

# **Zastosowanie cementu CEM I 42,5R oraz CEM I 42,5N-SR3/NA w samozagęszczalnych betonach mostowych – wymagania formalne i wyniki badań**

THE USE OF CEMENT CEM I 42.5 R AND CEM I 42,5N-SR3 / NA IN SELF-COMPACTING BRIDGE CONCRETE – FORMAL REQUIREMENTS AND THE TEST RESULTS

## **Streszczenie**

W dobie intensywnego rozwoju infrastruktury drogowej w tym obiektów mostowych, niezwykle istotne stają się parametry betonu takie jak wytrzymałość i trwałość. W ostatniej dekadzie w Europie Zachodniej nastąpiła popularyzacja technologii betonu samozagęszczalnego. O rozwoju tej technologii świadczy przede wszystkim wprowadzenie w 2010 roku norm PN-EN 12350-8÷12, oraz wpisanie tych norm od 2014 roku do katalogu właściwości mieszanek betonowych znowelizowanej normy PN-EN 206:2014-04. Autorzy artykułu na podstawie przeprowadzonych badań oraz własnych doświadczeń, przedstawiają możliwości zastosowania cementów CEM I 42,5R, CEM I 42,5N-SR3/NA oraz kruszyw przeznaczonych do budownictwa inżynierskiego w betonach mostowych SCC. Główną ideą programu badawczego było porównanie właściwości mieszanek betonu oraz betonu samozagęszczalnego o różnych składach, w oparciu o metody badawcze przedstawione w normie PN-EN 206:2014-04 oraz Specyfikacji technicznej beton konstrukcyjny.

Autorzy pokazują zasadność zastosowania betonów SCC podczas robót drogowo-mostowych. Użycie betonów specjalnych znacząco skraca czas wykonania obiektu mostowego i obniża koszty jego wykończenia.

## **Abstract**

In the era of intensive development of road infrastructure including bridges, parameters of concrete like strength and durability become extremely important. In the last decade in Western Europe the SCC (Self Compacting Concrete) technology was adapted and popularized. The development of this technology is primarily introduction in 2010 by standards PN-EN 12350-8 to 12, and enter these standards in 2014 to catalog the properties of fresh concrete in PN-EN 206: 2014-04. The authors of the article on the basis of studies and own experience, show the possibility of using CEM I 42.5 R, CEM I 42,5N-SR3 / NA and aggregates for construction engineering in the SCC bridge. The main idea of the research program was to compare the properties of fresh SCC and hardened SCC with different compositions based on research methods presented PN-EN 206: 2014-04 and the Technical Specification of structural concrete. The authors show the validity of the SCC during the road-bridges construction works. The use of special concrete significantly reduces the time of the building process and reduces the cost of its finish.

## 1. Wprowadzenie

Na przestrzeni ostatnich 10 lat w Europie Zachodniej nastąpiła popularyzacja technologii betonu samozagęszczalnego (Self Compacting Concrete SCC). Istotne korzyści, takie jak poprawa jakości budownictwa oraz środowiska pracy doprowadziły do coraz powszechniejszego akceptowania SCC przez inwestorów w praktyce budownictwa betonowego. Specyficzne właściwości reologiczne betonowej mieszanki samozagęszczalnej umożliwiają jej rozplływ i zagęszczanie pod własnym ciężarem oraz szczelne wypełnienie deskowania ze zbrojeniem przy zachowaniu jednorodności. O rozwoju tej technologii świadczy przede wszystkim wprowadzenie w 2010 roku 5 norm narzędziowych PN-EN 12350-8÷12, a następnie w 2014 roku ujęcie ich w znowelizowanej normie betonowej PN-EN 206:2014-04.

Technologia betonu samozagęszczalnego coraz częściej wykorzystywana jest również w intensywnie rozwijającym się budownictwie inżynieryjnym, które wymusza na dostawcach betonu poszukiwanie nowych rozwiązań technologicznych. Wielkim krokiem naprzód w budownictwie infrastrukturalnym było opublikowanie w 2013 roku przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad zbioru Ogólnych Specyfikacji Technicznych (OST). Opracowane przez przedstawicieli instytucji naukowych, firm drogowych oraz producentów betonu, oparte na aktualnych, obowiązujących przepisach, nowe OST umożliwiają wprowadzanie uzasadnionych technologicznie, ekonomicznych rozwiązań.

## 2. Wymagania formalne

Celem programu badawczego było zaprojektowanie mieszanek betonu samozagęszczalnego spełniającego wymagania zawarte w załączniku G normy PN-EN 206:2014-04 „Beton – wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”:

- rozplływ stożka poprzez pomiar średnic wg PN-EN 12350-8,
- rozplływ stożka poprzez pomiar czasu wg PN-EN 12350-9,
- lepkości metoda V-lejka wg PN-EN 12350-9,
- przepływalność metoda L-pojemnika wg PN-EN 12350-10,
- przepływalność J-pierścień wg PN-EN 12350-12,
- segregacja sitowa wg PN-EN 12350-11.

Dodatkowo autorzy założyli spełnienie wymagań zawartych w Specyfikacji technicznej beton konstrukcyjny:

- zawartość powietrza w mieszance betonowej,
- wytrzymałość na ściskanie betonu,
- odporność betonu na działanie mrozu,
- przepuszczalność wody przez beton.

Ponadto celem weryfikacji bardzo istotnego dla całego projektu badawczego parametru napowietrzenia przeprowadzono badania charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie, według założeń metody przedstawionej w normie PN-EN 480-11:2008.

Główną ideą programu badawczego było zaprojektowanie, wykonanie i porównanie właściwości mieszanek betonu oraz betonu samozagęszczalnego o różnych składach w oparciu o metody badawcze przedstawione w normie PN-EN 206:2014-04 „Beton – wymagania, właściwości, produkcja i zgodność” oraz nowej Specyfikacji technicznej beton konstrukcyjny, opublikowanej przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad.

## 2.1. Betonowa mieszanka samozagęszczalna

Cechy betonu samozagęszczalnego takie jak: wysoki rozplływ, brak segregacji składników, przepływalność czy duża urabialność, wyraźnie odróżniają go od betonu zwykłego. Duży rozplływ mieszanki i brak segregacji uzyskuje się poprzez relatywnie niski współczynnik w/c. Zastosowanie takiej mieszanki betonowej znacząco skraca czas pracy wykonania elementu, z uwagi na wyeliminowanie pracochłonnej operacji wibrowania.

Wymagania stawiane betonowej mieszance samozagęszczalnej:

### 2.1.1 Konsystencja

Tabela 1. Rozplływ stożka (pomiar średnic)

Klasa	Rozplływ stożka <sup>a)</sup> [mm], badany zgodnie z EN 12350-8
SF1	od 550 do 650
SF2	od 660 do 750
SF3	od 760 do 850
<sup>a)</sup> klasyfikacja nie stosuje się do betonu z kruszywem o ziarnach $D_{max} > 40$ mm	

### 2.1.2 Lepkość

Tabela 2. Pomiar czasu  $t_{500}$  (czas rozplwyu stożka)

Klasa	Czas $t_{500}$ <sup>a)</sup> [s] badany zgodnie z EN 12350-8
VS1	poniżej 2,0
VS2	2,0 i więcej
<sup>a)</sup> klasyfikacja nie stosuje się do betonu z kruszywem o ziarnach $D_{max} > 40$ mm	

Tabela 3. Pomiar czasu  $t_v$  (metoda V-lejka)

Klasa	Czas $t_v$ <sup>a)</sup> [s] badany zgodnie z EN 12350-9
VF1	poniżej 9,0
VF2	od 9,0 do 25,0
<sup>a)</sup> klasyfikacja nie stosuje się do betonu z kruszywem o ziarnach $D_{max} > 22,4$ mm	

### 2.1.3 Przepływalność

Tabela 4. Wskaźnik przepływalności z użyciem L-pojemnika (L-box)

Klasa	Wskaźnik przepływalności [-] badany zgodnie z EN 12350-10
PL1	przy 2 prętach: 0,8 lub więcej
PL2	przy 3 prętach: 0,8 lub więcej

Tabela 5. Parametr przepływalności według metody J-pierścienia (J-ring)

Klasa	Parametr przepływalności <sup>a)</sup> [mm], badany zgodnie z EN 12350-12
PJ1	≤10 – przy 12 prętach
PJ2	≤10 – przy 16 prętach
<sup>a)</sup> klasyfikacja nie stosuje się do betonu z kruszywem o ziarnach $D_{max} > 40$ mm	

### 2.1.4 Segregacja

Tabela 6. Odporność na segregację według metody sitowej

Klasa	Udział segregacji <sup>a)</sup> [%], badany zgodnie z EN 12350-11
SR1	≤20
SR2	≤15
<sup>a)</sup> klasyfikacja nie stosuje się do betonu z kruszywem o ziarnach $D_{max} > 40$ mm	

## 2.2. Beton konstrukcyjny

Według OST do betonów konstrukcyjnych należy stosować materiały dopuszczone do obrotu i stosowania. Materiały powinny być oznakowane znakiem CE lub B, dla których producent przedstawi deklarację zgodności z Polską Normą, normą zharmonizowaną, aprobatą techniczną IBDiM lub europejską aprobatą techniczną.

Tabela 7. Wymagania dotyczące parametrów mieszanki betonowej i betonu

Właściwości projektowanego betonu konstrukcyjnego	Beton konstrukcyjny – wymagania		Metoda badania
Mrozoodporność	F100	XF1	PN-88/B-06250 i PN-EN 206-1
	F150	XF2 i XF3	
F200		XF4	
Wodoszczelność	60mm	XA1	PN-EN 12390-8
	50mm	XA2	
	40mm	XA3	
	40mm	XD3 i XS3	
Nasiąkliwość	Brak wymogów		PN-88/B-06250
w/c	≤0,45	C30/37 i wyżej	
	≤0,50	C25/30	
Zawartość powietrza dla $D_{max}=16$ [mm]	4,5÷6,5% +1,0/-0,5%		PN-EN 12350-7
Klasa konsystencji (opad stożka Abramsa)	S2÷S3		PN-EN 12350-2
Średnia wytrzymałość na ściskanie	$f_{cm} \geq f_{ck} + 6 \div 12$ [N/mm <sup>2</sup> ]		PN-EN 206-1

Autorzy badając właściwości mieszanki betonowej nie korzystali z badania konsystencji według metody opadu stożka, gdyż nie była odpowiednia do badania mieszanki

samozagęszczalnej. Zgodnie z normą PN-EN 206:2014-04 badanie konsystencji tego typu mieszanek wykonuje się metodą rozplywu stożka.

### **2.3. Badanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie**

Określenie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie przeprowadzono na podstawie procedury IPPT PAN, zgodnie z normą PN-EN 480-11:2008. Pomiar wykonano metodą mikroskopową przy wykorzystaniu komputerowego systemu automatycznej analizy obrazu.

## **3. Informacje o projekcie**

W części badawczej zostały przedstawione parametry mieszanek betonowych oraz cechy stwardniałych betonów. Projekt badawczy zakładał zastosowanie 2 różnych cementów CEM I 42,5R, CEM I 42,5N SR3/NA oraz kruszyw granitowego i wapiennego. Przed rozpoczęciem docelowego projektu przeprowadzono szereg badań, które miały na celu znalezienie optymalnego rozwiązania na linii cement – domieszki chemiczne. Głównym założeniem było opracowanie najbardziej kompatybilnego rozwiązania umożliwiającego połączenie cech betonu samozagęszczalnego z betonem konstrukcyjnym przy jednoczesnym spełnieniu wymagań zawartych zarówno w normie PN-EN 206:2014-04 oraz Specyfikacji technicznej beton konstrukcyjny.

Zaprojektowane receptury miały spełnić klasę wytrzymałości C35/45. Charakteryzowały się niskim, stałym współczynnikiem  $w/c$ , co z uwagi na odmienną kompatybilność na linii cement – domieszka oraz różną wodożądność kruszyw grubych wiązało się ze zmiennym dozowaniem zastosowanego superplastyfikatora. Ilość cementu, stosunek  $w/c$ , zawartość domieszek chemicznych oraz układ stosu okruszowego zostały dobrane doświadczalnie i miały na celu uzyskanie mieszanki samozagęszczalnej o wysokim rozplywie, dobrej przepływalności i urabialności, charakteryzującej się brakiem segregacji składników oraz stabilnym w czasie napowietrzeniem. W celu uzyskania zbliżonych krzywych uziarnienia w poszczególnych recepturach nieznacznie zmieniono procentowy udział masowy składników stosu okruszowego.

Każda z receptur została przebadana pod kątem zawartości powietrza oraz 6 wymaganych parametrów dla mieszanki betonu SCC. Próbki zostały zaformowane w formach sześciennych 100x100x100 [mm], w przypadku badań mrozoodporności oraz 150x150x150 [mm] dla badań: wytrzymałości na ściskanie, głębokości penetracji pod ciśnieniem, charakterystyki porów powietrznych. Wszystkie próbki były przechowywane w warunkach normowych. Badania trwałościowe zostały przeprowadzone po 28 dniach.

### **3.1. Cement**

Do badań zastosowano cementy klasy 42,5 produkowane przez Grupa Ożarów S.A. Cementy CEM I 42,5R – Cementownia Ożarów, CEM I 42,5N-SR3/NA – Zakład Cementownia Rejowiec Fabryczny, spełniają wymagania normy PN-EN 197-1 oraz wymagania stawiane przez OST:

- zawartość  $NA_2O_{eq}$  do 0,8%,
- początek czasu wiązania wg PN-EN 196-3 powyżej 120 minut.

Tabela 8. Parametry zastosowanych cementów

Parametr	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 N-SR3/NA
Właściwa ilość wody [%]	27,7	25,1
Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach [MPa]	31,6	17,5
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	57,2	50,1
Początek czasu wiązania [min]	179	192
Zawartość alkaliów $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ [%]	0,77	0,44

### 3.2. Kruszywa

Do badań zastosowano kruszywa produkowane przez Trzuskawica S.A. Kruszywa granitowe z Kopalni Granitu Gniewków oraz wapienne z Zakładu Sitkówka, spełniają wymagania normy PN-EN 12620.

### 3.3. Domieszki

W celu uzyskania pożądanego współczynnika w/c, utrzymania stabilnych parametrów konsystencji oraz zawartości powietrza, został zastosowany superplastyfikator na bazie eterów polikarboksyłowych oraz napowietrzacz na bazie żywicy terpentynowej, zgodnie z wymaganiami norm PN-EN 934-1 oraz PN-EN 934-2.

## 4. Receptury mieszanek betonowych

Tabela 9. Składy zaprojektowanych mieszanek betonowych

Nazwa składnika	Z1	Z2	Z3	Z4
CEM I 42,5R Grupa Ożarów	440		440	
CEM I 42,5N SR3/NA		440		440
Kruszywo drobne 0–2 [mm]	42,50%	43,00%	43,00%	42,50%
Kruszywo grube 2–8 [mm] Trzuskawica		32,50%	32,50%	
Kruszywo grube 8–16 [mm] Trzuskawica		24,50%	24,50%	
Kruszywo grube 2–8 [mm] Gniewków	31,50%			31,50%
Kruszywo grube 8–16 [mm] Gniewków	26,00%			26,00%
Domieszka napowietrzająca	2,15%	1,50%	2,15%	1,50%
Domieszka upłynniająca	0,40%	0,10%	0,40%	0,10%
w/c	0,43			

## 5. Parametry mieszanki betonowej

Tabela 10. Uzyskane parametry mieszanek betonowych

Oznaczenie serii		Z1	Z2	Z3	Z4
Rodzaj użytego kruszywa grubego		Granit Trzuskawica		Wapień Trzuskawica	
Rodzaj użytego cementu		CEM I 42,5R	CEM I 42,5N-SR3/NA	CEM I 42,5R	CEM I 42,5N-SR3/NA
Zawartość powietrza %	Po 10 min.	5,2	5,4	5,0	5,2
	Po 60 min.	5,2	5,5	4,8	5,3
Rozpływ stożka poprzez pomiar średnic wg PN-EN 12350-8	Po 10 min.	SF3	SF3	SF3	SF3
	Po 60 min.	SF3	SF3	SF3	SF3
Rozpływ stożka poprzez pomiar czasu wg PN-EN 12350-9	Po 10 min.	VS1	VS1	VS1	VS1
	Po 60 min.	VS1	VS1	VS1	VS1
Lepkości metoda V-lejka wg PN-EN 12350-9	Po 10 min.	VF1	VF1	VF1	VF1
	Po 60 min.	VF1	VF1	VF1	VF1
Przepływalność metoda L-pojemnika wg PN-EN 12350-10	Po 10 min.	PL2	PL2	PL2	PL2
	Po 60 min.	PL2	PL2	PL2	PL2
Przepływalność J-pierścień wg PN-EN 12350-12	Po 10 min.	PJ2	PJ2	PJ2	PJ2
	Po 60 min.	PJ2	PJ2	PJ2	PJ2
Segregacja sitowa wg PN-EN 12350-11	Po 10 min.	SR2	SR2	SR2	SR2
	Po 60 min.	SR2	SR2	SR2	SR2



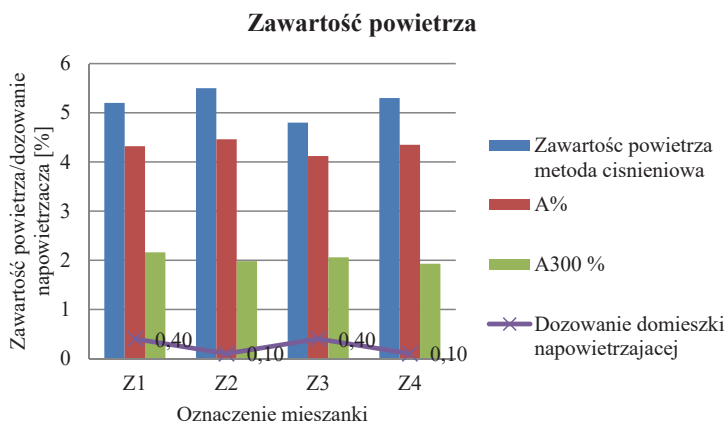
## 6. Cechy stwardniałego betonu

Tabela 11. Uzyskane cechy stwardniałego betonu

Oznaczenie serii		Z1	Z2	Z3	Z4
Rodzaj użytego kruszywa grubego		Granit Trzuskawica		Wapień Trzuskawica	
Rodzaj użytego cementu		CEM I 42,5R	CEM I 42,5N-SR3/NA	CEM I 42,5R	CEM I 42,5N-SR3/NA
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	po 1 dn.	10,8	9,4	11,6	9,8
	po 2 dn.	36,0	31,3	38,6	32,6
	po 7 dn.	46,0	41,8	48,8	43,1
	po 14 dn.	53,5	48,7	53,7	48,9
	po 28 dn.	56,9	52,3	57,3	53,0
Mrozoodporność po 150 cyklach – ubytek masy [%]	Po 28 dn.	0,32	0,30	0,28	0,27
Mrozoodporność po 150 cyklach – spadek wytrzymałości [%]		1,8	2,0	1,7	2,2
Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem [mm]	Po 28 dn.	28	29	24	26
Charakterystyka porów powietrznych w betonie	$\bar{L}$ [mm]	0,20	0,19	0,20	0,19
	A %	4,32	4,46	4,12	4,35
	$A_{300}$ %	2,16	1,98	2,06	1,93
$\bar{L}$ – wskaźnik rozmieszczenia porów w betonie $A_{300}$ – zawartość mikroporów o średnicy poniżej 0,3 [mm] A – całkowita zawartość powietrza					

## 7. Podsumowanie

Opracowane serie mieszanek betonowych charakteryzowały się stabilnymi parametrami pod względem napowietrzenia i utrzymania konsystencji w czasie. Powietrze oscyloowało na poziomie 5%, natomiast konsystencja nie ulegała zmianie do 60 minuty i utrzymywała się w klasie SF3 według badania rozplýwu stożka opisanego w PN-EN 12350-8. Zawartość powietrza zbadana podczas badania charakterystyki porów wahała się na poziomie 82% zbadanego powietrza metodą ciśnieniową. Zawartość powietrza  $A_{300}$  to około 40% powietrza zbadanego metodą ciśnieniową oraz 47% powietrza określonego w badaniu charakterystyki porów. Stosunkowo lepszą strukturę napowietrzenia porów otrzymano w betonie na bazie CEM I 42,5R.

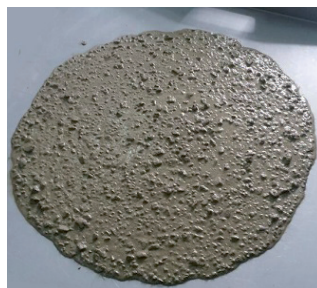


Rys. 1. Zawartość powietrza

Wszystkie mieszanki charakteryzowały się bardzo dobrą strukturą porów, co wpłynęło na uzyskanie betonów spełniających mrozoodporność na wysokim poziomie, z niewielkim spadkiem wytrzymałości i ubytkiem masy.

Niski stosunek  $w/c$ , zawartość zaprawy na poziomie  $600 \text{ dm}^3/\text{m}^3$  oraz optymalnie ułożony stos okruszowy kruszyw, pozwoliły na spełnienie wszystkich wymagań stawianych przez badania opisane w normach PN-EN 12350 8-12:

- rozplýw stożka poprzez pomiar średnic,
- rozplýw stożka poprzez pomiar czasu,
- lepkości metoda V-lejka,
- przepływalność metoda L-pojemnika,
- przepływalność J-pierścier,
- segregacja sitowa.



Fot. 1. Metryczny pomiar stożka



Fot. 2. V-lejek



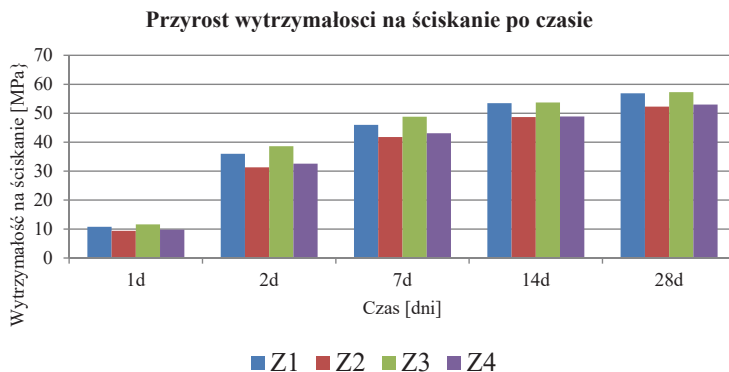
Fot. 3. J-pierścień



Fot. 4. L-pojemnik

Badane betony po 24 godzinach uzyskały wytrzymałości na poziomie 10 MPa. Znaczący przyrost wytrzymałości zaobserwowano po 2 dniach, by ostatecznie po 28 dniach uzyskać zakładaną klasę wytrzymałości C35/45. Serie wyników pokazują po 24 godzinach przyrost wytrzymałości średnio na poziomie 20% wytrzymałości końcowej. Po 48 godzinach zaobserwowano dużą dynamikę narastania wytrzymałości do około 60%

wytrzymałości 28 dniowej. Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach stanowiła około 82% wytrzymałości końcowej, a po 14 dniach 93%.



Rys. 2. Przyrost wytrzymałości na ściskanie po czasie

Opracowanie mieszanki betonu samozagęszczalnego dla obiektów mostowych wymaga od technologa przeprowadzenia wielu prób w celu zaprojektowania mieszanki uzyskującej zakładany rozptyw i zagęszczanie się pod własnym ciężarem, szczelne wypełnienie deskowania ze zbrojeniem, przy zachowaniu jednorodności. Prawidłowo opracowana receptura mieszanki betonu samozagęszczalnego powinna charakteryzować się:

- wysokim rozplywem – dzięki minimalizacji granicy płynięcia mieszanki,
- brakiem segregacji składników – dzięki wysokiej lepkości,
- dobrą przepływalnością nawet przez gęstą siatkę zbrojenia, dzięki zastosowaniu dużej ilości drobnych frakcji w recepturze,
- wysoką urabialnością – dzięki utrzymaniu ww. parametrów reologicznych do momentu zabudowy mieszanki.

## Literatura

- [1] PN-EN 206:2014-04 Beton - Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [2] PN-EN 12350-8:2012 Badania mieszanki betonowej – Część 8: Beton samozagęszczalny – Badanie metodą rozplywu stożka
- [3] PN-EN 12350-9:2012 Badania mieszanki betonowej – Część 9: Beton samozagęszczalny – Badanie metodą V-lejka
- [4] PN-EN 12350-10:2012 Badania mieszanki betonowej – Część 10: Beton samozagęszczalny – Badanie metodą L-pojemnika
- [5] PN-EN 12350-11:2012 Badania mieszanki betonowej – Część 11: Beton samozagęszczalny – Badanie segregacji sitowej
- [6] PN-EN 12350-12:2012 Badania mieszanki betonowej – Część 12: Beton samozagęszczalny – Badanie metodą J-pierścienia
- [7] Podręcznik SPBT do znowelizowanej normy PN-EN 206:2014-04 „Beton – wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”