

## **WZMOCNIENIE PODŁOŻA GRUNTOWEGO POD FUNDAMENTEM TURBOZESPOŁU BLOKÓW 5 I 6 W PGE ELEKTROWNIA OPOLE S.A.**

Piotr Kanty<sup>1</sup>, Krzysztof Podleś<sup>2</sup>, Andrzej Truty<sup>2</sup>, Tomasz Warchał<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Menard Polska Sp. z o.o., Warszawa

<sup>2</sup>Politechnika Krakowska, Kraków

**Streszczenie.** W artykule opisano proces powstawania projektu oraz realizacji prac na jednej z ważniejszych inwestycji realizowanych w ostatnim czasie, tj. rozbudowie Elektrowni Opole. Przedmiotem projektu było wzmocnienie podłoża pod fundamentem płytowym turbozespołu nowych bloków nr 5 i 6, zrealizowane za pomocą kolumn betonowych. Istotnym elementem przygotowania prac było wykonanie projektu wzmocnienia. Zdecydowano o wykonaniu przestrzennego modelu podłoża wraz z elementami wzmocnienia. W obliczeniach zastosowano nieliniowe modele materiałowe, takie jak Hardening Soil dla gruntów oraz Hoeka-Browna dla utworów skalistych. Parametry geotechniczne oraz rozwiązanie projektowe (prognoza osiadań płyt fundamentowych) kalibrowano na etapie wykonywania próbnych obciążeń kolumn testowych. W trakcie realizacji wykonano 1020 zbrojonych kolumn CFA oraz 2057 kolumn CMC.

**Słowa kluczowe:** wzmocnienie podłoża, kolumny CMC, kolumny CFA, Hardening-Soil, Elektrownia Opole, fundament turbozespołu

### **WSTĘP**

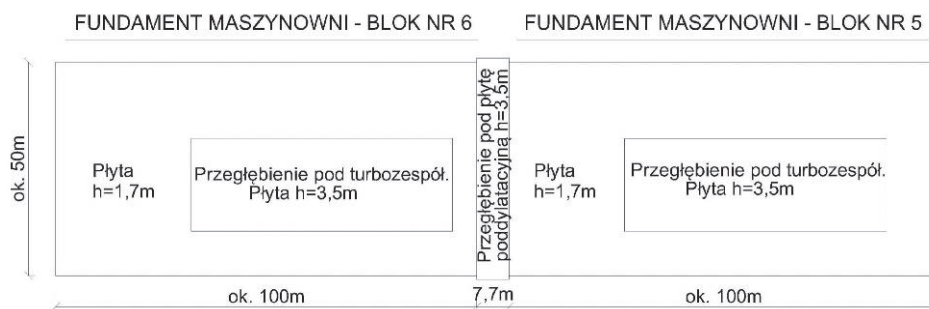
Budowa obiektów specjalistycznych, do których z pewnością można zaliczyć elektrownie, zawsze budzi zainteresowanie społeczeństwa. Od 2014 roku uwagę wielu skupia budowa dwóch bloków energetycznych w Elektrowni Opole. Są to bloki nr 5 i 6, każdy o mocy 900 MW. Jest to największa inwestycja w sektorze przemysłowym od 1989 roku. Zasadniczymi elementami wchodzącymi w jej skład są: maszynownie, kotłownie z pylonami komunikacyjnymi, chłodnie kominowe, obiekty odsiarczania oraz zbiorniki popiołu. W niniejszym artykule skupiono się na opisie wzmocnienia podłoża gruntowego pod budynki maszynowni.

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Piotr Kanty, Menard Polska Sp. z o.o., ul. Kochanowskiego 49a, 01-864 Warszawa, e-mail: pkanty@menard.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2016

Budynki maszynowni bloków nr 5 i 6 zlokalizowano obok siebie, ich fundamenty mają wymiary około  $50 \times 100$  m. Między nimi zaprojektowano przegłębienie pod płytę poddylatacyjną szerokości 7,5 m (rys. 1). Płyta fundamentowa w większości obszaru ma grubość 1,7 m, a w części środkowej (w rejonie dylatacji) oraz pod turbozespołami – 3,5 m. Poziom posadowienia płyty wynosi  $-9,1$  m, natomiast w przegłębieniach zmienia się do  $-10,9$  m. Ze względu na upad terenu naprężenia pierwotne wynosiły od 50 do 220 kPa. Maksymalne naprężenia od obciążenia obliczeniowego pod płytą fundamentową wynosiły od 500 do 670 kPa [Bogusz i Jaśkiewicz 2014].



Rys. 1. Gabaryty fundamentów maszynowni bloków nr 5 i 6

Fig. 1. Overall dimensions of the turbin hall units No. 5 and 6

## WARUNKI GRUNTOWE

Ze względu na rangę inwestycji oraz historię budowy w latach 2010–2014 wykonano liczną dokumentację określającą warunki gruntowe oraz warunki posadowienia budowlanych obiektów. Do najważniejszych należy zaliczyć dokumentację geologiczno-inżynierską [Łukasik i in. 2013] oraz projekt geotechniczny [Bogusz i Jaśkiewicz 2014].

Projektowany poziom posadowienia maszynowni przebiega w warstwie trzeciorzędowych utworów ilastych o dużej miąższości (6–17 m). W rejonie projektowanego budynku maszynowni bloku nr 5 znajduje się obniżenie terenu, tam ily osiągają największą miąższość. W części południowo-zachodniej występują nawodnione utwory piaszczyste drobnoziarniste w postaci poziomych soczewek. Zwierciadło wód gruntowych w obrębie tych utworów ma charakter napięty i stabilizuje się na wysokości spodu płyty fundamentowej ( $-9,1$  m). Poniżej gruntów ilastych zalegają utwory kredowe o nieregularnym stropie: seria ilów marglistych o zmiennej miąższości, skały miękkie węglanowe (margle i margle ilaste). Z punktu widzenia projektowego bardzo istotny jest upad tych warstw (szczegóły na ten temat podano w dalszej części tekstu). Głębiej zalegają nawodnione średnie i drobne piaski glaukonitowe występujące na większości projektowanego terenu. Zwierciadło wody poziomego kredowego ma charakter napięty i stabilizuje się na poziomie  $-9,1$  m. Aby zminimalizować ryzyko zalania wykopów, postanowiono, że jednym z warunków bezpiecznego zaprojektowania wzmocnienia podłoża będzie kotwienie z elementami nośnymi, minimum 1,5 m powyżej stropu tych piasków.

Opisane grunty zostały dobrze scharakteryzowane w trakcie wielu badań, na przykład w ramach dokumentacji geologiczno-inżynierskiej [Łukasik i in. 2013] wykonano 152 wiercenia, 21 sondowań CPTU, 5 badań DMT oraz badania geofizyczne (geoelektryczne, sejsmikę refrakcyjną, CSWS) i badania laboratoryjne (m.in. 24 badania edometryczne i 18 testów trójosiowych). Tak dobre (liczne oraz różnorodne) rozpoznanie podłoża pozwoliło na etapie projektowania zastosować zaawansowane modele materiałowe do opisu zachowania się gruntu oraz zbudować trójwymiarowy model podłoża.

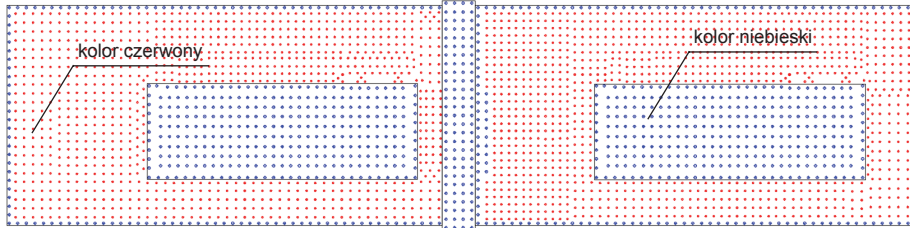
## KONCEPCJA WZMOCNIENIA PODŁOŻA

W trakcie przygotowania dokumentacji wykonano niezależne obliczenia sprawdzenia możliwości posadowienia płyty maszynowni. Jedną z takich analiz przedstawił prof. Gryczmański [Gryczmański 2011]. Była to opcja z posadowieniem części słupów na stopach o dużych rozmiarach. Ze względu na występowanie zbyt dużych sił odrywających określił on, że płyt nie można posadzić bezpośrednio i zasugerował wzmocnienie podłoża palami CFA o średnicy 1 m i długości 5–15 m. Kolejne obliczenia posadowienia bezpośredniego wykonano w ramach projektu geotechnicznego [Bogusz i Jaśkiewicz 2014]. W obliczeniach tych określono osiadania fundamentu płytowego na poziomie 0,10–0,15 m. Takie osiadania oraz różnica osiadań okazały się zbyt duże dla bezpiecznej pracy konstrukcji maszynowni.

Koncepcja posadowienia maszynowni zaproponowana przez Menard Polska polegała na wykonaniu wzmocnienia w postaci kolumn przemieszczeniowych CMC o średnicy 0,4 m oraz kolumn CFA o średnicy 0,6 m. Informacje dotyczące projektowania wzmocnienia za pomocą takich kolumn są zawarte m.in. w wytycznych francuskich ASIRI [2008], artykule Trutego [2012] oraz Świniańskiego i Marchwickiego [2014]. W pełni przemieszczeniowa technologia CMC wymusza stosowanie kolumn o relatywnie małych średnicach (do 0,4 m). W tej technologii nie można wykonać kolumn w bardzo sztywnych gruntach piaszczystych czy spoiстых. W takich przypadkach wykonuje się krótsze kolumny, których nośność jest z reguły wystarczająca. Formowanie kolumn świdrem ciągłym (CFA) pozwala na wiercenie do dowolnej głębokości oraz przy większych średnicach. Ze względu na większe średnice na takie kolumny można przekazać większe obciążenia niż na kolumny CMC oraz łatwiej wprowadzić w nie zbrojenie. Właśnie ze względu na zróżnicowanie obciążeń postanowiono zastosować obie technologie do wzmocnienia podłoża pod płytą maszynowni. Największe obciążenia występowały w przegłębieniach pod turbozespoły, gdzie zaprojektowano kolumny CFA  $\varnothing 0,6$  m. Takie same kolumny zaprojektowano pod płytą poddylatacyjną oraz na krawędziach płyt (rys. 2, kolor niebieski). W pozostałych obszarach (rys. 2, kolor czerwony) zaprojektowano kolumny CMC  $\varnothing 0,4$  m. Po wykonaniu pierwszej wersji projektu wzmocnienia podłoża, wedle koncepcji opisanej powyżej, przystąpiono do realizacji kolumn próbnych. Aby uzmysłowić czytelnikowi skalę problemu projektowego, na rysunku 2, obok rozmieszczonych kolumn pod płytami, pokazano jedną kolumnę próbną, na której bazie kalibrowano cały model podłoża.

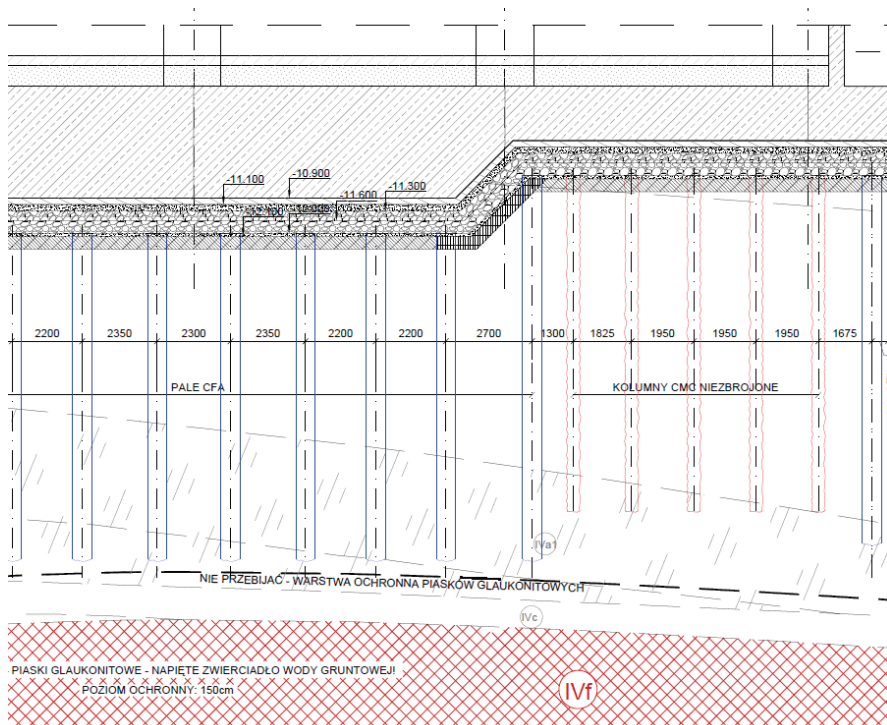
Widok jednej z kolumn próbnych □

Rozmieszczenie kolumn pod płytami obu maszynowni



Rys. 2. Rozmieszczenie kolumn po płytach fundamentowych oraz widok kolumny próbnej  
Fig. 2. Columns grid under the slab foundations and the view on one separate trial column

Istotnym elementem wzmocnienia podłoża kolumnami betonowymi jest wykonanie warstwy transmisyjnej. W omawianym przypadku warstwa transmisyjna pełniła również funkcję drenażu płytowego. Jej częścią była platforma robocza. Cały układ przedstawiał się następująco (rys. 3):



Rys. 3. Przekrój (w rejonie przegłębienia) przez fragment zaprojektowanego układu: płyta, warstwa transmisyjna, kolumny  
Fig. 3. Cross section (in the vicinity of bold) throw part of the design layout: slab, load transfer platform, columns

- platforma robocza z gruntu stabilizowanego  $R_m = 1,5$  MPa, miąższości 0,35–0,4 m,
- tłućień kamienny 0–31,5, miąższości 0,1 m (warstwa wykonana przed wierceniem kolumn),
- tłućień kamienny 4–31,5,  $I_0 < 3,0$ ,  $E_2 > 60$  MPa, miąższości 0,4 m,
- tłućień kamienny 4–31,5,  $I_0 < 2,5$ ,  $E_2 > 100$  MPa, miąższości 0,3 m,
- tłućień kamienny 0–31,5,  $I_0 < 2,2$ ,  $E_2 > 100$  MPa, miąższości 0,2 m,
- warstwa betonu podkładowego C25/30, miąższości 0,2 m,

gdzie:  $R_m$  – marka wytrzymałości gruntu stabilizowanego,

$I_0$  – wskaźnik odkształcenia,

$E_2$  – wtórny moduł odkształcenia.

Powyżej warstwy transmisyjnej wykonano płytę żelbetową o zmiennej grubości (1,7–3,5 m).

## MODEL OBLICZENIOWY

Trójwymiarowy model analizowanego układu konstrukcyjnego wykonany został w programie MES ZSOIL.PC.v2014. Składa się on z następujących elementów:

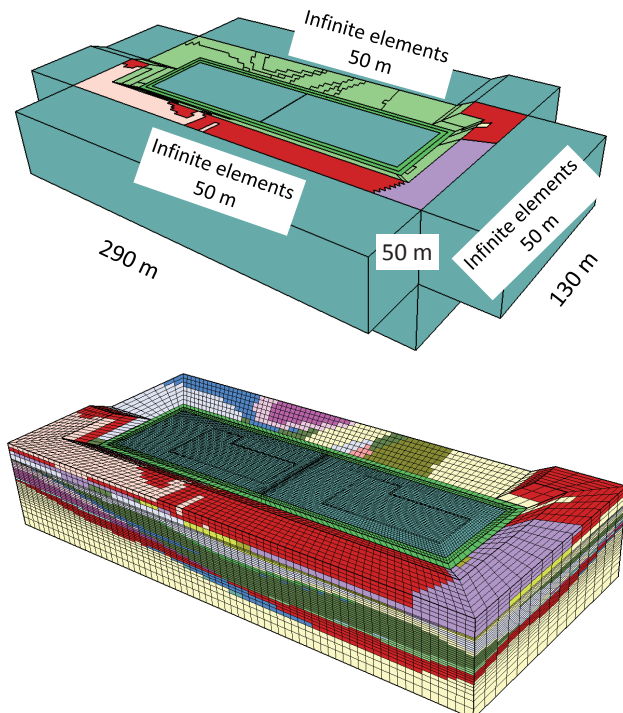
- podłoża o niejednorodnym rozkładzie stref materiałowych, które modelowano jako nieliniowe sprężysto-plastyczne kontinuum materialne (wykorzystano model Hardening Soil-small),
- elementów nieskończonych na ścianach zewnętrznych, umożliwiających redukcję liczby węzłów,
- płyty fundamentowej jako powłoki o zróżnicowanej grubości, od 1,7 do 3,5 m,
- kolumn współpracujących z płytą fundamentową, z uwzględnieniem interfejsu kontaktowego na pobocznicy oraz pod podstawą.

Kalibrację parametrów modelu HSs dla wydzielonych warstw geotechnicznych wykonano na bazie wyników badań polowych CPT, DMT, SPT oraz sejsmiki powierzchniowej, a także wyników badań laboratoryjnych trójosiowego ściskania oraz badania edometrycznego. W przypadku skał zalegających w głębszych warstwach podłoża zastosowano model Hoeka-Browna kalibrowany (częściowo) na podstawie wyników jednoosiowego ściskania. Z uwagi na obszerność materiału dotyczącego tej części analizy oraz mnogość wydzielonych warstw geotechnicznych szczegółowe wartości parametrów nie są prezentowane w tym artykule.

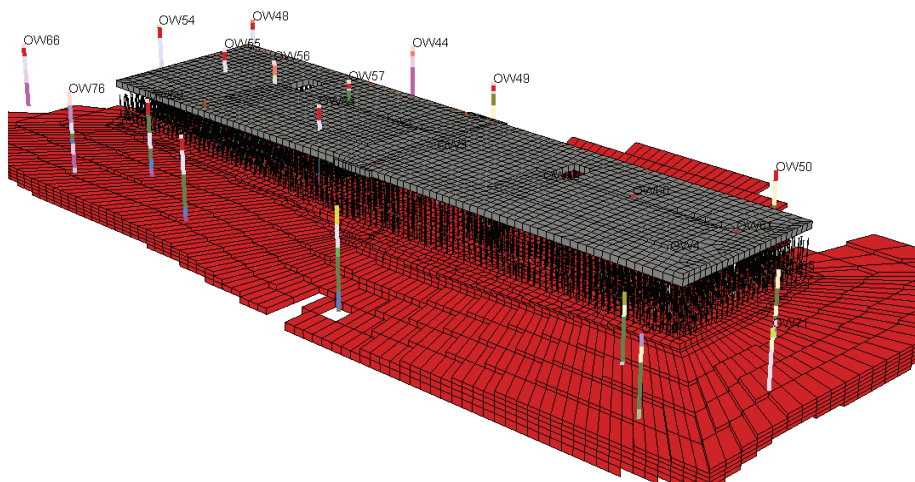
Widok zdyskretyzowanego modelu, wraz z zaznaczonymi strefami materiałowymi, przedstawiono na rysunku 4, natomiast na rysunku 5 zaprezentowano posadowienie płyty na kolumnach opartych na stropie warstwy gruntów nośnych.

Analizę numeryczną wykonano w następujących etapach:

- wyznaczenie stanu naprężeń początkowych w podłożu,
- wykonanie wykopu do poziomu dna płyty fundamentowej,
- wykonanie warstwy transmisyjnej,
- wykonanie pali i kolumn,
- wykonanie płyty fundamentowej,
- przyłożenie obciążeń według założonego harmonogramu (obciążenia te wyznaczone zostały przez projektantów w programie Robot).



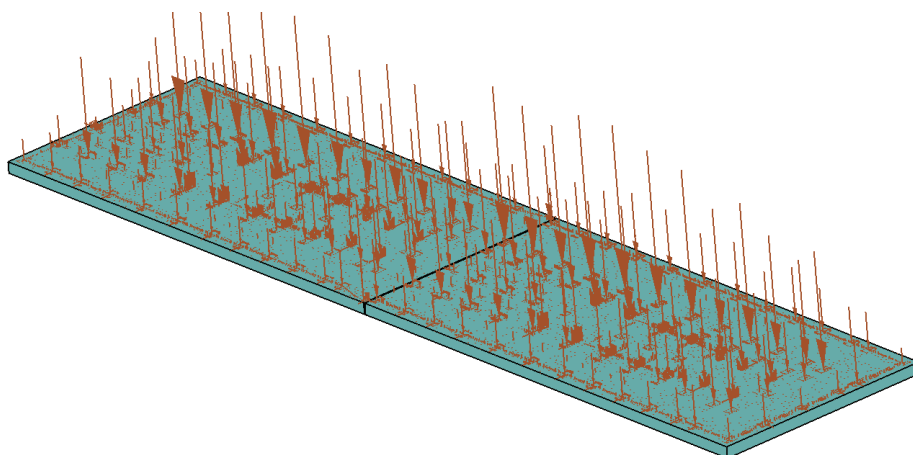
Rys. 4. Widok modelu 3D  
Fig. 4. The 3D model view



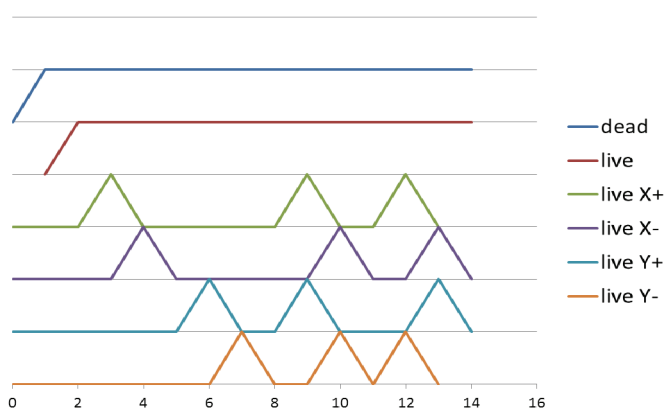
Rys. 5. Widok na płytę wzmocnioną kolumnami wraz z warstwą nośną gruntu  
Fig. 5. The view on 3D model of foundation plate reinforced with columns together with bearing layer



Obciążenia działające na płytę fundamentową (rys. 6) podzielono na następujące grupy: stałe, zmienne, zmienne działające w kierunku X+, zmienne działające w kierunku X-, zmienne działające w kierunku Y+ oraz zmienne działające w kierunku Y-. Aby uzyskać wszystkie istotne kombinacje występowania obciążeń, dla każdej z grup przypisano funkcję obciążenia, która aktywuje i deaktywuje daną grupę obciążeń w czasie. Zestawienie funkcji obciążeń przedstawiono na rysunku 7. Z uwagi na fakt, że zasada superpozycji dla materiałów nieliniowych nie ma zastosowania, pokazane na rysunku 7 funkcje obciążenia (wartość maksymalnego mnożnika obciążenia wynosi 1,0), odzwierciedlają przyjęty scenariusz sekwencji przykładania obciążeń.



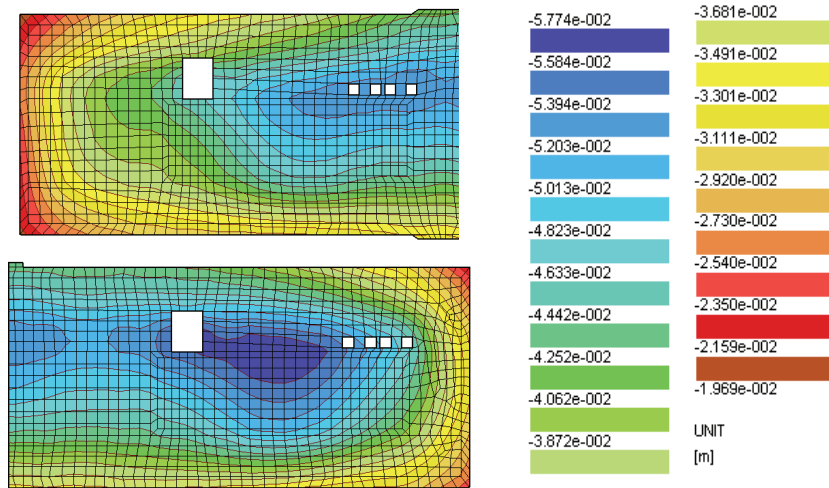
Rys. 6. Obciążenia na płycie fundamentowej  
Fig. 6. Loads on foundation plate



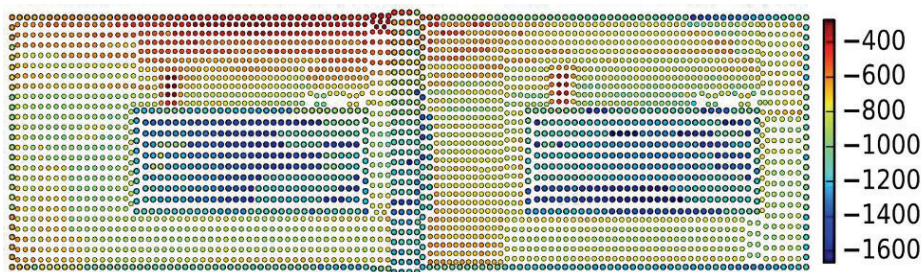
Rys. 7. Funkcje obciążenia  
Fig. 7. Load functions

Ostatecznie zaprojektowano kolumny CFA o średnicy 0,6 m, w rozstawie od  $2,0 \times 2,0$  do  $2,1 \times 2,35$  m i długości do 11,5 m. Kolumny te zazbrojono kosztami z ośmioma prętami  $\varnothing 16$  ze stali BS500S. Kolumny CMC zaprojektowano o średnicy 0,4 m, w rozstawie od  $1,6 \times 1,6$  m do  $2,15 \times 2,15$  m. Różniły się one długościami projektowymi (rys. 10). Różnice w długości kolumn wynikały z głębokości zalegania utworów kredowych oraz głębokości zalegania sztywniejszych warstw ilów, tam gdzie nie rozpoznano margli. Maksymalne długości kolumn CMC i CFA dobrano tak, by ich podstawa kończyła się minimum 1,5 m powyżej stropu piasków glaukonitowych, aby uniknąć ryzyka zalania wykopu przez wodę naporową uwięzioną w tych piaskach. Wszystkie kolumny zaprojektowano i wykonano z betonu C30/37.

Obliczone osiadania płyt pokazano na rysunku 8, natomiast siły w kolumnach – na rysunku 9. Rysunek 10 przedstawia długość projektowanych kolumn pod płytami obu maszynowni.

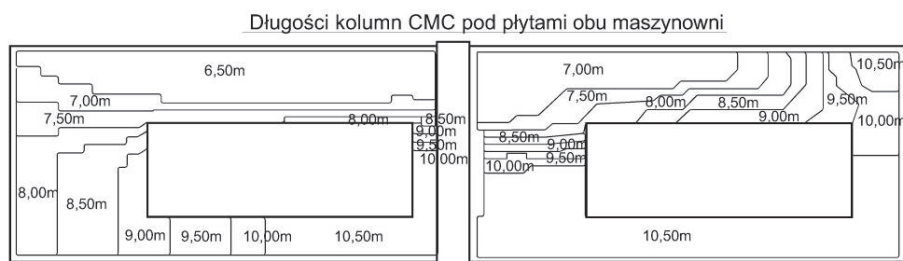


Rys. 8. Osiedlenia układu  
Fig. 8. Settlements of the layout



Rys. 9. Maksymalne charakterystyczne siły osiowe w kolumnach [kN]  
Fig. 9. Maximal characteristic axial forces in columns [kN]





Rys. 10. Gabaryty fundamentów maszynowni bloków nr 5 i 6

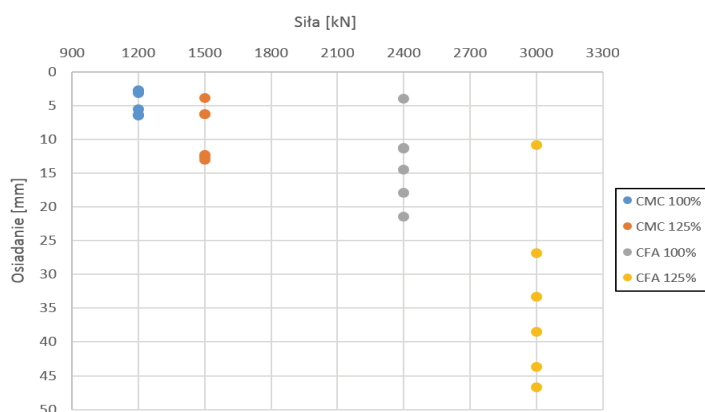
Fig. 10. Overall dimensions of the turbin hall units No. 5 and 6

W większości przypadków projektant na etapie wykonywania obliczeń nie ma możliwości wykonania i obciążenia kolumn próbnych. Tutaj ze względu na rangę zadania zdecydowano się na taką procedurę.

### KOLUMNY PRÓBNE

Wykonano 12 poletek próbnych rozmieszczonych równomiernie pod płytami maszynowni i płytą poddylatacyjną. Na każdym z poletek wykonano 9 kolumn (siatka  $3 \times 3$  szt.). Następnie, po 14 dniach od ich uformowania, kolumny środkowe obciążono do zadanej siły, kolumny sąsiednie wykorzystano jako kolumny kotwiące. Obciążenie wykonano metodą belki odwróconej. Obciążano sześć kolumn CMC oraz sześć kolumn CFA. Dla kolumn CMC ustalono maksymalne obciążenie obliczeniowe wynoszące 1200 kN, badanie prowadzono do 125% tej wartości, tj. 1500 kN. Dla kolumn CFA wartości te wynosiły 2400 i 3000 kN.

Na rysunku 11 pokazano osiadanie kolumn testowych przy 100 i 125% siły obciążającej. Wartości osiadań były zbliżone do oczekiwanych. Potwierdziło to zasadność doboru technologii CMC i CFA do wzmocnienia podłoża.



Rys. 11. Osiadania maksymalne kolumn próbnych

Fig. 11. Settlements of trial columns

Testy obciążeniowe miały na celu weryfikację przyjętych parametrów modeli obliczeniowych. Kalibracja parametrów modeli gruntowych, stref kontaktowych oraz geometrii modelu na bazie wyników obciążeń pozwoliła zweryfikować długość i rozstaw kolumn CMC i CFA. Ostatecznie wprowadzono nieznaczne zmiany w długościach wykonywanych kolumn, nie zmieniano ich rozstawu.

## REALIZACJA WZMOCNIENIA

Wzmocnienie podłoża zrealizowano na przełomie września i listopada 2014 roku. Łącznie wykonano 1020 kolumn CFA oraz 2057 kolumn CMC. Rysunek 12 przedstawia zdjęcie z tej realizacji. Jedna z maszyn wykonuje kolumny CMC (po lewej), druga wierci kolumny CFA pod turbozespół (po prawej).

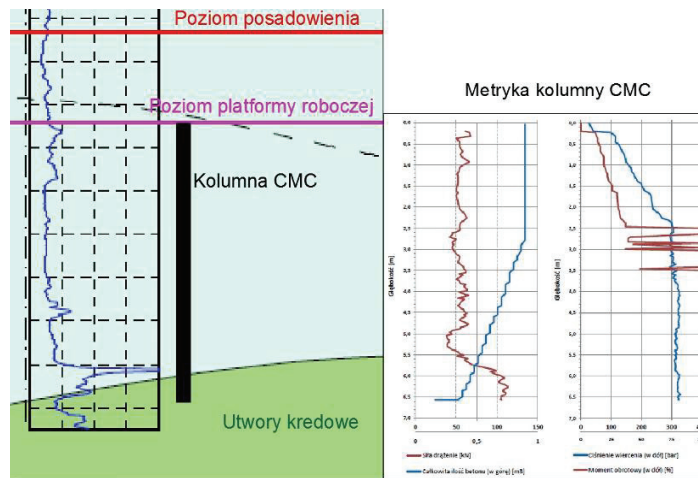


Rys. 12. Realizacja wzmocnienia podłoża fundamentów maszynowni bloków nr 5 i 6

Fig. 12. Strengthening works under the turbin hall units No. 5 and 6

W trakcie realizacji wzmocnienia projektanci na bieżąco kontrolowali zapisy z urządzeń rejestrujących parametry pracy maszyn. Projekt dopuszczał skrócenie kolumn CMC, pod warunkiem osiągnięcia wyspecyfikowanych minimalnych parametrów wiercenia w postaci ciśnienia KDK. Ogólnie można stwierdzić, że zaprojektowane długości kolumn zostały zrealizowane, jedynie sporadycznie warunki gruntowe wymuszały ich skrócenie. Może to świadczyć o dobrym rozpoznaniu podłoża oraz szczegółowym wykonaniu projektu.

Poniżej przedstawiono jedną z analiz, jakich wykonano wiele w trakcie realizacji wzmocnienia kolumnami. Po lewej stronie rysunku 13 widać warunki gruntowe oraz wyniki sondowania CPT. Na głębokości około 6 m pod poziomem platformy roboczej rozpoznano utwory kredowe w postaci margli. Margle wykazywały większe opory stożka niż ły zalegające powyżej. Analizując metrykę kolumny CMC (prawa część rysunku 13), na głębokości około 6 m widać wzrost siły drażenia – z około 60 kN do około 110 kN. Ciśnienie hydrauliczne KDK oraz moment obrotowy głowicy wiercącej osiągają wartości maksymalne już na głębokości około 3,5 m, co świadczy o dużej sztywności gruntów ilastych.



Rys. 13. Rozpoznanie gruntowe zestawione z parametrami wiercenia kolumny

Fig. 13. Geotechnical investigation compared with drilling parameters of the column

Bieżąca rejestracja i analiza parametrów wiercenia dała gwarancję poprawności wykonanych prac.

## WNIOSKI

Projektowanie i wykonawstwo wzmocnienia podłoża pod fundamentami turbozespołów bloków nr 5 i 6 Elektrowni Opole było relatywnie trudnym i wymagającym zadaniem inżynierskim. Z opisanej realizacji wyciągnięto następujące wnioski:

1. Tylko modelowanie 3D może dać pełen obraz deformacji oraz rozkładu sił (w kolumnach i płycie) w skomplikowanych warunkach gruntowych.
2. Zastosowanie modeli materiałowych typu HSs oraz Hoek-Brown, skalibrowanych na różnego typu badaniach polowych i laboratoryjnych, daje możliwość uzyskania realnych osiadań i sił w układzie płyta – kolumny – grunt.
3. Uzyskane podczas próbnych obciążeń charakterystyki osiadania potwierdzają, że kolumny CMC o średnicach 400 mm są w stanie przenosić duże obciążenia przy relatywnie małych osiadaniach.
4. Zastosowanie kolumn CMC w relatywnie gęstym rozstawie pozwoliło na szybką realizację wzmocnienia podłoża.
5. Na poziomie góry geomateraca uzyskano jednorodne parametry sztywnościowe układu, co dało (przy powierzchniowym charakterze obciążeń) zmniejszenie momentów w przęsłach płyty (zaprojektowane wzmocnienie ograniczyło momenty zginające w płycie), w przeciwieństwie do typowych rozwiązań płytowo-palowych, gdzie pale są w dużych rozstawach i momenty w płycie mogą być znaczące.

## PIŚMIENNICTWO

- ASIRI NATIONAL PROJECT (2008). Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvements.
- Bogusz, W., Jaśkiewicz, K. (2014). Projekt geotechniczny dla budynku maszynowni wraz z fundamentem turbozespołu dla potrzeb budowy nowych bloków 5 i 6 – 2 × 900 MW w PGE Elektrownia Opole S.A. Raport techniczny ITB, Warszawa.
- Gryczmański, M. (2011). Ekspertyza geotechniczna posadowienia wysokich obiektów budowlanych nowych bloków energetycznych 5 i 6 elektrowni „Opole” w Brzeziu, Gliwice.
- Łukasik, S. i inni (2013). Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla potrzeby budowy nowego bloku 2 x 900 MW w PGE Elektrownia Opole S.A. ITB, Warszawa.
- Świniański, J., Marchwicki, M. (2014). Wzmacnianie gruntu sztywnymi kolumnami – podstawy projektowania według ASIRI i Eurokodu 7. Inżynieria i Budownictwo, 6.
- Truty, A. (2012). Trójwymiarowa analiza wzmocnienia podłoża gruntowego pod płytami fundamentowymi budynków wielokondygnacyjnych z zastosowaniem kolumn CFA. Czasopismo Techniczne – Środowisko, 3-Ś.

## SOIL STRENGTHENING UNDER TURBO GENERATORS 5 AND 6 IN PGE OPOLE POWER PLANT S.A.

**Abstract.** The article describes the design process and the construction of a work on one of the most important investments realized recently, i.e. the expansion of Opole power plant. The project consists of soil reinforcement under slab foundation for a turbo generator in new blocks number 5 and 6. The strengthening was realized using concrete columns. The project of the reinforcement was an important part of the preparations for the realization of the works. It was decided to construct a three-dimensional model of soil with the elements of the reinforcement. Non-linear material models, such as Hardening Soil for soils and Hoek-Brown for rock formations, were applied in the calculations. Geotechnical parameters and the design solution (the prevision of foundation slabs excessive settlements) were calibrated during trial loading of test columns. 1020 reinforced columns CFA and 2057 CMC columns were built during the construction.

**Key words:** soil strengthening, CMC columns, CFA columns, Opole Power Plant, turbo generators foundations, Hardening-Soil

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 31.08.2016

Cytowanie: Kanty, P., Podleś, K., Truty, A., Warchał, T. (2016). Wzmocnienie podłoża gruntowego pod fundamentem turbozespołu bloków 5 i 6 w PGE Elektrownia Opole S.A. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 15 (4), 91–102.