

# Wpływ poziomego wytwarzania betonu na jakość konstrukcji masywnych

Wykonawstwo masywów z betonu w obiektach przemysłowych i mostowych jest zagadnieniem dość złożonym ze względu na warunki eksploatacyjne i wymagania użytkowe. Elementy tych budowli są zazwyczaj poddawane różnorodnym oddziaływaniom, jak np. mechanicznym, fizycznym i chemicznym. Na uwagę zasługują tu wpływy fizyko-mechaniczne, a zwłaszcza:

- zmienne pola temperatur
- gradienty wilgotnościowe
- zjawiska reologiczne (skurcz i pęcznienie betonu)
- działanie korozji
- obciążenia dynamiczne.

W przypadku oddziaływań obciążeń mechanicznych można dobrać i określić charakterystyki sprężysto-wytrzymałościowe betonu masywu monolitycznego, ze znaczną dokładnością. Jednak pewne trudności w wykonawstwie żelbetonowych elementów masywnych stwarza problem uzyskania wysokiej jednorodności struktury betonu. Zagadnieniu temu poświęcono uwagę jako koniecznemu elementowi zmierzającemu do uzyskania optymalnie jednorodnego masywu o wymagalnej charakterystyce dynamicznej.

## Opis techniczny pewnej estakady

Estakada wjazdowa konstrukcji żelbetowej, żebrowa, pięcioprzęstowa o długości całkowitej 117,95 m + 25,00 m + 20,00 m. Od strony mostu prześło opar-

te jest na filarze rozdzielczym poprzez łożyska ruchome o nośności 2MN, drugi koniec opiera się na przy-czołku żelbetowym, wspólnym dla estakad poprzez łożyska ruchome o nośności 2 MN.

Ustrój niosący to konstrukcja złożona z dwóch dźwigarów żelbetowych, połączonych płytą jezdni. Dźwigary połączone są nad filarami poprzecznymi. Wysokość dźwigarów wynosi ok. 1,35 m, a płyty 0,32 m. Całkowita szerokość obiektu wynosi 11,20 m. Wykonywanie ustroju niosącego zaprojektowano z betonu B30. Opracowano i zatwierdzono mieszankę betonową na bazie kruszywa łamanego diabazowego i cementu mostowego 42,5 HSR-NA przy zastosowaniu domieszki uplastyczniającej BV100.

## Wytyczne ogólne betonowania ustroju niosącego

Istotnym założeniem związanym z betonowaniem konstrukcji jest zasada ich realizacji w czysto fizyczne monolitycznym stanie: bez przerw, rys, pęknięć, rozwarstwień, raków czy mimośrodków technologicznych. Każdy z etapów realizacji wymaga innej techniki wykonania, uzasadnionej względami statycznymi, eksploatacyjnymi oraz projektowania składu betonu i technologii prowadzenia robót. Z punktu widzenia możliwości technologicznych rozpatrzone warianty techniki betonowania z uwzględnieniem najniekorzystniejszego przypadku.

## Technologia betonowania bez przerw technologicznych jako czynnik monolityzacji masywu

Rozpatrywano możliwość jednoczesnego betonowania pięciu przęseł ustroju nośnego w jednej operacji (rys. 2). Tutaj podstawą prawidłowej organizacji jest plan operatywny procesu betonowania, uwzględniający układanie warstw o zróżnicowanych grubościach. Wymaga to opracowania specjalnych zabiegów technologicznych, opóźniających czas wiązania betonu. Z uwagi na wysokość żeber i poprzecznic żelbetowych betonowanie było wykonywane warstwami (rys. 3) o grubości:

- I wysokość pierwszej warstwy – 30 cm
- II wysokość drugiej warstwy – 40 cm
- III wysokość trzeciej warstwy – 37 cm
- IV wysokość czwartej warstwy – 32 cm – płyta.

Warstwy nr I, nr II i nr III układano wzdłuż ustroju niosącego, natomiast warstwę nr IV układano prostopadle do osi podłużnej konstrukcji z jednoczesnym wyrobieniem spadku poprzecznego. W podstawowych założeniach organizacji technologii betonowania uwzględniono następujące czynniki [1] [2] [3]:

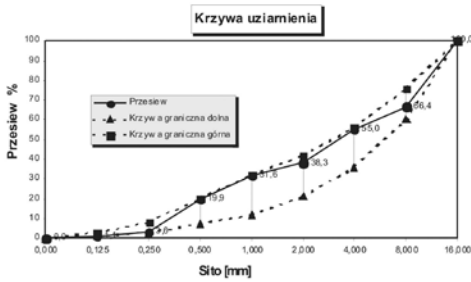
- podzielono konstrukcję estakady na bloki podporowe i przęsłowe
- przyjęto jako logiczną ciągłość betonowania polegającą na ułożeniu w pierwszej kolejności betonu w blokach przęsłowych (około 70÷90% ich kubatury), a następnie w blokach podporowych pomiędzy zabetonowanymi przęsłami
- każdy z bloków wynikających z przyjętego podziału został zabetonowany w sposób ciągły,

Tabela 1. Dane wejściowe (materiał mineralny)

Sito [mm]	Odsiew [%]			
	Diabaz # 8/11	Diabaz # 5/8	Diabaz # /5	Piasek # 0/2
31,500	0,0	0,0	0,0	0,0
16,000	0,0	0,0	0,0	0,0
8,000	82,0	11,6	0,0	0,0
4,000	16,0	78,5	20,1	0,0
2,000	0,5	8,0	64,6	2,9
1,000	0,2	0,9	10,0	12,0
0,500	0,1	0,2	1,9	32,0
0,250	0,0	0,0	0,7	46,0
0,125	0,2	0,1	0,6	6,7
0,000	1,0	0,7	2,1	0,4
Suma:	100,0	100,0	100,0	100,0

Tabela 2. Skład mieszanki

Nazwa materiału	Mieszanka		
	mineralna [%]	- cem. [%]	
			[kg/m <sup>3</sup> ]
Diabaz 8/11	41,0	33,3	861
Diabaz 5/8	0,0	0,0	0
Diabaz 2/5	24,0	19,5	504
Piasek 0/2	35,0	28,4	735
Cement 42,5	---	13,20	341
Cement 42,5 HSR-NA		13,20	341
Woda		5,5	143
Polimer BV 10		0,070	1,8
		0,000	0
Razem:	100,0	100,0	2583



Rys. 1 Krzywa uziarnienia

wszystkie wypełnienia podporowe zostały wykonane także w sposób zapewniający ułożenie betonu „świeżego na świeży” z zastosowaniem opóźniacza ADDIMENT VZ1

- maksymalne przerwy pomiędzy końcem ułożenia jednej warstwy a rozpoczęciem układania kolejnej określono na podstawie badań partii cementu przeznaczonego do wykonania estakady oraz przewidywanych temperatur otoczenia w dniu betonowania (początek wiązania dla cementu CEM I 42,5 HSR NA wynosi średnio 210 minut, lecz zdarzały się partie, dla których wynosił on tylko 160 minut w temperaturze 20°C), do obliczeń harmonogramu betonowania przyjęto 2 h jako czas bezpieczny
- opracowane harmonogramy betonowania uwzględniały czasowe uwarunkowania technologiczne i sprzętowe (zmiana stanowiska pomp).

### Wpływ braku prawidłowego określenia parametrów materiałowych na procesy realizacyjne

Dla potrzeb uporządkowania problematyki wykonawstwa jednolitych maszywów betonowych potrzebne jest przyjęcie każdorazowo prawidłowych założeń technologicznych [4]. W omawianym przypadku niedocenicenie niektórych czynników było powodem powstania szeregu problemów wykonawczych, takich jak:

- otrzymanie betonu o podwyższonej klasie
- zbyt wysoki gradient temperatur z powodu zastosowania niewystudzonego spoiwa o temp. 25°C, temperatura samonagrzewu betonu wyniosła  $t = 69^\circ\text{C}$
- znaczny rozrzut parametrów sprężysto-wytrzymałościowych spowodowany brakiem dokładnego dozowania składników, a przede wszystkim występującym błędem w ocenie wilgotności i zacychności kruszywa, niedających początkowo objawów zewnętrznych w postaci zmiany konsystencji.

### Recepta mieszanki betonowej

Klasa betonu: B30

Miejsce: Przeprawa mostowa

Konsystencja (K-3) + Polimer BV 10 (K-5)

Składniki mieszanki: Gęstość [g/cm<sup>3</sup>]

Diabaz 8/11	3,015
Diabaz 5/8	3,015
Diabaz 2/5	3,015
Piasek 0/22	2,630

### Ciągła kontrola operacyjna procesu betonowania

Jest to analiza procesu układania masy betonowej prowadzona na bieżąco w trakcie procesu betonowania. Rozpatrywane są tu takie zagadnienia, jak: tempo ruchu transportu technologicznego, szybkość strumienia masy betonowej na poszczególnych stano-

Tabela 3. Uziarnienie mieszanki mineralnej

Sito [mm]	Skrócony odsiew [%]	Odsiew [%]	Przesiew [%]	Krzywa graniczna	
				dolna [%]	górna [%]
16,000	61,7	0,0	100,0	100	100
8,000		33,6	66,4	60	76
4,000		11,4	55,0	36	56
2,000		16,7	38,3	21	42
1,000	37,2	6,7	31,6	12	32
0,500		11,7	19,9	7	20
0,250		16,3	3,6	3	8
0,125		2,6	1,1	1	3
0,000	1,1	1,1	0,0	0	0
Suma:	100,0	100,0			

Tabela 4. Cechy fizyczne mieszanki

1. Współczynnik	C/W	2,4	
2. Współczynnik	W/c	0,42	
3. Ilość zaprawy		533	[dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
4. Stopień konsystencji		K-5	
5. Zawartość powietrza		2,5	[%]
6. Gęstość pozorna betonu		2583,0	[kg/m <sup>3</sup> ]
7. Wytrzymałość na ściskanie	R7	28,0	[MPa]
	R28	44,0	[MPa]

Tabela 5. Przyjęte oznaczenia odcinków przęseł

Lp.	Stanowisko pomp	Sekcje mostu	Opis	Obliczeniowa ilość betonu Vc [m <sup>3</sup> ]
1.	B1	E2P+P1	podpora + przęsło	108
2.		E2/1	podpora	86
3.	B2	P2	przęsło	89
4.		E2/2	podpora	100
5.	B3	P3	przęsło	98
6.		E2/3	podpora	100
7.		P4	przęsło	89
8.	B4	E2/4	podpora	86
9.		R1+P4	podpora + przęsło	108

Tabela 6. Składowe czynności dla jednego betonowozu

Czas minimalny $\tau_1$		Stanowiska pomp
Czas załadunku i dostawy	10 min	B <sub>1</sub>
Czas betonowania	8 min	B <sub>2</sub>
Całkowity czas przebiegu masy betonowej	25 min	B <sub>2</sub>
Czas maksymalny $\tau_2$		
Czas załadunku i dostawy	50 min	B <sub>4</sub>
Czas betonowania	65 min	B <sub>3</sub>
Całkowity czas przebiegu masy betonowej	85 min	B <sub>2</sub> /IV <sub>w</sub>

Tabela 7. Analiza szybkości betonowania poszczególnych elementów przęsła mostu

Stanowiska pomp	Betonowanie		Szybkość betonowania
	Czas betonowania $\tau$ [h]	Ilość betonu V [m <sup>3</sup> ]	
B1	194	8,65	22,4
B2	189	9,66	19,5
B3	287	12,24	23,5
B4	194	10,30	18,8
		$\bar{V}$ [m <sup>3</sup> /h]	21,0

Tabela 8. Jakość wykonania mieszanki betonowej

Ocena jakości	Współczynnik zmienności dla klasy betonu [%]	
	B10 ÷ B30	B40 ÷ B60
Bardzo dobra	do 10	do 7
Dobra	10-13	7-10
Średnia	13-16	10-13
Dostateczna	16-20	13-15
Niedobra (zła)	>20	>15

Element przęsla	Godz. betonowania	Wymiary próbek [cm]	Gęstość stwardniałego betonu	$\tau = 4$	$\tau = 7$	$\tau = 14$	$\tau = 28$ [dni]		Warstwy	Stanowisko pomp	
				Wytrzymałość na ściskanie $R_4$ [MPa]	Wytrzymałość na ściskanie $R_7$ [MPa]	Wytrzymałość na ściskanie $R_{14}$ [MPa]	Wytrzymałość na ściskanie $R_4$ [MPa]	Moduł sprężystości $E_p \times 10^3$ [MPa]			
EP2+P1	17:30	15x15x15	2,622	31,3			54,9	39,77	II	B1	
EP2+P1	19:00		2,527		41,5		55,6	39,88	III	B1	
EP2+P1	19:10		2,597	35,7			66,9	41,96	III	B1	
E2/1	19:55		2,456		43,5		49,5	38,63	II	B1	
E2P+P1	21:10		2,557				58,5	40,45	IV	B1	
E2P+P1	22:30		2,613				67,9	41,97	IVa	B1	
E2P+P1	23:05		2,473		37,7		53,4	59,27	IV	B1	
E2P+P1	23:50		2,492				47,9	38,18	IV	B1	
E2/1	1:20		2,597				58,0	40,35	IVa	B1	
E2/2	1:00		2,499				54,3	39,64	IV	B2	
P2	2:00		2,542				56,0	39,92	IVa	B2	
P3	3:20		2,459				46,6	37,92	IVa	B2	
P3	3:50		2,561				47,6	38,17	IVa	B2	
P4	5:50		2,542		41,8		63,2	41,27	III	B3	
P4	6:20		2,470				53,9	59,4	IV	B3	
P4	7:20		2,510				55,7	51,1	Va	B3	
E2/4	7:40		2,563				56,0	60,8	IV	B4	
E2/4	8:20		2,556				60,8	40,86	IVa	B4	
				<b>2,535</b>	<b>33,5</b>	<b>41,125</b>	<b>55,2</b>	<b>56,3</b>	<b>41,03</b>	-	-

Tabela 9. Badania wytrzymałości na ściskanie

wiskach jej podawania, czas dowiązania betonu w układowej warstwie itd.

Rozliczenie czasu dostaw masy betonowej oraz jej charakterystykę obrazuje tabela 9.

Wynika z nich, że dostawy betonu wg załączonych receptur posiadały niejednorodną i nadmierną konsystencją o opadzie stożka od 7 do 16 cm. Przeciętna konsystencja wynosiła 13 cm wg stożka Abramsa. Optymalnym rozwiązaniem byłoby zastosowanie mieszanki o opadzie stożka 8 cm.

#### Warunki kontroli szybkości betonowania masywów żelbetowych

W celu spełnienia warunków koniecznych do otrzymania homogenicznie dowiązanego betonu na styku połączeń poszczególnych warstw musi być przestrzegana zasada ruchu masy betonowej z wymuszonym taktem. Zgodnie z istotą założeń technologicznych procesu betonowania konstrukcji masywnych, szczególną uwagę należy zwrócić na następujące czynniki:

- nieprzerwaną pracę wytwórni betonów, produkującej beton z wysokim poziomem jednorodności  $k = 0,88 \div 0,92$

- zapewnienie ruchu transportu poziomego (betonowozu) na wysokim poziomie ufności, dla  $p = 0,98$
- układanie i zawibrowanie masy betonowej w deskowaniu z zachowaniem bezpiecznych odstępów czasowych betonowania w każdej warstwie.

Czas betonowania sekcji mostu – tabela 6.

Czas dowiązania betonu

W trakcie betonowania kontrolowano tężenie masy betonowej za pomocą pręta. Czynność tę powtarzano cyklicznie.

Nie stwierdzono w trakcie dowiązywania warstw betonu niepożądanego zjawiska tężenia warstwy dolnej.

Uzyskane własności sprężysto-wytrzymałościowe betonu

Przy produkcji betonu dla estakady uzyskano współczynnik jednorodności betonu  $k = 0,81 < 0,9$ .

Obliczeniowy współczynnik wytrzymałości betonu na ściskanie wynosił:

$$v = \frac{s}{R_{sr}} \times 100\% = \frac{6,33}{56,26} \times 10^2 = 11,25 [\%]$$

Ocenę jakości mieszanki należy przyjąć jako średnią. Ogólna ocena jakości (średnia) wyprodukowanego betonu nie wyjaśnia całkowicie sprawy. Z danych wytrzymałościowych wynika, że uzyskano w realizacji beton klasy wyższej niż projektowano. Badanie wytrzymałości dokonano po 28 dniach dojrzewania

Uzyskano:

$$s = 6,33 \quad R_g = 45,87$$

$$R_{i \min} = 46,60 \text{ MPa} \quad R_{sr} = 56,26 \text{ MPa}$$

Orzeczenie

Po 28 dniach zgodnie z normą PN-88/B-06250 „Beton zwykły” badany beton odpowiada klasie B45

Przy dużym rozrzucie wyników dla wysokiej klasy betonu są to odchylenia znaczne, tym bardziej

Tabela 10. Dane rozrzutu wartości skrajnych

Klasa betonu		R [MPa]		Moduł sprężystości $E_s \times 10^3$ [MPa]
Projektowana	uzyskana	$R_1$	$R_2$	
B30	B45	$R_1$	46,60	37,92
		$\bar{R}$	56,30	41,03
		$R_2$	67,90	41,97

Tabela 11. Uzyskane własności wytrzymałościowe poszczególnych warstw - dla R28 [MPa]

Nr warstwy	Stanowiska pomp							
	B <sub>1</sub>		B <sub>2</sub>		B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>		
	sekcje mostu							
	E <sub>2p</sub> + P1	E <sub>2</sub> /1	E <sub>2</sub> /2	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	E <sub>2</sub> /4	
I								
II	54,9		49,5					
III	55,6	66,9				63,2		
IV	58,5	53,4	47,9	54,3		59,4	60,8	
IVa	67,9		58,0	56,0	46,6	47,6	51,5	60,8

że betonowano elementy mostu warstwami o grubości 30÷40 cm z gruszek samochodowych o pojemności 7,0 do 9,5 m<sup>3</sup>.

Powstały w ten sposób przęsta niejednorodnie przewarstwione (tab. 9 i 11).

Ma to duże znaczenie praktyczne dla charakterystyki dynamicznej przy projektowaniu mostów.

## Podsumowanie

### Technologia betonowania

Wprowadzono technologię betonowania z zastosowaniem pomp hydraulicznych. Przeciętna szybkość betonowania wynosiła  $S = 21$  [m<sup>3</sup>/h], na poszczególnych stanowiskach wydajność osiągnęła następujący poziom:

Sekcja	Średnia szybkość betonowania	[m <sup>3</sup> /h]
B <sub>1</sub>	$\bar{S}_1$	22,40
B <sub>2</sub>	$\bar{S}_2$	19,50
B <sub>3</sub>	$\bar{S}_3$	23,50
B <sub>4</sub>	$\bar{S}_4$	18,80

### Uwagi dotyczące zagadnień technologicznych niedopracowanych przez inwestora

Brak receptury o wymaganych własnościach fizyko-mechanicznych betonu, w tym:

- źle dobrana konsystencja betonu (7÷16 cm wg Abramsa)
- nadmierna ilość niewystudzonego spoiwa niespełniającego modułu chemicznego  $W_i = 1,07 > 1,0$
- zastosowanie mieszanki betonu klasy B45 zamiast wymaganej klasy B30
- wprowadzenie do masywu monolitycznego w warstwach grubości 30÷40 cm betonu o zróżnicowanych własnościach wytrzymałościowych w przedziale (na przykładzie stanowiska B<sub>1</sub>)

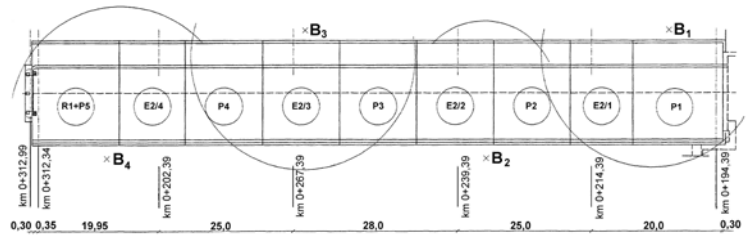
$$47,9 < R < 67,9 \text{ [dN/cm}^2\text{]},$$

a więc o rozrzucie wytrzymałości w granicach  $R = 20$  [MPa].

Jakość wykonanych mieszanek betonowych ocenia się jako średnią, na poziomie ufności  $k = 0,81 < 0,9$  o współczynniku zmienności  $10 < v = 11,25 < 13\%$ .

### Problemy technologiczne

- Stwierdzono wyciekanie zaczynu cementowego z powodu nadmiernej cieploty betonu (pomimo znacznej szczelności deskowań)
- Błędnie przyjęto czas rozpoczęcia betonowania o godz. 14 zamiast o godz. 5 rano, tzn. w chwili, kiedy kruszywa są znacznie wystudzone.



Rys. 2. Schemat betonowania sekcji estakady

### Czas dowiązania betonu

Gwarancją właściwego dowiązania betonu (świeży na świeży) była znaczna szybkość procesu betonowania  $S = 20$  [m<sup>3</sup>/h].

Sprawdzono dodatkowo (cyklicznie) tężenie masy betonowej za pomocą pręta. Kontrola ta nie wykazała niepożądanego zjawiska wczesnego tężenia betonu warstwy dolnej.

### Opóźniacz

Stosowano opóźniacz VZ w ilości 5÷6,51 [I] na betonowóz. Występował on nieregularnie w różnych warstwach, np.:

- B<sub>1</sub> – I, III w
- B<sub>2</sub> – I, II, III, IV w
- B<sub>3</sub> – III, IV w
- B<sub>4</sub> – I, II, III, IV w.

### Zarysowania betonu w konstrukcji

Po opadach deszczowych (w trakcie wysychania) wystąpiły wyraźnie widoczne zarysowania poprzeczne betonu IV (ostatniej) warstwy. Nad podporami w odstępach ok. 0,8 m, w przedziale 4 m z każdej strony podpory.

Stwierdzono również obecność rys skurczowych na półkach chodnikowych płyty estakady.

### Wnioski

Z analizy przedstawionego materiału wynika, że parametrem o dużym stopniu ryzyka jest przede wszystkim poziom wytworzenia mieszanki wynikający z wielu czynników, takich jak:

- cena i koszty materiałowe
- jednorodność dostaw kruszyw i spoiwa
- poziom wytwarzania mieszanki betonowej z uwzględnieniem dokładności dozowania składników.

**mgr inż. Tadeusz Janik**  
**mgr inż. Jan Konwinski**  
**mgr inż. Andrzej Konwinski**  
**Przedsiębiorstwo Budowlane CIROKO Sp. z o.o.**  
**Szczecin**

### Literatura

- 1 „Wymagania i zalecenia dotyczące wykonania betonów do konstrukcji mostowych”, Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, Ministerstwo Transportu i Gospodarki Morskiej, Warszawa 1987 r.
- 2 „Specyfikacje techniczne dla kontraktu – Wymagania ogólne”, Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych Oddział Północno-Zachodni w Szczecinie.
- 3 J. Jeńczak, A. Łowińska-Kiuge, Cement mostowy 4509 NA „REJOWIEC”. Ocena własności na tle cementu portlandzkiego zwykłego CP45NA, Politechnika Poznańska, Instytut Konstrukcji Budowlanych, Poznań 1997 r.
- 4 J. Kurzawa, W. Kiernożyci, T. Janik, Wybrane zagadnienia technologii wykonawstwa żelbetonowych fundamentów pod turbosopły dużej mocy, Prace naukowe Politechniki Szczecińskiej, nr 360, Instytut Inżynierii Lądowej Szczecin 1988 r.

Rys. 3. Przekrój poprzeczny przęsta estakady E2. Kolejność faz betonowania oraz schemat rozmieszczenia termopar do pomiaru temperatury samonagrzewu betonu

