



Technologia wykonania kesonu

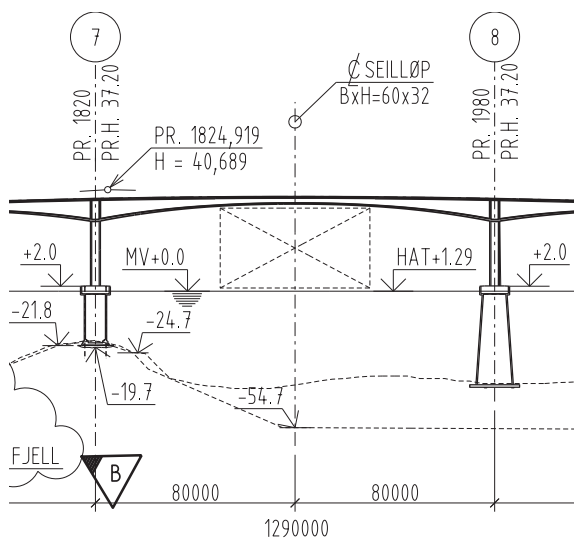
MOSTU TRESFJORDA

tekst: mgr inż. PRZEMYSŁAW PIELACH, Bilfinger Infrastructure SA

W artykule został opisany przebieg budowy i instalacji kesonu fundamentowego mostu Tresfjorda w Norwegii. Prace były wykonywane od lipca 2013 r. do sierpnia 2014 r. przez JV Bilfinger Tresfjorda. Wybudowany keson jest jedną z największych tego typu konstrukcji nie tylko w Norwegii, ale i na świecie. Prace podwodne związane z fundamentem wykonała norweska firma nurkowa EB Marine i zostały one tutaj jedynie zasygnalizowane.

Opis fundamentu

Keson stanowi fundament podpory nr 8 przęsła nawisowego mostu Tresfjorda. Sam most to obiekt o konstrukcji 19-przęsłowej belki ciągłej z betonu sprężonego. Główne przęsło ma rozpiętość 160 m, a całkowita długość mostu wynosi 1290 m.



Ryc. 1. Przęsło główne mostu Tresfjorda

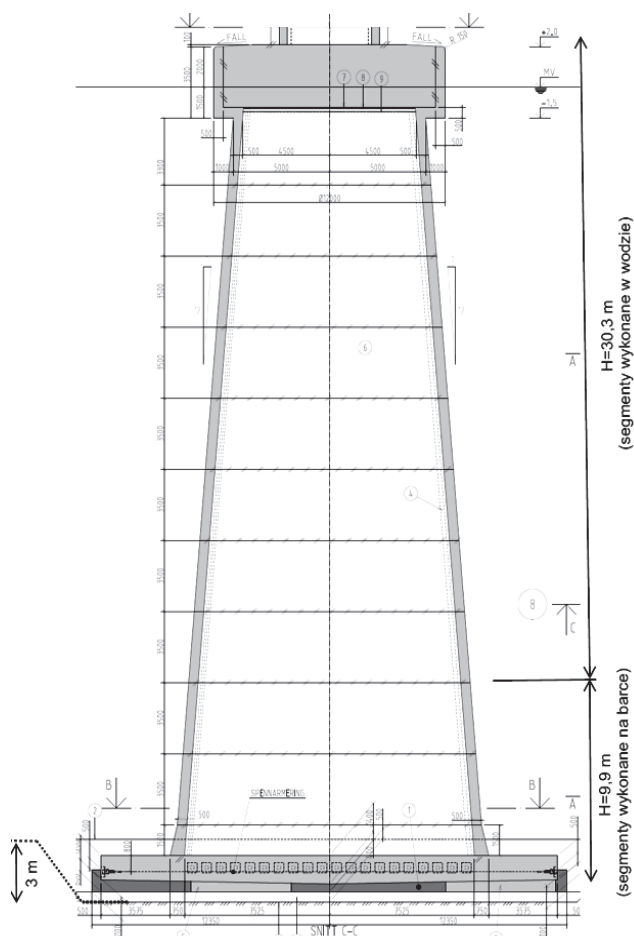
Most przeprowadza drogę E136 przez fiord Tresfjord pomiędzy miejscowościami Vestnes i Vikebukt. Maksymalna głębokość wody w rejonie przeprawy wynosi 45 m, zaś fiordu dochodzi do 100 m.

Keson w osi 8 ma całkowitą wysokość 40,2 m. Jest to konstrukcja żelbetowa w kształcie ściętego stożka o średnicy od 10,00 do 16,55 m. Grubość ścian stożka wynosi 0,5 m. Podstawę kesonu stanowi płyta z betonu sprężonego o średnicy 23,7 m i wysokości 1,2–1,4 m. Keson należy do grupy budowli GBF (*gravity based foundation*) i w związku z tym został wewnątrz balastowany kruszywem naturalnym. Siła „gruntująca” keson do dna morskiego (ciężar kesonu wraz z balastem pomniejszony o jego wyporność w wodzie morskiej) wynosi 4380 t. Zgodnie z dokumentacją projektową, dno morskie przed bezpośrednim posadowieniem kesonu zostało odpowiednio przygotowane. Wykonano wykop o głębokości 3 m (od rzędnej -36 m do -39 m od poziomu morza), usuwając luźne i słabonośne podłoże. Następnie wykonano warstwę betonu podwodnego wraz z trzema fundamentami, na których ustawiono keson. Na koniec powstałą przestrzeń zabetonowano przy pomocy rur zamontowanych wewnątrz konstrukcji kesonu.

W tabeli 1 zestawiono ilości podstawowych materiałów wykorzystanych do budowy kesonu, rycina 2 pokazuje przekrój poprzeczny z podziałem na betonowane segmenty.

Tab. 1. Zestawienie materiałów użytych do budowy kesonu w osi 8

Lp.	Materiał	Jedn.	Ilość
1.	Wykop podwodny	m ³	1920
2.	Beton podwodny pod podstawą	m ³	752
3.	Beton lekki płyty dennej	m ³	441
4.	Beton ścian	m ³	774
5.	Stal zbrojeniowa	t	441,6
6.	Stal sprężająca	t	34,2
7.	Balast – kruszywo naturalne	m ³	4178



Ryc. 2. Przekrój kesonu, dokumentacja projektowa

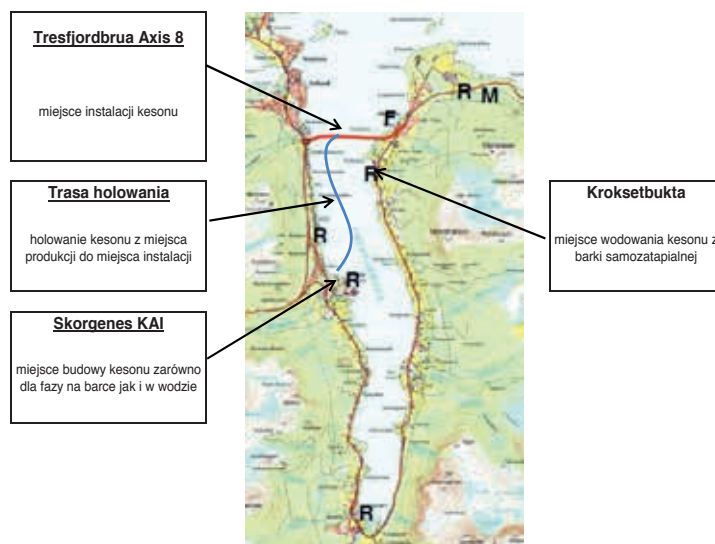
Fazy budowy i instalacji

Budowę i instalację fundamentu w osi 8 można podzielić na następujące fazy:

- faza 1 – wykonywanie kesonu na barce samozatapialnej (etap 1–4);
- faza 2 – wodowanie kesonu;
- faza 3 – wykonywanie kesonu w wodzie (etap 5–14);
- faza 4 – montaż ramy stalowej i wykonanie warstwy betonu podwodnego;
- faza 5 – holowanie kesonu i instalacja w miejscu docelowym;
- faza 6 – iniekcja podstawy kesonu i balastowanie skałą.

Równoległe do powyższych robót były prowadzone prace podwodne związane z przygotowaniem dna morskiego.

Na rycinie 3 pokazano miejsca wykonywania poszczególnych faz budowy i instalacji w obrębie fiordu.



Ryc. 3. Mapa Tresfjordu z miejscami produkcji kesonu

Wykonanie kesonu na barce i jego wodowanie

Płyta denna kesonu oraz pierwsze trzy etapy ścian zostały wykonane na barce samozatapialnej Contant o wymiarach 19 x 60 m. Całość prac przeprowadzono przy wcześniej przygotowanym nabrzeżu – Skorgenes KAI, przy którym znajdowało się również zaplecze i biuro budowy.



Ryc. 4. Skorgenes KAI – miejsce produkcji kesonu

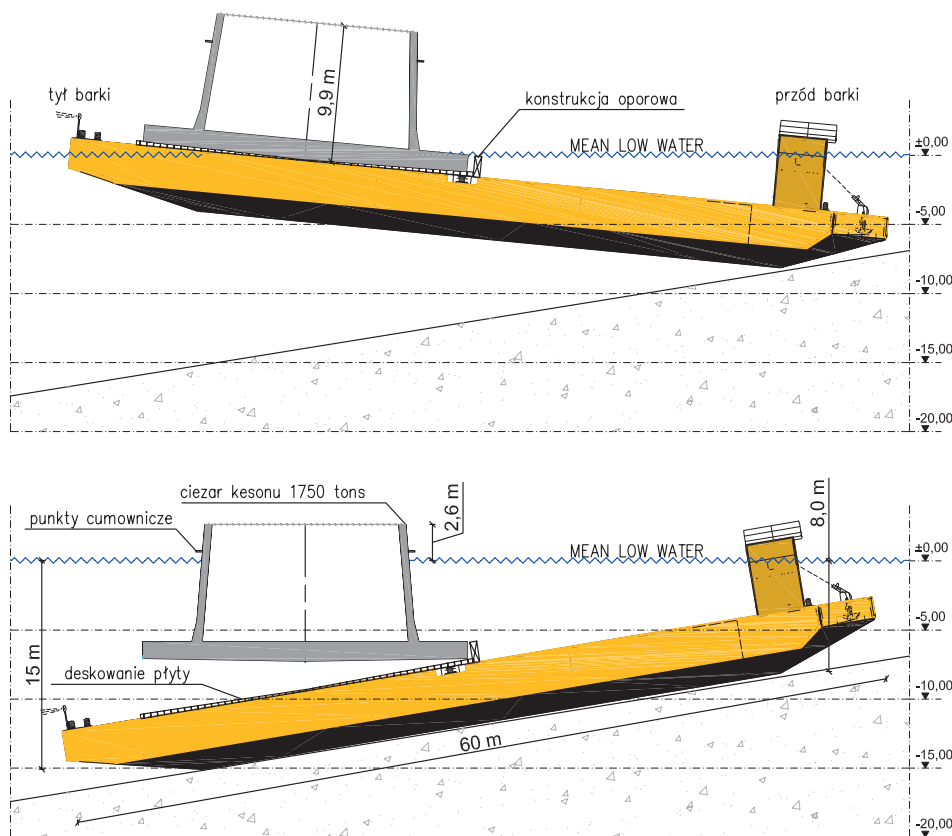
Z uwagi na możliwości wodowania barki płytę denną kesonu zabetonowano z betonu lekkiego o ciężarze objętościowym 2,1 t/m³. Pozwoliło to zredukować masę konstrukcji w chwili wodowania o 220 t. Szalunek podstawy został przymocowany do barki w taki sposób, aby oderwać się od betonu w czasie operacji. Z uwagi na średnicę płyty (23,7 m) przekraczającą szerokość barki (20 m) wymagane było przyspawanie dźwigarów stalowych do pokładu barki i oparcie na tak przygotowanych wspornikach wystającej części szalunku. Ściany kesonu zostały wykonane przy użyciu szalunków systemowych. W ostatnim etapie ścian zabetonowano trzy punkty cumownicze. W czasie każdego etapu betonowania komory balastowe barki były wypełniane wodą, aby utrzymać pokład w poziomie. Po wykonaniu ścian płyta denna została sprężona 40 kablami po 29 splotów. Następnie zainiektowano kable i zabetonowano nisze oraz wykonano nie-



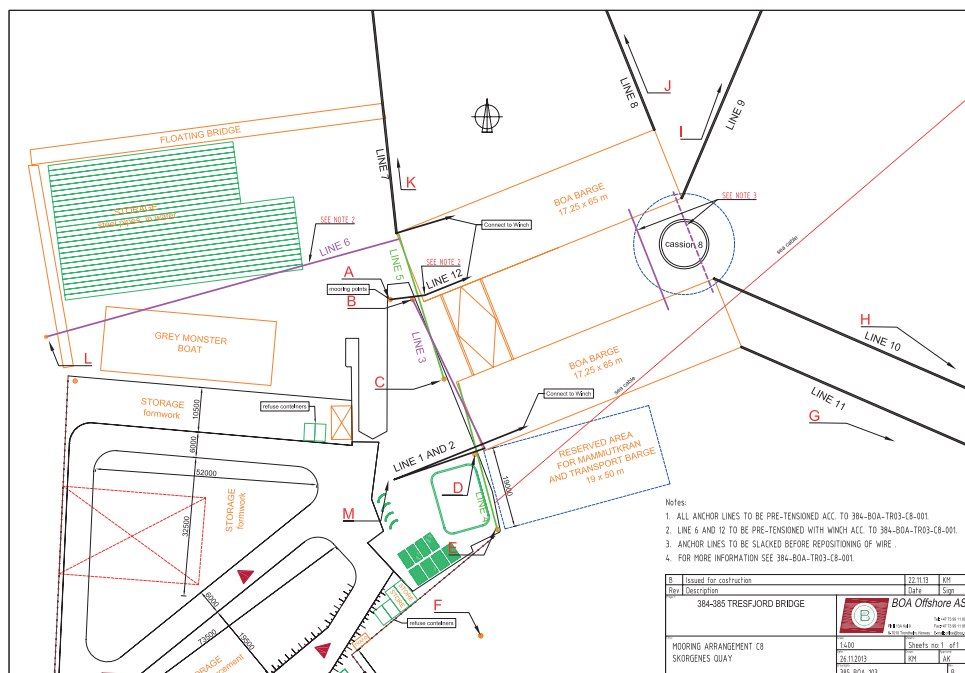
Ryc. 5. Betonowanie płyty dennej kesonu na barce

zbędne prace wykończeniowe. Na rurach stalowych zabetonowanych w płycie dennej (poz. 4 na ryc. 2) zamontowano zawory odcinające wodę w dalszej fazie budowy i instalacji kesonu. Rury te zostały zaprojektowane do betonowania pod podstawą kesonu po jego ustawieniu w miejscu docelowym, a następnie do wykonania odwiertów próbek w celu weryfikacji poprawności posadowienia na dnie morskim. Oznaczono również wysokość kesonu na jego ścianach w celu kontroli zanurzenia w czasie zatapiania. Do pokładu barki zostały przyspawane konstrukcje oporowe, które miały zapobiec przesuwaniu się kesonu w czasie pierwszej fazy wodowania.

Tak przygotowany keson był gotowy do operacji wodowania, a jego parametry geometryczne przedstawiały się następująco: wysokość – 9,9 m, zanurzenie – 7,3 m, ciężar – 1750 t, wypór w wodzie morskiej – 2195 t.



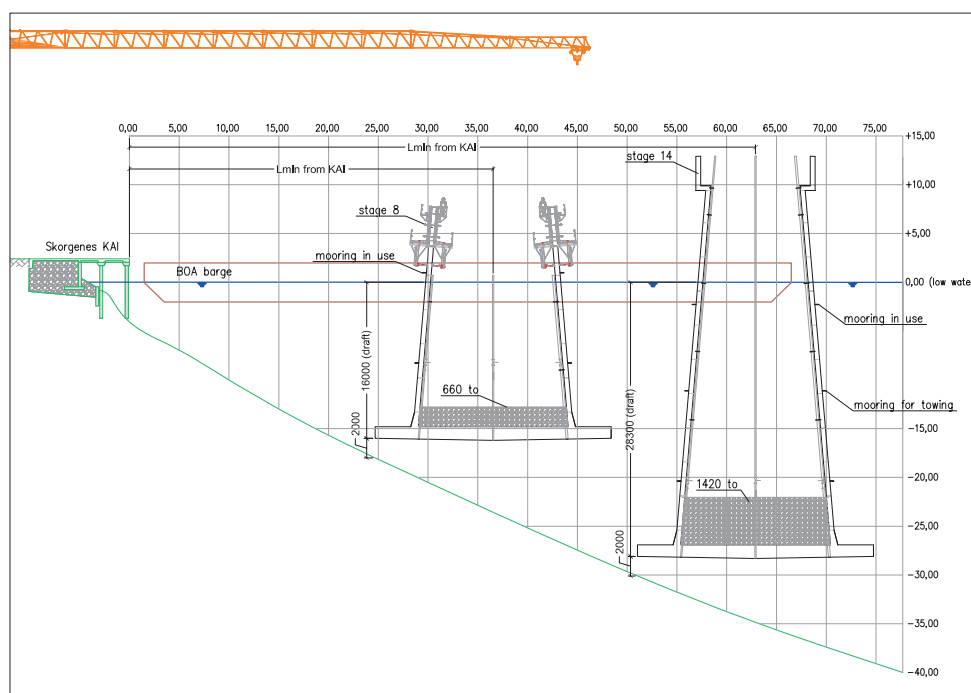
Ryc. 6. Schemat operacji wodowania barki z kesonem



Ryc. 7. Schemat systemu do produkcji kesonu w wodzie

Operację przeprowadził właściciel barki, firma Kristiansund Taubatservice AS, przy pomocy swojej załogi i dwóch pchaczy. Barka wraz z kesonem została zaholowana na Kroksebukte oraz zacumowana na dwóch kotwicach i dwóch punktach cumowniczych na lądzie w miejscu wodowania. Jeden z pchaczy zabezpieczał barkę w czasie operacji, a drugi miał za zadanie zaholowanie kesonu na Skorgenes KAI. Na sześć godzin przed niskim stanem wody rozpoczęto balastowanie komór na przodzie barki. Plan wodowania zakładał, że barka osiadnie na dnie przy najniższym tego dnia poziomie wody, tak aby wzrastający poziom wody wspomógł oderwanie się płyty dennej kesonu od pokładu. Po tym, jak przód barki oparł się na dnie morskim, nurkowie otworzyli zawory tylnych komór barki i nastąpiło zanurzenie barki wraz z kesonem. W momencie, gdy keson zaczął swobodnie pływać, zamontowano liny pomiędzy pchaczem a kesonem i przystąpiono do holowania kesonu. Zgodnie z obliczeniami, wolna burta kesonu wynosiła 2,6 m, co pozwoliło na bezpieczny transport na drugą stronę fiordu.

W celu wynurzenia barki rozpoczęto opróżnianie komór balastowych. Sprężone powietrze wypierało wodę w kolejności odwrotnej do operacji zanurzenia. Po wynurzeniu barka została odholowana na Skorgenes KAI, by usunąć deskowanie z jej pokładu.



Ryc. 8. Plan produkcji kesonu w wodzie

W programie wykorzystywanym w projektowaniu statków zostały przeprowadzone obliczenia symulujące operację, na podstawie których ustalono wymagania. W celu zwodowania barki wraz z kesonem należało znaleźć optymalne miejsce w rejonie fiordu. Wymagany był spadek dna morskiego w granicach 16% oraz podłoże wolne od skał i relatywnie miękkie z uwagi na możliwość uszkodzenia barki. Ważna była również głębokość wody – od 8 m z przodu do 15 m z tyłu barki. Nie było to łatwe zadanie, gdyż Tresfjord ma nachylenie większe niż 20%, sięgające nierzadko 45%. Przy współpracy z lokalną firmą nurkową określono miejsce wodowania w rejonie zatoki Kroksetbukta. Po usunięciu skał i oznaczeniu miejsca operacji przy pomocy boi przygotowano kotwice do zakotwiczenia barki.

Wykonanie kesonu w wodzie

Następnym etapem wykonywania kesonu była jego produkcja w wodzie pomiędzy barkami. Odbywało się to również przy nabrzeżu Skorgenes KAI. Zostały przeprowadzone szczegółowe obliczenia dla tej fazy, bazujące na regułach wykorzystywanych w projektowaniu berek i statków. Analizowano stabilność kesonu w czasie każdego etapu betonowania, jak również globalną pracę całego systemu.

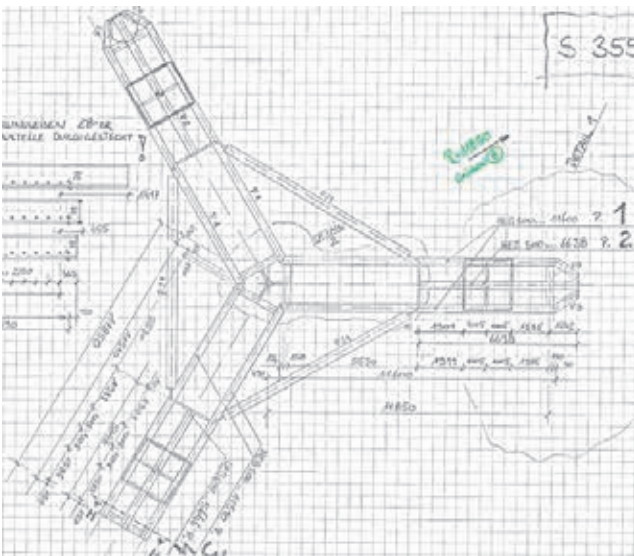
Przy nabrzeżu ustawiono dwie barki morskie o wymiarach 17 x 65 m, które połączono konstrukcją stalową. Całość została zacumowana na pięciu kotwicach oraz sześciu linach mocowanych do punktów cumowniczych na nabrzeżu. Keson umieszczono pomiędzy barkami i połączono z nimi linami.



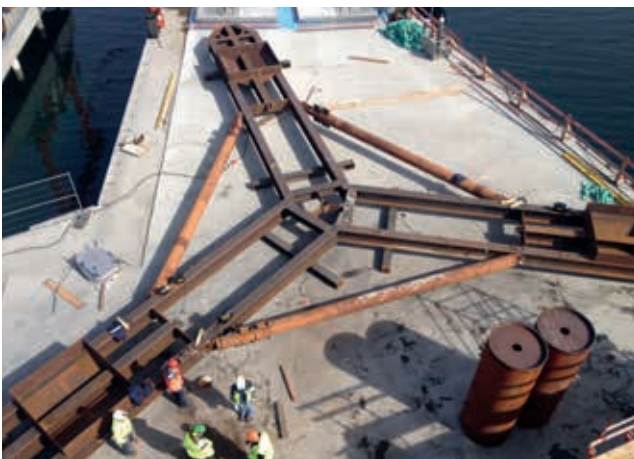
Ryc. 9. Produkcja kesonu w wodzie

Tak przygotowany system wymagał ciągłej kontroli z uwagi na zmieniający się poziom wody i warunki pogodowe.

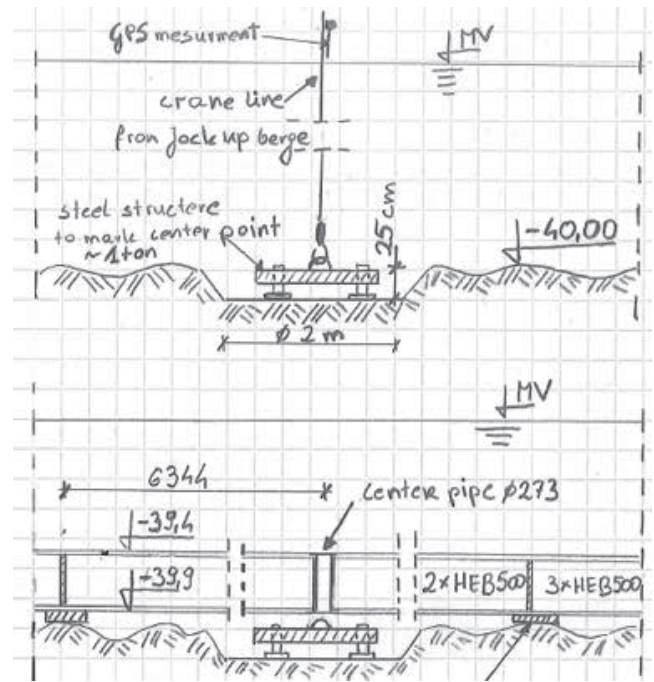
Opracowano szczegółowy plan produkcji, uwzględniający stabilność i zanurzenie kesonu, głębokość wody oraz technologię robót. Łącznie w wodzie zabetonowano 10 sekcji ścian kesonu. Dla zachowania stabilności kesonu balastowano go kruszywem przy użyciu przenośnika taśmowego ustawionego na barce. Materiał był transportowany statkiem. Łącznie w czterech



Ryc. 10. Szkic Bomba Mercedes Star



Ryc. 11. Montaż ramy stalowej na Skorgenes KAI



Ryc. 12. Szkic punktu centralnego

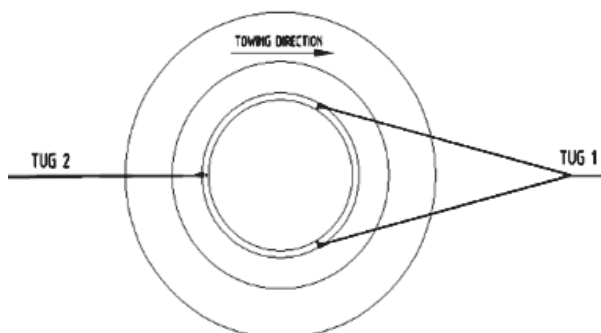
etapach balastowania wsypano do wnętrza kesonu 1420 t balastu. Dzięki nachyleniu dna morskiego w rejonie nabrzeża sięgającego 45% możliwe było wykonanie pięciu etapów ścian 40 m od nabrzeża, a więc w zasięgu żurawia wieżowego. Następnie odsunięto keson znajdujący się 60 m od nabrzeża z uwagi na wymaganą minimalną głębokość wody 30 m. Wymuszało to wprowadzenie na barkę dźwigu mobilnego do obsługi szalunków i zbrojenia. W czasie betonowania na barkę wjeżdżała pompa samochodowa i betonowozy. W tym celu wykonano rampę łączącą barkę z nabrzeżem. Dla każdego etapu produkcji obliczono zanurzenie kesonu, co pozwalało weryfikować teorię z praktyką.

Po zabetonowaniu ostatniego segmentu ścian kesonu przystąpiono do przygotowania jego instalacji. Oznaczono wysokości w środku i z zewnątrz kesonu. Wykonano niezbędne naprawy powierzchni betonowych. Wbudowano rury do betonowania podstawy i wiercenia. Zamontowano również liny służące do holowania.

Montaż ramy stalowej i wykonanie warstwy betonu podwodnego

Równoległe do produkcji kesonu prowadzone były roboty nurkowe w osi 8 mostu. Miały one za zadanie przygotować podłoże do posadowienia kesonu. Sprowadzało to się do wykopu podwodnego luźnych i słabonośnych części dna morskiego. Wykop miał w granicach 2,5–3 m głębokości i średnicę 26 m. Prace były prowadzone na głębokości 40 m. Po osiągnięciu przez nurków poziomu określonych w dokumentacji jako *hard masses* można było przystąpić do robót związanych bezpośrednio z instalacją kesonu.

W pierwszym etapie zainstalowano pomocniczą ramę stalową – tzw. Bomba Mercedes Star. Została ona zmontowana na nabrzeżu Skorgenes. Składała się z trzech ramion z fundamentami, na których miał spocząć keson w czasie instalacji. Dodatkowo na końcach dwóch ramion przyspawano rury o średnicy 1,2 m i wysokości 3,3 m. Jako konstrukcja pomocnicza rama



Ryc. 13. Schemat holowania kesonu

miała za zadanie ułatwić wykonanie warstwy betonu podwodnego, gdyż góra ramy równała się górnej powierzchni betonu. Dzięki wykonaniu jej w całości na lądzie trzy fundamenty do podparcia kesonu ustawiono z dużo większą precyzją niż to miałyby miejsce w przypadku bezpośredniego ich montażu pod wodą na głębokości 40 m. Dodatkowo rama stanowiła konstrukcję oporową w czasie instalacji.

Po scaleniu ramy, zabetonowaniu trzech fundamentów i montażu zbrojenia można było przystąpić do jej instalacji. Masa ramy wraz z betonem fundamentów wynosiła 62 t. Do instalacji wykorzystano dźwig pływający MammutKran o udźwigu 90 t przy wysokości podnoszenia 38 m, który podniósł ramę z nabrzeża i przetransportował ją w miejsce wbudowania. Po zacumowaniu dźwigu na kotwicach w pobliżu osi 8 przystąpiono do opuszczania ramy na dno morskie. Operację wykonywano w asyście nurków. Około 0,5 m przed opuszczeniem na dno przystąpiono do sprawdzania i korekcji

położenia ramy w planie. Do tego celu osadzono wcześniej konstrukcję stalową w formie płyty na czterech podporach z uchem w środku. Pozycję punktu środkowego określono poprzez pomiar na powierzchni wody położenia boi, której lina została przewleczona przez ucho i naciągnięta dźwigiem. Dokładność ustawienia punktu centralnego wynosiła 10 cm, zaś samą ramę ustawiono z dokładnością 5 cm w stosunku do punktu. Wymagana dokładność ustawienia kesonu w planie wynosiła 50 cm. Następnie nurkowie przy pomocy siłowników i poziomicy ustawili ramę w poziomie.

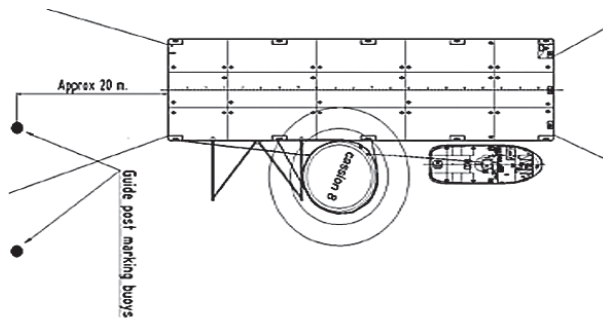
Po ostatecznym zatwierdzeniu przygotowania podłoża przez klienta przystąpiono do betonowania podwodnego. Poziom wykopu osiągnięto na rzędnych pomiędzy -39,3 a -38,5 m. Górna powierzchnia ramy równała się rzędnej -38,5 m. Łącznie wbudowano 582 m³ betonu podwodnego w czasie 30 godzin. Dwa promy transportowały betonowozy z betonem oraz pompy samochodowe. W osi 8 ustawiono barkę, na niej znajdował się dźwig i pompa samochodowa, której wąż do betonowania, zakończony zaworem odcinającym, znajdował się na dnie na głębokości 40 m. Przy barce była ustawiona jednostka nurków asystujących przy betonowaniu. W głównej mierze betonowanie było monitorowane przy użyciu podwodnego robota ROV (*Remotely Operated Vehicle*). Dzięki temu została zmniejszona liczba nurków biorących udział w betonowaniu, gdyż czas nurkowania na głębokości 40 m wynosi tylko 40 minut.

Holowanie i instalacja kesonu

Po zabetonowaniu ramy można było przystąpić do montażu kesonu. Z uwagi na to, iż jego produkcja skończyła się znacznie wcześniej niż przygotowanie dna do montażu, zdecydowano



Ryc. 14. Holowanie kesonu ze Skorgenes KAI



Ryc. 15. Schemat montażu kesonu w osi 8

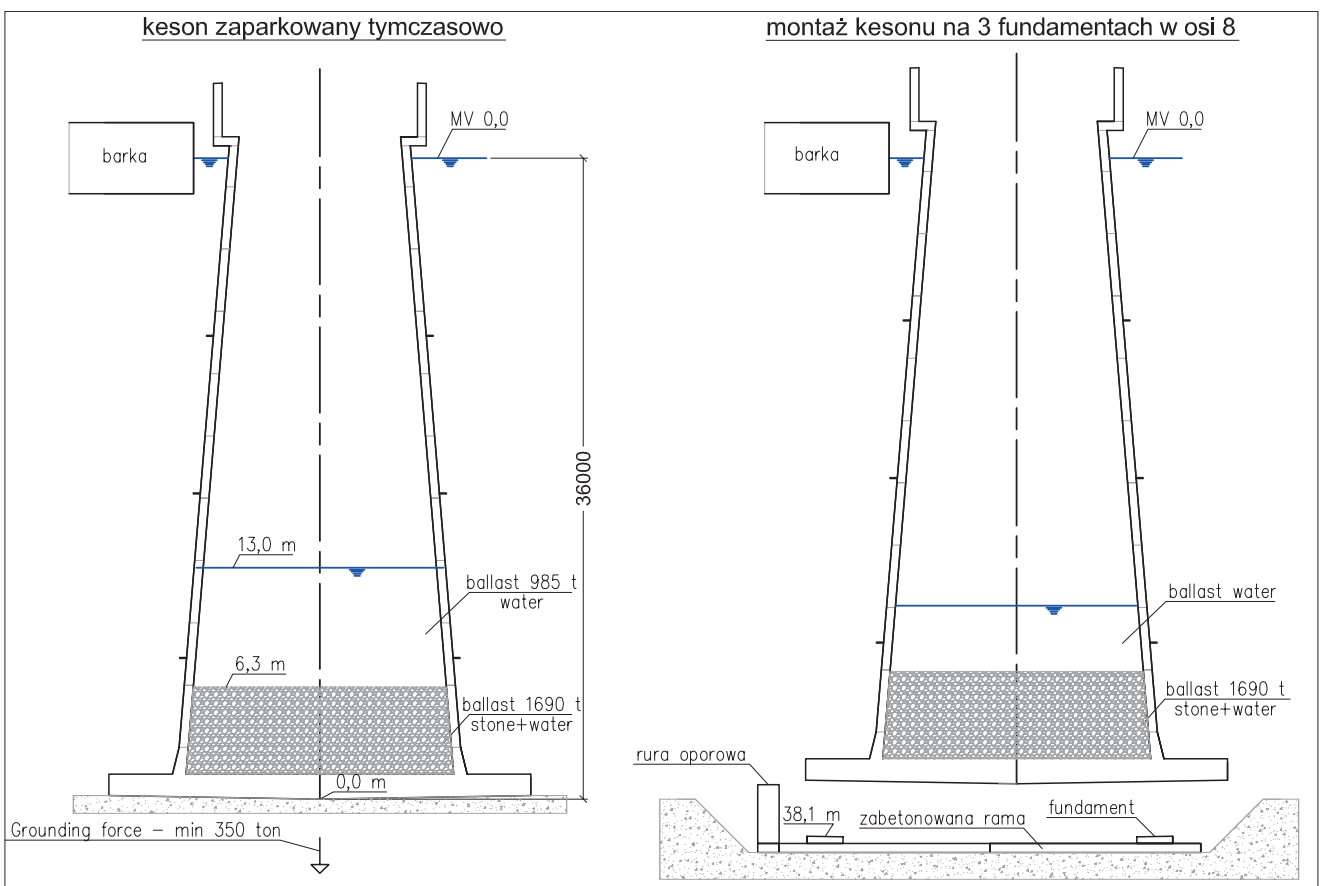
zaparkować tymczasowo keson na dnie morskim 40 m od osi 8. Po sprawdzeniu dna przyholowano keson i poprzez balastowanie wodą osadzono na dnie morskim na głębokości 36 m.

Keson w czasie holowania po zakończeniu produkcji na Skorgenes charakteryzował się następującymi parametrami geometrycznymi: wysokość – 40,2 m, zanurzenie – 27,9 m, ciężar – 4650 t (w tym 1420 t balastu), wypór w wodzie morskiej – 5950 t.

Holowanie kesonu ze Skorgenes do miejsca instalacji odbyło się według szczegółowej instrukcji określającej warunki pogodowe, rodzaj i liczbę sprzętu pływającego oraz sposób komunikacji. Z uwagi na zanurzenie kesonu ważne było ustalenie trasy holowania. W operacji brały udział dwa pchacze, z których pierwszy holował keson, używając dwóch punktów cumowniczych, natomiast drugi asekurował go przy pomocy jednej liny z tyłu. Punkty cumownicze zostały zabetonowane w ścianie kesonu i znajdowały się 10 m pod wodą w czasie holowania. Wynikało to z warunku, że środek ciężkości kesonu miał pokrywać się z miejscem przyłożenia siły w czasie holowania.

W pobliżu osi 8 zakotwiczo na czterech kotwicach barkę, do której zacumowano keson. Na niej znajdował się również sprzęt niezbędny do montażu – pompy do balastowania, podnośnik teleskopowy, windy kotwiczne, rusztowania itp. W początkowej fazie keson znajdował się 40 m od osi 8. Po wypompowaniu określonej ilości wody keson oderwał się od dna i zaczął pływać. Kontynuowano wypompowywanie wody aż do momentu uzyskania jednowetrowego prześwietu pomiędzy kesonem a dnem morskim. Podstawa kesonu została wyczyszczona wodą pod ciśnieniem przez nurków na głębokości 35 m, tak aby zapewnić lepszą przyczepność powierzchni podstawy do betonu. Następnie przy pomocy wind kotwicznych przesuwało barkę wraz z kesonem w kierunku osi 8, kontrolując operację pod wodą za pomocą robota ROV ze stacji nurkowej.

Kiedy keson znalazł się nad miejscem docelowym, przystąpiono do balastowania wodą morską aż do momentu, gdy płyta denna znajdowała się 1 m nad fundamentami, na których miał zostać posadowiony keson. Ważne było, aby osiągnąć to przy najniższym tego dnia poziomie wody, gdyż wtedy możliwe było wykorzystanie rur oporowych z zabetonowanej wcześniej rami. Gdy płyta denna oparła się o dwie rury oporowe, zamocowano łańcuchy wokół kesonu i rur. Kontynuowano balastowanie aż do momentu osadzenia kesonu na fundamentach. Ten etap, oprócz monitorowania przy użyciu robota ROV, odbywał się przy współudziale nurków. Gdy keson osiadł na trzech fundamentach, sprawdzono położenie i poziom jego górnego kielicha. Uzyskana odchyłka została zaakceptowana przez nadzór. Kontynuowano balastowanie aż do momentu osiągnięcia wymaganej siły gruntującej. Następnego dnia wykonano ponowną inspekcję



Ryc. 16. Montaż kesonu w osi 8



Ryc. 17. Betonowanie pod podstawą kesonu w osi 8

podwodną i kontrolę położenia. Następnie wypełniono keson wodą do poziomu przewidzianego w dokumentacji.

Iniekcja podstawy kesonu i balastowanie skałą

Betonowanie podstawy kesonu odbyło się przez rury stalowe zabetonowane w płycie dennej i przedłużone do poziomu kielicha kesonu. Łącznie zamontowano siedem rur do betonowania (jedną centralnie i sześć po obwodzie ścian) oraz sześć rur po obwodzie do wykonania odwiertów. Nurkowie otworzyli zawory na rurach, założone dla zapewnienia bezpieczeństwa w czasie produkcji i instalacji. Betonowanie odbywało się w podobny sposób do betonowania podwodnego, z tą różnicą, że pompa główna była podłączona za pomocą adaptera do jednej z rur i przez nią pompowała beton na głębokość 40 m. Pomimo trudności z rozpoczęciem pompowania po dwóch nieudanych próbach udało się wbudować określoną w dokumentacji ilość betonu – łącznie 170 m³.

Poprawność wykonanych robót potwierdziły odwierty wykonane przez beton pod podstawą i dno morskie. Pokazały one brak pustych przestrzeni oraz dobrą przyczepność z dnem.

Ostatnim etapem związanym z wykonywaniem kesonu było balastowanie jego wnętrza skałą. Materiał był transportowany statkiem i wsypywany bezpośrednio do kesonu za pomocą koparki. Równocześnie pompowano wodę na zewnątrz. W tym etapie wbudowano łącznie 5270 t skały. Następnie zabetonowano warstwę betonu stanowiącą podbudowę pod fundament w kielichu. Po tym można było przystąpić do wykonania fundamentu i słupa stanowiącego podporę przeszła nawisowego.

Podsumowanie i wnioski

Budowa i instalacja kesonu mostu Tresfjorda stanowiła nie lada wyzwanie inżynierskie. Zarówno na etapie ofertowania, jak i po podpisaniu kontraktu powstało wiele koncepcji i pomysłów. Dzięki współpracy wielu oddziałów firmy Bilfinger (w tym polskiego oddziału Bilfinger Infrastructure SA) odbyła się prawdziwa burza mózgów. Jednak dopiero po poznaniu uwarunkowań lokalnych w Norwegii, a w tym dostępności sprzętu wodnego, możliwe było podjęcie ostatecznych decyzji co do sposobu budowy i instalacji kesonu.

Można powiedzieć, że wybrana technologia sprawdziła się w tej trudnej realizacji. W sposób bezpieczny, a zarazem zgod-



Ryc. 18. Próbkki wywiercone pod podstawą kesonu

nie z założonym planem wybudowano i zainstalowano jeden z największych kesonów na świecie. Zdobyte doświadczenia dają ogromną satysfakcję i pozwalają planować kolejne ciekawe realizacje w Norwegii.

Literatura

- [1] Peire K., Nonneman H., Bosschem E.: *Gravity Based Foundations for the Thornton bank offshore wind farm.*
- [2] Bomba P.: *Niecodzienne pomysły i szkice, które stały się rzeczywistością.*
- [3] *Dokumentacja technologiczna mostu Tresfjorda*, Bilfinger.
- [4] *Dokumentacja mostu Tresfjorda*, Multiconsult AS.
- [5] *Mooring operations, towing and submersible operation of barge Contant at Tresfjorden*, Kristians und Taubatservice.
- [6] *Mooring arrangement C8 Skorgenes KAI*, BOA Offshore.
- [7] *Caisson 8 stability analysis*, BOA Offshore.
- [8] *Towing manual C8*, BOA Offshore.
- [9] *Installation manual C8*, BOA Offshore.

Nazwanie kesonem fundamentu skrzyniowego balastowanego kruszywem jest niepoprawne. Jednak blisko trzyletnie posługiwanie się angielskim słowem *caisson* utrwaliło tę nazwę dla fundamentu w osi 8 mostu Tresfjorda nie tylko w świadomości autora artykułu.

Referat wygłoszony podczas seminarium IBDiM i PZWFS *Fundamenty palowe 2015*, Warszawa, 5 marca 2015 r.

