

SONDERDRUCK | BETONTECHNIK

Einfluss des Mischens auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften

**SONDERDRUCK
BWI 12/03**



ABTC

Abcic
Asociación Brasileña de Construção
Industrializada de Concreto

NATIONAL PRECAST

NZCS

aci

CPM

ICPI
INTERNATIONAL CONCRETE PIPE
INSTITUTE

**American
Concrete Pipe
Association**

**BRITISH
PRECAST**

NPCA
National Precast Concrete Association

OPRA
INTERNATIONAL PRECAST
CONCRETE ASSOCIATION

PCI

bibm

Ultra High Performance Concrete (UHPC)

Einfluss des Mischens auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften

Ultrahochleistungsbeton (UHPC) unterscheidet sich von gewöhnlichem Beton durch seine Zusammensetzung und seine Eigenschaften. Er weist einen erheblich höheren Pulvergehalt bei in der Regel kleinerem Größtkorndurchmesser, sehr geringe Wasser/Zement- bzw. Wasser/Bindemittel-Werte und einen wesentlich höheren Fließmittelgehalt auf. UHPC kann Druckfestigkeiten über 200 N/mm² und Biegezugfestigkeiten über 20 N/mm² erreichen. Durch das dichte Gefüge ist er gegenüber Wasser, chemisch angreifenden Stoffen und Chloriden nahezu undurchlässig.

■ Peter Lieblang, Fachhochschule Köln, Deutschland
Daniel Ringwelski, Tillman B. V. Construction Chemicals, Niederlande ■

Für die hier durchgeführten Untersuchungen wird eine bereits erprobte Rezeptur [1] geringfügig modifiziert. Die Zusammensetzung ist in der folgenden Tabelle angegeben.

Tabelle 1: Betonrezeptur UHPC

Betonzusammensetzung (1,0 m ³)			
Materialbezeichnung	Masse [kg/m ³]	Rohdichte [kg/dm ³]	Volumen [dm ³ /m ³]
CEM I 52,5 R-HS/NA	832,0	3,10	268,4
Wasser	166,0	1,00	166,0
Quarzmehl	199,0	2,65	75,1
Microsilica	128,0	2,35	54,5
Luftporen	0,0	0,00	40,0
Fließmittel (PCE)	35,0	1,10	31,8
Basaltsand 0/2	1056,1	2,90	364,2
Summe	2416,1	—	1000,00

Grundsätzlich bestehen keine Unterschiede zwischen der Herstellung von UHPC und derjenigen von Normalbeton. Allerdings kommt dem Mischvorgang eine große Bedeutung zu, denn die vollständige Benetzung der sehr großen spezifischen Oberfläche und der Aufschluss des Zusatzmittels erhöhen die benötigte Mischenergie im Vergleich zu Normalbetonen.

Mischtechnik

Mischen bedeutet nichts anderes, als ein aus vielen Partikeln bestehendes System in den Zustand größtmöglicher Unordnung zu versetzen. Zu diesem Zweck werden in der Betonherstellung unterschiedliche Mischertypen eingesetzt. Am weitesten verbreitet sind die nach DIN 459-1 als Teller- bzw. Ringtellerischer sowie als Trogmischer bezeichneten Varianten. Bei diesen Typen erfolgt der eigentliche Mischvorgang durch schnelle Relativbewegungen zwischen Mischgut und Mischwerkzeug. Aufgrund der Bauart treten zugleich Relativbewegungen zwischen Mischgut und Mischbehälter auf. Intensivmischer hingegen verfügen über einen geeigneten Mischbehälter, Wand-Boden-Abstreifer und exzentrisch angeordneten Wirbler. Im Gegensatz zu den zuvor genannten Mischertypen wird das Mischgut im Intensivmischer durch Haftreibung im geeigneten Mischsteller nach oben transportiert und fällt durch die Schwerkraft wieder nach unten zurück. Diese Grobvermischung

wird durch den Abstreifer zusätzlich unterstützt und führt das Mischgut dem Mischwerkzeug zu. Die Feinvermischung erfolgt durch den in das Mischgut eingetauchten Wirbler. Dadurch entstehen Materialströme mit hoher Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Mischgut und Mischwerkzeug, ohne dass zugleich nennenswerte Reibungsverluste zwischen Mischgut und Mischbehälter auftreten. Dieser Sachverhalt ist bedeutsam, wenn die Leistungsaufnahme des Mixers gesteigert wird, weil sich die insgesamt eingetragene Energie als Produkte aus Leistung und Zeit in zwei Anteile aufspalten lässt. Dies sind einerseits die Arbeit, die zur Überwindung der „inneren Reibung“, also zur eigentlichen Vermischung der Ausgangsstoffe aufgewendet wird, andererseits diejenige Arbeit, die zur Überwindung der „äußeren Reibung“, also den Verlusten zwischen Mischgut und Behälterwand erforderlich ist. Mischertypen, in denen es zu einer ausgeprägten Relativverschiebung zwischen Mischgut und Behälterwand kommt, zeigen einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen eingetragener Leistung und Mischwirkung. Dagegen führt eine erhöhte Leistungsaufnahme bei Intensivmischern mit Wirbler und angetriebenem Mischbehälter wegen der praktisch nicht vorhandenen äußeren Reibung unmittelbar zu einer Erhöhung der Mischwirkung, so dass von einem näherungsweise linearen Zusammenhang zwischen Leistungsaufnahme und in das Mischgut eingetragener Mischenergie ausgegangen werden kann.

Das maximale Fassungsvermögen des hier verwendeten Labormischers beträgt 75 l bzw. 120 kg (Abbildung 1). Der Mischvorgang kann sowohl im Gleichstrom als auch im Gegenstrom durchgeführt werden. Als Mischwerkzeuge stehen ein Sternwirbler (Abbildung 2) und ein Stiftwirbler (Abbildung 3) zur Verfügung. Zudem ermöglicht es die Steuerung, alle relevanten Parameter, d. h. Drehzahl, Leistungseintrag und Mischguttemperatur aufzuzeichnen.

Laboruntersuchungen

In Vorversuchen sind verschiedene Mischzeiten und Leistungsstufen untersucht worden. Dabei wurde das Ziel verfolgt, praxistaugliche Mischzeiten einzuhalten. Insbesondere sollte die Gesamtmischzeit einen Wert von sechs Minuten nicht wesentlich überschreiten, weil sich bei sehr langen Mischzeiten die einsetzenden Hydratationsprozesse ebenfalls auf die Frischbetoneigenschaften auswirken. Bei den Untersuchungen wurden zwei verschiedene Mischwerkzeuge (vgl. Abb. 2 und 3) eingesetzt. Außerdem wurden die Parameter Mischzeit und Leistungsaufnahme variiert. Um den Einfluss der Mischparameter zu untersuchen wurden insgesamt 16 Mischungen mit jeweils drei Chargen hergestellt.

Alle Mischungen wurden grammgenau eingewogen, so dass Streuungen aufgrund von Dosierungenauigkeiten auszuschließen sind. Aus den Vorversuchen war bekannt, dass zur Einhaltung einer



Abbildung 1: Labormischer

- Einfüllen der festen Ausgangsstoffe in der sog. Mischergrundstellung (Mischbehälter 20 % Leistungsaufnahme, Wirbler 5 % Leistungsaufnahme),
- Trockenmischen bis zum Erreichen des vorgegebenen Zielwerts (entweder Mischzeit, oder Energieeintrag),
- Händische Wasser- und Fließmittelzugabe (möglichst innerhalb einer festen Zeit),
- Nassmischen bis zum Erreichen des vorgegebenen Zielwerts (entweder Mischzeit, oder Energieeintrag) und
- Entleeren.

Leistungsaufnahme, Mischzeit und eingetragene Mischenergie stehen beim verwendeten Mischertyp in einem funktionalen Zusammenhang, wenn die Zusammensetzung der Mischung nicht variiert wird.

$$P = \frac{dE}{dt}$$

Die eingetragene Mischenergie lässt sich damit durch Integration der Leistungsaufnahme über die Zeit bestimmen und grafisch als Fläche unter der Leistungskurve interpretieren, wenn die Verluste durch „äußere Reibung“ vernachlässigbar klein sind.

$$E = \int_t P \cdot dt$$

Eine definierte Mischenergie lässt sich bei hoher Mischerleistung in kurzer Zeit, bei geringerer Leistung in entsprechend längerer Mischzeit eintragen. Dieser Zusammenhang ist auch aus den Mischprotokollen ersichtlich, die in der folgenden Abbildung 4 für die Mischungen 7 und 9 dargestellt sind. Die gesamte Mischenergie wird bei Mischung 7 (Charge 3) mit dem Stiftwirbler bei einer Leistungsspitze von 6,34 kW (Wirbler- und Behälterantrieb) innerhalb von 548 s und bei Mischung 9 (Charge 3) mit dem Sternwirbler bei einer Leistungsspitze von 4,37 kW innerhalb von 663 s eingetragen. Man sieht, dass der Stiftwirbler das effektivere Mischwerkzeug ist, weil die Leistungsaufnahme des Mixers höher und die Mischzeit kürzer ist. Die eingetragene Mischenergie entspricht der Fläche unter der jeweiligen Leistungskurve und wurde durch numerische Integration in beiden Fällen zu exakt 0,516 kWh bestimmt.

Die Mischparameter sind in der folgenden Tabelle 2 dargestellt.

Ergebnisse Frischbetoneigenschaften

Der Ablauf der Frischbetonprüfung erfolgt in einer definierten Reihenfolge. Die hier



■ Prof. Dr.-Ing. Peter Lieblang, Jahrgang 1969; studierte Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen, 1994 Diplom, 2000 Promotion über ein Thema aus der Werkstoffmechanik, seit 1995 freiberufliche Tätigkeit als Bauingenieur, seit 2000 Tätigkeit für den Bundesverband der deutschen Zementindustrie in Köln, Stuttgart und Berlin, von 2006 bis 2010 Professor für Baustoffkunde und Leiter der Baustofflaboratorien an der Hochschule Bochum (FH), seit 2009 auch geschäftsführender Gesellschafter des Instituts für Beton- und Fertigteilbau (An-Institut der Hochschule Bochum), seit Oktober 2010 Professor für Bauphysik und Baustoffe sowie Leiter des Bauphysiklabors an der Fachhochschule Köln.
peter.lieblang@fh-koeln.de



■ Dipl.-Ing. (FH), M.Sc. Daniel Ringwelski, Jahrgang 1980, studierte Bauingenieurwesen („konstruktiver Ingenieurbau“) an der Hochschule Bochum (2008 Diplom) und studierte Bauingenieurwesen („Nachhaltiges Bauen“) ebenfalls an der Hochschule Bochum (2010 Master of Science). Von 2007 bis 2009 Berding Beton - Groß- und Vortriebsrohre - Konstruktionsabteilung, von 2009 bis 2010 freiberufliche Tätigkeit „Betontechnologie/Baustofftechnologie“, von 2009 bis 2010 wissenschaftlicher Mitarbeiter Hochschule Bochum - Institut für Bauphysik, Baustoffe und Konstruktion. Seit Oktober 2010 Laborleiter/technischer Leiter „Forschung & Entwicklung“ bei der Firma Tillman B.V. - Construction Chemicals.
d-ringwelski@tillman.nl

genannten Zeiten beziehen sich auf das Entleeren des Mixers als Nullzeit.

- Konsistenz nach ca. 1 min,
- Frischbetontemperatur nach ca. 2 min,
- LP-Gehalt nach ca. 10 min,
- Herstellung der Probewürfel nach ca. 15 min.

Die Ergebnisse der Versuche sind in der folgenden Tabelle 3 dargestellt.

Ein Vergleich der Mischungen zeigt, dass Setzfließmaß und eingetragene Mischenergie bei feststehender Rezeptur einen näherungsweise linearen Zusammenhang aufweisen. In Abb. 5 ist dieser mit Hilfe einer Regression ermittelte Zusammenhang als Gerade eingezeichnet.

Festbetoneigenschaften Druckfestigkeit

Es wird der Einfluss von Mischwerkzeug, Mischzeit, und Mischgeschwindigkeiten auf die Druckfestigkeit - ermittelt an Würfeln mit 10 cm Kantenlänge im Alter von 2, 7, 14 und 28 Tagen nach Normlagerung - untersucht. Auf eine detaillierte Darstellung aller Festigkeitswerte wird an dieser Stelle verzichtet. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Wahl der Mischwerkzeuge praktisch keinen Einfluss auf die Festigkeit bzw. Festigkeitsentwicklung hat. Die 28d Festigkeit streut um nicht mehr als 7 %. Bei verlängerter Mischzeit nimmt die Festigkeit tendenziell zu. Allerdings beträgt die beob-



Abbildung 2: Sternwirbler



Abbildung 3: Stiftwirbler

Frischbetontemperatur von ca. 20° C alle festen Ausgangsstoffe auf konstant 5° C temperiert werden mussten. Es wurde nicht untersucht, wie sich der Temperaturanstieg während des Mischens auf Reibungs- und Hydratationswärmeentwicklung verteilt. Das Mischregime folgte immer demselben Schema und umfasste die Schritte

achtete Erhöhung der Druckfestigkeit maximal 11 % und bewegt sich damit im Bereich üblicher Streuungen.

Beim Stiftwirbler ist bei den 2d bzw. 14d Festigkeiten eine Zunahme der Festigkeit bei steigender Leistungsaufnahme zu vermerken. Sie beträgt für die 2d Festigkeiten 11,0 % und für die 14d Festigkeiten 5,6 %. Diese Werte kennzeichnen die maximalen Unterschiede zwischen geringster und höchster Leistungsaufnahme. Bei den anderen Festigkeitsentwicklungen ist die Tendenz noch weniger ausgeprägt. Die Ergebnisse der Versuche sind in der folgenden Tabelle 4 dargestellt.

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit ist der Einfluss des Mischens auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften von UHPC untersucht worden. Dabei lag das Hauptaugenmerk auf den Parametern Frischbetontemperatur, Setzfließmaß und Druckfestigkeit. Die Untersuchungen zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen eingetragener Mischenergie und Setzfließmaß. Damit ist es in einem Intensivmischer möglich, die Konsistenz einer UHPC-Rezeptur mit Hilfe der eingetragenen Mischenergie einzustellen. Das verwendete Mischwerkzeug bzw. die Mischzeit sind dabei von untergeordneter Bedeutung. Die Wechselwirkungen zwischen Leistungsaufnahme, Mischzeit, Frischbetontemperatur und Konsistenz sind noch nicht untersucht worden. Hier besteht noch Erklärungsbedarf. Zudem lassen die bisherigen Ergebnisse vermuten, dass der Mischvorgang keine wesentliche Bedeutung für die Festigkeit bzw. Festigkeits-

entwicklung von UHPC hat. Diese Vermutung ist aber durch weitere Versuche zu bestätigen.

Literatur

- [1] Schmidt et al.: Brückenfamilie aus Ultrahochfestem Beton in Niestetal und Kassel, Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006), Heft 3
- [2] DIN 459-1: Mischer für Beton und Mörtel. Teil 1: Begriffe, Leistungsermittlung, Größen. Ausgabe November 1995. Berlin: Beuth Verlag. 1995
- [3] O. Mazanek und D. Lowke: Reduzierung der Mischzeit von ultrahochfesten Betonen durch Optimierung der Betonzusammensetzung. Betonwerk International, 2009 (Heft 2). S. 58 – 63
- [4] F. Dehn, M. Orgass: Einfluss unterschiedlichster Mischparameter auf die Frischbetoneigenschaften von ultrahochfestem Faserbeton, Betonwerk International, 2007 (Heft 4). S. 44 – 52
- [5] D. Ringwieski: Einfluss der Mischparameter eines Intensivmischers auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften von ultrahochfestem Beton, Master-Thesis (unveröffentlicht), 2010

Tabelle 3: Zusammenfassung – Mittelwerte der einzelnen Chargen (Frischbeton)

Mischung	Werkzeug	Geschw. [m/s]	Kriterium	Zeit [sec]	Energie [kWh]	Temperatur [°C]	Rohdichte [kg/dm³]	LP [%]	Setzfließmaß [mm]
1	Stift	5,3/0,7	Zeit	375	0,403	22,0	2,470	4,4	620
2	Stift	2,6/0,4	Zeit	374	0,247	19,4	2,480	4,8	530
3	Stift	7,9/1,1	Zeit	378	0,581	24,0	2,520	4,4	630
4	Stern	5,3/0,7	Zeit	373	0,309	21,0	2,470	4,6	580
5	Stern	2,6/0,4	Zeit	371	0,178	17,6	2,470	4,4	430
6	Stern	7,9/1,1	Zeit	374	0,454	21,6	2,500	4,1	630
7	Stift	5,3/0,7	Energie	512	0,521	23,5	2,510	4,0	640
8	Stift	7,9/1,1	Energie	195	0,355	21,4	2,460	4,4	570
9	Stern	5,3/0,7	Energie	528	0,523	21,8	2,500	4,1	630
10	Stern	7,9/1,1	Energie	258	0,349	20,5	2,470	4,5	520
11	Stift	5,3/0,7	Energie	502	0,399	21,7	2,490	4,5	620
12	Stern	7,9/1,1	Energie	188	0,272	20,2	2,450	4,9	520
13	Stift	5,3/0,7	Energie	407	0,417	23,4	2,480	4,4	640
14	Stift	7,9/1,1	Energie	148	0,284	20,2	2,450	4,5	520
15	Stift	5,3/0,7	Zeit	702	0,671	25,7	2,500	3,6	750
16	Stern	5,3/0,7	Zeit	702	0,534	23,7	2,490	4,0	710

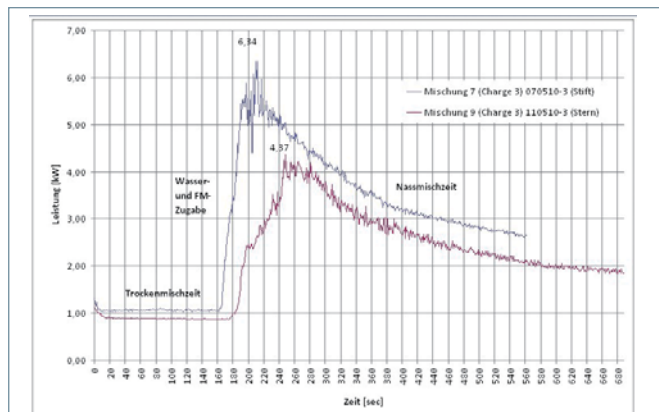


Abbildung 4: Leistungsaufnahme über die Zeit für die Mischungen 7 (Charge 3) und 9 (Charge 3)

Tabelle 4: Zusammenfassung – Mittelwerte der einzelnen Chargen (Festbeton)

Mischung	Werkzeug	Geschw. [m/s]	Kriterium	Zeit [sec]	Energie [kWh]	Betondruckfestigkeit [N/mm²]			
						2d [N/mm²]	7d [N/mm²]	14d [N/mm²]	
1	Stift	5,3/0,7	Zeit	375	0,403	85,6	125,1	143,9	152,7
2	Stift	2,6/0,4	Zeit	374	0,247	84,3	126,6	138,5	158,5
3	Stift	7,9/1,1	Zeit	378	0,581	93,6	127,7	146,2	156,6
4	Stern	5,3/0,7	Zeit	373	0,309	90,5	122,6	133,3	144,2
5	Stern	2,6/0,4	Zeit	371	0,178	85,6	127,3	130,2	146,7
6	Stern	7,9/1,1	Zeit	374	0,454	86,0	128,5	143,6	154,3
7	Stift	5,3/0,7	Energie	512	0,521	90,7	126,2	141,4	156,6
8	Stift	7,9/1,1	Energie	195	0,355	84,4	123,5	136,0	149,4
9	Stern	5,3/0,7	Energie	528	0,523	92,5	131,8	144,3	163,3
10	Stern	7,9/1,1	Energie	258	0,349	86,1	121,0	132,0	k. A.
11	Stern	5,3/0,7	Energie	502	0,399	90,8	130,2	k. A.	153,6
12	Stern	7,9/1,1	Energie	188	0,272	89,8	121,0	135,9	146,3
13	Stift	5,3/0,7	Energie	407	0,417	93,7	129,4	144,0	149,7
14	Stift	7,9/1,1	Energie	148	0,284	79,0	122,1	136,5	k. A.
15	Stift	5,3/0,7	Zeit	702	0,671	90,4	130,3	144,7	k. A.
16	Stern	5,3/0,7	Zeit	702	0,534	83,9	125,4	140,9	160,2

Tabelle 2: Zusammenfassung – Mittelwerte der einzelnen Chargen

Mischungen	Werkzeug	Geschw. (~ Leistung) [m/s]	Kriterium	Zeit [sec]	Energie [kWh]
1	Stift	5,3/0,7	Zeit	375	0,403
2	Stift	2,6/0,4	Zeit	374	0,247
3	Stift	7,9/1,1	Zeit	378	0,581
4	Stern	5,3/0,7	Zeit	373	0,309
5	Stern	2,6/0,4	Zeit	371	0,178
6	Stern	7,9/1,1	Zeit	374	0,454
7	Stift	5,3/0,7	Energie	512	0,521
8	Stift	7,9/1,1	Energie	195	0,355
9	Stern	5,3/0,7	Energie	528	0,523
10	Stern	7,9/1,1	Energie	258	0,349
11	Stern	5,3/0,7	Energie	502	0,399
12	Stern	7,9/1,1	Energie	188	0,272
13	Stift	5,3/0,7	Energie	407	0,417
14	Stift	7,9/1,1	Energie	148	0,284
15	Stift	5,3/0,7	Zeit	702	0,671
16	Stern	5,3/0,7	Zeit	702	0,534

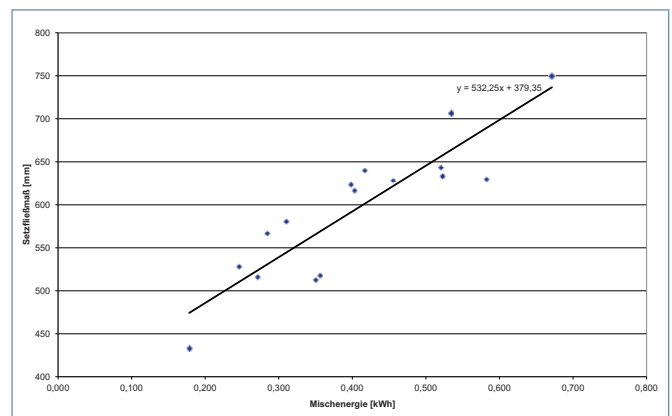


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen eingetragener Mischenergie und Setzfließmaß (Versuchsergebnisse und Regressionsgerade)