



#PALE PREFABRYKOWANE
#TROFOWISKO

Wysoki nasyp drogi
ekspresowej S5 k. Gniezna
posadowiony w torfowisku
na żelbetowych palach
prefabrykowanych wbijanych

dr inż. Dariusz Sobala
dr inż. Wojciech Tomaka
mgr inż. Piotr Maksim
mgr inż. Jakub Sobolewski

materiał z:
czasopisma MOSTY 5/2016



AARSLEFF

Technologie

Pale prefabrykowane:
żelbetowe, stalowe i drewniane

Pale i kolumny FDP

Pale i kolumny wiercone CFA

Mikropale

Kotwy i gwoździe gruntowe

Kolumny DSM

Grodzice stalowe / ścianki szczelne

Berlinki

Palisady wiercone

Obiekty

Budownictwo mieszkaniowe
i kubaturowe

Elektrownie wiatrowe

Budownictwo kolejowe

Drogi i autostrady

Budownictwo przemysłowe

Budownictwo hydrotechniczne

Obiekty sportowe i rekreacyjne

Wysoki nasyp

drogi ekspresowej S5 k. Gniezna
posadowiony w torfowisku na żelbetowych
palach prefabrykowanych wbijanych

dr inż. Dariusz Sobala
Zakład Dróg i Mostów Politechniki
Rzeszowskiej, Aarsleff Sp. z o.o.

dr inż. Wojciech Tomaka,
mgr inż. Piotr Maksim,
mgr inż. Jakub Sobolewski
Aarsleff Sp. z o.o.

Firma Aarsleff we współpracy z firmami AECOM i GT Projekt zaprojektowała i wykonała w rejonie torfowiska wzmocnienie podłoża pod nasypem drogi ekspresowej S5 k. Gniezna w technologii żelbetowych pali prefabrykowanych wbijanych. Zakres robót firmy Aarsleff obejmował projekt palowania, projekt i wykonanie blisko 190 próbnych obciążeń oraz wbicie 5200 szt. pali o całkowitej długości blisko 120 km. Palowanie zasadnicze wykonano w ciągu 48 dni roboczych.

Budowana droga ekspresowa S5 – część drogi została już zbudowana, część jest w budowie, a pozostała część w projektowaniu – będzie łączyć Wrocław, Poznań, Gniezno, Bydgoszcz i Grudziądz oraz autostrady A4/A8 z A1 i drogami ekspresowymi S11 i S10. Budowa drogi o długości całkowitej 365 km ma zostać zakończona do 2023 roku. Droga ekspresowa S5 jest uznawana za jedną z najważniejszych dróg szybkiego ruchu w kraju. W lipcu 2016 roku, po zaledwie 48 dniach roboczych, firma Aarsleff zakończyła wykonywanie na zlecenie firmy Budimex S.A. wzmocnienia podłoża pod wysoki nasyp drogi ekspresowej S5 k. Gniezna na odcinku długości 311 m w bezpośrednim sąsiedztwie przyczółków budowanego obiektu mostowego w rejonie występowania grubych warstw, zanieczyszczonych metalami ciężkimi, słabonośnych gruntów organicznych o wytrzymałości na ścinanie $c_u < 15$ kPa (fot. 1).

Projekt budowanego odcinka drogi ekspresowej S5 wykonała firma AECOM z Poznania, projekt platformy roboczej, geotechniczne badania podłoża, koncepcję wzmocnienia, projekt płyty żelbetowej i nasypu na wzmocnionym odcinku wykonała firma GT Projekt, natomiast projekt palowania i palowanie wykonała firma Aarsleff.

Warunki geotechniczne

Warunki geotechniczne na omawianym odcinku budowanej drogi były ustalane dwuetapowo: pierwszy raz na potrzeby projektu drogi ekspresowej oraz drugi w trakcie budowy, na potrzeby projektu i realizacji wzmocnienia obszaru gruntów słabonośnych (torfowiska). Na etapie przygotowania inwestycji nie było możliwe wykonanie pełnego zakresu badań geotechnicznych ze względu na brak dostępności do terenu torfowiska z licznymi zbiornikami wodnymi. W celu zapewnienia dostępu do terenu do badań podłoża i wykonania samego wzmocnienia zaprojektowano i wykonano platformę roboczą kruszywową wzmocnioną geosyntetykami o średniej grubości ok. 1,7 m. Lokalnie grubość platformy sięgała do 3,9 m, co wiązało się bezpośrednio z koniecznością zasypania istniejących zbiorników wodnych. Dodatkowe badania geotechniczne wykonano w zakresie i w sposób umożliwiający ich bezpośrednie wykorzystanie w projektowaniu wzmocnienia w wybranej technologii. Jako podstawowy sposób badania podłoża przyjęto sondowania statyczne (CPT), których wyniki wykorzystano zarówno w globalnych analizach projektowych GT Projekt, jak i szczegółowych projektach wykonawczych i technologicznych palowania Aarsleff.

Na podstawie dodatkowych badań wydzielono pakiety gruntów o zróżnicowanej genezie (rys. 1), natomiast w obrębie pakietów wyróżniono warstwy różniące się

I SUMMARY

Driven precast reinforced concrete piles for the foundation of the high embankment of the S5 expressway near Gniezno in a bog

Aarsleff, in cooperation with AECOM and GT Projekt, designed and constructed a peat soil improvement for the embankment of the constructed S5 expressway near Gniezno using the driven precast reinforced pile technology. The scope of works executed by Aarsleff included the piling design, the design and performance of nearly 190 load tests and installation of 5,200 piles of the total length of nearly 120 km. The major piling work was completed in 48 working days.

Keywords: precast piles, pile driving, soil improvement, bog, design

rodzajem oraz stanem (konsystencją lub zagęszczeniem). Podstawą wydzielenia warstw w obrębie pakietów były wyniki sondowań statycznych (wartość tarcia oraz opór stożka sondy) oraz ich korelacja z wynikami wierceń badawczych oraz badań laboratoryjnych. Wyróżniono następujące pakiety:

- **pakiet I** – nasypy budowlane i niekontrolowane, do maks. 3,9 m p.p.t.;
- **pakiet II** – grunty organiczne (torfy, gytie, namuły i pisaki próchnicze), gliny pylaste, pyły, piaski drobne i średnie, do maks. 17,4 m p.p.t. po stronie Poznania i do maks. 8 m p.p.t. po stronie Bydgoszczy;
- **pakiet III** – gliny zwałowe i piaski drobne, do maks. od 5,5 do 20,4 m p.p.t.;
- **pakiet IV** – piaski drobne, średnie, grube i pospółki, od 11,8 do 22,8 m p.p.t.;
- **pakiet V** – silnie skonsolidowane gliny zwałowe i piaski średnie, od 16 do 26,6 m p.p.t.;
- **pakiet VI** – ily neogeńskie o niskim stopniu konsolidacji, piaski drobne, średnie i grube, strop na głębokości 18,2-27,8 m p.p.t., maksymalna zbadana głębokość 31 m p.p.t bez przewiercenia warstwy.

Badania gruntów zalegających w podłożu wykazały ich skażenie metalami ciężkimi.

Woda gruntowa pierwszego poziomu występuje w osadach holoceniowych w postaci zwierciadła swobodnego oraz napiętego. Ustabilizowane zwierciadło wód gruntowych w trakcie badań terenowych określono na poziomie ok. 0,0-2,0 m p.p.t. Przez środek badanego obszaru przepływała rzeka Wełnianka, która na czas robót związanych z wykonaniem obiektu mostowego i wzmocnienia podłoża została przełożona. Woda gruntowa w badaniach wykazała słabą agresywność amonową i średnią agresywność węglanową.



Fot. 1. Torfowisko bezpośrednio przed rozpoczęciem budowy platformy



Fot. 2. Rozpoczęcie robót palowych – wbijanie pali testowych/świadków



Fot. 3. Badania nośności pali – próbne obciążenie statyczne na wyciąganie

Zgodnie z normą środowisko jest chemicznie silnie agresywne i klasyfikuje się do klasy ekspozycji XA3.

Dobór technologii wzmocnienia podłoża

Po przeprowadzonej analizie techniczno-ekonomicznej inwestor wraz z zespołem projektantów z firm AECOM i GT Projekt zdecydował się nie wymieniać, a tym samym nie utylizować skażonych gruntów i posadzić wysoki nasyp drogi ekspresowej na wzmocnionym podłożu.

Na podstawie wyników analizy:

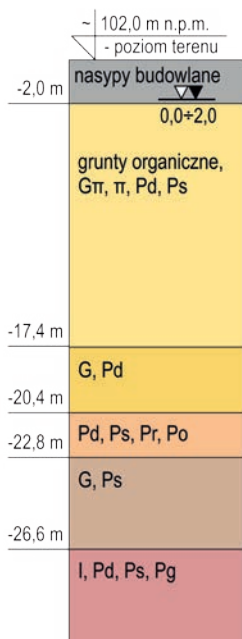
- warunków geotechnicznych z występującymi w podłożu grubymi warstwami skażonych metalami ciężkimi gruntów organicznych o wytrzymałości na ścianie $c_u < 15$ kPa,
- ostrych wymagań dotyczących ograniczenia osiadań/ różnicy osiadań nasypu drogi ekspresowej w sąsiedztwie posadowionego na palach obiektu mostowego,
- znacznych obciążeń od wysokiego (maksymalnie ok. 10 m) nasypu drogi ekspresowej,
- wymagań i zaleceń normowych dla poszczególnych rodzajów kolumn/pali,
- wymagań harmonogramowych,

dokonano wyboru technologii wzmocnienia.

Z technologii pali/kolumn wierconych zrezygnowano ze względu na konieczność utylizacji dużej ilości skażonego urobku oraz spodziewane trudności technologiczne związane z formowaniem trzonów pali w grubych warstwach podłoża o wytrzymałości na ścianie bez odpływu $c_u < 15$ kPa. Prawidłowe uformowanie pali/kolumn w tych warunkach wymaga pozostawienia w gruncie kosztownych rur osłonowych. Te same grube warstwy gruntów słabonośnych nie pozwoliły również wykorzystać kolumn kruszywowych oraz pali/kolumn przemieszczeniowych betonowych/żelbetowych,

które, podobnie jak pale/kolumny wiercone, wymagają wykorzystania kosztownych, traconych rur osłonowych. Wykorzystanie wglębnego mieszania nie wchodziło w rachubę ze względu na zaleganie w podłożu do znacznych głębokości grubych warstw gruntów organicznych.

Analiza dostępnych technologii doprowadziła drogą eliminacji do wyboru pali prefabrykowanych, a spośród dostępnych rozwiązań – do wyboru żelbetowych pali prefabrykowanych wbijanych jako technologii spełniającej wymagania projektu i kontraktu. Żelbetowe pale prefabrykowane wbijane to pale przemieszczeniowe, pogrążane bez wydobywania urobku, odporne na chemiczne działanie gruntów skażonych i organicznych, zanieczyszczoną wodę gruntową, niezagrażone są przy tym utratą ciągłości wskutek rozpląnięcia mieszanki w warstwach gruntów słabonośnych lub przemieszczenia podłoża w trakcie wykonywania wzmocnienia. Pale prefabrykowane mogą być wykonywane o długości dostosowywanej do potrzeb projektu dzięki wykorzystaniu szybkich złączy mechanicznych do łączenia prefabrykatów palowych. Ponadto wybrana technologia jest wydajna i zapewniła spełnienie ostrych wymagań harmonogramowych, wg których wzmocnienie należało wykonać zaledwie w ciągu 2,5 miesiąca od zakończenia badań podłoża i badań nośności pali. Przy doborze technologii wzmocnienia niebagatelne znaczenie miały dotychczasowe pozytywne doświadczenia z wykorzystania żelbetowych pali prefabrykowanych w podobnych warunkach gruntowych i obciążeniach, np. do posadowienia odcinków nasypów autostrady A2 i drogi ekspresowej stanowiącej zachodnią obwodnicę Poznania oraz dojazdów do mostu drogowego na wyspę Ostrów Brdowski w Szczecinie.



Rys. 1. Typowy przekrój geotechniczny



Fot. 4. Palowanie zasadnicze i tworzenie magazynu pali na placu budowy



Fot. 5. Łączenie pali



Fot. 6. Zakończenie palowania do strony Bydgoszczy

Rozwiązanie projektowe

Wzmocnienie podłoża zostało podzielone na dwa obszary:

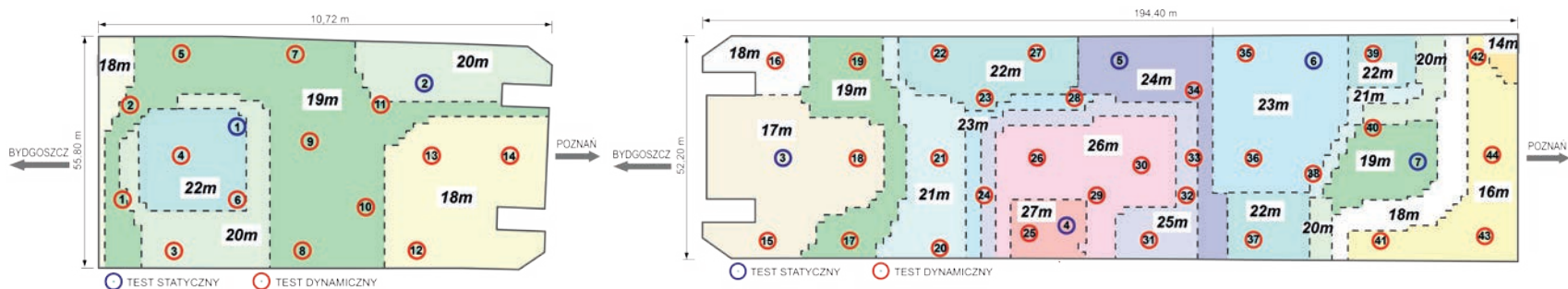
- część obszaru od północy do obiektu MS-11 (tzw. „część bydgoska”), tj. na odcinku od km 11+035,00 do km 11+148,13 budowanego odcinka drogi ekspresowej S5 – długość odcinka: 113,13 m,
- część obszaru od obiektu MS-11 na południe (tzw. „część poznańska”), tj. na odcinku od km+202,13 do km 11+400,00 budowanego odcinka drogi ekspresowej S5 – długość odcinka: 197,87 m.

Kompleksowe rozwiązanie problemu przekroczenia torfowiska obejmowało:

- projekt platformy roboczej, projekt i wykonanie badań podłoża (GT Projekt),
- projekt palowania i próbnych obciążeń pali (Aarsleff),
- projekt żelbetowej płyty zwieńczającej (GT Projekt),
- projekt nasypu drogi ekspresowej z wkładkami z kruszywa lekkiego – keramzytu (GT Projekt).

Prace projektowe zrealizowano w całości zgodnie z wymaganiami Eurokodów, co wciąż jest rzadkie w drogowym budownictwie komunikacyjnym. Zasadnicze zadanie projektowe polegało na optymalizacji uwzględniającej trzy zasadnicze elementy robót, tj.: 1) przekrój, długość i rozstaw pali, 2) grubość i zbrojenie płyty żelbetowej oraz 3) konstrukcję nasypu (liczbę i grubość wkładek z kruszywa lekkiego). O wyniku optymalizacji zdecydowały całkowite koszty realizacji robót.

Na podstawie wyników analiz przeprowadzonych z wykorzystaniem dodatkowych badań podłoża do wykonania wzmocnienia przyjęto pale prefabrykowane w rozstawie $1,8 \times 1,8$ m, o przekroju 300×300 mm z betonu C40/50, zbrojone standardowym zbrojeniem technologicznym 8#12 mm ze stali $f_y = 500$ MPa i długości dostosowanej do warunków gruntowych oraz założonych obciążeń (rys. 2). Głowice pali były rozkuwane na długości ok. 0,35 m, a zbrojenie pali zakotwiono w płycie. W ten sposób uzyskano korzystny docelowy schemat statyczny pracy pali jako pręta ściskanego podpartego przegubowo w płycie i utwierdzonego w gruncie, dla którego przeprowadzono szczegółową analizę wyoboczenia uwzględniającą dopuszczalne imperfekcje produkcyjne i wykonawcze. Wynik analizy przeprowadzonej dla skrajnie niekorzystnych warunków brzegowych potwierdził poprawność przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego pali. Wstępnie nośność i wymaganą długość pali określano na podstawie sondowań CPT, wykorzystując metodę francuską i zasady Eurokodu 7 (PN-EN 1997-1). Wyniki obliczeń były podstawą doboru i zlecenia produkcji dłuższych, górnych odcinków pali łączonych. Ostateczny dobór długości pali przeprowadzono na podstawie wyników próbnych obciążeń, które opracowano również zgodnie z wymaganiami Eurokodu 7 (PN-EN 1997-1). Duża liczba pali i ich znaczne wymagane długości czynią taką procedurę najbardziej efektywną. Została ona wcześniej wykorzystana i pozytywnie zweryfiko-



Rys. 2. Schemat planu palowania



Fot. 7. Palowanie od strony Poznania

wana przy budowie najdłuższego obiektu mostowego w Polsce, Stadionu Narodowego, mostu łukowego przez Wisłę w Toruniu i wielu innych rozległych/dużych fundamentów palowych.

Na etapie projektowania zrealizowano zakrojony na szeroką skalę program badań pali (fot. 2), w ramach którego wykonano blisko 190 próbnych obciążeń metodą statyczną na wciskanie (badania kalibrujące) i wyciąganie (fot. 3) oraz metodą dynamiczną przy dużych odkształceniach (zasadnicza metoda badań). Pale testowe, wbite i przebadane przed palowaniem zasadniczym:

- dostarczono na budowę o 1 lub 2 metry dłuższe niż to wynikało z obliczeń;
- wykorzystano jako pale świadki i sprawdzono ich wbijalność na całym obszarze wzmocnienia;
- wybrane, reprezentatywne pale przebadano metodą statyczną, a wyniki badań wykorzystano do kalibracji badań przeprowadzonych na wszystkich palach testowych metodą dynamiczną przy dużych przemieszczeniach;
- po zakończeniu pierwszego etapu badań niektóre pale dobito o 1 lub/i 2 metry i ponownie zbadano ich nośność.

W ramach zrealizowanego programu powtarzano badania w różnym czasie od momentu pogrążenia pala. W ten sposób ustalono wpływ czasu na przyrost nośności pali, który wykorzystano w projektowaniu wzmocnienia. Próbnymi obciążeniami wykonane po długim czasie zweryfikowały pozytywnie przyjętą procedurę szacowania przyrostu

nośności w czasie – uzyskano dokładność szacowania na poziomie $\pm 10\%$ w stosunku do wyników próbnych obciążeń.

Właściwe zaprogramowanie i przeprowadzenie badań pali pozwoliło w ostatnim dniu badań określić wymaganą długość wszystkich pali i przekazać tę informację do wytwórni prefabrykatów (rys. 2).

Wykonanie robót

Zakrojone na szeroką skalę przygotowania do robót palowych obejmujące:

- uzupełniające badania podłoża,
- badania pali pod próbnym obciążeniem statycznym na wciskanie i wyciąganie oraz pod próbnym obciążeniem dynamicznym przy dużych przemieszczeniach powtarzane wielokrotnie wraz z upływem czasu,
- analizy obliczeniowe nośności i długości pali oparte na wynikach badań podłoża (obliczeniach) i wynikach badań nośności pali,

spowodowały, że palowanie docelowe (fot. 4-7) stanowi z reguły jedynie duży wysiłek organizacyjny i sprowadza się do ścisłej realizacji wytycznych projektowych. Podobne i większe palowania zostały już w Polsce wielokrotnie zrealizowane. Pod jednym względem opisywane wzmocnienie jest jednak wyjątkowe: to wymagany, bardzo krótki czas realizacji robót palowych nieprzekraczający 2,5 miesiąca, co z powodzeniem udało się zrealizować (fot. 8-9). Spośród krytycznych czynników (rys. 3) wpływających na realizację robót palowych w krótkim czasie, takich jak:



Fot. 8. Zakończenie robót palowych – roboty wykończeniowe



Fot. 9. Zbrojenie płyty zwieńczającej pale



Rys. 3. Proces realizacji wzmocnienia w technologii żelbetowych pali prefabrykowanych

- planowanie (m.in. badania podłoża, projektowanie i badania pali na potrzeby projektowania),
- produkcja (prefabrykatów i złączy palowych),
- transport,
- palowanie,
- dokumentowanie (m.in. dokumentacja powykonawcza i badania powykonawcze pali),

pierwszym kluczowym elementem w omawianym projekcie było zapewnienie odpowiedniej liczby prefabrykatów pali w krótkim czasie. Realizowane jest to w praktyce na dwa sposoby: z magazynu (w przypadku rozpoczynania projektów palowych oraz w mniejszych i standardowych projektach) lub/i wykorzystując duże zdolności produkcyjne wytwórni prefabrykatów (w przypadku niestandardowych i większych projektów). W omawianym przypadku wykorzystano obydwie możliwości, które oferuje wytwórnia pali Centrum w Kutnie.

Samo palowanie, poza wielkością fundamentu palowego, można by uznać za standardowe, a po zakrojonych na szeroką skalę przygotowaniach... łatwe technicznie. Wyzwanie stanowiło zorganizowanie na czas dostaw prefabrykatów pali i zapewnienie wystarczająco dużego frontu robót dla wydajnych, nowoczesnych kfarów.

W trakcie palowania nie odnotowano żadnych istotnych problemów, ponieważ zakres ryzyka został ograniczony do wymaganego minimum w ramach przygotowań do robót palowych.

Roboty palowe obejmowały wbicie, rozkucie i inwentaryzację powykonawczą pali. W projekcie w pełni wykorzystano szeroki zakres zalet pali prefabrykowanych, tj.:

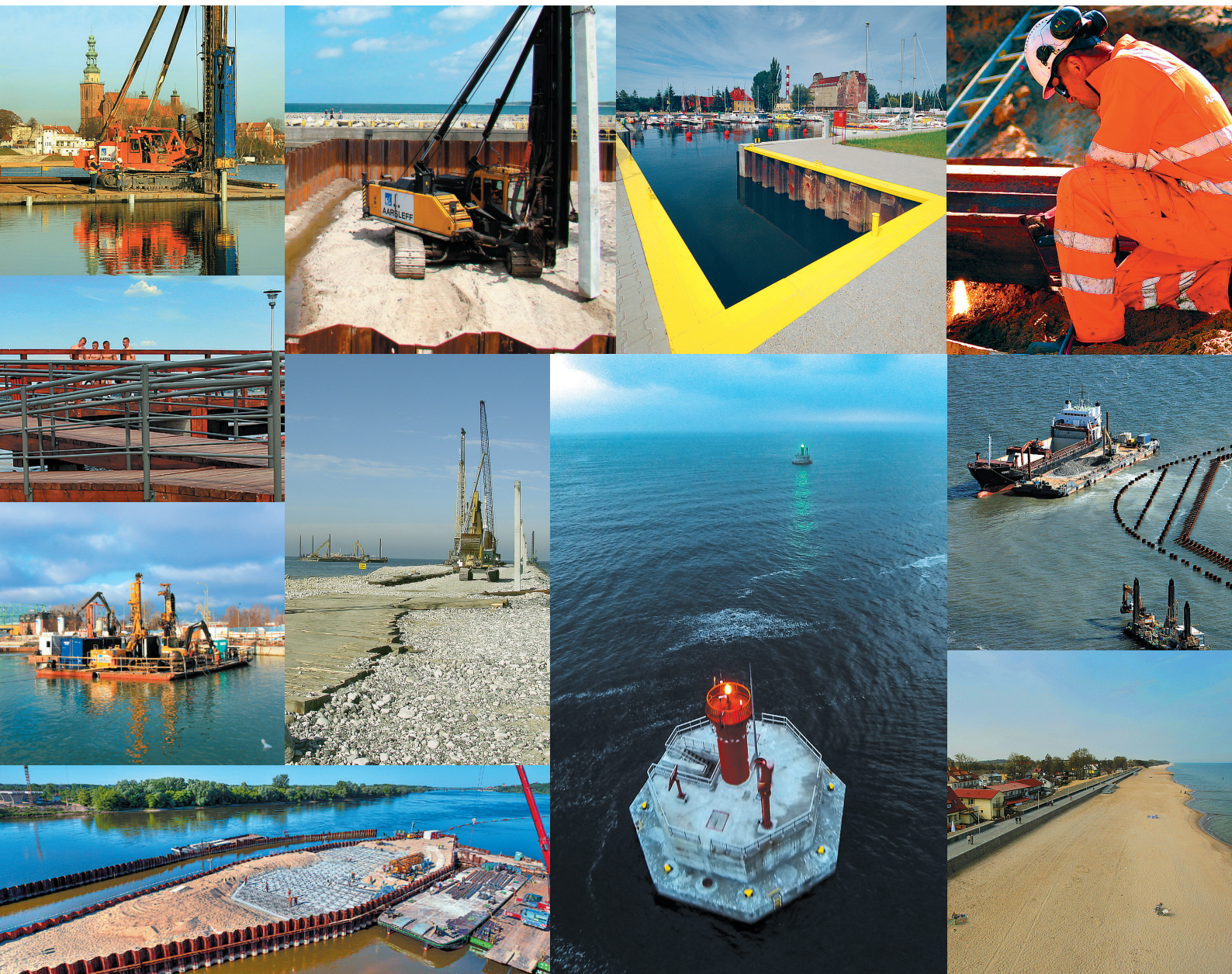
- czysty plac budowy (brak zanieczyszczeń mieszaną betonową i wydobywanym urobkiem),
- szybkie pograżanie pojedynczego pala i wykonanie rozległych fundamentów palowych wynikające z braku negatywnego oddziaływania pograżanych pali na wcześniej wykonane oraz wysoka odporność na niewielkie przemieszczenia platform roboczych,
- możliwość rozkuwania lub/i wykonywania wykopów między palami bezpośrednio po ich pograżeniu,
- możliwość wbicia pali do 1,5 m poniżej platformy roboczej,

- niezależność technologii od terminów dostaw betonu i temperatury otoczenia,
 - brak ograniczeń długości pali wynikający z możliwości szybkiego łączenia pojedynczych prefabrykatów za pomocą szybkich złączy mechanicznych,
 - duży potencjał produkcyjny i wykonawczy w Polsce: dostępność w magazynie pali o przekrojach 250 × 250 mm, 300 × 300 mm, 350 × 350 mm i 400 × 400 mm o różnych długościach z magazynu,
 - możliwość łatwego szacowania nośności pali na podstawie wyników badań podłoża, wpędów i wzorów dynamicznych, badań dynamicznych i statycznych,
 - szerokie możliwości kontrolowania efektów palowania: metryki pali, rejestracja wpędów, badania statyczne i dynamiczne nośności pali,
 - długoletnie, szerokie doświadczenie w wykorzystaniu pali prefabrykowanych w posadowieniu różnego rodzaju konstrukcji – od ekranów akustycznych po największe w kraju obiekty mostowe i nasypy na torfowiskach.
- Za drugi z kluczowych elementów, który doprowadził do zakończenia wzmocnienia zgodnie z oczekiwaniami inwestora, można uznać gromadzone przez lata doświadczenie i budowany potencjał specjalistycznej firmy geotechnicznej w kompleksowej realizacji robót palowych w technologii pali prefabrykowanych obejmującej wszystkie kluczowe etapy realizacji projektu (rys. 3).

Podsumowanie

Firma Aarsleff, działając na zlecenie firmy Budimex, w ścisłej współpracy z firmami AECOM i GT Projekt z Poznania, zaprojektowała i wykonała w rejonie głębokiego torfowiska wzmocnienie podłoża pod wysokim nasypem drogi ekspresowej S5 k. Gniezna w technologii żelbetowych pali prefabrykowanych wbijanych. Powierzchnia wzmoczonego obszaru to 1,65 hektara.

Zakres robót firmy Aarsleff obejmował projekt palowania, projekt i wykonanie blisko 190 różnego rodzaju próbnych obciążeń pali oraz wbicie niemal 5200 szt. długich, łączonych pali prefabrykowanych o przekroju 300 × 300 mm i całkowitej długości blisko 120 km. Palowanie zasadnicze zostało wykonane w ciągu zaledwie 48 dni roboczych. □



Aarsleff → budownictwo mieszkaniowe, kubaturowe, przemysłowe, hydrotechniczne, kolejowe, elektrownie wiatrowe, drogi i autostrady, obiekty sportowe i rekreacyjne. na zdjęciach budowa moła w Chełmży, budowa Marina Royale w Darłowie, marina w Elblągu, fragment moła w Nleporęciu, budowa falochronu w Śwnoujściu, Bałtyk — stawy nawigacyjne, budowa falochronu w Śwnoujściu, budowa Muzeum II Wojny Światowej w Gdańsku, budowa wyspy na Wiśle pod podporę mostu w Toruniu, nabrzeże w Sarbinowie.



Aarsleff →
budownictwo mieszkaniowe,
kubaturowe, przemysłowe,
hydrotechniczne, kolejowe,
elektrownie wiatrowe,
drogi i autostrady, obiekty
sportowe i rekreacyjne.

na zdjęciach
budowa fundamentu palowego pod zakład produkcyjny Gryfia w Szczecinie, budowa kanalizacji
w ciągu ul. Dźwigowej w Warszawie, posadowienie dzwonnicy w Białymstoku, roboty klejowe,
budowa stadionu narodowego w Warszawie, budowa oczyszczalni ścieków we Wrocławiu, prace
fundamentowe — farma wiatrowa, marina w Elblągu, na budowie budynku wielorodzinnego, budowa
terminala Kraków-Balice, estakady i most w Kwidzynie, budynek dworca Wrocław Główny — podczas
jego modernizacji wykonaliśmy ponad 7000 m² stalowych ścian szczelnych jako zabezpieczenie
wykopów niezbędnych do przeprowadzenia przebudowy obiektu (FOT. EMIL123. WIKIMEDIA)