

Geotechnika partnerem okrętownictwa

Mgr inż. Marek Inerowicz¹, prof. dr hab. inż. Maciej Werno^{1,2},
mgr inż. Bożena Juskiewicz-Bednarczyk¹, inż. Maciej Lisowski³

¹Geostab Sp. z o.o., ²Politechnika Koszalińska Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji,
³Stocznia Crist S.A.

W 2012 roku Stocznia CRIST S.A. w Gdyni na zamówienie niemiecko-belgijskiej firmy HGO InfraSea Solution wykonała statek do budowy i utrzymania farm wiatrowych oraz innych specjalistycznych zadań dźwigowych (rys. 1). Jednostka ta otrzymała nazwę INNOVATION. W nomenklaturze *offshore* statki tego rodzaju są określane jako *HEAVY LIFT JACK-UP VESSEL (HLJV)*. W języku polskim należy rozumieć, że jest to samopodnoszący wielofunkcyjny statek z dźwigiem o dużej nośności.

Statek ten, o długości 147,5 m i szerokości 42,0 m ma cztery nogi o długości 89 m wraz z czterema niezależnymi mechanicznymi systemami podnoszenia składającymi się łącznie z dzie-

więćdziesięciu sześciu motoreduktorów umieszczonych wokół każdej nogi. Łączna nośność systemu podnoszenia statku wynosi 29950 ton w zakresie dopuszczalnej głębokości wody od 15 do 50 m. Nogi wykonane w postaci trzy-kolumnowej przestrzennej kratownicy ze stalowymi wielobryłowymi stopami są umieszczone w kierunku prostym przy burtach statku, a w kierunku podłużnym statku w miejscach wynikających z obciążeń pochodzących od ciężaru kadłuba wraz z ładunkiem.

Maksymalne wysunięcie nóg poniżej dna kadłuba wynosi 65 m, a dopuszczalną penetrację stóp w podłoże dna ograniczono do 5 m.



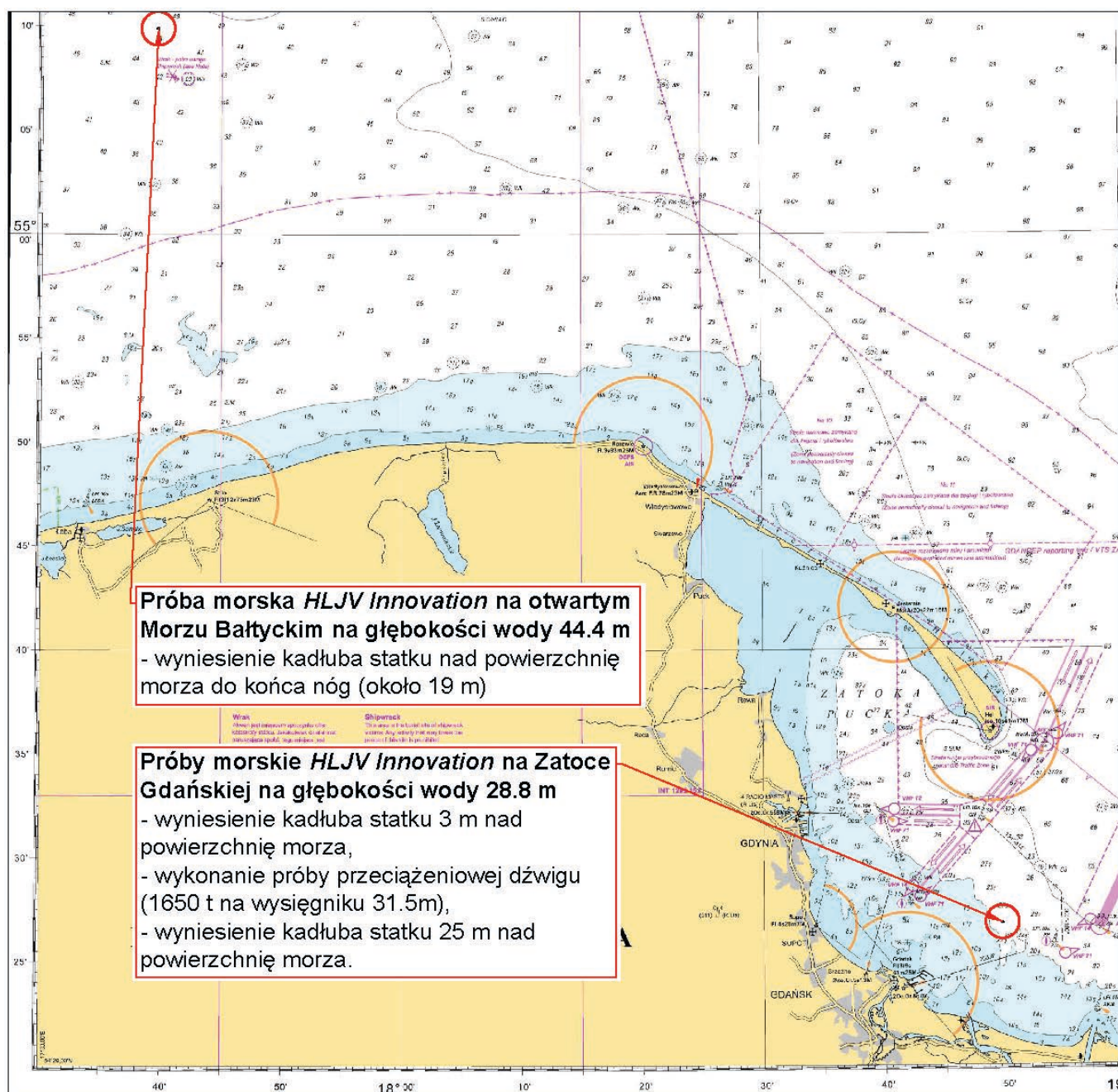
Rys. 1. Jednostka HLJV Innovation w trakcie montażu wiatraków na morzu

Stopy nóg są zbudowane z trzech brył o podstawach zbliżonych do trójkąta. Bryła środkowa o wysokości 0,7 m jest graniastostupem, bryły górna i dolna są w przybliżeniu ostrosłupami ściętymi o wysokości odpowiednio 1,6 m i 0,7 m.

Maksymalna pozioma powierzchnia przekroju stopy nogi wynosi około 141 m², a całkowita wysokość stopy 3 m.

Statek jest wyposażony w dźwig o nośności 1500 t przy wysięgniku 31,5 m operującym z maksymalnym dopuszczonym obciążeniem jedynie w czasie, gdy jednostka jest posadowiona na dnie oraz w stanie pływającym z ograniczaniem do 800 t. Dźwig jest osadzony obrotowo w pierścieniowym łożysku umieszczonym na rufowym korpusie systemu podnoszenia (prawa burta) w taki sposób, że noga statku może przemieszczać się swobodnie przez środek pierścienia, co pozwala operować dźwigiem wokół całego statku.

Jednostka *HLJV* jest zaprojektowana w taki sposób, aby obciążenie wstępne podłoża wykonać bez użycia dodatkowych balastów, poprzez naprzemienne obciążenie nóg, wykorzystując system podnoszenia kadłuba jednostki. Przed przekazaniem statku armatorowi Stocznia CRIST S.A była zobowiązana do przeprowadzenia szeregu prób morskich z jednostką posadowioną na pozycjach różniących się warunkami gruntowymi podłoża dna morskiego i głębokością wody. W tych warunkach z punktu widzenia konstrukcji statku istotne było sprawdzenie działania systemów podnoszenia statku. Biorąc pod uwagę wymagania prób morskich, GEOSTAB wytypował cztery miejsca. Wykorzystał do tego wiedzę własnego zespołu badawczego związaną z badaniami na morzu nabytą w czasie 34 lat pracy dotyczącej posadowienia konstrukcji pełnomorskich na potrzeby poszukiwania i wydobywania ropy i gazu na Południowym Bałtyku [5, 6, 7, 10].



Rys. 2. Lokalizacja prób morskich jednostki *HLJV Innovation* przeprowadzonych na Morzu Bałtyckim

Ostatecznie Stocznia wybrała następujące dwie lokalizacje na próby posadowienia statku na dnie morza (rys. 2):

- Lokalizacja „A” – Kotwiczowisko Nr 4, Zatoka Gdańska (podłoże piaszczyste, głębokość wody 28,8 m),
- Lokalizacja „B” – Morze Bałtyckie, 23 M na północ od Latarni Stilo (podłoże spoiste, głębokość wody 44,4 m).

POMIARY DNA I BADANIA GEOTECHNICZNE PODŁOŻA

Pomiary dna morskiego na obu lokalizacjach A i B wykonano na obszarze o promieniu około 100 m wokół planowanego miejsca próby posadowienia nóg statku. Pomiary batymetryczne wykonano przy użyciu echosondy wielowiązkowej, a pomiary ewentualnego zalegania obiektów ferromagnetycznych przy użyciu magnetometru. Do tego celu wykorzystano statek badawczy Instytutu Morskiego w Gdańsku r/v IMOR.

Pomiary pozwoliły ustalić głębokość wody, stwierdzić, że powierzchnia dna jest płaska i dno jest „czyste”, tzn. pozbawione jakichkolwiek wraków lub innych przeszkód, które mogłyby spowodować uszkodzenie lub zniszczenie stopy nóg podczas prób.

Badania geotechniczne na morzu wykonano również z pokładu statku r/v IMOR. W zakres tych badań wchodziło profilowanie sejsmoakustyczne przy użyciu aparatu *Boomer* w kilku przekrojach w celu określenia układu warstw gruntowych na obszarach planowanych prób. Ponadto dokonano poboru rdzeni gruntowych o średnicy 98 mm przy użyciu wibrosondy z miejsc, gdzie było przewidziane posadowienie nóg podczas prób w celu identyfikacji podłoża. W laboratorium GEOSTABU oznaczono parametry fizyczne i mechaniczne pobranych gruntów. Szczegółowe opisy sprzętu oraz procedur pomiarowych i badawczych, które zastosowano, zawarto w pracach [8, 9].

WARUNKI GEOTECHNICZNE

Do określenia warunków geotechnicznych wykorzystano wyniki wszystkich wykonanych badań na potrzeby prób podnoszenia oraz dodatkowo wyniki badań archiwalnych zrealizowanych przez LOTOS Petrobaltic i GEOSTAB w rejonie planowanych prób. W przypadku „A” były to badania wykonane w 2010 roku, a w przypadku „B” były to badania wykonane w 1994 roku, w odległości około 100 m na wschód od tych lokalizacji.

Lokalizacja „A”. Wykorzystano wyniki czterech archiwalnych wibrosond oraz trzech archiwalnych sondowań statycznych CPTU wraz z ich interpretacją. Otrzymane wytrzymałości na ścinanie bez odwodnienia C_u i kąty tarcia wewnętrznego porównano z wynikami oznaczeń laboratoryjnych (sondką laboratoryjną i w aparacie bezpośredniego ścinania) próbek z wibrosond pobranych z miejsc planowanego posadowienia fundamentów nóg statku. Generalnie można stwierdzić, że w miejscach tych od powierzchni dna występuje warstwa iltu z częściami organicznymi w stanie płynnym o miąższości do 1,1 m. Poniżej

występuje formacja czwartorzędowa w postaci piasków średnio zagęszczonych, miejscami z wkładkami międko plastycznego namułu i iltu.

Interpretacja sondowań CPTU wskazuje, że wytrzymałość na ścinanie wzrasta wraz z głębokością, podczas gdy procentowa zawartość laminacji organicznych w piaskach maleje, a w konsekwencji rośnie zagęszczenie. Praktycznie od głębokości 4,5 ÷ 5,1 m poniżej dna występują wyłącznie piaski zagęszczone.

Lokalizacja „B”. Wykorzystano wyniki czterech archiwalnych wibrosond oraz jednego wiercenia geotechnicznego. Na podstawie wszystkich wykonanych wyników badań stwierdzono, że wierzchnią warstwę o miąższości od 0,7 do 0,9 m stanowią piaski drobne i grube, pod którą zalega czwartorzędowa glina zwałowa o miąższości około 2,8 m w stanie od plastycznego do półzwałowego. Poniżej występują trzeciorzędowe piaski. Na głębokości około 5 m występuje strop sylurskich łożysk.

PROGNOZA PENETRACJI STÓP W PODŁOŻE

Prognozę penetracji stóp fundamentowych w zależności od wartości reakcji pionowej stóp fundamentowych opracowano niezależnie do każdej z czterech nóg przy przyjęciu następujących danych:

- profil podłoża dna morskiego przyjęty niezależnie do każdej nogi na podstawie najbliższych położonych archiwalnych punktów badawczych (wibrosond i sondowań CPTU),
- rzeczywisty kształt i wymiar stóp,
- własna autorska metoda szacowania penetracji stóp fundamentowych konstrukcji typu *jack-up*, dedykowana dla stóp fundamentowych statku *HLJV Innovation* (metoda opiera się na ogólnej [3] i zmodyfikowanej [4] formule nośności granicznej Brinch Hansena, poprawionej dla przypadku przebicia warstwy słabej (*punch through*) przez zastosowanie procedury Brown-Meyerhafa [1] i Hanna-Mayerhafa [2]).

Prognozy krzywych penetracji stóp dla obu lokalizacji przedstawiono na rys. 5 i 6 wraz z wynikami pomiarów prowadzonych w trakcie prób morskich.

PRÓBY PODNOSZENIA

Próby morskie związane z posadowieniem nóg jednostki na dnie i wyniesieniem kadłuba ponad powierzchnię morza miały głównie na celu:

- sprawdzenie sztywności strukturalnej kadłuba i nóg jednostki,
- sprawdzenie systemu podnoszenia kadłuba,
- przeprowadzenie prób nośności dźwigu zamontowanego na jednostce.

Próby te przeprowadzono dla dwóch ciężarów statku pokazanych w tabl. 1. Ciężar statku zmieniano przez jego balastowanie wodą morską.

Tabl. 1. Zestawienie parametrów

Parametry	Statek „lekki”	Statek „ciężki”
Ciążar całkowity jednostki [t]	29570	33949
Ciążar kadłuba z wyposażeniem (bez ciężaru nóg) [t]	25472	29851
Zanurzenie jednostki [m]	6.36	7.17

Sprawdzenie sztywności strukturalnej jednostki i systemu podnoszenia zaplanowano przeprowadzić dla skrajnego położenia kadłuba względem powierzchni morza lub spodu stóp fundamentowych w różnych warunkach gruntowych podłoża dna morskiego. Pierwszy przypadek (statek „lekki”) dotyczy wyniesienia kadłuba 25 m nad powierzchnię morza (maksymalna dopuszczalna wysokość), a drugi (statek „ciężki”) dotyczy wyniesienia kadłuba do końca nóg (65 m od spodu stóp fundamentowych do dna kadłuba). Spełnienie tych warunków wymagało przeprowadzenia prób podnoszenia kadłuba w dwóch lokalizacjach o różnych głębokościach morza, 28,8 m na Zatoce Gdańskiej i 44,4 m na Morzu Bałtyckim w odległości 23 mil na północ od latarni Stilo.

Próby przeciążeniowe nośności dźwigu zaprojektowano dla ciężaru 1650 t na wysięgniku 31,5 m oraz dla ciężaru 260 t na wysięgniku 103,5 m. Dźwig może operować jedynie wtedy, gdy jednostka jest posadowiona na dnie, a kadłub jest wynurzony z wody.

Każde wyniesienie kadłuba powyżej 1 m ponad powierzchnię morza lub planowane użycie dźwigu jest poprzedzone procedurą obciążenia wstępnego stóp fundamentowych. Polega ona na odciążeniu dwóch stóp znajdujących się po przekątnej statku, skutkiem czego większa część ciężaru kadłuba przenosi się na pozostałe stopy, co wywołuje znaczny przyrost obciążenia podłoża pod tymi stopami. Po określonym czasie powraca się do stanu równomiernego obciążenia wszystkich stóp, a następnie przenosi się obciążenie od ciężaru kadłuba na drugą (wcześniej odciążaną) parę stóp w analogiczny sposób, jak w przypadku pierwszej pary. Procedurę tę powtarza się kilkakrotnie, aż do uzyskania stabilizacji osiadania. Odciążana para stóp pełni funkcję zapewniającą utrzymanie jednostki w równowadze.

Na Zatoce Gdańskiej wykonano następujące próby morskie:

- podniesiono kadłub jednostki (statek „lekki”) na wysokość około 1,5 m nad powierzchnię morza; obciążenie wstępne wykonywano w trakcie wynurzania jednostki, a następnie po jej wynurzeniu; przebieg penetracji stóp jednostki przedstawiono na rys. 2.
- opuszczono kadłub do pozycji częściowo zanurzonej bez podnoszenia nóg i dobalastowano jednostkę do ciężaru odpowiadającego ciężarowi statku „ciężkiego”, a następnie po procedurze obciążenia wstępnego podniesiono kadłub na wysokość około 8 m nad powierzchnię morza (rys. 3).
- opuszczono kadłub na wysokość około 3 m nad powierzchnię morza i przeprowadzono próby nośności dźwigu głównego (rys. 4); jako ciężar 1650 t wykorzystano ponton wypełniony częściowo wodą, który przyho-

lowano z basenu stoczniowego w Porcie Gdynia; po zakończeniu badań nośności dźwigu kadłub opuszczono na wodę i po podciągnięciu nóg powrócono do portu.

- na lokalizacji przesuniętej około 50 m od pierwotnego miejsca prób, ze statkiem „ciężkim”, po wykonaniu obciążenia wstępnego z kadłubem wyniesionym nad powierzchnię morza ponad grzbiety fal wykonano próbę podniesienia kadłuba jednostki na wysokość 25 m nad powierzchnię morza.

Na otwartym Morzu Bałtyckim (lokalizacja „Stilo”) po wykonaniu obciążenia wstępnego ze statkiem „ciężkim” i przebalastowaniu statku do stanu „lekkiego” wykonano podniesienie kadłuba jednostki do końca nóg, co przy głębokości morza 44,4 m oznaczało podniesienie kadłuba około 19 m nad powierzchnię morza. Przebieg penetracji stóp fundamentowych jednostki w trakcie obciążenia wstępnego przedstawiono na rys. 6.

PORÓWNANIE PROGNOZY Z RZECZYWISTĄ PENETRACJĄ

Wynikiem prognozy penetracji stopy fundamentowej w podłożu dna morskiego jest nie tylko jej końcowa wartość, ale także ciągła zależność pomiędzy obciążeniem stopy a przewidywaną penetracją. Z tego względu prowadzenie pomiarów rzeczywistej penetracji podczas procedury wynurzania kadłuba, a następnie podczas procedury wstępnego obciążania danej stopy, pozwala na sprawdzenie, czy proces penetracji przebiega poprawnie, co jest szczególnie istotne w przypadku możliwości przebicia warstwy mocnej.

Na rys. 5 i 6, wraz z prognozowanym zakresem penetracji dla każdej stopy w przypadku lokalizacji „Zatoka Gdańska” bądź dla pary stóp w przypadku lokalizacji „Stilo”, pokazano:

- wartość obciążeń przypadających na stopę fundamentową w momencie wynurzenia kadłuba na czterech nogach oraz przeniesienia całego ciężaru wynurzonego kadłuba na dwóch nogach diagonalnych (obciążenie wstępne),
- profile wiobrosod wykonanych w miejscu posadowienia stóp z podziałem na warstwy geotechniczne i opisem tych warstw (dla lokalizacji „Stilo” dla każdej pary stóp wykonano tylko jedną wiobrosodę),
- obliczeniowe parametry geotechniczne podłoża przyjęte dla każdej warstwy wydzielonej w profilu wiobrosody na podstawie badań wykonanych do celów prób morskich *HLJV Innovation* oraz badań archiwalnych,
- widok stóp fundamentowych,
- rzeczywisty pomierzony przebieg penetracji poszczególnych stóp.

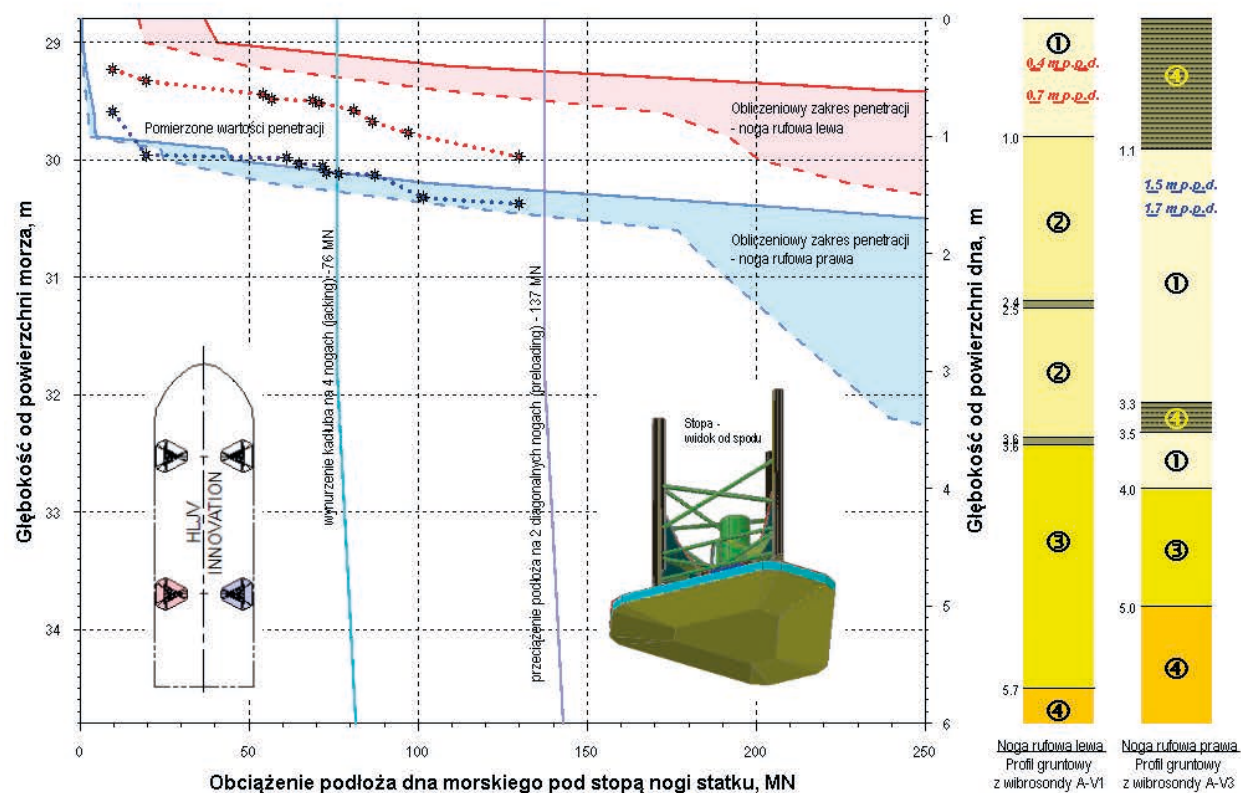
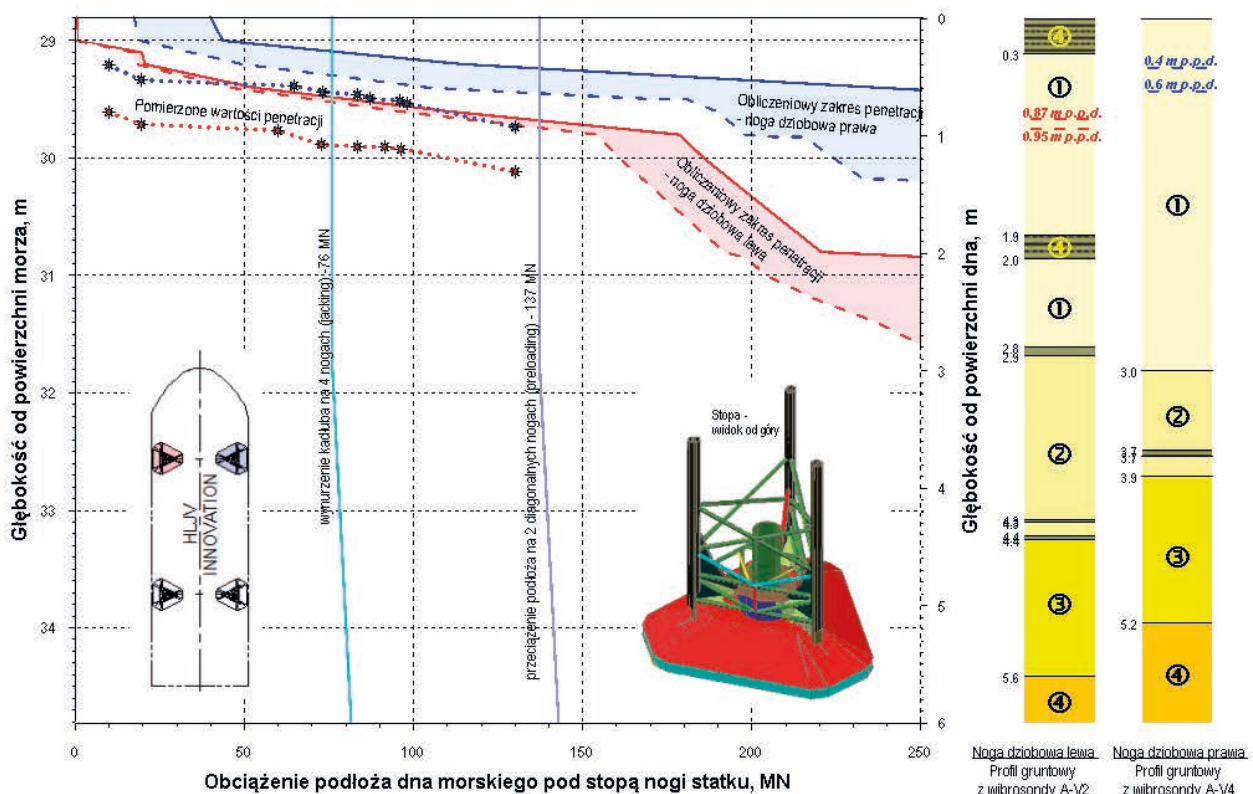
Jak można zauważyć na rys. 5 przebieg penetracji w czasie prób wykonanych w Zatoce Gdańskiej dla „statku lekkiego” bardzo dobrze zgadza się z prognozą. Mniejsza zgodność prognozy z pomiarem wystąpiła w lokalizacji „Stilo” dla „statku ciężkiego” (rys. 6). Można to tłumaczyć między innymi znacznym mniejszym zakresem wykonanych badań, jak też świadomym zaniżeniem parametrów obliczeniowych w celu oszacowania największej możliwej wartości penetracji.



Rys. 3. Jednostka HLJV Innovation na Zatoce Gdańskiej po podniesieniu na 8 m n.p.m.



Rys. 4. Jednostka HLJV Innovation na Zatoce Gdańskiej w trakcie prób dźwigu (fot. za zgodą Autora)



Grunty gruboziarniste:

① Piasek z pyłem i piasek drobny, średnio zagęszczony
 $\gamma = 18.2 + 18.7 \text{ kN/m}^3$
 $c = 3.8 + 1.7 \text{ kPa}$
 $\phi = 32.8^\circ + 35.4^\circ$

② Piasek drobny i piasek z pyłem, średnio zagęszczony
 $\gamma = 18.2 + 18.7 \text{ kN/m}^3$
 $c = 1.1 + 1.4 \text{ kPa}$
 $\phi = 34.3^\circ + 35.5^\circ$

Utwory czwartorzędowe

③ Piasek drobny, średnio zagęszczony do zagęszczonego
 $\gamma = 18.7 + 18.9 \text{ kN/m}^3$
 $c = 1.4 + 2.0 \text{ kPa}$
 $\phi = 35.5^\circ + 43^\circ$

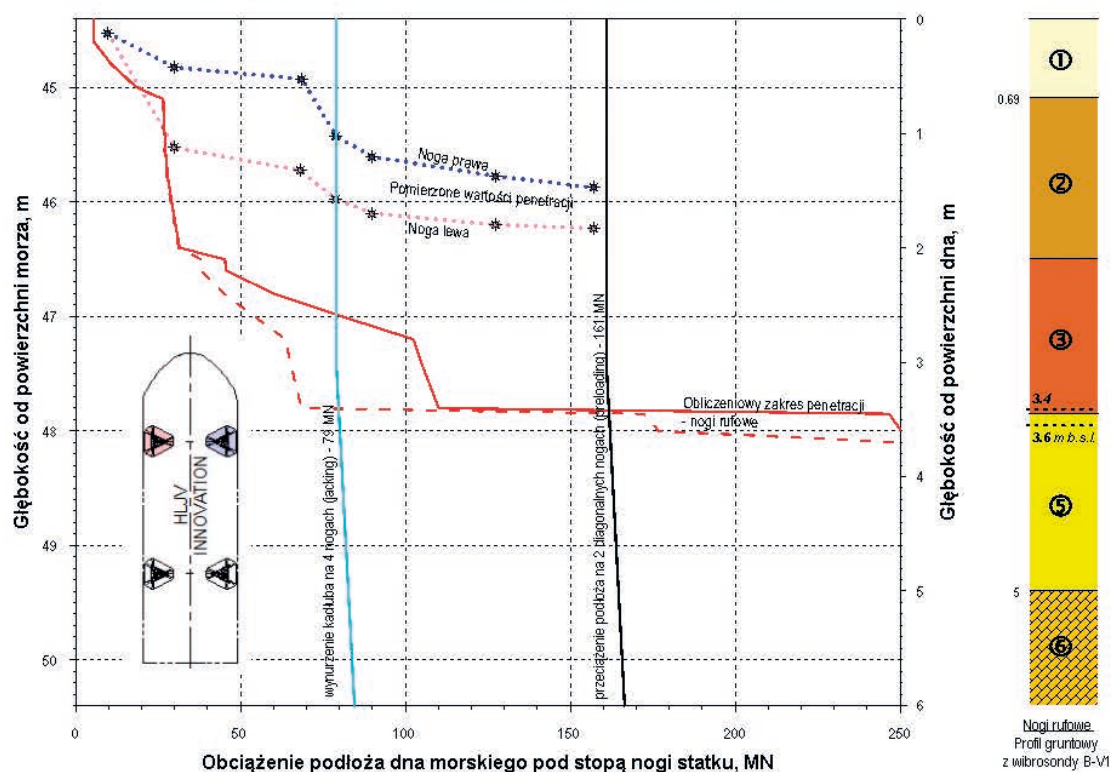
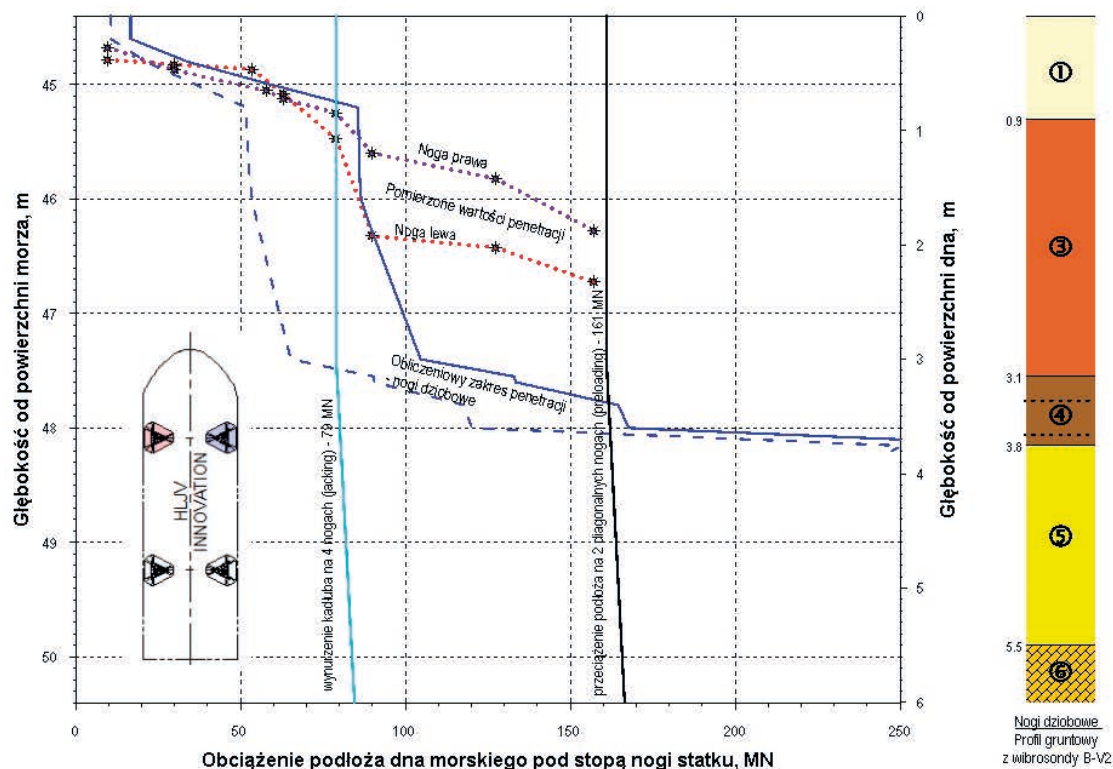
④ Piasek średni, zagęszczony
 $\gamma = 20.0 \text{ kN/m}^3$
 $c = 0 \text{ kPa}$
 $\phi = 47^\circ$

Grunty drobnoziarniste:

⑤ Il organiczny i namul
 $\gamma = 13.0 + 15.5 \text{ kN/m}^3$
 $c_s = 2 + 4 \text{ kPa}$

⑥ Il zmieszany z piaskiem
 $\gamma = 16.5 + 17.0 \text{ kN/m}^3$
 $c_s = 8 \text{ kPa}$

Rys. 5. Obliczeniowe i rzeczywiste zagłębienie stóp nóg statku podczas operacji wynoszenia kadłuba z wody i przeciążenia podłoża podczas prób morskich na Zatoce Gdańskiej



Utwory czwartorzędowe

① Piasek drobny, sporadycznie gruby, ze żwirami
 $\gamma = 18.0 + 15.5 \text{ kN/m}^3$
 $c = 0 \text{ kPa}, \phi = 30^\circ + 35^\circ$

② Ił z piaskiem, pyłem i poj. kawałkami tępku i żwiru, o małej wytrzymałości

③ Ił z piaskiem, pyłem i poj. kawałkami tępku i żwiru, o średniej wytrzymałości

④ Ił z piaskiem, pyłem, kawałkami tępku i poj. ziarnami żwiru, o dużej wytrzymałości

$\gamma = 21.1 + 21.2 \text{ kN/m}^3$
 $c_s = 22 + 25 \text{ kPa}$
 $c = 18 \text{ kPa}, \phi = 6^\circ$

$\gamma = 21.3 + 21.7 \text{ kN/m}^3$
 $c_s = 40 + 45 \text{ kPa}$
 $c = 30 \text{ kPa}, \phi = 8.5^\circ$

$\gamma = 21.3 + 21.7 \text{ kN/m}^3$
 $c_s = 40 + 45 \text{ kPa}$
 $c = 30 \text{ kPa}, \phi = 8.5^\circ$

Utwory trzeciorzędowe

⑤ Piasek drobny, średnio zagęszczony
 $\gamma = 18.5 + 19.0 \text{ kN/m}^3$
 $c = 0 \text{ kPa}, \phi = 33^\circ + 35^\circ$

Utwory sylurskie

⑥ Ił, tłupek sylurski, o dużej do nadzwyczaj dużej wytrzymałości

Rys. 6. Obliczeniowe i rzeczywiste zagłębienie stóp nóg statku

podczas operacji wynoszenia kadłuba z wody i przecięcia podłoża podczas prób morskich na Morzu Bałtyckim na wysokości latarni Stilo

PRÓBY KOLEJNYCH JEDNOSTEK OFFSHORE

Analogiczną procedurę uwzględniającą całokształt prac związanych z możliwością przeprowadzenia prób posadowienia i systemów podnoszenia zastosowano na następnym samopodnoszącym wielofunkcyjnym statku z dźwigiem o dużej nośności, wybudowanym przez Stocznnię CRIST S.A. w 2013 roku, o nazwie *HLJV Vidar*.

Statek ten o długości 140,4 m i szerokości 41,0 m ma cztery nogi o długości 90 m wraz niezależnymi hydraulicznymi systemami podnoszenia umieszczonymi wokół każdej nogi. Łączna nośność systemu podnoszenia statku wynosi 24000 t w zakresie dopuszczalnej głębokości wody od 7 do 50 m. Nogi są wykonane w postaci grubościennych rur ze stalowymi wielobryłowymi stopami i umieszczone są tak, jak w przypadku *HLJV Innovation*, w kierunku prostopadłym przy burtach statku, a w kierunku podłużnym statku w miejscach wynikających z obciążeń pochodzących od ciężaru kadłuba wraz z ładunkiem.

Maksymalne wysunięcie nóg poniżej dna kadłuba wynosi 64 m, a dopuszczalną penetrację stóp w podłoże dna ograniczono do 5 m.

Stopy nóg są zbudowane z trzech brył o podstawach zbliżonych do prostokątów. Bryła środkowa jest graniastosłupem, bryły górna i dolna są w przybliżeniu ostrosłupem ściętym, maksymalna pozioma powierzchnia przekroju stopy nogi wynosi około 123,5 m², a całkowita wysokość stopy 3,6 m.

Statek jest wyposażony w dźwig o nośności 1200 t przy wysięgniku 25 m oraz 100 t – przy wysięgniku 95 m operujący jedynie w czasie, gdy jednostka jest posadowiona na dnie. Dźwig jest osadzony na rurowym korpusie systemu podnoszenia (prawa burta) i może operować wokół całego statku.

Próbę podniesienia statku ciężkiego (21 500 t ciężar kadłuba wraz z wyposażeniem) wykonano w Basenie VII Portu Gdynia (rys. 7), pomimo bardzo trudnych warunków gruntowych w podłożu dna i nasilającego się sztormu o olbrzymiej sile. Z powodu spodziewanego wystąpienia zjawiska *punch-through* (przebicia warstwy mocnej zalegającej nad warstwą słabą przez stopy fundamentowe) procedurę obciążenia wstępnego przeprowadzono początkowo, dla bezpieczeństwa jednostki, z kadłubem zanurzonym częściowo w wodzie, stosując identyczną procedurę jak w przypadku jednostki *HLJV Innovation*.

Z powodu napiętego harmonogramu i przeciągającego się sztormu próby morskie z testowaniem dźwigu przeprowadzono w porcie macierzystym jednostki w Bremerhaven.

Kolejną zbudowaną przez Stocznnię CRIST S.A. samopodnoszącą wielofunkcyjną jednostką pływającą wyposażoną w suwnicę o niezwykle dużej nośności jest barka *HLJB Zourite* (rys. 9), zamówiona przez armatora francuskiego. Służy ona do transportowania oraz instalacji podpór i innych elementów 5,4 kilometrowej estakady morskiej wzdłuż północno-zachodniego brzegu wyspy La Reunion położonej na Oceanie Indyjskim.

Barka ta o długości 107 m i szerokości 44 m jest wyposażona w osiem nóg o długości 55 m każda wraz z trzema niezależnymi hydraulicznymi systemami podnoszenia umieszczonymi wokół każdej nogi. Łączna nośność systemu podnoszenia barki wynosi 30600 t w zakresie dopuszczalnej głębokości wody

od 6 do 16 m. Nogi wykonano w postaci grubościennych rur ze stalowymi wielobryłowymi stopami i umieszczono przy burtach w miejscach wynikających z obciążeń pochodzących od ciężaru kadłuba i ładunku. Maksymalne wysunięcie nóg poniżej dna kadłuba wynosi 29 m, a dopuszczalną penetrację stóp w podłoże dna ograniczono do 10 m.

Stopy fundamentowe zbudowano z graniastosłupa i przylegającego do niego od góry ostrosłupa ściętego o podstawach zbliżonych do kwadratu. Maksymalna pozioma powierzchnia przekroju stopy nogi wynosi około 25 m², a całkowita wysokość stopy 1,6 m.

Przewidziano, że prefabrykowane elementy fundamentów podpór estakady będą załadowywane przy nabrzeżu portowym, na wynurzony do poziomu nabrzeża kadłub jednostki za pomocą pneumatycznego systemu wózków przemieszczających się wraz z ciężarem po prowadnicach ułożonych między nabrzeżem a pokładem barki. Po załadowaniu prefabrykatów i opuszczeniu kadłuba na wodę barka płynie samodzielnie do miejsca posadowienia prefabrykowanych fundamentów. Tutaj, po procedurze podniesienia kadłuba i po przeprowadzeniu obciążenia wstępnego, elementy fundamentów podpór będą podniesione z pokładu barki i przemieszczone na rufę jednostki za pomocą suwnicy o operacyjnym udźwigu 4730 t, a następnie opuszczone na przygotowane wcześniej podłoże dna morza. Rufa barki ma wycięcie w kadłubie, co umożliwi opuszczanie ładunku bez wynoszenia poza obrys kadłuba jednostki. Jednostkę zaprojektowano do przeprowadzenia łącznie 144 takich operacji (rys. 10).

Jednostkę zaprojektowano w taki sposób, aby można było wykonywać obciążenie wstępne najbliżej położonej pary nóg znajdujących się na przeciwnych burtach. Zaplanowano możliwość przeprowadzenia obciążenia wstępnego dla pary nóg znajdujących się naprzeciwko siebie (równoległe) lub po przekątnej pokładu (diagonalne). Obciążenie wstępne pary nóg polega na odciążeniu dwóch sąsiadujących z nimi nóg, co powoduje przeniesienie ciężaru tej części kadłuba na obciążane nogi. Nogi odciążane oraz pozostałe cztery nogi usytuowane na drugim końcu kadłuba utrzymują jednostkę w równowadze i eliminują przechylenie się jednostki, na przykład w przypadku wystąpienia zjawiska przebicia warstwy mocnej („*punch-through*”). Kolejne pary nóg są wstępnie obciążane w identyczny sposób poprzez odciążanie następnej sąsiadującej pary nóg. Równoległy lub diagonalny sposób obciążania wstępnego podłoża pod stopami nóg zależy od ciężaru całkowitego kadłuba (ciężar kadłuba i ładunku) oraz od sposobu rozłożenia ładunku na pokładzie.

Ze względu na masę przemieszczanego ładunku oraz na świadomie ograniczoną przez armatora sztywność kadłuba dla każdej procedury obciążenia wstępnego (każdego ładunku) wykonywane są obliczenia określające maksymalne obciążenia dla każdej „równoległej” pary nóg, jakich nie można przekraczać. Oznacza to, że istnieją istotne różnice wartości obciążenia pomiędzy poszczególnymi parami nóg w trakcie procedury obciążenia wstępnego podłoża. W celu zapewnienia integralności kadłuba jednostki należy zachować proporcjonalną różnicę obciążeń pomiędzy poszczególnymi parami nóg w trakcie całego procesu obciążenia wstępnego, od jego początku aż do końca.

Z powodu zakładanego w próbach morskich znacznego obciążenia podłoża podczas obciążenia wstępnego (do 4000 t na 25 m² powierzchni nośnej stopy nogi) oraz granicznej wartości



Rys. 7. Jednostka HLJV Vidar w trakcie prób podnoszenia w Basenie VII Portu Gdynia



Rys. 8. Jednostka HLJV Vidar na morzu (fot. aeromedia.pl)



Rys. 9. Jednostka HLJB Zourite na Zatoce Gdańskiej



Rys. 10. Jednostka HLJB Zourite w trakcie opuszczania na dno fundamentu podpory estakady morskiej budowanej wzdłuż brzegu wyspy La Reunion, ważącego 4530 T

penetracji, do prób podnoszenia jednostki wybrano obszar dna morskiego, zlokalizowany 1,5 mili morskiej na wschód od Klifu Orłowskiego, który na podstawie wykonanych badań geotechnicznych charakteryzuje się dużą nośnością.

Dla tego obszaru obliczone wartości penetracji stóp fundamentowych po obciążeniu wstępnym dla barki ciężkiej wynosiły, w zależności od wartości obciążenia przypadającego na stopę, od 1,8 do 8,4 m poniżej poziomu dna.

Z powodu zbliżającego się terminu załadunku barki na wcześniej zakontraktowany samozanurzeniowy statek do przewożenia ciężkich ładunków armator zrezygnował z przeprowadzenia prób morskich dotyczących podnoszenia jednostki na Zatoce Gdańskiej i przeprowadził je w pobliżu wyspy La Reunion.

LITERATURA

1. Brown J. D., Meyerhof G. G.: Experimental Study of Bearing Capacity In Layered Clays. Proc. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, Vol. 2, 1969.
2. Hanna A. M., Meyerhof G. G.: Design Charts for Ultimate Bearing Capacity of Foundation on Sand Overlaying Soft Clay. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 17, No 2, 1980.

3. Hansen J. B.: A General Formula for Bearing capacity. The Danish Geotechnical Institute, Bulletin no. 11, Copenhagen, 1961.
4. Hansen J. B.: A General and Extended Formula for Bearing capacity. The Danish Geotechnical Institute, Bulletin No. 28, Copenhagen, 1980.
5. Juskiewicz-Bednarczyk B., Werno M., Nocoń J.: Interpretacja sondowań statycznych CPTU wykonanych na obszarze Południowego Bałtyku. Sposób określania stopnia plastyczności. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 1/2016, 23-30.
6. Lunne T., Robertson P. K., Powell J. J. M.: Cone penetration testing in geotechnical practice. Blackie Academic & Professional, London 1997.
7. Werno M., Juskiewicz-Bednarczyk B., Inerowicz M.: Penetration of Jack-up Platform Footings into the Seabed. Marine Geotechnology, vol. 7, No. 2, 1987, 65-78.
8. Werno M. i inni: Zasady dokumentowania geologiczno-inżynierskich warunków posadowienia obiektów budownictwa morskiego i zabezpieczeń brzegu morskiego. Państwowy Instytut Geologiczny. Warszawa, 2009.
9. Werno M., Juskiewicz-Bednarczyk B.: Przegląd metod i sprzętu do badań geotechnicznych na morzu. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 5/2009, 61-69.
10. Werno M.: Warunki posadowienia gazociągu podmorskiego ze złoża B8 do Władysławowa. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 5/2015, 696-700.