

Budowa fundamentów elektrowni wiatrowych – jako przykład aplikacji betonów wysokowartościowych (BWW) w Polsce

CONSTRUCTIONS OF FOUNDATIONS FOR WIND POWER PLANT – AS
EXAMPLE OF APPLICATION OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE (HPC)
IN POLAND

Streszczenie

Referat jest zbiorem informacji i uwag zebranych przez autorów w trakcie budowy prefabrykowanych fundamentów elektrowni wiatrowych. W ramach międzynarodowego projektu CEMEX Polska Sp. z o.o. był dostawcą betonu wysokowartościowego (BWW) dla konsorcjum polsko-duńskiego Pihl-Hochtief. Fundamenty z betonu wysokowartościowego, zaprojektowano jako żelbetowe elementy prefabrykowane z betonu klasy C 45/55 wg EN-206-1, które posadowione są na dnie morskim. Elementy eksploatowane są w wyjątkowo ekstremalnych warunkach środowiska: zamrażanie i odmrażanie w obecności wody morskiej oraz fizyczne i chemiczne oddziaływanie wody morskiej. Autorzy w referacie prezentują uzyskane wyniki badań oraz istotne elementy procesu budowlanego. W trakcie realizacji wykorzystano nowoczesne narzędzia w technologii betonu: Air Void Analyzer oraz system symulacji i monitorowania betonu w konstrukcji.

Abstract

This paper is a set of information and comments gathered by the authors during the construction of prefabricated foundations for wind power plants. Within an international project, CEMEX Polska Sp. z o.o. was a supplier of high performance concrete (HPC) for the Pihl-Hochtief Polish-Danish Consortium. The foundations of high performance concrete were designed as precasted elements of reinforced concrete class C 45/55 acc. to EN-206-1, situated on the sea bed. The elements are exploited in the extreme conditions:

freezing and melting in the presence of sea water and physical and chemical operation of sea water. The authors present the achieved results of the studies and significant milestones of the construction process. During the realization, modern tools were used in the concrete technology: Air Void Analyzer and the system for simulation and monitoring of concrete in the structure.

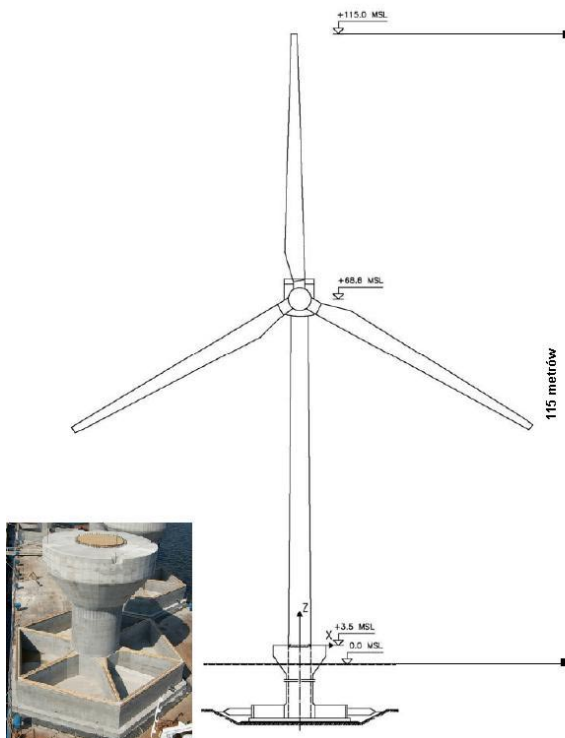
1. Wstęp

Podstawowymi cechami betonów wysokowartościowych (BWW) jest ich wytrzymałość (powyżej 60 MPa) oraz wysoka trwałość i odporność na oddziaływanie środowiska, w którym są eksploatowane. Autorzy referatu w ramach współpracy polsko-duńskiej mieli możliwość uczestnictwa w dwóch międzynarodowych projektach inwestycyjnych, wykorzystujących technologię betonów wysokowartościowych. W niniejszym referacie autorzy chcą podzielić się doświadczeniami zdobytymi przy budowie prefabrykowanych fundamentów elektrowni wiatrowych, posadowionych na dnie morskim.

W ramach pierwszego kontraktu (2002–2003) CEMEX Polska dostarczył beton dla 72 fundamentów turbin wiatrowych (2,3 MW każda). Zbudowane w Polsce fundamenty transportowano barkami do miejsca przeznaczenia i posadowiono na dnie morza między miejscowościami Gedser and Rørdby (południowe wybrzeże Danii), nazywając miejsce elektrowni: Wind Farm.

W marcu 2006 roku CEMEX Polska rozpoczął dostawy betonu dla kolejnych 48 fundamentów elektrowni wiatrowych posadowionych w morzu. Tym razem elektrownia Lillgrund jest zlokalizowana na płytkich wodach Oresund pomiędzy Szwecją i Danią, w okolicach Malmö i zajmie powierzchnię około 7 km². Miejszem prefabrykacji jest Świnoujście. Wykonawcą elementów jest konsorcjum Pihl-Hohtief JV.

Całkowita wysokość turbiny mierzona od góry fundamentu do końca śmigła wynosi 115 metrów (rys. 1). Fundamenty ze względu na nierówności dna morskiego w miejscu posadowienia mają różne wysokości (najwyższy 14,31 metra). Elementy posadowione są na dnie morza, w specjalnej niecce o głębokości 2,5 metra, na warstwie kruszywa łamanego o grubości od 30 do 40 centymetrów. Fundamenty, których masa całkowita wynosi około 1 300 ton dodatkowo balastowane są kruszywem (około 500 ton). Każdy z fundamentów wystaje ponad powierzchnię morza około 3,5 metra. Na dodatkowym fundamencie będzie umieszczona stacja transformatorowa, łącząca elektrownię z lądem przewodem o długości 7,2 kilometra.

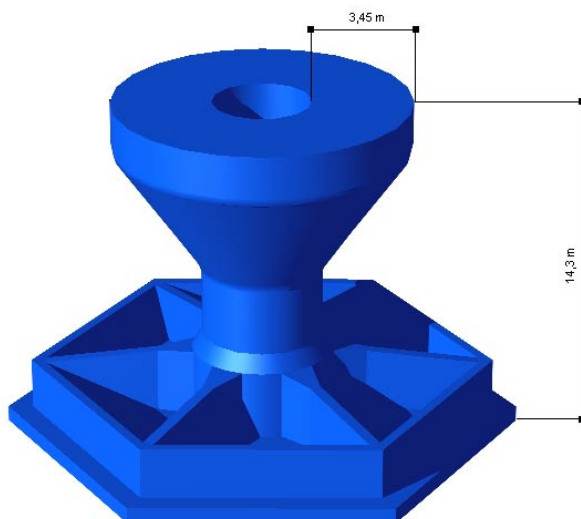


Rys. 1. Turbina elektrowni wiatrowej i fundament z BWW

Fundamenty zaprojektowano jako żelbetowe elementy prefabrykowane z betonu wysokowartościowego. Projekt przewidywał zastosowanie betonu klasy C 45/55 zgodnie z EN 206-1. Projektant wyspecyfikował dla betonu następujące klasy ekspozycji: XC4; XF4; XS3; XM3. Elementy narażone będą na wyjątkowo ekstremalne oddziaływanie środowiska: zamrażanie i odmrażanie w obecności wody morskiej, fizyczne i chemiczne oddziaływanie wody morskiej. Zastosowanie w tym przypadku betonu BWW jest jedynym możliwym rozwiązaniem.

2. Charakterystyka betonu i badania

Ze względu na warunki klimatyczne, w jakich zlokalizowana jest elektrownia wiatrowa, projektanci szczególną uwagę poświęcili trwałości i jakości stosowanych materiałów. W stosunku do betonu wymagania te są zdecydowanie najwyższe. Ciężkie zimy powtarzające się w regionie elektrowni i związane z tym częste zmiany temperatur z dodatnich na ujemne i odwrotnie, zadecydowały o wysokich wymaganiach mrozoodporności w stosunku do betonu. Dodatkowym agresywnym czynnikiem w stosunku do betonu jest woda morska, która oprócz oddziaływania czysto chemicznego oddziałuje na elementy poprzez procesy erozji i kawitacji. Opisywane czynniki były decydujące, jeżeli chodzi o wybór rozwiązania materiałowego, ale nie jedyne. Górna część fundamentu, tzw. kielich, jest elementem masywnym. W tego typu elementach dodatkową trudnością jest możliwość powstania zbyt wysokich temperatur oraz gradientów temperatur w elemencie na skutek procesów hydratacji cementu. Schemat fundamentu elektrowni wiatrowej pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Schemat betonowego fundamentu

Możliwość pojawienia się rys termicznych na elementach była powszechnie dyskutowana przed rozpoczęciem budowy. Sprawdzano wiele rozwiązań materiałowych tak, aby zapewnić spełnienie wymagań podstawowych dla betonu (wytrzymałość na ściskanie),

wymagań trwałościowych (mrozoodporność) oraz wymagań dla gotowego elementu (brak spękań). Ewentualne pojawienie się spękań na elemencie drastycznie obniżyłoby jego trwałość oraz generowałoby dodatkowe wysokie koszty napraw. W związku z tym przed posadowieniem elementów w morzu przechodziły one w ramach kontroli jakości, bardzo szczegółowe oględziny pod kontem występowania rys.

Przed rozpoczęciem realizacji wykonano wiele badań wstępnych, mających na celu wybór najlepszego rozwiązania materiałowego. Wykonane badania można podzielić na następujące grupy:

- badania surowców do betonu (kruszywa, mikrokrzemionka, cementy),
- standardowe badania wstępne (wytrzymałość na ściskanie; konsystencja; zawartość powietrza);
- badania trwałościowe (mrozoodporność – w wodzie i w soli; wodoszczelność; nasiąkliwość);
- badania dodatkowe (struktura napowietrzenia za pomocą Air Void Analyzer [1]; kalorymetryczność mieszanki – „kabina hydratacyjna” [2, 3, 4]).

Spśród testowanych materiałów i rozwiązań zdecydowano się na wariant pokazany w tabeli poniżej, który najlepiej spełniał założenia projektowe.

Tabela 1. Charakterystyka betonu wysokowartościowego na fundamenty elektrowni wiatrowych

Klasa betonu:	C 45/55
Konsystencja:	S4
Klasy ekspozycji:	XC4; XF4; XS3; XM3
W/C:	0,38 ¹⁾
Zawartość powietrza:	5,5 %
Cement:	CEM III/A 32,5 N NA HSR LH – wg EN 197-1
Mikrokrzemionka:	5 % masy cementu – wg EN 13263
Piasek:	naturalny płukany 0/2 mm – wg EN 12620
Kruszywa:	gnejs frakcje: 2/8 mm; 8/16 mm; 16-32 mm – wg EN 12620
Domieszki:	upłynniające (plastyfikator i superplastyfikator) – wg z EN 934-2; napowietrzająca – wg z EN 934-2.

¹⁾ przy obliczaniu W/C uwzględniono współczynnik aktywności dla mikrokrzemionki $k = 2$

Kontrola jakości betonu prowadzona była w sposób szczególny. Zakres i częstotliwość badań były jednoznacznie sprecyzowane. W przypadku wystąpienia niezgodności którekolwiek z parametrów w stosunku do wymagań podejmowane były środki zaradcze przy jednoczesnym zwiększeniu częstotliwości kontroli tego parametru. Na placu budowy zorganizowano laboratorium polowe, którego możliwości badawcze obejmowały:

- badania kruszyw (oznaczenie składu ziarnowego, oznaczenie zawartości pyłów mineralnych);
- oznaczenie zawartości pyłu krzemionkowego w „szlamie”;

- badania świeżej mieszanki betonowej (konsystencja, zawartość powietrza; współczynnik w/c , temperatura);
- badania betonu stwardniałego (wytrzymałość na ściskanie; nasiąkliwość).

Pozostałe badania – w tym trwałościowe – wykonywane były poza placem budowy. Zakres i częstotliwość badań kontrolnych dla surowców pokazano w tabeli 2, a dla mieszanki betonowej i betonu stwardniałego w tabeli 3.

Tabela 2. Zakres badań surowców w ramach bieżącej kontroli jakości

Rodzaj badania	Metoda	Rodzaj surowca	Częstotliwość
Oznaczenie składu ziarnowego kruszywa	EN 933-1:2000	Piasek Mosty 0/2 mm Gnejs Eikefet 2/8 mm; 8/16 mm; 16/32 mm	1 raz na partię (Partia = 500 ton), lub w przypadku wątpliwości przy ocenie wizualnej. 1 raz na partię (Partia = 1 statek lub 500 ton dla grysu 2-8 mm; 1000 ton dla gryсів 8-16 mm i 16-32 mm) lub w przypadku wątpliwości przy ocenie wizualnej.
Oznaczenie zawartości pyłów mineralnych	EN 933-1:2000	Piasek Mosty 0/2 mm Gnejs Eikefet 2/8 mm; 8/16 mm; 16/32 mm	1 raz na partię (Partia = 500 ton), lub w przypadku wątpliwości przy ocenie wizualnej. 1 raz na partię (Partia = 1 statek lub 500 ton dla grysu 2-8 mm; 1000 ton dla gryсів 8-16 mm i 16-32 mm) lub w przypadku wątpliwości przy ocenie wizualnej.
Zawartość suchej masy	EN 13263	Mikrokrzemionka w szlamie	1 raz na tydzień

Zestawienie wyników badań betonu wysokowartościowego C 45/55, w okresie od 1 kwietnia do 31 maja 2006 roku, na tle wykonanych badań wstępnych, pokazano w tabeli 4. W okresie tym wyprodukowano ponad 3 500 m³ betonu. Wykonano ponad 200 badań wytrzymałości na ściskanie (R_{28}) i tyle samo badań wytrzymałości na ściskanie 2-dniowej i 7-dniowej, ponad 130 badań zawartości powietrza i kolejnych tyle pomiarów konsystencji. Uzyskane w trakcie kontroli jakości odchylenia standardowe, wskazują na dużą powtarzalność i stabilność produkcji.

Dla opisywanego betonu wykonano również badania trwałościowe, których wyniki są również pozytywne. Mrozoodporność wg PN-B/86-06250: strata wytrzymałości wyniosła 6,9%, a ubytek masy 0,1%. W badaniach wodoszczelności maksymalna głębokość penetracji wody przy ciśnieniu 10 atm. wyniosła 150 mm. Średnia nasiąkliwość betonu z serii badań wyniosła 3,2%. Wyników badań mrozoodporności w 3% roztworze NaCl

Tabela 3. Zakres badań mieszanki betonowej i betonu stwardniałego w ramach bieżącej kontroli jakości

Badana cecha:	Metoda badania:	Wymagania:	Częstotliwość:	Ilość próbek:
Wytrzymałość na ściskanie: R2 R7 R28	EN 12390-1 EN 12390-2 EN 12390-3* EN 12390-4	brak wymagań brak wymagań Rsr > 59 MPa Rmin > 51 MPa	R2 i R7 - 1 raz / 100 m3 lub minimum 1 raz / dzień produkcji R28 – 1 raz / 50 m3 produkcji lub minimum 1 raz na dzień produkcji	Każde pobranie próbek do badań powinno składać się z 3 próbek pobranych z 1 transportu.
Określenie gęstości betonu stwardniałego:	EN 12390-7	brak wymagań	Badanie wykonuje się dla każdej próbki kostkowej pobranej do badań wytrzymałości	Jak wyżej.
Określenie konsystencji mieszanki betonowej: Opad stożka	EN 12350-1 EN 12350-2	Klasa konsystencji: S4 160 - 210 mm	Minimum 3 pierwsze betonowozy przy rozpoczęciu produkcji i do ustabilizowania się konsystencji. Później ocena wizualna każdego betonowoza oraz 1 badanie / 5 betonowozów lub w przypadku wątpliwości.	Nie dotyczy.
Określenie zawartości powietrza w mieszance betonowej. Metoda ciśnieniowa	EN 12350-1 EN 12350-7	4,5±6,5% ±0,5%	Minimum 3 pierwsze betonowozy przy rozpoczęciu produkcji i do ustabilizowania się zawartości powietrza. Później 1 badanie / 5 betonowozów lub w przypadku wątpliwości.	Nie dotyczy
Określenie gęstości świeżej mieszanki betonowej.	EN 12350-1 EN 12350-6	Brak wymagań	Każdorazowo przy określaniu zawartości powietrza.	Nie dotyczy
Temperatury; powietrza mieszanki betonowej	Termometr do betonu	Nie dotyczy 5 – 30oC	Każdorazowo przy pobieraniu mieszanki do badań.	Nie dotyczy
Badanie W/C	Odparowanie wody – procedura własna	W/C ≤ 0,38	Minimum 1 badanie /dzień.	Nie dotyczy

wg prENV 12390, w związku z terminem oddania artykułu do druku, nie można jeszcze podać.

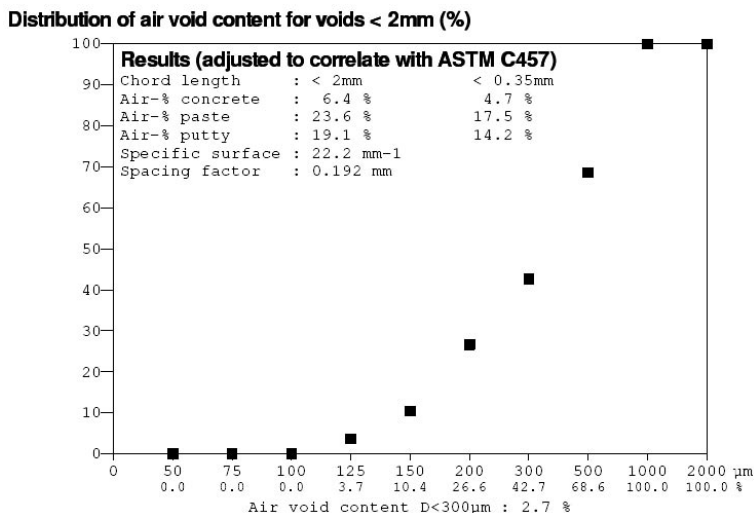
Tabela 4. Zestawienie wyników badań betonu BWB

Parametr	Produkcja		Badania wstępne	Wymaganie
	Wynik	Odchylenie standardowe	Wynik	
Konsystencja [mm]	186	20	180	S4 = 160 – 210
Gęstość [kg/m ³]	2323	19	2326	brak wymagań
Zawartość powietrza [%]	5,2	0,6	5,9	4,5 – 6,5
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]				
R2	17,8	3,3	16,2	brak wymagań
R7	44,0	3,6	41,1	brak wymagań
R28	65,7	4,3	66,5	> 59

2.1. Badania struktury napowietrzenia

Oprócz standardowych badań zawartości powietrza metodą ciśnieniową wg PN-EN 12350-7, wykonano wiele badań struktury napowietrzenia betonu za pomocą urządzenia AVA – Air Void Analyzer. Metoda badania struktury napowietrzenia, za pomocą urządzenia AVA, opracowana została przez specjalistów z Danish Technological Institute. Urządzenie umożliwia zbadanie struktury napowietrzenia w świeżej mieszance betonowej [1]. Wyniki badań uzyskiwane w rezultacie testu AVA są porównywane do wymagań normy ASTM C457. Badanie jest alternatywą dla badania mikroskopowego. Przewagą badania struktury napowietrzenia za pomocą AVA jest to, że informacje na temat struktury napowietrzenia uzyskujemy jeszcze przed wbudowaniem mieszanki betonowej lub na etapie jej wbudowywania. Badania mikroskopowe możliwe są do wykonania już po zabudowaniu betonu w elemencie, kiedy osiągnął on wymaganą do pobrania próbek (odwiertów) wytrzymałość. Poprzez kontrolę takich parametrów w strukturze napowietrzenia, jak: współczynnik rozmieszczenia pęcherzyków powietrza w betonie (spacing factor), procentowa zawartość pęcherzyków o średnicy poniżej 300 µm oraz całkowita powierzchnia pęcherzyków, jesteśmy w stanie stwierdzić, czy wprowadzone domieszka napowietrzająca powietrze ma tzw. dobrą strukturę i gwarantuje uzyskanie odpowiedniej mrozoodporności. Dane literaturowe [5, 6] oraz normy i wytyczne [7, 8] omawiające zagadnienia struktury napowietrzenia, stosowane w różnych krajach, podają zalecane wymagania dotyczące struktury powietrza w betonie, których spełnienie gwarantuje uzyskanie betonu o wysokiej mrozoodporności. Najważniejszymi parametrami są spacing factor (wymaganie < 0,2 (0,24 – wg niektórych danych z literatury)) oraz zawartość pęcherzyków poniżej 300 µm (wymaganie > 1,8%). Dalej przedstawiono wyniki badania

struktury napowietrzenia (rys. 3), dla betonu wysokowartościowego dostarczanego na potrzeby budowy fundamentów pod elektrownie wiatrowe.

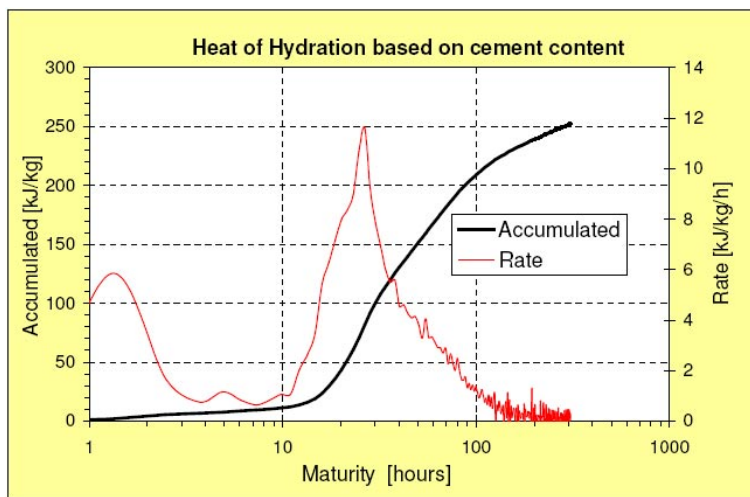


Rys. 3. Badania struktury napowietrzenia – Air Void Analyzer

Pokazane na rys. 3 wyniki badań potwierdziły dobrą strukturę napowietrzenia w betonie. Sama metoda badawcza nie jest jeszcze wystarczająco rozpropagowana w Polsce. Dzięki swoim zaletom jest rekomendowana przez Kansas Department of Transportation oraz Federal Highway Administration w USA, a także przez Danish Technological Institute.

2.2. Badania ciepła hydratacji

Badania kalorymetrii betonu wysokowartościowego dostarczanego na potrzeby budowy wykonano w kabinie hydratacyjnej [2, 3, 4], będącej częścią systemu do symulacji i monitorowania cech młodego betonu w konstrukcji. Badania pokazały, że zaproponowana mieszanka betonowa charakteryzuje się wyjątkowo niskim ciepłem hydratacji (rys. 4) jak na beton wysokowartościowy. Mimo to po wykonaniu symulacji rozwoju i rozkładu temperatur w betonowanym elemencie okazało się, że niezbędne będzie zaprojektowanie systemu chłodzącego elementy. Temperatury, które generowałyby się w górnej części fundamentu oraz gradienty temperatur, bez zastosowania systemu chłodzącego, byłyby zbyt wysokie i spowodowałyby powstanie spękań. Szczególnie zjawisko występowałoby w okresie, kiedy temperatura powietrza wzrosłaby powyżej 20°C. Najbardziej intensywnie prace betoniarskie prowadzono w okresie letnim, dlatego na potrzeby budowy zaprojektowano układ chłodzenia elementów. Na obwodzie kielicha przewidziano układ rur chłodzących, których celem było niedopuszczenie do powstania zbyt wysokich temperatur wewnątrz elementu oraz obniżenie do minimum powstających gradientów temperatury. Projekt systemu chłodzącego wykonała firma Pihl. Temperatura wody chłodzącej oraz prędkość przepływu wody w rurach chłodzących były regulowane w zależności od potrzeb.



Rys. 4. Wyniki badań kalorymetryczności betonu

Temperatury powstające w „kielichu” każdego z fundamentów były monitorowane. W żadnym z przypadków maksymalna temperatura wewnątrz elementu nie przekroczyła 39°C, a maksymalny gradient utrzymywał się poniżej 10°C.

3. Etapy budowy

Mimo że docelową lokalizacją elektrowni wiatrowej są okolice Malmö, całość prac związanych z wykonaniem fundamentów z betonu wysokowartościowego odbywała się w Polsce w Świnoujściu. Elementy wykonywane były na barkach przycumowanych do nabrzeża basenu portowego. Harmonogram prac był tak zorganizowany, aby poszczególne etapy budowy zazębiały się z sobą. W związku z tym konieczne było wykonywanie elementów na czterech barkach jednocześnie. Na każdej barce wykonywane były cztery elementy. Jeden fundament pochłaniał około 100 ton stali zbrojeniowej i około 550 m³ betonu. Od samego początku procesu budowlanego każdy fundament był jednoznacznie oznaczony i miał już przypisane swoje miejsce posadowienia w morzu na obszarze elektrowni wiatrowej. Do każdego elementu był przyporządkowany dokument, który pozwalał na odtworzenie każdej nawet drobnej czynności wykonywanej na elemencie, wraz z identyfikacją zastosowanych materiałów (w tym betonu) z wynikami badań i innymi dokumentami jakości. Poszczególne etapy budowy fundamentów pokazano na zdjęciach (fot. 5 – 9).

Najdłuższym i najbardziej pracochłonnym etapem budowy było przygotowanie zbrojenia dla fundamentów. Prace odbywały się w specjalnie wyznaczonym obszarze, gdzie montowano poszczególne moduły z prętów zbrojeniowych. Moduły później montowano w elementach.

Na potrzeby budowy przygotowano specjalne systemy szalowania, uwzględniające oczekiwaną krzywiznę kielicha oraz parcie betonu na szalunek. Szalowanie było wykonywane z wielką starannością. Niedopuszczalne było pozostawienie szczelin, przez które w trakcie betonowania mógłby wyciekać zaczyn cementowy.



Fot. 5. Prace zbrojarskie



Fot. 6. Stopy fundamentów



Fot. 7. Przygotowanie szalowania kielichów

Betonowania kielichów były pod szczególnym nadzorem. Ze względu na zastosowanie systemu chłodzenia, cały harmonogram betonowania dopasowany był do jego wydajności. Wszystko było zależne od pogody. W wyższych temperaturach powietrza betonowanie odbywało się wolniej, tak aby system chłodzący mógł odpowiednio schłodzić ułożoną mieszankę betonową w elemencie, jeszcze przed rozpoczęciem twardnienia, kiedy dy-

namika procesu hydratacji jest jeszcze niska. Nad całością procesu czuwała wyznaczona osoba, monitorująca temperatury wewnątrz kielicha i sterująca systemem chłodzącym.



Fot. 8. Betonowanie kielicha



Fot. 9. Elementy gotowe do wypłynięcia

Natychmiast po betonowaniu rozpoczynano intensywną pielęgnację wodną, która w przypadku betonów wysokowartościowych jest bardzo ważna. Przystąpienie najwcześniej jak to możliwe do pielęgnacji wyeliminowało możliwość wystąpienia zjawiska

samoosuszenia się betonu. Zastosowanie cementu CEM III i dodatku mikrokrzemionki sprawiło, że czas pielęgnacji musiał zostać wydłużony do 7 dni. Nie stanowiło to jednak większego problemu i było przewidziane harmonogramem budowy.

Pierwsza barka z gotowymi czterema elementami wypłynęła z portu w Świnoujściu po 8 tygodniach od rozpoczęcia robót. Później, ze względu na zaawansowanie prac zbrojarskich, każda kolejna barka wypływała po 2-3 tygodniach od poprzedniej. Wypłynięcie barki uzależnione było od pogody i stanu morza. Posadowienie gotowego fundamentu pokazano na fot. 10 i 11.



Fot. 10. Posadowienie fundamentu w morzu



Fot. 11. Element w miejscu posadowienia

4. Podsumowanie

Niewątpliwie aplikacje betonów wysokowartościowych w Polsce nie są powszechną praktyką. Przykład budowy fundamentów elektrowni wiatrowych jest dużym doświadczeniem zarówno dla wykonawców, jak i dostawcy mieszanki betonowej. Sposób przygotowania się do realizacji tak odpowiedzialnego zadania, zarówno pod względem organizacyjnym, jak i technologicznym był sporym wyzwaniem dla wszystkich stron procesu. Wybór rozwiązania materiałowego, badania wstępne oraz specjalistyczne badania mieszanki betonowej i betonu, wykonane na etapie przygotowania się do budowy, jak i w trakcie realizacji, pokazują, że możliwa jest w Polsce realizacja zaawansowanych technicznie budów. Dostępność na rynku wysokozaawansowanych technicznie materiałów (cementy, dodatków i domieszek) powoduje, że w tym względzie nie ma ograniczeń, jeżeli chodzi o betony wysokowartościowe. Największe różnice pojawiają się podczas kontroli jakości i nadzorze. Konieczna jest zdecydowanie większa częstotliwość badań i kontroli zarówno materiałów do produkcji, jak i mieszanki betonowej i betonu stwardniałego. Kontrola parametrów świeżej mieszanki betonowej, które bezpośrednio wpływają na późniejszą trwałość elementu (zawartość powietrza, współczynnik w/c), jest szczególnie ważna. Dzięki zastosowaniu nowoczesnych metod i przyrządów badawczych, takich jak

Air Void Analyzer, czy system do symulowania i monitorowania cech młodego betonu w konstrukcji – zysujemy większą pewność co do prawidłowości wyboru rozwiązania materiałowego. Narzędzia te pozwalają nam kontrolować specyficzne parametry betonu, przyczyniając się do zwiększania trwałości budowanych konstrukcji.

Literatura

- [1] Instrukcje obsługi urządzenia Air Void Analyzer.
- [2] Instrukcje obsługi programów 4C-Heat, 4C-Temp&Stress.
- [3] Gajewski R., Szabat Ł.: System symulacji i monitorowania cech młodego betonu w konstrukcji, Budownictwo, Technologie, Architektura, Polski Cement, nr 2/2005.
- [4] Gajewski R., Szabat Ł.: System symulacji i monitorowania cech młodego betonu w konstrukcji – przykłady praktycznego zastosowania, Budownictwo, Technologie, Architektura, Polski Cement, nr 3/2005.
- [5] Neville A.M.: Właściwości betonu, Polski Cement, Kraków 2000.
- [6] Rusin Z.: Technologia betonów mrozoodpornych, Polski Cement; Kraków 2002.
- [7] Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton, Ausgabe 1991.
- [8] ASTM C457 - Standard Test Method for Microscopical Determination of parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete.