

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Forschungsvereinigung:	VDZ gGmbH
Forschungseinrichtung 1:	VDZ gGmbH Forschungsinstitut der Zementindustrie
Forschungseinrichtung 2:	TU München Centrum Baustoffe und Materialprüfung
IGF-Vorhaben-Nr.:	19276 N
Bewilligungszeitraum	01.11.2016 – 30.04.2019

Forschungsthema:

Optimale Verdichtung leichtverarbeitbarer Betone mit hoher Robustheit

1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Leichtverarbeitbare Betone (LVB) zeichnen sich durch eine sehr weiche bis fließfähige Konsistenz aus. Durch die Fließfähigkeit kann der Aufwand für Arbeitsschritte wie das Verteilen des Betons in der Schalung und das Verdichten sowie das Nachbearbeiten der Betonoberfläche nach dem Einbau reduziert werden. Die Betone eignen sich somit besonders zur Herstellung von Bauteilen und Bauwerken mit entsprechenden Anforderungen an die Ästhetik und die Dauerhaftigkeit bei kurzer Bauzeit.

Die Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung von leichtverarbeitbaren Betonen auf der Baustelle ist ein guter Zusammenhalt (geringe Entmischungsneigung) in Kombination mit einer bedarfsgerechten Verdichtung. Die Konsistenz der Betone muss so eingestellt sein, dass bereits eine geringe Verdichtungsarbeit zur Entlüftung der Betone führt, die Betone aber einen ausreichenden Widerstand gegen Entmischung aufweisen. Die notwendige Verdichtungsarbeit ist von der Bauteilgeometrie, der Frischbetonkonsistenz und der Betonzusammensetzung abhängig. Für die richtige Wahl der Verdichtungsarbeit leichtverarbeitbarer Betone lagen bislang keine ausreichenden objektiven Bewertungskriterien vor. Bei einer Überverdichtung kann es zum Entmischen des Betons und zur Sedimentation der groben Gesteinskörnung kommen. Bei einer unzureichenden Verdichtung können Poren und Lunker im Gefüge auftreten. Beides kann die Festigkeits-, Verformungs- und Dauerhaftigkeitseigenschaften des Festbetons negativ beeinflussen. Da bisher keine Empfehlungen für die optimale Verdichtung von leicht zu verarbeitenden Betonen vorlagen, wurde deren sichere Anwendung erschwert.

Ziel des IGF-Vorhabens 19276 N war es, grundlegende Erkenntnisse zur bedarfsgerechten Verdichtung von leicht zu verarbeitenden Betonen in Abhängigkeit der Frischbetoneigenschaften zu gewinnen. Die Untersuchungen sollten dabei den gesamten möglichen Bereich der Frischbetoneigenschaften von LVB abdecken. Neben der Konsistenz war hierbei die Zähigkeit zu berücksichtigen, die die Verarbeitungseigenschaften maßgeblich beeinflusst. In einem weiteren Schritt sollte die Wirkung unterschiedlicher Verdichtungsszenarien auf die Frischbetoneigenschaften (Luftporengehalt, Blutneigung, Sedimentationsbeständigkeit etc.) und die Festbetoneigenschaften (z. B. Druckfestigkeit, Wasseraufnahme etc.) untersucht werden. Ziel der Untersuchungen war es, Betone mit robusten Frisch- und Festbetoneigenschaften zu identifizieren und bedarfsgerechte Verarbeitungs- und Verdichtungsmethoden zu definieren. Aus den Ergebnissen sollte ein Leitfaden für die bedarfsgerechte Verarbeitung und Verdichtung von LVB auf der Baustelle erstellt werden. Dieser soll helfen, Fehlanwendungen zu vermeiden und dadurch die Qualität der Bauweise zu erhalten bzw. zu steigern.

2 Arbeitsprogramm

2.1 Allgemeines

Das Arbeitsprogramm gliederte sich in insgesamt fünf Arbeitspakete, die gemeinschaftlich von beiden Forschungsstellen bearbeitet wurden.

An beiden Forschungseinrichtungen wurden die Untersuchungen mit drei Referenzbetonen durchgeführt, deren Zusammensetzungen in **Tabelle 1** angegeben sind. Die Zusammensetzungen wurden so konzipiert, dass das Leimvolumen sowie das Volumen und die Sieblinie der Gesteinskörnung in den drei Referenzbetonen gleich waren. Der äquivalente Wasserzementwert w/z_{eq} (Flugasche mit einem k-Wert von 0,4 angerechnet) wurde zwischen 0,30 und 0,75 variiert. Die Fließmitteldosierung wurde jeweils der Zielkonsistenz entsprechend angepasst.

Tabelle 1 Betonzusammensetzungen

Bezeichnung	Z0	Z+	Z-
Zement	320 kg/m ³	394 kg/m ³	240 kg/m ³
Flugasche	90 kg/m ³	111 kg/m ³	67,5 kg/m ³
w/z_{eq}	0,46	0,30	0,75
Leimvolumen ¹⁾	ca. 305 l/m ³		
Gesteinskörnung	Sieblinie A/B 16		
Fließmittel	0,6...1,2 % v. Z.	1,2...1,9 % v. Z.	0...0,5 % v. Z.
Zähigkeit ²⁾	mittel	hoch	gering
¹⁾	Das Leimvolumen ist definiert als Summe der Volumina von Zement, Flugasche und Wasser und Luft gemäß Mischungsberechnung		
²⁾	Definition „Zähigkeit“: siehe Abschnitt 2.3		

Durch die gezielte Veränderung des äquivalenten Wasserzementwerts wurde die Zähigkeit des Frischbetons gesteuert. Die Zähigkeit ist neben der Konsistenz maßgebend für die Verarbeitbarkeit des Betons und steigt mit abnehmendem äquivalenten Wasserzementwert $(w/z)_{eq}$ an. Durch die Wahl von $(w/z)_{eq}$ zwischen 0,30 und 0,75 sollte ein großer Bereich möglicher Verarbeitbarkeitseigenschaften von leicht zu verarbeitenden Betonen abgedeckt

werden. Der Dreiteilung entsprechend wurden die Bezeichnungen hohe Zähigkeit (Z+), mittlere Zähigkeit (Z0) und geringe Zähigkeit (Z-) gewählt.

Für die Herstellung der Betone kam zunächst ein CEM I 42,5 N (sd) zum Einsatz (Abkürzung im Folgenden: Zem1). Als Variationen wurden an der Forschungseinrichtung 1 ein CEM II/A-S 42,5 R (Zem2), ein CEM III/A 42,5 N (Zem3) und ein CEM III/B 42,5 L-LH/SR (na) (Zem4) genutzt.

Als Betonzusatzstoff (Typ 2) wurde Steinkohlenflugasche verwendet. In einzelnen Untersuchungen der Forschungseinrichtung (FE) 2 wurde als weiterer Betonzusatzstoff (Typ 2) Silikastaub verwendet. Des Weiteren kamen an der FE 2 zwei Quarzmehle mit unterschiedlicher Feinheit und ein Kalksteinmehl als Betonzusatzstoffe (Typ 1) zum Einsatz.

An beiden Forschungseinrichtungen wurden jeweils lokal verfügbarer Sand und Kies (Forschungseinrichtung 1: Rheinsand/-kies, Forschungseinrichtung 2: Isarsand/-kies) als Gesteinskörnung eingesetzt. Als Variation wurde an beiden Forschungseinrichtungen ein Austausch der groben Gesteinskörnung (Rheinkies bzw. Isarkies) gegen gebrochene grobe Gesteinskörnung vorgenommen. An der Forschungseinrichtung 1 wurde ein Sandsteinsplitt verwendet, an der Forschungseinrichtung 2 Basaltsplitt.

Zur Einstellung der Konsistenz des Frischbetons wurde ein PCE-basiertes Fließmittel verwendet. An der Forschungseinrichtung 2 wurde in einigen Betonen zusätzlich ein viskositätsmodifizierendes Zusatzmittel (Stabilisierer) verwendet.

2.2 Arbeitspaket A

Im Arbeitspaket A sollte die Verdichtungswirkung üblicher Praxismethoden zur Verdichtung von LVB quantifiziert werden. Dabei sollten die folgenden Praxismethoden berücksichtigt werden:

- Schwabbeln / Rakeln (sehr leichtes Verdichten)
- Stochern (leichtes Verdichten)
- Innenrüttler (mäßiges bis starkes Verdichten)

Mit diesen Untersuchungen sollte sichergestellt werden, dass die Intensität der Verdichtung der Betone im Labor auf einem Rütteltisch mit variabler Frequenz und Rütteldauer mit der von Praxismethoden vergleichbar ist. Für das Forschungsvorhaben wurden an beiden Forschungseinrichtungen baugleiche Rütteltische angeschafft, um möglichst identische Rahmenbedingungen für die Verdichtung der Laborproben zu gewährleisten. Die Rütteltische sind hinsichtlich der Rüttelfrequenz und Rütteldauer stufenlos einstellbar.

Zur Quantifizierung der Verdichtungswirkung wurden am Frischbeton der Luftgehalt nach DIN EN 12350-6 und die Rohdichte nach DIN EN 12350-7, jeweils nach Einwirkung verschiedener Verdichtungsszenarien, bestimmt. Ergänzend wurden am Festbeton die Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 und die Festbetonrohichte nach DIN EN 12390-7 bestimmt.

2.3 Arbeitspaket B

Im Arbeitspaket B wurden die Frischbetoneigenschaften von Betonen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen untersucht, um die Verarbeitungseigenschaften von leichtverarbeitbaren Betonen zu erfassen und zu klassifizieren. Gemäß Arbeitsprogramm sollte für die Konsistenz und die Zähigkeit der Betone jeweils eine Dreiteilung (hoch – mittel – gering) vorgenommen werden. Durch die Kombination der unterschiedlichen Konsistenz- und Zähigkeitsbereiche ergaben sich neun Verarbeitungsklassen, s. **Tabelle 2**.

Tabelle 2 Definition von Verarbeitungsklassen

		Zähigkeit (Z)		
		Z-	Z0	Z+
Konsistenz (K)	K-	Z-/K-	Z0/K-	Z+/K-
	K0	Z-/K0	Z0/K0	Z+/K0
	K+	Z-/K+	Z0/K+	Z+/K+

Die Untersuchungen wurden zunächst an den drei Referenzbetonen durchgeführt, s. **Tabelle 1**. Für die Referenzbetone wurden drei äquivalente Wassermenge (0,3 – 0,46 – 0,75) festgelegt. Aufgrund früherer Erfahrungen wurde davon ausgegangen, dass damit eine hohe, mittlere und geringe Zähigkeit erzielt werden konnte. Die Konsistenz der Betone wurde über eine Anpassung der Fließmitteldosierung eingestellt. In einem weiteren Schritt wurde durch den Austausch einzelner Ausgangsstoffe untersucht, ob die zuvor vorgenommene Klassifizierung bzgl. Konsistenz und Zähigkeit auch bei diesen stofflichen Variationen weiterhin angewendet werden kann.

Die Konsistenz wurde über das Ausbreitmaß a quantifiziert und durch zuvor festgelegte Werte in drei Bereiche eingeteilt:

- Unterer Konsistenzbereich (K-) / geringe Fließfähigkeit: $a = 56 \pm 3$ cm
- Mittlerer Konsistenzbereich (K0) / mittlere Fließfähigkeit: $a = 62 \pm 3$ cm
- Oberer Konsistenzbereich (K+) / hohe Fließfähigkeit: $a = 68 \pm 3$ cm

Für die Zähigkeit existierten zu Beginn des Vorhabens keine Frischbetonprüfungen und daher auch keine Erfahrungswerte für die Einteilung in Bereiche hoher, mittlerer und geringer Zähigkeit. Gemäß Arbeitsprogramm war geplant, die Zähigkeit durch die Ausfließzeit aus dem Auslaufkegel nach [1] zu quantifizieren, der normalerweise für selbstverdichtende Betone angewendet wird. Es zeigte sich, dass die Prüfung wegen der Gefahr des Verstopfens des Kegels bei Betonen im unteren Konsistenzbereich nicht zur Beurteilung der Zähigkeit geeignet ist. Ersatzweise wurde die Fließzeit auf dem Ausbreittisch bzw. die daraus berechnete mittlere Fließgeschwindigkeit im Ausbreitversuch zur Bewertung der Zähigkeit genutzt.

2.4 Arbeitspaket C

Im Arbeitspaket C sollten die Zusammenhänge zwischen den Verarbeitungseigenschaften der Betone und deren rheologischen Eigenschaften (Fließgrenze und Viskosität) quantifiziert werden. Hierzu wurden Messungen in Rotationsrheometern durchgeführt und die Ergebnisse den im Ausbreitversuch bestimmten Verarbeitungseigenschaften gegenübergestellt. Un-

ter Annahme bingham'schen Fließverhaltens wurden die dynamische Fließgrenze sowie die plastische Viskosität ermittelt.

Des Weiteren sollten die rheologischen Eigenschaften in Abhängigkeit der eingebrachten Verdichtungswirkung (Energie und Dauer) analysiert werden. Dazu wurden rotationsrheometrische Messungen an Betonen während der Verdichtung durchgeführt.

2.5 Arbeitspaket D

Das Arbeitspaket D hatte zum Ziel, die Frisch- und Festbetoneigenschaften der untersuchten Betone in Abhängigkeit der Verdichtungsintensität zu quantifizieren.

Am Frischbeton wurden der Luftgehalt, die Frischbetonrohichte, das Bluten mit dem Eimerverfahren und die Sedimentation der groben Gesteinskörnung im dreiteiligen Zylinder in Anlehnung an die SVB-Richtlinie bzw. unter Rüttelwirkung jeweils nach unterschiedlichen Verdichtungsszenarien untersucht.

Für die Festbetonuntersuchungen wurden Prüfkörper hergestellt, die mit unterschiedlicher Intensität verdichtet wurden und anschließend bis zur weiteren Prüfung erschütterungsfrei gelagert wurden. An den Festbetonproben wurden die Rohdichte, die Druckfestigkeit, die Wasseraufnahme und die Sedimentation der groben Gesteinskörnung bestimmt.

2.6 Arbeitspaket E

Unter Verwendung der Erkenntnisse aus den vorangegangenen Arbeitspaketen sollten im Arbeitspaket E Empfehlungen zur bedarfsgerechten Verdichtung leichtverarbeitbarer Betone in Abhängigkeit ihrer Verarbeitungseigenschaften erstellt werden. Diese Empfehlungen sollen helfen, Fehlanwendungen von LVB zu vermeiden und dadurch die Qualität der Bauweise zu erhalten bzw. zu steigern.

3 Ergebnisse

3.1 Arbeitspaket A

Mit den im Arbeitspaket A durchgeführten Untersuchungen sollte sichergestellt werden, dass die Intensität der Verdichtung der Betone im Labor auf einem Rütteltisch mit variabler Frequenz und Rütteldauer mit der von Praxismethoden vergleichbar ist. Als Praxismethoden wurden händische Methoden (Stochern, Schwabbeln/Rakeln) sowie das Verdichten mit einem Innenrüttler betrachtet. Zum Vergleich wurden die Betone auf einem Laborrütteltisch mit unterschiedlichen Rüttelfrequenzen und Rüttelzeiten verdichtet. Die Wirkung der Verdichtung wurde anhand des Luftgehalts und der Rohdichte des Frischbetons quantifiziert. Ergänzend wurden teilweise die Druckfestigkeit und die Festbetonrohichte an Würfeln mit 150 mm Kantenlänge geprüft. Durch die Berechnung der Verdichtungsarbeit zu den einzelnen Verdichtungsszenarien auf dem Rütteltisch wurde die Intensität der Verdichtung quantifiziert.

Mit zunehmender Verdichtungsarbeit ergab sich eine Reduktion des Luftgehalts, wobei an beiden Forschungseinrichtungen die stärkste Reduktion des Luftgehalts für eine Verdichtungsarbeit bis ca. 3.500 J festgestellt wurde. Bei einer Steigerung der Verdichtungsarbeit

über 3.500 J hinaus blieb der Luftgehalt etwa konstant. Für die Rohdichte ergab sich erwartungsgemäß ein umgekehrt proportionaler Zusammenhang, d. h. der deutlichste Anstieg wurde für eine Verdichtungsarbeit bis 3.500 J verzeichnet, darüber hinaus blieb die Rohdichte etwa konstant. Diese Zusammenhänge sind in **Bild 1** beispielhaft für die Betone mit mittlerer Zähigkeit (Z0) dargestellt.

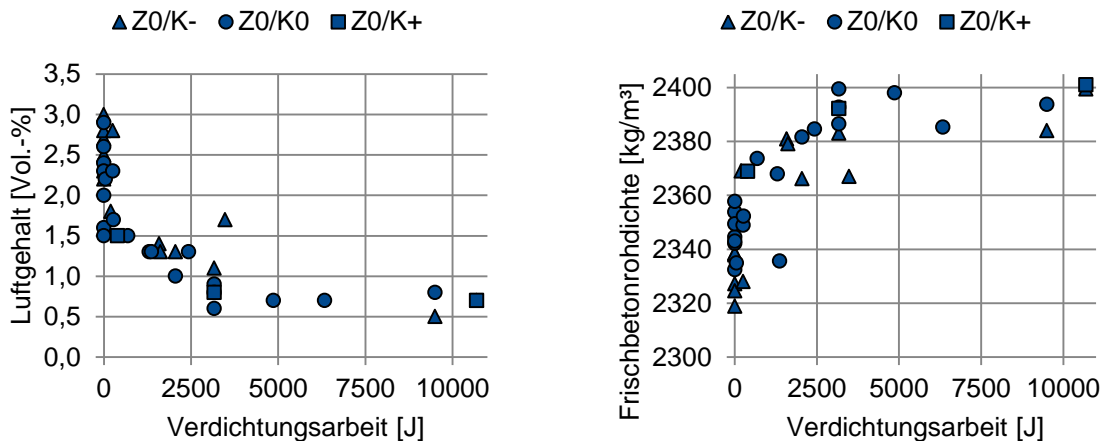


Bild 1 Luftgehalt und Frischbetonrohichte der Betone „Z0“ mit unterschiedlicher Konsistenz ohne Verdichtung und nach unterschiedlichen Verdichtungsszenarien auf dem Rütteltisch (Ergebnisse der Forschungseinrichtung 1)

Durch den Vergleich mit den Ergebnissen der händisch bzw. mit dem Innenrüttler verdichteten Proben konnte gezeigt werden, dass durch Anpassung der Frequenz und Rütteldauer auf dem Laborrütteltisch Verdichtungszustände bzgl. Luftgehalt, Rohdichte und Festigkeit erzielt werden können, die mit denen bei Anwendung der Praxismethoden vergleichbar sind. Für die untersuchten Praxisverdichtungsmethoden wurde jeweils ein Wertebereich der Verdichtungsarbeit abgeleitet, in dem die Verdichtung auf dem Laborrütteltisch zu ähnlichen Ergebnissen führte. Für die durch Stochern verdichteten Proben ergab sich die beste Übereinstimmung der Ergebnisse mit den auf dem Rütteltisch verdichteten Proben bei einer Verdichtungsarbeit von 1.000 J bis 3.800 J. Für die durch Schwabbeln verdichteten Proben führte eine Verdichtungsarbeit von 200 J bis 720 J auf dem Rütteltisch zu der besten Übereinstimmung der Ergebnisse. Obwohl die Wertebereiche jeweils relativ groß sind, können die beiden händischen Verdichtungsmethoden bezüglich der Intensität eindeutig voneinander abgegrenzt werden. Dabei ist erwartungsgemäß die der Verdichtung durch Schwabbeln entsprechende Verdichtungsarbeit geringer als die dem Stochern zugeordnete Verdichtungsarbeit. Hinsichtlich der Verdichtung mit dem Innenrüttler kann zusammengefasst werden, dass auch die Wirkung dieser Verdichtung mit dem Rütteltisch nachgestellt werden konnte. So lagen die untersuchten Frischbetoneigenschaften der Betone (Luftgehalt und Rohdichte) nach der Verdichtung mit dem Innenrüttler stets in einem vergleichbaren Bereich wie die auf dem Rütteltisch verdichteten Proben, wenn der Betrag der in den Beton eingebrachten Verdichtungsarbeit vergleichbar war. Im Vergleich zu den händischen Verdichtungsverfahren wurden dabei mit dem Innenrüttler stets höhere Beträge der Verdichtungsarbeit in den Beton eingebracht (> 3.800 J bei 10 s Verdichtungsdauer), sodass eine Abgrenzung der einzelnen untersuchten Verdichtungsverfahren voneinander möglich ist.

3.2 Arbeitspaket B

Im Arbeitspaket B wurden die Frischbetoneigenschaften von Betonen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen untersucht, um die Verarbeitungseigenschaften von leichtverarbeitbaren Betonen zu erfassen und zu klassifizieren. Gemäß Arbeitsprogramm sollte für die Konsistenz und die Zähigkeit der Betone jeweils eine Dreiteilung (hoch – mittel – gering) vorgenommen werden. Durch die Kombination der unterschiedlichen Konsistenz- und Zähigkeitsbereiche ergaben sich neun Verarbeitungsklassen.

Zur Beschreibung der Zähigkeit wurde die Fließzeit auf dem Ausbreittisch bzw. die daraus berechnete mittlere Fließgeschwindigkeit im Ausbreitversuch genutzt. Die Ergebnisse belegten, dass durch die Bestimmung dieser Größe unterschiedliche Bereiche der Zähigkeit voneinander abgegrenzt werden können. Die Zähigkeitsbereiche wurden anhand der Fließgeschwindigkeiten wie folgt eingeteilt:

- Hohe Zähigkeit (Z+): Fließgeschwindigkeit $v(t_a) \leq 4$ mm/s
- Mittlere Zähigkeit (Z0): Fließgeschwindigkeit $v(t_a) > 4$ mm/s und $v(t_a) \leq 14$ mm/s
- Geringe Zähigkeit (Z-): Fließgeschwindigkeit $v(t_a) > 14$ mm/s

Die untersuchten betontechnologischen Variationen ergaben, dass bei Veränderungen der Zementart oder der Art des Zusatzstoffs (volumengleicher Austausch) eine Anpassung der Fließmitteldosierung ausreichte, um weiterhin Betone in den drei festgelegten Konsistenzbereichen zu erzielen, die bei optischer Beurteilung im Ausbreitversuch stabil wirkten. Der Austausch der groben Gesteinskörnung (Kies) gegen gebrochene grobe Gesteinskörnung bewirkte jedoch eine so starke Reduktion der Fließfähigkeit, dass bei der Referenzzusammensetzung für den Beton mit mittlerer Zähigkeit allein durch eine Erhöhung der Fließmitteldosierung das Erreichen der vorgegebenen Konsistenzbereiche nicht möglich war. Durch eine Modifikation der Sieblinie der groben Gesteinskörnung und eine Erhöhung des Leimvolumens war es möglich, die vorgegebenen Konsistenzbereiche zu erreichen. Hinsichtlich der Erhöhung des Leimvolumens entsprach dieser Optimierungsschritt bekannten Empfehlungen bzgl. des Mindestleimvolumens. Das Leimvolumen des Referenzbetons entsprach mit rund 305 l/m³ etwa dem in Fachkreisen zur Sicherstellung der Robustheit empfohlenen Mindestleimvolumen für Betone mit Kies in den Konsistenzklassen F5 und F6. Bei der Verwendung von gebrochener Gesteinskörnung ist gemäß diesen Empfehlungen ein höheres Leimvolumen zur Sicherstellung der Robustheit und Fließfähigkeit erforderlich, was durch die Untersuchungen bestätigt wurde.

Sämtliche Untersuchungen zum Austausch einzelner Ausgangsstoffe bewirkten im Vergleich zu den Unterschieden zwischen den Referenzbetonen mit unterschiedlichen äquivalenten Wasserzementwerten geringe Änderungen der Zähigkeit, sodass die zuvor vorgenommene Kategorisierung für die hinsichtlich einzelner Ausgangsstoffe veränderten Betone erhalten blieb. Die Untersuchungen zeigten somit, dass der äquivalente Wasserzementwert unter den untersuchten Parametern den stärksten Einfluss auf die Zähigkeit der Betone hatte.

3.3 Arbeitspaket C

Im Arbeitspaket C wurden die rheologischen Eigenschaften von Betonen und Mörteln in Rotationsrheometern untersucht. Die Ergebnisse dienen der Quantifizierung der Zusammenhänge zwischen den Verarbeitungseigenschaften der Betone und deren rheologischen Ei-

genschaften (Fließgrenze und Viskosität) sowie zur Analyse von stofflichen Einflüssen (Fließmitteldosierung, w/z-Wert, Austausch Zementart oder Zusatzstoff u. ä.) auf die rheologischen Eigenschaften. Des Weiteren sollten die rheologischen Eigenschaften in Abhängigkeit der eingebrachten Verdichtungswirkung (Energie und Dauer) analysiert werden.

An der Forschungseinrichtung 1 wurden Untersuchungen zu den rheologischen Eigenschaften von Mörteln durchgeführt. Die Zusammensetzung der Mörtel entsprach der Zusammensetzung der Betone ohne grobe Gesteinskörnung. Die Zementart und die Fließmitteldosierung wurden variiert, um deren Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften analysieren zu können. Die Ergebnisse zeigten bei äquivalenten Wasserzementwerten $> 0,3$ einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Ausbreitfließmaß und der Fließgrenze der Mörtel, der unabhängig von der Zusammensetzung der Mörtel und der verwendeten Zementart bzw. Fließmitteldosierung mithilfe einer Exponentialfunktion beschrieben werden konnte, s. **Bild 2**. Die Fließgrenze der Mörtel mit einem verhältnismäßig geringen äquivalenten Wasserzementwert von $0,3$ folgte diesem Zusammenhang nicht, vermutlich aufgrund des ausgeprägt thixotropen Verhaltens. Bzgl. der Viskosität korrelierten die Ergebnisse gut mit den Beobachtungen, die im Arbeitspaket B für die Zähigkeit der Betone gemacht wurden. Die Viskosität wurde signifikant durch den äquivalenten Wasserzementwert beeinflusst und nahm mit steigendem $(w/z)_{eq}$ ab. Variationen der Zementart und der Fließmitteldosierung bei sonst gleicher Zusammensetzung beeinflussten die Viskosität nur in einem vergleichsweise geringen Umfang.

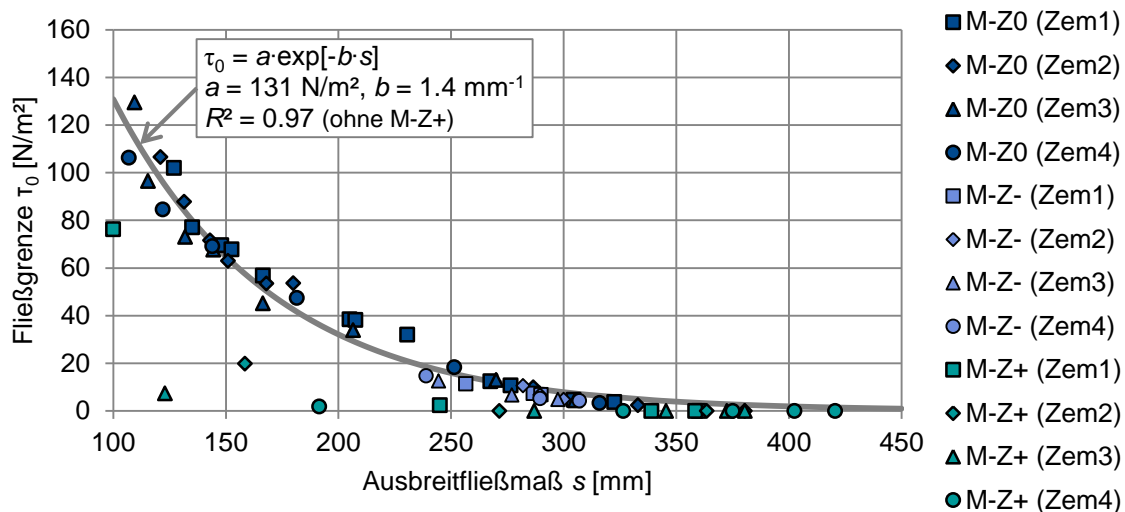


Bild 2 Zusammenhang zwischen Ausbreitfließmaß und Fließgrenze der Mörtel

An der Forschungseinrichtung 2 erfolgten Untersuchungen zu den rheologischen Eigenschaften der leichtverarbeitbaren Betone. Dabei wurden sowohl Versuche ohne externe Verdichtung als auch rheologische Untersuchungen während der Verdichtung der Betone durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche ohne externe Verdichtung bestätigten die an der Forschungseinrichtung 1 in Mörtelversuchen gewonnenen Erkenntnisse zum Zusammenhang zwischen der Fließfähigkeit und der Fließgrenze grundlegend. So reduzierte sich die Fließgrenze der Betone mit zunehmender Fließfähigkeit, bestimmt durch deren Ausbreitmaß, kontinuierlich. Anders als bei den Mörtelversuchen standen die beiden Kenngrößen dabei im mathematischen Zusammenhang einer Potenzfunktion, siehe **Bild 3**. Die Viskosität der Betone korrelierte demgegenüber mit der im Ausbreitversuch bestimmten Fließge-

schwindigkeit. Mit zunehmender Betonviskosität sank dabei die Fließgeschwindigkeit. Auch diese beiden Kenngrößen standen im mathematischen Zusammenhang einer Potenzfunktion, siehe **Bild 4**.

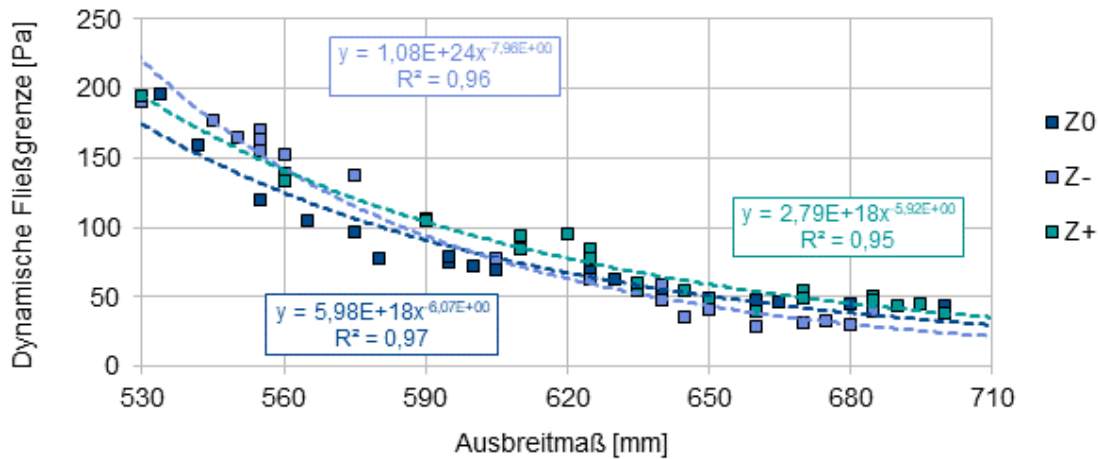


Bild 3 Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß und Fließgrenze der untersuchten Betone

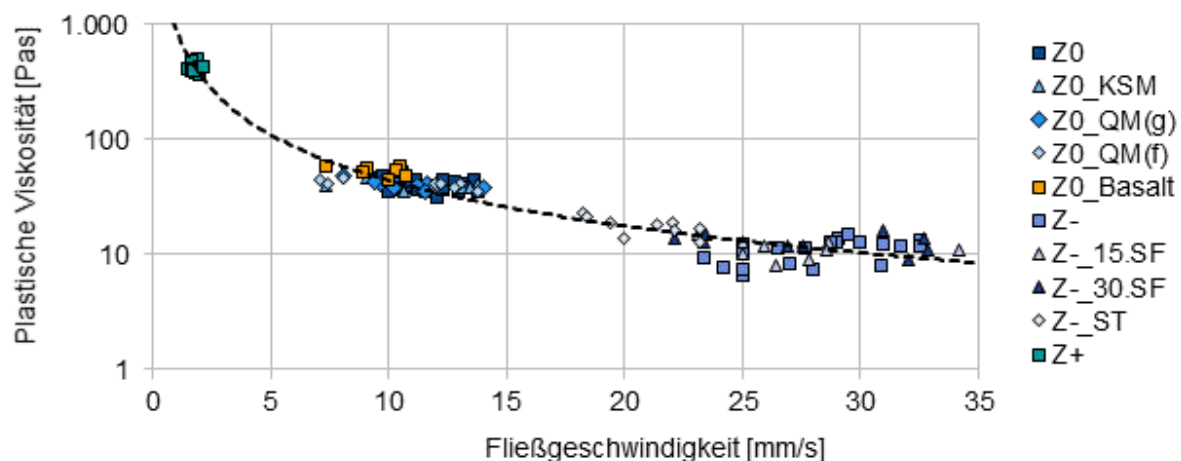


Bild 4 Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit und Viskosität der untersuchten Betone

Neben den drei Referenzbetonrezepturen wurden an der Forschungseinrichtung 2 Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Betonzusatzstoffe (ein Kalksteinmehl, zwei Quarzmehle, ein Silicastaub mit variierendem Gehalt) und Betonzusatzmittel (Stabilisierer) auf die rheologischen Eigenschaften der Betone durchgeführt. Die Zugabe der Zusatzstoffe und -mittel führte hierbei nur zu geringen Änderungen in der Fließgrenze und der Viskosität der Betone. Ferner konnten die an den Referenzbetonen gewonnenen Erkenntnisse zum Zusammenhang zwischen den rheologischen Kennwerten und den Verarbeitungskennwerten auch mit diesen Betonen mit leichten Variationen in der Zusammensetzung bestätigt werden. Dies ist exemplarisch auch in **Bild 4** zu erkennen.

Die Untersuchungen zur Entwicklung der rheologischen Eigenschaften der Betone bei gleichzeitigem Verdichtungseinfluss ergaben abnehmende Werte für die Fließgrenze und die Viskosität. Dies ist exemplarisch für den Beton mit mittlerer Zähigkeit in **Bild 5** und **Bild 6** dargestellt. Auffällig war dabei, dass die Fließgrenze mit steigender Konsistenz (Ausbreitmaß) des Betons bereits bei geringen Verdichtungsfrequenzen überwunden werden konnte,

Bild 5. Darüber hinaus reduzierte sich die Viskosität, ausgehend von einem vergleichbaren Anfangswert ohne externe Verdichtung mit zunehmender Betonkonsistenz stärker, **Bild 6.**

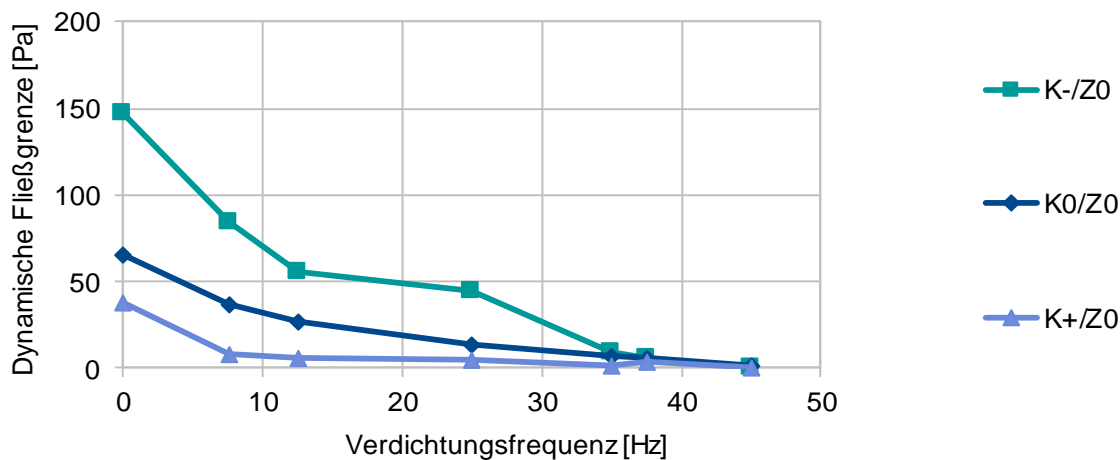


Bild 5 Entwicklung der dynamischen Fließgrenze des Betons mittlerer Zähigkeit in Abhängigkeit von der Konsistenz und der Verdichtungsfrequenz

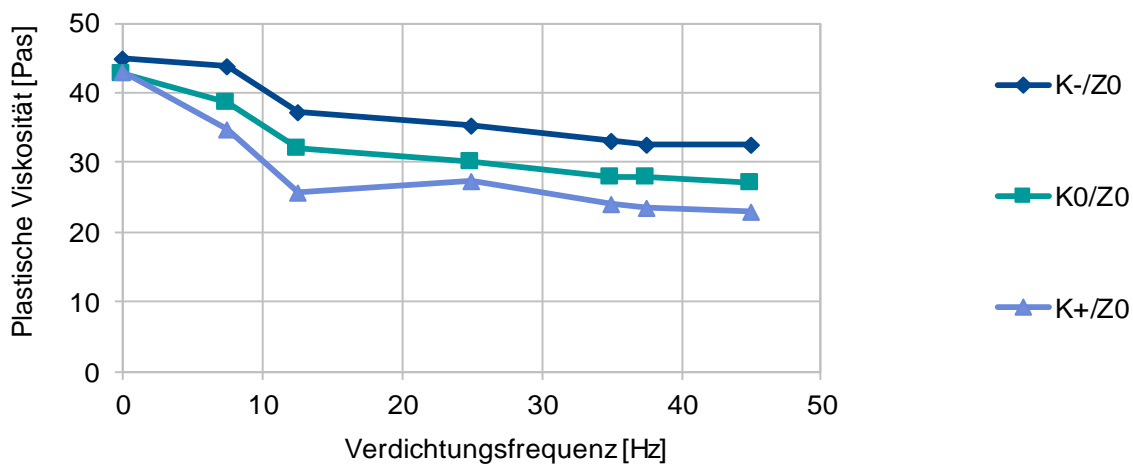


Bild 6 Entwicklung der plastischen Viskosität des Betons mittlerer Zähigkeit in Abhängigkeit von der Konsistenz und der Verdichtungsfrequenz

Die Untersuchungen zum Einfluss der Verdichtung ergaben zudem, dass bei Betonen mit hoher Zähigkeit (bzw. Viskosität) die Fließgrenze bereits bei geringen Beträgen eingebrachter Verdichtungsarbeit überwunden wird, wohingegen bei Betonen mit geringer Zähigkeit auch bei Zufuhr hoher Verdichtungsintensitäten ein Restwert der Fließgrenze vorhanden bleibt, **Bild 7.** Demgegenüber besitzen die Betone mit hoher Zähigkeit (bzw. Viskosität) auch während der Verdichtung eine hohe Viskosität, während die Betone mit geringer Zähigkeit auch unter dem Verdichtungseinfluss niederviskos bleiben. Die Reihung bleibt demnach erhalten, **Bild 8.**

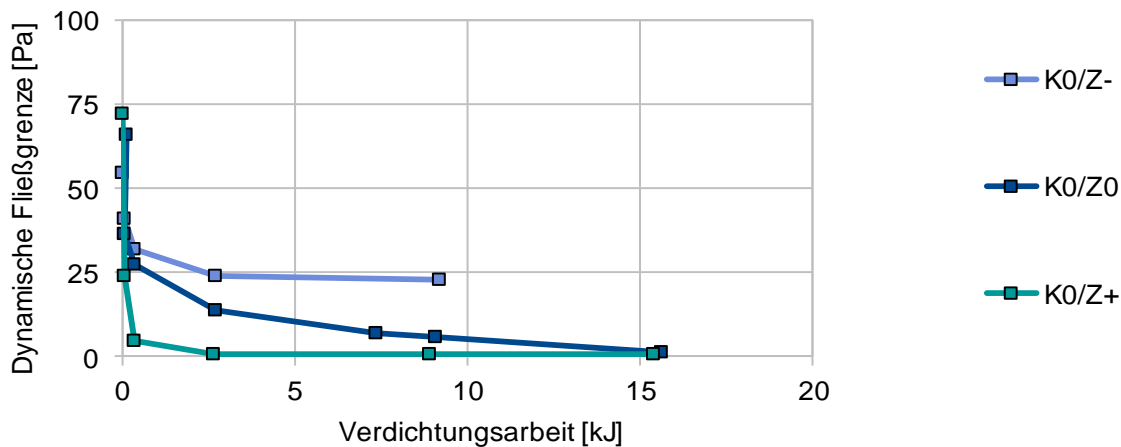


Bild 7 Entwicklung der dynamischen Fließgrenze der Betone mit geringer (Z-), mittlerer (Z0) und hoher (Z+) Zähigkeit in Abhängigkeit von der in den Beton eingebrachten Verdichtungsarbeit

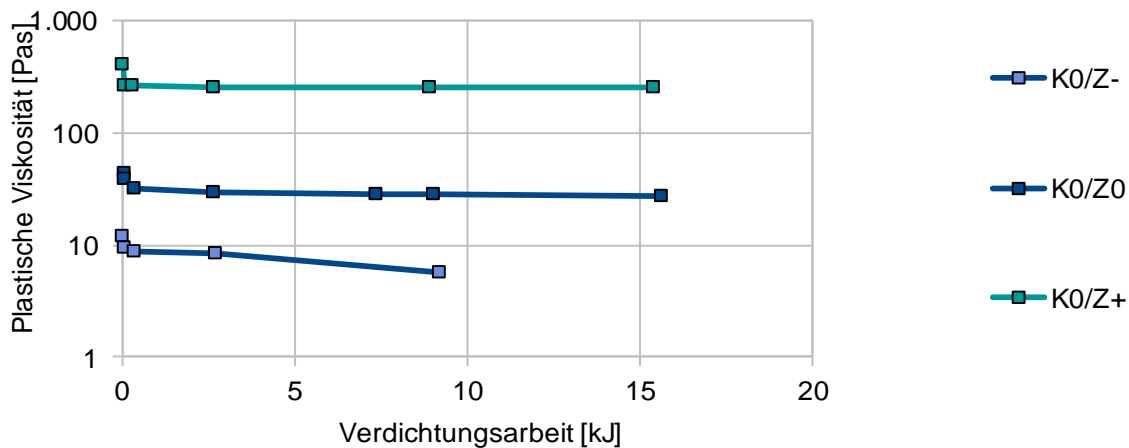


Bild 8 Entwicklung der plastischen Viskosität der Betone mit geringer (Z-), mittlerer (Z0) und hoher (Z+) Zähigkeit in Abhängigkeit von der in den Beton eingebrachten Verdichtungsarbeit

3.4 Arbeitspaket D

Im Arbeitspaket D wurden die Frisch- und Festbetoneigenschaften der Betone in den zuvor definierten Verarbeitungsklassen untersucht, nachdem die Betone mit unterschiedlicher Intensität verdichtet worden waren.

Am Frischbeton wurden neben dem Luftgehalt und der Rohdichte, die bereits im Arbeitspaket A untersucht worden waren, das Wasserabsondern (Bluten) mit dem DBV-Eimerverfahren und die Sedimentation der groben Gesteinskörnung im dreiteiligen Zylinder gemäß SVB-Richtlinie nach unterschiedlichen Verdichtungsszenarien untersucht. Am Festbeton wurden die Druckfestigkeit und die Rohdichte an Zylindern ($h = 300 \text{ mm}$, $d = 150 \text{ mm}$) nach DIN EN 12390-3 bzw. -7, die Wasseraufnahme gemäß DAfStb-Heft 422, Abschnitt 2.1.5.2, an Würfeln mit 100 mm Kantenlänge sowie die Sedimentation der Gesteinskörnung an Schnittbildern von Zylindern ($h = 300 \text{ mm}$ bzw. 600 mm , $d = 150 \text{ mm}$) untersucht. Für die

Festbetonuntersuchungen wurden die Probekörper nach zuvor festgelegten Szenarien verdichtet und anschließend bis zur Prüfung erschütterungsfrei gelagert.

Die Untersuchungen zum Wasserabsondern ergaben bei den Betonen mit mittlerer und geringer Zähigkeit eine umso geringere Blutwassermenge, je stärker die Betone zuvor verdichtet worden waren. Der Zusammenhang zwischen der Verdichtung und der Blutwassermenge ist exemplarisch in **Bild 9** für den Beton mit mittlerer Zähigkeit dargestellt. Die mit steigender Verdichtungsintensität zunehmende Blutwassermenge kann damit begründet werden, dass die Zufuhr von Verdichtungsenergie zu einer Entlüftung und somit Verdichtung des Gefüges (also dem primär gewünschten Zweck der Verdichtung von Betonen) führt. Die Verdichtung des Gefüges führt dann dazu, dass das Aufsteigen von Blutwasser in dem Beton erschwert wird und die Menge an abgesondertem Blutwasser mit zunehmender Verdichtung sinkt. Die Untersuchungen ergaben zudem, dass neben der Verdichtungsintensität auch die Verarbeitungseigenschaften (Zähigkeit und Konsistenz) des Betons die Blutwassermenge bestimmen. So sonderten Betone bei sonst gleicher Zusammensetzung mit zunehmender Konsistenz eine größere Menge Wasser ab. Aufgrund des höheren Wassergehalts zeigten die Betone mit geringer Zähigkeit ($(w/z)_{eq} = 0,75$) ein stärker ausgeprägtes Bluten als die Betone mit mittlerer Zähigkeit ($(w/z)_{eq} = 0,46$), während bei den Betonen mit hoher Zähigkeit aufgrund des geringen Wassergehalts ($(w/z)_{eq} = 0,30$) unabhängig von der Verdichtungsintensität kein Wasserabsondern festgestellt wurde.

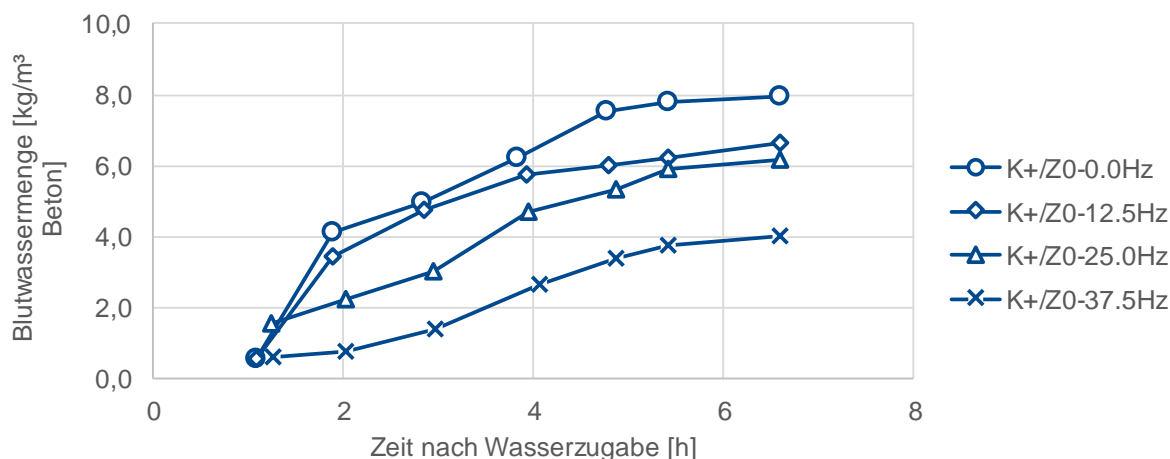


Bild 9 Zeitliche Entwicklung des Blutens des Betons mit mittlerer Zähigkeit in Abhängigkeit von der gewählten Verdichtungsfrequenz (0 Hz, 12,5 Hz, 25,0 Hz, 37,5 Hz) bei einer konstanten Verdichtungsdauer von 20 s

Die Sedimentation der groben Gesteinskörnung wurde am Frischbeton mit Auswaschversuchen in Anlehnung an die SVB-Richtlinie, Ausgabe 2003, Anhang N.2 [2] bzw. das BAW-Merkblatt „Entmischungssensibilität von Beton“ [3] bestimmt. Die Ergebnisse zeigten, dass das Sedimentationsverhalten stark von der Zähigkeit der Betone beeinflusst wurde. Während bei den Betonen mit hoher Zähigkeit nahezu keine Sedimentation der groben Gesteinskörnung feststellbar war (ohne Abbildung), zeigten die Betone mit geringer und mittlerer Zähigkeit eine zunehmende Sedimentation der groben Gesteinskörnung mit zunehmender Verdichtungsintensität, **Bild 10**. Bei diesen Betonen (Z- und Z0) zeigte sich ebenfalls ein Einfluss der Konsistenz. Bei gleicher Zähigkeit (Z- oder Z0) trat eine umso stärkere Sedimentation der groben Gesteinskörnung auf, je fließfähiger der Beton war ($K+ > K0 > K-$). Mit der Untersuchung von Schnittbildern zur Beurteilung der Sedimentation der

groben Gesteinskörnung konnten die Beobachtungen aus den Versuchen zur Sedimentation am Frischbeton qualitativ bestätigt werden.

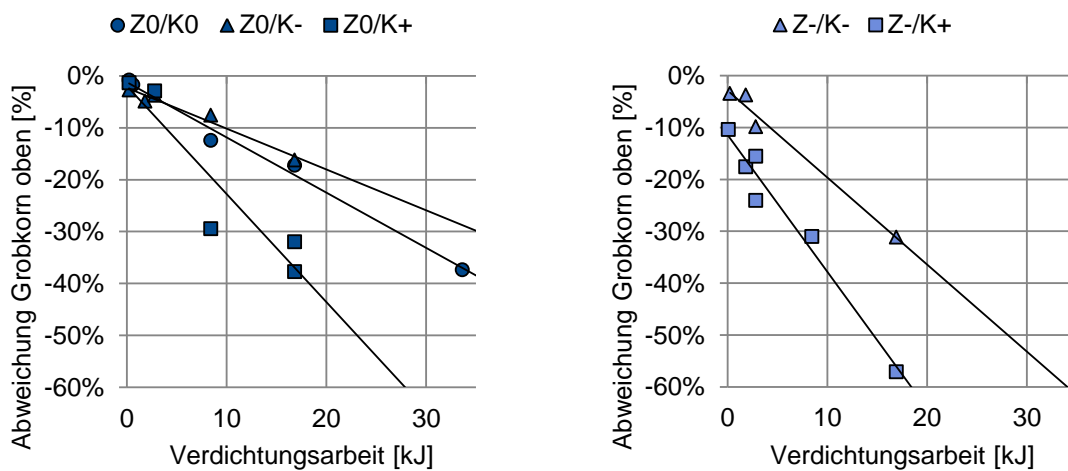


Bild 10 Sedimentation der groben Gesteinskörnung für die Betone mit mittlerer Zähigkeit (Z0, links) und geringer Zähigkeit (Z-, rechts); Ergebnisse der Forschungseinrichtung 1

Die Untersuchungen zur Druckfestigkeit ergaben bei den Betonen mit mittlerer und hoher Zähigkeit einen gewissen Anstieg der Druckfestigkeit mit zunehmender Verdichtungsarbeit, der keine deutliche Abhängigkeit von der Konsistenz zeigte, s. **Bild 11**. Der relative Zuwachs der Druckfestigkeit bei Steigerung der Verdichtungsintensität von der leichtesten auf die höchste untersuchte Intensität betrug 2 % bei den Betonen mit hoher Zähigkeit und 6 % bis 8 % bei den Betonen mit mittlerer Zähigkeit (je nach Konsistenzbereich) und fiel somit moderat aus. Bei den Betonen mit geringer Zähigkeit nahm die Festigkeit mit steigender Verdichtungsintensität ab, s. **Bild 12**. Der Festigkeitsunterschied zwischen den am wenigsten verdichteten Proben und den am intensivsten verdichteten Proben betrug unabhängig von der Konsistenz rund -10 %. Die Rohdichte der Probekörper veränderte sich durch Variationen der Verdichtungsintensität bei allen Betonen nur wenig, die Veränderungen lagen bei max. 2 %.

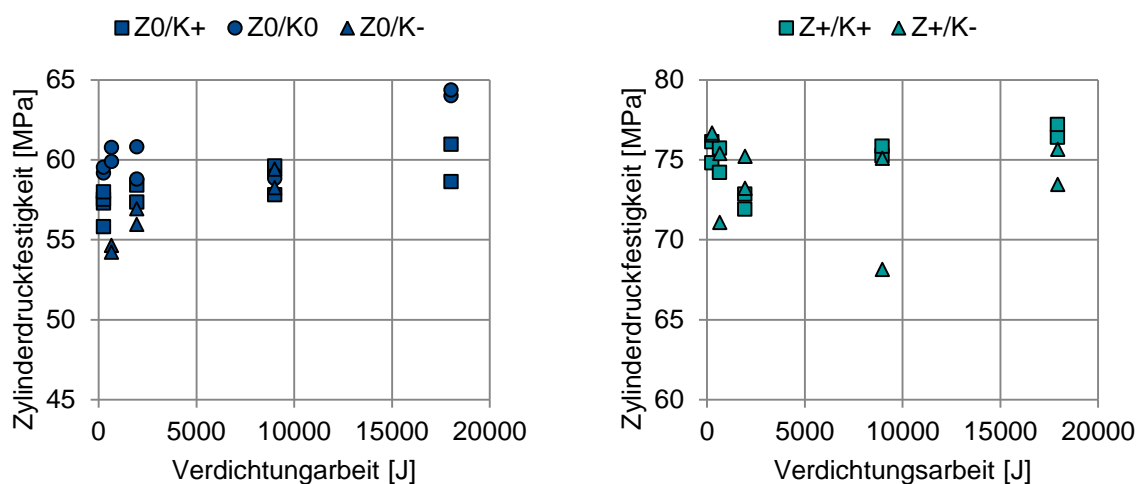


Bild 11 Druckfestigkeit der Betone Z0 und Z+; Ergebnisse der Forschungseinrichtung 1

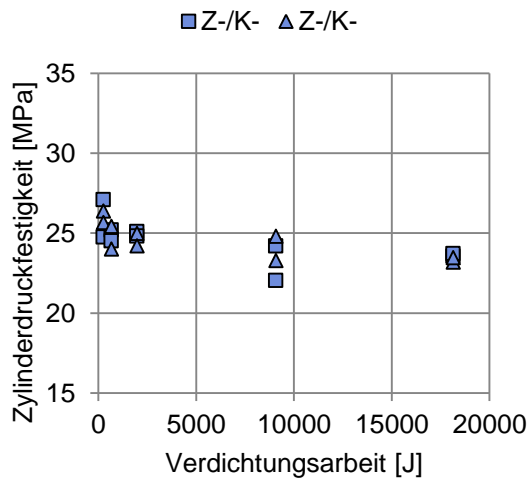


Bild 12 Druckfestigkeit der Betone Z-; Ergebnisse der Forschungseinrichtung 1

Die Wasseraufnahme der Betone verringerte sich bei allen Betonen mit zunehmender Verdichtungsintensität, **Bild 13**. Dabei bewirkte eine verhältnismäßig geringe Verdichtungsintensität (30 s bei 30 Hz) bereits eine Reduktion der Wasseraufnahme, während eine weitere Steigerung der Verdichtungsintensität nur noch eine verhältnismäßig geringe Veränderung der Wasseraufnahme bewirkte.

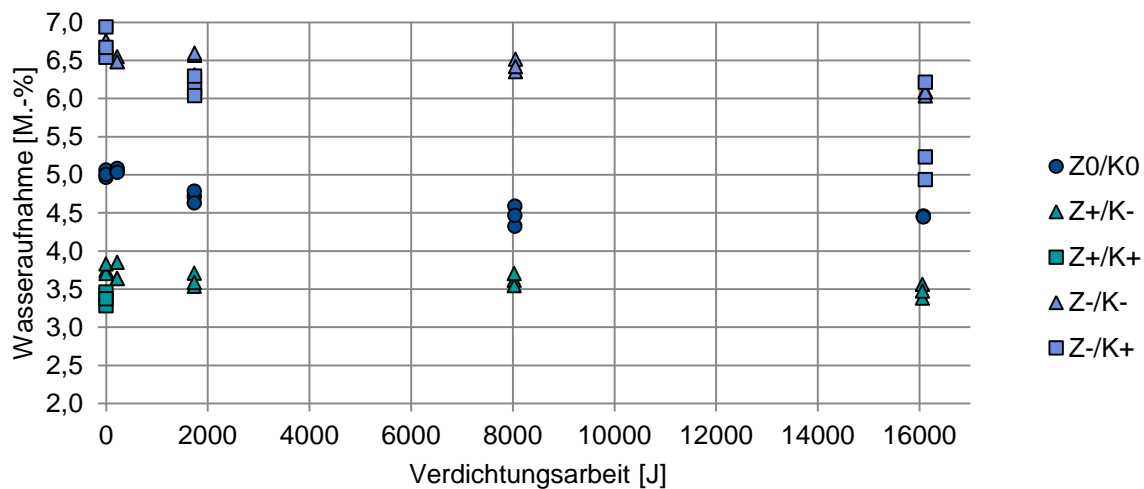


Bild 13 Wasseraufnahme der Betone (geprüft gemäß DAfStb-Heft 422, Abschnitt 2.1.5.2, an Würfeln mit 100 mm Kantenlänge im Alter von 28 Tagen); Ergebnisse der Forschungseinrichtung 1

3.5 Arbeitspaket E

Unter Verwendung der Erkenntnisse aus den vorangegangenen Arbeitspakete wurden im Arbeitspaket E Empfehlungen zur bedarfsgerechten Verdichtung leichtverarbeitbarer Betone in Abhängigkeit von deren Verarbeitungseigenschaften formuliert.

Eine bedarfsgerechte Verdichtung ist erreicht, wenn die Betone durch die Zufuhr dieser Verdichtung ausreichend entlüften, jedoch noch nicht nennenswert sedimentieren. Für die Betone mit niedriger Zähigkeit war dies bereits ohne weitere Verdichtung der Fall, da sie im

gesamten untersuchten Konsistenzbereich selbständig entlüftet. Diese Betone können händisch durch Schwabbeln oder Stochern verdichtet werden, allerdings sollte auf den Einsatz von Innenrüttlern verzichtet werden, da diese eine zu hohe Verdichtungsintensität aufweisen und den Beton zum Sedimentieren bringen. Die Betone mit mittlerer Zähigkeit können in der Praxis ebenfalls händisch durch Schwabbeln oder Stochern verdichtet werden. Im Gegensatz zu den wenig zähen Betonen kann für deren Verdichtung auch ein Innenrüttler eingesetzt werden, wenn dieser maßvoll zur Anwendung kommt. Hierbei ist darauf zu achten, dass der Innenrüttler nur so lange an einer Stelle im Beton belassen wird, wie Luftblasen aus dem Beton aufsteigen und kein sichtbares Absinken der groben Gesteinskörnung an der Betonoberfläche auftritt. Die maximal ertragbare Verdichtung kann gesteigert werden, wenn die Betonkonsistenz bei unveränderter Zusammensetzung reduziert wird. Bei anspruchsvollen Bauteilen sollte an Probekörpern, die auf die Geometrie der Bauteile angepasst sind, vorab die Eignung der geplanten Kombination von Verarbeitungseigenschaften und Verdichtungsmethoden getestet werden.

Die untersuchten Betone mit hoher Zähigkeit konnten mit den klassischen Verdichtungsmethoden und -dauern weder zur weiteren Entlüftung, noch zur Sedimentation gebracht werden. Diese Betone sollten daher vornehmlich mit Ausbreitmaßen ≥ 700 mm eingesetzt werden, da sie dann einen selbstverdichtenden Charakter besitzen. Wird die Fließfähigkeit reduziert, führt deren hohe Viskosität zu einem mangelhaften Entlüftungsverhalten, welchem nur durch unverhältnismäßig lange Verdichtungsdauern (mehrere Minuten anhaltende Verdichtung) Abhilfe geschaffen werden kann.

4 Literatur und Regelwerke

- [1] Kordts, S.; Breit, W.: Kombiniertes Prüfverfahren zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit von SVB – Auslaufkegel. In: Beton 54 (4), 2004
- [2] Deutscher Ausschuss für Stahlbetonbau (Hrsg.): DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie), Ausgabe November 2003, Beuth, Berlin, 2003
- [3] Bundesanstalt für Wasserbau (Hrsg.): BAWMerkblatt (Entwurf) Entmischungssensibilität von Beton (MESB), Ausgabe 2018

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 19276 N der VDZ gGmbH, Tannenstraße 2, 40476 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.