

dr inż. Mariusz Biały<sup>1)</sup>  
ORCID: 0000-0003-2627-8759

# Analiza osiadań podłoża budynku głównego bloku energetycznego o mocy 910 MW w Elektrowni Jaworzno III – Elektrownia II

## *Analysis of settlements of the main building subsoil 910 MW power unit in Power plant Jaworzno III – Power plant II*

DOI: 10.15199/33.2021.09.01

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki analizy osiadań podłoża budynku głównego bloku energetycznego o mocy 910 MW w Elektrowni Jaworzno III – Elektrownia II. Analiza bazowała na wynikach wierceń, sondowań dynamicznych, sondowań statycznych CPTU i testach DMT. Obliczenia osiadań przeprowadzono metodą analizy statycznej.

**Słowa kluczowe:** geotechnika; blok energetyczny; fundamentowanie; elektrownia; analiza osiadań podłoża.

**Abstract.** The paper presents the results of static analysis of subsoil settlements the main building of 910 MW power unit in Power plant Jaworzno III – Power plant II. The analysis based on results of drilling, dynamic penetration tests, static penetration CPTU and DMT tests. The calculation of settlements were performed using static method.

**Keywords:** geotechnics; power unit; foundation; power plant; analysis of settlements.

Ograniczenie osiadań fundamentów obiektów do 5 cm jest podstawowym warunkiem zdefiniowanym w Eurokodzie 7, ale w przypadku obiektów bloku energetycznego wymagania te są często zaostrzone ze względów technologicznych. Zredukowanie i wyrównanie osiadania fundamentów budynku głównego jest trudne z kilku względów. Pierwszy z nich, to bardzo duża powierzchnia oddziaływania płyt fundamentowych na podłoże. Drugi czynnik, powiązany ściśle z pierwszym, to duże prawdopodobieństwo występowania na tak dużym obszarze warstw gruntów o zróżnicowanej podatności. Trzeci to duże, a miejscami bardzo duże obciążenia fundamentów i zróżnicowanie intensywności tych obciążeń w obrębie jednej płyty. Kolejnym czynnikiem jest poziom posadowienia obniżony ze względu na stosowane technologie (gospodarka podziemna maszynowni) i grubość płyt potrzebna do osiągnięcia odpowiedniej sztywności fundamentów o wielkich rozmiarach i obciążeniach. Bardzo duży wpływ na sposób projektowania posadowienia ma znac-

na wysokość obiektów i wynikające z tego ograniczenia odchylenia od pionu konstrukcji stalowych hal i konstrukcji wosporczej kotła.

Wymienione uwarunkowania i problemy pojawiły się podczas analizy warunków posadowienia i przy projektowaniu fundamentów budynku głównego nowego bloku energetycznego o mocy 910 MW zbudowanego w Elektrowni Jaworzno III – Elektrownia II.

### Charakterystyka fundamentów budynku głównego

Analizowany budynek główny bloku energetycznego w Elektrowni Jaworzno III – Elektrownia II posadowiony jest na płytach fundamentowych o znacznych rozmiarach. Maszynownia z nawą urządzeń elektrycznych spoczywa na płycie o wymiarach 110 x 66 m. Grubość płyty nawy urządzeń elektrycznych wynosi 2,5 m, a maszynowni 2,5 – 3,0 m. Kotłownia spoczywa na płycie o wymiarach 78,4 x 73,4 m i grubości 4 m. Fundamenty maszynowni posadowione są na głębokości 9,0 – 10,5 m p.p.t., a kotłowni na poziomie 5,2 m p.p.t. Obiekty budynku głównego są wysokie: maszynownia z nawą urządzeń elektrycznych wznosi się na wysokość 43,1 m, a kotłownia 133,75 m. Obciążenia od

konstrukcji wosporczych i urządzeń zainstalowanych w budynku głównym wraz z ciężarem własnym płyt generują duże (ponad 200 kPa), a miejscami bardzo duże (przekraczające 700 kPa) naciski na podłoże (chodzi o wartości charakterystyczne tych nacisków).

Parametry obiektów i ich fundamentów, a także warunki gruntowe kwalifikowały je do III kategorii geotechnicznej. Z tego powodu, na etapie projektowania budynku wynikała konieczność wykonania wieloetapowych i szczegółowych badań podłoża.

### Badania i właściwości podłoża gruntowego

Badania podłoża budynku głównego były prowadzone w czterech etapach w latach 2009 – 2015. Pierwsze rozpoznanie w latach 2009 – 2010 wykonane przez Zakład Robót Geologiczno-Inżynierskich „Geotest” Ostrów Wielkopolski z bazą w Tychach bazowało na odwiertach o głębokości 15, 25 i 45 m i na sondowaniach dynamicznych. Podłoże podzielono na warstwy na podstawie wydzielen genetycznych i parametrów fizykomechanicznych oraz określono ich parametry na podstawie normy [1]. W podłożu wydzielono trzy grupy genetyczne. Pierwsza to na-

<sup>1)</sup> Politechnika Śląska; Wydział Budownictwa; mariusz.bialy@polsl.pl

sypy niebudowlane zalegające do głębokości 1 m, druga grupa zawierała grunty niespoiste i spoiste, piaski o różnym stopniu zagęszczenia i przewarstwiające je lub zalegające pod nimi warstwy glin, pyłów i ilów. Z tego powodu zastosowano podział na podgrupy a i b zależnie od stopnia zagęszczenia lub plastyczności i oszacowano ich moduły ściśliwości na podstawie normy [1]. Podgrupa a, gdzie przeważały grunty sypkie, zawierała: piaski średnie w stanie luźnym; piaski średnie z domieszką gliny i piaski średnie na pograniczu drobnych średniozagęszczone; piaski średnie z domieszką gliny w stanie zagęszczonym; piaski drobne w stanie luźnym; piaski drobne średniozagęszczone; piaski drobne; piaski drobne na pograniczu piasków pylastych zagęszczone.

Podgrupa b zawierała grunty spoiste: pyły piaszczyste na pograniczu piasków gliniastych; pyły; gliny pylaste na pograniczu glin zwięzłych; gliny zwięzłe na pograniczu ilu; gliny zwięzłe; gliny piaszczyste na pograniczu piasków gliniastych oraz gliny na pograniczu pyłów piaszczystych o konsystencji twaroplastycznej, a także ily pylaste i ily o konsystencji plastycznej. Trzecia grupa gruntów została podzielona na dwie podgrupy a i b zawierające:

a – grunty stanowiące wietrzelinę utworów starszego podłoża w stanie zagęszczonym w postaci okruchów piaskowca i zlepieńca;

b – grunty stanowiące utwory starszego podłoża – miękka skała piaskowca. Na tym etapie wskazano na występowanie w podłożu piasków o bardzo zróżnicowanym stopniu zagęszczenia i słabych gruntów spoistych o małych modułach ściśliwości.

W podłożu nawiercono tylko jeden poziom wody gruntowej w utworach czwartorzędowych. Poziom ten występował w przypowierzchniowych warstwach piasków i wahał się w granicach 2,4 – 3,3 m w części południowej do 4,0 – 5,0 m w części środkowo-zachodniej terenu planowanej zabudowy obiektów bloku.

Kolejne dwa etapy badania podłoża przeprowadziło w latach 2010 i 2014 Przedsiębiorstwo Geologiczne S.A. z siedzibą w Krakowie. Rozpoznanie bazowało na badaniach geofizycznych

CSWS, otworach wierconych do głębokości 15 – 35 m, sondowaniach statycznych i dynamicznych oraz na badaniu dylatometrycznym. Na podstawie wyników badań polowych i badań laboratoryjnych oznaczono parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe gruntów.

**W podłożu wydzielono cztery serie gruntów.** Serie podzielono na grupy gruntów, określając ich stopnie zagęszczenia lub plastyczności i odpowiadające im moduły ściśliwości edometrycznej.

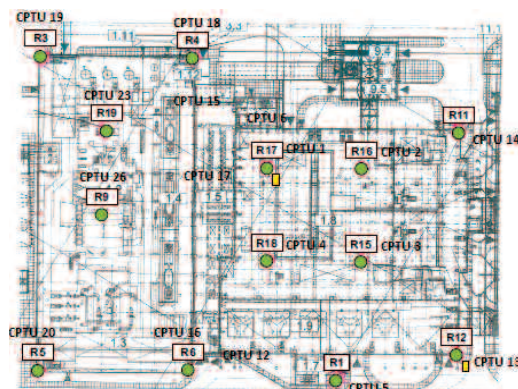
**Pierwsza seria** to nasypy antropogeniczne i gleba zalegające do głębokości 0,4 – 3,5 m. **W drugiej serii** występują grunty sypkie akumulacji rzeczno-łodowcowej, reprezentowane głównie przez piaski drobne, średnie i grube, rzadko piaski ze żwirem, lokalnie z przewarstwieniami utworów ilasto-pylastych. Utwory te występują pod gruntami grupy pierwszej i jako wkładki pomiędzy gruntami spoistymi. W warstwach przypowierzchniowych grunty sypkie zalegają w stanie średniozagęszczonym lub lokalnie luźnym. W tej serii wyróżniono trzy podgrupy gruntów występujących w stanie zagęszczonym, średniozagęszczonym i luźnym o modułach ściśliwości edometrycznej odpowiednio  $M = 130\ 000, 82\ 000$  i  $45\ 000$  kPa.

**W serii trzeciej** zalegają: ily i ily z pyłem w stanie zwartym o module ściśliwości  $M_0 = 7600$  kPa; il z pyłem; il z pyłem i piaskiem i il z piaskiem w stanie twaroplastycznym o module ściśliwości  $M_0 = 6560$  kPa; ily z pyłem; ily z pyłem i piaskiem, miejscami ily w stanie plastycznym stanowiące wkładki w gruntach niespoistych o miąższości 2 – 2,5 m, a miejscami 3 – 4 m o module ściśliwości  $M_0 = 3550$  kPa; pył z łem, piasek z łem i pył z łem w stanie twaroplastycznym, o średniej miąższości 4 m, ale miejscami występują już od głębokości 15 m lub znacznie poniżej 22 m. p.p.t. (w kilku otworach ich miąższość była duża i osiągnęła 6 – 10,6 m) o module ściśliwości  $M_0 = 9200$  kPa oraz piasek z łem, pył z łem i pył z łem i piaskiem w stanie plastycznym o module ściśliwości  $M_0 = 6070$  kPa.

**Czwarta seria** to utwory karbońskie reprezentowane przez piaskowce drobno- i średnioziarniste o spoiwie ilastym, w których pojawiają się przerosty węgla. Głębokość zalegania stropu pia-

skowców waha się pod całym terenem bloku od poziomu 9,5 do 28 m. Średnia wytrzymałość na ściskanie tych utworów wynosiła  $R_c = 1,5$  MPa. Na podstawie wykonanych wierceń i zamontowanych siedmiu piezometrów określono poziom wody gruntowej o swobodnym zwierciadle, zalegającej w piaskach utworów czwartorzędowych. W wynikach badań zwrócono uwagę na występowanie poziomu wód o charakterze subartezyjskim w porowatych piaskowcach karbonu drugiego.

**Czwarty etap badań** został wykonany przez Instytut Konsultacyjno-Badawczy GEOCONTROL z siedzibą w Krakowie i firmę HEBO-POZNAŃ. W podłożu budynku głównego IKB GEOCONTROL wykonał odwierty o głębokości 40 – 60,0 m. Ze wszystkich otworów pobrano próbki rdzeniowe skał. Wyznaczona wytrzymałość na ściskanie tych próbek  $R_c$  wynosiła 1,12 – 3,85 MPa. Następnie, w sąsiedztwie otworów firma HEBO przeprowadziła sondowanie statyczne CPTU i badania dylatometryczne. Punkty badawcze (wiercenia R i sondowania CPTU) zlokalizowano w narożach i na załamaniach obrysu fundamentów budynków, w miejscu oparcia czterech słupów stalowej konstrukcji wsporczej kotła, pod pylonami komunikacyjnymi i w osi turbozespołu (rysunek). Sondowanie statyczne CPTU, wykonane w tak ulokowanych punktach badawczych, dostarczyło niezbędnych danych do oszacowania osiadania wszystkich gruntów w całym obszarze od powierzchni gruntu aż do zwietrzelin. Wyprzedzające je



**Rozmieszczenie punktów wierceń i sondowania statycznego w obrębie budynku głównego**  
Rys. HEBO  
Location of points of boreholes and CPTU tests in area of the main building

wiercenia pozwoliły na: głębokie rozpoznanie podłoża, w którym wyróżniono górną warstwę piasków o średniej miąższości ok. 10 m i zalegających pod nimi (przewarstwionych piaskami i żwirami) znacznie bardziej odkształcalnych warstw gruntów spoistych o miąższości miejscami od kilku do kilkunastu metrów; dokładną ocenę głębokości zalegania stropów znacznie sztywniejszych utworów zwietrzelinowych oraz wiercenie w głąb zwietrzelin miejscami do głębokości 60 m p.p.t. Zwietrzeliny te występowały pod całym budynkiem głównym. Wiercenia pokazały, że poziom zagłębienia stropu zwietrzelin zmienia się znacznie w obrębie budynku głównego, co widać szczególnie dobrze w przypadku hali maszynowni. Krawędź płyty fundamentowej przebiegającej pod ścianą hali maszynowni, położoną między otworami R5 i R6, stoi praktycznie na zwietrzelinach, a krawędź płyty pod przeciwną ścianą położoną między otworami R3 i R4 spoczywa na obszarach uwarstwionego podłoża o miąższości (liczonej od powierzchni terenu do stropu zwietrzelin) odpowiednio 22,5 m i 28,0 m, w których występują na przemian grunty niespoiste i spoiste.

Kilka otworów poprowadzonych do głębokości 55 i 60 m wykonano, aby zbadać, czy na większej głębokości nie występują w zwietrzelinach przewarstwienia gruntów spoistych lub węgla, co miało znaczenie w przypadku rozpatrywanego wariantu posadowienia płyt fundamentowych na palach.

Parametry wytrzymałościowe warstw gruntów wyznaczone w sondowaniach statycznych wykonanych przez HEBO, w punktach oznaczonych symbolami CPTU-4 i CPTU-5, pokazano w tabelach 1 i 2.

### Oszacowanie osiadań podłoża

Oszacowanie osiadań przeprowadzono w przypadku wariantu bezpośredniego posadowienia budynku bez modyfikacji podłoża. W obliczeniach pominięto sztywność głębszych warstw zwietrzelin, które charakteryzowały się zdecydowanie mniejszą odkształcalnością niż grunty zalegające powyżej nich, a szczególnie silnie odkształcalne grunty spoiste. Uwzględnienie sztywności głębszych

**Tabela 1. Parametry geotechniczne warstw gruntów podłoża wyznaczone z charakterystyki sondowania w punkcie CPTU-4 wykonanego przez HEBO**

Table 1. Geotechnical parameters of soil layer determined from characteristics of static penetration test made in point CPTU-4 by HEBO

Przelot warstwy [m]		Rodzaj gruntu [-]	Do-mieszki [-]	Opór stożka $q_p$ [MPa]	Naprężenie pionowe $\sigma_{vo}$ [KPa]	Parametry					
od	do					stanu gruntu		wytrzymałości na ścinanie			odkształceniowe $M_o$ [MPa]
				$I_D$ [-]	$I_L$ [-]	$\Phi'$ [°]	$C'$ [kPa]	$S_u$ [kPa]			
0,0	2,6	nN	(Gb, Ps, Ceg.)	-	-	-	-	-	-		
2,6	4,8	Ps	-	15,4	67	0,83	-	37°0'	-	77,0	
4,8	6,6	Ps	-	19,0	107	0,86	-	38°20'	-	-	
6,6	7,6	I	//III	1,3	134	-	0,18	16°40'	17,0	66,0	
7,6	10,8	Gπ	//I	1,9	171	-	0,24	19°50'	14,0	107,0	
10,8	11,6	Ps	-	11,0	208	0,55	-	33°40'	-	54,0	
11,6	13,1	I	-	1,9	229	-	0,14	16°50'	21,0	92,0	
13,1	13,6	Ps	-	21,0	247	0,77	-	36°10'	-	114,0	
13,6	14,2	Ps	/Pd	13,3	258	0,59	-	34°0'	-	65,0	
14,2	15,1	Ps	-	21,9	273	0,77	-	36°10'	-	119,0	
15,1	16,5	Gπ	//I	3,2	296	-	0,20	19°50'	14,0	180,0	
16,5	18,8	Pg	//Ps,I	8,4	332	-	0,04	25°40'	12,0	618,0	
18,8	20,5	Ps	//I	18,3	372	0,64	-	34°40'	-	90,0	

**Tabela 2. Parametry geotechniczne warstw gruntów podłoża wyznaczone z charakterystyki sondowania w punkcie CPTU-16 wykonanego przez HEBO**

Table 2. Geotechnical parameters of soil layer determined from characteristics of static penetration test made in point CPTU-16 by HEBO

Przelot warstwy [m]		Rodzaj gruntu [-]	Do-mieszki [-]	Opór stożka $q_p$ [MPa]	Naprężenie pionowe $\sigma_{vo}$ [KPa]	Parametry					
od	do					stanu gruntu		wytrzymałości na ścinanie			odkształceniowe $M_o$ [MPa]
				$I_D$ [-]	$I_L$ [-]	$\Phi'$ [°]	$C'$ [kPa]	$S_u$ [kPa]			
0,0	0,3	nN	(Gb, Ps, Ceg.)	-	-	-	-	-	-		
0,3	0,5	Pd	-	1,9	7	0,18	-	29°0'	-	9,5	
0,5	2,5	Ps	-	9,0	26	0,65	-	34°50'	-	36,0	
2,5	5,0	Ps	-	12,2	69	0,73	-	35°50'	-	44,0	
5,0	6,3	Ps	-	7,0	104	0,45	-	32°20'	-	28,0	
6,3	7,5	I	-	1,4	126	-	0,32	17°20'	17,0	76,0	
7,5	8,8	Ps	//Pd	18,2	150	0,77	-	36°10'	-	91,0	
8,8	9,2	piaskowiec	-	39,4	-	-	-	-	-	217,0	

warstw zwietrzelin nie miałyby decydującego wpływu na wyliczone osiadania, najwyżej nieznacznie by je zwiększyły.

Podstawowym parametrem oszacowania osiadania były edometryczne moduły ściśliwości pierwotnej, wyznaczone na podstawie sondowań statycznych CPTU wykonanych przez firmę HEBO. Przy doborze metody oszacowania osiadań istotną była spójność zaleceń rozporządzenia [2] z procedurą oznaczania wartości edometrycznego modułu ściśliwości metodą CPTU oraz z usankcjonowanym we współczesnej światowej geotechnice podejściem do analizy naprężeń i przemieszczeń masywu gruntowego współdziałającego z budowlą, znanym jako eksperymentalna inżynieria gruntowa (w skrócie ESE). Istotą tego podejścia

jest możliwie prosty, realistyczny model obliczeniowy tego masywu, z możliwie dokładnie oszacowanymi parametrami mechanicznymi gruntów i miąższościami warstw w zidentyfikowanych profilach. Dobrą jakość oszacowania osiadań gwarantowały skalibrowane testami dylatometrycznymi sondowania CPTU wykonane przez HEBO Poznań.

Biorąc pod uwagę proporcję bardzo dużej powierzchni obciążenia podłoża do miąższości warstw odkształcalnych, przyjęto, że w podłożu występuje jednoosiowy stan odkształcenia (stan edometryczny). Jednocześnie, ze względu na proporcje obszaru obciążenia do głębokości podłoża założono, że wielkość naprężeń w podłożu jest stała i nie zmienia się wraz z głębokością.

Osiadania oszacowano przy użyciu wzoru:

$$s_k = q\eta \sum h_i/M_{0i} \quad (1)$$

gdzie:

- k – numer profilu geotechnicznego;
- i – numer warstwy gruntu w profilu;
- $h_i$  – miąższość warstwy i;
- $M_{0i}$  – moduł pierwotnej ścisłości edometrycznej warstwy;
- $\eta$  – funkcja zaniku pionowej składowej normalnej naprężenia na głębokości.

Osiadania obliczone w wybranych punktach badawczych podłoża budynku głównego oznaczonych na rysunku podano w tabeli 3.

**Tabela 3. Oszacowane osiadania  $s_k$  podłoża budynku głównego**

*Table 1. Estimated settlements  $s_k$  of subsoil of main building*

Nr otworu	Nr sondowania	Obiekt	Nacisk fundamentu na podłoże [kPa]	Osiadanie [cm]
R3	CPTU 19	maszynownia	206	11,8
R4	CPTU 18	maszynownia	260	10,9
R5	CPTU 20	maszynownia	260	1,0
R6	CPTU 16	maszynownia	320	1,2
R19	CPTU 23	maszynownia	260	16,5
R9	CPTU 26	maszynownia	313	12,9
R6	CPTU 12	nawa urządzeń elektr.	273	2,9
R17	CPTU 17	nawa urządzeń elektr.	278	21,1
R4	CPTU 15	nawa urządzeń elektr.	280	13,5
R17	CPTU 1	kotłownia	587	52,4
R16	CPTU 2	kotłownia	399	49,5
R15	CPTU 3	kotłownia	350	29,1
R18	CPTU 4	kotłownia	471	28,9
R17	CPTU 6	kotłownia	718	42,9
R11	CPTU 14	kotłownia	373	35,5
R6	CPTU 12	kotłownia	627	16,1
R1	CPTU 5	pylon komunikacyjny	469	32,3
R12	CPTU 13	kotłownia	379	38,0

Ze względu na duże koszty wykonywania odwiertów pod budynkiem głównym ograniczono ich liczbę do trzynastu, a parametry gruntów wyznaczono w sondowaniach statycznych, których wykonano więcej w sąsiedztwie odwiertów. Z tego powodu w tabeli 3 temu samemu numerowi otworu R17 przyporządkowano trzy numery sondowań statycznych CPTU – dwa dla maszynowni i jedno dla nawy urządzeń elektrycznych, gdyż wiercenie w punkcie 17 wy-

konano w osi słupa konstrukcji wsporczej kotła zlokalizowanego jednocześnie blisko krawędzi płyty fundamentowej maszynowni i płyty nawy. Wykonywanie trzech głębokich odwiertów tak blisko siebie nie miało w tym przypadku uzasadnienia.

### Wnioski

Analiza statyczna osiadania obiektów budynku głównego metodą ESE wymagała przeprowadzenia szczegółowych badań podłoża. Wieloetapowe badania pozwoliły dokładnie zdefiniować geometrię zalegających warstw i wyznaczyć niezbędne w obliczeniach parametry odkształceniowe gruntów. Sztywność podłoża w obrębie projektowanego fundamentowania budynku była bardzo zróżnicowana zarówno w planie, jak i z głębokością, co pokazały wyniki sondowań statycznych CPTU. Miejscami pod obiektami zalegały warstwy silnie odkształcalnych gruntów spoistych (głównie iłów i glin przewartwionych iłami w stanie twaroplastycznym i plastycznym) o małym module ścisłości. Jednocześnie pod tymi samymi obiektami można znaleźć miejsca, gdzie miąższość tych utworów była minimalna lub w ogóle nie występowały, co było powodem widocznych dużych różnic osiadania w wyniku obliczeń. Nierównomierność podatności podłoża jest skojarzona ze zróżnicowanym rozkładem obciążenia fundamentów, co dodatkowo wpływa na nierównomierny rozkład naprężeń i przemieszczeń w gruntach.

Widoczne w tabeli 3 osiadania, obliczone w przyjętych punktach badawczych (rysunek), wielokrotnie przekroczyły dopuszczalne wielkości określone w Eurokodzie 7. Zdecydowało to o przyjęciu posadowienia płyt fundamentowych obiektów budynku głównego na palach i ścianach szczelinowych.

### Literatura

- [1] PN-81/B-03020. 1981. „Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie”.
- [2] Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z 27 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych, Dz. Ustaw poz. 463.

Przyjęto do druku: 19.07.2021 r.



## ARBOCEL P – The Power of Innovation

- nieograniczone możliwości regulacji konsystencji,
- łatwe i szybkie mieszanie,
- zagęszczanie i stabilizacja tynków i farb przy jednoczesnej poprawie aplikacji



Rettenmaier Polska

Sp. z o.o.

Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7B

02-366 Warszawa

mobile +48 600 423 423

Tel + 48 22 608 51 00

e-mail: arbocel@jrs.pl