

# Beton samozagęszczalny

## – rewolucyjna innowacja

Beton samozagęszczalny jest z pewnością jedną z najbardziej rewolucyjnych innowacji w technologii betonu na przestrzeni ostatnich dekad. Materiał ten po raz pierwszy został zastosowany pod koniec lat osiemdziesiątych w Japonii, a obecnie jest przyjmowany z entuzjazmem w całej Europie. Wytwarzanie samozagęszczalnych mieszanek betonowych stało się możliwe dzięki opracowaniu nowoczesnego typu domieszek upłynniających, działających znacznie efektywniej niż tradycyjne superplastyfikatory.

Stosowanie betonu samozagęszczalnego, niewymagającego wibrowania, czyli zagęszczenia, przynosi korzyści ekonomiczne i ekologiczne, dlatego w światowych i krajowych publikacjach coraz więcej miejsca poświęca się temu właśnie zagadnieniu.

### Beton samozagęszczalny

– SCC (z ang. self-compacting concrete)

**Beton cementowy o specyficznych właściwościach świeżej mieszanki, zapewniających szczelne wypełnianie form lub deskowań, nawet przy obecności gęstego zbrojenia, jedynie pod wpływem własnego ciężaru, z równoczesnym zachowaniem jednorodności masy.** Należy zwrócić uwagę, że pojęcie „beton samozagęszczalny” nie jest do końca logiczne, gdyż zdolność do samozagęszczania dotyczyć może jedynie mieszanki betonowej.

#### Odporność na segregację

Zdolność mieszanki betonowej do pozostania jednorodną masą podczas mieszania, transportu i układania (wbudowania).

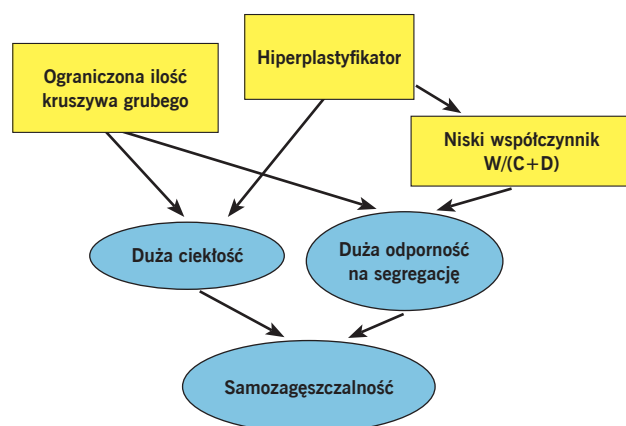
#### Zdolność przepływania (Passing ability, confined flowability)

Zdolność mieszanki betonowej do przepływania przez ciasne szczeliny, takie jak przestrzenie między prętami zbrojeniowymi, czy wąskie fragmenty form (deskowań), bez blokowania się i segregacji.

#### Zdolność wypełniania (Filling ability, unconfined flowability)

Zdolność mieszanki betonowej do całkowitego i szczelnego wypełnienia przestrzeni w formach (deskowaniach) pod wpływem własnego ciężaru.

Rys. 1. Generalne zasady uzyskania mieszanki samozagęszczalnej



### Istota samozagęszczalności

Z definicji betonu samozagęszczalnego wynikają trzy podstawowe cechy, dotyczące urabialności samozagęszczalnej mieszanki betonowej:

- bardzo wysoki stopień ciekłości, umożliwiający całkowite wypełnienie formy
- odporność na segregację
- zdolność do pokonywania przeszkód takich jak zbrojenie czy przewężenia w formach lub deskowaniu.

W celu uzyskania wymienionych cech należy spełnić kilka określonych warunków pokazanych na rysunku 1.

Ograniczona ilość kruszywa grubego, a w konsekwencji większa ilość zaprawy powoduje zmniejszenie liczby kolizji pomiędzy ziarnami kruszywa, co z kolei wpływa na zdolność przepływania. Niski współczynnik  $\frac{W}{C+D}$  zapewnia odporność na segregację, natomiast zastosowanie hiperplastyfikatora powoduje dużą płynność mieszanki betonowej.

W związku z powyższym, skład betonów samozagęszczalnych charakteryzuje się pewnymi specyficznymi cechami:

- zwiększoną zawartością ziaren frakcji pylastej, tj. <0,125 mm, pochodzących przede wszystkim z cementu i mikrowypełniacza
- zawartością bardzo efektywnych domieszek upłynniających nowej generacji, tzw. hiperplastyfikatorów
- niskim współczynnikiem  $\frac{W}{C+D}$ , przeważnie mniejszym niż 0,5.

### Wymagania dla samozagęszczalnej mieszanki betonowej

SCC może być używany w prefabrykacji lub jako beton towarowy, może być transportowany na dalekie odległości lub formowany zaraz po zarobieniu, może być układany w formach pionowych lub poziomych. Kształt i wymiary deskowania (formy) oraz ilość i zagęszczenie zbrojenia również mogą być bardzo zróżnicowane. W związku z powyższym, konkretne wymagania dla samozagęszczalnej mieszanki betonowej muszą być ustalone każdorazowo w zależności od zastosowania. Typowe kryteria dla samozagęszczalnej mieszanki betonowej przed jej układaniem podane są w tabeli 1.

### Projektowanie SCC

SCC powinien być zaprojektowany tak, aby spełnić wszystkie wymagania zarówno co do mieszanki betonowej jak i stwardniałego betonu. Wymagania dla stwardniałego betonu określają normy PN-EN 206-1 (PN-88/B-06250) oraz inne specyfikacje. Oczywiście nie istnieje jedna uniwersalna metoda projektowania, gdyż często powstawały one w różnych krajach, gdzie specyfikacje jak i użyte materiały znacznie się różniły. Najbardziej popularną metodą jest metoda Okamury, która jest pierwszą metodą projektowania betonu samozagęszczalnego. Powstała ona w roku 1987 w wyniku szerokich badań nad SCC na Uniwersytecie w Tokio. Jej twórcami są: Okamura, Ozawa i zespół.

Niezwykle istotną rzeczą jest zwrócenie uwagi na podstawowe założenia metody Okamury, dotyczące używanych materiałów, tj. grubego kruszywa frakcji 5-20 mm, drobnego kruszywa frakcji 0-5 mm, wysokobelitowego cementu portlandzkiego o niskim cieple hydratacji (uwodnienia), nie używa się „domieszek lepkości”. Jak widać, materiały te różnią się znacznie od tych, które używane są w Polsce, zwłaszcza w kwestii podziału kruszywa na frakcje oraz składu mineralicznego cementu.

Metoda Okamury polega na:

- ustaleniu wymaganej ilości powietrza
- ustaleniu ilości grubego kruszywa

- ustaleniu ilości drobnego kruszywa (piasku)
- zaprojektowaniu zaczynu cementowego
- ustaleniu na zaprawie optymalnego stosunku  $\frac{W}{C+D}$  oraz ilości superplastyfikatora
- sprawdzeniu cech mieszanki betonowej i ewentualnej optymalizacji.

#### Ustalenie wymaganej ilości powietrza

Zawartość powietrza w mieszance betonowej ustala się na poziomie 2%, chyba że wymagana mrozoodporność zmusza do zwiększenia zawartości powietrza poprzez wprowadzenie domieszki napowietrzającej.

#### Ustalenie ilości grubego kruszywa

Objętość grubego kruszywa definiuje się jako iloraz masy i gęstości nasypowej w stanie zagęszczonym. Tak zdefiniowaną objętość grubego kruszywa ustala się na poziomie 50÷60% objętości mieszanki betonowej, pomniejszonej o założoną zawartość powietrza. A zatem, aby obliczyć ilość grubego kruszywa, należy zmierzyć doświadczalnie jego gęstość nasypową w stanie zagęszczonym. Uzyskany wynik mnoży się przez 50÷60% różnicy objętości mieszanki betonowej i założonej objętości powietrza. Jak widać, w metodzie Okamury poprzez badanie gęstości nasypowej w stanie zagęszczonym grubego kruszywa uwzględnia się jego kształt i uziarnienie.

#### Ustalenie ilości drobnego kruszywa

Ilość piasku ustala się objętościowo, na poziomie od 40% do 50% objętości zaprawy, w zależności od cech reologicznych zaczynu.

#### Projektowanie zaczynu cementowego

Po ustaleniu proporcji cementu do mikrowypełniacza określa się teoretyczną wartość stosunku  $\frac{W}{C+D}$  ( $\beta_p$ ), przy którym zaczyn miałby „zerowy” rozptyw. W celu wyznaczenia  $\beta_p$  należy wykonać kilka zaczynów o różnych współczynnikach  $\frac{W_p}{C+D}$ , określanych objętościowo, np.: 1,1; 1,2; 1,3 i 1,4. Zaczyny te testuje się stożkiem do badania rozptyłu zaczynu i zaprawy pokazanym na rys. 2. Wyniki tworzą zależność liniową pomiędzy  $\frac{W}{C+D}$  i relatywnym rozptywem ( $T$ ), określanym następująco:

$$T = \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 - 1 \quad 1.2$$

gdzie:

$$d = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \quad 1.3$$

$d_1, d_2$  średnice rozptyłu w prostopadłych kierunkach

$d_0$  średnica podstawy stożka równa 100 mm

Punkt przecięcia prostej z osią rzędnych jest wartością  $\beta_p$ . Typowe wyniki pokazane są na wykresie (rys. 3).

#### Ustalenie na zaprawie optymalnego stosunku $\frac{W}{C+D}$ oraz ilości superplastyfikatora

Wykonuje się zaprawy o różnych współczynnikach  $\frac{W}{C+D}$ , w granicach (0,8-0,9)  $\beta_p$  oraz z różnym dozowaniem superplastyfikatora, a następnie testuje się te zaprawy na wyżej wspomnianym stożku

Rys. 3. Przykładowe wyznaczenie wartości współczynnika  $\beta_p$

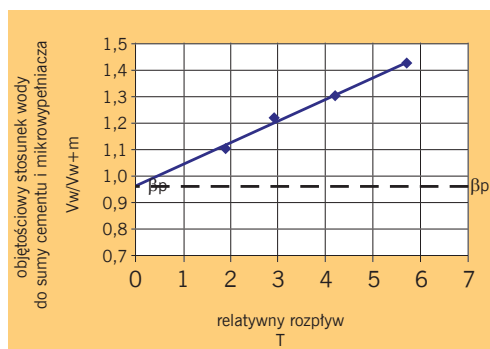


Tabela 1. Typowe kryteria dla samozagęszczalnej mieszanki betonowej.

	Metoda	Jednostka	Wartości	
			Minimalnie	Maksymalnie
1	Rozptyw stożka Abrahmsa	mm	650	800
2	T50	s	2	5
3	J-ring	mm	0	10
4	V-funnel	s	6	12
5	L-box	( $h_2/h_1$ )	0,8	1,0
6	U-box	mm	0	30
7	Fill-box	%	90	100
8	GTM	%	0	15
9	Orimet	s	0	5

oraz na V-funnelu do zapraw (rys. 4). Celem testów jest uzyskanie zaprawy o rozptywie od 24 do 26 cm i czasie wypływu z V-funnela do zapraw od 7 do 11 s.

W przypadku uzyskania zaprawy o odpowiednim rozptywie, ale czasie wypływu mniejszym niż 7 s, należy zmniejszyć współczynnik  $\frac{W}{C+D}$ . Z kolei gdy uzyskano odpowiedni rozptyw, ale czas wypływu jest dłuższy niż 11 s, należy zwiększyć współczynnik  $\frac{W}{C+D}$ .

W przypadku uzyskania zaprawy o odpowiednim czasie wypływu z lejka do zapraw, ale rozptywie mniejszym niż 24 cm, należy zwiększyć ilość superplastyfikatora. Gdy rozptyw jest większy niż 26 cm, należy zmniejszyć ilość superplastyfikatora.

W przypadku gdy nie jest możliwe uzyskanie odpowiednich wyników dla obu testów, należy zmienić komponenty, zaczynając od domieszki, poprzez mikrowypełniacz, a na cemencie kończąc.

#### Sprawdzenie cech mieszanki betonowej i ewentualna optymalizacja

Sprawdzania cech mieszanki betonowej dokonuje się poprzez wykonanie wybranych testów często opisywanych w literaturze. Najczęściej wykonywane testy to rozptyw stożka Abrahmsa, V-funnel test oraz L-box test.

Jeżeli uzyskane wyniki testów mieszanki betonowej nie spełniają wymagań dla mieszanki betonowej, należy zoptymalizować dozowanie superplastyfikatora lub skorygować ilość wody.

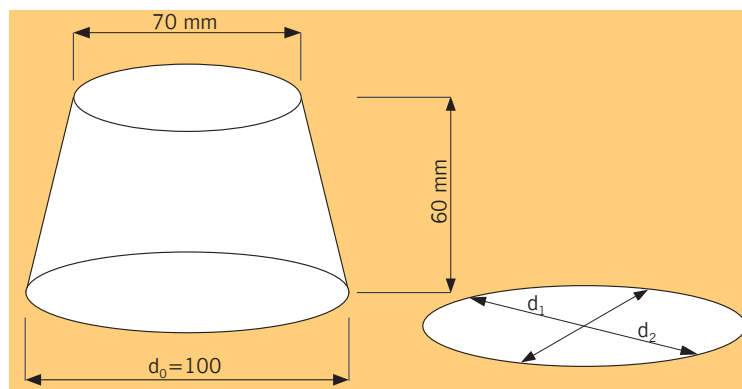
Projektowanie składu betonu samozagęszczalnego jest znacznie trudniejsze i bardziej skomplikowane niż betonu tradycyjnego. Wynika to m.in. z faktu, iż SCC składa się z większej liczby komponentów niż beton klasyczny, a co za tym idzie liczba możliwych kombinacji jest nieporównywalnie większa. Po za tym, samozagęszczalna mieszanka betonowa musi spełniać znacznie większą ilość wymagań, ustalanych według innych, ostrzejszych kryteriów niż mieszanka zwykła.

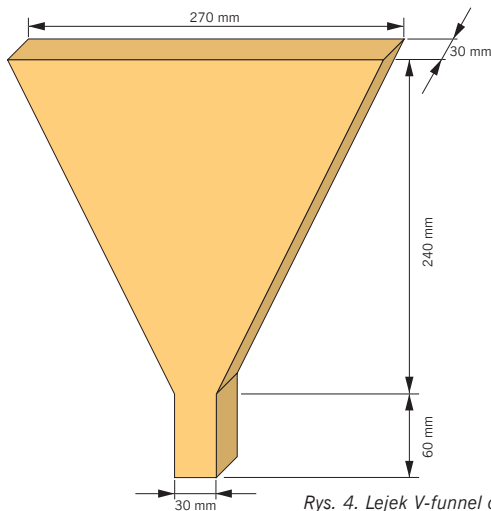
#### Porównanie dwóch dodatków: mączki wapiennej i popiołu lotnego oraz dwóch metod projektowania betonu samozagęszczalnego

Wybór mikrowypełniacza

Wykonano dwie zaprawy o składach podanych w tabeli 2.

Rys. 2. Stożek do pomiaru rozptyłu zaczynu i zaprawy





Rys. 4. Lejek V-funnel do pomiaru czasu wypływu zaprawy

Tabela 2. Składy zapraw

Składniki	Skład na 3 kg zaprawy 1 z mączką wapienną [g]	Skład na 3 kg zaprawy 2 z popiołem lotnym [g]
CEM I 52,5R	816,3	816,3
Mączka wapienna	204,1	-
Popiół lotny	-	204,1
Piasek kopalniany 0-2	1632,7	1632,7
Superplastyfikator na bazie polikarboksylianów	10,20	10,20
Woda	346,9	346,9

Reologia zapraw badana była na dwóch przyrządach zaraz po mieszaniu oraz w 30 min później:

- Stożek do zapraw – mierzona średnica rozptywu
- V-funnel do zapraw – mierzony czas wypływu.

Wyniki przedstawiono w tabeli 3.

Wyniki wytrzymałości na ściskanie zostały zamieszczone w tabeli 4.

### Obserwacje wizualne

W obydwu przypadkach beleczki mają bardzo ładną powierzchnię: bez porów, ani przebarwień. Jednak powierzchnia zaprawy z mączką wapienną ma powierzchnię znacznie jaśniejszą.

### Porównanie metod

Poniżej przedstawiono wyniki badań dwóch betonów SCC zaprojektowanych według metody Okamury oraz według metody analizy krzywej uziarnienia betonu na podstawie praktycznych

Tabela 3. Wyniki pomiarów reologii zapraw z różnymi mikrowypełniaczami

	Stożek [mm]		V-funnel [s]	
	5 min	30 min	5 min	30 min
Zaprawa 1 „mączka”	310x312 śr. 311	402x400 śr. 401	6,0	9,0
Zaprawa 2 „popiół”	317x313 śr. 315	428x432 śr. 430	7,0	9,0

Tabela 4. Wyniki pomiarów wytrzymałości zapraw z różnymi mikrowypełniaczami

	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]		
	24 h	7 dni	28 dni
Zaprawa 1 „mączka”	47,6 47,5 <b>R<sub>sr</sub> = 47,55</b>	71,3 72,4 <b>R<sub>sr</sub> = 71,85</b>	80,4 82,1 <b>R<sub>sr</sub> = 81,25</b>
Zaprawa 2 „popiół”	48,4 49,1 <b>R<sub>sr</sub> = 48,75</b>	76,6 72,9 <b>R<sub>sr</sub> = 74,75</b>	83,6 85,7 <b>R<sub>sr</sub> = 84,65</b>

doświadczeń. Celem było zaprojektowanie betonu o następujących wymaganiach:

Wymagania w stosunku do betonu:

- klasa wytrzymałości na ściskanie – C50/60
- wytrzymałość na ściskanie po 24 h – minimum 45 MPa
- gładka powierzchnia, bez porów, bez przebarwień.

Z porównania w tabeli 5 widać, że recepta 1 ma znacznie więcej cementu niż recepta 2. Nie przekłada się to jednak na wyższe wytrzymałości. Duża ilość cementu nie tylko znacznie podraża koszty produkcji, ale również niesie za sobą ryzyko powstania w elemencie zbyt wysokiej temperatury, mogącej mieć destrukcyjny wpływ na beton. Beton z recepty 2 natomiast pomimo mniejszej zawartości cementu ma wyższe wytrzymałości początkowe i końcowe. Ponadto wyniki badań reologii mieszanek betonowych wskazują, że mieszanka 2 będzie miała lepsze właściwości samozagęszczania, takie jak zdolność wypełniania i zdolność przepływania. Jak widać japońska metoda Okamury projektowania betonu samozagęszczalnego nie daje najlepszych rezultatów. Może to być spowodowane podstawowymi założeniami dotyczącymi używanych materiałów, które to materiały różnią się znacznie od stosowanych w Polsce. Jednocześnie potwierdzono ogromne znaczenie doświadczenia technologa, które jest konieczne przy projektowaniu betonu samozagęszczalnego.

### Stosowanie SCC na polskich budowach

W Polsce stosowanie betonu samozagęszczalnego do konstrukcji monolitycznych jest cały czas bardzo mało popularne. Wynika to z kilku powodów. Po pierwsze, zastosowanie nowej technologii zawsze wiąże się z pewnym ryzykiem popełnienia błędów, co z kolei odstrasza inwestorów i wykonawców. Po drugie, beton samozagęszczalny jest droższy niż beton tradycyjny, a oszczędności wynikające z braku potrzeby wibrowania często są niewystarczające. Tania siła robocza, jak i nieegzekwowanie przepisów dotyczących ochrony środowiska oraz ochrony pracy człowieka to przyczyny, które powodują, że zastosowanie SCC przeważnie uznawane jest za nieopłacalne. Dlatego w Polsce główną przyczyną zastosowania technologii betonu samozagęszczalnego jest niemożność zawibrowania tradycyjnej mieszanki betonowej.

### Stosowanie SCC w polskich zakładach prefabrykacji

Zwiększająca się konkurencja na rynku prefabrykatów budowlanych powoduje, że cena i jakość produktu nabiera coraz większego znaczenia. Zmusza to producentów do minimalizowania czynników kosztowych, zwiększania wydajności i ciągłego po-

Tabela 5. Porównanie składów i wyników badań obu recept

	RECEPTA 1 Metoda Okamury	RECEPTA 2 Metoda analizy
<b>SKŁADY</b>		
SKŁADNIKI	ILOŚĆ SKŁADNIKÓW [kg/m <sup>3</sup> ]	
CEM I 52,5R	462	420
Mączka wapienna	132	120
Piasek kopalniany 0-2	707	754
Dolomit 2-8	115	115
Dolomit 8-12	790	785
Woda	185	168
Domieszka PCP	5,94	6,48
<b>WŁAŚCIWOŚCI MIESZANKI BETONOWEJ</b>		
rozptyw stożka Abrahamsa [cm]	65	69
T <sub>50</sub> [s]	4,0	3,5
V-funnel [s]	8,5	7,5
<b>WYTRZYMAŁOŚCI BETONU [MPa]</b>		
R <sub>24h</sub>	42,1	49,8
R <sub>7</sub>	57,9	68,6
R <sub>28</sub>	65,8	77,7



prawiania jakości elementów prefabrykowanych. Zastosowanie betonu samozagęszczalnego do produkcji prefabrykatów betonowych przynosi zarówno korzyści techniczne jak i ekonomiczne. Nie należy jednak zapominać o pewnych niedogodnościach SCC oraz ograniczeniach w jego stosowaniu.

Do głównych korzyści wynikających z zastosowania betonu samozagęszczalnego należą:

- redukcja hałasu
- redukcja drgań
- minimalizacja zapylenia
- krótszy czas formowania
- oszczędność energii
- eliminacja urządzeń do wibrowania
- redukcja liczby pracowników
- poprawienie wyglądu powierzchni elementu
- poprawienie jakości krawędzi elementu poprzez dokładniejsze wypełnienie form
- optymalizacja czasu użytkowania form.

Głównymi problemami związanymi z zastosowaniem SCC są:

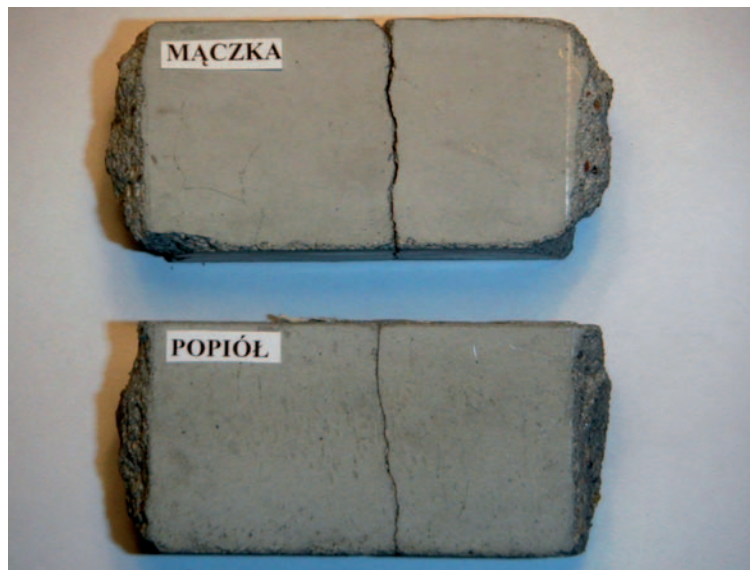
- wyższe koszty materiałowe
- większa wrażliwość mieszanki na zmiany jakościowe i ilościowe używanych składników
- wyższe koszty związane z zapewnieniem jakości.

Decyzja o zastosowaniu SCC powinna być praktycznie zawsze poprzedzona dogłębną analizą techniczną, technologiczną i ekonomiczną.

**mgr inż. Andrzej Koton**  
**Lafarge Beton**

#### Literatura

- 1 E. Osiecka, Wybrane zagadnienia z technologii mineralnych kompozytów budowlanych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1996
- 2 J. Piasta, W.G. Piasta, Beton zwykły, Arkady, Warszawa 1997
- 3 A.M. Neville, Właściwości betonu, Polski Cement, Kraków 2000
- 4 Z. Jamroz, Beton i jego technologie, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Kraków 2000
- 5 V.S. Ramachandran, V.M. Malhotra, C. Jolicoeur and N. Spiratos, Superplasticizers: Properties and applications in concrete, Canmet, Canada 1998
- 6 K. Ozawa, M. Ouchi, Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, COMS Engineering Corp., X 2001, Tokyo, Japan – 74 referaty
- 7 J. Szwabowski, Reologia betonów nowej generacji, V Sympozjum Naukowo-Techniczne „Reologia w technologii betonu”, Gliwice 2003
- 8 A. Skarendahl, O. Petersson, Self compacting concrete. State-of-the-art report, 28 RILEM TC 174, 2000
- 9 A. Skarendahl, O. Petersson, Self compacting concrete. State-of-the-art report, RILEM TC 174, 2001
- 10 Van B.K., A method for the optimum proportioning of the aggregate phase of highly durable vibration-free concrete, MSc thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok 1994
- 11 S. Tangtermsirikul and Van B.K., Blocking criteria for aggregate phase of self-compacting high-performance concrete, Proceedings of Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Thailand. Pp58-69, Engineering, December 1995, Bangkok
- 12 Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, EF-NARC, February 2002
- 13 Japan Society of Civil Engineers, State of the Art on Highly-Flowable Concrete, Concrete Engineering Series 15, Tokyo 1996
- 14 R. Tegelaar, Pop music instead of vibration noise, BFT 11/2001, s. 96-99
- 15 P. Woyciechowski, Sprawozdanie z wizytacji technicznej w Holandii w sprawie technologii, organizacji oraz urządzeń do fabrycznej produkcji prefabrykatów z samozagęszczalnymi mieszankami betonowymi, Warszawa 2001



Fot. 1. Beleczki uformowane z zapraw 1 i 2 – powierzchnia boczna

- 16 K. Holger, Pile production with self-compacting concrete at Schockindustrie, BFT 12/2002, s. 28-32
- 17 W. Brameshuber, S. Uebachs, Ch. Tigges, Self-compacting concrete in the precast element plant, BFT 11/2001, s. 80-89
- 18 G. Buchenau, B. Hillemeier, Rock powders for self-compacting concrete, BFT 11/2001, s. 32-37
- 19 A. Graubner, G. Muller-Falcke, E. Kleen, K. Lieberum, T. Rieger, New self-compacting concrete for precast elements, BFT 3/2001, s. 100-108
- 20 J. Śliwiński, Beton zwykły – projektowanie i podstawowe właściwości, Polski Cement, Kraków 1999
- 21 K.H. Khayat, K. Manai and A. Trudei, In situ mechanical properties of wall elements cast using self-consolidating concrete, ACI Materials Journal, Vol 94, No 6/1997, s. 491-500
- 22 B. Persson, Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete. Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, September 1999; RILEM; Paris, s. 239-250
- 23 V. Bui Khanh and D. Montgomery, Drying shrinkage of self-compacting concrete containing milled limestone. Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, September 1999; RILEM; Paris, s. 227-238
- 24 J. Tragardh, Personal information. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Sweden
- 25 PN-EN 1097-3:1998 Badanie mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie gęstości nasypowej i jamistości, Alfa, Warszawa 1998

Fot. 2. Beleczki uformowane z zapraw 1 i 2 – powierzchnia górna oraz przełom

