



Schwerpunkt IV

- Allgemeines

Aufbauend auf den Untersuchungen in Schwerpunkt III wurden die Einflüsse von Wasser und Fließmittel bei der Herstellung und die Steuerung der Frischbetoneigenschaften von selbstverdichtenden Betonen untersucht.

Wie aus der Definition des SVB hervorgeht, muss er so fließfähig sein, damit die groben Gesteinskörnungen im Mörtel „schwimmen“ können aber die Luft weiterhin ausreichend aufsteigen und entweichen kann. Das Sedimentieren der groben Gesteinskörnungen und das Aufsteigen von Feinmörtel, Leim oder Wasser vor dem Erstarren des Betons müssen vermieden werden. Andernfalls entstehen inhomogen zusammengesetzte Bauteile, die in ihrer Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit beeinträchtigt sein können. Das Leimvolumen und die Sieblinie müssen so gewählt werden, dass der Beton die Schalung vollständig ausfüllt und nicht vor Bewehrungszwischenräumen blockiert.

Für die Untersuchungen zur Ermittlung der Einflussgrößen auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften wurden selbstverdichtende Betone in unterschiedlichen Zusammensetzungen hergestellt. Entsprechend der Untersuchungen zur granulometrischen Charakterisierung der Feinstoffe wurde eine Serie aus gebrochenkörnigem Mehlkorn (Typ I) und eine weitere aus gemischtkörnigem Mehlkorn (Typ II) zusammengesetzt.

Die Betonausgangsstoffe wurden in der Reihenfolge Gesteinskörnung Zement und Zusatzstoff, Wasser und Fließmittel in einem 250 Liter fassender Laborzwangsmischer 3 Minuten nach Fließmittelzugabe gemischt. Danach wurde das Setzfließmaß s_m mit zugehöriger Fließzeit t_{500} , die Trichterauslaufzeit T , die Steighöhe in der Box sowie das Setzfließmaß mit Blockierring $s_{m,b}$ mit zugehöriger Fließzeit $t_{500,b}$ gemessen. Die Frischbetonprüfungen wurden alle 30 Minuten nach kurzem Aufmischer wiederholt. Erreichte ein Beton die Grenze der Fließfähigkeit für Selbstverdichtung, wurde jeweils konstant 0,2 M.-% vom Zementgewicht Fließmittel in den Mischer nachdosiert und 90 Sekunden gemischt. Unmittelbar danach wurden die Frischbetonprüfungen am nachdosierten SVE wiederholt und anschließend im alten Rhythmus fortgeführt. Die Entmischungsneigung der Betone wurde über die Zeit geprüft. Zu der

jeweiligen Frischbetonprüfungen wurden zylinderförmige Probekörper hergestellt.

- Zusammensetzung der Betone

Für die Betone vom Typ I wurde Portlandzement CEM I 32,5 R und Kalksteinmehl und für die Betone vom Typ II Hochofenzement CEM III/A 32,5 R und Flugasche verwendet. Ferner kamen Rheinsand und Rheinkies Trinkwasser aus dem Leitungsnetz der Stadt Düsseldorf sowie Fließmittel auf der Basis von Polycarboxylatether zum Einsatz. Die Betone waren so zusammengesetzt, dass das Leimvolumen rd. 400 l/m³ betrug. Dadurch begrenzte sich der Mehlkorngelalt auf ca. 550 kg/m³. Die Mehlkornhaufwerke waren so zusammengesetzt, dass auf der unteren Seite die Anforderungen an Konstruktionsbetone für die Expositionsclassen XC1/XC2 und auf der oberen Seite die Anforderungen für die Expositionsclassen XC4/XF1 erfüllt wurden. Die Betone besaßen eine optimierte Sieblinie, so dass alle untersuchten Betone die Anforderungen an blockierungsfreies Fließen erfüllten. Als Ausgangsbeton wurde jeweils ein SVB in Voruntersuchungen hinsichtlich des Wassergehalts optimiert. Untersucht wurden die Folgen geringer Abweichungen des Wassergehalts von rd. 7 l/m³ bei unterschiedlicher Fließmitteldosierungen auf den zeitlichen Verlauf des Setzfließmaßes, der Trichterauslaufzeit und der Steighöhe im Box Test. Des Weiteren wurden die Betone auf eine Fließmittelnachdosierung untersucht. Die Zusammensetzung der Betone ist in Tafel IV-1 und Tafel IV-2 dargestellt.

Tafel IV-1: Zusammensetzungen der Betone vom Typ I

Schlüssel- Nummer		SVB-								
		I.1	I.2	I.3	I.4	I.5	I.6	I.7	I.8	I.9
CEM I	kg/m ³	240	240	240	240	260	260	285	285	285
KM	kg/m ³	310	310	310	310	330	330	265	265	265
w	kg/m ³	168	168	175	175	175	182	165	172	178
g	kg/m ³	1624	1624	1606	1606	1567	1549	1638	1620	1604
PCE 1	M. %	1,1	1,2	1,1	1,2	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2
Luft	%	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

Tafel IV-2: Zusammensetzungen der Betone vom Typ II

--	--

Schlüssel- Nummer		SVB-								
		II.1	II.2	II.3	II.4	II.5	II.6	II.7	II.8	II.9
CEM III	kg/m ³	240	240	240	240	240	240	270	270	270
FA	kg/m ³	310	310	310	310	310	310	280	280	280
w	kg/m ³	168	168	168	168	175	175	173	173	180
g	kg/m ³	1566	1566	1566	1566	1548	1548	1561	1561	1542
PCE 1	M. %	0,8	0,9	1,0	1,1	0,8	0,9	-	-	-
PCE 2	M. %	-	-	-	-	-	-	2,2	2,4	2,2
Luft	%	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

- Verarbeitbarkeitseigenschaften

Aus der Kombination der Frisch- und Festbetonprüfungen konnten Bereiche abgeleitet werden, in denen die Betone selbstverdichtende Eigenschaften (ausreichende Entlüftung und gleichmäßige Kornverteilung) aufwiesen.

Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone vom Typ I

Bei Setzfließmaßen über 75 cm oder Trichterauslaufzeiten unter 8 s war die Mischungsstabilität der untersuchten Betone vom Typ I (CEM I 32,5 R und Kalksteinmehl) mit einem Zementgehalt von 240 bis 285 kg/m³ und einem Mehlkorngelbalt von 550 kg/m³ nicht immer gegeben. Lagen die Werte für das Setzfließmaß unter 60 cm und die Trichterauslaufzeit über 18 s, war die Selbstentlüftung der Betone nicht mehr ausreichend. Alle Betone erfüllten die Anforderungen für blockierungsfreies Fließen sowohl im Box Test als auch in der Blockierringprüfung, solange sie die oben genannten Fließeigenschaften aufwiesen.

Bei der Bewertung der Verarbeitbarkeitseigenschaften der Betone vom Typ I ist im Vergleich zu den Betonen vom Typ II (CEM III/A 32,5 R und Flugasche) zu beachten, dass das Leimvolumen aufgrund der unterschiedlichen Dichten der Zusatzstoffe (Kalksteinmehl = 2,7 kg/m³ zu Flugasche = 2,3 kg/m³) etwa 20 l/m³ geringer ist. Daher wurden einige orientierende Untersuchungen an Betonen vom Typ I mit einem dem Typ II entsprechenden Leimvolumen vor rd. 400 l/m³ durchgeführt. Durch den um rd. 20 l/m³ höheren Leimgehalt der Betone SVB I.5 und SVB I.6 konnte die Verarbeitbarkeit geringfügig verbessert werden. Der charakteristische Verlauf der

Verarbeitbarkeitseigenschaften, der auf das Zusammenwirken der gewählter Zement-Fließmittelkombination zurückzuführen ist, blieb indes bestehen.

Die Betone SVB I.7 bis SVB I.9 erfüllten aufgrund des Zementgehalts und des Wasserzementwertes die Anforderungen der Expositionsklassen XC4 und XF1. Diese Betone mit erhöhtem Zementgehalt bei gleichem Mehlkorngelalt zeigten das selbe Verhalten wie die Betone SVB I.1 bis SVB I.4. Trotz hoher Wasser- und Fließmitteldosierungen wurde immer nur ein geringes Setzfließmaß von rd. 73 cm bei relativ geringen Trichterauslaufzeiten erreicht. Daher wurde nur der Einfluss des Wassergehalts bei einer konstanter Fließmitteldosierung von 1,2 M.-% vom Zementgewicht auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften untersucht.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Betone des Typs I in der Kombination Portlandzement CEM I 32,5 R und Kalksteinmehl geringe Setzfließmaße bei generell geringen Trichterauslaufzeit erreichten. Eine Verringerung des Wassergehalts führte nicht zu einer Verringerung der Trichterauslaufzeit, sondern auch bei höheren Fließmittelgehalten zum früher Verlust der Verarbeitbarkeit. Fließmittelnachdosierungen brachten die Betone in den verarbeitungsfähigen Bereich zurück. Jedoch folgte in der Regel nach weiteren 30 Minuten erneut ein steiler Verarbeitbarkeitsabfall.

Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone vom Typ II

Für die Betone SVB II.1 bis SVB II.9 vom Typ II wurde ebenfalls der Einfluss von Wasser- und Fließmittel auf die zeitlichen Verläufe von Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit unter besonderer Beachtung der Entmischungsneigung über die Zeit untersucht. Bei Setzfließmaßen über 81 cm und oder Trichterauslaufzeiten unter 12 s war die Mischungsstabilität der hier untersuchten Betone mit einem Zementgehalt von 240 bis 270 kg/m³ und einem Mehlkorngelalt von 550 kg/m³ nicht immer gegeben. Lagen die Werte für das Setzfließmaß unter 70 cm und die Trichterauslaufzeit über 22 s, war die Selbstentlüftung der Betone nicht mehr ausreichend. Alle Betone erfüllter die Anforderungen für blockierungsfreies Fließen sowohl im Box Test als auch in der Blockierringprüfung, solange sie die oben genannter Fließeigenschaften aufwiesen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Betone des Typs II in der Kombination Hochofenzement und Flugasche relativ große Setzfließmaße bei höheren Trichterauslaufzeit erreichten. Insgesamt zeigten die Betone

einen überproportionalen Verarbeitbarkeitsverlust infolge des Anstieges der Trichterauslaufzeit. Höhere Fließmitteldosierungen konnten diesen Effekt zum Teil vermindern. Dadurch vergrößerte sich aber das Setzfließmaß über einen längeren Zeitraum, so dass die Betone erst zu späten Zeitpunkten nach Mischungsende den stabilen Verarbeitungsbereich erreichten. Fließmittelnachdosierungen brachten die Betone in den verarbeitungsfähiger Bereich zurück. Jedoch folgte in der Regel erneut ein steiler Verarbeitbarkeitsabfall. Trotzdem wiesen die Betone nach der Nachdosierung für rd. 40 Minuten selbstverdichtende Eigenschaften auf. Die Untersuchungen an den Betonen SVB II.7 bis SVB II.9 mit PCE 2 zeigten die selben Tendenzen wie die Untersuchungen an den Betonen SVB II.1 bis SVB II.6 mit PCE 1. Im Vergleich veränderten sich jedoch die Trichterausfließzeiten der Betone SVB II.7 bis SVB II.9 mit PCE 2 trotz des höheren Zementgehalts nicht so stark.

- Überprüfung der Ergebnisse im Transportbetonwerk

Um die Laborergebnisse zu überprüfen, wurde ein selbstverdichtender Beton SVB II.TB mit einer Zusammensetzung entsprechend SVB II.8, siehe Tafel IV-2, im Transportbetonwerk hergestellt und seine Frisch- und Festbetoneigenschaften untersucht. Dabei war besonders zu beachten, dass die Gesteinskörnungen je nach Fraktion Eigenfeuchten von 1 bis 5 M.-% aufwiesen. Dies erschwert auf der einen Seite eine genaue Wasserdosierung. Auf der anderen Seite sind diese Gesteinskörnungen in der Regel wassergesättigt, so dass ein Wasserverlust durch Saugen nicht eintritt. Zur Herstellung des SVB wurde folgende Vorgehensweise gewählt. Um zu vermeiden, dass dem Beton mehr Wasser als benötigt zugegeben wird, wurde unter Berücksichtigung der Eigenfeuchte etwa 10 l Wasser pro m³ Beton planmäßig weniger eingewogen. Die Ausgangskonsistenz des SVB ohne Fließmittel wurde dann augenscheinlich durch weitere Wasserzugabe eingestellt. Danach wurde die vorgesehene Fließmittelmenge zugegeben, der Beton ausreichend gemischt und in einen Fahrmischer aufgegeben. Es wurden zwei Chargen à 2,0 m³ hergestellt. Anschließend wurden die zeitlichen Verläufe des Setzfließmaßes und der Trichterauslaufzeit überprüft sowie die Steighöhe im Box Test ermittelt.

Bild IV-1 zeigt die zeitlichen Verläufe von Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit für den Beton SVB II.TB. Wie auch in den Laboruntersuchungen besaß der Beton bei Setzfließmaßen zwischen 70 und 81 cm und Trichterauslaufzeiten zwischen 12 und 22 Sekunden selbstverdichtende Eigenschaften. Er erfüllte

die Anforderungen für blockierungsfreies Fließen im Box Test, solange er die oben genannten Fließeigenschaften aufwies. In seiner Verarbeitbarkeitseigenschaften war er mit dem entsprechenden Laborbeton SVB II.8 vergleichbar.

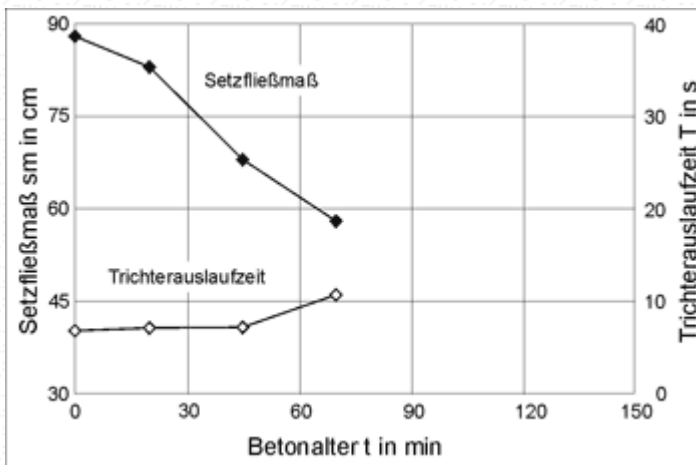


Bild IV-1: Verarbeitbarkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Zeit für SVB II.TB

- Festbetoneigenschaften

Aufgrund des erhöhten Mehlkorngelhalts und der nicht klassifizierter Konsistenz weicht selbstverdichtender Beton von den Regelungen der DIN EN 206-1/DIN 1045-2 ab. Um den Einfluss des erhöhten Mehlkorngelhalts und der verdichtungsfreien Einbau auf die Gebrauchseigenschaften des Betor abschätzen zu können, wurden von charakteristischen SVB aus den obiger Serien Festbetonkennwerte ermittelt. Es zeigte sich, dass alle hier untersuchten Betone anforderungsgemäße Festbetoneigenschaften besaßen. Tafel IV-3 zeigt beispielhaft die Festbetonkennwerte von SVB II.TB aus der Praxisversuchen

Tafel IV-3: Festbetonkennwerte des Betons SVB II.TB

Eigenschaft	Einheit	Prüfzeitpunkt	Wert
Druckfestigkeit	N/mm ²	2 d	7,3
	N/mm ²	7 d	30,3
	N/mm ²	28 d	54,1
Spaltzugfestigkeit	N/mm ²	28 d	4,2
Elastizitätsmodul	N/mm ²	28 d	32000
Schwindverformung	mm/m	91 d	0,38
Carbonatisierungstiefe	mm	91 d	5,9

- Zusammenfassung der Betonversuche

Durch die Kombination von Frisch- und Festbetonuntersuchungen konnten die Verarbeitbarkeitsbereiche für selbstverdichtende Eigenschaften, Stagnation und Sedimentation in Abhängigkeit des Wasser- und Fließmittelgehalts ermittelt werden. Ebenso waren die zeitlichen Verläufe der verschiedenen Bereiche quantifizierbar. Die Ergebnisse zeigten auf der einen Seite, dass durch gezielte Wasser- und Fließmittelgehalte die Verarbeitbarkeitseigenschaften zeitlich sehr genau gesteuert werden können. Auf der anderen Seite untermauern die Ergebnisse, dass Schwankungen der Wasser- und Fließmittelgehalte in einer laufenden Produktion sehr genau beherrscht und beobachtet werden müssen.

Untersuchungen an selbstverdichtenden Betonen zum Einfluss der Temperatur auf die Verarbeitbarkeit bestätigten das in den Mörtelversuchen gefundene Verhalten. Die durch die Temperatur beeinflussten unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten zwischen Zement, Füller und Fließmittel führen zu unterschiedlichen Fließmitteldepots, die eine längere bzw. kürzere Verarbeitbarkeit des Betons gewähren und damit maßgeblich den Verarbeitbarkeitszeitraum beeinflussen. Bei den Betonen war der Einfluss der höheren Temperaturen auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften ausgeprägter als bei den Mörteln. Dieses Verhalten kann durch die im Vergleich erhöhte Gesteinskörnungsfläche und das größere Temperaturreervoir der groben Gesteinskörnungen erklärt werden.

