Konzept zur Betonherstellung

Hybrider Intensiv-Konus-Mischer mit integriertem Rheometer für Hochleistungsbeton

Dieser Beitrag stellt ein neues umfassendes Konzept zur Betonherstellung vor. Auf Grundlage der im Folgenden aufgezeigten Zusammenhänge zwischen Mischungsentwurf, Mischtechnik und der zu erfassenden rheologischen Eigenschaften des Betons im Mischer lässt sich eine zielgerichtete Produktion maßgeschneiderter Betone unter Berücksichtigung ökologischer wie ökonomischer Aspekte sicherstellen. Mit Hilfe der Software Bétonlab Pro konnten Anhaltswerte für den Mischungsentwurf hinsichtlich Fließgrenze und Viskosität des Frischbetons berechnet werden. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Mischregime auf die Fließgrenze, die Viskosität und die Thixotropie konnten durch die zusätzliche Verwendung des Mischers als Rotations-Rheometer bzw. den Einsatz des Mischers für Oszillationsmessungen bewertet werden. Auf Basis der gemessenen rheologischen Kennwerte können so das Mischregime und der Mischungsentwurf mit der Software optimiert werden. Die modifizierte LCPC Box ermöglicht als „Low-Cost-Rheometer" neben der Messung der Fließgrenze auch Aussagen zur Viskosität des Frischbetons.

Harald Garrecht, Christian Baumert und Andreas Karden, Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt, Deutschland

Problemstellung

Das Anforderungsprofil an einen modernen Beton umfasst neben den klassischen Festbetoneigenschaften zunehmend Aspekte der Dauerhaftigkeit und der Ressourcenschonung. Als betontechnologische Maßnahme wird der Zementklinkeranteil reduziert. Neben der Teilsubstitution von Zement durch Ersatzstoffe wird zudem die Packungsdichte durch Fein(st)stoffe erhöht und der w/b-Wert verringert. Der Einsatz von Hochleistungsfließmitteln ist zwingend, da nur so eine verarbeitungsfähige Konsistenz, bis hin zur Selbstverdichtung, erreicht werden kann.

Der gegenüber Normalbetonen deutlich veränderte Mischungsentwurf von Sonderbetonen bedingt erheblich verlängerte Mischzeiten und einen höheren Verbrauch an elektrischer Energie [1, 2]. Die eigentliche Herausforderung besteht hierbei nach [3] in der Herabsetzung der Viskosität des Betons, damit eine Verarbeitung in der Praxis möglich wird. Die rheologischen Eigenschaften des Betons sind dabei auch von der eingesetzten Mischtechnik und dem Mischregime [4] abhängig und werden nach Mischende – im Regelfall außerhalb des Mischers – in Frischbetonversuchen an Teilmengen des Mischgutes bestimmt. Trotz der bekannten Wechselwirkungen untereinander, erfolgt häufig immer noch eine isolierte Betrachtung von Mischungsentwurf und Mischtechnik sowie eine nur unzureichende rheologische Charakterisierung des Frischbetons durch Frischbetonversuche.

Stand der Technik

Mischtechnik

In der Praxis wird der Mischvorgang nach der sogenannten Stabilisationszeit beendet. Dabei nähert sich nach [5] die Energieaufnahme der Antriebsmotoren asymptotisch einem Minimum an. Die dabei erzielten Frischbetoneigenschaften sind abhängig von der Bauart und Baugröße des Mischers und dem Mischregime. Große Mischer [3] und solche mit höheren Werkzeuggeschwindigkeiten [1] ermöglichen niedrigere Werte für die Fließgrenze und insbesondere für die Viskosität der darin hergestellten Betone. Die höhere Werkzeuggeschwindigkeit verkürzt die Mischdauer durch die schnellere Homogenisierung der Ausgangsstoffe und bewirkt den besseren Aufschluss der Agglomerate. Obwohl die elektrische Antriebsleistung des Mischwerkzeugs durch die Drehzahlanhebung deutlich erhöht werden muss, wird der Energiebedarf zur Herstellung der Charge durch kürzere Mischzeiten reduziert [1]. Betone mit Fließmittelzusatz, die in einem zweistufigen Verfahren hergestellt werden, erreichen 8-17 % höhere Druckfestigkeiten [6]. Dabei wird zunächst der Mörtel – bestehend aus Sand, Zement, Wasser und Fließmittel – in einem Suspen-

Tabelle 1: Untersuchte Mischregime der Versuchsserien 1 bis 8 und ausgewählte Frischbeton- sowie Festbetonergebnisse

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5	Versuch 6	Versuch 7	Versuch 8
Mischenergie kWh/m³	8,75	5,25	3,45	5,25	5,25	3,45	3,45	2
Fließmittel kg/m³	6	6	6	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Zugabe 40 % FM bei kWh/m³	5,55	1,85	1,4	1,65	3,25	1,75	1,15	1
Stufe I	Beton 100 UPM	Mörtel 600 UPM	Mörtel 600 UPM	Mörtel 1000 UPM	Beton 250 UPM	Beton 250 UPM	Mörtel 1000 UPM	Leim 1000 UPM
bis kWh/m³	-	3,7	2,1	3,7	-	-	2,3	
Stufe II	-	Beton 150 UPM	Beton 150 UPM	Beton 150 UPM	-	-	Beton 150 UPM	Beton extern
plastische Viskosität ICAR [Pa s]	163	86,6	150	181	316	471	210	348
LCPC T_{700} [s]	29	25	34	29	43	51	37	43
LCPC Ausbreitmaß [cm]	115 (13,8 Pa)	107 (17,2 Pa)	104 (18,4 Pa)	111,5 (15,4 Pa)	111 (15,6 Pa)	110 (16 Pa)	106 (17,6 Pa)	105 (18 Pa)
$f_{cm,cube\ 100,\ 1d}$ [N/mm²]	15,8	5,1	3,5	11,6	14,2	12,3	10,4	13,5

sions-Mischer hergestellt und im Anschluss in einem zweiten konventionellen Mischer mit der groben Gesteinskörnung vermengt. In [2] konnten das Setzfließmaß und die Konsistenzhaltung eines SVB durch einen zweistufigen Mischprozess unter Einsatz eines Suspensionsmischers deutlich gesteigert werden.

Rheologische Messungen im Mischer

In der Praxis hat sich bei Betonen der üblichen Konsistenzklassen die Strom- oder Leistungsaufnahme der Antriebsmotoren zur Bewertung der Konsistenz als geeignet erwiesen. Zudem können die einzelnen Mischphasen und somit auch das Mischende aus dem Verlauf der Leistungsaufnahme über die Mischdauer abgeleitet werden [7]. Nach [8] ist dieses Vorgehen für die rheologische Bewertung von SVB ungeeignet. Alternativ wird bei diesem Verfahren in der letzten Mischphase die Drehzahl mit einem Frequenzumrichter in 5 Stufen abgesenkt. Die Wertepaare Drehzahl/Drehmoment in den einzelnen Stufen werden mittels linearer Regression zur Berechnung der relativen Bingham-Parameter genutzt und daraus das Setzfließmaß abgeleitet. Der von Skako Concrete vertriebene Viscoprobe™ misst den Bewegungswiderstand einer in Beton eingetauchten Stahlkugel, die über einen Stab an einem Drehmoment-Sensor befestigt ist. Um die relativen Bingham-Parameter berechnen zu können, sind zwei Wertepaare (Geschwindigkeit und zugehöriges Drehmoment) erforderlich. Die Datenerfassung und Auswertung erfolgt in Echtzeit parallel zum Mischvorgang und führt deshalb nicht zu verlängerten Mischzeiten.

Vorgehensweise

Unter Verwendung kostengünstiger Ausgangsstoffe mit niedrigem Treibhauspotenzial wurde mit der Software Bétonlab Pro die Rezeptur für einen Beton der Festigkeitsklasse C60/75 mit exzellenter Dauerhaftigkeit entwickelt. Die Herstellung des Betons erfolgte ein- und zweistufig in einem modifizierten Konus-Mischer. Während im einstufigen Verfahren nach Vorlage aller Trockenstoffe Wasser zugegeben wurde, erfolgte im zweistufigen Verfahren innerhalb ein und desselben Mischers zunächst die Herstellung des Mörtels oder Leims, dem die Zugabe der Gesteinskörnung folgte. Bei beiden Verfahren wurden die von den Mischer-Antrieben aufgenommene elektrische Energie, die Werkzeuggeschwindigkeit und der Zeitpunkt der FM-Zugabe variiert, siehe Tabelle 1.

Die Erfassung der rheologischen Kennwerte erfolgte mit dem Mischwerkzeug, einem Beton-Rheometer und der modifizierten LCPC Box.

Das mit sehr geringer Geschwindigkeit rotierende oder oszillierende Mischwerkzeug des Konus-Mischers erlaubt die Bewertung der kompletten Charge hinsichtlich ihrer Fließgrenze, Viskosität und Thixotropie. Die Auswirkungen eines geänderten Mischregimes auf die Rheologie werden damit erkennbar und können in einem integralen Prozess durch Anpassung der Rezeptur mit der Software Bétonlab Pro zielgerichtet auf die jeweilige Anwendung hin optimiert werden. Da das Mischwerkzeug über keine definierten Scherbedingungen hinsichtlich Scherfläche und Scherspalt verfügt, haben die ermittelten Werte einen relativen Charakter. Zur Kalibrierung des Mischwerkzeuges infolge Abnutzung und zur Bestimmung der Fließgrenze und der Viskosität wurde die LCPC Box für hochviskose Betone modifiziert.

Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht studierte Bauingenieurwesen an der Universität Karlsruhe. 1992 promovierte er an der Universität Karlsruhe, wo er im Anschluss auch als Oberingenieur tätig war. Von 1998-2006 katte er eine Professur an der Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft in den Lehrgebieten Baustoffkunde, Bauphysik und Baukonstruktion inne. Seit 2006 ist er Professor an der Technischen Universität Darmstadt und Vertreter des Fachgebietes Werkstoffe im Bauwesen am Institut für Massivbau, Lehrgebiete Werkstoffe, Bauphysik und Bauwerkserhaltung.
garrecht@massivbau.tu-darmstadt.de

Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. (FH) Christian Baumert studierte zunächst Bauingenieurwesen an der Fachhochschule Münster. Nach einer zweijährigen Tätigkeit in der Bauplanung studierte er an der TU Braunschweig Bauingenieurwesen mit konstruktiver Vertiefung. Seit 2007 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen an der Technischen Universität Darmstadt im Bereich der Technologieentwicklung für Betonanwendungen tätig.
baumert@massivbau.tu-darmstadt.de

Dipl.-Ing. (FH) Andreas Karden MBA BEng studierte zunächst Bauingenieurwesen an der Hochschule Karlsruhe und Civil Engineering an der University of Ulster. Anschließend arbeitete er in einem Prüfingenieurbüro für Baustatik. In einem Aufbaustudium an der Hochschule Karlsruhe erwarb er den Abschluss MBA und ist seit 2010 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen an der Technischen Universität Darmstadt im Bereich der Technologieentwicklung für Betonanwendungen tätig.
karden@massivbau.tu-darmstadt.de

- Faserdosiermaschinen für Kunststoff-, Glas- und Naturfasern
- Dosiermaschinen für Pulver, Compact-Pigmente und Granulate (auch in Sonderlösungen mit Fahrwaage)
- Labor- und Kleinmengenmischer EASYMIX
- Flüssigkeitswaagen

KI • MI • DO
KINDLER MISCHTECHNIK DOSIERTECHNIK

KI • MI • DO
Kindler GmbH | Siemensstraße 11
D-72160 Horb a.N. | Deutschland
T +49 7451 1022 | F +49 7451 6622
info@kimido.com | www.kimido.com

Tabelle 2: Verwendete HVFA-Rezeptur

	HVFA kg/m³
CEM I 52,5 N HS/NA	180
Flugasche KM/C	309
FM Sika 20 HE	4.5 - 6
Wasser	112
Sand 0/2	640
Kies 2/8	746
Kies 8/16	391

Tabelle 3: Mit Bétonlab Pro berechnete Stabilisationszeiten für unterschiedliche Mischungszusammensetzungen

	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5	Fall 6
CEM I 52,5 N HS/NA	x	x	x	x	x	x
Flugasche KM/C	x	x	x	x	x	-
FM Sika 20 HE	x	x	x	x	x	x
Wasser	x	x	x	x	x	x
Sand 0/2	x	x	50%	-	-	x
Kies 2/8	x	-	-	x	-	x
Kies 8/16	x	-	-	-	x	-
Stabilisationszeit [s]	210	166	143	122	178	235

Mischungsentwurf

Der Betonentwurf basiert auf dem Konzept von [9] und wird im angelsächsischen Raum als High-Volume Fly Ash (HVFA) Concrete bezeichnet. Am Institut für Werkstoffe im Bauwesen der TU Darmstadt wurden neben dem in Tabelle 2 beschriebenen Beton mit 16 mm Größtkorn auch hochfeste Feinkornbetone und hochfeste Leichtbetone entwickelt, die durch eine sehr geringe Schwindneigung gekennzeichnet sind.

Obwohl aufgrund des hohen Anteils an Puzzolanen die Verwendung von Zement mit hohem wirksamen Alkaligehalt sinnvoll erscheint, wurden zwei Zemente mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt eingesetzt. Deren niedriger Wasser- und Fließmittelanspruch machten im Zusammenwirken mit geeigneten Hochleistungsfließmitteln eine weitere Absenkung des w/b-Wertes möglich. Damit werden Festigkeitsklassen bis C60/75 und deutliche höhere Frühfestigkeiten möglich. Infolge ausgeprägter Nacherhärtung können nach 90 Tagen zielsicher Würfeldruckfestigkeiten über 120 N/mm² erreicht werden. Die Betonkonsistenz kann, entgegen der Auslegung des Fließmittels auf maximale Verflüssigung bei kurzer Wirksamkeitsdauer, über mehrere Stunden aufrecht erhalten werden.

Bétonlab Pro

Die am Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) entwickelte Software zur Mischungsentwicklung ermöglicht die Berechnung der Stabilisationszeit. Eine geringe relative Feststoffkonzentration geht dabei mit einer kurzen Stabilisationszeit einher [5]. Um im Vorfeld erkennen zu können, welche Dosier-Reihenfolgen der einzelnen Ausgangsstoffe sinnvoll sind, wurden Berechnungen mit Bétonlab Pro durchgeführt. In Tabelle 3 sind die Stabilisationszeiten für die vollständige HVFA-Rezeptur und für Mischungen ohne einzelne Ausgangsstoffe angegeben. In dem zweistufigen Verfahren (Fall 2) wird durch eine deutlich höhere Werkzeuggeschwindigkeit in der ersten Phase der Mörtel hergestellt und die Stabilisationszeit weiter verkürzt. Eine Verlängerung der Mischzeit gegenüber dem klassischen Vorgehen (Fall 1) ist folglich nicht zu erwarten.

Kniele Konus-Mischer

Die Anforderungen aus der Mischtechnik umfassen einen drehzahlvariablen Antrieb mit deutlich höherer Drehzahl und Antriebsleistung sowie Veränderungen am Mischwerkzeug. Während die Anforderung aus der Mischtechnik auch mit einem Frequenzumrichter einfachster Bauart umgesetzt werden können, verlangt die rheologische Auswertung nach maximaler Leistungsfähigkeit des Umrichters. Dieser Forderung wird das Regelverfahren Direct-Torque-Control gerecht, da es den Motor aus dem Stillstand heraus kontrolliert beschleunigen kann und den Betrieb bei niedrigsten Drehzahlen ermöglicht. Ein weiterer Vorzug besteht in der Möglichkeit des drehmomentgeführten Betriebs, wie dieser bei rheologischen Messungen üblich ist [10]. Durch den Rückgriff auf die Daten des Umrichters entfallen zudem zusätzliche Bauteile wie Drehmoment-Sensoren im bzw. unmittelbar am Mischer. Um auf eine Untersetzung und die damit einhergehenden Nachteile verzichten zu können und um eine hohe Drehzahlgenauigkeit zu erzielen, wurde ein High-Torque Permanent-Magnet-Synchron-Motor (siehe Abbildung 1) verbaut, der das innere Mischwerkzeug direkt antreibt. Die damit erreichte Steifigkeit des Antriebsstranges ermöglicht oszillierende Messungen im Mischer. Oszillationsmessungen ermöglichen neben der Bestimmung der Fließgrenze und Viskosität Aussagen zur Struktur eines Materials.

Abbildung 1: Konus-Mischer (Kniele) mit Dosiereinrichtungen für Labornutzung

Fließkurve und statische Fließgrenze im Mischer

Zur Bestimmung der Fließkurve wird der Beton für 10 Sekunden vorgeschert. Dann rotiert das Mischwerkzeug in 9 Stufen mit Drehzahlen von 21.8 UPM bis 1.7 UPM für jeweils 4 Sekunden. Für die Auswertung werden die Daten aus der Vorscherphase und die aus der jeweils ersten Sekunde einer Stufe nicht berücksichtigt. Während der einzelnen Messphasen mit vorgegebenen konstanten Drehzahlen werden die tatsächliche Drehzahl und das zugehörigen Drehmoment im 100ms-Intervall gemessen, siehe Abbildung 2. Aus den Messwerten wiederum werden für die einzelnen Geschwindigkeitsstufen Wertepaare gemittelt und ausgegeben. Die Berechnung der relativen Fließgrenze und der relativen plastischen Viskosität erfolgt in der speicherprogrammierbaren Steuerung des Mischers nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Zur Bestimmung der relativen statischen Fließgrenze wird das Drehmoment kontinuierlich gesteigert, bis das Mischwerkzeug zu rotieren beginnt.

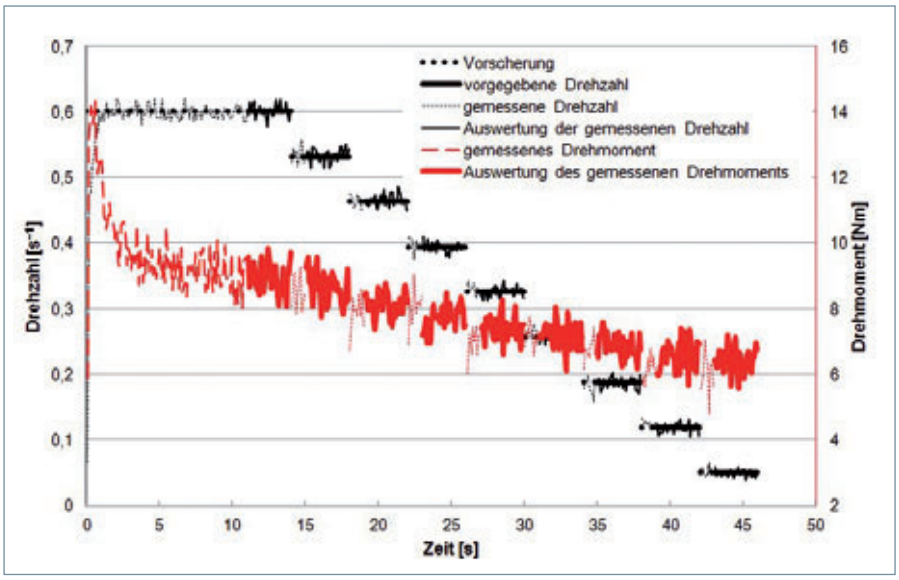

Abbildung 2: Messprofil und ermittelte Werte zur Bestimmung der Fließkurve im Konus-Mischer

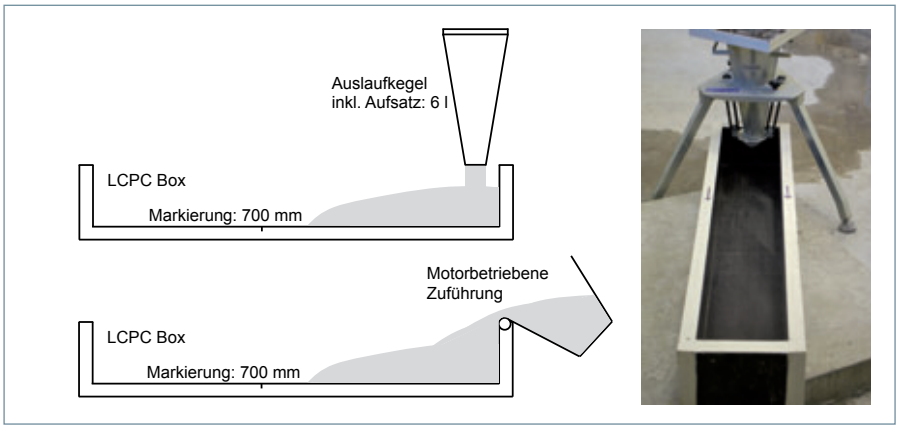

Abbildung 3: LCPC Box mit Auslaufkegel inkl. Aufsatz (oben) und mit einer motorbetriebenen Zuführung (unten)

LCPC Box in Kombination mit dem Auslaufkegel

Um den ungestörten Fließvorgang eines homogenen Materials annehmen zu können, ist eine Probenhöhe von mindestens dem 5-fachen Größtkorndurchmesser der Probe am äußeren Rand erforderlich [11]. Unter Beibehaltung einer handhabbaren Probemenge wurde deshalb als Alternative zum Setzfließmaß die LCPC Box entwickelt. Diese besteht aus einer 120 cm langen, 20 cm breiten und 15 cm hohen Schalung, in die 6 l Beton an einem Ende eingefüllt werden. Das langsame, händische Einfüllen der Betonprobe in die LCPC Box ist ein schwer reproduzierbarer Vorgang und ermöglicht deshalb keine Aussagen zur Viskosität. Um sowohl Messwerte zur tatsächlichen Fließgrenze und zur Viskosität zu bekommen, wurde das LCPC Box-Verfahren im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen entsprechend Abbildung 3 modifiziert. Hier erfolgt die Befüllung an einem Ende der LCPC Box reproduzierbar mit dem Auslaufkegel. Die Zeit zwischen dem Öffnen des Auslaufkegel-Verschlusses und dem Überfließen der 700 mm-Markierung in der Box durch den Beton wird zur Bewertung der Viskosität herangezogen (T_{700}-Zeit in [s]).

Ergebnisse

Fließkurve und statische Fließgrenze im Mischer

Abbildung 4 belegt die sehr gute Übereinstimmung der mit dem ICAR Rheometer und dem Konus-Mischer gemessenen Fließkurven. Der Messkörper des Rheometers wurde dazu mit einem Adapter an der Mischwelle befestigt. Die Messung des Rheometers fand in einem Konus mit den Abmessungen des Konus-Mischers statt (Abbildung 5).

Abbildung 6 zeigt die gute Korrelation zwischen der mit dem Rheometer bestimmten plastischen Viskosität und dem Motordreh-

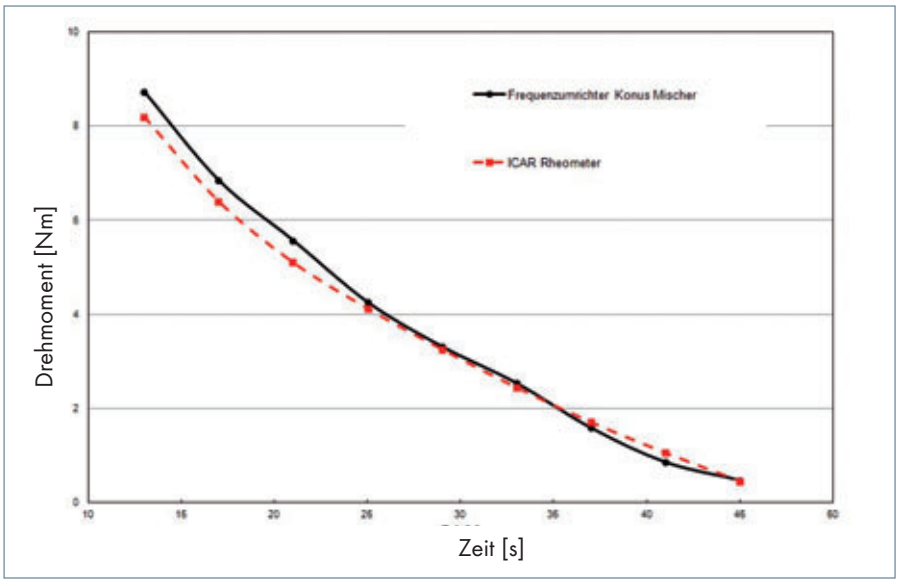

Abbildung 4: Fließkurven, gemessen mit Konus-Mischer und ICAR-Rheometer

Abbildung 5: Adapter für Flügeldrehkörper im Mischer (links) und ICAR-Rheometer in einem nachgebildeten Konus mit identischen Abmessungen wie im Konus-Mischer (rechts)

moment des Mischers bei 11 Umdrehungen des Mischwerkzeugs pro Minute für verschiedene Mischregime. Die zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Mischer gemessenen relativen statischen Fließgrenzen (Tabelle 4) ermöglichen die Bewertung des Strukturaufbaus des Frischbetons in Abhängigkeit vom Mischregime.

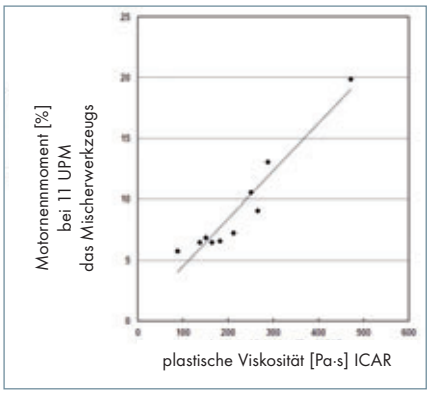

Abbildung 6: Gegenüberstellung des Motordrehmoments und der mit dem ICAR Rheometer ermittelten plastischen Viskosität

Amplitudensweep im Mischer

Unter Vorgabe des Drehmoments wird dieses – unter Beibehaltung der Frequenz – kontinuierlich gesteigert. Die im Amplitudentest ermittelten Messergebnisse ermöglichen eine von der Belastung abhängige Charakterisierung des viskoelastischen Materialverhaltens. Werden der elastische Anteil REL' und der viskose REL'' wie im nachfolgenden Diagramm dargestellt, lassen sich Aussagen zum Strukturcharakter machen. Solange REL' und REL'' konstant bleiben, ist die Prüfung zerstörungsfrei, da die Struktur nicht irreversibel gestört wird (linear-viskoelastischer Bereich). Der Grenzwert des Drehmoments $M_{y,relativ}$ (yield point), der zur Überschreitung des linear-viskosen Bereiches führt, wird als Nachgebgrenze bezeichnet. REL' und somit der elastische Anteil dominiert weiterhin über den viskosen Anteil REL''. Erst am Schnittpunkt von REL' mit REL'' findet ein Wechsel hin zum Flüssigkeits-Charakter statt, siehe Abbildung 7. Dieser Punkt legt die in der Rheologie von Beton übliche Fließgrenze $M_{f,relativ}$ (flow point) fest. Die Werte von M_y und M_f weichen nach [10] signifikant voneinander ab und können die zugehörige Scherrate um mehr als den Faktor 10 beeinflussen.

Schlussfolgerung / Ausblick

Zweistufige Mischregime bewirken bei geringerem Mischenergieeinsatz die deutliche Verringerung der Viskosität des Frischbetons, siehe Tabelle 1. Auch bei zweistufigen Verfahren führte die verzögerte Zugabe von 40 % des Fließmittels zu besseren Ergebnissen, als bei vollständiger Zugabe zu Mischbeginn. Zwar ist die Fließgrenze gegenüber einstufigen Verfahren leicht erhöht, allerdings geht dies mit einer reduzierten Entmischungsneigung einher. In Versuch 8 wurde mit einer Mischer-Charge der Leim für drei einzelne Beton-Chargen mit hoher Werkzeuggeschwindigkeit hergestellt. Im Anschluss wurde – um einen Fahr-

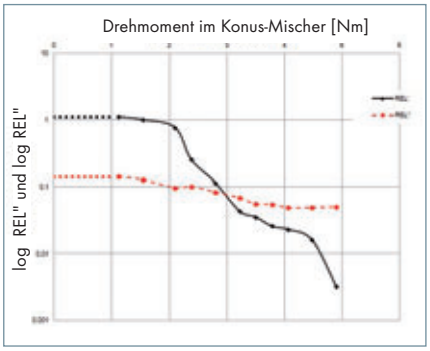

Abbildung 7: Ermittelte REL'- und REL''-Kurven bei dem Amplitudentest im Konus-Mischer

Tabelle 4: Gemessene Motordrehmomente zu unterschiedlichen Zeitpunkten

	Versuch 4	Versuch 5	Versuch 6	Versuch 7
	[Motornennmoment in %]			
Mischende	1,45	1,98	6,41	1,48
30 min nach Mischende	4,63	11,78	28,61	6,35
30 min nach Mischende und nach einer Vorscherzeit von 30 Sekunden	1,78	1,69	4,1	1,38

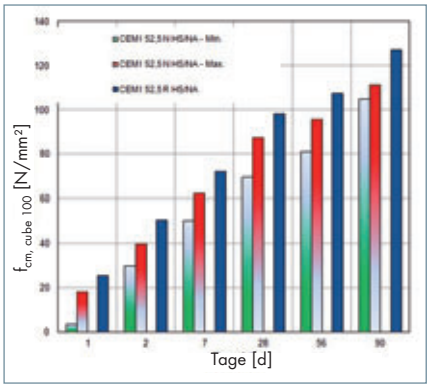

Abbildung 8: Festigkeitsentwicklung unterschiedlicher Zemente; für CEM I 52,5 N HS/NA sind für verschiedene Mischregime die unteren und oberen Mittelwerte angegeben.

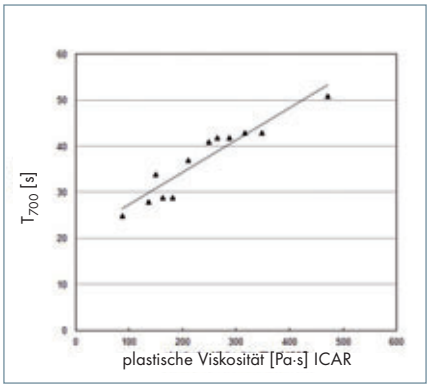

Abbildung 9: Gegenüberstellung der T_{700} Zeit und der plastischen Viskosität

mischer zu simulieren – der Leim in einem Einwellen-Mischer bei 2 UPM für 20 min mit der Gesteinskörnung vermengt. Obwohl für die Herstellung des Leims nur 38 % der Mischenergie von Versuch 5 eingesetzt wurden, lagen die Frischbetonkennwerte auf einem Niveau. Werden Fahrmischer mit eingebauter Konsistenzkontrolle und -steuerung eingesetzt, besteht die Möglichkeit den Ausstoß deutlich zur erhöhen und den Energieverbrauch zu senken.
Da das Erstarrungsende bei einem zweistufig hergestellten Beton infolge besserer Konsistenzhaltung später erreicht wird, reduziert sich die Frühfestigkeit. Durch die Verringerung der Fließmittelmenge kann dies kompensiert werden. Ausschlaggebend für die Festigkeitsentwicklung ist gemäß Abbildung 8 jedoch die Festlegung auf einen Zement.

Die rheologischen Eigenschaften werden sowohl durch den Konus-Mischer als auch mit der modifizierten LCPC Box reproduzierbar erkannt, siehe Abbildung 9, und ermöglichen die weitere Optimierung der Mischung mit Bétonlab Pro. Durch die oszillierenden Messungen kann der Beton zudem umfangreicher charakterisiert werden.

Literatur

[1] Baumert, Ch.: Rheologische Mischprozessführung (Arbeitstitel). Dissertation in Vorbereitung, TU Darmstadt, 2012

[2] Baumert, Ch.; Garrecht, H.: Mischen von Hochleistungsbetonen, in: Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010), S. 371-378

[3] Wallewik, O.H.; Wallewik, J.E.: Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes, in: Cement and Concrete Research 41 (2011), S. 1279-1288

[4] Chang, P.-K.; Peng, Y.-N.: Influence of mixing techniques on properties of high performance concrete, in: Cement and Concrete Research 31 (2001), S. 87-95

[5] Chopin, D.; Larrad, F. de; Cazacliu, B.: Why do HPC and SCC require a longer mixing time?, in: Cement and Concrete Research 34 (2004), S. 2237-2243

[6] Rejeb, S. K.: Improving compressive strength of con-crete by a two-step mixing method, in: Cement and Concrete Research 26 (1996), S. 585-592

[7] Cazacliu, B.; Roquet, N.: Concrete mixing kinetics by means of power measurement, in: Cement and Concrete Research 39 (2009), S. 182-194

[8] Nordenswan, E.; Käppi, A.: A new online method of measuring the workability of self-compacting concrete, in: Proc. 5th RILEM Symposium on SCC, Ghent 2007

[9] Malhotra, V.M.; Mehta, P.K.: High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete for Building Sustainable and Durable Structures, 3. Auflage, Ottawa (Canada): Supplementary cementing Materials for Sustainable Development Inc., 2008

[10] Mezger, Th. G.: Das Rheologie Handbuch, 3. Auflage, Hannover: Vincentz Network, 2010

[11] Roussel, N.: The LCPC Box: a cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC, in: Materials and Structures 40 (2007), S. 889-896

WEITERE INFORMATIONEN

Technische Universität Darmstadt
Werkstoffe im Bauwesen
Petersenstraße 12
T +49 6151 16 6247
F + 49 6151 16 5344
www.wib-tud.de

KNIELE Baumaschinen GmbH

Kniele Baumaschinen GmbH
Gemeindebeunden 6
88422 Bad Buchau, Deutschland
T +49 7582 93030 · F +49 7582 930330
info@kniele.de · www.kniele.de

Ihr Partner für:

- Konusmischer KKM
- Labormischer
- Intensivmischer mit 1 oder 2 mech. Wirblern
- Doppelwellenmischer
- Gegenstrommischer
- Mischer für Fließestrich
- stationäre und mobile Mischanlagen
- Waagen für Zement, Wasser, Zuschlagstoffe und Zusatzmittel
- Aufzüge (Kippkübel oder Bodenentleerung)
- Silos für Zement und Zuschlagstoffe
- Förder- und Beschickungsanlagen
- Zubehör

KNIELE Mischtechnik

Gemeindebeunden 6 · D-88422 Bad Buchau
Tel: +49(0)7582-93030 · Fax: +49(0)7582-930330
info@kniele.de · www.kniele.de