

#PALE PREFABRYKOWANE  
#OBIEKTY KOMUNIKACYJNE

## Posadowienie obiektów komunikacyjnych na palach prefabrykowanych

dr inż. Dariusz Sobala

materiał z:  
Wrocławskich Dni Mostowych  
Duże mosty wieloprzęsłowe. Projektowanie,  
technologie budowy, monitoring  
Wrocław, 29-30 listopada 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

Dariusz SOBALA<sup>1</sup>

## POSADOWIENIE OBIEKTÓW KOMUNIKACYJNYCH NA PALACH PREFABRYKOWANYCH

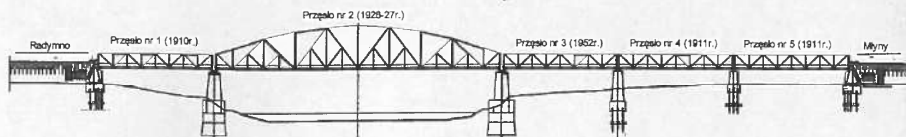
### 1. Wprowadzenie

Pale prefabrykowane (wraz z fundamentami bezpośrednimi) stanowią niewątpliwie fundament naszej cywilizacji. Są wykorzystywane przez człowieka nieprzerwanie od co najmniej 6000 lat. Przez zdecydowaną większość tego okresu wykorzystywane były pale drewniane. Dopiero na początku XIX wieku rozpoczęto stosowanie pali żelaznych, a następnie – wraz z rozwojem metalurgii – pali stalowych. Jednak o faktycznej rewolucji w technologii pali prefabrykowanych wbijanych możemy mówić dopiero od czasu wykorzystania przez Francois Hennebique'a żelbetu jako podstawowego materiału konstrukcyjnego pala. Francois Hennebique opatentował je w 1896 r. we Francji i rok później w Wielkiej Brytanii, ale nie był bynajmniej pierwszym, ani tym bardziej jedynym ich wynalazcą. Przed nim analogiczny patent zgłosił i uzyskał Philip Brannon już 1871 roku. Cóż z tego jednak, skoro jego pomysł nie został prawdopodobnie nigdy wykorzystany w praktyce. Równoległe z systemem Hennebique'a stosowane były inne ówczesne systemy pali prefabrykowanych pełnych Coigent'a (patent francuski z 1894 r. oraz brytyjski z 1906 r.) i Considere'a (1902) oraz systemy pali z drażonymi trzonami, np. Mouchela (1907) [1]. Jednak to pale Hennebique'a stały się trwałym i istotnym elementem świadomości inżynierów i historii budownictwa, ponieważ w tej branży oprócz genialnego pomysłu potrzebna jest skuteczność potwierdzona wieloma aplikacjami.

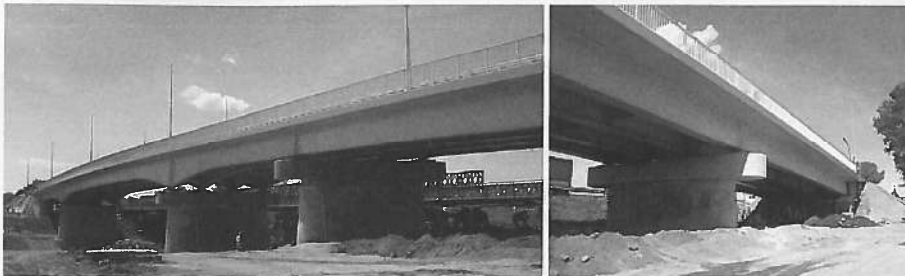


Rysunek 1. Stary most przez San w Radymnie w ciągu obecnej DK 4

<sup>1</sup> dr. inż., Zakład Dróg i Mostów, WBIŚiA Politechnika Rzeszowska, Aarsleff sp. z o.o.



Rysunek 2. Schemat konstrukcji starego mostu przez San w Radymnie z wiekiem poszczególnych przęseł (młodsze odbudowywane) oraz rozwiązaniem konstrukcyjnym fundamentów poszczególnych podpór



Rysunek 3. Stare podpory nowego mostu przez San w Radymnie – w fundamentach wykorzystano istniejące studnie i pale prefabrykowane

Na tle zastosowań światowych bardzo intrygująco wygląda historia pali prefabrykowanych na ziemiach polskich. W latach 1902–1907 r. z użyciem pali prefabrykowanych  $0,3 \times 0,3$  m wykonane zostały fundamenty podpór zalewowych mostu przez San w Radymnie (rys. 1–3). Po odkopaniu pali podczas przebudowy obiektu w 2002 roku stwierdzono, że są one w bardzo dobrym stanie i wykorzystano je w nowym moście drogowym klasy B zlokalizowanych w ciągu DK94. Sprawdzona w rzeczywistych warunkach użytkowania trwałość żelbetonowych pali prefabrykowanych w tym obiekcie przekracza aktualnie 110 lat. Trudno o lepsze referencje.

Katalog dostępnych rozwiązań konstrukcyjnych pali prefabrykowanych uzupełniły ok. 1930 roku pale sprężone. Współcześnie stosowane są również na małą skalę pale prefabrykowane zespolone (złożone z dwóch różnych materiałów konstrukcyjnych, np. górą żelbetowe a dołem stalowe lub odwrotnie) i kompozytowe (pale z tworzyw sztucznych).

Do podstawowej, geotechnicznej funkcji pała prefabrykowanego próbuje się z sukcesami dodawać również inne funkcje, np. wymiennika energii.

W mostownictwie wykorzystuje się efektywnie wszystkie rodzaje pali prefabrykowanych.



Rysunek 4. Uproszczona klasyfikacja pali

Współczesne pale prefabrykowane należą do grupy pali przemieszczeniowych (rys. 4) pograżanych w gruncie bez wydobywania urobku metodą wbijania, wibrowania, wciskania lub/i wkręcania. Pograżanie pali prefabrykowanych wymaga użycia kafara lub dźwigu, młota, wibromłota, prasy hydraulicznej lub głowicy obrotowej, a czasem także wspomaganie wstępnym przewiercaniem, przebijaniem lub podpłukiwaniem (najczęściej wodą pod wysokim ciśnieniem). Pod względem materiałowym pale prefabrykowane dzielimy na drewniane, stalowe, betonowe (żelbetowe lub sprężone) oraz kompozytowe. Pale prefabrykowane mogą mieć przekrój pełny (np. kwadratowy, sześcioboczny, okrągły, X, Z, U, H), rurowy, skrzynkowy lub stanowić kombinację wielu przekrojów.

Pale prefabrykowane projektowane są w zakresie technologicznym, obejmującym produkcję, składowanie, transport i pograżanie, konstrukcyjnym (STR) oraz geotechnicznym (GEO).

Przemieszczeniowy charakter pali prefabrykowanych zapewnia im relatywnie wyższe opory jednostkowe wzdłuż pobocznic i pod stopą (nośność geotechniczną) oraz sztywność w porównaniu do geometrycznie podobnych pali wierconych (beprzemieszczeniowych, wykonywanych z usuwaniem urobku).

Do dnia dzisiejszego, pomimo intensywnego rozwoju technologii pali wierconych i przemieszczeniowych formowanych w gruncie, pale prefabrykowane są podstawową technologią posadowienia głębokiego w wielu krajach (np. pale stalowe i żelbetowe prefabrykowane w krajach skandynawskich), podczas gdy w innych (m.in. w Polsce) stanowią jedną z wielu wykorzystywanych technologii palowych.

W zależności od rozwiązania konstrukcyjnego prefabrykatu pała możemy rozróżnić pale wywołujące duże (np. pale drewniane, żelbetowe pełne, rurowe z dnem zamkniętym) lub małe (dwuteowniki typu H, X, grodzice, rury z dnem otwartym, przekroje złożone) przemieszczenia gruntu. W określonych warunkach gruntowych pale prefabrykowane wywołujące na początku procesu pograżania małe przemieszczenia gruntu wraz z rosnącym zagłębieniem mogą przekształcać się w pale wywołujące duże przemieszczenia – np. pale rurowe z dnem otwartym, grodzice lub pale typu H, w których w trakcie pograżania wytworzył się korek gruntowy. Zjawisko to można efektywnie wykorzystać w projektowaniu pali w zależności od dominującego kryterium projektowego: nośności lub głębokości pograżenia pała.

## 2. Badania pali prefabrykowanych

Wymagania dotyczące badań pali, w tym pali prefabrykowanych, zostały ogólnie opisane w normie PN-EN 1997-1 p. 7.5. W normie określono precyzyjnie sytuacje, w których próbne obciążenia muszą być wykonywane. Są to rzadkie przypadki stosowania nowych rodzajów pali, nietypowych warunków gruntowych lub obciążeń, dla których brak jest doświadczeń porównywalnych. Norma określa także sytuacje, w których próbne obciążenia mogą być wykonywane. Są to:

- ocena przydatności metody wykonania,
- określenie zachowania reprezentatywnego pała i otaczającego go gruntu pod obciążeniem w zakresie osiadania i obciążenia granicznego,
- oceny całego fundamentu palowego.

Próbne obciążenia są wykorzystywane również do weryfikacji wyników palowania w przypadku stwierdzenia występowania istotnych, odbiegających od dotychczasowych doświadczeń, nieprawidłowości w trakcie robót palowych. W takiej sytuacji, przed decyzją o przeprowadzeniu próbnego obciążenia statycznego, wymagane jest m.in. wykonanie

uzupełniających badań podłoża i analiz ukierunkowanych na identyfikację przyczyn powstania problemu, a próbne obciążenie traktowane jest jako ostateczność.

W normie PN-EN 1997-1 zostały wymienione dwie metody badań nośności pali: statyczna i dynamiczna (rys. 5). W kontekście metody statycznej badań pali wymienione zostały dwa rodzaje pali przeznaczonych do badań: próbne i konstrukcyjne. Pale próbne bada się statycznie na potrzeby projektowania przed palowaniem zasadniczym. Celem badania statycznego na palu próbnym jest określenie rzeczywistego obciążenia granicznego pala. Liczba pali próbnych badanych statycznie powinna zależeć od warunków gruntowych i ich zmienności w obszarze palowania, kategorii geotechnicznej, dotychczasowych doświadczeń z analogicznym rodzajem pali wykonywanych w podobnych warunkach gruntowych oraz całkowitej liczby pali i liczby rodzajów pali w fundamencie. Decyzja w zakresie potrzeby wykonywania, liczby i rodzaju próbnych obciążeń powinna za każdym razem brać kompleksowo pod uwagę ww. czynniki.

W przypadku pali prefabrykowanych podstawowym rodzajem badań są badania dynamiczne, czyli:

- analiza wpędów z wykorzystaniem wzorów dynamicznych nieuwzględniających lub uwzględniających skrócenie sprężyste trzonu pala lub/i
- badania dynamiczne przy dużych odkształceniach gruntu wokół pala towarzyszących jego przemieszczeniom wywołanym uderzeniem młota/bijaka, analizowane najczęściej metodami CASE lub/i CAPWAP.

Wykorzystanie analizy wpędów możliwe jest w zasadzie wyłącznie w gruntach sypkich z wykorzystaniem wzorów sprawdzonych w warunkach lokalnych – w Polsce warunek ten w najszerszym zakresie spełnia formuła duńska, czyli wzór dynamiczny z normy PN-83/B-02384. Z kolei wykorzystanie badań dynamicznych przy dużych przemieszczeniach uwarunkowane jest korelacją z wynikami badania statycznego przeprowadzonego na analogicznym palu w podobnych warunkach gruntowych. Funkcję badania korelacyjnego często spełnia badanie statyczne przeprowadzone w obrębie wykonywanego fundamentu palowego, ale również wartościowe są archiwalne wyniki badań spełniających normowe warunki podobieństwa pali i warunków gruntowych.

W analizie wyników próbnych obciążeń wykorzystuje się współczynniki korelacyjne, których wartości, charakteryzujące dokładność poszczególnych metod badań, zostały podane w normie PN-EN 1997-1.



Rysunek 5. Badania nośności pali statyczne (po lewej), dynamiczne przy dużych odkształceniach z wykorzystaniem kafara (w środku) i z wykorzystaniem bijaka urządzenia przenośnego (po prawej)

### 3. Współczesne wymagania normowe dotyczące pali prefabrykowanych

Współcześnie pale prefabrykowane powinny być projektowane, produkowane i pogrążane zgodnie z wymaganiami Eurokodów. Procesy produkcji i wykonawstwa fundamentów z wykorzystaniem pali prefabrykowanych są w Polsce realizowane z powodzeniem zgodnie z wymaganiami Eurokodów od ponad 20-stu lat. Jedynie projektowanie konstrukcyjne (STR) i geotechniczne (GEO) realizowane jest w praktyce dwutorowo, tj. zarówno według norm europejskich PN-EN i norm z serii PN, wycofanych z katalogu Polskich Norm. Warto podkreślić, że w przypadku pali prefabrykowanych korzystne jest stosowanie jednolitych, spójnych i jednocześnie racjonalnych wymagań norm europejskich, co nie wyklucza możliwości wykorzystania dotychczasowego dorobku i doświadczeń krajowych.

Tablica 1. Normy dotyczące pali prefabrykowanych

Pal	Produkcja/ obróbka	Projektowanie			Wykonawstwo robót palowych
		Konstrukcyjne (STR)	Technologiczne (STR)	Geotechniczne (GEO)	
Drewniany	–	PN-EN 1995-1-1			PN-EN 12699
Stalowy	PN-EN 10248-1 PN-EN 10210-1	PN-EN 1993-5			PN-EN 12699 PN-EN 12063
Betonowy (żelbetowy lub sprężony)	PN-EN 12794	PN-EN 1992-1-1	PN-EN 1992 PN-EN 12794	PN-EN 1997	PN-EN 12699

### 4. Pale drewniane

Cechy prefabrykatów drewnianych, takie jak mały ciężar, relatywnie wysoka wytrzymałość drewna, łatwość obróbki, naturalna zbieżność i niska cena powodują, że mogłyby być one szeroko wykorzystywane w fundamentach konstrukcji tymczasowych i technologicznych. Ze względu na najwyższe spośród wszystkich pali walory ekologiczne, po odpowiednim doborze gatunku drewna, jego zabezpieczeniu lub/i ukształtowaniu fundamentów (pale trwałe bez zabezpieczenia powinny być w całości zlokalizowane pod poziomem wody gruntowej), możliwe jest ich wykorzystanie w obiektach trwałych. Znanych jest wiele przykładów obiektów posadowionych na palach drewnianych, które prawidłowo funkcjonują od tysięcy lat. Istotnym ograniczeniem dla stosowania pali drewnianych w Polsce jest brak zorganizowanego rynku prefabrykatów palowych, a tym samym łatwo dostępnej dla projektantów i wykonawców informacji na temat dostępnych aktualnie przekrojów, długości i klasy bali drewnianych. Podstawową metodą pogrążania pali drewnianych jest wbijanie (rys. 6). Wykorzystuje się do tego celu kafary z młotami wolnospadowymi, hydraulicznymi lub spalinowymi o małym i średnim ciężarze/energii wbijania. Znane są również przypadki wykorzystania wibratorów do pogrążania pali drewnianych.

Pale drewniane są wykorzystywane do fundamentowania pomostów trwałych (rys. 6 i 7) i tymczasowych, podpór tymczasowych w korytach rzek lub w innych zbiornikach wodnych, obiektów mieszkalnych lub/i komercyjnych zlokalizowanych nad lustrem wody, a także do budowy ostróg i falochronów.



Rysunek 6. Wbijanie pali drewnianych pod pomosty rekreacyjne na jeziorze Krzywe w Olsztynie z wody przy użyciu kufara na platformie pływającej (po lewej) i z łądy przy użyciu młota na ramieniu koparki (po prawej)



Rysunek 7. Wbijanie pali drewnianych pod trwałe pomosty rekreacyjne dla pieszych



Rysunek 8. Wbijanie rur stalowych pod pomost spacerowy na jeziorze Chełmżyńskim przy użyciu kufara na platformie pływającej

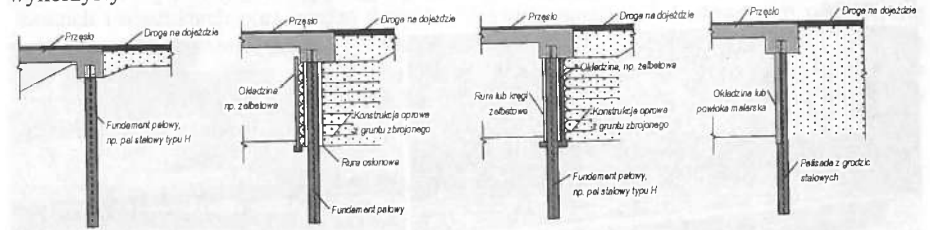
## 5. Stalowe pale prefabrykowane



Rysunek 9. Zespólny most zintegrowany posadowiony na palach stalowych fundamentowych typu H, Wólka Niedźwiecka, woj. Podkarpackie

Pale stalowe wykorzystywane w mostownictwie to grodzice, pale typu H (w tym specjalne kształtowniki palowe powszechnie wykorzystywane w Stanach Zjednoczonych AP), rury oraz kształtowniki typu X wykorzystywane głównie w krajach skandynawskich. Z pojedynczych profili stalowych (np. grodzic) możliwe jest kształtowanie prefabrykatów o przekrojach złożonych, np. pali skrzynkowych lub układów kombinowanych. Pale rurowe, grodzice i pale skrzynkowe z grodzic są często wykorzystywane do posadowienia obiektów tymczasowych i technologicznych. Pale stalowe współcześnie są najczęściej kojarzone z robotami palowymi w wodzie.

Wykorzystane, umożliwiają pograżenie i odzyskanie materiału po przewidywanym okresie użytkowania. Ma to także niebagatelne znaczenie ekologiczne, ponieważ współcześnie produkowana stal wytwarzana jest głównie ze złomu, a ponadto elementy używane, które utrzymują wymagane tolerancje mogą być i są współcześnie wykorzystywane na równi z elementami nowymi (recykling materiałowy/konstrukcyjny).



Rysunek 10. Schematy przyczołków zintegrowanych na palach prefabrykowanych stalowych

Grodzice stalowe, w postaci palisad stalowych, znajdują coraz szersze zastosowanie do posadowienia tymczasowych i trwałych obiektów mostowych. Buduje się z nich przyczołki tymczasowe i trwałe wspornikowe lub kotwione. Szczególne zalety ten rodzaj posadowienia wykazuje w trwałych obiektach zintegrowanych (rys. 9–13) budowanych w ciągu istniejących szlaków komunikacyjnych metodą „top&down”, gdzie wymagana jest wysoka podatność na wymuszone przemieszczenia termiczne przy jednoczesnym zachowaniu cech tymczasowej i trwałej konstrukcji oporowej i fundamentu głębokiego (palowego).



Rysunek 11. Miejski wiadukt zintegrowany budowany metodą „top&down” posadowiony na grodzicach stalowych, Rzeszów



Rysunek 12. Wiadukt zintegrowany w ciągu al. Krakowskiej w Rzeszowie z grodzicami bez okładziny

W konstrukcjach zintegrowanych najbardziej efektywne jest wykorzystanie wbijanych kształtowników typu H obróconych sztywniejszą osią prostopadłą do osi obiektu (rys. 13) lub wyżej opisanych rozwiązań na grodzicach. Kształtowniki mogą stanowić podparcie korpusów przyczołków żelbetowych (zwykle o małej wysokości konstrukcyjnej)

lub zostać „zatopione” w konstrukcji z gruntu zbrojonego w sposób umożliwiający swobodne przemieszczenia termiczne końców przęsła i głowic pali, które na długości swobodnej tworzą rodzaj wahacza konstrukcyjnego. Stosunkowo wysoki koszt jednostkowy stali w fundamentach takich obiektów rekompensowany jest z nawiązką ograniczonymi wymiarami fundamentu, ograniczoną liczbą lepiej wykorzystanych pali, oszczędnościami materiałowymi w podporach (mniejsze zużycie materiałów) i technologicznymi (mniej etapów budowy). Obiekt tego rodzaju buduje się ponadto zdecydowanie szybciej od obiektów tradycyjnych. Coraz większego znaczenia dla Inwestorów publicznych nabiera również bezobsługowy charakter zbudowanego obiektu bez łożysk i urządzeń dylatacyjnych, co znakomicie obniża koszty eksploatacji, a tym samym koszt całkowity obiektu liczony w cyklu życia. Warto dodać, że idea mostów zintegrowanych, w tym wykorzystujących fundamenty stalowe, nie jest nowa. Na ziemiach polskich (np. w Policach) jeszcze do niedawna w eksploatacji znajdowały się obiekty tego typu zbudowane przed II Wojną Światową.



**Rysunek 13.** Zintegrowany most drogowy w Bałtowie posadowiony na prefabrykowanych palach stalowych z kształtowników HEB



**Rysunek 14.** Molo w Międzyzdrojach na monopalach rurowych – monopale wibrowane przy użyciu dźwigu z platformy pływającej stabilizowanej na dnie morza

Wciąż niedoceniane w krajowym mostownictwie są rozwiązania fundamentów obiektów mostowych wykorzystujących monopale, czyli pojedyncze pale rurowe o dużych i bardzo dużych średnicach (rys. 14). Są to bardzo atrakcyjne rozwiązania integrujące fundament i filar, szczególnie filar nurtowy lub wykonywany przy ograniczonym dostępie do terenu. Warto wspomnieć, że na świecie stosuje się w mostownictwie monopale o średnicy kilku metrów, a w jednym z morskich mostów chińskich wykorzystano fundamentowy prefabrykat stalowy o średnicy, bagatela, 34m. Opór wobec stosowania molopali może po części wynikać z ryzyka geotechnicznego, jakie jest związane ze stosowaniem pojedynczego elementu oraz ograniczonymi możliwościami potwierdzenia jego bardzo dużej, wymaganej nośności oraz często wyrażanych wątpliwości dotyczących trwałości stali w gruncie. Współczesne metody badań nośności pali oraz możliwość stosowania różnorodnych zabezpieczeń antykorozyjnych likwidują te obawy:

- wykorzystanie metod dynamicznych pozwala na oszacowanie nośności monopala bez konieczności ponoszenia dużych kosztów z wystarczającą dokładnością,
- w normie PN-EN 1993-5 podano metody zapewnienia trwałości elementom stalowym w gruncie przez stosowanie odpowiednich powłok lub, co jest zdecydowanie łatwiejsze, wiarygodne oszacowanie ubytków korozyjnych i zastosowanie nadatków materiałowych.

W kraju wykorzystanie monopali w mostownictwie ma charakter incydentalny. Do pogrążania monopali wykorzystuje się duże młoty hydrauliczne lub spalinowe (najczęściej montowane na monopalu) lub wibratory.

## 6. Żelbetowe pale prefabrykowane

Żelbetowe pale prefabrykowane w fundamentach podpór stałych i tymczasowych obiektów mostowych tworzą obecnie najszerszy obszar zastosowań technologii pali prefabrykowanych. Pozwalają na kompleksową realizację robót palowych w różnych warunkach gruntowych i lokalizacyjnych: na lądzie, z ładu, z tymczasowych grobli lub platform pływających w wodzie lub z wody na lądzie. Ponadto pozwalają te roboty wykonać niezwykle szybko. Skala obiektu mostowego nie ma przy tym większego znaczenia: żelbetowe pale prefabrykowane wykorzystywane są w kładkach, typowych mostach i wiaduktach oraz bardzo dużych obiektach mostowych budowanych przez Wisłę (np. most w Krakowie w ciągu S7, Połańcu, Toruniu oraz w Kieźmarku w ciągu S7) i Odrę (np. mosty przez Odrę i Regalicę w Szczecinie, estakady dojazdowe do mostu Rędzińskiego). W podporach nurtowych dużych mostów wykorzystywane są bardzo często fundamenty zespolone złożone z pali prefabrykowanych, grodziec i zasypek piaskowych.

### 6.1. Fundamenty podpór stałych i tymczasowych

Większość fundamentów obiektów mostowych wykonywanych z użyciem prefabrykatów realizowana jest na żelbetowych palach prefabrykowanych wbijanych o przekroju 400×400mm. Na zdjęciu (rys. 15) pokazano typowy ruszt palowy pod filar dużego obiektu lub przyczółek masywny. Pokazany na rys. 16 rozległy fundament dużego mostu autostradowego w wykorzystaniem pali prefabrykowanych stanowi jedynie przykład wielu podobnych obiektów zbudowanych w ciągu ostatnich lat i budowanych obecnie (np. most podwieszony przez Wisłę w Krakowie).



**Rysunek 15.** Typowy fundament palowy podpory mostowej z żelbetowych pali prefabrykowanych wbijanych



**Rysunek 16.** Fundament palowy mostu autostradowego przez San w ciągu A-4

Interesujące jest wykorzystanie żelbetowych pali prefabrykowanych w fundamentach podpór tymczasowych wykonywanych w korytach rzek i zbiornikach wodnych. Dobrym przykładem wykorzystania prefabrykatów są rozwiązania fundamentów podpór tymczasowych dużego mostu drogowego o konstrukcji podwieszanej przez Wisłok i zbiornik wody technologicznej elektrociepłowni w Rzeszowie. Podpory stałe mostu (przyczółka, filary i pylon) zostały również posadowione na żelbetowych palach prefabrykowanych. Fundamenty podpór tymczasowych stanowiły efektywną ekonomicznie

kontynuację palowania pod podpory stałe, zrealizowaną w zdecydowanie trudniejszych warunkach: podpory stałe zostały zlokalizowane na lądzie, podpory tymczasowe w zdecydowanej większości w wodzie.

Decyzja o wykorzystaniu żelbetowych pali prefabrykowanych w fundamentach mostu i konstrukcji tymczasowych w opisanych warunkach gruntowych podyktowana była:

- wysoką wydajnością robót palowych w przyjętej technologii;
- możliwością efektywnego przenoszenia obciążeń na grunt zarówno w warunkach wciskania jak i wyciągania;
- pozytywnymi doświadczeniami wynikającymi z szerokiego wykorzystania technologii w warunkach gruntowych Podkarpacia (autostrada A4, droga ekspresowa S19, farmy wiatrowe);
- możliwością łatwej, bieżącej kontroli efektów prowadzonych robót palowych;
- możliwością kompleksowego rozwiązania różnych problemów posadowienia, w tym wynikających z lokalizacji w wodzie.



Rysunek 17. Palowanie fundamentów podpór tymczasowych w korycie Wisłoka [5] z tymczasowej grobli przy użyciu kafara z młotem hydraulicznym

W korycie Wisłoka palowanie fundamentów dwóch podpór tymczasowych wykonano z tymczasowej grobli ziemnej (rys. 17). Górną jej powierzchnię wzmocniono płytami drogowymi. Pale zwieńczono żelbetowym oczepem monolitycznym, na którym zbudowano podporę z typowych klatek. Grobla tymczasowa została rozebrana. Podpory wykonano jesienią, a montaż (nasuwanie) przesła – jesienią i zimą. Ze względu na zagrożenie ewentualnym lodochoodem przed podporą tymczasową pograżono rury stalowe pełniące rolę izbicy. Zaletą tego rozwiązania była możliwość pełnego odzysku konstrukcji izbicy, która znajdowała się poza obrysem konstrukcji montowanego mostu. Po nasunięciu stalowej konstrukcji przesła rozebrano podpory tymczasowe. Oczep żelbetowy i górne odcinki pali zostały odcięte na poziomie dna rzeki i poddane utylizacji. Rozwiązanie przeszło pozytywną weryfikację technologiczną i ekonomiczną na kontrakcie „projektuj i buduj”.

Z kolei w zbiorniku Elektrociepłowni Rzeszów powstał problem zapewnienia szczelności po wykonaniu palowania dna zbiornika wykonanego z geomembrany. Spośród rozwiązań: na rurach i pełnych palach żelbetowych wybrano rozwiązanie na prefabrykatkach żelbetowych ze względu na ograniczenie potencjalnych miejsc przecieku do powierzchni zewnętrznej prefabrykatów. Palowanie wykonano z platformy pływającej przy użyciu żelbetowych pali prefabrykowanych o przekroju 400x400 mm i długości 18m (a więc także

przy użyciu pali łączonych). W omawianym przypadku pojęcie „platforma pływająca” jest bardzo adekwatne. Ze względu na konieczność ochrony dna zbiornika. Kotwienie zrealizowano przy użyciu odciągów linowych, które spełniły swoje zadanie, ale nie zapewniły stabilności platformy.



Rysunek 18. Wbijanie pali w fundamentach podpór tymczasowych w zbiorniku elektrociepłowni Rzeszów; gotowe podpory tymczasowe w zbiorniku Elektrociepłowni Rzeszów [5]

Brak stabilnej platformy generuje dodatkowe problemy technologiczne, które zostały pośrednio ujęte w normie [3]. Tolerancje wykonania/wbicia pali w wodzie należy uzgodnić przed rozpoczęciem robót, ponieważ normy wykonawcze nie określają ściśle tolerancji dotyczących wykonania pali w takich warunkach. Uzyskiwana dokładność wbicia zależy od możliwości zapewnienia stabilności platformy, przyjętej technologii robót, głębokości wody oraz warunków gruntowych w dnie zbiornika/rzeki, ale także od umiejętności i doświadczenia wykonawcy robót palowych. Palowanie w wodzie wymaga zdecydowanie lepszego przygotowania, wariantowego planowania z dużym wyprzedzeniem i uwzględnieniem alternatywnych sposobów postępowania w zmieniających się warunkach realizacji robót. Celem jest minimalizacja przestojów, które w robotach palowych na wodzie są bardzo kosztowne.

## 6.2. Fundamenty zespolone

W praktyce, w miejsce prostych układów technologiczno-konstrukcyjnych coraz częściej są stosowane struktury złożone. W niniejszym artykule nazwano je fundamentami zespolonymi. Przykładami takich z pozoru skomplikowanych fundamentów są, budowane w sąsiedztwie toru wodnego, zespolone fundamenty podpór nurtowych mostów przez Odrę i Regalicę w Szczecinie, fundamenty podpory środkowej łukowego mostu drogowego przez Wisłę w Toruniu oraz fundament/konstrukcja staw nawigacyjnych na torze wodnym północnym przy dojściu do portu w Świnoujściu. Skomplikowanie w tego rodzaju fundamentach z reguły dotyczy struktury wewnętrznej – zewnętrznie przypominają one konstrukcją duże monopale, kesony lub grodze.

### Fundamenty zespolone mostów przez Odrę i Regalicę w Szczecinie

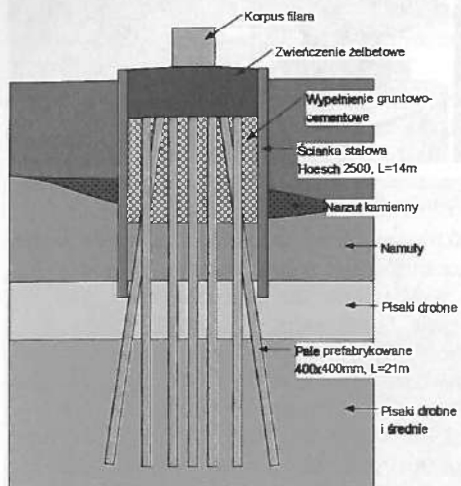
Pod względem wykonawczym najprostszym spośród wyżej wymienionych były fundamenty podpór nurtowych mostów przez Odrę i Regalicę (rys. 19 i 20), budowane przy torze wodnym, który zapewniał pływalność platform roboczych.

Fundamenty zespolone składały się w tym przypadku z układu prostych i pochylonych żelbetowych pali prefabrykowanych wbitych w dno rzeki, obudowy z grodziec stalowych, podwodnego wypełnienia obudowy mieszaniną piasku i cementu oraz zwieńczenia żelbetowego, w którym zakotwiono jednocześnie grodziec i pale bez konieczności ich rozkucia. Podpora zlokalizowana przy torze wodnym musi zapewniać



odpowiednią odporność na uderzenia jednostek pływających, co uzyskano przez wykonanie masywnego fundamentu zespolonego.

Niespodzianką była, niedoszacowana na etapie projektowania, głębokość wody w rejonie palowania, co wymusiło dokonanie zmian konstrukcyjno-technologicznych pali prefabrykowanych żelbetowych (łączenie pali przed wbiciem), a także zaleganie w dnie niewybuchów i przeszkód w postaci elementów zniszczonych wcześniej przęsł starych mostów. Roboty zrealizowano przy asyście nurków, z platformy roboczej pływającej i kotwionej w dnie rzeki za pomocą opuszczanych szcudeł.



Rysunek 19. Schemat podpory mostu

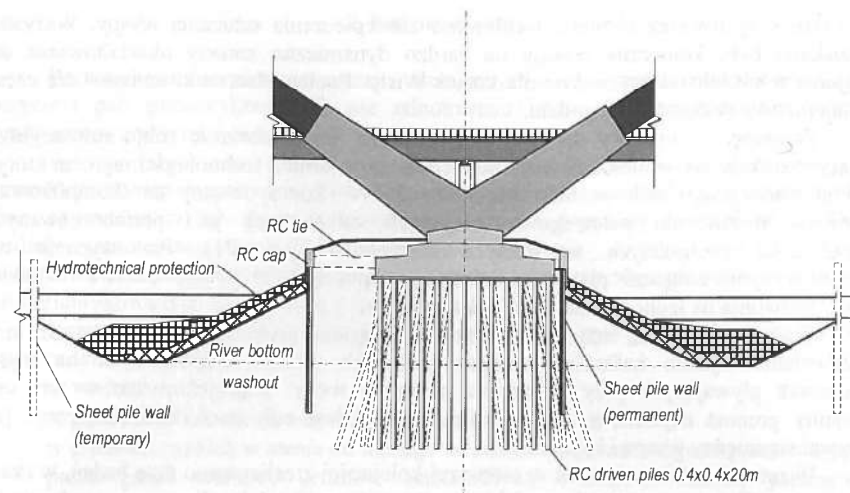


Rysunek 20. Wykonany fundament

### Fundament zespolony podpory nurtowej łukowego mostu drogowego przez Wisłę w Toruniu

Wykorzystując doświadczenia z wykonania trudnych technicznie fundamentów dwóch dużych mostów drogowych przez Odrę i Regalicę w Szczecinie projektanci firmy PONT-PROJEKT z Gdańska zaprojektowali fundament jednego z największych miejskich drogowych obiektów mostowych w Polsce i Europie. Łuki toruńskiego mostu łączą brzegi Wisły z wykorzystaniem naturalnej łachy piasku przekształconej w sztuczną wyspę, na której wykonano zespolony fundament podpory pośredniej. Na brzegach rzeki zlokalizowano zespolone fundamenty palowo-ściankowe przenoszące jednocześnie duże obciążenia pionowe i jeszcze większe siły poziome. Roboty fundamentowe z wykorzystaniem grodzic stalowych i żelbetowych prefabrykowanych pali wbijanych i towarzyszące robotom projekty technologiczne wykonała firma AARSLEFF.

Efektywne wykorzystanie pali prefabrykowanych w fundamentach bardzo dużego mostu łukowego bez ściągu jest niewątpliwym osiągnięciem technicznym i stanowi potwierdzenie udokumentowanych w tradycji budownictwa dużych możliwości żelbetowych prefabrykowanych pali wbijanych.



Rysunek 21. Schemat ideowy fundamentu palowego podpory środkowej



Rysunek 22. „Domykanie” obudowy wyspy – wibrowanie grodzic przy użyciu kafara na platformie pływającej



Rysunek 23. Wyspa po zakończeniu robót palowych

Projekt mostu aktywnie wykorzystał charakterystykę naturalnego koryta Wisły w przekroju mostowym na potrzeby budowy podpory środkowej. Sztuczna wyspa (rys. 23) powstała przez obudowanie grodzicami stalowymi naturalnej łachy piasku zlokalizowanej na środku koryta rzeki. Grodzice, ze względu na zmienne stany wody w korycie Wisły, musiały być wykonywane ze specjalnej platformy pływającej, która w trakcie pograżania grodzic była stabilizowana w dnie podporami szcudłowymi (rys. 22). Wyporność platformy umożliwiła realizację robót palowych przy użyciu wibratora zamontowanego na maszcie ciężkiego kafara. Wibrowanie grodzic przy użyciu takiego zestawu sprzętowego zapewniło większą dokładność pograżenia grodzic, co ma szczególnie duże znaczenie w robotach prowadzonych z wody.

Wibrowaniu grodzic z pływającej platformy roboczej towarzyszyły roboty refulacyjne zapewniające utrzymanie żeglowności technologicznej koryta rzeki (minimalna wymagana głębokość umożliwiająca realizację robót to ok. 1,2 m) oraz zabezpieczenie wykonanej obudowy przed podmyciem. W ramach tych prac wykonano m.in. dodatkową ściankę z grodzic stalowych stanowiącą osłonę (izbicę) tymczasową dla budowanej wyspy (rys. 23) oraz wypełniano lokalnie powstające rozmycia workami wypełnionymi piaskiem,

które stanowiły również element docelowego zabezpieczenia sztucznej wyspy. Wszystkie te działania były konieczną reakcją na bardzo dynamiczne zmiany ukształtowania dna w rejonie robót, charakterystyczne dla koryta Wisły. Poziom dna rzeki zmieniał się często o kilka metrów w ciągu kilku godzin.

Zamknięcie obudowy stalowej pozwoliło na kontynuowanie robót refulacyjnych mających na celu wypełnienie komory do pierwszego poziomu technologicznego, na którym zamontowano ściągi stalowe. Ich układ musiał być skoordynowany ze skomplikowaną geometrią fundamentu palowego z wbijanych żelbetowych pali prefabrykowanych, w większości pochylonych w różnych kierunkach (rys. 21). Po usypaniu nad zamontowanymi ściągami platformy roboczej rozpoczęły się roboty palowe. Wielkość wyspy pozwoliła na jednoczesną pracę kilku kufarów.

Ważnym zadaniem inżynierskim było rozwiązanie problemów logistycznych, m.in. umożliwienie wjazdu kufarów, dźwigów i innych maszyn budowlanych na wyspę z jednostek pływających przy zmiennym poziomie wody. Zaprojektowano w tym celu specjalny pomost najazdowy, który później obsługiwał cały ruch technologiczny, jaki odbywał się między wyspą i lądem.

W ramach robót palowych w pierwszej kolejności zrealizowano fazę badań, w czasie której zweryfikowano założenia projektowe dotyczące nośności pali oraz sprawdzono ich pogrążalność. Analiza pogrążalności uwzględniała konieczność wbicia dużej liczby pali w ograniczonej przestrzeni wyspy bez nadmiernych odkształceń obudowy i przeciążenia ściągów tymczasowych. Palowaniu zasadniczemu musiało towarzyszyć, nieuniknione w takiej sytuacji i zakładane w projekcie, dogęszczanie piasków i ujednoczenie warunków posadowienia podpory środkowej.

### 6.3. Posadowienie nasypów komunikacyjnych na głębokich torfowiskach

Do najbardziej spektakularnych przykładów zastosowania pali prefabrykowanych w budownictwie komunikacyjnym należą posadowienia nasypów komunikacyjnych zlokalizowanych na głębokich torfowiskach (rys. 24). Ze względu na niskie wytrzymałości gruntów organicznych, często spotykane w tych warunkach środowisko agresywne oraz praktyczny brak możliwości wykorzystania technologii pali formowanych w gruncie, najczęściej do posadowienia nasypów wykorzystywane są żelbetowe pale prefabrykowane o przekroju  $0,3 \times 0,3$  m lub  $0,4 \times 0,4$  m. Jednym z ostatnio zrealizowanych projektów jest posadowienie odcinka drogi ekspresowej S5 koło Gniezna długości 311 m i szerokości do 55 m na torfowisku o głębokości dochodzącej do 17 m, w którym wykorzystano blisko 120 km pali o przekroju  $0,3 \times 0,3$  m.



Rysunek 24. Palowanie pod nasyp drogi ekspresowej S5 koło Gniezna



Rysunek 25. Żelbetowy pal prefabrykowany z końcówką skalną wbijany w fundamentach obiektu mostowego w Suchej Beskidzkiej

## 7. Podsumowanie

Przy wykonaniu opisanych wyżej i wielu innych fundamentów obiektów mostowych z użyciem pali prefabrykowanych nie odnotowano istotnych problemów technicznych wynikających z przyjętej technologii.

Pale prefabrykowane mogą być stosowane praktycznie w każdych warunkach gruntowych występujących na terenie kraju, za wyjątkiem skał twardych, gruntów sypkich silnie zgrzeszczonych lub gruntów spoistych o bardzo wysokiej wytrzymałości. Dobre rezultaty odnotowano także w przypadku stosowania prefabrykatów w wysoce niejednorodnych skałach miękkich fliszu podkarpackiego przy wykorzystaniu żelbetowych pali prefabrykowanych ze specjalną końcówką skalną (rys. 25).

Najwyższą efektywność techniczną i ekonomiczną pale prefabrykowane uzyskują w przypadku palowania:

- w wodzie;
- w gruntach silnie agresywnych lub skażonych chemicznie;
- w gruntach sypkich w stanie od luźnego do średnio zagęszczonego/zagęszczonego;
- przez grube warstwy gruntów słabonośnych o bardzo niskich parametrach wytrzymałościowych (torfy, gytie, namuły), w których prawidłowe wykonanie pali formowanych w gruncie jest w praktyce bardzo trudne lub wręcz niemożliwe,
- w warunkach napiętego zwierciadła wody gruntowej,
- w podporach mostowych wymagających znacznej podatności poziomej (przyczółki zintegrowane),
- wzmocnień istniejących lub wadliwie wykonanych fundamentów palowych oraz
- w obiektach mostowych budowanych metodą „top&down”.

Pale prefabrykowane to sprawdzona, wydajna, mało skomplikowana, efektywna ekonomicznie, odporna na błędy wykonawstwa i łatwa do nadzoru i kontroli technologia palowania. Pale prefabrykowane charakteryzują się relatywnie wysokimi nośnościami i sztywnościami. Swoboda doboru odpowiedniego rozwiązania materiałowego, konstrukcyjnego i technologicznego czyni z pali prefabrykowanych jedną z najbardziej różnorodnych i atrakcyjnych technologii posadowienia dla obiektów mostowych. DRIVEN PILES ARE TESTED PILES, a reszta zależy wyłącznie od wiedzy i fantazji projektantów.

## Literatura

- [1] SUTHERLAND R. J. M., HUMM D., CHRIMES M., *Historic Concrete*. Thomas Telford, 2001.
- [2] PN-EN 1997-1 *Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne*.
- [3] SOBALA D., TOMAKA W., SZARO J., SOBCZAK S., *Żelbetowe pale prefabrykowane wbijane w fundamentach mostu łukowego przez Wisłę w Toruniu*. *Inżynieria i Budownictwo*, 6/2014.
- [4] PN-EN 12699 *Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych. Pale przemieszczeniowe*.
- [5] SOBALA D., TOMAKA W., SZARO J., MUCHALSKI R., *Żelbetowe pale prefabrykowane wbijane w fundamentach podpór stałych i tymczasowych mostu drogowego przez Wisłok w Rzeszowie*. WDM 2014.
- [6] SOBALA D., *Pale prefabrykowane w fundamentach mostów*. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 7–8/2011.
- [7] *Materiały archiwalne firmy Aarsleff sp. z o.o.*

- [8] PILARSKI T., SOBALA D., TOMAKA W., Nietypowe rozwiązania fundamentów na palach prefabrykowanych. Wzmacnianie podłoża gruntowego i fundamentów budowli. Seminarium IBDiM i PZWFS. Warszawa, 15 listopada 2007.
- [9] SOBALA D., TOMAKA W., MAKSIM P., Projekt i wykonanie podpór zintegrowanego wiaduktu drogowego z wykorzystaniem grodzic stalowych. s. 89–98. Seminarium „Konstrukcje stalowe w geotechnice”, Warszawa, 18.11.2010.

## FOUNDATION OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE

### Summary

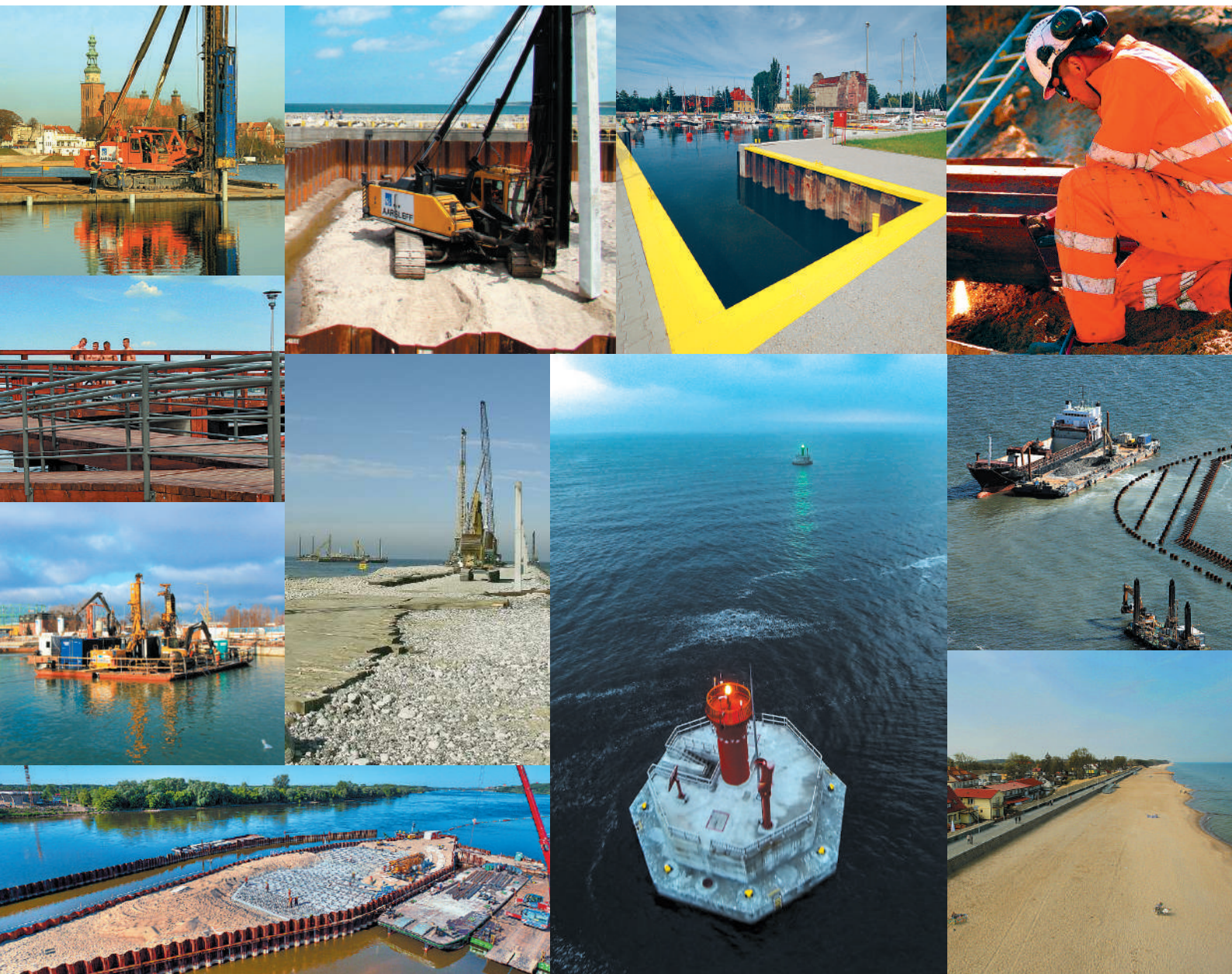
The paper presents a history and overview of the current applications of the precast pile technology in Poland's transport infrastructure.

The contemporary methods of applications of timber, steel and reinforced concrete piles in bridge structures are discussed.

It appears that currently the widest scope of applications have precast reinforced concrete piles driven with pile drivers with hydraulic hammers. They are driven for smaller engineering structures, such as acoustic screens and masts of traction power network as well as the largest bridges over the Vistula and Oder erected in Poland over the recent years.

The growth in the precast pile technology applications is accompanied by extensive development of efficient design methods and pile capacity monitoring, directly related to the implementation of Eurocodes, in particular Eurocode 7.





Aarsleff → na zdjęciach  
 budownictwo mieszkaniowe, budowa moła w Chełmży, budowa Marina Royale  
 kubaturowe, przemysłowe, w Darłowie, marina w Elblągu, fragment moła w Nleporęciu, budowa  
 hydrotechniczne, kolejowe, falochronu w Śwnoujściu, Bałtyk — stawy nawigacyjne, budowa  
 elektrownie wiatrowe, falochronu w Śwnoujściu, budowa Muzeum II Wojny Światowej  
 drogi i autostrady, obiekty w Gdańsku, budowa wyspy na Wiśle pod podporę mostu w Toruniu,  
 sportowe i rekreacyjne. 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 m<sup>2</sup> stalowych ścian szczelnych jako zabezpieczenie  
wykopów niezbędnych do przeprowadzenia przebudowy obiektu (FOT. EMIL123. WIKIMEDIA)