

Anwendung eines Prüfverfahrens zur Ermittlung der Sedimentationssensibilität von Rüttelbeton

1. Einleitung

Die Entmischung von Frischbeton ist seit einigen Jahren in verschiedenen Baubereichen zunehmend in den Fokus gerückt. Auch im Verkehrswasserbau sind Probleme aufgetreten [1]. Bei der Entmischung von Frischbeton steht die Sedimentation der groben Gesteinskörnung im Bauteil derzeit im Blickpunkt. Derartige Entmischungsprozesse können sich negativ auf Festigkeits-, Verformungs- und Dauerhaftigkeitseigenschaften des Betons im Bauteil auswirken.

Im Vergleich zum Selbstverdichtenden Beton (SVB) wird bei Rüttelbeton die Entmischung nicht nur durch den Beton selbst beeinflusst. Der Verdichtungsprozess kann große Streuungen hinsichtlich Intensität und Dauer aufweisen. Anders als die Konsistenz und der Luftgehalt kann ein Beton derzeit nicht mit einem Prüfverfahren hinsichtlich seiner Sedimentationssensibilität beschrieben werden. Beim aktuell vorrangig angewendeten Versuch zur Ermittlung der Sedimentationssensibilität von Rüttelbeton handelt es sich um eine Adaption des Auswaschversuches der SVB-Richtlinie des DAfStb aus dem Jahr 2003 [2]. Das Verfahren wird in auf Rüttelbeton adaptierter, aber unterschiedlich gehandhabter Form zur Untersuchung von Rüttelbetonen eingesetzt [3, 4]. In den letzten 3 Jahren wurde das Verfahren im Bereich des Verkehrswasserbaus in der Praxis eingesetzt [5]. Die dort gewonnenen Erfahrungen und fortschreitende Erkenntnisse der Forschung haben das Potential, aber auch erforderliche Verfahrensoptimierungen aufgezeigt.

2. Zielsetzung und Untersuchungskonzept

Ein Prüfverfahren zur Beschreibung der Sedimentationssensibilität von Frischbeton kann verwendet werden, um den Beton bzw. eine bestimmte Betoneigenschaft zu charakterisieren. In einem nächsten Schritt können dann Grenzwerte zur Erfüllung gewünschter Eigenschaften festgelegt werden. Bei Rüttelbeton ist die im Prüfverfahren eingebrachte Rüttelenergie ein entscheidender Parameter. Ziel aktueller Untersuchungen ist die Erarbeitung einer geeigneten Prüf- und Auswertemethodik. Zu diesem Zweck erfolgen in der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Untersuchungen an Rüttelbetonen ohne und mit künstlichen Luftporen bei verschiedener Verdichtungsintensität. Parallel bearbeiten der Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum und das Institut für Baustoffe der Leibniz Universität Hannover durch die BAW, den BTB, den DAfStb sowie den DBV geförderte Untersuchungen.

3. Grundlagen

Durch das Rütteln des Frischbetons verändern sich die rheologischen Kennwerte. Die Fließgrenze wird herabgesetzt [6] und der Beton wird verdichtet. Dazu ist eine bestimmte Energie erforderlich, die insbesondere auch von den Betoneigenschaften und der Betonzusammensetzung abhängig ist. Frequenz und Amplitude bzw. Beschleunigung unter Last sind die Parameter des Rüttelgerätes, welche neben der Rüttelzeit die Verdichtung des Betons beeinflussen. Eine Kenngröße allein reicht nicht aus, um die Intensität zu beschreiben [7]. Eine kompakte Zusammenfassung der Erkenntnisse zur Betonverdichtung enthält [8].

Die auf den Beton einwirkende Energie fasst die Einflüsse aus Frequenz, Beschleunigung und Zeit zusammen und wird in [9] nach Gleichung 1 berechnet. Bei einer Sinusschwingung kann die Amplitude A entsprechend Gleichung 2 aus der Beschleunigung berechnet werden.

$$W_m = \frac{a_{\max}^2 \cdot t}{16 \cdot \pi^4 \cdot f} \quad (1)$$

W_m eingetragene Energie in $\frac{J}{kg}$
 $a_{\max}$ maximale Beschleunigung in m/s^2
 f Frequenz in $1/s$
 t Verdichtungszeit in s

$$A = \frac{a}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2} \quad (2)$$

A Amplitude in m
a Beschleunigung in m/s^2
f Frequenz in $1/s$

Zur Vermeidung von Fehlstellen bei zu geringer oder einer Betonentmischung bei zu intensiver Verdichtung ist eine Abstimmung der Parameter auf den Beton erforderlich [10, 11]. DIN 1045-2 [12] und DIN EN 13670 [13] enthalten zum Thema Betonentmischung keine konkreten Regelungen.

Für die Durchführung von Laboruntersuchungen kommt den Geräteparametern eine bedeutende Rolle zu, damit im Laborversuch praxisrelevante Randbedingungen abgebildet werden und eine Differenzierung zwischen Betonen möglich ist. Während die Literatursauswertung in [8] für Innenrüttler Frequenzen um die 200 Hz als angemessen darstellt, sind bei Rütteltischen Beschleunigungen zwischen etwa 20 und 40 m/s^2 bei gefüllter Form zur Verdichtung erforderlich, der optimale Frequenzbereich liegt zwischen 50 und 100 Hz. Eine Umsetzungen dieser Kennwerte findet sich in DIN EN 12390-2 [14], die zur Prüfkörperherstellung Innenrüttler und Rütteltische mit einer Mindestfrequenz von 120 Hz bzw. 40 Hz fordert.

4. Sedimentationsgerät

4.1 Geräteaufbau

In Zusammenarbeit mit einem Gerätehersteller erfolgte die Konzeption eines Gerätes, das einen Rütteltisch mit einer Fixierung des dreiteiligen Sedimentationsrohres kombinierte. Untersuchungen in der BAW haben zu Geräteoptimierungen und schließlich dem aktuell verwendeten Gerät geführt (Bild 1) [15].

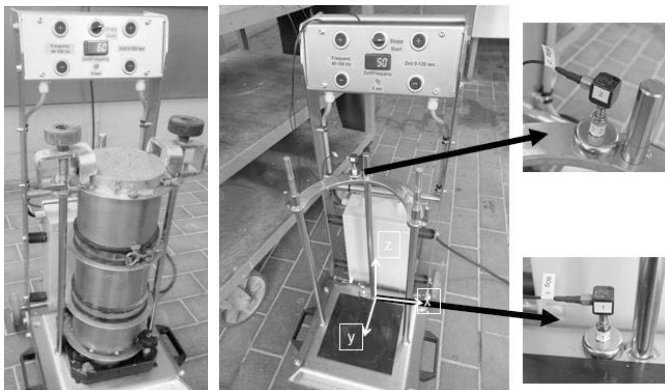


Bild 1: Sedimentationsgerät

Die Frequenz kann im Bereich zwischen 40 und 100 Hz variiert werden. Der dreiteilige Zylinder wird über eine Klemme in das Gerät eingespannt.

4.2 Beschleunigungsmessungen

Zur Überprüfung der Verdichtungsintensität wurden zu Beginn Messungen mit Triaxial-Beschleunigungsaufnehmern mit einem Messbereich von 60 g durchgeführt [15]. Die Sensoren wurden auf dem Rütteltisch sowie dem oberen Halteringsring angebracht (Bild 1) und Messungen bei verschiedenen Frequenzen mit eingespanntem, gefülltem Zylinder durchgeführt. Bild 2 zeigt exemplarisch Messdaten bei einer Frequenz von 50 Hz. Hier liegt eine relativ gleichmäßige Sinusschwingung vor.

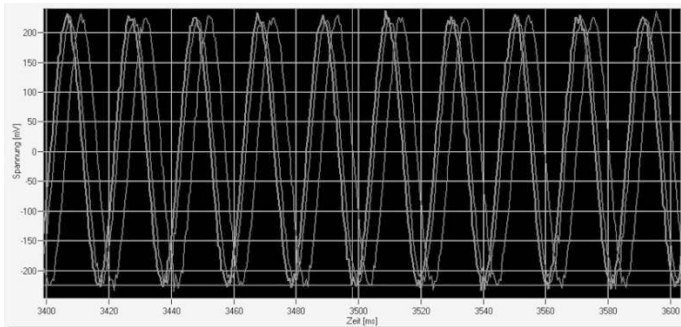


Bild 2: Beschleunigungsmessung mit aufgespanntem Zylinder (50 Hz) [15]

Untersuchungen zur Auswirkung der Anzugskraft auf das Frequenzspektrum haben bei nur leichtem Anziehen der Befestigungsschrauben zahlreiche, teils energiereiche Oberwellen gezeigt (Bild 3, links). Diese ließen sich mit steigender Anzugskraft der Schrauben weitgehend vermeiden (Bild 3, rechts). Daraufhin wurde der Zylinder mit einem Drehmomentschlüssel und einem Anzugsmoment von 12 Nm befestigt.

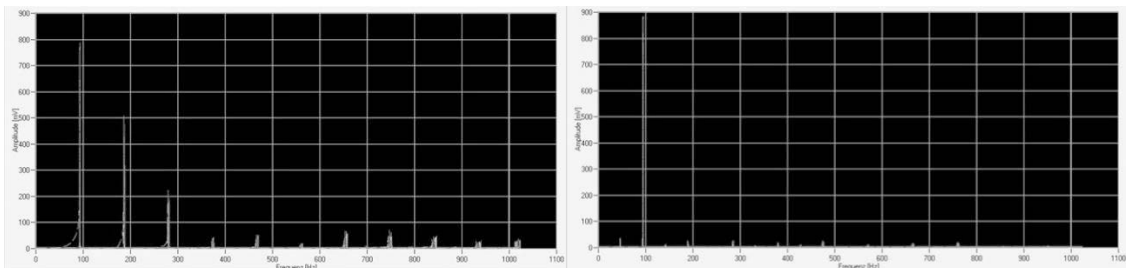


Bild 3: Auswirkung der Anzugskraft der Befestigungsschrauben auf das Frequenzspektrum [15]

Die Zusammenfassung der Ergebnisse in z-Richtung (Bild 1) und die entsprechend Gleichung 1 und 2 berechnete Energie und Amplitude in z-Richtung enthält Tab. 1. In y-Richtung wurden vergleichbare Größenordnungen ermittelt, in x-Richtung betrugen die Beschleunigungen etwa 20 bis 30 % der z-Richtung. Messungen direkt auf der Rüttelplatte ohne Zylinder ergaben weit höhere Beschleunigungen sowie neben der Hauptfrequenz auch teils zahlreiche maßgebliche Oberwellen [15]. Für repräsentative Aussagen zur Intensität der Einwirkung sind zwingend Messungen unter der maßgeblichen Last erforderlich.

Nach Tab. 1 liefert beispielsweise eine Verdichtung mit dem hier verwendeten Gerät bei 48,8 Hz für 120 Sekunden einen vergleichbaren Energieeintrag wie eine Verdichtung bei 94,5 Hz für 15 Sekunden. Dies stellt eine Vereinfachung dar, da ausschließlich die z-Richtung betrachtet ist und unterschiedliche Anlaufzeiten bis zum

Erreichen der Beschleunigungskennwerte nicht berücksichtigt sind. Die Anlaufzeiten betrugen zwischen 1 s bei 48,8 Hz und 3 s bei 94,5 Hz [15]. Die Kennwerte für W_m in Tab. 1 liegen im unteren Bereich des in [9] untersuchten Energiebereiches.

Tab. 1: Ergebnisse der Beschleunigungsmessungen (Z-Richtung, Mittelwerte)

IST-Frequenz	a_z	s_z	$W_{m,z}$ nach ... s			
			15	45	90	120
Hz	m/s ²	mm	J/kg			
48,8	21	0,23	0,09	0,27	0,53	0,71
71,4	50	0,25	0,34	1,01	2,02	2,69
94,5	87	0,25	0,77	2,31	4,63	6,17

5 Laboruntersuchungen

5.1 Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften

Es wurden Untersuchungen an zwei Betonzusammensetzungen durchgeführt, welche in der Sedimentationssensibilität einen deutlichen Unterschied erwarten ließen. In vorangegangenen Untersuchungen in der BAW und der TU Braunschweig wurde eine unterschiedliche Sedimentationssensibilität sowie rheologische Kenngrößen zwischen Betonen ohne und mit künstlichen Luftporen festgestellt [16]. Zur Abbildung einer großen Bandbreite der Sedimentationssensibilität wurde daher in den aktuellen Untersuchungen ein Beton ohne und mit künstlichen Luftporen untersucht. Es kamen die gleichen Betone und Ausgangsstoffe mit gleichen Frischbetoneigenschaften wie bei den genannten Untersuchungen in Bochum und Hannover zum Einsatz (Tab. 2).

Tab. 2: Betone und Eigenschaften

Parameter	Einheit	Beton	
		BM1	BM2
CEM II/A-S 42,5 R	kg/m ³	270	270
Flugasche		70	70
Wasser		164	149
Sand 0/2		668	644
Kies 2/8		254	245
Kies 8/16		454	438
Kies 16/32		456	440
Dichte		2336	2256
Zielluftgehalt	Vol.-%	1,0	5,0
Äquivalenter w/z-Wert	-	0,55	0,50
Leimgehalt	dm ³ /m ³	284	269
Mehlkorngehalt	kg/m ³	346	344
Mittleres Ausbreitmaß ¹⁾	mm	498	503
Mittlerer Luftgehalt ¹⁾	Vol.-%	1,0	6,4

1) zum Prüfzeitpunkt des Auswaschversuches

5.2 Auswaschversuch für Rüttelbeton

Die Entnahme einer repräsentativen Probe ist bei diesem Versuch von besonderer Bedeutung. Nach vollständiger Befüllung des dreiteiligen Zylinders wurde dieser mit einem Stahllineal abgezogen und auf dem Sedimentationsgerät fixiert. Zur Sicherstellung gleichbleibender Frischbetoneigenschaften wurde mit 6 Zylindern gearbeitet, welche nacheinander befüllt wurden. Anschließend erfolgte die unmittelbar

aufeinander folgende Verdichtung der Zylinder mit der vorgesehenen Prüffrequenz und Verdichtungszeit. Nach Versuchsende wurde das Absetzmaß a des Betons im Zylinder gemessen (Bild 4). Bei den Untersuchungen im Baustofflabor der BAW betrug das Absetzmaß im Mittel 8 mm für den Beton BM1 und 5 mm für BM2 bei einer Konsistenz von 500 mm. Für BM1 wurden zusätzliche Versuche bei einer Konsistenz von 400 mm durchgeführt, die zu einem mittleren Absetzmaß von 36 mm geführt haben [17].



Bild 4: Absetzmaß bei einer Konsistenz des Betons von 500 mm

Der Beton der einzelnen Segmente wurde anschließend über einem Sieb ausgewaschen. Im Rahmen der Untersuchungen wurde größtenteils ein Sieb mit einer Sieböffnung von 8 mm oder 11,2 mm verwendet. Die Masse der Gesteinskörnung wurde aufgezeichnet und für das obere Drittel entsprechend Gleichung 3 um das Absetzmaß korrigiert. Aus der korrigierten Masse des obersten Segmentes und den übrigen beiden Segmenten wurde die mittlere Masse grober Gesteinskörnung nach Gleichung 4 berechnet. Die prozentuale Grobkornabweichung Δm_i im einzelnen Segment vom mittleren Grobkornanteil wurde auf 0,1 % nach Gleichung 5 berechnet.

$$m_{1,korr} = \frac{m_1}{1 - \frac{a}{150}} \quad (3)$$

$$\bar{m} = \frac{1}{3} (m_{1,korr} + m_2 + m_3) \quad (4)$$

$$\Delta m_i = \left(\frac{m_i}{\bar{m}} - 1 \right) \cdot 100 \quad (5)$$

Mittels Trockensiebungen der ausgewaschenen Gesteinskörnung auf Sieben mit einem Durchmesser von 8, 11,2 und 16 mm wurde eine weiterführende Analyse des Sedimentationsverhaltens der unterschiedlichen Kornfraktionen vorgenommen. Für einen visuellen Abgleich wurden bei ausgewählten Prüfungen Festbetonrohre mit gleichen Abmessungen und gleichen Verdichtungsrandbedingungen wie beim Auswaschversuch hergestellt und nach ausreichender Erhärtung entlang der Zylinderachse aufgesägt, um eine visuelle Auswertung vornehmen zu können. Die Grobkornsedimentation ΔA_i wurde über eine bildanalytische Auswertung der Flächenanteile der angeschnittenen Gesteinskörnung mit einer Mindestabmessung von 8 mm an den Festbetonrohren entsprechend der Gleichungen 6 und 7 ermittelt.

$$\bar{A} = \frac{1}{3} (A_1 + A_2 + A_3) \quad (4)$$

$$\Delta A_i = \left(\frac{A_i}{\bar{A}} - 1 \right) \cdot 100 \quad (5)$$

6. Ergebnisse

6.1 Zusammenhänge zwischen Verdichtungszeit und Sedimentationsmaß

Für die beiden untersuchten Betone wurde das Sedimentationsmaß bei verschiedenen Frequenzen in Abhängigkeit der Rüttelzeit ermittelt. Durch die Siebung der

Gesteinskörnung erfolgte eine Auswertung in Abhängigkeit der Korngrößenbereiche der Gesteinskörnung, hier dargestellt für die Siebe 8 und 16 mm [17].

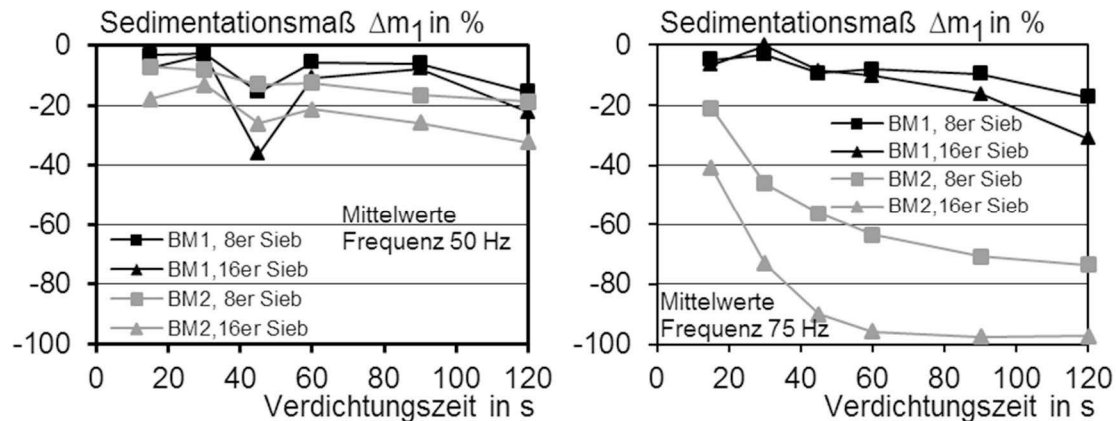


Bild 5: Sedimentationsmaß in Abhängigkeit von Zeit und Auswaschsieb, 50 und 75 Hz

Die Ergebnisse der Gesamtrückstände auf den Sieben sind in Bild 5 exemplarisch für die Mittelwerte zu jedem Prüfzeitpunkt für die Frequenzen 50 und 75 Hz dargestellt, da zwischen diesen die größten Unterschiede für die Betone festgestellt wurden. Entsprechende Auswertungen für 100 Hz liegen in [17] vor. Die wesentliche Erkenntnis ist, dass bei einer Frequenz von 50 Hz im Gegensatz zu 75 Hz keine markanten Unterschiede zwischen beiden Betonen vorliegen. Der LP-Beton zeigt bei 75 Hz eine wesentlich höhere Sedimentationsgeschwindigkeit der groben Gesteinskörnung. Bild 6 stellt die Ergebnisse differenzierter über eine getrennte Korngruppenauswertung dar. Bei BM1 sedimentiert die Gesteinskörnung unabhängig von der Frequenz bis zu einem Größtkorn von 16 mm nicht nennenswert. Die Korngruppe 16/32 sedimentiert bei 75 Hz bei langen Verdichtungszeiten. Bei Beton BM2 sedimentiert bei 75 Hz die gesamte grobe Gesteinskörnung, mit der deutlich höchsten Sinkgeschwindigkeit jedoch die Korngruppe 16/32. Bei 50 Hz ist lediglich für die Korngruppe 16/32 eine Sedimentation feststellbar. Die geringe Differenzierung bei 50 Hz ist ggf. mit den Erläuterungen aus [8] erklärbar. Danach werden mindestens 50 Hz und Beschleunigungen von 20 bis 40 m/s^2 empfohlen. Diese Randbedingungen werden hier nur knapp eingehalten.

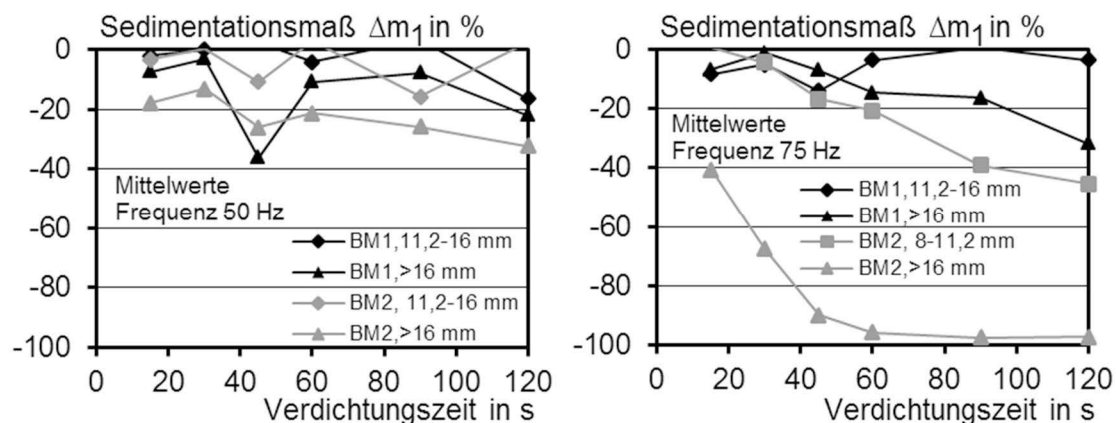


Bild 6: Sedimentationsmaß in Abhängigkeit von Zeit und Auswaschsieb, 50 und 75 Hz

6.2 Zusammenhänge zwischen Verdichtungsenergie und Sedimentationsmaß

Die Kennwerte der Energie W_m bei unterschiedlichen Frequenzen und Rüttelzeiten ermöglichen eine gemeinsame Darstellung aller Versuchsergebnisse, exemplarisch

dargestellt für die Korngruppe 16/32 (Bild 7). Es deutet sich an, dass diese Abschätzung der Verdichtungsenergie das Sedimentationsverhalten mit grundsätzlich vergleichbaren Zusammenhängen wie in [9] abbilden kann. Bei vergleichbarer Energie W_m liegen bei unterschiedlicher Verdichtungszeit, Frequenz und Beschleunigung vergleichbare Sedimentationsmaße für beide Betone vor. Ungenauigkeiten liegen möglicherweise an der groben Abschätzung der Energie nur über die z-Achse.

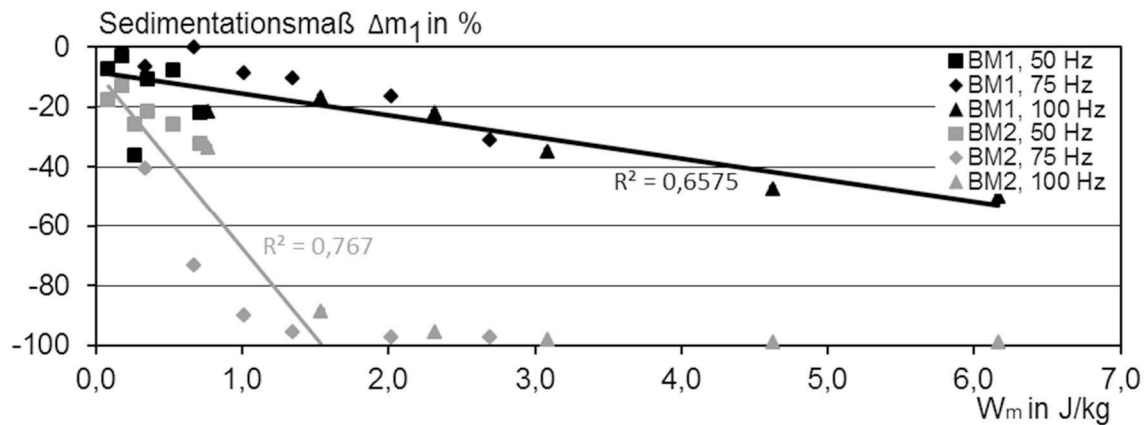


Bild 7: Zusammenhang zwischen Energie W_m und Sedimentationsmaß

6.3 Zusammenhänge zwischen Sedimentationsmaß am Frisch- und Festbeton

In einem weiteren Schritt wurde die Übertragbarkeit der Ergebnisse des Auswaschversuches auf den Festbeton untersucht. Die Festbetonauswertung erfolgte an aufgesägten Rohren entsprechend Gleichungen 4 und 5. Die Zusammenhänge sind in Bild 8 ergänzt um einen visuellen Eindruck der Schnittflächen dargestellt. Für die Frischbetondaten wurde jeweils die Auswertung auf dem 8-er, 11,2-er und 16-er Sieb dargestellt. Die Festbetonauswertung bezieht sich auf angeschnittene Körner mit Mindestabmessungen von 8 mm. Der grundsätzliche Zusammenhang ist vorhanden. Tendenziell lagen bei der Festbetonauswertung bei Sedimentationsmaßen etwa unter 40 % geringere Werte als im Auswaschversuch vor.

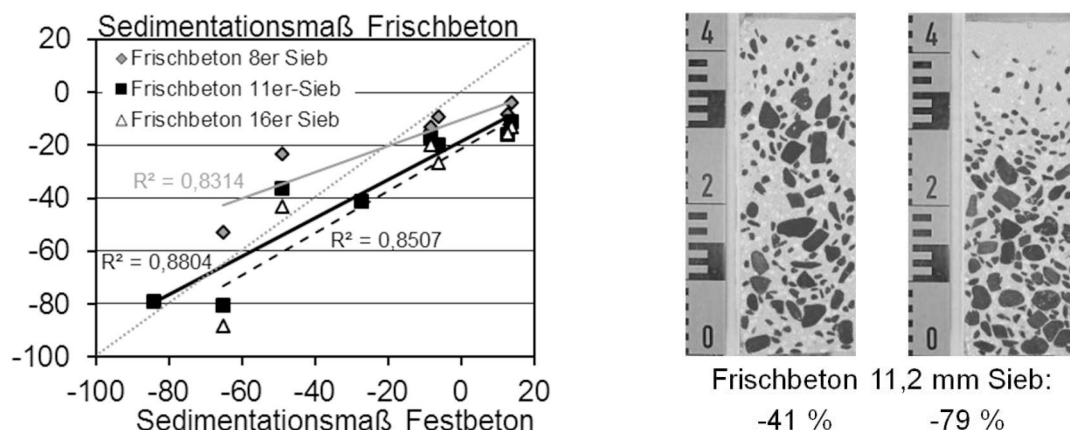


Bild 8: Zusammenhang zwischen Sedimentationsmaß am Frisch- und Festbeton, Beispiel Festbetonschnittbild

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Sedimentationssensibilität von Rüttelbeton ist derzeit ein wichtiger Teilaspekt der Gesamthematik „Robuste Betone“, welcher über aktuell angewendete und genormte

Prüfverfahren nicht beschrieben werden kann. Ein Prüfverfahren, welches diese Eigenschaft charakterisieren kann, ist derzeit Gegenstand zahlreicher Forschungsaktivitäten. Die BAW beteiligt sich aktiv über eigene Untersuchungen und Initiativen sowie der Förderung von Forschungsprojekten auf diesem Gebiet. Der Beitrag stellt aktuelle Untersuchungen der BAW vor, welche das Potential des auf Rüttelbetone adaptierten Auswaschversuches der SVB-Richtlinie aus dem Jahr 2003 zeigen. In Abhängigkeit der Prüfrandbedingungen erscheint eine Differenzierung von Betonen mit unterschiedlicher Sedimentationssensibilität möglich. Die Erkenntnisse werden für die Erarbeitung von Regelungen im Verkehrswasserbau genutzt und werden auch für weiterführende Normungsaktivitäten zur Verfügung gestellt.

8. Literatur

- [1] BAW-Brief 1/2015: Probleme mit der Mischungsstabilität von Beton. BAW, Karlsruhe, Juni 2015.
- [2] DAfStb – Richtlinie: Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie), Ausgabe November 2003. DAfStb, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2003.
- [3] Abebe, Y.A.: Flowable and Stable Concrete – Design, Characterization and Performance Evaluation, Dissertation, Leibnitz Universität Hannover, 2017
- [4] Steinhäuser, H., Begemann, C., Lohaus, L.: Stabilität und Robustheit fließfähiger Betone unter Rüttelwirkung. Tagungsband 19. Ibaustil, Weimar, 2015
- [5] BMVI Erlass WS 12/5257.6/4 vom 04.05.2015: Mischungsstabilität von Beton. Verkehrsblatt Nr. 12/2015, Verkehrsblatt-Verlag.
- [6] Tattersal, G.H.; Baker, P. H.: The effect of vibration on the rheological properties of fresh concrete. Magazine of Concrete Research 40, Nr. 143, 1988
- [7] Popovics, S.: A review of the concrete consolidation by vibration. Materials and Structures 6, Nr. 36, 1973
- [8] ACI 309.1R-08 Report on Behaviour of Fresh Concrete During Vibration. ACI Committee 309, 2008
- [9] Navarrete, I., Lopez, M.: Estimating the segregation of concrete based on mixture design and vibratory energy. Construction and building materials 122 (2016)
- [10] Leemann, A.; Germann, A.; Schlumpf, J.: Maßvolles Verdichten. Der Bauingenieur, Nr. 2, 2006
- [11] Olbrecht, H.; Moser, K.: Entmischen von Beton durch Überverdichtung. Tec 21, 44/2004
- [12] DIN 1045-2: 2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- [13] DIN EN 13670:2011-03: Ausführung von Tragwerken aus Beton
- [14] DIN EN 12390-2:2009-08: Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen
- [15] Metz, W.: Beschleunigungsmessungen am „Rütteltisch BAW“, Fa Beckel. Bundesanstalt für Wasserbau, Oktober 2017
- [16] Ross, I.: Untersuchungen zur Sedimentationsstabilität von Luftporenbeton. Bachelorarbeit, TU Braunschweig, 2017
- [17] Jakob, O.: Sedimentationsstabilität von Rüttelbeton. Masterarbeit Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2018

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Frank Spörel
Bundesanstalt für Wasserbau
Kussmaulstr. 17
D – 76187 Karlsruhe

frank.spoerel@baw.de