

# Wzmocnienie podłoża gruntowego pod fundamentami konstrukcji oporowych na budowie Stadionu Narodowego w Warszawie

mgr inż. Sławomir Teżyk, mgr inż. Jakub Raczkiewicz, Keller Polska Sp. z o.o.

Doświadczenia projektowe i wykonawcze zdobyte w czasie pierwszego etapu budowy Stadionu Narodowego w zakresie wzmocnienia podłoża gruntowego za pomocą kolumn żwirowych pod fundamenty dwupoziomowego parkingu pod płytą boiska wykorzystano także do posadowienia murów oporowych, ramp dojazdowych oraz schodów zewnętrznych w drugim etapie budowy.

Zgodnie z projektem firmy JSK Architekci Sp. z o.o. wystąpiła konieczność wzmocnienia podłoża gruntowego pod fundamentami konstrukcji oporowych, zlokalizowanych wokół wznoszonego obiektu. Podobnie jak w pierwszym etapie robót, firma Keller Polska Sp. z o.o. opracowała projekt wykonawczy wzmocnienia podłoża oraz wykonała specjalistyczne roboty geotechniczne. Całość prac zrealizowano na zlecenie generalnego wykonawcy, konsorcjum firm Alpine Construction Polska Sp. z o.o. oraz Hydrobudowa Polska Sp. z o.o.

## Wzmocnienie podłoża gruntowego pod płytą boiska i tunelem (pierwszy etap robót)

W celu zobrazowania zakresu wszystkich prac wzmacniających podłoże, poniżej przedstawiono syntetyczną informację o robotach wykonanych w pierwszym etapie robót.

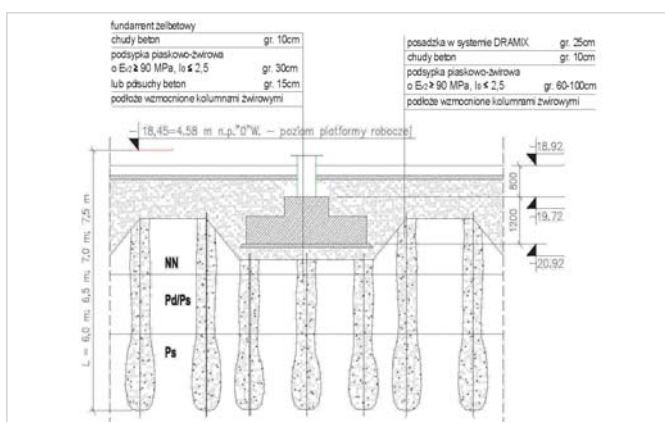
Fundamenty parkingów pod płytą boiska oraz w rejonie osi B i C stadionu posadowiono na podłożu wzmocnionym kolumnami żwirowymi i żwirowo-betonowymi systemu Kellera, wykonywanymi w technologii wibrowymiany (ryc. 2). Pod istniejącymi fundamentami tunelu wjazdowego zrealizowano posadowienie na kolumnach jet grouting, wykonywanych w technologii iniekcji strumieniowej. Wykonano łącznie (ryc. 1):

- 4026 kolumn żwirowych (ryc. 3), o całkowitej długości 25 880 m
- 2750 sztuk kolumn żwirowo-betonowych (ryc. 4), o całkowitej długości 18 966 m
- 94 kolumny jet grouting, o średnicy 2,0 m i sumarycznej długości 517 m.

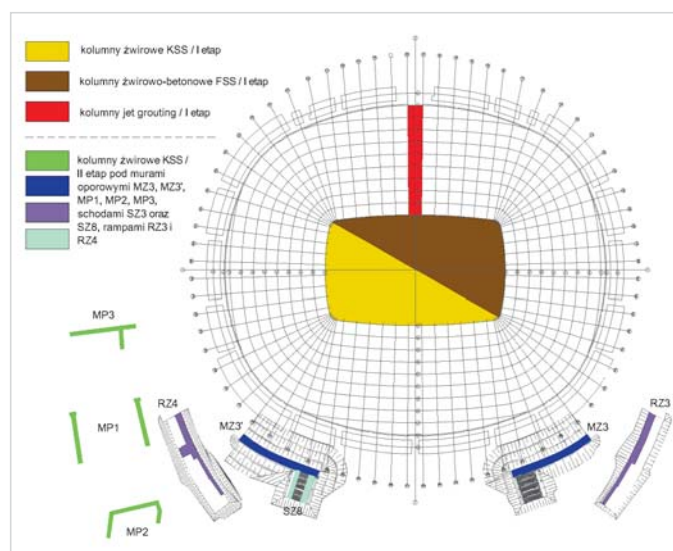
Roboty prowadzono od października 2008 do lutego 2009 r. i ukończono przed terminem.



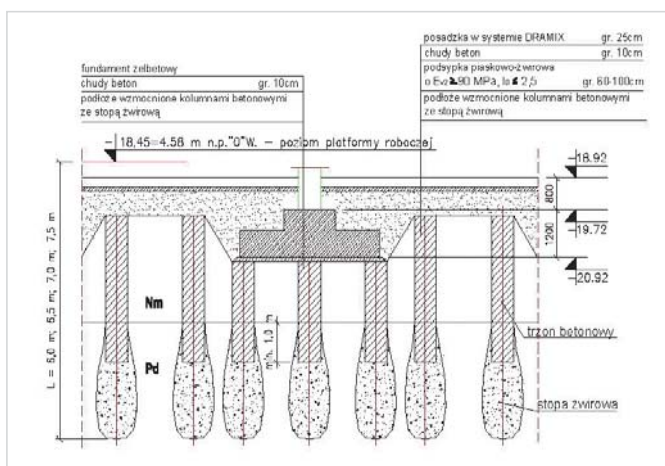
Ryc. 2. Wykonywanie kolumn żwirowych KSS i żwirowo-betonowych FSS pod płytą stadionu [8]



Ryc. 3. Przekrój przez podłoże wzmocnione kolumnami żwirowymi KSS [9]



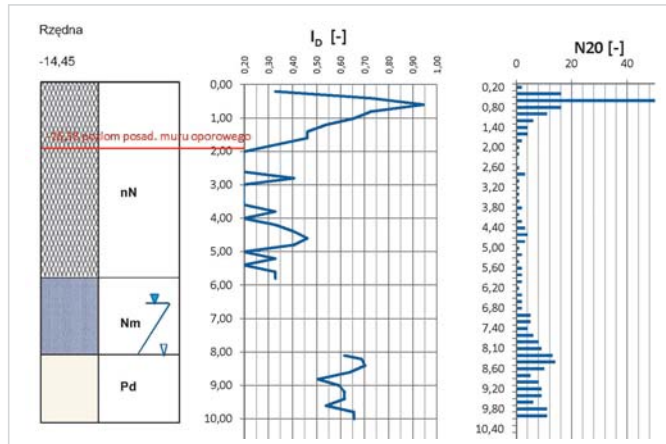
Ryc. 1. Zakres wykonywanych robót na budowie Stadionu Narodowego



Ryc. 4. Przekrój przez podłoże wzmocnione kolumnami żwirowo-betonowymi FSS w rejonie występowania gruntów organicznych [9]

## Warunki gruntowe i założenia projektowe (drugi etap robót)

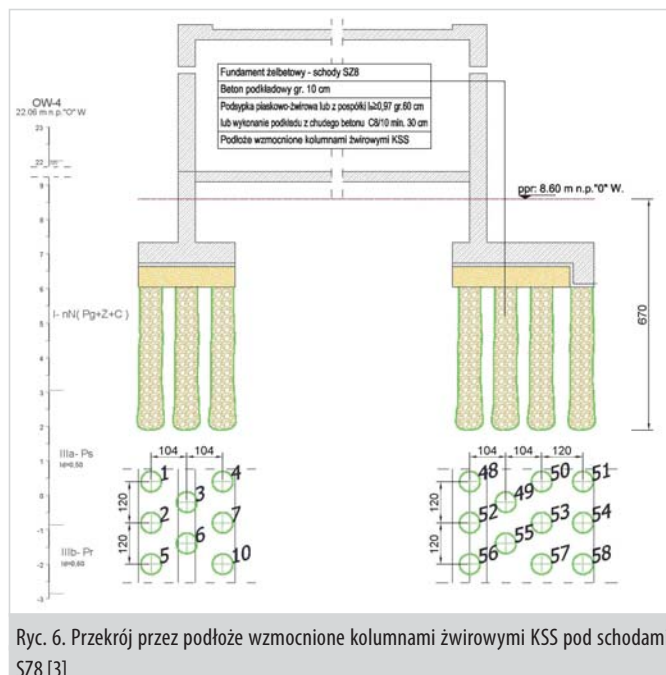
Badania geologiczno-inżynierskie, wykonane na terenie prowadzonej inwestycji, wykazały występowanie gruntów antropogenicznych w postaci nasypów niekontrolowanych. Miąższość nasypów miejscami przekraczała nawet 15 m, natomiast stan zagęszczenia gruntów był bardzo zróżnicowany i wynosił od  $I_D = 0,20$  do  $I_D = 0,60$ . Poniżej nasypów stwierdzono ponadto miejscowe występowanie gruntów słabonośnych, wykształconych w postaci namulów (ryc. 5).



Ryc. 5. Profil sondowania przed wykonaniem wzmocnienia podłoża [7]

Biorąc pod uwagę warunki gruntowe, obciążenia i geometrię obiektów zaproponowano wzmocnienie podłoża za pomocą kolumn żwirowych KSS systemu Kellera, o długościach od 6,6 do 9,6 m. Rozstaw oraz rozmieszczenie kolumn dostosowano indywidualnie do geometrii konstrukcji (ryc. 6). Obliczeniowe osiadanie murów posadowionych na podłożu wzmocnionym kolumnami żwirowymi nie przekracza 3 cm.

Ponad kolumnami przewidziano, opcjonalnie, warstwę podsypki piaskowo-żwirowej o  $I_s \geq 0,97$  i grubości 50 cm lub warstwę betonu C8/10 o konsystencji nadającej się do zagęszczenia (ubijania) i grubości minimum 30 cm. Pod konstrukcją fundamentu zastosowano w obu rozwiązaniach warstwę betonu podkładowego o grubości 10 cm. Na tak wykonanej podbudowie wykonano fundamenty konstrukcji oporowych (ryc. 6).



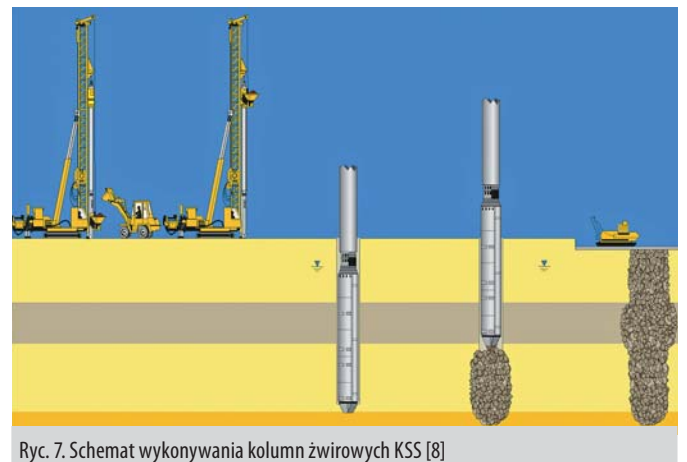
Ryc. 6. Przekrój przez podłoże wzmocnione kolumnami żwirowymi KSS pod schodami SZ8 [3]

## Wykonawstwo kolumn żwirowych dla posadowienia konstrukcji oporowych

Kolumny żwirowe są ekonomicznym i szybkim sposobem wzmocnienia słabego podłoża gruntowego, w którym występują warstwy rozluźnionych lub plastycznych gruntów. Ze względu na konieczność zmobilizowania bocznego oporu gruntu, zapewniającego utrzymanie trzonu kolumny, minimalna wytrzymałość gruntu na ścinanie powinna przewyższać ok. 5 do 10 kPa, zależnie od charakteru obiektu i stosowanego w pewnych przypadkach przeciążenia (kiedy zadaniem kolumn jest przyspieszenie konsolidacji podłoża).

Warto również zwrócić uwagę, że kolumny żwirowe, ze względu na stosowany materiał, charakteryzują się najniższym wskaźnikiem emisji  $CO_2$  w porównaniu do alternatywnych rozwiązań, np. kolumn betonowych (typu *Rigid Inclusions*), pali CFA lub pali prefabrykowanych. Problematyka ochrony środowiska i zmniejszenia emisji  $CO_2$  m.in. w robotach budowlanych nabiera ostatnio coraz większego znaczenia.

Proces wykonywania kolumn żwirowych KSS systemu Kellera oparty jest na technologii wibrowymiany. Kolumny wykonuje się za pomocą maszyny podstawowej (przystosowanej palownicy), wyposażonej w wibrator wgłębnny z wewnętrznym (śluzowym) podawaniem materiału (ryc. 7).



Ryc. 7. Schemat wykonywania kolumn żwirowych KSS [8]

W pierwszej fazie wibrator wypełnia się kruszywem a następnie pogłęza w podłoże przy udziale wibracji i docisku maszyny, sięgającym do 150 kN. Po osiągnięciu przewidzianej głębokości następuje formowanie poszerzonej stopy żwirowej w gruncie nośnym. W tym czasie odbywa się wzmocnienie podłoża rodzimego w wyniku zagęszczenia (grunty sypkie) lub jego przyspieszona konsolidacja (nawodnione grunty spoiste).

W drugiej fazie następuje formowanie trzonu kolumny w obrębie gruntów słabych i do powierzchni roboczej. W tym celu do wibratora wysypuje się od góry, przez zamykaną śluzę, kruszywo żwirowe lub łamane o uziarnieniu 0 do 50 mm i odpowiednim składzie frakcji, umożliwiającym zagęszczanie. W trakcie podciągania wibratora do góry kruszywo wydostaje się spod ostrza wibratora pod działaniem sprężonego powietrza i wypełnia przestrzeń zajęta wcześniej przez wibrator. Ponowne opuszczenie wibratora powoduje rozepchnięcie kruszywa i zwiększenie efektywnej średnicy kolumny. Posuwisto-zwrotny ruch wibratora kontynuowany jest na całej długości kolumny. Dodatkowym efektem, jaki towarzyszy formowaniu trzonu kolumny żwirowej, jest poprawienie parametrów mechanicznych otaczającego gruntu. Uzyskiwane średnice kolumn żwirowych wynoszą w typowych przypadkach od 0,6 do 0,8 m, zależnie od podatności bocznej gruntu, tzn. w warstwach gruntów sł-

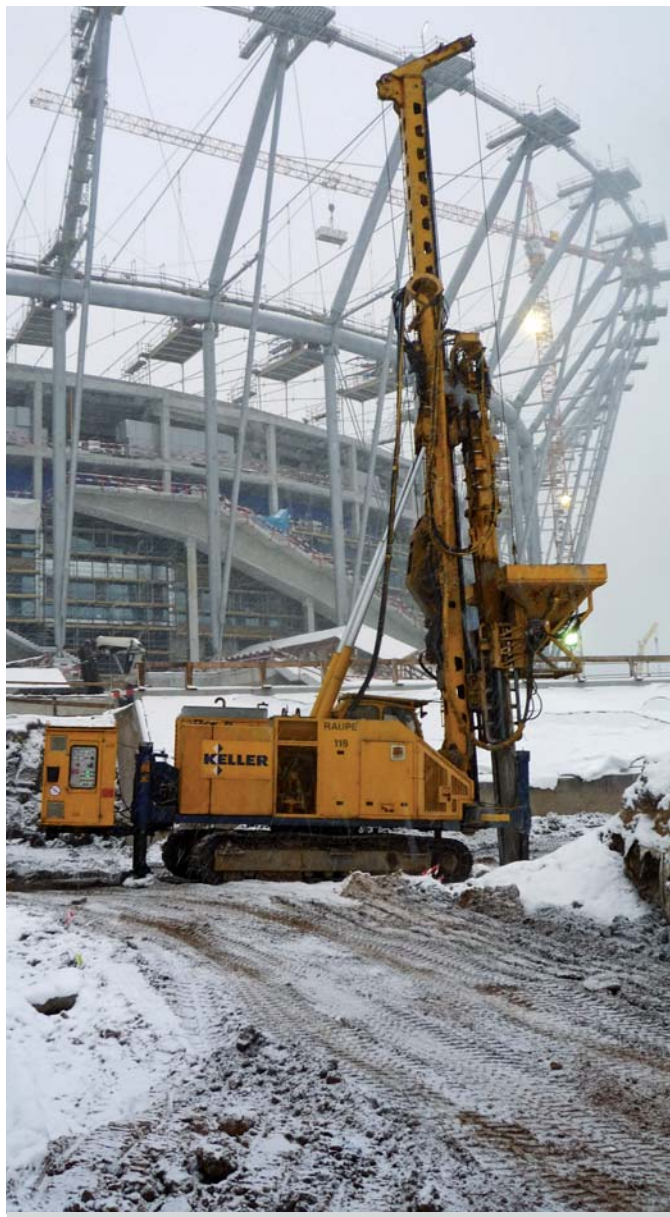


bych są większe, a w mocniejszych mniejsze. Istotną zaletą stosowania kolumn żwirowych jest dostosowanie ich średnicy do rzeczywistej nośności bocznej gruntu, co odbywa się niejako automatycznie w opisanym procesie formowania kolumny w gruntach uwarstwionych, a także możliwość dostosowania długości kolumn do rzeczywistego przebiegu spągu gruntów słabych dzięki ciągłej obserwacji i rejestracji oporów pograżania wibratora w podłoże.

## Zakres wykonanych prac i kontrola robót w drugim etapie realizacji

W ramach robót wzmocniających podłoże gruntowe pod fundamentami murów oporowych, schodów zewnętrznych oraz ramp dojazdowych wokół stadionu wykonano łącznie ok. 1200 kolumn żwirowych KSS systemu Kellera, o całkowitej długości ok. 8400 m (ryc. 8, 9, 10). Szczegółowe zestawienie przedstawiono w tabeli 1.

W celu kontroli ciągłości i zagęszczenia kolumn żwirowych wykonano 23 sondowania dynamiczne trzonów kolumn sondą SD 30. Wyniki wszystkich badań kontrolnych przekroczyły wymagania projektowe. Przykładowe badanie pokazano na rycinie 11.



Ryc. 8. Wykonywanie kolumn żwirowych – MP3

Tab. 1. Zestawienie robót wykonanych w drugim etapie

Obiekt	Liczba [szt.]	Długość [m.b.]
MZ3	203	1365,5
MZ3'	203	1029,6
MP1	114	1037,30
MP2	118	803,00
MP3	105	877,90
SZ8	110	759,80
RZ3	153	1598,70
RZ4	180	866,10
Łącznie	1186	8337,9

## Podsumowanie

Zastosowane wzmocnienia podłoża gruntowego za pomocą kolumn żwirowych wpłynęło na poprawę parametrów geotechnicznych podłoża i umożliwiło ograniczenie osiadań obiektów.

Dzięki zastosowaniu opisanych rozwiązań uniknięto wykonania droższego posadowienia na palach prefabrykowanych oraz osiągnięto przyspieszenie terminu realizacji prac.



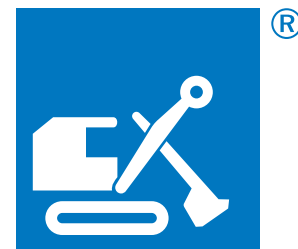
Ryc. 9. Wykonywanie kolumn żwirowych – RZ3



Ryc. 10. Wykonywanie kolumn żwirowych pod fundamenty muru oporowego – MP1







Budowa mostu przez Wisłę w Toruniu



Autostradowa Obwodnica Wrocławia - ścianka szczelna wciskana przy torowisku



Budowa autostrady A4 odcinek Radymno-Korczowa

## Roboty palowe

- Dostawa i instalacja pali prefabrykowanych wbijanych dla posadowienia mostów, konstrukcji inżynierskich oraz obiektów kubaturowych
- Wzmacnianie nasypów i korpusów drogowych
- Posadowianie na palach wbijanych ekranów akustycznych i słupów sieci trakcyjnych
- Instalacja mikropali
- Wbijanie i wwbrowywanie pali stalowych
- Badanie nośności pali - próbné obciążenia statyczne, dynamiczne testy nośności pali, badania ciągliwości pali

## Zabezpieczenia głębokich wykopów

- Stalowe ścianki szczelne - instalacja grodzic z zastosowaniem metod tradycyjnych oraz bezwibracyjnej metody wciskania grodzic prasą hydrauliczną SILENT PILER
- Ścianki berlińskie
- Iniekcyjne kotwy gruntowe
- Roboty ziemne i odwodnieniowe
- Pomiar vibracji

## Projektowanie

- Prace projektowe dla potrzeb wykonywanych robót realizowane we własnej pracowni projektowej
- Serwis projektowy - [www.aarsleff.com.pl/serwis.php](http://www.aarsleff.com.pl/serwis.php) - do pobrania rysunki, specyfikacje, wytyczne oraz **KALKULATOR PALI** - program do projektowania fundamentów palowych



Pale prefabrykowane pod fundamenty Stadionu Narodowego