

The mix design of a durable, self-compacting concrete that is optimized using the software BétonLab Pro results in longer mixing times, which can be reduced significantly by applying multi-stage mixing processes in a high-performance cone mixer. In addition, the rheological characteristics of the concrete can be determined in the mixer for quality control purposes.

Die mit der Software BétonLab Pro optimierte Mischungszusammensetzung eines nachhaltigen selbstverdichtenden Betons führt zu verlängerten Mischzeiten, die durch mehrstufige Mischregime in einem Konus-Intensiv-Mischer erheblich reduziert werden können. Zudem können die rheologischen Eigenschaften des Betons im Mischer zur Qualitätssicherung bestimmt werden.

Three-stage concept for the development, production and quality control of SCC 3-Stufen-Konzept zur Entwicklung, Herstellung und Qualitätssicherung von SVB

TEXT: Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht, Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. (FH) Christian Baumert, Dipl.-Ing. (FH) Andreas Karden, Universität Stuttgart,

When developing new concrete mix designs, the durability of the concrete and the amount of primary energy consumed in the production process are becoming increasingly important over and above the traditional design requirements. In this setting, the outcome of the life cycle assessment is determined by the Portland cement clinker and plasticizer content in the mix. This inevitably leads to the requirement of reducing the amount of Portland cement whilst adding only a minor amount of plasticizer. In addition, a reduction in the water-binder ratio (which further reduces the paste content) is necessary in order to meet the durability specifications. Fillers need to be used because state-of-the-art concretes are associated with ever-increasing flow requirements, including self-compacting properties. Available options include fly ash and silica, which are currently considered waste materials, or limestone dust whose processing consumes only a low amount of energy. Like UHPC, such concretes with a reduced amount of binder form part of the category of high-performance materials that require quality control [1].

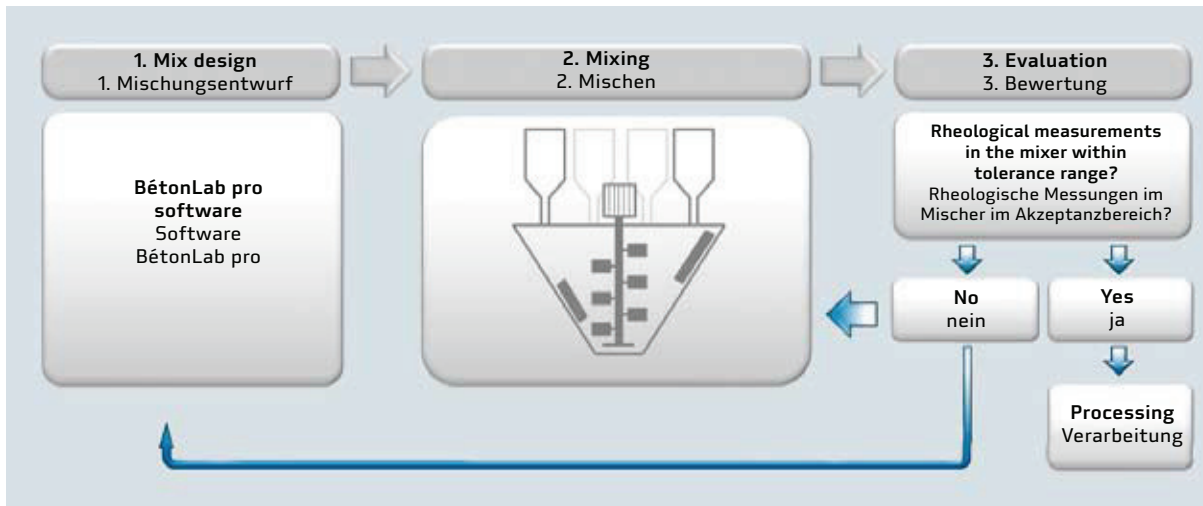
Implications of the mix composition for the mixing process

The mixing process can be divided into the individual steps of fine and coarse mixing. In the latter step, the mixing tool shifts larger particle clusters in relation to each other. According to [2], this process is slowed down considerably by a low water content, which results in longer mixing times. During fine mixing, however, a low water content facilitates the rearrangement of particles as a result of collision in the presence of a

Bei der Entwicklung neuer Betonrezepturen sind neben den klassischen Auslegungsanforderungen zunehmend die Dauerhaftigkeit des Betons und der Primärenergiebedarf für dessen Herstellung bedeutsam. Dabei bestimmen die Gehalte an Portlandzementklinker und an Fließmittel in der Mischungszusammensetzung das Ergebnis der Ökobilanzierung. Daraus ergibt sich zwangsläufig die Forderung nach einer Absenkung der Menge an Portlandzement bei geringem Fließmitteleinsatz. Um die Vorgaben hinsichtlich der Dauerhaftigkeit zu erfüllen, ist zudem eine Absenkung des Wasser-Bindemittelwertes unabdingbar, die zu einer weiteren Verringerung der Leimenge führt. Da für moderne Betone die Anforderungen an die Fließfähigkeit bis hin zur Selbstverdichtung steigen, müssen Füller eingesetzt werden. Dafür kommen u.a. Flugasche und Silika in Betracht, die gegenwärtig als Abfallstoffe bewertet werden, oder Kalksteinmehl, bei dem die Aufbereitung wenig energieintensiv ist. Derartige bindemittelreduzierte Betone zählen wie UHPC zur Kategorie der Hochleistungswerkstoffe, die einer Qualitätssicherung bedürfen [1].

Auswirkungen der Mischungszusammensetzung auf das Mischen

Der Mischvorgang kann in die Einzelvorgänge Fein- und Grobvermischung unterteilt werden. Bei der Grobvermischung werden größere Partikel-Kollektive durch das Mischwerkzeug relativ zueinander verschoben. Nach [2] wird dieser Vorgang durch einen geringen Wassergehalt stark verlangsamt und somit die Mischzeit verlängert. Bei der Feinvermischung hingegen begünstigt ein geringer Wassergehalt bei hoher Packungsdichte den Platz-



1
Integrated three-stage concept for the development, production and quality control of high-performance concretes

Integriertes 3-Stufen-Konzept zur Entwicklung, Herstellung und Qualitätssicherung von Hochleistungsbetonen

high packing density. If the mix includes a high amount of fines, the increased number of particles, and thus the greater number of required location changes, also results in longer mixing times. Particle agglomerations have an influence on the formation of the microstructure and deteriorate the rheological performance of the fresh concrete. The process of deagglomeration requires a minimum collision intensity that is not achieved by standard mixers.

Measures to reduce mixing time:

In mixers with horizontal tools, mixing times can be reduced by elevating the tool speed whilst disproportionately increasing the drive output. However, the tool speed required for extensive deagglomeration is not reached, and the wear on mixing tools and inner liners increases. In mixers with vertical tools, an increase in the tool speed would lead to segregation of the mix. For this reason, mixers are equipped with so-called vortexes in order to increase mixing intensity. These parts move a subset of the mix at a higher tool speed. The use of a high-intensity mixer makes it possible to adjust the mixing pattern to the composition of the mix. In such a system, a relatively small mixing tool is operated at variable speeds and used mainly for fine mixing and deagglomeration. Depending on the design of the mixer, coarse mixing and the feed of the material to be mixed to the smaller tool are ensured via a rotatable mixing vessel or a so-called „edge-to-edge“ scraper located in the mixing vessel. Mixing systems need to be separated when using a suspension mixer, which introduces the mixing energy to material sizes smaller than 1 mm in a targeted fashion at very high tool speeds, and achieves a very high mixing quality. The disadvantage of such a system lies in the fact that a second mixer is required to mix in the coarse constituents.

Determining rheological characteristics in the mixer:

The power consumption of the mixer drive is analyzed to determine the end of the mixing process of vibrated concretes. If this power consumption shows an asymptotic approximation to a final value, the mixing process is terminated because the rheological characteristics of the fresh concrete would only change marginally if the

wechsel der Partikel infolge Kollision. Verfügt die Mischung über einen hohen Gehalt an Feinstoffen, führt die höhere Anzahl an Partikeln und damit die auch erhöhte Anzahl an erforderlichen Platzwechseln ebenfalls zu einer längeren Mischdauer. Partikelagglomerate beeinflussen die Ausbildung des Mikrogefüges und verschlechtern die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons. Für die Desagglomeration ist eine Mindestintensität der Kollisionsvorgänge erforderlich, die von Standard-Mischern nicht erreicht wird.

Maßnahmen zur Verringerung der Mischdauer:

Bei Mischern mit horizontalen Mischwerkzeugen kann die Mischdauer durch Anhebung der Werkzeuggeschwindigkeit bei überproportionaler Steigerung der Antriebsleistung verkürzt werden. Allerdings wird die für eine weitreichende Desagglomeration erforderliche Werkzeuggeschwindigkeit nicht erreicht und der Verschleiß der Mischwerkzeuge und der Mischerauskleidung erhöht. Bei Mischern mit vertikalem Mischwerkzeug würde eine Erhöhung der Werkzeuggeschwindigkeit zur Entmischung des Mischgutes führen. Zur Steigerung der Mischintensität werden deshalb sogenannte Wirbler verbaut, die eine Teilmenge des Mischgutes mit erhöhter Werkzeuggeschwindigkeit bewegen. Durch den Einsatz eines Intensiv-Mischers kann das Mischregime an das Mischgut angepasst werden. Dabei wird ein kleineres Mischwerkzeug mit variabler Drehzahl betrieben und vornehmlich zur Feinvermischung und Desagglomeration eingesetzt. Abhängig von der Bauart erfolgt die Grobvermischung und die Zuführung des Mischgutes an das kleinere Mischwerkzeug durch einen drehbaren Mischbehälter oder einen sogenannten randgängigen Abstreifer im Mischbehälter. Eine anlagentechnische Trennung wird durch den Einsatz eines Suspensions-Mischers erforderlich, der die Mischenergie bei sehr hohen Werkzeuggeschwindigkeiten gezielt in die Ausgangsstoffe kleiner 1 mm einbringt und eine sehr hohe Mischgüte erreicht. Nachteilig ist das Erfordernis eines zweiten Mischers zur Untermischung der groben Bestandteile.

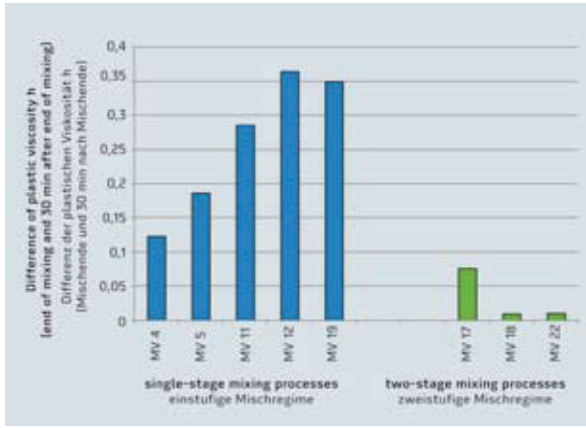
Bestimmung rheologischer Eigenschaften im Mischer:

Zur Bestimmung des Misch-Endes von Rüttelbetonen wird die Leistungsaufnahme des Mischerantriebs ausgewertet.

2

Change in plastic viscosity within the first 30 minutes after the end of the mixing period for five single-stage and three two-stage mixing processes in a high-intensity cone mixer

Veränderung der plastischen Viskosität innerhalb der ersten 30 Minuten nach Mischende für fünf einstufige und drei zweistufige Mischregime in einem Konus-Intensiv-Mischer



mixing process were continued. In addition, the power consumption at the end of mixing correlates with the consistency of the fresh concrete and thus enables a rheological characterization of the fresh concrete in the mixer. This method is unsuitable for concretes with self-compacting properties according to [3]. For this reason, the rheological characteristics of a self-compacting concrete are determined using alternative processes, such as those developed by Consolis or Viscoprobe, at several tool speeds or shear rates. The speed/torque value pairs are used in the Bingham model for determining the rheological parameters g (yield value) and h (plastic viscosity) in relative units applying linear regression, and to derive concrete slump. The yield value is thus not a measured value but a parameter extrapolated from the Bingham model.

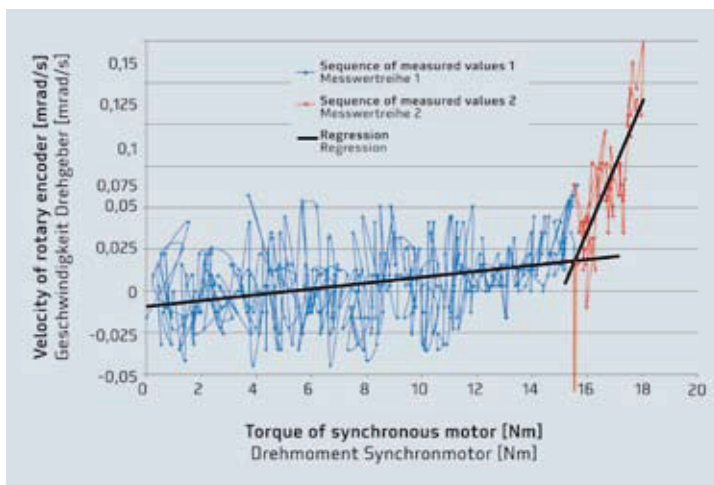
Integrated three-stage concept for the development, production and quality control of a high-volume fly-ash concrete

Concretes with a reduced binder ratio and optimized rheological characteristics can be produced with a significantly reduced amount of mixing energy by merging mix design, production and quality control. The

Nähert sich diese asymptotisch einem Endwert, wird der Mischvorgang beendet, da sich die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons durch die Fortführung des Mischvorgangs nur noch marginal verändern lassen. Zudem korreliert die Leistungsaufnahme bei Mischende mit der Konsistenz des Frischbetons und ermöglicht so eine rheologische Bewertung des Frischbetons im Mischer. Bei Betonen mit selbstverdichtenden Eigenschaften ist dieses Verfahren nach [3] ungeeignet. Die rheologischen Eigenschaften eines selbstverdichtenden Betons werden deshalb bei alternativen Verfahren wie dem von Consolis oder Viscoprobe bei mehreren Werkzeug- bzw. Schergeschwindigkeiten bestimmt. Durch die Wertepaare Drehzahl/Drehmoment werden nach dem Bingham-Modell mittels linearer Regression die rheologischen Parameter g (Fließgrenze) und h (plastische Viskosität) in relativen Einheiten bestimmt und daraus das Setzfließmaß abgeleitet. Bei der Fließgrenze handelt es sich dabei nicht um einen Messwert, sondern um einen über das Bingham-Modell extrapolierten Wert.

Integriertes 3-Stufen-Konzept zur Entwicklung, Herstellung und Qualitätssicherung am Beispiel eines High Volume Fly-Ash Concrete

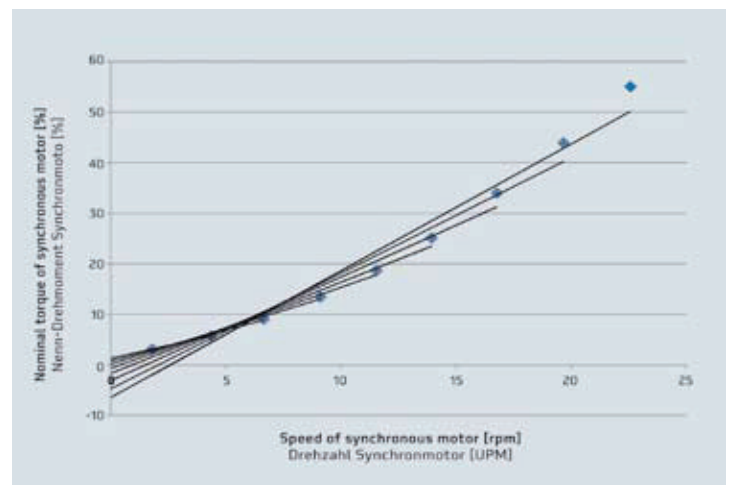
Durch die Zusammenführung von Mischungsentwurf, Herstellung und Qualitätssicherung können bindemittelreduzierte Betone mit optimierten rheologischen Eigenschaften bei deutlich reduziertem Mischenergiebedarf hergestellt werden. Die Bestimmung von Fließgrenze und Viskosität im Mischer als Messwerte ermöglicht zudem, jede Einzelcharge zu bewerten und bei Abweichungen durch die automatisierte Nachdosierung von Betonzusatzmitteln gezielt in die Rheologie einzugreifen. Nachfolgend wird das 3-Stufenkonzept (Abb. 1) beispielhaft an einem sogenannten High-Volume Fly Ash-Beton erläutert. Dieser klinkerarme Beton mit kostengünstigen Ausgangsstoffen verfügt über eine exzellente Dauerhaftigkeit bei Druckfestigkeiten bis 130 N/mm².



3

Torque-controlled measurement of the yield value [Nm] in the high-intensity cone mixer

Drehmomentgeregelte Bestimmung der Fließgrenze als Messwert in [Nm] im Konus-Intensiv-Mischer



4

Diagram showing the nine pairs of speed/torque values measured in the high-intensity cone mixer. Yield value and plastic viscosity vary depending on the number of value pairs considered in the Bingham model

Darstellung der neun Wertepaare Drehzahl/Drehmoment, die im Konus-Intensiv-Mischer ermittelt wurden. Abhängig von der Anzahl der im Bingham-Modell berücksichtigten Wertepaare variieren die Fließgrenze und die plastische Viskosität

		High-Volume Fly Ash (Beton)	High-Volume Fly Ash (Mörtel)
CEM I 52.5 N HS/NA	kg/m ³	180	180
Fly ash Baumineral KM/C Flugasche Baumineral KM/C	kg/m ³	309	309
Plasticizer Sika 20 HE FM Sika 20 HE	kg/m ³	4,5	4,5
Water Wasser	kg/m ³	113	113
Sand 0-2 Sand 0/2	kg/m ³	577	577
Mineral aggregate 2-8 Gesteinskörnung 2/8	kg/m ³	245	-
Mineral aggregate 8-16 Gesteinskörnung 8/16	kg/m ³	955	-
Mixing times calculated by BétonLab Pro Mischdauer BétonLab Pro	s	210	166

Tab. 1

Composition of the HVFA concrete and HVFA mortar mixes and mixing times calculated using BétonLab Pro

Mischungszusammensetzung des HVFA-Betons und des HVFA-Mörtels sowie die mit BétonLab Pro berechneten Mischzeiten

measurement of yield value and viscosity in the mixer also enables an evaluation of each individual batch. In the event of deviations, the rheological characteristics of the mix can be accurately adjusted by automatically feeding minute amounts of concrete additives. The following section of this article outlines the three-stage concept (Fig. 1) for a high-volume fly-ash concrete. This low-clinker concrete consists of relatively low-priced raw materials and provides an excellent durability at compressive strengths of up to 130 N/mm².

Designing the mix using BétonLab Pro:

The BétonLab Pro software is based on the Compressible Packing Model according to de Larrard [4] and uses the following parameters for its mathematical/physical method of packing density optimization:

- » the grading curves of the individual raw materials,
- » their mineralogical composition,
- » water and plasticizer demand,
- » and the compactibility of the coarse raw materials.

After determining the raw materials, the mix design can be optimized with respect to its compressive strength, durability or rheological characteristics. It is crucial that rheological parameters such as yield value and plastic viscosity are forecast as rheological characteristics both in absolute units and as a slump parameter. This method makes it possible to evaluate the basic suitability of the mix design for achieving predefined fresh and hardened concrete properties in a computer-based exercise. In addition, the software is capable of calculating the expected mixing time on the basis

Mischungsentwicklung mit BétonLab Pro:

Die Software BétonLab Pro basiert auf dem Compressible Packing Model nach de Larrard [4] und nutzt als mathematisch-physikalisches Packungsdichte-Optimierungsverfahren u. a.:

- » die Sieblinie der einzelnen Ausgangsstoffe
- » deren mineralogische Zusammensetzung
- » den Wasser- und Fließmittelanpruch
- » und die Verdichtungsneigung der groben Ausgangsstoffe

Unter Vorgabe der Ausgangsstoffe kann die Mischungszusammensetzung dann z. B. auf die Druckfestigkeit, die Dauerhaftigkeit oder auf die rheologischen Eigenschaften optimiert werden. Von großer Bedeutung ist, dass die rheologischen Eigenschaften als Fließgrenze und als plastische Viskosität in absoluten Einheiten und als Ausbreitmaß prognostiziert werden. Damit kann bereits am PC die grundsätzliche Eignung des Mischungsentwurfes zur Erzielung vorgegebener Frisch- und Festbetoneigenschaften bewertet werden. Die Software kann zudem über die relative Feststoffkonzentration die zu erwartende Mischdauer berechnen. Die relative Feststoffkonzentration ergibt sich dabei aus dem Verhältnis von aktuellem Feststoffgehalt pro Volumeneinheit zur maximalen Feststoffkonzentration unter definierter Verdichtung.

Mehrstufige Herstellung in einem Intensiv-Konus-Mischer

Die mit BétonLab Pro berechnete Mischzeit für einen Beton mit sehr hohem Flugaschegehalt (High Volume Fly Ash Concrete) beträgt 210 Sekunden (Tabelle 1). Durch die mehrstufige Herstellung des Betons in einem Intensiv-Konus-Mischer können die Vorteile



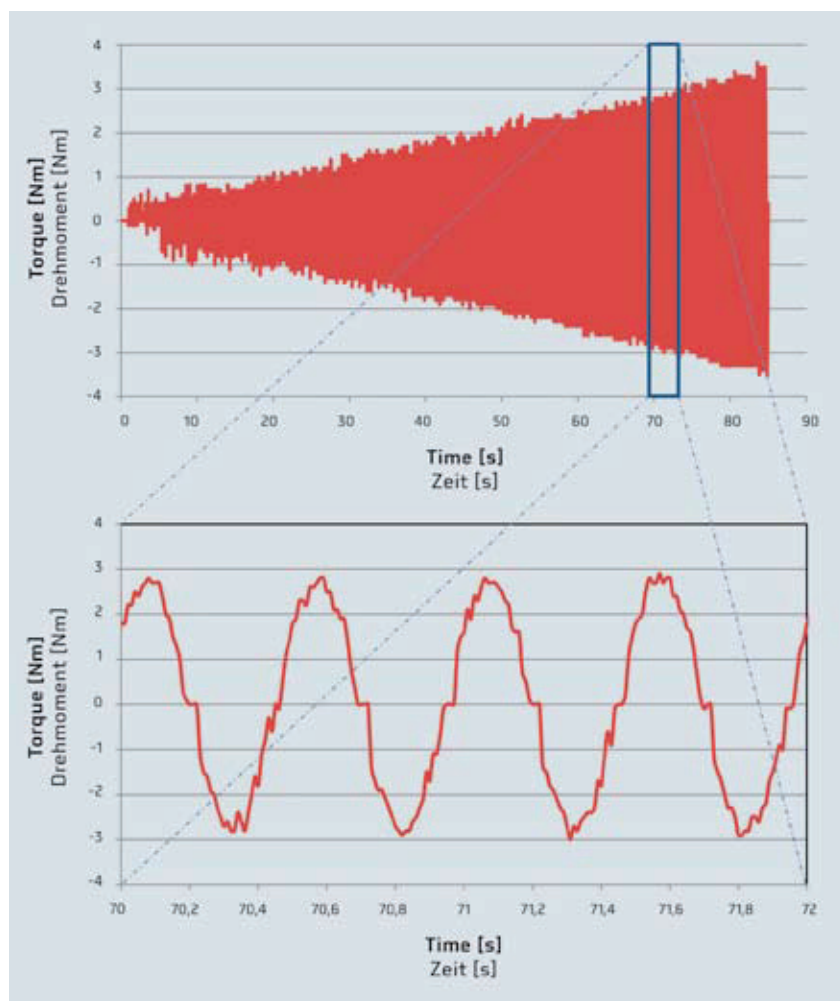
Ihr Partner für:

- 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



5

Diagram of the defined sinusoidal torque pattern for the amplitude sweep in the high-intensity cone mixer

Darstellung der sinusförmigen Drehmomentvorgabe für den Amplituden-Sweep im Konus-Intensiv-Mischer

of the relative concentration of solids. This parameter is obtained from the ratio of the actual solids content per unit of volume to the maximum concentration of solids under defined compaction conditions.

Multi-stage production in a high-intensity cone mixer

The mixing time for a high-volume fly-ash concrete calculated using BétonLab Pro amounts to 210 seconds (Table 1). The multi-stage production of the concrete in a high-intensity cone mixer utilizes the benefits of the suspension mixing technology within a single mixer. For this purpose, the first stage serves to produce the highly flowable mortar at a very high speed of the inner mixing tool. In this arrangement, the outer pins of the modified standard tool act as the effective system components. At the second stage, the tool speed is reduced significantly, and the coarse aggregate is mixed in by the inclined paddles on the inside of the internal mixing tool. BétonLab Pro calculates a mixing time of only 166 seconds in a standard mixer for producing the mortar. The total mixing time is shortened if the coarse aggregate is successfully mixed in within a period of less than 44 seconds. The use of a high-intensity mixer makes it possible to significantly reduce the mixing time of 166 seconds anticipated for the mortar, and thus the total duration of the mixing process. The tests support the calculations carried out with the BétonLab Pro software. The two-stage method

der Suspensions-Mischtechnologie in einem einzigen Mischer genutzt werden. Dazu wird in der 1. Stufe der sehr fließfähige Mörtel bei sehr hoher Werkzeuggeschwindigkeit des inneren Mischwerkzeugs hergestellt. Wirksam sind dabei die äußeren Stifte des modifizierten Standardwerkzeugs. In der 2. Stufe wird die Werkzeuggeschwindigkeit sehr stark reduziert und die grobe Gesteinskörnung durch die inneren geneigten Mischpaddel des inneren Mischwerkzeugs untergemischt. Für die Herstellung des Mörtels werden von BétonLab Pro lediglich 166 Sekunden in einem Standard-Mischer berechnet. Gelingt es, die grobe Gesteinskörnung in weniger als 44 Sekunden unterzumischen, verkürzt sich die Gesamtmischzeit. Durch den Einsatz eines Intensiv-Mischers kann die prognostizierte Mischdauer von 166 Sekunden für den Mörtel – und damit die Gesamtmischdauer – deutlich verkürzt werden. Die Versuche belegen die mit BétonLab Pro durchgeführten Berechnungen. Die Mischdauer reduziert sich durch den zweistufigen Ansatz um bis zu 50 % gegenüber dem klassischen einstufigen Vorgehen. Der für eine vergleichbare Viskosität des Frischbetons erforderliche Mischenergieeintrag in kWh/m³ reduziert sich zudem auf bis zu 40 %. Ergeben sich für andere Betone wie beispielsweise UHPC infolge der Mischungszusammensetzung keine Vorteile durch ein mehrstufiges Mischregime, ist ein einstufiger Mischvorgang ohne Einschränkungen durchführbar.

Rheologische Bewertung des Betons im Intensiv-Konus-Mischer

Die Bestimmung der rheologischen Eigenschaften im Mischer ist nur dann sinnvoll, wenn diese sich nach Mischende nur möglichst geringfügig ändern. Der zweistufige Herstellungsprozess ist auch diesbezüglich vorteilhaft (Abb. 2). Um die Fließgrenze und die Viskosität als Messwerte erfassen zu können, wurde der Antriebsstrang des Konus-Intensiv-Mischers umgestaltet. Die Asynchronmotor-Getriebeeinheit des inneren Antriebs wurde durch einen High-Torque-Synchronantrieb ersetzt, um die erforderliche Drehzahlgenauigkeit und Steifigkeit des Antriebsstranges zu erreichen. Die Steuerung des Antriebs erfolgt über einen Frequenzumrichter, der nach dem Regelverfahren Direct Torque Control arbeitet. Damit werden die kontrollierte Beschleunigung des Synchronantriebs aus dem Stillstand und der Betrieb bei niedrigsten Drehzahlen möglich. Zudem verfügt der Frequenzumrichter über einen in der Rheologie bevorzugten drehmomentgeregelten Modus (Controlled Shear Stress). Damit bestehen die nachfolgenden Möglichkeiten zur Bestimmung der Rheologie im Mischer:

Bestimmung der Fließgrenze durch das Tangentenverfahren:

Mit der direkten Drehmoment-Regelung des Frequenzumrichters (DTC) wird das Drehmoment des Synchronmotors – ausgehend von 0,5% des Nenndrehmomentes – linear gesteigert. Der auf der Motorwelle befestigte Drehgeber löst eine Umdrehung mit 0,192 mrad auf. In Abb. 3 sind die Drehbergeschwindigkeit in [mrad/s] und das Motornennmoment in [Nm] ablesbar. Oberhalb von 15 Nm steigt die Geschwindigkeit des Drehgebers überproporti-

reduces the mixing time by up to 50% compared to the conventional single-stage process. In addition, the mixing energy (kWh/m³) to be introduced to achieve a comparable viscosity of the fresh concrete is reduced to as little as 40% of the original amount. A single-stage mixing process can be implemented without restrictions if a multi-stage process does not result in benefits for other concretes, such as UHPC, due to their mix composition.

Rheological evaluation of the concrete in the high-intensity cone mixer

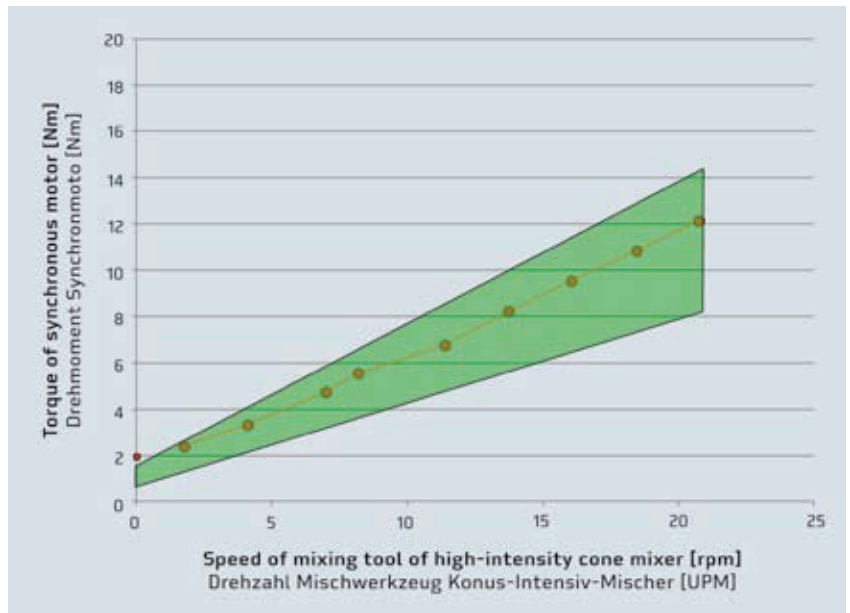
It is useful to determine the rheological characteristics in the mixer only if these properties undergo very minor changes after the end of the mixing process. The two-stage production process is also beneficial in this respect (Fig. 2). The drive train of the high-intensity cone mixer has been redesigned in order to be able to measure yield value and viscosity. The asynchronous motor gear unit of the internal drive was replaced with a high-torque synchronous drive in order to achieve the required speed precision and drive train rigidity. The drive is controlled via a frequency inverter that uses the direct torque control principle. This design enables the controlled acceleration of the synchronous drive from zero and its operation at extremely low speeds. In addition, the frequency inverter uses a torque-controlled mode that is preferable for rheological evaluations (Controlled Shear Stress). This combination of features results in the following options for determining the rheological characteristics in the mixer:

Determining the yield value using the tangential method:

The direct torque control (DTC) of the frequency inverter ensures a linear increase in the torque of the synchronous motor, starting at 0.5% of the nominal torque. The rotary encoder mounted on the motor shaft enables rotations in 0.192 mrad increments. Fig. 3 shows the rotary encoder velocity [mrad/s] and the nominal torque of the motor [Nm]. Above 15 Nm, the velocity of the rotary encoder shows a disproportionate increase and moves out of the linearly elastic range. The tangential method is used for determining the yield value and the associated torque.

Determining the yield curve in the lower speed range:

The modified internal drive makes it possible to operate the mixing tool of the high-intensity cone mixer at a very low speed and a high degree of rotational accuracy. In the first step, the mix is subjected to shear at the speed determined by the operator in order to eliminate thixotropic effects. Operation in the range from 20.78 to 1.73 revolutions per minute determines nine pairs of speed/torque values. Fig. 4 shows a diagram of the measured values. The programmable logic controller (PLC) calculates the rheological parameters g (yield value) and h (plastic viscosity). Depending on the number of the speed/torque pairs considered, the yield value extrapolated from the measured values using the Bingham model may vary considerably.



onal an, und der linear-elastische Bereich wird verlassen. Die Festlegung der Fließgrenze und des zugehörigen Drehmomentes erfolgt durch das Tangentenverfahren.

Bestimmung der Fließkurve im unteren Drehzahlbereich:

Durch den modifizierten inneren Antrieb kann das Mischwerkzeug des Konus-Intensiv-Mischers bei sehr geringer Drehzahl mit sehr gutem Rundlauf betrieben werden. Zunächst wird das Mischgut mit der vom Benutzer vorgegebenen Drehzahl vorgeschert, um thixotrope Effekte zu eliminieren. Durch den Betrieb im Drehzahlbereich von 20,78 bis 1,73 Umdrehungen pro Minute werden 9 Wertepaare Drehzahl/Drehmoment bestimmt. Eine Darstellung der ermittelten Werte zeigt Abbildung 4. Die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) berechnet die rheologischen Parameter g (Fließgrenze) und h (plastische Viskosität). Abhängig von der Anzahl der berücksichtigten Wertepaare Drehzahl/Drehmoment variiert insbesondere die aus den Messwerten über das Bingham-Modell extrapolierte Fließgrenze erheblich.

Oszillationsversuch: Amplituden-Sweep:

Die geringe Masse und Steifigkeit des Direktantriebs und die Direct-Torque-Regelung des Frequenzumrichters ermöglichen erstmals Oszillationsversuche im Mischer. Dabei wird das Drehmoment sinusförmig mit linear ansteigender Amplitude variiert (Abb. 5) und die Position der Motorwelle über den Drehwertgeber erfasst. Unter ideal-elastischen Bedingungen ist die Drehmomentkurve deckungsgleich mit dem Verlauf des Drehwertgebers. Unter ideal-viskosen Bedingungen stellt sich eine Phasenverschiebung von 90° ein. Per Definition ist bei einer Phasenverschiebung von 45° die Fließgrenze erreicht.

Gezielte Beeinflussung der Frischbetoneigenschaften:

Die rheologische Bewertung jeder Einzelcharge im Mischer durch Messwerte ermöglicht es, Abweichungen zu erkennen und gezielt einzugreifen. Liegen die Messwerte für die Fließgrenze und die der Fließkurve außerhalb eines vorgegebenen Akzeptanzbereichs (Abb. 6),

6 Yield value (at zero speed) measured in the high-intensity cone mixer and nine pairs of speed/torque values to describe the rheology of an HVFA concrete. The yield value lies outside the tolerance range

Mit dem Konus-Intensiv-Mischer gemessene Fließgrenze (Drehzahl 0) und neun Wertepaare Drehzahl/Drehmoment zur Beschreibung der Rheologie eines HVFA-Betons. Die Fließgrenze liegt außerhalb des Akzeptanzbereichs

Oscillation test – amplitude sweep:

The low mass and rigidity of the direct drive and the direct torque control of the frequency inverter enable oscillation tests in the mixer for the first time. During these tests, the torque is varied in a sinusoidal pattern at a linearly increasing amplitude (Fig. 5), and the position of the motor shaft is captured via the rotary encoder. Under fully elastic conditions, the torque curve is congruent with the rotary encoder curve. Under fully viscous conditions, a 90 degree phase shift occurs. According to the definition, the yield value is reached at a phase shift of 45 degrees.

Targeted control of fresh concrete characteristics:

Deviations can be accurately detected and rectified by the rheological evaluation of every single batch in the mixer relying on measured values. If the measured yield values and yield curves lie outside a defined tolerance range (Fig. 6), the fresh concrete characteristics can be adjusted to the specification by automated subsequent feed of a plasticizer and viscosity modifier.

Summary

The three-stage concept significantly reduces the experimental effort to be made for designing the concrete mix. The adjustment of the mixing equipment to the specific mix results in shorter mixing times, better fresh concrete properties and a lower amount of electrical energy required for the mixing process. Each batch can be evaluated with respect to its rheological characteristics by measuring the yield value and plastic viscosity in the mixer. If deviations from the reference are too large, minute amounts of concrete additives can be batched subsequently to adjust the properties of the mix.

werden durch die automatisierte Nachdosierung von Fließmittel und Viskositätsmodifizierer die Frischbetoneigenschaften korrigiert.

Zusammenfassung

Durch das 3-Stufen-Konzept verringert sich der experimentelle Aufwand für die Betonentwicklung deutlich. Die Anpassung der Mischtechnik an den jeweiligen Beton führt zu kürzeren Mischzeiten, besseren Frischbetoneigenschaften und einem geringeren Bedarf an elektrischer Energie für den Mischvorgang. Durch die Bestimmung der Fließgrenze und der plastischen Viskosität im Mischer als Messwert kann jede Einzelcharge rheologisch bewertet werden. Bei zu großen Abweichungen von der Referenz kann durch Nachdosierung von Betonzusatzmitteln gezielt eingegriffen werden.

REFERENCES · LITERATUR

- [1] Haist, M., Müller, H. S.: Nachhaltiger Beton – Betontechnologie im Spannungsfeld zwischen Ökobilanz und Leistungsfähigkeit, 9. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, KIT, ISBN 978-3-86644-820-9
- [2] Jézéquel, P. H., Collin, V.: Mixing of concrete or mortars: Distributive aspects, Cement and Concrete Research, 678-686, Vol. 39(8), Elsevier, 2009
- [3] Nordenswan, E., Käppi, A.: A new online method of measuring the workability of self-compacting concrete, RILEM Symposium of SCC, 2007
- [4] de Larrard, F., Sedran, T.: Une nouvelle approche de la formulation des betons, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Centre de Nantes



Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht studierte Bauingenieurwesen an der Universität Karlsruhe. 1992 promovierte er an der Universität Karlsruhe. Seit 04/2012 ist er als Professor an der Universität Stuttgart Institutsleiter des Instituts für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) und wissenschaftlicher Direktor an der Materialprüfungsanstalt MPA.



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 06/2012 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart im Bereich der Technologieentwicklung für Betonanwendungen tätig.



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 Prüffingenieurbüro für Baustatik. In einem Aufbaustudium an der Hochschule Karlsruhe erwarb er den Abschluss MBA. Seit 05/2012 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart im Bereich der Technologieentwicklung für Betonanwendungen tätig.