

Verdichtbarkeit und Stabilität Leichtverarbeitbarer Betone

Thomas Kränkel, Dirk Lowke, Christoph Gehlen

Centrum Baustoffe und Materialprüfung, Technische Universität München
Tel. +49.89.289.27126 · thomas.kraenkel@tum.de



Dipl.-Ing. Thomas Kränkel

2001 – 2007 Diplomstudium des Bauingenieurwesens an der Universität Leipzig

Seit 2007 wissenschaftlicher Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Betontechnologie am Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der Technischen Universität München

Kurzfassung

Für eine ausreichende Entlüftung bei gleichzeitig hoher Mischungsstabilität leichtverarbeitbarer Betone (LVB) bedarf es i.d.R. lediglich geringer Verdichtungsleistungen. In der Baupraxis bleibt bei der Wahl dieser Verdichtungsleistung jedoch die Viskosität des Frischbetons gänzlich unberücksichtigt. Gerade diese spielt jedoch während des Verdichtens sowohl hinsichtlich des Entlüftungs- als auch des Sedimentationsverhaltens eine entscheidende Rolle. In dem Beitrag werden die grundlegenden Zusammenhänge zwischen der plastischen Viskosität von LVB sowie dem Entlüftungsverhalten und der Mischungsstabilität während der Verdichtung vorgestellt.

Motivation und Ziel

Die Grundvoraussetzung für eine ausreichende Entlüftung bei gleichzeitig hoher Mischungsstabilität leichtverarbeitbarer Betone (LVB) ist der Einsatz einer angepassten Verdichtungsleistung. Diese ist insbesondere von der Bauteilgeometrie, der Frischbetonkonsistenz und der Betonzusammensetzung

zung abhängig /1-5/. So werden flächige Bauteile vornehmlich durch Räkeln oder Schwabbeln, vertikale Bauteile hingegen eher durch Stochern oder Klopfen verdichtet /6/. In /7,8/ werden Angaben gemacht, wie sich die notwendige Verdichtungsleistung mit zunehmender Verarbeitbarkeit der Betone reduziert (Bild 1). Gänzlich unberücksichtigt bleibt bislang die durch die stoffliche Zusammensetzung bedingte innere Reibung bzw. Viskosität des Frischbetons. Gerade diese spielt jedoch während des Verdichtens sowohl hinsichtlich des Entlüftungs- als auch des Sedimentationsverhaltens eine entscheidende Rolle.







F1	F2	F3	F4	F5	F6	SVB
Stampfen	starkes Verdichten	normales Verdichten	wenig Verdichten	leichtes Verdichten (Stochern, Klopfen)	leichtes Verdichten (Schwabbeln)	kein Verdichten
						
Verdichtungsaufwand						

Bild 1: Verdichtungsaufwand in Abhängigkeit von der Konsistenz des Betons /7/

In dem Beitrag werden die Zusammenhänge zwischen der Viskosität von LVB und deren Entlüftungs- sowie Sedimentationsverhalten während der Verdichtung dargestellt. Die Untersuchungen legen die Basis für die Abgabe exakter Empfehlungen hinsichtlich der für LVB richtigen Verdichtungsleistung, zur Sicherung ausreichender Entlüftung bei gleichzeitig hoher Mischungstabilität der LVB.

Rezepturen und Verdichtungsarten

Es wurden Versuche an in der Praxis üblichen Mörteln von leichtverarbeitbaren Betonen (LVM) sowie den zugehörigen Betonen (LVB) mit unterschiedlichen Volumenanteilen von Wasser zu Mehlkorn ($0,8 \leq V_w/V_p \leq 1,6$), bei sonst konstanter Zusammensetzung, durchgeführt. So konnte gezielt die plastische Viskosität η_{pi} der Mischungen variiert und deren Einfluss auf das Entlüftungs- und Sedimentationsverhalten quantifiziert werden. Alle Mischungen wurden durch die Wahl eines geeigneten Fließmittelgehalts auf eine für LVM bzw. LVB übliche Konsistenz mittlerer Verarbeitbarkeit eingestellt und somit eine konstante Fließgrenze τ_0 aller Mörtel bzw. Betone erreicht. Die Mörtelversuche wurden mit drei unterschiedlichen Verdichtungsvarian-

ten durchgeführt. Bei Vibration 0 wurde nicht verdichtet, bei Vibration A und B wurden die Mörtel auf einem Rütteltisch einer Vibration ausgesetzt. Dabei entspricht Variante A einer sehr leichten, für LVM praxisüblichen, Verdichtung. Variante B stellt eine hohe Verdichtungsleistung dar, um gezielt das Verhalten bei Überverdichtung zu untersuchen. Die Untersuchungen am Beton erfolgten ohne Verdichtung (Vibration 0) oder mit einer für LVB üblichen Verdichtungsleistung (Vibration C).

Untersuchungen

Zur rheologischen Charakterisierung der Mörtel wurden Messungen im Rotationsrheometer mit einer Doppelringspalt-Messzelle nach /9/ durchgeführt. Es wurden die Fließgrenze τ_0 und die plastische Viskosität η_{pl} unter Annahme binghamischen Fließverhaltens ermittelt. Zeitgleich wurde der LVM im Luftporentopf nach jeweils einer der in Tabelle 1 dargestellten Arten verdichtet und anschließend der Luftporengehalt (LP-Gehalt) bestimmt. Um ein Maß für die Sedimentationsstabilität zu erhalten, wurde der Kugeleindringversuch (KEV) in Anlehnung an /10,11/ durchgeführt. Dazu wurde eine Kugel, die in Dichte und Abmessungen ein grobes Gesteinskorn simuliert, in den Mörtel eingebracht. Während der Verdichtung (Vibration 0, A oder B) wurde anschließend die Sinkgeschwindigkeit v und die Eindringtiefe e der Kugel in den Mörtel als Maß für die Grobkornsedimentation bestimmt. Zur rheologischen Charakterisierung der Betone wurde der Kegelauslaufversuch nach /12/ durchgeführt und das Setzfließmaß als Maß für die Fließgrenze τ_0 sowie die Kegelauslaufzeit als Maß für die plastische Viskosität η_{pl} ermittelt. Das Entlüftungsverhalten der LVB wurde analog zum LVM im Luftporentopf mit Vibration 0 bzw. C bestimmt. Das Sedimentationsverhalten wurde mit Hilfe des Zylinder-Sedimentationsversuchs in Anlehnung an /10,11/ quantifiziert. Im Unterschied zu /10,11/ wurde die Zylinderschallung jedoch bei Vibration C direkt nach dem Füllen verdichtet. Als Maß für die Sedimentation wurde die maximale Grobkornabweichung Δm_{max} vom Probenmittel bestimmt.

Ergebnisse

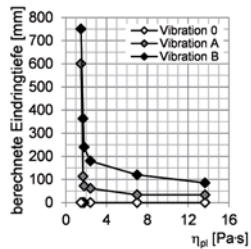
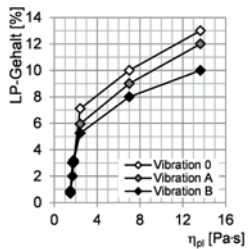
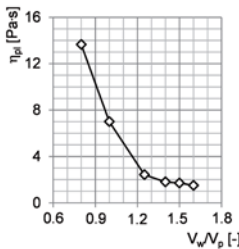
Alle untersuchten Mörtel besaßen eine vergleichbare Fließgrenze τ_0 von 31 bis 42 Pa. Veränderungen im Entlüftungs- und Sedimentationsverhalten können somit auf die Variation der plastischen Viskosität zurückgeführt werden. Diese ist indirekt proportional zu den Volumenanteilen von Was-

ser zu Mehlkorn V_w/V_p der LVM (Bild 2, links). Im Hinblick auf das Entlüftungsverhalten der LVM zeigte sich mit zunehmender Verdichtungsleistung erwartungsgemäß eine Verringerung des LP-Gehalts (Bild 2, mitte). Unabhängig von der Verdichtung ergab sich zudem eine direkte Proportionalität zwischen dem LP-Gehalt und der plastischen Viskosität η_{pl} . Die Entlüftung während des Verdichtungsvorgangs wird folglich maßgeblich von der Viskosität des Mörtels beeinflusst. Dies impliziert, dass die vor der Verdichtung hochviskosen Mörtel auch während der Verdichtung eine höhere Viskosität aufweisen, als die vor der Verdichtung niederviskosen Mörtel. Mit zunehmender Viskosität sinkt die Auftriebsgeschwindigkeit der Luftporen und somit das Entlüftungsvermögen.

Im KEV ohne externe Verdichtung (Vibration 0) sank die Kugel nicht ab (Bild 2, rechts). Die hohe Fließgrenze der LVM führte zu Sedimentationsstabilität. Die während der Verdichtung zugeführte Energie ist stets größer als die Fließgrenze der LVM /3,5/. Somit können sich Partikel während der Verdichtung im Mörtel bewegen und das Grobkorn kann absinken /3/, was durch das Absinken der Kugel im KEV verdeutlicht wird. Insbesondere bei den niederviskosen Mörteln und starker Verdichtung (Vibration B) kam es bereits vor Beendigung des Verdichtungsvorgangs zum Absinken der Kugel bis auf den Grund, sodass die endgültige Eindringtiefe e nicht bestimmt werden konnte. Deshalb wurde eine voraussichtliche Eindringtiefe e_{calc} nach /13,14/ berechnet. Mit zunehmender Verdichtungsleistung stieg die Eindringtiefe der Kugel erwartungsgemäß für jede Viskosität der LVM an (Bild 2, rechts). Überdies erhöhte sich die Eindringtiefe der Kugel überproportional mit sinkender Viskosität der Mörtel. Je kleiner die Viskosität der LVM ist, desto größer ist die Sinkgeschwindigkeit der Kugel im KEV während der Verdichtung.

Bild 2: Zusammenhang zwischen der plastischen Viskosität η_{pl} der LVM und dem V_w/V_p (links), dem LP-Gehalt (mitte) sowie der Eindringtiefe der Kugel im KEV (rechts) in Abhängigkeit der Verdichtung

Basierend auf den Mörtelversuchen wurden Versuche am leichtverarbeitbaren Beton durchgeführt. Alle Betone wiesen ein vergleichbares Setzfließ-



maß von 630 ± 15 mm auf, die Kegelauslaufzeiten variierten zwischen 5 ($V_w/V_p = 1.6$) und 155 s ($V_w/V_p = 0.8$). Sie besaßen also eine annähernd konstante Fließgrenze τ_0 bei variabler Viskosität η_{pl} . Die Untersuchungen bestätigten die am Mörtel gewonnenen Ergebnisse hinsichtlich des Entlüftungs- und Sedimentationsverhaltens in Abhängigkeit der vorherrschenden plastischen Viskosität und der Art der Verdichtung. Sinkende Viskositäten des LVB führten, unabhängig von der Art der Verdichtung, zu sinkenden Luftporengehalten, jedoch zunehmenden Sedimentationserscheinungen. Erwartungsgemäß sanken die Luftporengehalte und stiegen die Sedimentationserscheinungen durch die Verdichtung (Vibration C), verglichen mit den Werten ohne Verdichtung (Vibration 0).

LVB für den sicheren baupraktischen Einsatz

Die Untersuchungen ergaben zwei gegenläufige Effekte. Niederviskose Mischungen entlüfteten bereits bei geringer Verdichtungsleistung, hochviskose Mischungen weisen dagegen eine gesteigerte Robustheit gegen Überverdichtung auf. Zur Veranschaulichung sind in Bild 3 (links LVM, rechts LVB) die ermittelten LP-Gehalte den Ergebnissen der Sedimentationstests gegenübergestellt.

Bild 3 verdeutlicht, dass ein Teil der Mischungen mit der gewählten Verdichtungsleistung hervorragend für den baupraktischen Einsatz geeignet ist. Sie entlüfteten ausreichend bei gleichzeitiger Mischungsstabilität (Bild 3, grauer Quadrant, links unten). Die weiteren Mischungen hätten optimiert werden müssen, um auch in der Praxis eingesetzt werden zu können. So entlüfteten einige Rezepturen trotz unüblich starker Verdichtung (Vibration B) nicht ausreichend (Bild 4; linker oberer Quadrant). Andere entlüfteten dagegen bereits ohne externe Verdichtung (Vibration 0) ausreichend, sedimentierten jedoch bei üblichen Verdichtungsleistungen (Bild 3, rechter unterer

Quadrant). Ein Mörtel wies noch keine ausreichende Entlüftung, jedoch eine starke Sedimentation auf (Bild 3, grauer Quadrant rechts oben). Der baupraktische Einsatz einer solchen Rezeptur erscheint derzeitig problematisch.

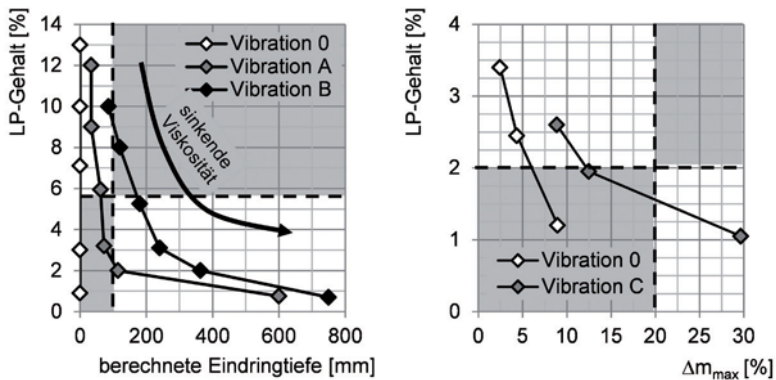


Bild 3: Zusammenhang zwischen LP-Gehalt und Eindringtiefe der Kugel im KEV im LVM (links) bzw. maximaler Grobkornabweichung Δm_{\max} vom Probenmittel im LVB (rechts) in Abhängigkeit der Verdichtung

Schlussfolgerung

Die Untersuchungen belegen den direkten Zusammenhang zwischen der plastischen Viskosität von LVB und deren Entlüftungs- sowie Sedimentationsverhalten während der Verdichtung. Niederviskose Mischungen entlüften bereits bei geringer Verdichtungsleistung, hochviskose Mischungen weisen dagegen eine gesteigerte Robustheit gegen Überverdichtung auf. Die Untersuchungen legen die Basis, um exakte Empfehlungen hinsichtlich einer auf den jeweiligen LVB angepassten Verdichtung abzugeben. Diese Empfehlungen beziehen sich dann nicht mehr nur auf die Konsistenz der LVB, sondern berücksichtigen auch deren Viskosität. Dieses Vorgehen ist nötig, um auf der Baustelle zielsicher einen ausreichend entlüfteten, jedoch mischungsstabilen LVB einsetzen zu können.

Literaturverzeichnis

- /1/ Olbrecht, Moser. Entmischung von Beton durch Überverdichtung. Tec21 130 (2004) 44, S. 13-16
- /2/ Petrou, Et Al. A unique experimental method for monitoring aggregate settlement in concrete. CCR 30 (2000) 5, S. 809-816
- /3/ Safawi, Iwaki, Miura. The segregation tendency in the vibration of high fluidity concrete. CCR 34 (2004) 2, S. 219-226
- /4/ Olbrecht. Einfluss des Vibrierens auf die Festbetoneigenschaften. Schweizer Baublatt 63/64 (1997), S. 4-7
- /5/ Safawi, Iwaki, Miura. A study on the applicability of vibration in fresh high fluidity concrete. CCR 35 (2005) 9, S. 1834-1845
- /6/ Remex Deutschland AG. aaton. Leicht verdichtbare und selbstverdichtende Betone. www.cemex.de; 11.06.2012
- /7/ Verein Deutscher Zementwerke e.V (Hrsg); Kampen. Bereiten und Verarbeiten von Beton, Merkblatt B7. (2011)
- /8/ DIN 1045-2:2008-08. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 2: Beton, Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. (2008)
- /9/ Vogel. Eine Messzelle für Spezialmörtel. www.vogel-labor.de; 11.06.2012
- /10/ Lowke, Schießl. Schnelltest zur Bestimmung der Sedimentationsneigung selbstverdichtender Betone. beton 57 (2007) 3, S. 86-90
- /11/ Kränkel, Lowke, Gehlen. Direct and Indirect Determination of the Segregation Resistance of SCC. Proceedings of SCC2010 (2010), K. H. Khayat, and D. Feys, eds., Springer, S. 603-610
- /12/ Kordts, Breit. Combined test method for assessing the workability of SCC – flow cone. Concrete Technology Reports 2004-2006 (2007), S.7-15
- /13/ Kraenkel, Lowke, Gehlen. Entlüftungsverhalten und Mischungsstabilität leicht verarbeitbarer Betone während des Verdichtungsprozesses. 18. ibausil (2012), Band 2, S. 0106-0113
- /14/ Kraenkel, Lowke, Rosa, Gehlen. Deaeration and segregation tendencies of highly flowable concrete owing to vibration. International Conference on Advances in Cement and Concrete Technology in Africa (2013), S. 575-583