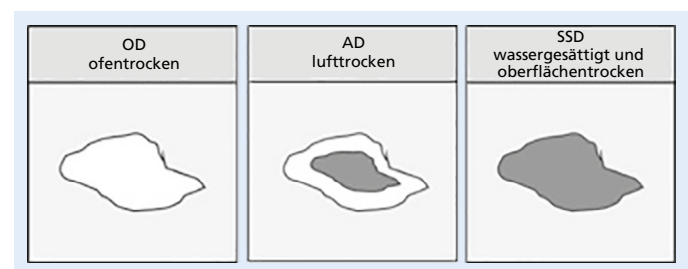


Bild 12: Untersuchte Feuchtezustände bei saugenden Gesteinskörnungen

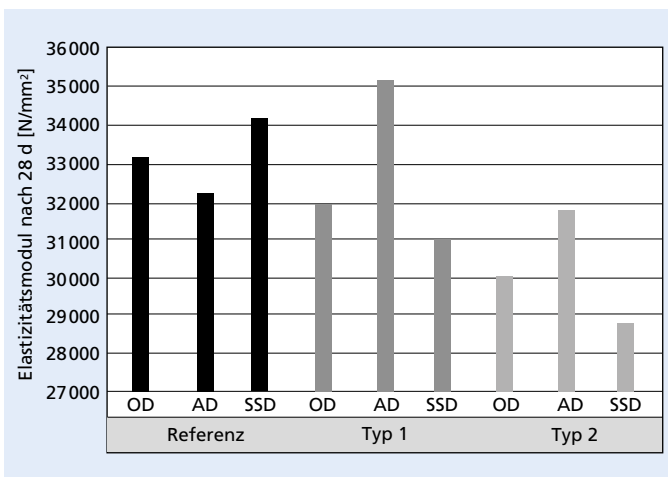


Bild 13: Elastizitätsmodul der Betone nach 28 d in Abhängigkeit vom Feuchtezustand

Gesteinskörnung und es waren praktisch keine Unterschiede in Abhängigkeit vom Feuchtezustand mehr sichtbar. Die lufttrocken eingesetzte Gesteinskörnung lieferte generell die höchsten Druckfestigkeiten unter allen betrachteten Feuchtezuständen. Gleiches galt für die Spaltzugfestigkeit und den Elastizitätsmodul. Aus der Verwendung der rezyklierten Gesteinskörnung im wassergesättigten, aber oberflächentrockenen Zustand resultierten bei den R-Betonen jeweils die geringsten Festbetoneigenschaften. Insbesondere der Elastizitätsmodul war bei diesen Mischungen signifikant verringert (Bild 13).

Die besten Betoneigenschaften konnten erzielt werden, wenn die rezyklierte Gesteinskörnung weder komplett trocken noch vollständig wassergesättigt eingesetzt wurde. Die Untersuchungen zeigten, dass es ausreichend ist, die Eigenfeuchte der Gesteinskörnung zu bestimmen und diese Wassermenge von der in der Erstprüfung ermittelten notwendigen Gesamtwassermenge abzuziehen.

4 Fazit

Die Untersuchungen zeigten, dass die Steuerung der Aufbereitungstechnik für rezyklierte Gesteinskörnungen es ermöglicht, vergleichbare Streuungen in den Eigenschaften bei Lieferungen aus einem Herstellwerk einzuhalten, wie sie auch für natürliche Gesteinskörnungen unvermeidbar sind. Die Zugabewassermenge einer Referenzmischung aus natürlicher Gesteinskörnung sollte um diejenige Menge an Zusatzwasser erhöht werden, die die rezyklierte Gesteinskörnung innerhalb von zehn Minuten im Pyknometerversuch aufnehmen kann. Es ist nicht notwendig, rezyklierte Gesteinskörnung wasserzutröpfen oder vollständig zu trocknen. Maximale Festbetoneigenschaften werden erreicht, wenn die Gesteinskörnung eine Kernfeuchte aufweist, ohne vollständig gesättigt zu sein. Die Eigenfeuchte sollte ermittelt und auf das nötige Gesamtwasser angerechnet werden. Rezyklierte Gesteinskörnungen, unabhängig vom verwendeten zugelassenen Typ, verminderten in den Unter-

suchungen bei gleicher Zusammensetzung der Zementsteinmatrix weder die Druckfestigkeit noch die Spaltzugfestigkeit. Dem Elastizitätsmodul ist bei R-Betonen grundsätzlich besondere Aufmerksamkeit zu widmen, da dieser im Vergleich mit den lokal verwendeten natürlichen Gesteinskörnungen geringer ausfallen kann.

Auf Basis der Ergebnisse wurde eine Handlungsempfehlung zur

Herstellung von R-Beton mit definiertem Wasserzementwert abgeleitet. Diese empfohlene Vorgehensweise zur Charakterisierung von rezyklierten Gesteinskörnungen sowie zur Berücksichtigung von deren Charakteristika in der Mischungsberechnung und Betonherstellung konnte im Rahmen eines Praxistests erfolgreich angewendet werden. In [1] (ebenfalls in dieser Ausgabe von beton abgedruckt) werden die aktuelle Regelwerksituation und die erarbeitete Handlungsempfehlung für die Herstellung von R-Beton vorgestellt sowie von den Erfahrungen mit deren Umsetzung im Praxistest berichtet.

Literatur

- [1] Scheidt, J.; Breit, W.: Herstellung von R-Beton im Transportbetonwerk – Handlungsempfehlung zur zielsicheren Steuerung des Wasserzementwerts. beton 70 (2020) Nr. 4, S. 120–125
- [2] DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierter Gesteinskörnung nach DIN EN 12620“. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin 2010
- [3] Juan, M. S. de; Gutiérrez, P. A.: Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials 23 (2009) No. 2, pp. 872–877
- [4] Scheidt, J.: Ermittlung des erforderlichen Gesamtwassers zur Herstellung von R-Beton mit definiertem Wasserzementwert. Dissertation, Kaiserslautern 2019
- [5] Fremdüberwachung Gesteinskörnungsproduktion nach DIN EN 12620 zwischen 2010 und 2017. Vertrauliche Überwachungsberichte, Materialprüfamt der Technischen Universität Kaiserslautern (MPA Kaiserslautern), Kaiserslautern 2018
- [6] Fremdüberwachung Gesteinskörnungsproduktion nach DIN EN 12620 zwischen 2010 und 2017. Vertrauliche Überwachungsberichte, Baustoffüberwachungsverein Hessen – Rheinland-Pfalz e.V. (BÜV Hessen-RLP), 2018
- [7] Platzek, W.: Auswertung zur Schwankungsbreite der Kornrohdichten in den 54 Steinbrüchen der Basalt-Actien-Gesellschaft 2010–2015. Interne Studie zur Qualitätssicherung, 2018
- [8] Ungricht, H.: Wasserhaushalt und Chlorideintrag in Beton – Einfluss der Exposition und der Betonzusammensetzung. Dissertation, ETH Zürich 2004
- [9] DIN EN 1097-6:2013-09 „Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme“
- [10] Bonzel, J.; Dahms, J.: Über den Wasseranspruch des Frischbetons. Betontechnische Berichte Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf 1978, S. 121–156
- [11] <https://www.r-beton.de/> (abgerufen am 26.02.2020)