

Prüfverfahren zur Bewertung der Mischungsstabilität von Beton unter Rütteleinwirkung

Christoph Begemann¹, Michael Haist¹ und Ludger Lohaus¹

¹*Leibniz Universität Hannover, Institut für Baustoffe, Hannover, Deutschland*

KURZFASSUNG:

Die Mischungsstabilität von Beton stellt eine wichtige Frischbetoneigenschaft dar, um insbesondere unter herausfordernden Betonierbedingungen eine zielsichere Herstellung von Betonbauteilen sicherzustellen. Jedoch existiert aktuell kein geeignetes Prüfverfahren, um die Mischungsstabilität im Rahmen des Bauprozesses quantitativ zu erfassen und zu bewerten.

Der vorliegende Beitrag zeigt, dass der aus dem Bereich der Selbstverdichtenden Betonen bekannte „Auswaschversuch“ so modifiziert werden kann, dass er auch für übliche Rüttelbetone geeignet ist. Entscheidend hierfür ist die Berücksichtigung und genaue Definition der eingebrachten Rüttel-einwirkung, um eine Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse sicher zu stellen. Erste Vergleichsuntersuchungen zeigen, dass mit Hilfe der Prüfergebnisse bei vergleichbarer Rütteleinwirkung auch eine Prognose der Sedimentation im Bauteil möglich ist.

Keywords: Mischungsstabilität, Sedimentation, Prüfverfahren, Verdichtung

ABSTRACT:

The stability of concrete represents an important feature of fresh concrete in order to ensure a targeted production of concrete components, especially under challenging processing conditions. However, there exists currently no suitable test method to test and evaluate the mixing stability of fresh concrete during the construction process.

The present article shows that the "washout-test", known from the field of self-compacting concrete, can be transferred to conventional concrete. Decisive for this is the consideration and exact quantification of the vibrations introduced during the test and ensuring a reproducibility and comparability of the test results. Initial comparative investigations between construction components and results of the test method show that with comparable vibration a forecast from test results to sedimentation in the component is also possible.

Keywords: Mixture stability, segregation, Sedimentation, test methods, compaction

1 EINLEITUNG

Seit Beginn der 90er Jahre hat der Betonbau und damit auch die Betontechnologie einen enormen Wandel vollzogen. Stand zunächst die Weiterentwicklung der Festigkeit und Dauerhaftigkeit ((U)HPC) und die Steigerung der Fließfähigkeit (SVB) im Vordergrund, wurden in den letzten Jahren die Erfahrungen und Möglichkeiten aus der Entwicklung dieser Sonderbetone auch auf den konventionellen Betonbau übertragen. Um den erweiterten Frischbetonanforderungen, die sich unter anderem aus der Verarbeitung bei schwierigen Betonierbedingungen ergeben (z. B. engliegende Bewehrung, hohe Anzahl an Einbauteilen, filigrane und komplexe Bauteilgeometrie), gerecht zu werden, werden zunehmend weiche bis fließfähige Betone eingesetzt.

Durch die zunehmende Vielfalt an Ausgangsstoffen bei Zementarten, Zusatzstoffen und Zusatzmitteln können die erforderlichen Frischbetoneigenschaften maßgeschneidert für eine spezielle Bauaufgabe eingestellt werden. Insbesondere die Verwendung von modernen PCE-Fließmitteln führte dazu, dass einerseits weichere Betone verwendet wurden und andererseits im Bereich der Konsistenzklassen F3 der Zementgehalt über Wassereinsparungen und damit der Leimgehalt reduziert wurde. Gleichzeitig werden solche Betone unweigerlich sensibler gegenüber Ungenauigkeiten bei der Dosierung oder gegenüber Störeinflüssen bei der Verarbeitung, so dass mit diesen betontechnologischen Änderungen auch die Gefahr von Entmischungen ansteigt (Lohaus 2018a). Diese Problematik hat bereits zu erheblichen Schäden geführt, vgl. (Westendarp 2015, Wagner 2016).

Daneben kann auch durch eine nicht sachgemäße Überverdichtung eine Entmischung des Betons auftreten (Olbrecht et al. 1997). Da aktuell jedoch nur qualitative Regeln für die Verdichtung existieren, ist die Vermeidung einer Überverdichtung vor allem von der Erfahrung des ausführenden Personals abhängig.

Für die Herstellung von Betonbauteilen mit einem planmäßig homogenen Eigenschaftsprofil ist es notwendig, die Mischungsstabilität als zusätzliche Frischbetoneigenschaft im Entwurfs-, Herstell- und Verarbeitungsprozess stärker zu berücksichtigen (Lohaus 2018b). Somit sind Maßnahmen zu treffen, um eine ausreichend Mischungsstabilität im Beton zu erzielen und die Verarbeitung an diese anzupassen (z. B. Pump- und Rütteleinwirkung). Dafür ist es erforderlich, die Mischungsstabilität messbar und bewertbar und im Bauprozess überprüfbar zu machen.

Jedoch existieren aktuell noch keine Prüfverfahren, die es ermöglichen, die Mischungsstabilität unter Rütteleinwirkung quantitativ zu erfassen, zu bewerten und zu prüfen. Daher ist es das Ziel mehrerer Forschungsvorhaben am Institut für Baustoffe, geeignete Prüfverfahren für die Mischungsstabilität zu entwickeln, vgl. z. B. (Lohaus et al. 2016, Lohaus et al. 2017, Lohaus und Begemann 2018, Breitenbücher et al. 2019). Der vorliegende Beitrag konzentriert sich vor allem auf die Entwicklung eines Prüfverfahrens für die Sedimentation der groben Gesteinskörnung in Folge Rütteleinwirkung. Dazu werden zunächst die für die Mischungsstabilität relevanten Prozesse der Entmischung beschrieben. Im Anschluss wird der aktuelle Stand zur Entwicklung eines Prüfverfahrens für die Sedimentationsstabilität vorgestellt. Für die Anwendbarkeit des Prüfverfahrens ist es erforderlich, dass die Ergebnisse der Laborproben auf Bauteilebene übertragen werden können. Hierfür wurden erste Vergleichsuntersuchungen zwischen der Sedimentation im Prüfverfahren und bei einer herkömmlichen Verdichtung im Bauteil durchgeführt.

2 ENTMISCHUNGSPHÄNOMENE

Eine Entmischung tritt dann auf, wenn es zu einer Trennung von einer flüssigen und einer festen Phase im Beton kommt. Je nach Betrachtungsebene kann zwischen verschiedenen Phasentrennungen unterschieden werden, vgl. Bild 1.

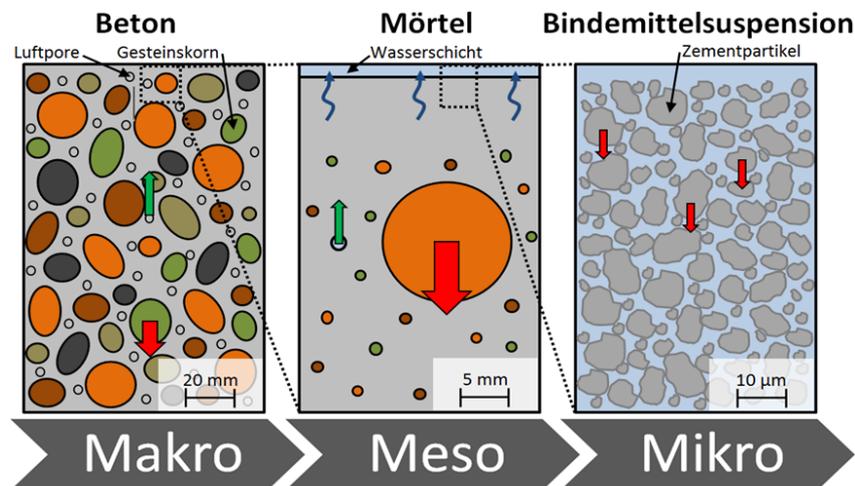


Bild 1: Darstellung der Entmischungsphänomene in Abhängigkeit der betrachteten Ebene und der sich trennenden Phasen, vgl. (Begemann et al. 2018)

Während des Einbauprozesses ist es das Ziel, den Beton entweder durch das Fließen unter Schwerkraft oder durch externe eingebrachte Vibrationen zu entlüften und damit eingeschlossene Luft aus den Beton auszutreiben. Schon dieser Vorgang stellt eine, wenn auch erwünschte, Form der Entmischung dar. Neben diesem gewünschten Vorgang treten allerdings auch unerwünschte Entmischungsformen auf. So kann es auf Makroebene zu einer Trennung der groben Gesteinskörnung (feste Phase) vom Mörtel (flüssige Phase) kommen. Dieser Vorgang wird als Sedimentation beschrieben. Auf Mesoebene kann es im Mörtel zu einer Trennung von groben Sandpartikeln und dem Leim kommen. Außerdem kann auf Mikroebene eine Absonderung von Wasser aus dem Leim beobachtet werden. Im Rahmen dieses Betrags steht die Sedimentation des Grobkorns im Fokus.

3 BISHERIGE VORARBEITEN

Das übergeordnete Ziel muss es demnach sein, den Beton so einzustellen und zu verarbeiten, dass ein Austreiben der eingebrachten Luft ermöglicht und eine weitere Entmischung möglichst verhindert wird. Um dies zu ermöglichen, muss die Sedimentationsstabilität unter Rütteleinwirkung messbar und bewertbar gemacht werden. Jedoch zeigen aktuelle Schadensfälle und Schwierigkeiten mit der Sedimentationsstabilität, z. B. an Wasserbauwerken, Brückenbauwerken oder Räumlerlaufbahnen, dass dies insbesondere unter herausfordernden Betonierbedingungen noch nicht zielsicher gelingt, vgl. z. B. (Westendarp 2015, Wagner 2016). Das bis heute verwendete Verfahren zur Charakterisierung und Prüfung von Betonen, das Ausbreitmaß in Kombination mit dem Lieferschein, ist nicht mehr ausreichend, um die Mischungsstabilität und hierbei die Sedimentationsstabilität, insbesondere für weichere Betone sicher zu erfassen. Dies liegt auch daran, dass das Ausbreitmaß das Betonverhalten unter Verdichtung nicht abbildet. So kann es vorkommen, dass auf Basis des Ausbreitmaßes

augenscheinlich stabile Betonzusammensetzungen während der Verarbeitung unterschiedlich stark sedimentieren (Lohaus et al. 2018b). Daher bedarf es eines zusätzlichen Prüfverfahren, um die Mischungsstabilität auch im Bereich der Normalbeton sowohl in der Eignungs-, als auch in der Annahmeprüfung bewertbar zu machen.

In der Vergangenheit wurden verschiedene Prüfverfahren vor allem im Bereich der Selbstverdichtenden Betone (SVB) entwickelt. Einen Überblick über verschiedene Verfahren liefert z. B. (Müller 2012). In Deutschland haben sich der Auswaschversuch und das Sedimentationsrohr sowie der Siebversuch für die Bewertung der Sedimentationsneigung von SVB etabliert (DAfStb 2003, DAfStb 2012), wobei das Sedimentationsrohr auf Grund der Versuchsdauer nur für die Eignungsprüfung geeignet ist. Im Rahmen von Vergleichsuntersuchungen zwischen verschiedenen Verfahren zeigte sich, dass der Auswaschversuch gut geeignet zu sein scheint, auch unter Rütteleinwirkung eine Bewertung der Sedimentationsstabilität in kurzer Zeit zu ermöglichen. Des Weiteren scheint das Sedimentationsrohr als Referenzprüfung in der Eignungsprüfung gut geeignet zu sein, um einen umfassenden qualitativen visuellen Eindruck zu erhalten. Quantitative Auswertungen sind jedoch ebenfalls möglich.

4 UNTERSUCHUNGEN

4.1 *Untersuchungskonzept*

Ziel der nachfolgenden Untersuchungen war es, die Prüfung mit dem Auswaschversuch und dem Sedimentationsrohr so weiter zu entwickeln, dass auch eine Bewertung der Sedimentationsneigung von Normalbeton unter Rütteleinwirkung möglich ist. Hierzu wurden folgende Schritte bearbeitet:

- Festlegung eines Prüfablaufes unter Berücksichtigung der Verdichtungseinwirkung
- Untersuchung des Einflusses und genaue Festlegung der Verdichtungseinwirkung
- Überprüfung der Anwendbarkeit des Verfahrens für typische Normalbetone
- Überprüfung der Übertragbarkeit der gemessenen Ergebnisse auf die Entmischung im Bauteil

4.2 *Versuchsdurchführung*

4.2.1 *Verwendete Betone*

Für die Untersuchungen wurden verschiedene Betonzusammensetzungen mit unterschiedlichen rheologischen Eigenschaften verwendet. Die Betone variierten sowohl in ihrem Leimgehalt, ihren Leimeigenschaften (w/z_{eq} , V_z/V_{zs}) und ihrem Größtkorn, wobei die Sieblinie zwischen den Regelsieblinie A/B gewählt wurde. Als Gesteinskörnung kam unterschiedlich Rundzuschlag zur Anwendung. Die Ausbreitmaße der Betone lagen zwischen 450 mm und 600 mm, da vor allem im Bereich der weichen bis fließfähigen Betone in der Praxis Schwierigkeiten beobachtet wurden, vgl. z. B. (Olbrecht 1997), Wagner (2016). Für die Herstellung der Betone wurden weitgehend einheitliche Ausgangsstoffe aus dem Großraum Hannover verwendet.

4.2.2 *Modifizierung des Auswaschversuchs und des Sedimentationsrohres*

Für die Anwendung des Auswaschversuchs und des Sedimentationsrohres für Normalbetone mussten die Verfahren durch eine zusätzliche Rütteleinwirkung modifiziert werden. Das grundsätzliche Vorgehen zur Durchführung der Prüfungen wurde so beibehalten, wie in der SVB-Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (Fassung 2003) beschrieben, vgl. (DAfStb 2003). Auf die genaue Festlegung der Rütteleinwirkung auf die Probekörper wird später detailliert eingegangen. Nach seiner Herstellung wurde der Beton zunächst hinsichtlich seiner Frischbetoneigenschaften charakterisiert. Im

Anschluss wurde die Prüfung der Sedimentationsstabilität mit dem Auswaschversuch und dem Sedimentationsrohr jeweils unter Rüttleinwirkung durchgeführt.

Zunächst wurden alle Probekörper in einem Winkel von 45 Grad befüllt, glatt abgezogen und anschließend in definierter Weise unterschiedlich lange verdichtet. Die Sedimentationsrohre wurden danach erschütterungsfrei gelagert. Die dreiteiligen Auswaschrohre, vgl. Bild 5, wurden unmittelbar nach der Verdichtung in die drei vorgesehenen Segmente mittels eines Schiebers geteilt und die Rückstände der einzelnen Segmente über einem Sieb ausgewaschen. Hierzu wurden Siebe einer Siebweite von 4, 8 und 16 mm verwendet, wobei üblicherweise zur Bewertung der Betone die Siebrückstände auf der nächstkleineren Siebweite zum Größtkorndurchmesser herangezogen wurde. Die Siebrückstände der einzelnen Siebe wurden aufgefangen und nach augenscheinlich ausreichendem Abtropfen gewogen. Die gemessenen Siebrückstände m_i jedes Segmentes wurden nach Gleichung 1 auf den Mittelwert \bar{m}_n der Siebrückstände bezogen.

$$\Delta m_a = \left(\frac{m_i}{\bar{m}_n} - 1 \right) * 100 [M - \%] \quad (1)$$

Das Vorgehen ist in Bild 2 nochmal dargestellt. Die Ergebnisse Δm_a sind als jeweilige Abweichung vom Mittel der groben Gesteinskörnung über die einzelnen Segmente aufgetragen, vgl. Bild 2. Maßgeblich für die Beurteilung der Entmischung ist die Abweichung vom Mittel im oberen Segment, die in den weiteren Darstellungen als Bewertungsgröße herangezogen wird.

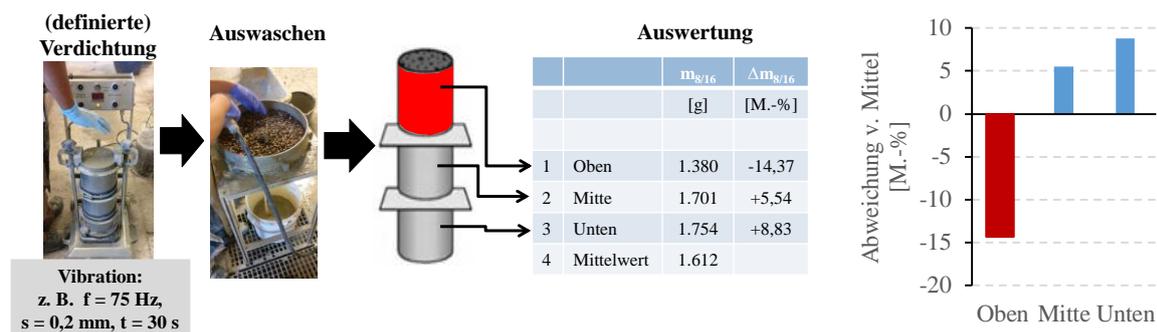


Bild 2: Darstellung des Versuchsablaufs

Nach der Erhärtung der Sedimentationsrohre wurden diese in Längsrichtung geteilt, um an Hand der Schnittbilder die Sedimentationstiefe zu ermitteln. Dies kann sowohl visuell mittels einer Schieblehre als auch durch eine bildanalytische Auswertung von Fotoaufnahmen erfolgen, wie z. B. in Lohaus et al. 2016) beschrieben.

4.3 Einfluss der Verdichtungseinwirkung

4.3.1 Einfluss des Verdichtungsprozesses aus dem Prüfaufbau

Um den Einfluss der Rüttleinwirkung auf das Prüfergebnis zu bewerten, wurden sowohl Untersuchungen zum Einfluss der Verdichtungsparameter sowie Untersuchungen zum Prüfaufbau, wie z. B. die Anbindung des Probekörpers an das Prüfgerät, durchgeführt.

Zunächst wurden dafür die üblichen Prüfaufbauten wie für SVB, vgl. Bild 3, auf einen herkömmlichen Laborverdichtungstisch aufgestellt. Jedoch kommt es dabei zu deutlichen Unterschieden in der Prüfgröße Δm_a , wie Bild 4 zeigt. Dies kann auf den unterschiedlichen Anpressdruck sowie auf impulsartige Schläge zurückgeführt werden, wenn während der Verdichtung der Kontakt zum Rütteltisch kurzfristig unterbrochen ist. Eine direkte Anbindung des Probekörpers, z. B. durch eine

magnetische Aufspannung, konnte diesen Einfluss deutlich reduzieren und führte zu geringeren Sedimentationen mit geringeren Streuungen. Da es in der Praxis üblicherweise einen direkten Kontakt zwischen Beton und Rüttelflasche oder Beton und Schalung gibt, wird eine direkte und definierte Anbindung an den Rütteltisch gewählt.

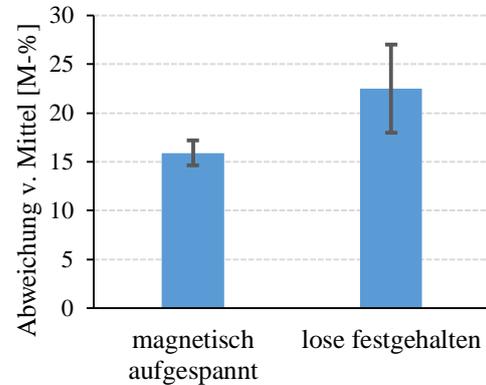


Bild 3: dreiteiliger Sedimentationstopf aus Stahl

Bild 4: Einfluss der Aufspannung auf den Rütteltisch

Einen weiteren Einfluss auf den Messwert hat die Wahl des Rütteltisches, wie Bild 5 zeigt. Die Verdichtung stellt eine erzwungene Schwingung dar, die durch die Parameter Frequenz, Amplitude, Richtung der Schwingung und Dauer der Einwirkung beschrieben werden kann. Für die dargestellten Versuche wurde ein Beton auf drei unterschiedlichen Rütteltischen im Labor verdichtet.

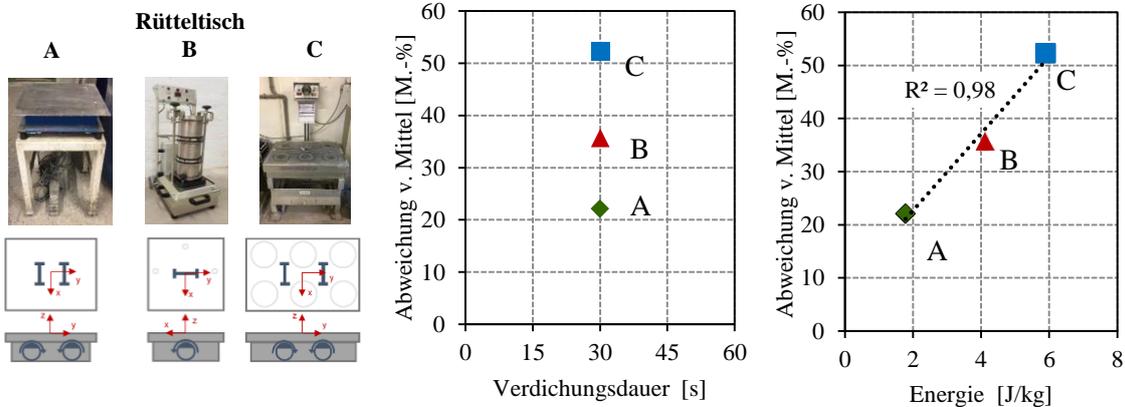


Bild 5: Einfluss der Rütteltischbauart, auf die Sedimentationsneigung bei gleicher Verdichtungsdauer und Korrelation zwischen der eingebrachten Verdichtungsenergie und der Sedimentationsneigung

Die verwendeten Rütteltische unterschieden sich in der Anordnung und der Anzahl der Schwingmassen, wodurch unterschiedlich gerichtete Schwingungen und unterschiedliche Schwingungsamplituden erzeugt werden. Trotz fester Aufspannung, gleicher Verdichtungsfrequenz von ca. 75 Hz und gleicher Verdichtungsdauer von 30 Sekunden wurden teilweise deutlich Unterschiede in der Sedimentation ermittelt. Eine weitergehende Vermessung der Rütteltische hinsichtlich der erzeugten Schwingungen und eine Auswertung (in Anlehnung an Navarette et al. 2014) des daraus resultierenden Energieeintrags zeigte, dass die ermittelte Sedimentation mit der Schwingungsamplitude und mit der eingetragenen Energiemenge korreliert, vgl. Bild 5 (rechts).

Damit wird deutlich, dass es erforderlich ist, die Verdichtungseinwirkung genau zu definieren und im besten Fall durch einen festen Prüfaufbau mit festen Schwingungsparametern (Frequenz und Amplitude) einzustellen.

Für die weitere Entwicklung wurde daher ein Prüfgerät verwendet, das durch einen Rütteltischhersteller in Kooperation mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) entwickelt wurde, vgl. Bild 6 (Spörel 2018). Das Gerät kombiniert das Prüfgefäß für den Auswaschversuch mit einem Rütteltisch. Dabei wird das Prüfgefäß über einen speziellen Haltemechanismus definiert mit dem Rütteltisch verbunden. Das Gerät erlaubt es, die Frequenz und die Verdichtungsdauer frei einzustellen. Darüber hinaus lässt sich die Amplitude über die Einstellung der Schwungscheiben am Motor des Tisches variieren. Vorversuche zeigten, dass eine ausreichende Anbindung des Auswaschtopfes bei einem Anzugmoment der Schrauben von 12 Nm erzielt wird. In den Untersuchungen wurde daher auf ein mindestens aufzubringendes Anzugmoment geachtet.

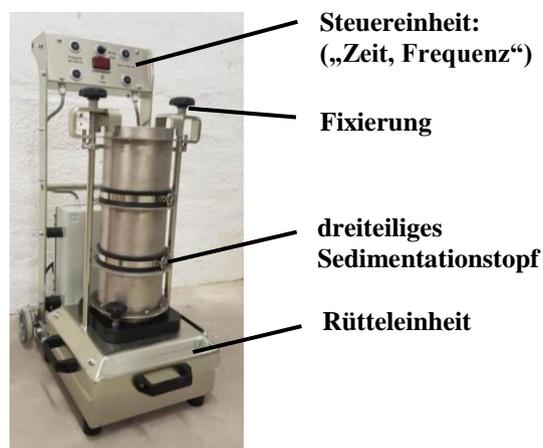


Bild 6: verwendetes Sedimentations-Messgerät

4.3.2 Einfluss der Verdichtungsparameter: Frequenz und Dauer

Um den Einfluss der weiteren Verdichtungsparameter wurde im Rahmen einer Parameterstudie die Verdichtungsintensität durch Variation der Verdichtungsdauer (15, 30, 45, 60 Sekunden) und der Frequenz (50 Hz, 75 Hz, 100 Hz) verdichtet. Die Schwingungsamplitude lag bei ca. 0,22 mm. Bild 7 zeigt beispielhaft den Verlauf der Sedimentation Δm_a .

Es zeigt sich, dass mit zunehmender Rütteldauer die Sedimentation zunimmt. Dies erfolgt nahezu linear, bis es zu einem abflachenden Verlauf der Kurven kommt und sich diese einer Asymptoten annähern. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass mit zunehmender Sedimentation die Gesteinskörnungskontakte zunehmen und der überschüssige Leim aufsteigt. Letztendlich kommt es zu einer engen Lagerung der Gesteinskörnung. In diesem Grenzzustand ist trotz zunehmender Rütteldauer keine weitere Sedimentation. Der dargestellte prinzipielle Verlauf kann für alle untersuchten Betone festgestellt werden. Entscheidend für die Bewertung des Sedimentationswiderstands ist der lineare Bereich, da in diesem Bereich die eigentliche Sedimentation stattfindet. Die in diesem Bereich ermittelte Geschwindigkeit, mit der die Sedimentation unter Rüttelwirkung abläuft, stellt eine charakteristische Betoneigenschaft dar und ist als Sedimentationsrate e_a definiert, vgl. Gleichung 2.

$$e_a = \frac{\Delta m_a}{\Delta t} [M - \%/s] \quad (2)$$

Der Kehrwert der Sedimentationsrate stellt den Sedimentationswiderstand dar, vgl. Gleichung 3.

$$S_a = \frac{1}{e_a} [s/M - \%] \quad (3)$$

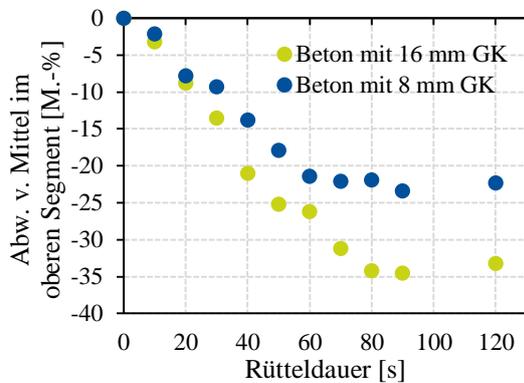


Bild 7: Prinzipieller Verlauf der Sedimentation in Abhängigkeit der Rütteldauer im Sedimentations-Prüfverfahren für Betone mit einem Größtkorn von 8 mm und 16 mm bei einer Frequenz von 75 Hz.

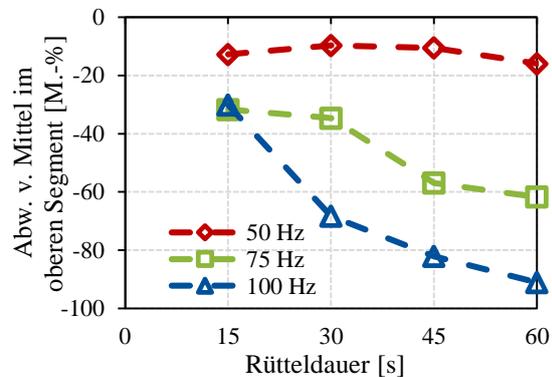


Bild 8: Einfluss der Frequenz und Rütteldauer auf die Sedimentation im Sedimentations-Prüfverfahren für einen Beton mit einem Größtkorn von 32 mm.

Neben der Rütteldauer hat auch die Prüffrequenz einen deutlichen Einfluss auf die Sedimentation, wie Bild 8 zeigt. Mit steigender Frequenz wird eine größere Sedimentation festgestellt. Im Rahmen der von Breitenbücher et al. 2019 durchgeführten Untersuchungen zeigte sich, dass bei einer Amplitude von 0,22 mm eine Frequenz von 75 Hz die höchste Trennschärfe aufwies. Andere Frequenzen führten entweder nur zu sehr geringen Sedimentationsunterschieden (bei 50 Hz) oder bereits bei geringen Rütteldauern zu sehr starken Sedimentationen (bei 100 Hz).

4.4 Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit

4.4.1 Reproduzierbarkeit bei gleichem Rüttelgerät

Für die Anwendbarkeit des Verfahrens ist es zwingend erforderlich, dass eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sichergestellt wird. Daher wurden an Betonen mit einem Größtkorn von 8, 16 und 32 mm jeweils drei Wiederholversuche bei einer Frequenz von 75 Hz, einer Amplitude von 0,22 mm und einer Verdichtungsdauer von 45 Sekunden durchgeführt. Im Anschluss wurde der Mittelwert der Abweichungen vom Mittel im oberen Drittel und die Standardabweichung berechnet. Die untersuchten Betone unterschieden sich neben dem Größtkorn in ihrer Leimmenge. Die Leimzusammensetzung wurde konstant gehalten, wobei die Sieblinien zwischen den Regelsieblinie A/B eingestellt wurden. Bild 8 zeigt, dass die Standardabweichung für die Betone mit Größtkorn 8 mm und 16 mm maximal 3,5 M.-% betrug und damit in einem annehmbaren Bereich lag.

Betone mit einem Größtkorn von 32 mm wiesen eine höhere Standardabweichung bis zu 7 M.-% auf. Allerdings fiel die gemessene Sedimentation auch höher aus. Das Größtkorn übt demnach einen maßgeblichen Einfluss auf die Wiederholgenauigkeit aus. In weiteren Untersuchungen (Breitenbücher et al. 2019) zeigte sich, dass bereits die Verschiebung eines einzelnen groben Korns vom oberen Segment in das mittlere Segment eine Veränderung von 5 M.-% bei einem Größtkorn von 32 mm ausmachen kann.

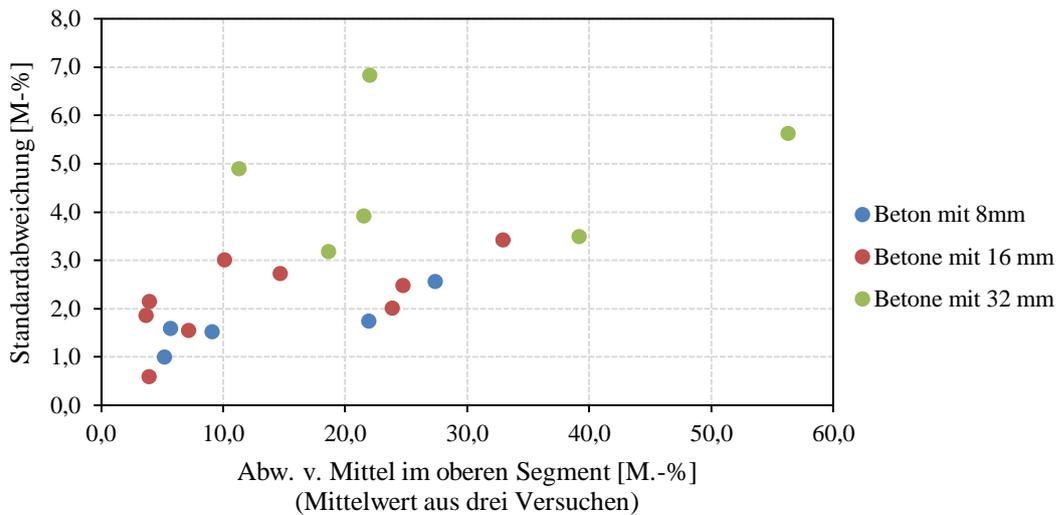


Bild 8: Vergleich der Standardabweichung für Betone mit einem Größtkorn von 8, 16 und 32 mm

Für ein Größtkorn von 8 mm und 16 mm lag der Einfluss unter 1 M-%. Um in Zukunft die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse auch bei einem Größtkorn von 32 mm sicherstellen zu können, werden aktuell verschiedenen Lösungsansätze verglichen.

4.4.2 Vergleichbarkeit zwischen Auswaschversuch und Sedimentationsrohr

Um zu überprüfen, ob die gemessene Sedimentation im Auswaschversuch mit der augenscheinlichen Sedimentation im Prüfkörper korreliert, wurden in einem weiteren Vergleich die im Auswaschrohr ermittelte Sedimentation mit der Sedimentationstiefe im Sedimentationsrohr gegenübergestellt. Bild 9 zeigt eine Auswahl der Ergebnisse.

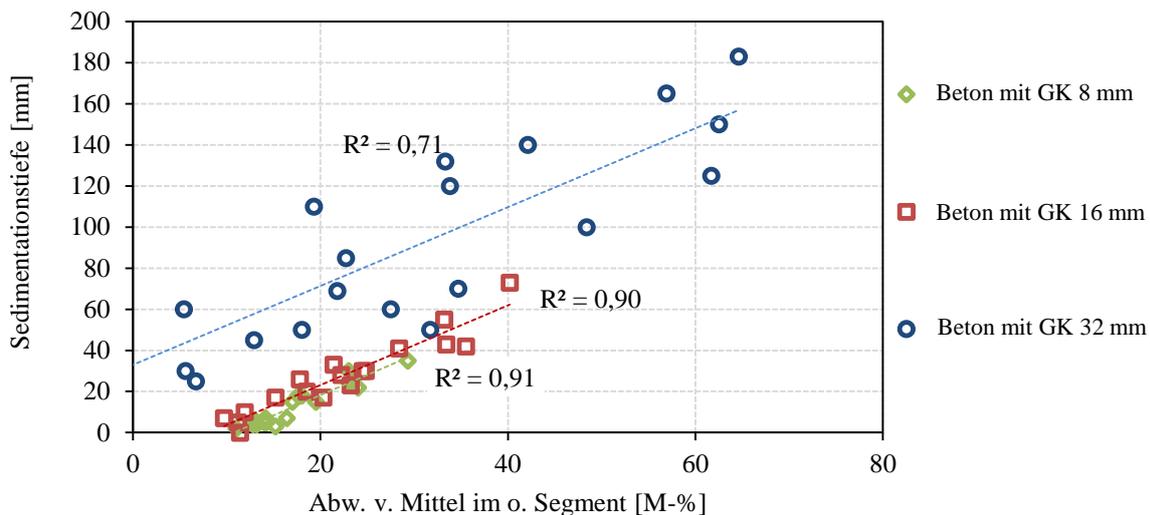


Bild 9: Vergleich der im Auswaschversuch ermittelten Sedimentation mit der am Sedimentationsrohr gemessenen Sedimentationstiefe für Betone mit einem Größtkorn von 8 mm und 16 mm aus dem Forschungsvorhaben Lohaus 2018b) und Betonen mit Größtkorn von 32 mm aus dem Forschungsvorhaben (Breitenbücher et al 2019)

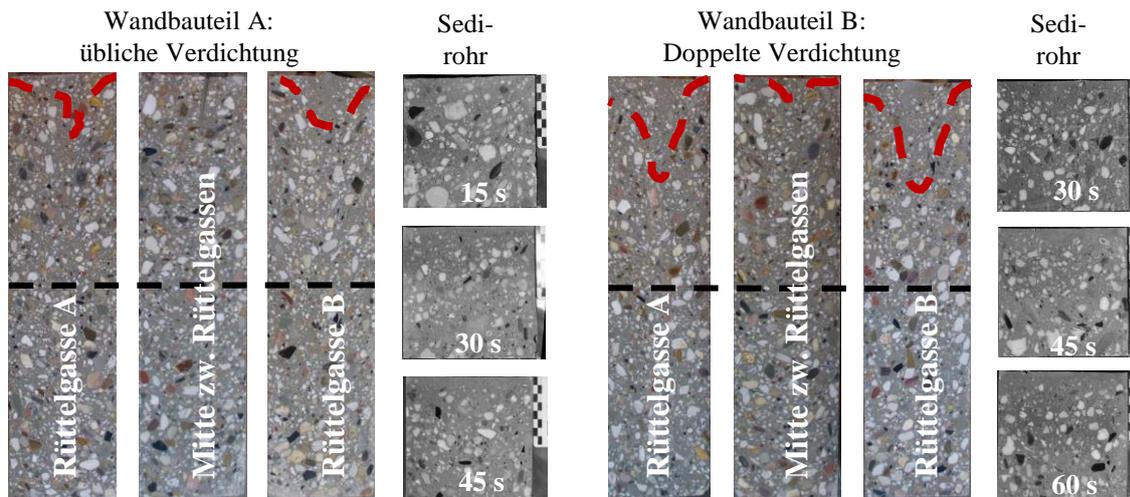


Bild 11: Schnittbilder der Kleinbauteile mit normkonformer (links) und doppelter Verdichtungsdauer (rechts), sowie der jeweils parallel hergestellten Sedimentationsrohre bei ein Verdichtungszeit von 15, 30, 45 Sek. (links) und 30, 45, 60 Sek. (rechts); verwendete Rüttelflasche: $d=36$ mm, $f=200$ Hz; Rüttelparameter des Rütteltisches: $f=75$ Hz, $s=0,22$ mm

Die Schnittbilder sind in Bild 11 zugehörig zu den jeweiligen Bauteilen dargestellt. In Bild 12 sind die anhand der Schnittbilder ermittelten Sedimentationstiefen mit denen der Sedimentationsrohre über die Rütteldauer aufgetragen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Kurvenläufe beider Betonagen.

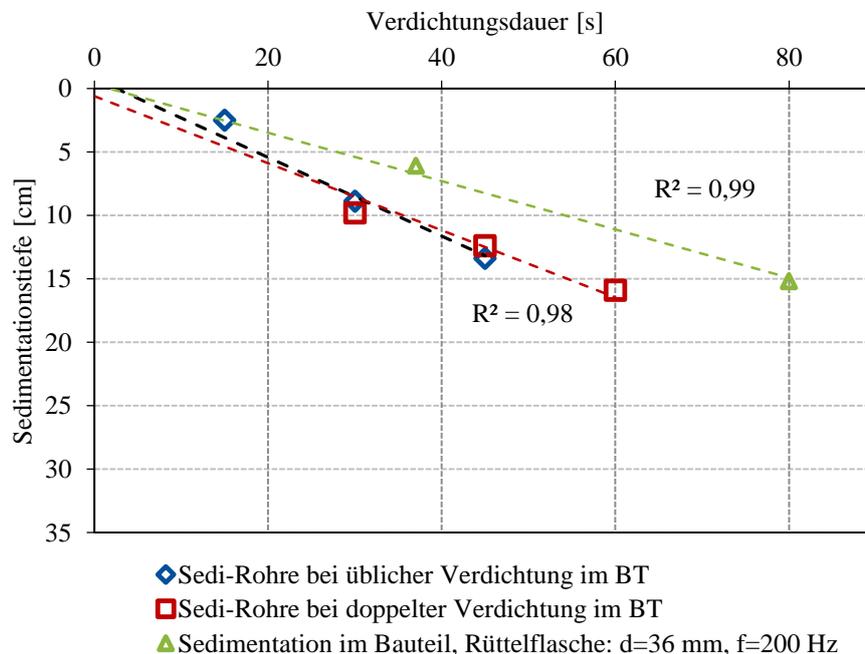


Bild 12: Vergleich der gemessenen Sedimentation im Sedimentations-Prüfgerät und in den Rüttelgassen der erstellten Bauteile

In Bild 12 sind ebenfalls die gemittelten Sedimentationstiefen in der Mitte der Rüttelgassen aus den beiden Bauteilen über die Rütteldauer aufgetragen (grün). Aus einem Vergleich mit dem Kurvenverlauf

mit der Sedimentation im Prüfverfahren wird deutlich, dass für den dargestellten Versuch das Sedimentations-Prüfgerät höhere Sedimentationen prognostiziert als tatsächlich im Bauteil auftreten. Damit liegt das Prüfverfahren in diesen Untersuchungen auf der sicheren Seite. Es kann weiter geschlussfolgert werden, dass das Prüfverfahren bei gleicher Rütteldauer im Vergleich zu der verwendeten Rüttelflasche eine größere Einwirkung auf den Beton ausübt. Aktuell werden weitere umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, bei denen die eingebrachte Verdichtungsleistung verschiedener Rüttelflaschen mit der Rüttelwirkung im Sedimentations-Prüfgerät verglichen wird. Ziel der Untersuchungen ist es, durch die Messung der Sedimentation im Prüfverfahren eine maximal zulässige Verdichtungsdauer mit der Rüttelflasche festzulegen.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Die Mischungsstabilität stellt zunehmend eine relevante Frischbetoneigenschaft insbesondere im Bereich weicher bis fließfähiger Betone dar. Um die Mischungsstabilität unter Rüttelwirkung sicherstellen zu können, bedarf es geeigneter Prüfverfahren, die diese Eigenschaft messbar und bewertbar sowie im Bauprozess überprüfbar machen. Das bisher in der Annahmeprüfung verwendete Ausbreitmaß reicht alleine nicht aus, da augenscheinlich stabile Zusammensetzungen unter Rüttelwirkung sehr unterschiedlich entmischen können. Der vorliegende Beitrag zeigt, dass der aus dem Bereich der Selbstverdichtenden Betone bekannte Auswaschversuch als Prüfverfahren auch für Betone unter Rüttelwirkung genutzt werden kann. Dafür ist es jedoch zwingend erforderlich, die Rüttelwirkung eindeutig zu definieren. Dies kann entweder mit Hilfe eines festen Versuchsaufbaus oder durch eine genaue Messung und Berücksichtigung der eingetragenen Verdichtungsenergie in die Bewertung der Ergebnisse erfolgen. Der Sedimentationswiderstand eines Betons kann letztendlich an Hand seiner Sedimentation über die Zeit, der sogenannten Sedimentationsrate beschrieben und mit weiteren Betonen verglichen werden. Letztendlich können so verdichtungssensible Betone von stabileren Betonen unterschieden werden. Im Rahmen von Vergleichsuntersuchungen zur Reproduzierbarkeit und Wiederholbarkeit konnte im Labormaßstab festgestellt werden, dass die Reproduzierbarkeit mit steigendem Größtkorn sinkt. Daher ist es notwendig, insbesondere bei Betonen mit einem Größtkorn von 32 mm, Möglichkeiten zu schaffen, wie diese Streuungen reduziert werden können. Der Vergleich des vorgestellten Prüfverfahrens mit der praxisüblichen Verdichtung an Kleinbauteilen zeigt, dass der Versuch für die hier vorgestellten Untersuchungen auf der sicheren Seite liegt. Aktuell werden Untersuchungen durchgeführt, um auch zwischen der Sedimentation im Prüfverfahren und der Sedimentation in Bauteilen mit einer Rüttelflasche eine bessere Vergleichbarkeit zu erzielen und somit auch Grenzen für die Verdichtungsdauer festlegen zu können.

DANKSAGUNG

Für die vollständige oder teilweise Unterstützung der vorgestellten Arbeiten danken die Autoren dem Deutschen Beton- und Bautechnik Verein E.V. (DBV), der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF), der Forschungsgemeinschaft Transport E.V. (FTB), der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), den unterstützenden Unternehmen aus der Wirtschaft, sowie dem Forschungspartner der Ruhr-Universität Bochum Herrn Prof. Rolf Breitenbücher und seinem Team.

LITERATUR

- Lohaus L., Begemann, C., Cotardo, D., Schack, T., Beyer, D. (2018): Robustheit – Schlüsselkompetenz für Hochleistungsbeton, Ludwig, H.-M. [Hrsg.], Tagungsband der 20. Internationalen Baustofftagung (ibausil), Bd. 1, S. 231-242, Weimar
- Westendarp, A. (2015): Probleme mit der Mischungsstabilität von Beton, BAW-Brief 01/2015, Karlsruhe
- Wagner, J.-P. (2016): Baustellenrelevante Leistungsmerkmale von Beton – Die zukünftige Qualitätssicherung im Betonbau, Beton, Bd. 66, Hf. 4, S. 144 - 146
- Olbrecht, H. (1997): Einfluss des Vibrierens auf die Festbeton-Eigenschaften, Schweizer Baublatt Band 63/64, S. 4-7
- Lohaus, L., Begemann, C., Cotardo, D. (2018): Mischungsstabilität fließfähiger Betone, Bd. 95, Hf. 4, S. 316 - 323
- Lohaus, L., Steinhäuser, H., Begemann, C. (2016): Annahmeprüfverfahren zur Beurteilung der Mischungsstabilität von fließfähigen Betonen, Abschlussbericht zum DBV-Forschungsvorhaben 301 Leibniz Universität Hannover, Hannover
- Lohaus, L., Cotardo, D. (2017): Pumpstabilität von Beton - Prüfverfahren zur Mischungsstabilität bei hohem Druck, Abschlussbericht zum DBV Forschungsvorhaben 308, Leibniz Universität Hannover, Hannover
- Breitenbücher, R., Lohaus, L., Begemann, C., Neumann, J. (2019): Prüfung der Sedimentationsstabilität von Beton unter Rütteln, Abschlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben S017 und DBV 310, im DAfStb-Arbeitskreis Frischbeton, gefördert durch BTB, DBV, BAW, Hannover / Bochum
- Florian Müller (2012), Design Criteria for low binder Self-Compacting Concrete, Phd-Thesis, School of Science and Engineering at Reykjavik University, Reykjavik
- DAfStb-Richtlinie (2003): Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie). Beuth-Verlag, Berlin
- DAfStb-Richtlinie (2012): Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie). Beuth-Verlag, Berlin
- Lohaus, L. und Begemann, C. (2018): Fließfähige Betone mit erhöhter Pump- und Rüttelstabilität - Betonentwurf, Verarbeitungstechnik, Regelung, Abschlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben 18345 N und DBV 304, Hannover / Berlin
- Navarrete, I., Lopez, M. (2016): Estimating the segregation of concrete based on mixture design and vibratory energy, Construction and Building Materials Bd. 122, S. 384-390
- Spörel, F. (2018): Anwendung eines Prüfverfahrens zur Ermittlung der Sedimentationssensibilität von Rüttelbeton, Ludwig, H.-M. [Hrsg.], Tagungsband der 20. Internationalen Baustofftagung (ibausil), S. 1-1089 - 1-1097, Weimar
- FISCHER, M. et al. (2017): Zur Entwicklung der Betonzusammensetzung, Beton, Bd. 67, H. 1+2, S. 16-19