

Renesans żelbetowych wbijanych pali prefabrykowanych

dr inż. Dariusz Sobala

Na polskim rynku dostępne są obecnie praktycznie wszystkie technologie fundamentowania, a ich różnorodna oferta i możliwości bardzo często bazują na najnowocześniejszym sprzęcie i wiedzy inżynierskiej. Autor wraz z zespołem współautorów podjął próbę opisu stanu współczesnej technologii żelbetowych prefabrykowanych pali wbijanych w Polsce – jednej z najstarszych, a aktualnie najdynamiczniej rozwijających się w naszym kraju technologii palowych. Całość omawianej problematyki podzielono na cztery części. W niniejszym artykule omówione zostaną zagadnienia ogólne dotyczące historii, współczesnej technologii żelbetowych pali prefabrykowanych i zakresu jej stosowania. Kolejne artykuły poświęcone będą zagadnieniom szczegółowym, dotyczącym:

- projektowania technologicznego, konstrukcyjnego i geotechnicznego pali i fundamentów na palach prefabrykowanych;
- produkcji prefabrykatów, składowania, transportu i wbijania pali;
- szeroko rozumianych badań towarzyszących wykonaniu fundamentów na żelbetowych palach prefabrykowanych.

Zarys historii żelbetowych pali prefabrykowanych

Pierwsze pale wykorzystywane przez człowieka to wbijane prefabrykowane pale drewniane. Autorstwo koncepcji fundamentowania na palach jest obecnie przypisywane ludziom z okresu Neolitu, nazywanym *Swiss Lake Dwellers* (ang. Szwajcarscy Osadnicy Jezior), którzy żyli na obszarze dzisiejszej Szwajcarii w okresie ok. 4300-500 r. p.n.e. Prawdopodobnie w celu ochrony przed dzikimi zwierzętami budowali oni swoje domy na jeziorach w niewielkiej odległości od brzegu, wykorzystując do tego celu drewniane pale wbijane.

Do około 1800 roku pale drewniane oraz dostępne techniki wbijania wyznaczały możliwości technologii palowania. Na początku XIX wieku rozpoczęto stosowanie pali żelaznych, a następnie, wraz z rozwojem metalurgii – stalowych. O rewolucji w technologii palowania możemy mówić od czasu, gdy na przełomie XIX i XX w. Francois Hennebique wykorzystał żelbet jako podstawowy materiał konstrukcyjny pala. Pale Hennebique'a pozostały do dnia dzisiejszego w świadomości wielu polskich inżynierów synonimem żelbetowych pali prefabrykowanych wbijanych. W rzeczywistości Hennebique nie był ani pierwszy, ani jedyński (patrz kalendarium). Przed nim analogiczny patent zgłosił i uzyskał Philip Brannon. Cóż z tego, skoro jego pomysł nie został prawdopodobnie nigdy wykorzystany w praktyce. Równoległe z systemem Hennebique'a stosowane były inne systemy pali prefabrykowanych pełnych Coingenta i Considere'a oraz drążonych, opisanych w pracy Mouchela Sutherlanda R. J. M., Humm D., Chrimes M.: *Historic Concrete*. Thomas Telford, 2001. Z przytoczonych powyżej faktów jasno wynika,

Kalendarium odkryć związanych ze współczesną technologią betonu i historią żelbetowych pali prefabrykowanych:

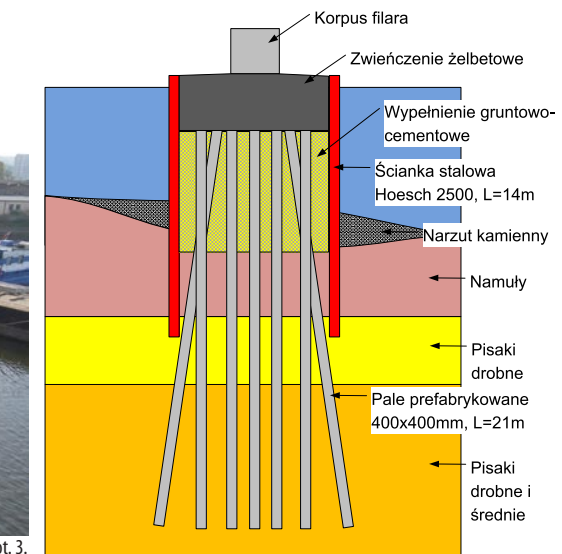
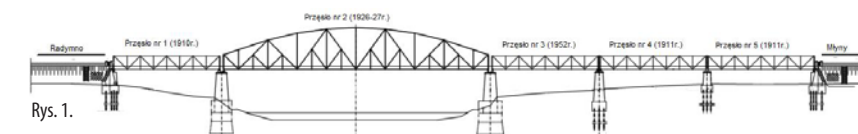
- 1756 r. – opatentowanie spoiwa hydraulicznego przez Johna Smeatona;
- 1824 r. – opatentowanie cementu portlandzkiego przez Josepha Aspdina;
- 1830 r. – rozpoczęto produkcję cementu w Kanadzie;
- 1836 r. – pierwsze systematyczne badania betonu wykonane w Niemczech;
- 1849 r. – wynalezienie żelbetu przez paryskiego ogrodnika Josepha Moniera;
- 1860 r. – zaczyna się era cementu portlandzkiego o składzie, jaki znamy dzisiaj;
- 1867 r. – opatentowanie żelbetu przez Josepha Moniera;
- 1871 r. – opatentowanie żelbetowych pali prefabrykowanych przez Philipa Branona w Wielkiej Brytanii;
- 1896 r. – opatentowanie we Francji i pierwsze zastosowanie pali prefabrykowanych przez Francois Hennebique'a;
- 1901(2) r. – pierwsze zastosowanie żelbetowych pali prefabrykowanych w Stanach Zjednoczonych;
- 1902-1907 – pierwsze potwierdzone zastosowanie żelbetowych prefabrykowanych pali wbijanych na ziemiach polskich – most przez San w Radymnie;
- 1930 r. – Eugene Freyssinet wykorzystuje sprężone pale prefabrykowane w porcie Havre we Francji.

we budownictwie, aby przejść do historii, nie wystarczy genialny pomysł, ale potrzebna jest jeszcze skuteczność udokumentowana wieloma realizacjami.

Powyższe kalendarium zawiera daty i zdarzenia uznane w wielu źródłach za potwierdzone. Nie oznacza to jednak, że zawarte w nim informacje są pewne. Różne źródła podają inne daty i przypisują wynalazki i zastosowania innym autorom.

Na tle pierwszych światowych zastosowań żelbetowych wbijanych pali prefabrykowanych ciekawie przedstawia się historia ich stosowania na ziemiach polskich. Udokumentowanym przykładem ich wykorzystania jest budowa fundamentów podpór mostu przez San w Radymnie (fot. 3) w latach 1902-1907. Fundamenty filarów i przyczółków zlokalizowanych na terenach zalewowych zostały wykonane z żelbetowych pali prefabrykowanych o przekroju 30 cm x 30 cm. Pale po odkopaniu w czasie przebudowy obiektu w 2002 roku były w tak dobrym stanie, że zostały wykorzystane w fundamentach nowego mostu drogowego zlokalizowanego w ciągu drogi krajowej nr 4. Warto w tym miejscu odnotować, że rzeczywisty okres ich użytkowania przekroczył już 100 lat.

Po około 30 latach powszechnego wykorzystania pali żelbetowych gamę rozwiązań konstrukcyjnych pali prefabrykowanych uzupełniły pale sprężone. Obecnie na małą skalę stosowane są również pale kompozytowe. Równoległe z bardzo szybkim rozwojem technologii żelbetowych prefabrykowanych pali wbijanych, które w naturalny sposób zastąpiły pale drewniane, rozwijano (w początkowym okresie z reguły na zdecydowanie mniejszą skalę) inne technologie fundamentowania głębokiego. Przełom wieku XIX i XX obfitował w liczne odkrycia w tym zakresie. Wtedy powstały zręby większości współczesnych technologii palowania i głębokiego wzmocnienia gruntu.



Rys. 1. Schemat konstrukcji starego mostu przez San w Radymnie z wiekiem poszczególnych przęseł (młodsze odbudowywane) oraz rozwiązaniem konstrukcyjnym fundamentów poszczególnych podpór

Fot. 1. Most przez San w Radymnie zbudowany w latach 1902-1913

Fot. 2. Odtworzone domostwa na palach sprzed ponad 6000 lat

Fot. 3. Wbijanie pali pod fundament filaru nurtowego mostu przez Regalicę w Szczecinie. Obok: schemat przekroju fundamentu palowego (projektant: K. Wąchalski, Pont-Projekt Gdańsk, fot. T. Pilarski, Aarsleff Sp. z o.o.)

Ponowne otwarcie Polski na świat w 1989 roku zaowocowało m.in. szerokim dostępem do współczesnych technologii fundamentowania. Specjalistyczne firmy polskie i oddziały firm zagranicznych w bardzo szybkim tempie powiększały swoją ofertę technologiczną i potencjał sprzętowy. Towarzyszył temu proces wymiany norm krajowych na zgodne z systemem norm europejskich.

Współczesne żelbetowe pale prefabrykowane

Spośród stosowanych w praktyce światowej pali prefabrykowanych (rys. 2, str. 43) żelbetowych, sprężonych, stalowych i drewnianych w Polsce do fundamentowania obiektów trwałych na dużą skalę wykorzystywane są praktycznie wyłącznie pale żelbetowe. W ograniczonym zakresie i w większości do podparcia konstrukcji tymczasowych wykorzystywane są pale stalowe w formie rur, grodzic, dwuteowników szerokostopowych lub fundamentowych. W Polsce aktualnie praktycznie nie wykorzystuje się pali drewnianych.

W dalszej części artykułu pojęcie „pale prefabrykowane” stosowane jest w odniesieniu do pali prefabrykowanych żelbetowych.

Na rysunku 4 (str. 43) przedstawiono schemat pojedynczego pala prefabrykowanego z opisem poszczególnych jego części i charakterystycznymi wymiarami. Współczesne pale prefabrykowane mają z reguły przekrój kwadratowy i wymiary przekroju poprzecznego w zakresie od 200 mm do 400 mm, zmieniające się co 50 mm. Stosunkowo rzadko wykorzystywane są pale o większych przekrojach poprzecznych, tj. 450 mm, 500 mm i więcej, lub o innych kształtach (okrągłe, rurowe, sześcioboczne lub trójkątne). Charakterystycznymi cechami współczesnej technologii pali prefabrykowanych odróżniającymi ją od pierwowzoru Hennebique'a są:

- przemyśły charakter produkcji prefabrykatów z wysokiej klasy materiałów: beton min. C40/50 i zbrojenie klasy min. „b” o $f_y = 500$ MPa;
- możliwość szybkiego łączenia prefabrykatów w trakcie wbijania na budowie (złącza mechaniczne);
- płaska podstawa pala;

– nowoczesny i wysoko wydajny sprzęt do wbijania pali;

– nowoczesne metody projektowania, badania nośności i kontroli jakości.

Podstawowe zalety pali prefabrykowanych nie zmieniły się od czasu pierwszego ich zastosowania (Jaromniak A. i in.: *Pale i fundamenty palowe*. Arkady, Warszawa 1976). Spośród nich należy wymienić:

- prostotę wykonania;
- niezdeformowane zbrojenie, umieszczone centrycznie i zabezpieczone otuliną przed korozją;
- formowanie odbywa się w warunkach sprzyjających uzyskaniu betonu dobrej jakości – szczelnego, o wymaganej wytrzymałości, a jakością betonu można łatwo skontrolować;
- nie ma niebezpieczeństwa wyplukania lub wylugowania cementu z mieszanki betonowej przez wodę gruntową;
- pale prefabrykowane wytrzymują bez uszkodzeń ciężkie warunki wbijania;
- małe niebezpieczeństwo przerwania trzonu pala w wykonywaniu grup palowych;
- możliwość ponownego wbijania, gdy zostały uniesione gruntem wypieranym wskutek zagłębienia w nim grupy pali;
- nieograniczoną trwałość przy obciążeniach siłami osiowymi w środowiskach nieagresywnych względem betonu;
- możliwość obciążenia od razu po wbiciu;
- są szczególnie przydatne przy posadowieniu budowli w wodzie, gdy trzony pali mają wystawać ponad dno;
- szybkie wykonawstwo;
- w wielu przypadkach zaletą pali prefabrykowanych staje się zmniejszenie zakresu prac w miejscu budowy fundamentu.



Fot. 4.



Fot. 5.



Fot. 6.

Fot. 4. Wbijanie pali prefabrykowanych pod słupy nowej sieci trakcyjnej na linii kolejowej tódź – Kuluszki

Fot. 5. Fundament palowy zbiornika oczyszczalni ścieków Pomorzany w Szczecinie (projektant: K. Gwizdała, Gdańsk)

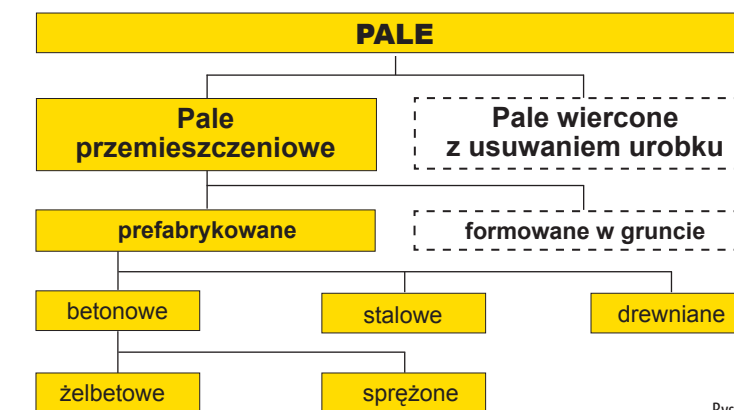
Fot. 6. Fundament palowy wieży turbiny wiatrowej w Orzechowicach (projektant: D. Sobala)

Żelbetowe pale prefabrykowane, pierwotnie wzorowane na palach drewnianych, przez długi okres wyposażane były w ostrza. Współczesne doświadczenia wynikające z wieloletniego stosowania technologii pozwoliły na rezygnację z tego kłopotliwego w prefabrykacji elementu. Płaska podstawa zapewni lepsze prowadzenie pala w gruncie w trakcie wbijania i zwiększa odporność trzonu na uszkodzenia przy pokonywaniu ewentualnych przeszkód. Prostopadłościenny kształt pala prefabrykowanego w połączeniu ze stosowaniem jednakowego zbrojenia na całej długości trzonu pozwala uniknąć pomyłek polegających na wbiciu prefabrykatu „niewłaściwym końcem”. Zarówno głowica, jak i spód pala są jednakowo wzmocnione przez zagęszczenie rozstawu strzemion (spiral) i ewentualne zastosowanie dodatkowego zbrojenia głowicy/spodu pala. Warto w tym miejscu podkreślić, że inaczej niż w wypadku pali wierconych definiowana jest długość całkowita pala, która w palach prefabrykowanych obejmuje długość czynną pala (w gruncie) oraz długość zakotwienia w zwieńczeniu. Pale prefabrykowane w odróżnieniu od pali wierconych obmiarowuje się zgodnie z zasadami stosowanymi dla prefabrykatów, a więc w sztukach pali o określonych parametrach przekroju poprzecznego, długości i powierzchni zbrojenia, a nie w metrach bieżących, jak w wypadku pali formowanych w gruncie.

Materiały i rozwiązania konstrukcyjne prefabrykatów palowych

Dostępne obecnie w Polsce rozwiązania konstrukcyjne i materiałowe typowych prefabrykatów palowych można scharakteryzować w następujący sposób:

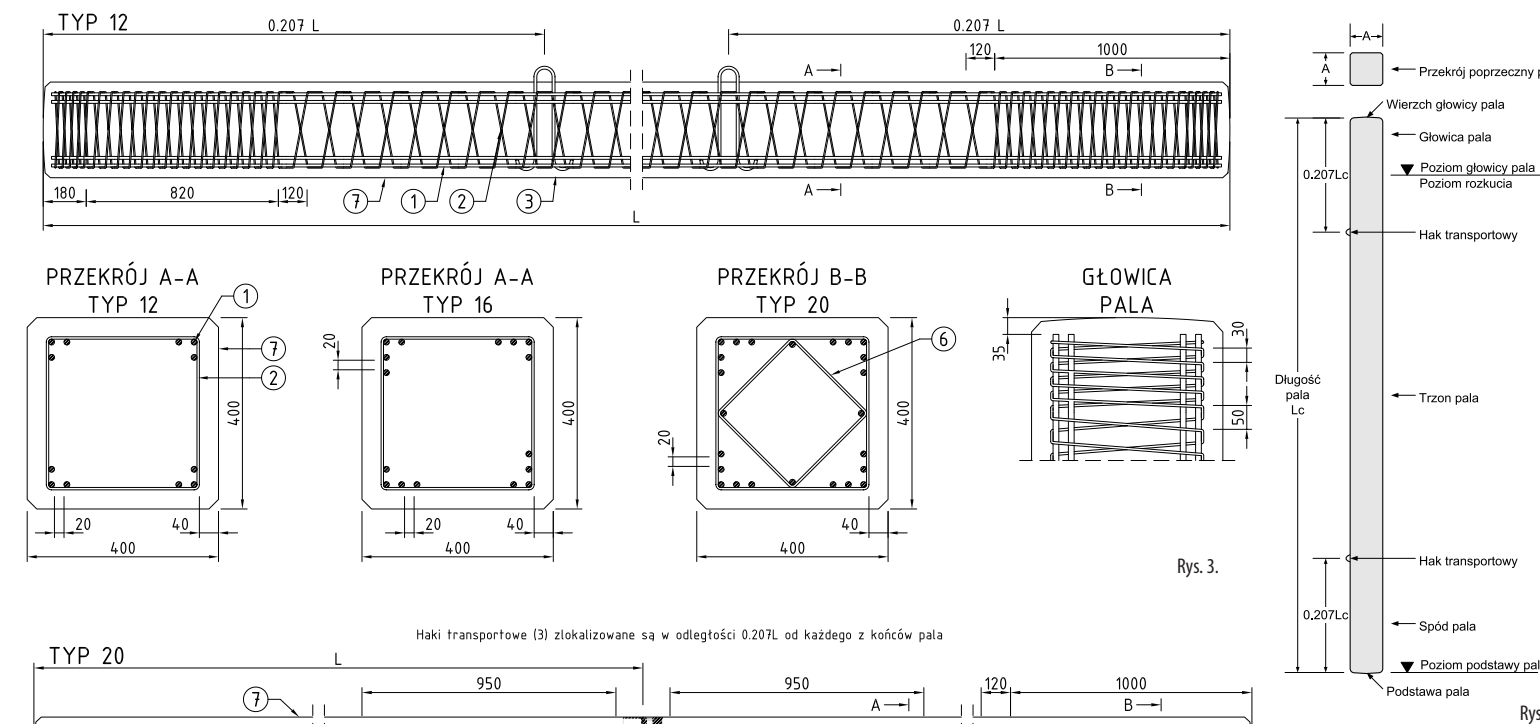
- przekrój poprzeczny trzonu pala – kwadratowy, o wymiarze boku od 200 mm do 400 mm ze skokiem co 50 mm;
- beton pala min. C40/50 (B50) ze zbrojeniem klasy min. „b” o wytrzymałości $f_y = 500$ MPa;
- otulina zbrojenia min. 40 mm;
- liczba prętów zbrojenia głównego w przekroju poprzecznym pala – min. 4 szt.;
- maksymalna dopuszczalna rozwarłość $rys \leq 0,3$ mm;
- odporność na działanie czynników agresywnych¹ – wszystkie klasy agresywności środowiska z wyjątkiem środowisk silnie agresywnych chemicznie XA2 i XA3, które zazwyczaj wymagają modyfikacji podstawowego rozwiązania konstrukcyjnego przez zastosowanie cementu HSR;
- minimalna wymagana trwałość – min. 50 lat (budownictwo ogólne) lub min. 100 lat (np. mosty);
- maksymalne długości pojedynczych prefabrykatów:
 - 75 x wymiar boku pala – ograniczenie normatywne smukłości elementu;



Rys. 2.

Fundament	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Wg projektu podstawowego								
Liczba pali [szt.]	34	42	45	45	45	45	40	34
Długość pali w [m]	12	12	13	11	13	12	11	9
Wg zrealizowanej wersji projektu								
Liczba pali [szt.]	34	42	45	45	45	45	45	34
Długość pali [m]	19	42	42	45	13	16	13	13
Różnica pomiędzy projektem podstawowym i ostatecznie zrealizowanym								
w liczbie pali [szt.]	0	0	0	0	0	0	5	0
w długości pojedynczych pali w [m]	7	30	29	34	0	4	2	4

Tabela 1. Porównanie długości pali projektowanych i ostatecznie zainstalowanych – estakada E w Międzyzdrojach



Rys. 3.

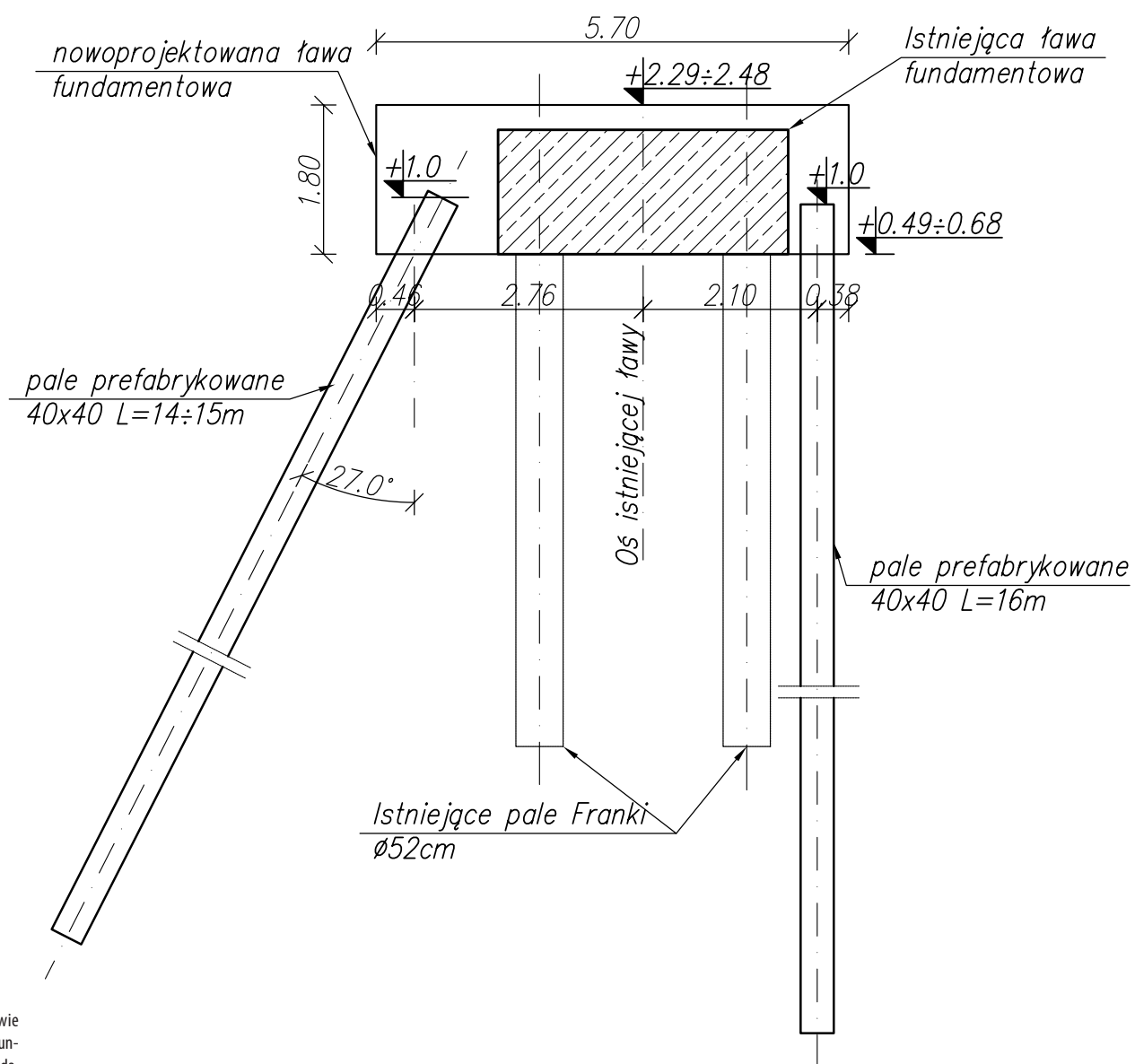
Rys. 5.

Rys. 4.

- 21 m – ograniczenie wynikające z możliwości typowych kafarów;
 - 18 m – ograniczenie wynikające z długości typowych form do produkcji prefabrykatów;
 - 15 m – ograniczenie wynikające z długości skrajni transportowej²;
 - maksymalna długość pali w gruncie – teoretycznie bez ograniczeń, w praktyce większość fundamentów na palach prefabrykowanych wykorzystuje pale o długości całkowitej ≤ 30 m;
 - wszystkie wymagania aktualnych rozporządzeń i norm PN-EN 12794: *Prefabrykaty betonowe. Pale fundamentowe*, dotyczące wytwarzania i stosowania prefabrykatów palowych, m.in. podwyższona wodoszczelność;
 - (W8), bardzo mała nasiąkliwość;
 - (< 5%), wysoka mrozoodporność (F150) oraz wykonanie z mieszanki betonowej na bazie kruszywa łamanego.
- Możliwe są modyfikacje typowego rozwiązania konstrukcyjnego pala prefabrykowanego w zakresie:
- zmiany klasy betonu lub/i stali zbrojeniowej na wyższą;
 - zwiększenia grubości otuliny;
 - zmiany składu mieszanki betonowej, np. zastosowanie cementu HSR;
 - zmiany rodzaju zbrojenia (np. na zbrojenie ze stali nierdzewnej, powleczonej żywicą epoksydową, itp.);

- zastosowanie dodatkowych powłok, np.:
 - specjalnej powłoki bitumicznej nakładanej na powierzchnię betonu pala w strefie występowania gruntów słabych w celu zmniejszenia wpływu tarcia negatywnego na pobocznicę;
 - uszczelnienie wgłębne betonu przez hydrofobizację powierzchni zewnętrznej w strefie występowania określonych czynników agresywnych;
 - uszczelnianie powierzchni betonu przez nakładanie powłok zewnętrznych (najczęściej z żywicy epoksydowej) odpornych na uszkodzenia w trakcie wbijania;
 - zabezpieczanie zbrojenia przed betonowaniem pala przez nakładanie powłok antykorozyjnych (np. z żywicy epoksydowej lub powłok metalowych);
 - zastosowanie dodatków do mieszanki betonowej (np. płynnych lub lotnych inhibitorów korozji);
 - zastosowanie złączek o większej liczbie elementów łączących;
 - zastosowanie większej liczby lub/i przekroju prętów zbrojeniowych;
 - wzmocnienie/okucie stopy lub/i głowicy pala przy ciężkim wbijaniu, np. w grunty skaliste;
 - zamontowanie w palu instalacji geotermalnej, ochrony katodowej itp.
- Kosze zbrojeniowe do prefabrykatów palowych mogą być wykonywane ręcznie lub automatycznie. W wypadku

Rys. 2. Uproszczona klasyfikacja pali
Rys. 3. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego pala pojedynczego ze zbrojeniem montowanym ręcznie
Rys. 4. Schemat pojedynczego żelbetowego pala prefabrykowanego
Rys. 5. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego pala ze złączką i zbrojeniem wykonanym w automacie zbrojarskim



Rys. 6. Estakady Bielańskie w Warszawie – schemat wzmocnienia istniejącego fundamentu przyczółka (projektant: K. Sahajda, Aarsleff Sp. z o.o.)

Rys. 6.

► montażu ręcznego zbrojenia wymaganą powierzchnię zbrojenia uzyskuje się przede wszystkim przez zmianę średnicy prętów, a następnie przez zmianę ich liczby w przekroju poprzecznym. W wypadku zbrojenia wykonywanego automatycznie stosuje się na zbrojenie główne wyłącznie pręty o średnicy 12 mm, a wymaganą powierzchnię zbrojenia uzyskuje się przez zmianę liczby prętów. Stosowane są również rozwiązania mieszane, polegające na wykonaniu szkieletu zbrojenia w automacie zbrojarskim i dozbrojeniu go ręcznie prętami o większej średnicy.

Zakres stosowania pali prefabrykowanych

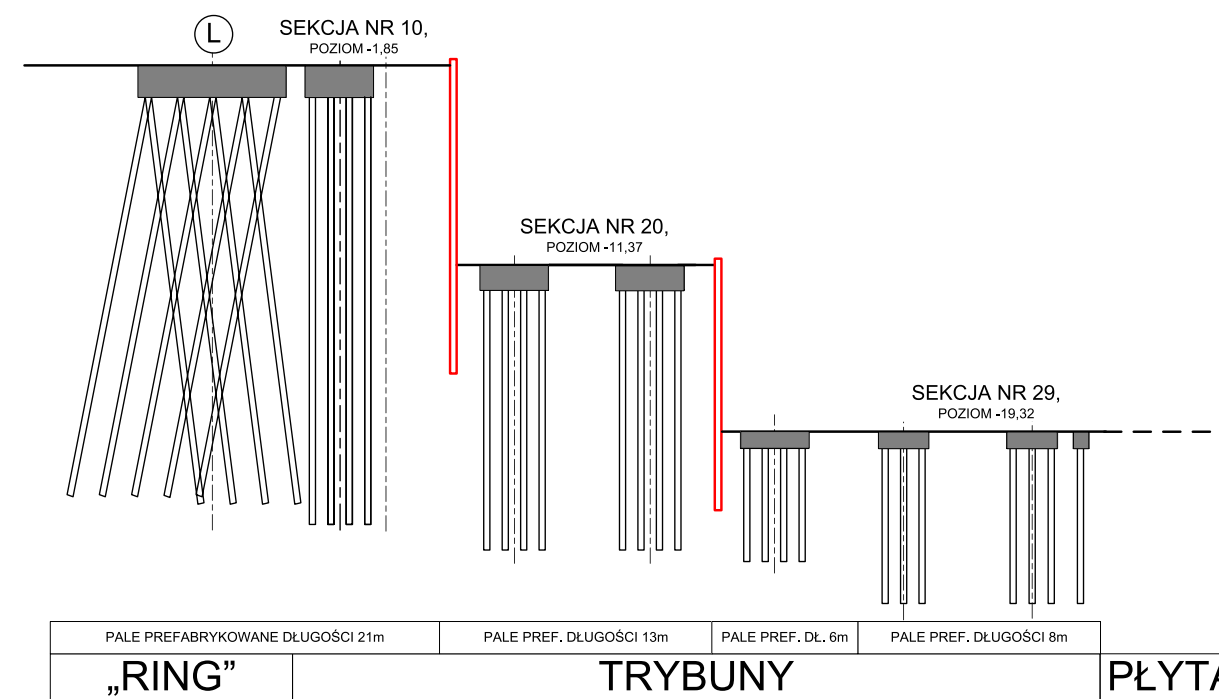
Pale prefabrykowane znajdują bardzo szerokie zastosowanie. Poniższa lista zawiera całe grupy obiektów, w których posadowieniu na palach prefabrykowanych pośrednio lub bezpośrednio brał udział autor:

- obiekty komunikacyjne: fundamenty nasypów, mosty, wiadukty, estakady, kładki dla pieszych, przepusty, przejścia dla zwierząt i różnego rodzaju konstrukcje oporowe;
- nabrzeża portowe i elementy ich wyposażenia (np. dalki cumownicze);
- obiekty mieszkalne jedno- i wielorodzinne;
- obiekty kubaturowe przemysłowe, handlowe, sakralne i sportowe;

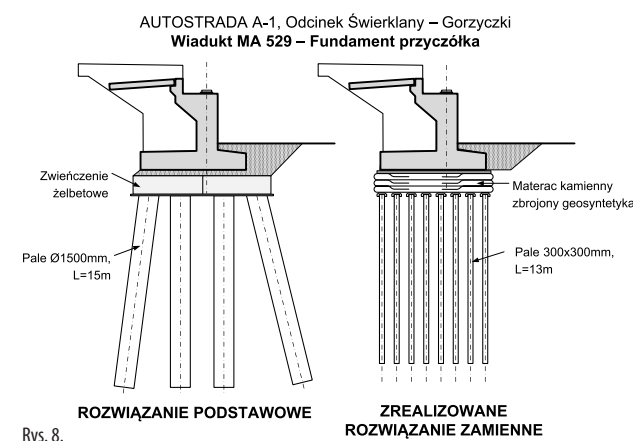
- różnego typu zbiorniki;
- elektrownie wiatrowe, kominy, wieże przemysłowe, słupy energetyczne, oświetleniowe, reklamowe i wieże telefonii komórkowej, maszty i anteny satelitarne;
- ciężkie maszyny i ciągi technologiczne;
- stacje transformatorowe;
- żurawie stacjonarne;
- ekrany akustyczne i słupy kolejowej sieci trakcyjnej;
- różnego typu konstrukcje tymczasowe (np. podpór tymczasowych do budowy obiektów mostowych) itp.

Przedstawione poniżej przykłady fundamentów, zilustrowane fotografiami lub/i rysunkami, opisują aktualne możliwości i wyzwania, jakim może sprostać współczesna technologia pali prefabrykowanych:

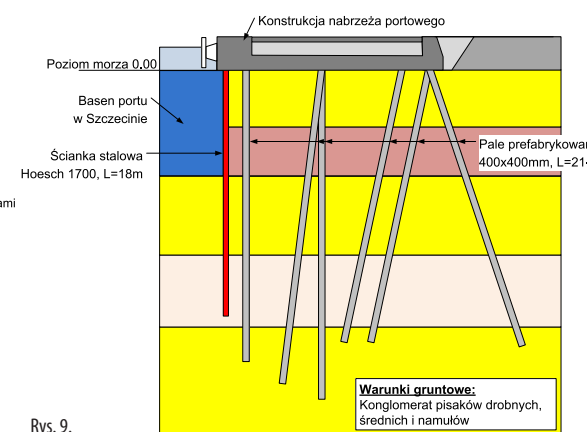
- **produkcja pali i organizacja robót palowych:**
 - fundamenty Stadionu Narodowego w Warszawie, gdzie w ciągu 109 dni roboczych zainstalowano blisko 9000 sztuk pali prefabrykowanych o długości od 6 m do 27 m (rys. 7), osiągając wydajności przekraczające 2000 mb. dziennie;
- **możliwości technologiczne:**
 - fundamenty estakady E w Międzyzdrojach, gdzie ze względu na różnice w rozpoznanych i rzeczywistych warunkach gruntowych na jednej z podpór zamiast pali o długości 11 m wbito pale o długości całkowitej 45 m (tab. 1, str. 43);



Rys. 7.



Rys. 8.



Rys. 9.

Rys. 7. Typowy układ fundamentów na palach prefabrykowanych w przekroju jednej z trybun Stadionu Narodowego w Warszawie (projektant: M. Matejko i M. Wesoły, Matejko & Wesoły, Wrocław)
Rys. 8. Schemat rozwiązania posadowienia obiektu na szkodach górniczych z projektu podstawowego i zamiennego (projektant fundamentu zamiennego: W. Tomaka, Aarsleff Sp. z o.o.)
Rys. 9. Przekrój typowy nabrzeża w porcie w Szczecinie posadowionego na palach prefabrykowanych (projektant: Bimor, Szczecin)

- fundamenty filarów nurtowych mostów przez Odrę i Regalicę (rzeki żeglowne), gdzie zainstalowano pale prefabrykowane o długości 21 m i 24 m w wodzie o głębokości 6-14 m (fot. 3, str. 41);
- wzmocnienie istniejących fundamentów przyczółków Estakad Bielańskich, w których wykorzystano m.in. pale prefabrykowane o przekroju 400 mm x 400 mm, długości 14-15 m, pochylone 27°;
- słupy kolejowej sieci trakcyjnej, gdzie kafar zlokalizowanych na początku zestawu do potokowej wymiany sieci trakcyjnej – pozwala to kompleksową wymianę sieci trakcyjnej o wydajności dochodzącej do 1000 mb. dziennie;
- projektowanie:
 - fundamenty turbin wiatrowych, których projektowanie wymaga uwzględnienia aspektów dynamicznych i zmęczeniowych;
 - fundamenty obiektów na szkodach górniczych prezentujące odmienną od zazwyczaj stosowanej filozofii projektowania, polegającą na stosowaniu pali podatnych w miejsce sztywnych pali wielośrednicowych;
 - fundament palowy nabrzeża w porcie w Szczecinie wykorzystujący swobodę kształtowania grup palowych z prefabrykatów;
- trwałość i ograniczenie osiadań obiektów:
 - fundamenty oczyszczalni ścieków Pomorzany zlokalizowanej w znacznej części na wysypisku śmieci oraz

budowanej w reżimie bardzo małych osiadań całkowitych (maks. 8-12 mm) i małej różnicy osiadań poszczególnych obiektów. Warto podkreślić, że realizacja ww. fundamentów w warunkach gospodarki rynkowej była możliwa przy spełnieniu dodatkowego i z reguły nadrzędnego kryterium efektywności ekonomicznej.

Podsumowanie

Technologia żelbetowych pali prefabrykowanych pozwala na szybkie i bezpieczne wykonanie fundamentów praktycznie każdej konstrukcji. Świadczą o tym liczne i różnorodne, zakończone sukcesem realizacje wykorzystujące szeroki zakres przekrojów poprzecznych i długości prefabrykatów. Technologia, pomimo stosunkowo sędziwego wieku, ma się dobrze. Również perspektywy dla pali prefabrykowanych są w Polsce dobre. W porównaniu z innymi krajami podobnej wielkości w Europie Polska w dziedzinie fundamentowania wciąż stanowi rynek rozwijający się, który nie jest jeszcze ostatecznie ukształtowany. O udziale w nim pali prefabrykowanych decydują, tak jak w wypadku Hennebique'a, zakończone sukcesem liczne realizacje. □

Dziękuję firmie Aarsleff Sp. z o.o. za udostępnienie zdjęć i innych materiałów wykorzystanych w artykule.

Piśmiennictwo dostępne w redakcji.

¹ Szczegółowe omówienie zagadnienia trwałości w odniesieniu do pali prefabrykowanych można znaleźć w powszechnie dostępnym artykule: Czarnecki L., Piotrowski T.: *Trwałość żelbetowych pali fundamentowych*, „Materiały Budowlane”, 2/2008.
² W praktyce, ze względu na wysokie koszty transportów ponadnormatywnych, pale o długości całkowitej > 14 m zaleca się projektować jako łączone.