

## **Wpływ objętości zaczynu cementowego na konsystencję mieszanek do wysokowartościowych betonów samozagęszczalnych i masywnych**

**Bartłomiej Zarzycki<sup>1</sup>, Wojciech Piasta<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *bzarzycki@tu.kielce.pl*

<sup>2</sup> *Katedra Technologii i Organizacji Budownictwa, Wydział Budownictwa i Architektury,  
Politechnika Świętokrzyska, e-mail: wpiasta@tu.kielce.pl*

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących wpływu objętości zaczynu cementowego i stosunku w/c na konsystencję mieszanek betonowych stosowanych do wykonywania wysokowartościowych betonów samozagęszczalnych i masywnych. Badaniom poddano sześć mieszanek zawierających zaczyn cementowy w ilości od 220 do 420 dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, z których trzy projektowane były jako betony wysokowartościowe oraz dla porównania trzy betony zwykłe. Badania konsystencji mieszanek betonowych przeprowadzono metodą stolika rozplywowego oraz opadu stożka, a także przeprowadzono dodatkowe testy samozagęszczalności. Wykonano także badania wytrzymałości na ściskanie, aby wykazać, że betony są wysokowartościowe. Stwierdzono silny wpływ objętości zaczynu na urabialność i konsystencję mieszanki betonowej, natomiast wpływ stosunku w/c jest zdecydowanie mniejszy dzięki zastosowaniu superplastyfikatora wysokiej sprawności.

**Słowa kluczowe:** zaczyn, konsystencja, mieszanka betonowa, beton wysokowartościowy, beton samozagęszczalny, beton masywny

### **1. Wprowadzenie**

Beton zwykły, pomimo swojej bardzo dużej uniwersalności nie zapewnia wystarczających właściwości z punktu widzenia wymagań technologicznych w przypadku specjalnych konstrukcji betonowych. Elementy gęsto zbrojone, obliczane do przenoszenia dużych naprężeń czy elementy o dużych przekrojach wykraczają poza właściwości betonu zwykłego. Z tego względu konieczne jest stosowanie betonów nowej generacji lub specjalnych o szczególnym składzie, które charakteryzują się wyraźnie lepszymi właściwościami użytkowymi. Szczególnymi rodzajami betonu wysokowartościowego są beton wysokowartościowy masywny oraz beton wysokowartościowy samozagęszczalny, na których skład nie ma opracowanych teoretycznych metod projektowania.

Przyjęto, że beton wysokowartościowy to taki, który charakteryzuje się wytrzymałością na ściskanie powyżej 60 MPa, niekiedy przekraczając nawet 100 MPa i więcej. Wskaźnik w/c betonów wysokowartościowych wynosi nie więcej niż 0,38, co wpływa na ograniczenie ilości wody, przy jednoczesnym zastosowaniu cementów wysokiej jakości (klasy 42,5 lub 52,5) [1, 2]. Najczęściej wykorzystuje się cementy z dodatkiem pyłów krzemionkowych, a od niedawna granulowanego żużla wielkopieczowego, ale o dużej powierzchni właściwej. Beton wysokowartościowy charakteryzuje się również wysoką

trwałością, wynikającą zasadniczo z małej porowatości osiąganą za pomocą niskiego wskaźnika w/c oraz dzięki zastosowaniu dodatków mineralnych, które uszczelniają strukturę zaczynu [3].

Mieszanki samozagęszczalne cechują się wysoką objętością zaczynu, a więc także spoiwa. Bardzo istotne w przypadku betonów samozagęszczalnych jest, aby świeża mieszanka miała nie tylko możliwe wysoką płynność, ale jednocześnie była stabilna i odporna na segregację oraz wytrącanie się zaczynu. Z punktu widzenia urabialności takiej mieszanki kluczowe znaczenie ma lepkość plastyczna oraz granica płynięcia. Im mniejszą granicę płynięcia ma mieszanka, tym jest ona lepiej urabialna. Lepkość plastyczna wpływa nie tylko na urabialność mieszanki, ale także na jej stabilność i zdolność do samoodpowietrzania [4]. Właściwości te mieszanka przeznaczona do betonów wysokowartościowych może osiągnąć tylko dzięki stosowaniu specjalnego wysokosprawnego superplastyfikatora kompatybilnego z cementem oraz stosowanymi dodatkami mineralnymi, zachowując niski stosunek w/c.

Skład mieszanki betonu masywnego jest zdeterminowany przez kryterium najniższego ciepła twardnienia i powolny przyrost temperatury poprzez wydłużony czas hydratacji. Należy zatem stosować cementy niskokaloryczne, ograniczające wzrost temperatury wewnątrz twardniejącej mieszanki. Zmniejsza to naprężenia własne wywołane niejednorodnym polem temperatury wewnątrz betonowanego elementu [5]. Z tego też powodu zaleca się stosowanie cementów hutniczych CEM III lub pułolanowych CEM IV zaliczanych do grupy cementów o niskim cieple hydratacji (LH) wynoszącym poniżej 270 J/g [6, 7].

Przy wykonywaniu mieszanek do betonów wysokowartościowych samozagęszczalnych duże utrudnienia może stworzyć, szczególnie w praktyce, nie tyle osiągnięcie wysokiej wytrzymałości, ale uzyskanie właściwej urabialności i zagęszczalności rozumianej jako ilość energii potrzebnej do skutecznego zagęszczenia. W badaniach laboratoryjnych zagadnienie to zostało w znacznym stopniu rozwiązane [8, 9, 10]. Nierozpoznane jest natomiast zagadnienie właściwej zagęszczalności i urabialności betonów masywnych wysokowartościowych.

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu objętości zaczynu i wskaźnika w/c na konsystencję mieszanek betonów wysokowartościowych masywnych i samozagęszczalnych.

## 2. Metody i materiały

Zagadnienie utrudnionej zagęszczalności i urabialności betonów samozagęszczalnych i masywnych wysokowartościowych podjęto się rozwiązać przyjmując w sposób arbitralny stosunek w/c = 0,3 jako wystarczający do osiągnięcia wysokiej wytrzymałości. Jako główną zmienną w badaniu przyjęto objętość zaczynu cementowego.

Badaniami objęto sześć mieszanek betonowych: trzy z nich projektowane jako betony wysokowartościowe – masywny z najniższą objętością zaczynu, typowy beton wysokowartościowy oraz beton samozagęszczalny z najwyższą objętością zaczynu – a także, dla porównania, trzy mieszanki do betonów zwykłych również zróżnicowane pod względem objętości zaczynu. Czynniki zmienne w badaniu pokazano w tabeli nr 1.

Tabela 1. Czynniki zmienne w badaniu

Stosunek w/c		Objętość zaczynu [dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]		
0,3	0,6	220	320	420

Na podstawie badań wstępnych przyjęto za właściwe stosowanie wskaźnika  $w/c = 0,3$  w przypadku betonów wysokowartościowych oraz  $w/c = 0,6$  w przypadku betonów zwykłych. Wszystkie betony zostały wykonane z cementu hutniczego CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA, piasku naturalnego 0/2 mm oraz łamanego grubego kruszywa bazaltowego o uziarnieniu 2/8 oraz 8/16 mm. Wybór kruszywa grubego bazaltowego wiąże się z jego wysoką wytrzymałością na ściskanie, która ma znaczenie przy wykonywaniu betonów wysokowartościowych. Użyty w badaniach cement został wybrany z powodu jego niskiego ciepła hydratacji, a więc przydatności do wykonywania betonów o dużej zawartości cementu, a także betonów masywnych. Cementy zawierające zmielony granulowany żużel wielkopieczowy z powodzeniem mogą być stosowane również do betonów samozagęszczalnych, a także, ze względu na osiągnięte przez nie wysokie wytrzymałości w późniejszym okresie dojrzewania, do betonów wysokowartościowych. Jako domieszki upłynniającej użyto wysokiej jakości superplastyfikatora polimerowego na bazie eteru polikarboksylowego. W przypadku betonów zwykłych ( $w/c = 0,6$ ) nie było konieczności stosowania superplastyfikatora. Ilość tej domieszki w składzie mieszanki samozagęszczalnej została określona za pomocą zarobów próbnych, tak aby zapewnić odpowiednie parametry konsystencji i urabialności wymagane dla tego typu mieszanki przy jej jednoczesnej stabilności. Domieszka upłynniająca dozowana była wagowo wraz z wodą zarobową. W celu zachowania niezmiennych proporcji pomiędzy objętością zaczynu, zaprawy oraz kruszywa grubego dla poszczególnych rodzajów mieszanek, przyjęto stałe wartości punktu piaskowego wynoszące 28, 34 oraz 40% dla objętości zaczynu równych odpowiednio 220, 320 i 420 dm<sup>3</sup>. Składy mieszanek betonowych poddanych badaniom podano w tabeli 2.

Tabela 2. Składy mieszanek betonowych wykorzystanych w badaniu

	w/c = 0,30			w/c = 0,60		
$V_z$	220	320	420	220	320	420
$W$	103,8	151	195,8	141,1	205,2	269,4
$C$	346,2	503,5	660,8	235,2	342	448,9
$P$	631,8	663	661,1	631,8	663,8	661,1
$K_{2-8}$	812,4	644,3	495,8	812,4	644,3	495,8
$K_{8-16}$	812,4	644,3	495,8	812,4	644,3	495,8
$SP$	3,46	1,98	5,67	-	-	-

$V_z$  – objętość zaczynu w mieszance betonowej [dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>],  $W$  – ilość wody [kg/m<sup>3</sup>],  $C$  – ilość cementu CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA [kg/m<sup>3</sup>],  $P$  – ilość piasku frakcji 0/2 [kg/m<sup>3</sup>],  $K_{2-8}$  – ilość kruszywa bazaltowego frakcji 2/8 mm [kg/m<sup>3</sup>],  $K_{8-16}$  – ilość kruszywa bazaltowego frakcji 8/16 mm [kg/m<sup>3</sup>],  $SP$  – ilość domieszki upłynniającej [dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>].

Poddane badaniom mieszanki betonowe oraz betony obejmują pod względem wskaźnika  $w/c$  oraz objętości zaczynu niemal cały zakres stosowanych powszechnie betonów, dzięki czemu otrzymane wyniki mogą być wykorzystywane przy projektowaniu mieszanek.

Mieszanki betonowe bezpośrednio po zarobieniu poddano testom mającym określić ich parametry konsystencji. Do testów podstawowych wykonanych dla każdej mieszanki należało badanie opadu stożka oraz rozplywu mieszanki na stoliku rozplywowym wykonane zgodnie z normami [11, 12]. Dodatkowo, w przypadku mieszanki betonu wysokowartościowego samozagęszczalnego wykonano testy mające określić parametry takie jak płynność i czas rozplywu do średnicy 500 mm (Slump-flow test), zdolność

przepływu przez przeszkody symulujące pręty zbrojeniowe (L-Box test) oraz lepkość i zdolność mieszanki do wypełniania (V-funnel test). Wszystkie testy techniczne wykonane dla mieszanki betonu samozagęszczalnego pozwalają na wizualną ocenę odporności mieszanki na segregację i wydzielanie się zaczynu.

W przypadku wszystkich mieszanek pobrano również po pięć próbek sześciennych o krawędzi 10 cm do badania wytrzymałościowego po 28 dniach dojrzewania. Badania te były konieczne w przypadku betonów wysokowartościowych w celu potwierdzenia, że spełniają one wymagania wytrzymałościowe stawiane dla tego typu betonów. Próbkę zostały rozformowane po 24 godzinach, a następnie dojrzewały przez 24 dni całkowicie zanurzone w wodzie. Przed badaniem próbki były suszone przez 3 dni w warunkach powietrzno-suchych. Wytrzymałość na ściskanie zbadano w maszynie wytrzymałościowej Tecnotest Modena.

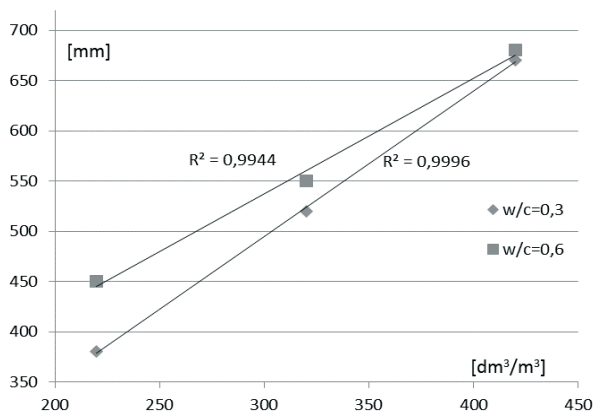
### 3. Wyniki badań i ich analiza

W tabeli nr 3 przedstawiono wyniki badania konsystencji metodą stolika rozpliwowego. Pokazują one wyraźnie, że bez względu na wskaźnik w/c, wpływ ilości zaczynu na średnicę rozpliwu mieszanki jest silny. Na rysunku nr 1 porównano wyniki badania konsystencji metodą stolika rozpliwowego. W przypadku mieszanki betonu wysokowartościowego samozagęszczalnego ( $w/c = 0,3$ ,  $V_z = 420 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ ) zanotowano rozpliw swobodny, bez wymuszania ruchu płyty stolika, natomiast w przypadku mieszanki betonu zwykłego o objętości zaczynu wynoszącej  $420 \text{ dm}^3/\text{m}^3$  stwierdzono umiarkowaną segregację polegającą na niewielkim opadaniu ziaren kruszywa grubego, jednak bez wytrącania się zaczynu. Jest to spowodowane przede wszystkim względnie dużą ilością wody w zaczynie i małą ilością kruszywa grubego, co łącznie powoduje zbyt dużą płynność mieszanki oraz zbyt niską lepkość.

Tabela 3. Wyniki badania konsystencji metodą stolika rozpliwowego

	w/c = 0,3			w/c = 0,6		
objętość zaczynu [ $\text{dm}^3/\text{m}^3$ ]	220	320	420	220	320	420
rozpliw [mm]	380	520	670*	450	550	680

\*rozpliw swobodny, bez wymuszania ruchu płyty stolika



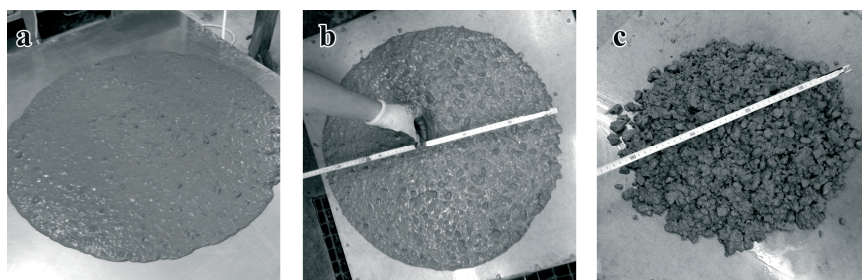
Rys. 1. Zależność średnicy rozpliwu od objętości zaczynu

Na rysunku nr 1 zauważyć można, iż średnica rozplywu rośnie proporcjonalnie z ilością zaczynu. Średnica ta jest jednocześnie większa w przypadku wskaźnika  $w/c = 0,6$ , jednak różnice w stosunku do mieszanek z  $w/c = 0,3$  są niewielkie, a jest to spowodowane użyciem superplastyfikatora, który znacząco poprawił urabialność świeżych mieszanek. Nadmienić należy, że w przypadku betonu wysokowartościowego masywnego zwiększanie ilości domieszki powyżej tej określonej w tabeli nr 2 nie wpływało na poprawę urabialności, więc z technologicznego i ekonomicznego punktu widzenia było bezcelowe. Osiągnięto w tym przypadku granicę przesylenia mieszanki superplastyfikatorem.

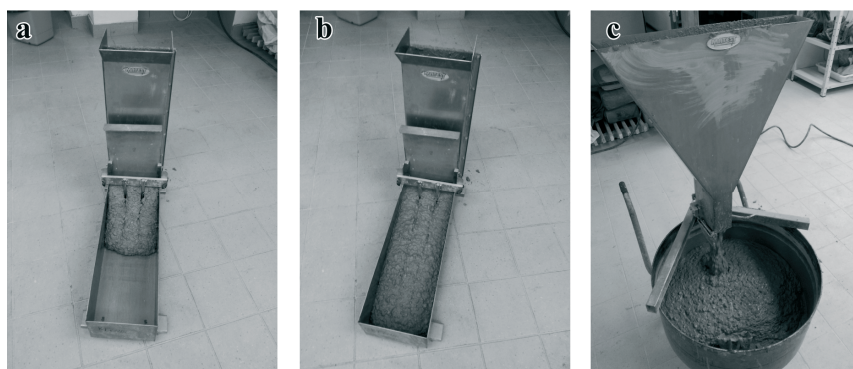
W tablicy nr 4 umieszczono wyniki testów technicznych przeprowadzonych dla mieszanki betonu wysokowartościowego samozagęszczalnego. Potwierdziły one, że mieszanka ta spełnia wymagania samozagęszczalności oraz zdolności do samoodpowietrzania, przy jednoczesnym zachowaniu jej stabilności, bez oznak segregacji.

Tabela 4. Wyniki badania konsystencji metodą stolika rozplywowego

	slump-flow test	czas rozplywu T500	V-funnel	L-box
wynik testu technicznego	670 mm	1,8 s	5,7 s	PL = 0,80
interpretacja wyniku	klasa rozplywu SF2	klasa lepkości VS1	klasa lepkości VF1	klasa zdolności przepływu PL1 (2 pręty)
krótka charakterystyka testu	średnica swobodnego rozplywu	czas rozplywu mieszanki do średnicy 500 mm	czas wypływu z lejka V-kształtnego	zdolność do przepływu pomiędzy przeszkodami bez segregacji

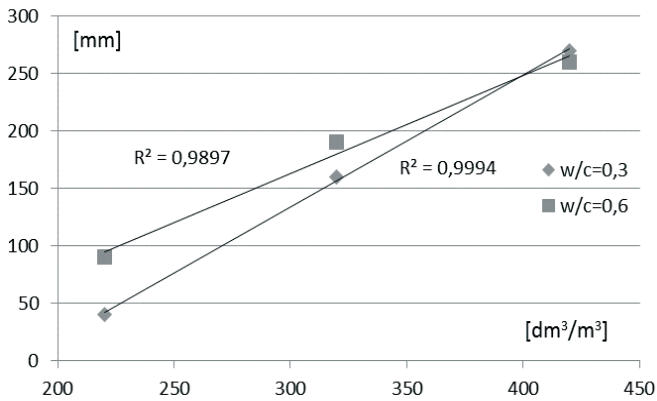


Rys. 2. Widok po teście rozplywu mieszanek do betonów wysokowartościowych: a) samozagęszczalnych, b) typowych BWW, c) masywnych



Rys. 3. Widok testów technicznych mieszanki betonu wysokowartościowego samozagęszczalnego: a), b) L-Box, c) V-funnel

Na rysunku nr 4 oraz w tabelicy nr 5 pokazano wyniki badania konsystencji metodą opadu stożka. Metoda ta nie jest zalecana dla mieszanek ciekłych, jednak dla celów porównawczych wykorzystano ją także w badaniu mieszanki samozagęszczalnej.



Rys. 4. Zależność opadu stożka od objętości zaczynu

Tabela 5. Wyniki badania konsystencji metodą opadu stożka

	w/c = 0,3			w/c = 0,6		
objętość zaczynu [dm³/m³]	220	320	420	220	320	420
opad [mm]	40	160	270	90	190	260

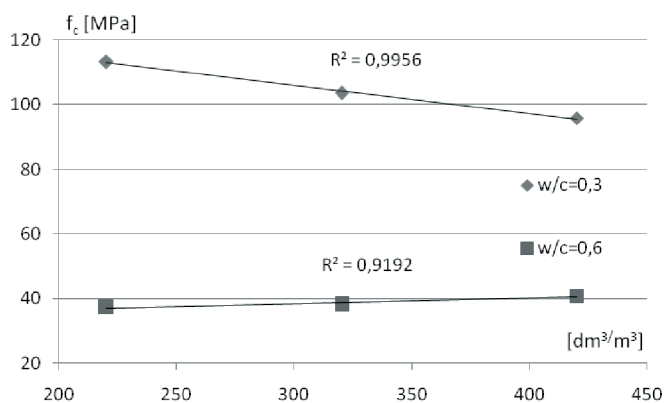
Badanie metodą opadu stożka potwierdziło, że konsystencja mieszanki jest zależna nie tylko od wskaźnika w/c, ale w znacznym stopniu od objętości zaczynu. Zauważyć należy jednak, że wraz ze wzrostem objętości zaczynu zmniejsza się różnica wielkości opadu stożka pomiędzy mieszankami z różnym wskaźnikiem wodno-cementowym. Świadczy to o wysokiej skuteczności domieszki upłynniającej, która pozwoliła uzyskać w przypadku mieszanki samozagęszczalnej (w/c = 0,3,  $V_z = 420 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ ) opad stożka większy niż ten zanotowany dla mieszanki z taką samą objętością zaczynu, ale dużo wyższą zawartością wody (w/c = 0,6).

Zarówno badanie na stoliku rozpliwowym, jak i metoda opadu stożka wykazały zależność płynności mieszanki betonowej od objętości zaczynu. Ponadto, w przypadku mieszanek ze wskaźnikiem w/c = 0,3 zaobserwować można silniejszy wpływ zmiany objętości zaczynu na badane parametry. Może się to wiązać ze stosowaniem domieszki upłynniającej, której wpływ na płynność mieszanki jest również zależny od objętości zaczynu. Powyższe wyniki pokazują jednocześnie, że można przygotować mieszanki o zbliżonej konsystencji i płynności nawet wtedy, gdy ich wskaźniki wodno-cementowe znacznie się różnią. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu superplastyfikatorów wysokiej jakości, pozwalających znacznie zredukować ilość wody i utrzymujących właściwe parametry reologiczne przez kilkadziesiąt minut.

Współczynnik determinacji określający dopasowanie zmierzonych w badaniu wartości do wyznaczonych równań jest w każdym przypadku bliski jedności.

Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie potwierdziły, że z trzech mieszanek o wskaźniku w/c = 0,3 uzyskano betony o wytrzymałości powyżej 90 MPa, a w przypadku

betonu wysokowartościowego masywnego ze względnie niską ilością cementu wynoszącą  $346 \text{ kg/m}^3$  wytrzymałość ta wyniosła aż 113 MPa. Badanie to pokazało również, że wytrzymałość na ściskanie betonów wysokowartościowych i zwykłych ma różną zależność i spada wraz ze wzrostem objętości zaczynu w przypadku betonów wysokowartościowych, natomiast w przypadku betonów zwykłych wytrzymałość ta nieznacznie rośnie. Zależność wytrzymałości na ściskanie od objętości zaczynu pokazano na rysunku nr 5.



Rys. 5. Zależność wytrzymałości na ściskanie od objętości zaczynu

#### 4. Wnioski

Zaprezentowane powyżej wyniki badań pozwalają na wyciągnięcie kilku wniosków:

1. Konsystencja mieszanki betonowej bardzo istotnie zależy od objętości zaczynu, wpływ wskaźnika wodno-cementowego można zredukować stosując wysoko sprawne superplastyfikatory.
2. Rozplływ oraz opad mieszanki betonowej wzrastają proporcjonalnie do objętości zaczynu. Pomiędzy objętością zaczynu a opadem i rozplływem mieszanki zachodzi silna korelacja liniowa.
3. Mieszanka samozagęszczalna, mimo niskiego wskaźnika  $w/c=0,3$ , spełniła wymagania testów technicznych samozagęszczalności (L-Box, V-funnel) i osiągnęła rozplływ swobodny 670 mm, a wytrzymałość na ściskanie tego betonu ponad 95 MPa.
4. Mimo stosowania superplastyfikatora polimerowego o bardzo wysokiej sprawności i przekroczenia granicy przesylenia, nie osiągnięto mieszanki betonowej o zadowalającej konsystencji i zagęszczalności do betonu masywnego wysokowartościowego. Główną tego przyczyną jest bardzo mała objętość zaczynu, a nie zbyt mała ilość superplastyfikatora lub jego niewystarczająca sprawność. Wytrzymałość tego betonu wyniosła ponad 110 MPa.

#### Literatura

- 1 Neville A.M. *Właściwości betonu*, Polski Cement, Kraków 2000.
- 2 Zieliński K. *Podstawy Technologii Betonu*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.

- 3 Gołaszewski J. *Betony Nowej Generacji*. Inżynier Budownictwa 3 (2014) 58–60.
- 4 Gołaszewski J. *Technologia betonu samozagęszczalnego a betonu zagęszczalnego w sposób tradycyjny*, Przegląd Budowlany 6 (2009) 28–36.
- 5 Kiernożycki W. *Betonowe konstrukcje masywne: teoria, wymiarowanie, realizacja*, Polski Cement, Kraków 2003.
- 6 PN-EN 197-1:2012 *Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku*.
- 7 PN-B-19707:2013-10 *Cement – Cement specjalny – Skład, wymagania i kryteria zgodności*.
- 8 Gołaszewski J., Kostrzanowska A. *Wpływ właściwości i ilości zaczynu na reologię betonów samozagęszczalnych wysokowartościowych*. Czasopismo Techniczne 1-B(2) (2010) 99–109.
- 9 Kostrzanowska A. *Kształtowanie samozagęszczalności betonów wysokowartościowych*, rozprawa doktorska, Gliwice 2011.
- 10 Szwabowski J., Gołaszewski J. *Technologia betonu samozagęszczalnego*, Polski Cement, Kraków 2010.
- 11 PN-EN 12350-2:2011 *Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka*.
- 12 PN-EN 12350-5:2011 *Badania mieszanki betonowej – Część 5: Badanie konsystencji metodą stolika rozplywowego*.

## **Effect of the cement paste volume on the consistency of mixes for high performance massive and self-compacting concretes**

**Bartłomiej Zarzycki<sup>1</sup>, Wojciech Piasta<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> e-mail: [bzarzycki@tu.kielce.pl](mailto:bzarzycki@tu.kielce.pl)

<sup>2</sup> Department of Building Engineering Technologies and Organization, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology, e-mail: [wpiasta@tu.kielce.pl](mailto:wpiasta@tu.kielce.pl)

**Abstract:** The article presents the results of research concerning the influence of the volume of cement paste and the w/c ratio on the consistency of concrete mixes for high-performance massive and self-compacting concrete. The research covered six types of concrete mixes containing from 220 to 420 dm<sup>3</sup> of cement paste in a cubic meter. Three of them were designed as high-performance concrete and for comparison three conventional ones. The consistency was tested with two methods: concrete slump test and flow table test, also additional tests of self-compacting mix were made. Compressive strength test were conducted to prove that concretes are high-performance. A high influence of the volume of cement paste on the workability and consistency of fresh concrete mix has been found, while the influence of the w/c ratio is considerably lower due to the dosage of high-quality superplasticizer.

**Keywords:** cement paste, consistency, concrete mix, high-performance concrete, self-compacting concrete, massive concrete