

60. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton
28. und 29. Oktober 2019, Hannover

Entwicklungskonzepte für robuste Ökobetone

Jack S. Moffatt und Michael Haist

Institut für Baustoffe, Hannover, Deutschland

KURZFASSUNG:

Beton ist der weltweit meist verwendete Baustoff und eines der meist produzierten Güter überhaupt. Seine Produktion in solch großen Mengen erfolgt jedoch unter erheblichen Eingriffen in die natürliche Umwelt, die sowohl signifikante Beiträge zu den anthropogenen CO₂-Emissionen wie auch regionale Verknappungen der mineralischen Betonausgangsstoffe beinhalten. Ökobetone müssen sowohl eine verbesserte CO₂-Bilanz aufweisen wie auch gegenüber Schwankungen in der Qualität ihrer Ausgangsstoffe robust sein, das heißt die für sie bestimmten Frisch- und Festbetoneigenschaften mit hoher Sicherheit erzielen. Die granulometrischen Eigenschaften der Ausgangsstoffe und die Zusammensetzung der Gesteinskörnungen spielen hierfür eine zentrale Rolle. Dieser Beitrag erläutert Ansätze zur Entwicklung rheologisch robuster Ökobetone.

Keywords: Ökobeton, Nachhaltigkeit, Robustheit, Granulometrie, Gradientenbeton

ABSTRACT:

Concrete is the most used construction material and one of the most produced goods of all. Its production in such large quantities causes great environmental impacts, including significant contributions to anthropogenic CO₂-emissions and a decrease in the regional availability of high quality constituent materials. Green concretes must demonstrate an improved CO₂-balance over their lifecycle and yet also be robust against variations in the quality of their constituent materials, meaning the desired properties of the concretes must be achieved with a high level of certainty. The granulometric properties of the aggregates are central to this challenge. This paper explains development procedures for rheologically robust concrete mixtures.

Keywords: Green concrete, sustainability, robustness, granulometry, graded concrete

1 EINLEITUNG

Dank seiner hervorragenden technischen Eigenschaften, seiner einfachen Herstellungstechnik, der weltweit scheinbar unerschöpflichen Verfügbarkeit seiner Ausgangsstoffe und den daraus resultierenden wirtschaftlichen Vorteilen ist der Werkstoff Beton zu einem der meistproduzierten Güter der Menschheit aufgestiegen (Mehta & Monteiro 2014). Der noch immer starke Nachholbedarf von bevölkerungsreichen Schwellen- und Entwicklungsländern im Bereich der Infrastruktur lässt darüber hinaus ein weiteres starkes Wachstum – bis hin zu einer Vervielfachung – der Betonnachfrage erwarten (Damineli et al. 2017).

Die Herstellung dieser enormen Mengen von Beton hat jedoch Auswirkungen sowohl regional wie auch auf die gesamte Biosphäre (Aïtcin et al. 2011). Regional wird die zukünftige Versorgung dicht besiedelter Regionen mit geeigneten Betonausgangsstoffen zunehmend schwieriger und logistisch anspruchsvoll. Stark urbanisierte Regionen, in denen große Anteile potenzieller Abbauf Flächen bereits bebaut sind, erfahren eine Verknappung der Verfügbarkeit von herkömmlichen Gesteinskörnungen (Habert et al. 2010, Ionnaïdou et al. 2017). Global geraten zunehmend die bei der Herstellung des Bindemittels Zement verursachten CO₂-Emissionen wegen der Klimaschutzproblematik in die Kritik. Die bislang verfolgten Anstrengungen zur Reduktion der Umweltwirkungen und des Ressourcenverbrauchs des Betonbaus lassen sich vereinfacht drei Ansätzen zuordnen: Der erste Ansatz konzentriert sich auf das Bindemittel und besteht einerseits darin, den Zementklinker durch emissionsärmere Ersatz- und Zusatzstoffe möglichst zu ergänzen und zu ersetzen (Mehta & Manmohan 2006, Müller et al. 2005). Ebenfalls werden auch völlig neuartige, umweltfreundliche Bindemittel gesucht, die den Zementklinker als Betonausgangsstoff ablösen könnten (Stemmermann et al. 2010, Schneider et al. 2011, Scrivener et al. 2016). Der zweite Ansatz zielt darauf ab, die Betonzusammensetzung effizienter und nachhaltiger zu gestalten und um weitere Produkte, wie Rezyklate, zu ergänzen (Pellegrino & Faleschini 2016). Der dritte Ansatz betrifft die Entwicklung neuer Bemessungskonzepte für Tragwerke und Bauwerke, in welchen die Nachhaltigkeit als ein Bemessungsziel über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks integriert ist (Glavind 2011, Sakai 2013, Sakai et al. 2016).

Allen bislang vorliegenden Ansätzen ist weitgehend gemein, dass sie den Werkstoff Beton bzw. die zu dessen Herstellung erforderlichen Ausgangsstoffe effizienter nutzen. Dies hat zur Folge, dass die entwickelten Systeme ggf. empfindlicher auf mögliche Schwankungen in den Herstellungs- und Nutzungsbedingungen reagieren. Zielsetzung des vorliegenden Beitrags ist es daher, Konzepte für die Herstellung besonders robuster Ökobetone vorzustellen. Der Begriff Robustheit ist hierbei so zu verstehen, dass der Beton so ausgelegt ist, dass seine definierten Eigenschaften trotz der im Rahmen seiner Herstellung und seines Einbaus angetroffenen Prozessschwankungen mit möglichst großer Sicherheit eingehalten werden können. Diese Eigenschaft wird von den Autoren als Grundvoraussetzung dafür betrachtet, die ökologisch vorteilhafte Wirkung der Nutzung dieser Betone zielsicher auszunutzen.

2 KONZEPTE FÜR DEN MISCHUNGSENTWURF ROBUSTER ÖKOBETONE

2.1 *Statistische Methoden für den Mischungsentwurf*

Das Ziel des Mischungsentwurfs ist es, die Art und das Mischungsverhältnis der Betonausgangsstoffe so zu definieren, dass die gewünschten Eigenschaften zuverlässig erreicht werden. Die Auswahl der Stoffe und ihre Anteile im Beton hängen dabei vom Wissen um ihren kombinierten Einfluss auf die relevanten Betoneigenschaften ab.

Die Robustheit des Betons wird herkömmlich durch eine regeltechnische Festlegung der Streubreiten für Eigenschaften der einzelnen Ausgangsstoffe in Kombination mit deskriptiven Vorgaben für die Mischungszusammensetzung und den Herstellungsprozess sichergestellt. Die Ziele des Mischungsentwurfs haben sich jedoch weit über das Erreichen einer ausreichenden Druckfestigkeit und Wirtschaftlichkeit hinaus erweitert. Die Anzahl der verwendeten Betonausgangsstoffe, ihre chemische Vielfalt, ihre Qualitätsschwankungen und das geforderte Leistungsniveau haben ebenfalls zugenommen. Empirisch basierte Methoden sind daher sehr aufwändig und zu ungenau, um Betone unter diesen Randbedingungen zu optimieren und dabei ihre Robustheit zu gewährleisten. Entsprechend werden hierfür neue Methoden und Ansätze benötigt. Anleihen hierzu können aus der statistischen Mischungsoptimierung von Beton genommen werden.

Scheffé diskutierte die Problematik der Optimierung von Mischungen mit statistischen Methoden auf Grundlage von empirischen Beobachtungen (Scheffé 1958). Gl. 1 beschreibt eine q -komponentige Mischung mit den Komponenten x_i , die jeweils einen Anteil des Volumens oder der Masse der Mischung bilden. Der von den Komponenten gebildete Faktorenraum bildet ein Simplex mit $(q-1)$ Dimensionen, wobei jede Komponente einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen kann (Scheffé 1958). Nach Scheffé kann eine empirische Vorhersage der Antwort einer Mischung (z. B. Konsistenz oder Festigkeit) auf jede beliebige Zusammensetzung der Komponenten durch Anpassung einer polynomischen Funktion n -ten Grades mit q Variablen durch sorgsam angeordnete Beobachtungen entlang des Simplex gemacht werden.

$$x_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, q), \quad \sum_{i=1}^q x_i = 1 \quad (1)$$

Das bestgeeignete Polynom für einen speziellen Anwendungsfall (d. h. eine Gleichung die z. B. den Zusammenhang zwischen der Konsistenz und der Zusammensetzung beschreibt) ist in der Regel unbekannt (Scheffé 1958). Gl. 2 zeigt die allgemeine Form eines Polynoms dritten Grades in q Variablen, welche die Gl. 1 erfüllt und mit der die Antwort η einer Eigenschaft der Mischung (z. B. Konsistenz) abgebildet werden kann (Scheffé 1958). In dieser Gleichung repräsentieren x_i die Mischungsanteile der Komponenten und die Faktoren β_i quantifizieren den Einfluss einer Menge einer Komponente auf die betrachtete Eigenschaft der Mischung. Im Fall von Gl. 2 kann berücksichtigt werden, dass manche Komponenten miteinander interagieren und daher die Antwort des Systems auf die Änderung des Anteils einer Einzelkomponente (siehe Term $\sum_{1 \leq i \leq q} \beta_i x_i$ in Gl. 2) um diese Interaktion mit Interaktionstermen ergänzt werden muss (siehe Term $\sum_{1 \leq i \leq j \leq q} \beta_{ij} x_i x_j$ und Terme höherer Ordnung) (Scheffé 1958).

$$\eta = \sum_{1 \leq i \leq q} \beta_i x_i + \sum_{1 \leq i \leq j \leq q} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq j \leq q} \gamma_i x_i x_j (x_i - x_j) + \sum_{1 \leq i \leq j \leq k \leq q} \beta_{ijk} x_i x_j x_k \quad (2)$$

Ursprünglich betrachtete Scheffé die β_i Faktoren als Konstanten. In Bezug auf den Mischungsentwurf des Frischbetons wäre dies jedoch nicht ausreichend. Nach Ansicht der Autoren ist das komplexe Verhalten der Komponenten, welches zum Beispiel auf die chemische Reaktionskinetik des Zements zurückzuführen ist, nur mittels Modellen mit variablen β_i abbildbar, welche die chemische und physikalische Wechselwirkungen einzelner Komponenten in der Mischung angemessen berücksichtigen können. Auf diese Weise könnten auch Varianzen der Eigenschaften von Ausgangsstoffen und ihr Einfluss auf die Mischung erfasst werden.

Verfahren wie die Methoden nach Scheffé und weitere Methoden, wie die sog. Response Surface Methodology (Myers et al. 2009), sind sehr nützlich um das Verhalten einer bestehenden komplexen Mischung gegenüber Änderungen in ihrer Zusammensetzung zu beschreiben, maßgebende Einflussfaktoren auf ausgewählte Eigenschaften zu identifizieren und Mischungen zu optimieren. Die Mechanismen hinter dem Verhalten müssen jedoch zwingend verstanden werden, um verallgemeinerbare Erkenntnisse hiermit ableiten zu können.

Auf Grundlage der vorherigen Überlegungen kann die Robustheit jedoch bereits als Funktion ausgedrückt werden, siehe Gl. 3. In dieser wird Gl. 2 um die Varianz der Anteile der Komponenten $\vartheta(\eta)$ erweitert und der Einfluss der Streuungen der Eigenschaften der Komponenten in den β -Funktionen berücksichtigt. Hieraus ergibt sich die Robustheit χ der Betonmischung bezüglich einer Eigenschaft η als Kehrwert der maximalen hierin erwarteten Varianz $\vartheta(\eta)$. Dabei wird der Fall der Schwankung der Eigenschaften aller Ausgangsstoffe in ihrer pessimalen Kombination berücksichtigt, sodass $\vartheta(\eta)$ maximal wird.

$$\chi = \frac{1}{\vartheta(\eta)} \quad (3)$$

2.2 Konstitutive Zusammenhänge für die Vorhersage der Frischbetoneigenschaften

Um den Erwartungswert einschließlich der Streubreite der Eigenschaften einer Mischung hervorzusagen, müssen für diese die funktionalen Zusammenhänge vorliegen, welche ihre zugrundeliegenden Mechanismen möglichst genau abbilden. Die Verteilungsfunktion der maßgebenden Parameter muss ebenfalls bekannt sein. Eine Vorhersage der Konsistenz des Frischbetons anhand seiner Zusammensetzung ist auf diesem Wege jedoch schwierig.

In der Literatur liegen vielfältige Modelle zur Vorhersage der Fließeigenschaften von Zementleim (Haist 2010), von Mörteln (Kwan & Li 2012) und von Betonen (de Larrard 1999, Kwan 2014) auf Grundlage der Zusammensetzung und der Eigenschaften der Ausgangsstoffe vor. Statistische Methoden können zudem angewendet werden, um komplexe Betone während des Mischungsentwurfs zu optimieren (Ghafari et al. 2015). Viele dieser Modelle sind jedoch stark empirisch geprägt, unvollständig oder unterliegen bei ihrer Anwendung starken Einschränkungen. Ein umfassendes Modell, welches die Betonkonsistenz zuverlässig vorhersagt, fehlt bislang. Ein Grund hierfür ist, dass die Vielfalt der Interaktionen zwischen den Ausgangsstoffen wie dem Leim und den Gesteinskörnungen und daher die entsprechenden Interaktionsfunktionen bislang nicht ausreichend beleuchtet sind.

Es ist jedoch schon lange bekannt, dass die Frischbetonkonsistenz stark mit der Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen zusammenhängt. Daher kann ein Ansatz zur Beurteilung der Robustheit des Frischbetons auf Grundlage der Abweichung seiner Korngrößenverteilung von einer anvisierten Zielverteilung unter Berücksichtigung der Schwankung der Korngrößenverteilung der granularen Komponenten aufgebaut werden. Als Referenzverteilungen bieten sich die Kurven nach Fuller (Fuller & Thompson 1907) oder nach Andreasen an (Andreasen & Andersen 1930), siehe Gl. 4.

$$P(d)_{\text{erf}} = \left(\frac{d}{d_{\text{max}}} \right)^n \quad (4)$$

In Gl. 4 ist $P(d)_{\text{erf}}$ der beabsichtigte Volumenanteil der Gesteinskörner mit Durchmesser kleiner als der Korndurchmesser d an der granularen Gesamtmischung, d_{max} ist das Größtkorn der Mischung und n ist der Lageparameter der Verteilung (Andreasen & Andersen 1930). Da die Korngrößenverteilung der Mischung nicht mittels eines einzigen Parameters – dessen Streuung mit einem Variationskoeffizienten

abzubilden wäre – beschrieben werden kann, muss die Abweichung einer Korngrößenverteilung von einer Zielgrößenverteilung an jeder Stützstelle der Sieblinie einzeln betrachtet werden.

In den folgenden Untersuchungen wurde dies anhand Zielgrößenverteilungen $P(d)_{\text{erf}}$ umgesetzt (hier: $n = 0,37$ und $d_{\text{max}} = 4 \text{ mm}$; s. Gl. 4). Die Abweichung der Korngrößenverteilung $P(d)_{\text{ist}}$ von der Zielkorngrößenverteilung $P(d)_{\text{erf}}$ wird dabei über die Fehlersumme Δ beschrieben, die in Bild 1 dargestellt ist.

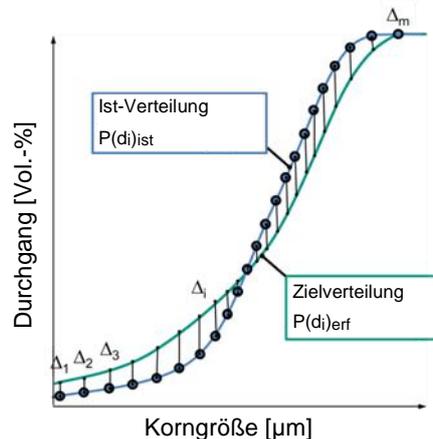


Bild 1: Schema zur Berechnung der Fehlersumme Δ

$$\Delta = \sum_{i=1}^m |P(d_i)_{\text{erf}} - P(d_i)_{\text{ist}}| = |A \mathbf{v} - P(d)_{\text{erf}}| \stackrel{!}{=} \text{Minimum} \quad (5)$$

Der Parameter Δ in Gl.5 hängt stark von der Anzahl der Stützstellen m ab. Um Δ bestimmen zu können, muss die tatsächliche Korngrößenverteilung der Mischung bekannt sein. Diese kann wie in Gl. 6 bestimmt werden.

$$\begin{pmatrix} P(d_1)_{\text{Cem}} & P(d_1)_{\text{ZS}} & P(d_1)_{\text{GK1}} & P(d_1)_{\text{GK2}} & \dots & P(d_1)_{\text{GKS}} \\ P(d_2)_{\text{Cem}} & P(d_2)_{\text{ZS}} & P(d_2)_{\text{GK1}} & P(d_2)_{\text{GK2}} & \dots & P(d_2)_{\text{GKS}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ P(d_m)_{\text{Cem}} & P(d_m)_{\text{ZS}} & P(d_m)_{\text{GK1}} & P(d_m)_{\text{GK2}} & \dots & P(d_m)_{\text{GKS}} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} v_{\text{Cem}} \\ v_{\text{ZS}} \\ v_{\text{GK1}} \\ v_{\text{GK2}} \\ \vdots \\ v_{\text{GKS}} \end{pmatrix} \stackrel{!}{=} \begin{pmatrix} P(d_1)_{\text{ist}} \\ P(d_2)_{\text{ist}} \\ \vdots \\ P(d_m)_{\text{ist}} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} P(d_1)_{\text{Cem}} \times v_{\text{Cem}} + P(d_1)_{\text{ZS}} \times v_{\text{ZS}} + P(d_1)_{\text{GK1}} \times v_{\text{GK1}} + \dots + P(d_1)_{\text{GKS}} \times v_{\text{GKS}} \\ P(d_2)_{\text{Cem}} \times v_{\text{Cem}} + P(d_2)_{\text{ZS}} \times v_{\text{ZS}} + P(d_2)_{\text{GK1}} \times v_{\text{GK1}} + \dots + P(d_2)_{\text{GKS}} \times v_{\text{GKS}} \\ \vdots \\ P(d_m)_{\text{Cem}} \times v_{\text{Cem}} + P(d_m)_{\text{ZS}} \times v_{\text{ZS}} + P(d_m)_{\text{GK1}} \times v_{\text{GK1}} + \dots + P(d_m)_{\text{GKS}} \times v_{\text{GKS}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P(d_1)_{\text{ist}} \\ P(d_2)_{\text{ist}} \\ \vdots \\ P(d_m)_{\text{ist}} \end{pmatrix}$$

Ein Ansatz, um die Robustheit der Konsistenz der Mischung im frischen Zustand zu optimieren besteht darin, den Parameter Δ zu minimieren. Wird die Zielkorngrößenverteilung als A zusammengefasst, lässt sich diese Optimierung auch in Matrixschreibweise ausdrücken, siehe Gl. 6. Anhand dieses Algorithmus ist es dann möglich eine Korngrößenverteilung zu ermitteln, die eine minimale Abweichung von der Zielkorngrößenverteilung aufweist. Nach der Definition von Mindestgehalten an Zement und weiterer Additive zur Gewährleistung der mechanischen Eigenschaften, kann die restliche Zusammensetzung hinsichtlich der Minimierung des Parameters Δ optimiert werden. Das Ergebnis der restlichen Zusammensetzung ist ein definierter Vektor V mit dem zugehörigen Δ -Werten. Diese Vorgehensweise entspricht dem allgemeinen Vorgehen während des Mischungsentwurfs. Sie kann jedoch leicht erweitert werden, um die Robustheit des Betons zu verbessern.

Angenommen die Korngrößenverteilung eines der Ausgangsstoffe unterliegt Schwankungen, so würden sich die Schwankungen dieser Körnung $P(d)_{GK,S}$ auf den Parameter Δ der Mischung auswirken. Sofern das Streuband der Korngrößenverteilung des schwankenden Ausgangsstoffs bekannt ist, kann die restliche Zusammensetzung so angepasst werden, dass der Einfluss der streuenden Körnung auf den Parameter Δ möglichst minimal ist.

Für jede Variation j , d. h. für den Mittelwert, die obere Grenze und die untere Grenze der Korngrößenverteilung eines Ausgangsstoffs (siehe Bild 2), kann eine neue Zusammensetzung $v_{i=j}$ und eine korrespondierende Fehlersumme $\Delta_{i,j=i}$ berechnet werden. Die Mischung $v_{i=j}$ mit der Variation j ergibt somit eine optimierte Mischung mit minimaler Fehlersumme. Im nächsten Schritt wird die Zusammensetzung der Mischung $\Delta_{i,j=i}$ (d. h. die Volumenanteile der einzelnen Fraktionen) konstant gehalten, jedoch mit einer neuen Variation j der streuenden Fraktion kombiniert. Dies resultiert in einer neuen Fehlersumme $\Delta_{i,j}$. Durch Auswertung insgesamt r verschiedener Variationen werden neben der Summe $\Delta_{i,j=i}$ insgesamt $r - 1$ Summen $\Delta_{i,j}$ erhalten. Eine Summation all dieser Fehlersummen und Normierung dieser auf den Gehalt der streuenden Fraktion $v_{GK S_j}$ ergibt den relativen Fehler $\Delta_{i,rel}$ jeder erzeugten Mischung, siehe Gl. 7.

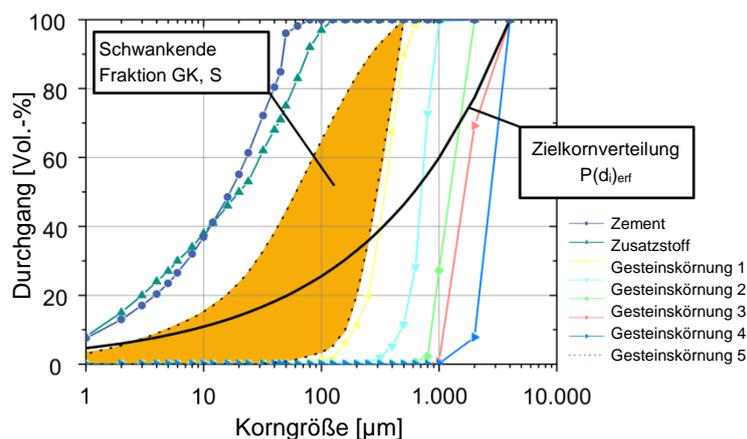


Bild 2: Sieblinien von Gesteinskornfraktionen mit Schwankungsbereich der streuenden Komponente

Durch Ermittlung einer optimierten Mischung $v_{i=j}$ für jede Variation der schwankenden Komponente und durch Ermittlung des relativen Fehlers jeder Variation, kann die robusteste Mischung als diejenige berechnet werden, die den geringsten relativen Fehler $\Delta_{i,rel}$ ergibt. Das Ergebnis dieser Vorgehensweise ist in Tabelle 1 dargestellt.

$$\Delta_{i,rel} = \frac{\sum_{j=1}^r \Delta_{i,j}}{v_{GK S_j}} \quad (7)$$

Das Materialverhalten der schwankenden Mischungen wurde experimentell im Labor anhand der Mischung mit dem geringsten relativen Fehler $\Delta_{i,rel}$ aus Tab. 1 mit fünf Variationen der schwankenden Fraktion untersucht.

Ergebnisse sind in Tab. 2 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass selbst erhebliche Schwankungen der Korngrößenverteilung der schwankenden Fraktion nur geringfügige Schwankungen der Mörtel Eigenschaften des untersuchten Mörtels (ausgedrückt als Variationskoeffizient) erzeugen.

Tabelle 1: Zusammensetzung untersuchter Mischungen

	Schwankende Fraktionen GK S _j für Optimierung (6 Fraktionen)					
	GK S _{j=1}	GK S _{j=2}	GK S _{j=3}	GK S _{j=4}	GK S _{j=5}	GK S _{j=6}
Ausgangsstoffe	Mischung v _{i=j} [Vol.-%], als Ergebnis der Optimierung					
Zement	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
Zusatzstoffe	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Gesteinskörnung 1	0,5	3,2	5,9	5,3	2,9	6,6
Gesteinskörnung 2	13,0	12,3	11,8	11,9	12,2	11,4
Gesteinskörnung 3	4,4	5,2	5,8	5,6	5,3	6,2
Gesteinskörnung 4	18,7	17,9	17,3	17,4	17,7	16,8
Gesteinskörnung 5	18,3	18,5	18,8	18,7	18,6	18,9
Gesteinskörnung S _j	20,1	17,8	15,5	16,0	18,2	15,1
$\Delta_{i,j}$ ermittelt für jede Ausgangsmischung i mit Variation j von Körnung S _j						
$\Delta_{i,j}$	$\Delta_{1,j}$	$\Delta_{2,j}$	$\Delta_{3,j}$	$\Delta_{4,j}$	$\Delta_{5,j}$	$\Delta_{6,j}$
$\Delta_{i,1}$	46,4	47,3	48,2	48,0	47,0	48,2
$\Delta_{i,2}$	47,8	47,5	48,4	48,2	47,6	48,4
$\Delta_{i,3}$	52,2	49,8	49,0	49,2	49,9	49,1
$\Delta_{i,4}$	49,2	47,5	47,4	47,2	47,6	47,4
$\Delta_{i,5}$	48,8	48,5	49,1	49,0	48,2	49,0
$\Delta_{i,6}$	53,9	51,8	50,8	51,0	52,0	50,5
$\sum_{j=1}^6 \Delta_{i,j}$	298,3	292,4	292,9	292,6	292,3	292,6
$\Delta_{i,rel}$	14,8	16,4	18,9	18,3	16,1	19,4
Bemerke: Alle Ausgangsstoffe außer der Körnungen GK S _j wurden vorsichtig homogenisiert und ihre Korngrößenverteilung untersucht und Materialeigenschaften vor der Mischungsoptimierung und -herstellung bestimmt. Die Schwankung in den betroffenen Eigenschaften war daher null. Die Schwankung der Korngrößenverteilung der schwankenden Kornfraktion GK S _j ist in Bild 2 dargestellt.						

Tabelle 2: Ergebnisse untersuchter Mörtel nach Tabelle 1

Materialeigenschaft	Ergebnis (Mittelwert)	Standardabweichung	Variationskoeffizient
Frischbetonrohddichte	2289 kg/m ³	8 kg/m ³	ca. 0 %
Ausbreitmaß mit Schlag	123 mm	2 mm	2 %
Setzfließmaß mit Schlag	212 mm	2 mm	1 %
7-Tage Rohddichte	2422 kg/m ³	15 kg/m ³	1 %
28-Tage Rohddichte	2422 kg/m ³	13 kg/m ³	1 %
7-Tage Biegezugfestigkeit	6.1 MPa	0.1 MPa	2 %
7-Tage Druckfestigkeit	30.7 MPa	0.9 MPa	3 %
28-Tage Biegezugfestigkeit	7.1 MPa	0.2 MPa	3 %
28-Tage Druckfestigkeit	43.3 MPa	1.2 MPa	3 %

3 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ökobetone werden zukünftig mit einem reduzierten Bindemittelgehalt und erhöhten Gehalt an Gesteinskörnungen hergestellt werden. Regional werden leicht abbaubare und qualitativ hochwertige Gesteinskörnungen weniger verfügbar werden und die Qualität verarbeiteter Gesteinskörnungen breiteren Schwankungen unterliegen. Neue Konzepte werden benötigt, um die Robustheit der

Ökobetone unter diesen Bedingungen zu gewährleisten. Auf der Baustoffebene müssen Ansätze entwickelt werden, die es ermöglichen die Sensibilität der Ökobetone gegenüber Schwankungen im Herstellungsprozess zu minimieren. Eine zentrale Rolle nimmt hierbei die Granulometrie der Gesteinskörnung ein. Mit den hier vorgestellten Methoden des Mischungsentwurfs ist es möglich, die Robustheit einer Mischung – ausgedrückt als Variationskoeffizient der betrachteten Eigenschaft – zu quantifizieren. Die Methodik ermöglicht es somit, bereits bei der Mischungsentwicklung die Rezeptur so anzupassen, dass die gewünschten Frisch- und Festbetoneigenschaften möglichst gutmütig auf Schwankungen der Ausgangsstoffe reagieren und eine geringe Streuung aufweisen.

Zentrales Ziel zukünftiger Arbeiten ist es, ein besseres Verständnis des Zusammenhangs zwischen der Granulometrie der festen Ausgangsstoffe und den Frisch- und Festbetoneigenschaften zu gewinnen. Auch die vorliegenden mathematischen Ansätze sind zu verbessern.

LITERATUR

- Aïtcin, P.-C., Mindess, S. (2011): *Sustainability of Concrete*, Spon Press, Oxon.
- Andreasen, A. H. M., Andersen, J. (1930): Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten), *Kolloid-Zeitung* 50, S. 217-228.
- Damineli, B.L., Pileggi, R. G., John, V. M. (2017): Influence of packing and dispersion of particles on the cement content of concretes, *IBRACON Structures and Materials Journal* 10, Heft 5, S. 998-1024.
- De Larrard, F. (1999): *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*, E & FN Spon, London.
- Fuller, W. B., Thompson, S. E. (1907): The laws of proportioning concrete, *Journal of the American Society of Civil Engineers* 59, S. 67-143.
- Ghafari, E., Costa, H., Júlio, E. (2015): Statistical mixture design approach for eco-efficient UHPC, *Cement & Concrete Composites* 55, S. 17-25.
- Glavind, M. (2011): Green concrete structures, *Structural Concrete* 12, Heft 1, S. 23-29.
- Habert, G., Bouzidi, Y., Chen, C., Jullien, A. (2010): Development of a depletion indicator for natural resources used in concrete, *Resources, Conservation and Recycling* 54, S. 364-376.
- Haist, M. (2010): Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, *Karlsruher Reihe Massivbau, Baustofftechnologie, Materialprüfung*, Heft 66, KIT Scientific Publishing.
- Ionnaidou, D., Meylan, G., Sonnemann, G., Habert, G. (2017): Is gravel becoming scarce? Evaluating the local criticality of construction aggregates, *Resources, Conservation & Recycling* 126, S.25-33.
- Kwan, A., Li, L. G. (2012): Combined effects of water film thickness and paste film thickness on rheology of mortar, *Materials and Structures* 45, S. 1359-1374.
- Kwan, A. K., Li, L. G. (2014): Combined effects of water film, paste film and mortar film thicknesses on fresh properties of concrete, *Construction and Building Materials* 50, S. 598-608.
- Mehta, P. K. & Manmohan, D. (2006): Sustainable high-performance concrete structures, The U.S. experience with high-volume fly ash concrete, *Concrete International* 37, Heft 7, S. 37-42.
- Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M. (2014): *Concrete, Microstructure, Properties, and Materials* (Fourth Edition), McGraw-Hill Education, New York.

- Müller, H. S., Guse, U., Schneider, E. (2005): Leistungsfähigkeit von Betonen mit Flugasche, *Beton- und Stahlbetonbau* 100, Heft 8, S. 693-704.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., Anderson-Cook, C. M. (2009): *Response Surface Methodology, Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons, New Jersey
- Pellegrino, C., Faleschini, F. (2016): *Sustainability Improvements in the Concrete Industry, Use of Recycled Materials for Structural Concrete Production*, Springer International Publishing, Switzerland.
- Sakai, K. (2013): Sustainability in fib Model Code 2010 and its future perspective, *Structural Concrete* 14, Heft 4, S. 301-308.
- Sakai, K., Shibata, T., Kasuga, A., Nakamura, H. (2016): Sustainability design of concrete structures, *Structural Concrete* 17, Heft 6, S. 1114-1125.
- Scheffé, H. (1958): Experiments With Mixtures, *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 20, Heft 2, S. 344-360.
- Schneider, M., Romer, M., Tschudin, B. (2011): Sustainable cement production – present and future, *Cement and Concrete Research* 41, S. 642-650.
- Scrivener, K. L., John, V. M., Gartner, E. M. (2016): *Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂, cement-based materials industry*. United Nations Environmental Program (Hrsg.).
- Stemmermann, P., Schweike, U., Garbev, K., Beuchle, G., Möller, H. (2010): Celitement – a sustainable prospect for the cement industry, *Cement International* 8, Heft 5, S. 52-66.