

Beton wysokiej wytrzymałości (BWW) w produkcji rur betonowych

1. Wprowadzenie

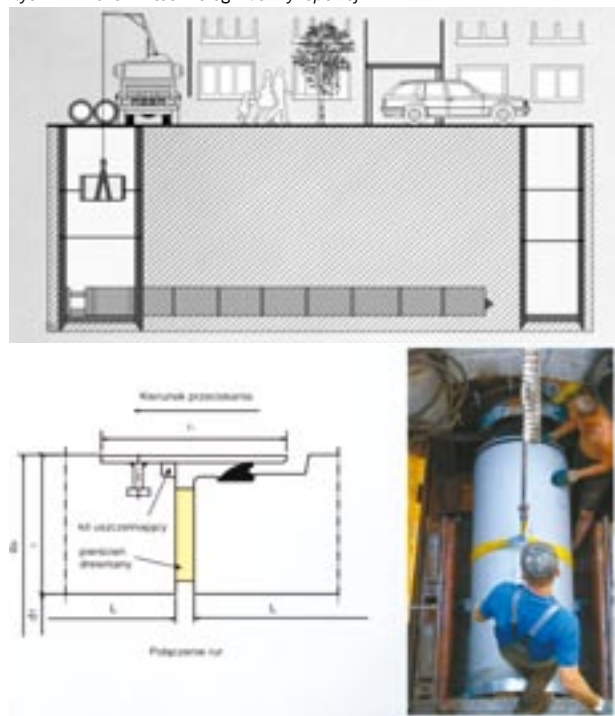
Gęsta zabudowa terenów miejskich, nasilony ruch drogowy i coraz większa ilość instalacji uniemożliwiają prowadzenie otwartej zabudowy kanałów. W tej sytuacji jedynym rozwiązaniem jest budowa instalacji podziemnych metodą bezwykopową. Zaletą tego sposobu jest to, że budowa rurociągu odbywa się bez utrudniania i zakłócania ruchu pieszych oraz pojazdów (rys. 1, 2). Przy konieczności prowadzenia robót w obszarze autostrad, torów kolejowych oraz głównych dróg i arterii komunikacyjnej nie ma innej sensownej alternatywy. Zalety technologii bezwykopowej to:

- zmniejszenie zakresu robót ziemnych o ok. 85% w stosunku do wykopów otwartych przy tej samej średnicy rur oraz tej samej długości kanału,
 - brak konieczności obniżania poziomu wód gruntowych
 - minimalizacja ilości urobku
 - wyeliminowanie wykopu liniowego
 - stabilny nałoz zwiększający bezpieczeństwo pracy rurociągu [1, 2].
- Ze studni startowej rury przeciskane są do studni końcowej. Zakres robót zmniejsza się o 85% w stosunku do wykopów otwartych przy tej samej średnicy rur oraz tej samej długości kanału.

2. Wymagania dotyczące rur betonowych

Zastosowanie mikrotunelingu ma coraz większe znaczenie w gospodarce wodno-kanalizacyjnej. Dla efektywnego przeciskania obok parametrów gruntu oraz czasu i długości przeciskania istotne są także właściwości betonu użytego do produkcji rur żelbetowych. Rury „High Performance Pipe” stanowią doskonałe połączenie wymagań wytrzymałościowych z optymalizacją wielkości urobku gruntu podczas mikrotunelingu. Żelbetowe rury przeciskowe wykonywane są zgodnie z normą PN-EN 1916 „Rury i kształtki z betonu niezbrojonego, betonu zbrojonego włóknom stalowym i żelbetowe”. Beton do budowy takich instalacji, z uwagi na niejednokrotnie ekstremalnie trudne warunki eksploatacji, musi spełniać specjalne wymagania, do których należy zaliczyć: odporność na agresywne oddziaływanie środowiska ze względu na bardzo zróżnicowany

Rys. 1. Założenia technologii bezwykopowej



ładunek zanieczyszczeń w wodach i gruncie, wysoki stopień wodoszczelności, mrozoodporność oraz ograniczony skurcz.

Rury żelbetowe „High Performance Pipe” w porównaniu do rur o standardowych średnicach zewnętrznych charakteryzują się mniejszą grubością ścianki, która wynosi odpowiednio 80 lub 82,5 mm. Dzięki tym własnościom możliwe jest zmniejszenie urobku o około 40%, skrócenie czasu pracy i związanych z tym kosztów (tab. 1). Rury produkowane są metodą odlewania na mokro, a proces dojrzewania betonu odbywa się w formach stalowych, w których umieszczone jest zbrojenie przy pomocy dystansów polimerowych. Zastosowanie tego typu dystansów eliminuje w znacznym stopniu możliwość tworzenia się rys i pęknięć na powierzchni rury. Dzięki takiej technologii produkcji uzyskujemy bardzo gładką i jednorodną powierzchnię zewnętrzną rury. Gładkość powierzchni rury w połączeniu ze zredukowaną powierzchnią zewnętrzną, spowodowaną zmniejszeniem grubości ścianki, obniża zdecydowanie wielkość występujących oporów tarcia podczas przeciskania. Zmniejszenie sił tarcia pozwala z kolei na wydłużenie odcinków przeciskania. Dzięki temu rury „High Performance Pipe” nadają się do przeciskania na odległość do 200 m [2].

3. Założenia projektowe

Uzyskanie betonu o pożądanych właściwościach wymaga odpowiedniego doboru składników i właściwego procesu projektowania, uwzględniającego gęstość i rozstaw zbrojenia, odpowiednią ciekłość mieszanki betonowej, a także czas transportu i zabudowy betonu. Wymagania dotyczące zarówno właściwości mieszanki betonowej jak i stwardniałego betonu przedstawiono w tabelicy 2.

4. Charakterystyka materiałów stosowanych w badaniach

4.1. Cement

Biorąc pod uwagę pożądany poziom wytrzymałości wczesnej, zapewniający rozformowanie i transport gotowego elementu na terenie zakładu prefabrykacji, do badań zastosowano cement portlandzki żuźlowy CEM II/B-S 52,5N o właściwościach przedstawionych w tabelicy 3. Cement ten charakteryzuje się wysoką wytrzymałością wczesną oraz w okresie normowym (28 dni), a także wysokim ciepłem hydratacji. Jest spoiwem

Tabela 1. Porównanie ilości urobku oraz nakładu pracy dla rur tradycyjnych oraz „High Performance Pipe”

Średnica [mm]	Urobek [m ³]		Dodatkowy nakład pracy
	„High Performance Pipe”	Rura standardowa	
500	34,25	47,9	40%
600	46,01	60,9	32%
800	73,22	95,10	30%

Tabela 2. Wymagania projektowe dla rur żelbetowych „High Performance Pipe”

Wymagania dla mieszanki betonowej	Wymagania dla stwardniałego betonu
Konsystencja mieszanki betonowej: 50-55 cm mierzona metodą stolika rozpluwowego	Klasa betonu C 70/85 po 28 dniach twardnienia
Brak segregacji składników	Wytrzymałość na ściskanie po 7 godzinach cyklu naporowania (3 godziny grzania elementu, 4 godziny stygnięcia, temp 55°C) – minimum 18 MPa
Utrzymanie konsystencji w czasie min. 30 minut	Wytrzymałość na ściskanie betonu po 1 dniu twardnienia – minimum 25 MPa
Brak zjawiska „wyrzucania” wody	Nasiąkliwość – nie wyższa niż 5%
	Głębokość penetracji wody – maksimum 30 mm
	Stopień mrozoodporności F 150

Tablica 3. Właściwości cementu portlandzkiego żuźlowego CEM II/B-S 52,5N

Właściwość	Wymagania wg PN-EN 197-1	Wynik badań laboratorium zakładowego
Zmiany objętości, Le Chatelier	≤ 10 mm	0,7 mm
Początek czasu wiązania	≥ 45 minut	264 minut
Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach	≥ 20 MPa	26,8 MPa
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach	≥ 52,5 MPa	59,0 MPa

Tablica 4. Właściwości fizyczne popiołu lotnego

Strata prażenia [%]	SO ₃ [%]	CaO _{wolne} [%]	Cl ⁻ [%]	Aktywność pucolowa [%]		Miałkość [%]	Gęstość [g/cm ³]
				po 28 dniach	po 90 dniach		
2,24	0,67	0,07	0,007	78,4	89,7	34,0	2,13

Tablica 5. Skład chemiczny popiołu lotnego

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO _{wolne}	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻
51,50	27,83	7,50	0,07	3,68	2,51	0,67	1,07	2,97	0,007

Tablica 6. Skład mieszanki betonowej

Składnik	Producent	Ilość [kg/m ³]
Cement CEM II/B-S 52,5N	Góraźdze	410
Piasek 0/2	Lewin Brzeski	646
Żwir 2/8	Wójcice	360
Żwir 8/16	Wójcice	792
Popiół lotny	Opole	30
Mikrokrzemionka (Woerosil 500 SP)	BASF	41
Superplastyfikator Glenium ACE 48	BASF	6,97
Woda	-	136

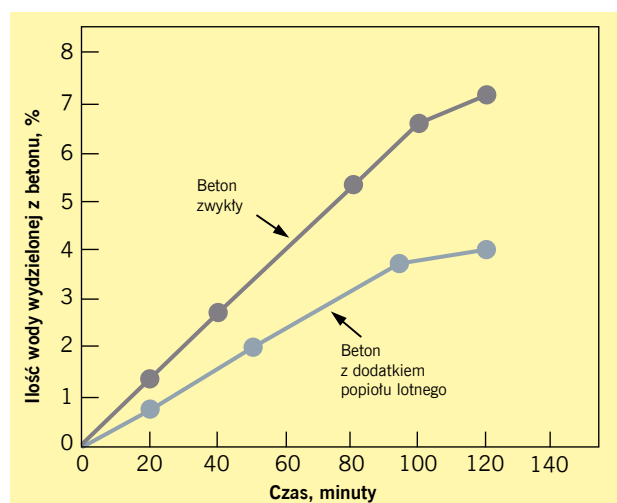
Tablica 7. Właściwości mieszanki betonowej

Właściwość	Uzyskany wynik
Konsystencja mieszanki betonowej mierzona metoda stolika rozplwowego	54 cm
Zawartość powietrza	1,9%
Segregacja składników	brak
Utrzymanie konsystencji w czasie	30 minut
Temperatura mieszanki betonowej	18,5°C
Zjawisko „wyrzucania” wody	brak

Tablica 8. Średnia wytrzymałość na ściskanie betonu C 70/85

	Wytrzymałość średnia f_{cm} [MPa], po upływie			
	7 godzin	1 dzień	2 dni	28 dni
Laboratorium	40,3	56,1	67,1	101,9
Próba przemysłowa	32,9	Nie badano	56,2	93,9

Rys. 2. Ilość wody wydzielanej z betonu bez dodatku i z dodatkiem popiołu lotnego [4]



powszechnie stosowanym w produkcji prefabrykatów wielko- i drobnowymiarowych, elementów sprężonych, a także betonów BWW i SCC.

4.2. Kruszywo

Do zaprojektowania składu mieszanki betonowej zastosowano lokalne kruszywa żwirowe. Szczególną uwagę zwrócono na uziarnienie piasku. Zastosowane kruszywo umożliwiało osiągnięcie właściwego rozplwy mieszanki betonowej i należyte wypełnienie przestrzeni w wykonywanym elemencie (gęsto ułożone zbrojenie).

4.3. Domieszka chemiczna

Do projektowania i wykonania betonu zastosowano domieszkę Glenium ACE 48 opartą na bazie eterów polikarboksylianowych. Jest to domieszka przeznaczona do produkcji prefabrykatów, betonów reodynamicznych, o wysokich wytrzymałościach początkowych i betonów sprężonych. Umożliwia produkcję betonów o niskim stosunku w/c, co prowadzi do otrzymania betonu o wysokich wytrzymałościach zarówno początkowych jak i w okresie normowym (28 dni). Betony z zastosowaniem Glenium ACE 48 odznaczają się zdolnością do dobrego utrzymania konsystencji, także przy wysokich temperaturach. Ten rodzaj domieszki wpływa przyspieszająco na hydratację faz cementowych, w efekcie czego w procesie twardnienia, zwłaszcza w początkowym okresie, wydziela się więcej ciepła. Skutkuje to stosunkowo wysokim poziomem wytrzymałości wczesnej betonu.

4.4. Popiół lotny

W celu poprawy właściwości reologicznych mieszanki betonowej w składzie betonu zastosowano wysokiej jakości popiół lotny, spełniający wymagania normy PN-EN 450-1: 2006 „Popiół lotny do betonu”. Odpowiednio dobrany dodatek mineralny, wraz z cementem, zapewnia właściwą płynność mieszanki betonowej oraz pozwala na wydłużenie czasu urabialności (przerabialności) betonu. Mieszanka betonowa zawierająca popioły lotne jest spoiwa i wykazuje mniejszą tendencję do wydzielania mleczka cementowego, co pokazano na rys. 2. Dodatek popiołu lotnego, przy równoczesnym zmniejszeniu zawartości cementu w betonie, powoduje zmniejszenie skurczu betonu. Beton z dodatkiem popiołu lotnego charakteryzuje się podwyższoną odpornością na korozyjne działanie środowisk agresywnych chemicznie. W prowadzonych badaniach zastosowano popiół lotny krzemionkowy o składzie i właściwościach przedstawionych w tablicy 4 i 5.

4.5. Pył krzemionkowy

Pył krzemionkowy jest produktem ubocznym powstałym w procesie wytwarzania krzemu metalicznego lub jego stopów. Wykazuje on charakter amorficzny i występuje w postaci pustych kuleczek o średnicach mniejszych niż 10-6 m. Stosowany w produkcji betonu powinien spełniać wymagania określone w normie PN-EN 13263-1:2006 Pył krzemionkowy do betonu. Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności. Wprowadzenie pyłu krzemionkowego do składu mieszanki betonowej zmienia jej właściwości reologiczne rzutujące na sposób jej układania i zagęszczania. Bardzo drobne cząstki tego dodatku wpływają na zwiększenie spoiwości i zmniejszenie plastyczności mieszanki betonowej, co skutkuje zwiększeniem wodożądności. Wymaga to stosowania odpowiedniej jakości i ilości domieszek chemicznych uplastyczniających i wydłużenia okresu zagęszczania (wibrowania) [3]. Pył krzemionkowy bardzo korzystnie wpływa na wytrzymałość betonu, generalnie ją zwiększając. Wzrostowi wytrzymałości na ściskanie betonu towarzyszy przyrost wartości modułu Younga. Szczególnie należy podkreślić pozytywny wpływ dodatku pyłu krzemionkowego na trwałość betonu. Beton z tym dodatkiem charakteryzuje się większą szczelnością, mniejszą nasiąkliwością i zwiększoną odpornością na działanie agresji chemicznej. W projektowaniu betonu zastosowano mikrokrzemionkę w postaci zawiesiny o nazwie handlowej „Woerosil 500 SP”.

5. Skład i właściwości mieszanki betonowej

Skład zaprojektowanej i badanej mieszanki betonowej przedstawiono w tablicy 6, a jej właściwości w tablicy 7.

6. Właściwości stwardniałego betonu

Próbki betonu po zaformowaniu były przechowywane przez 4 godziny w temperaturze 55°C, a następnie przez kolejne 3 godziny dojrzewały w warunkach laboratoryjnych (temperatura 20±1°C i wilgotności powyżej 50%). Po 7 godzinach zostały rozformowane. Symulacja taka miała odzwierciedlać warunki technologiczne w zakładzie produkcyjnym. Po uzyskaniu zadowalających parametrów wytrzymałościowych i trwałościowych w laboratorium przeprowadzono próbę przemysłową w PV Prefabet Kluczbork. (rys. 3)

Poniżej przedstawiono zestawienie właściwości stwardniałego betonu zarówno z badań laboratoryjnych jak i seryjnej produkcji rur „High Performance Pipe” (odwarty rdzeniowe).

Wykonano następując zakres badań stwardniałego betonu:

- wytrzymałość na ściskanie po 7 godzinach, 1, 7 i 28 dniach
- głębokość penetracji wody pod ciśnieniem
- nasiąkliwość
- odporność na różne czynniki chemiczne.

Uzyskane wyniki badań potwierdzają osiągnięcie założeń projektowych. Badany beton charakteryzował się wysoką szczelnością. Badanie wykonane według procedury zawartej w normie PN-EN 12390-8 Badania betonu. Część 9: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem. Wykazuje brak wnikania wody pod ciśnieniem zarówno w próbce pochodzącej z zarobów laboratoryjnych jak i w odwiercie z produkcji przemysłowej, co pokazano na rys. 2. Zgodnie z zaleceniami niemieckimi, beton można zakwalifikować jako beton szczelny (maksymalna głębokość wnikania wody 50 mm, lub w przypadku betonów narażonych na oddziaływanie środowisk agresywnych 30 mm). Średnia wartość nasiąkliwości dla badanych betonów wyniosła 3,1% dla próby laboratoryjnej oraz 3,35% dla próby przemysłowej. Badania mrozoodporności wykonano dla stopnia mrozoodporności F150 wg PN-88/B-06250 „Beton zwykły”. Procedurę badań rozpoczynano po upływie 28 dni. Wyniki badań przedstawiono na rys. 3 i 4. Badany beton spełnił wymagania dla stopnia mrozoodporności F150. Beton charakteryzował się niewielkim ubytkiem masy (0,6%) i niedużym spadkiem wytrzymałości na ściskanie (9,0%). Na próbkach stwardniałego betonu (po 28 dniach) zostały przeprowadzone również testy mające na celu ocenę odporności na działanie środowisk agresywnych (woda morska oraz środowisko siarczanów). Po 180 dniach przechowywania próbek w roztworach zgodnych z Pr ENV 196-X „Methods of testing cement – Determination of the resistance of cements to attack by sulfate solution or by sea water” próbki zostały poddane badaniu wytrzymałości na ściskanie wg PN-EN 12390-3. Wyniki przedstawiono w tabelcy 9. Próbki betonowe po badaniu utrzymywały zakładany poziom wytrzymałości i mieściły się w projektowanej klasie wytrzymałości (C 70/85).

7. Wnioski

W przeprowadzonych badaniach pokazano możliwość zastosowania betonu wysokiej wytrzymałości (C 70/85) w produkcji i w wykonawstwie żelbetowych rur „High Performance Pipe” zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 1916. Zaprojektowany i wykonany beton charakteryzował się wysoką wytrzymałością zarówno wczesną jak i w okresie normowym, wysoką szczelnością i odpornością na działanie niskich temperatur (badany stopień mrozoodporności F 150). W oparciu o przeprowadzone badania w skali laboratoryjnej, a następnie ich przemysłową weryfikację oraz analizę ekonomiczną, można stwierdzić, że uzasadnione jest zastosowanie w produkcji rur żelbetowych betonu wysokich klas pod warunkiem stosowania odpowiedniej jakości składników oraz ścisłego przestrzegania reżimu technologicznego na wytwórni betonu.

Tomasz Pużak
Górażdże Cement SA

Literatura

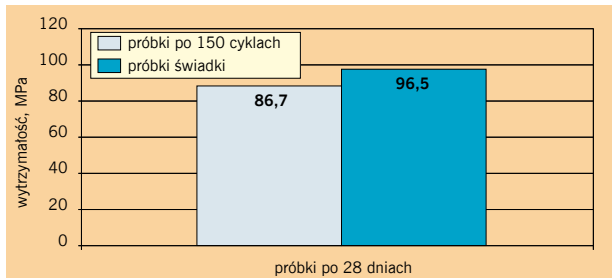
- 1 C. Madryas, A. Kolonko, L. Wysocki, *Konstrukcje przewodów kanalizacyjnych*, Wrocław 2002
- 2 *Materiały promocyjne firmy PV Prefabet Kluczbork*
- 3 A.M. Neville, *Właściwości betonu*, Polski Cement, Kraków 2000
- 4 V.M. Malhotra, A.A. Ramezianpour, *Fly ash in concrete CANMET*, Canada 1994



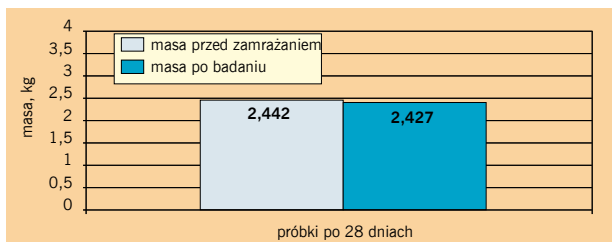
Rys. 3. Proces produkcyjny rur „High Performance Pipe”



Rys. 4. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem (widoczny brak penetracji wody)



Rys. 5. Badanie mrozoodporności betonu – spadek wytrzymałości



Rys. 6. Badanie mrozoodporności betonu – ubytek masy

Tabela 9. Wytrzymałość na ściskanie próbek przechowywanych w roztworach agresywnych

Próbka	Rodzaj środowiska	Czas przechowywania [dni]	Średnia wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Spadek wytrzymałości [%]
C 70/85	Sztuczna woda morska o składzie: – 1000 g wody – 30 g chlorku sodu – 6 g chlorku magnezu – 5 g siarczanu magnezu – 1,5 g siarczanu wapnia – 0,2 g węgla potasu	180	90,5	9,5
C 70/85	Roztwór siarczanów (zawartość SO ₃ 16 g/dm ³)	180	96,6	3,4
C 70/85	Woda (świadek)	28	99,9	-