

Analiza i ocena przebiegu realizacji tunelu drogowego pod Martwą Wisłą w Gdańsku¹

IWONA ŻYGOWSKA

mgr inż. arch., Gdańskie Inwestycje Komunalne Sp. z o.o., ul. Żagłowa 11, 80-560 Gdańsk, tel. 58 722 01 49, e-mail: iwona.zygowska@gik.gda.pl

PIOTR CZECH

mgr inż., Gdańskie Inwestycje Komunalne Sp. z o.o., ul. Żagłowa 11, 80-560 Gdańsk, tel. 609 696 356, e-mail: piotr.czech@gik.gda.pl

SZCZEPAN GAPIŃSKI

mgr inż., Gdańskie Inwestycje Komunalne Sp. z o.o., ul. Żagłowa 11, 80-560 Gdańsk, tel. 58 722 01 06, e-mail: szczepan.gapinski@gik.gda.pl

ADAM ŁOSIŃSKI

mgr inż., Gdańskie Inwestycje Komunalne Sp. z o.o., ul. Żagłowa 11, 80-560 Gdańsk, tel. 668 044 737, e-mail: adam.losinski@gik.gda.pl

KINGA SMOLIBOWSKA

inż., Gdańskie Inwestycje Komunalne Sp. z o.o., ul. Żagłowa 11, 80-560 Gdańsk, tel. 668 863 325, e-mail: kinga.smolibowska@gik.gda.pl

AGNIESZKA TEMPLIN

mgr, Gdańskie Inwestycje Komunalne Sp. z o.o., ul. Żagłowa 11, 80-560 Gdańsk, tel. 58 722 01 13, e-mail: agnieszka.templin@gik.gda.pl

Streszczenie. Budowa tunelu drogowego pod Martwą Wisłą jest częścią przedsięwzięcia inwestycyjnego „Połączenie Portu Lotniczego z Portem Morskim Gdańsk–Trasa Słowackiego”. Tunel drogowy pod Martwą Wisłą w Gdańsku wraz z węzłem Marynarki Polskiej jest obiektem inżynierskim o całkowitej długości 2.155 metrów. Połączy on wschodnie tereny portowe z zachodnimi w rejonie nabrzeży „Dworzec Drzewny” oraz „Nabrzeże Wiślane”. Długość sekcji tunelowej to 1.377,5 metra, w tym tunel drążony metodą TBM o długości 1.072,5 metra i średnicy 12,5 metra. W artykule zaprezentowana została analiza ekonomiczna projektu, jak również analiza techniczna, która doprowadziła do wyboru metody wykonania tunelu w technologii TBM. Szeroko zostały również omówione warunki gruntowo-wodne w rejonie inwestycji oraz metody ich badania. Artykuł opisuje instalację maszyny TBM, zakładu separacji urobku z płuczki wiertniczej, drążenie tunelu, wymianę narzędzi tnących tarczy w czasie drążenia tunelu, produkcję tubingów oraz budowę przejść poprzecznych między rurami tunelu. Artykuł podsumowuje również osiągnięte efekty w czasie drążenia tunelu pod Martwą Wisłą.

Słowa kluczowe: tunel drogowy, tunel pod rzeką, metoda TBM

Wprowadzenie

Najtrudniejszym i jednocześnie najważniejszym elementem zadania IV, realizowanego od 2011 roku, przedsięwzięcia inwestycyjnego „Połączenie Portu Lotniczego z Portem Morskim Gdańsk–Trasa Słowackiego” jest budowa tunelu drogowego pod Martwą Wisłą.

Mówiąc o budowie tunelu, należy wspomnieć, iż budowa Trasy Słowackiego ma strategiczne znaczenie dla poprawy warunków ruchu w Gdańsku i dalszego harmonijnego rozwoju miasta: zapewni dogodne połączenie Portu Lotniczego im. Lecha Wałęsy z Portem Morskim Gdańsk, a także z siecią dróg wojewódzkich, krajowych i tras międz-

zynarodowych, usprawni komunikację pomiędzy dzielnicami Gdańska, ułatwi turystyczny ruch drogowy na Pojezierze Kaszubskie oraz stworzy nowe połączenie drogowe przez Martwą Wisłą, mające niezwykle istotne znaczenie dla podniesienia konkurencyjności Portu Morskiego w Gdańsku, jak i regionu.

W ramach realizacji czterech zadań składających się na Trasę Słowackiego, równoległe z budową nowych jezdni (około 10 kilometrów dwujezdniowych i dwupasmowych odcinków jezdni), wykonywane były gruntowne przebudowy istniejących skrzyżowań, budowa nowych dróg dojazdowych, chodników i ścieżek rowerowych, powstały nowe obiekty inżynierskie, w tym będący przedmiotem niniejszego opracowania – tunel drogowy pod Martwą Wisłą.

Realizacja projektu nie byłaby możliwa bez finansowego wsparcia ze strony Unii Europejskiej. Projekt jest współfinansowany (poziom dofinansowania wynosi 85% kosztów kwalifikowanych) ze środków Funduszu Spójności, w ramach Programu Infrastruktura i Środowisko, Priorytet VII Transport przyjazny środowisku, Działanie 7.2 Rozwój transportu morskiego.

Jako zadanie inżynierskie budowa tunelu pod Martwą Wisłą przełamuje próg techniczny wprowadzania wielkich obiektów inżynierskich, na których odbywa się ruch drogowy, pod ziemię. Jest to kierunek rozwoju wszystkich wielkich miast w Europie i na świecie. Ograniczona przestrzeń miast zderza się z wciąż nieograniczonym rozwojem ruchu kołowego drogowego oraz kolejowego. Istotą działań inżynierskich winna być zatem eliminacja progów, łagodzenie barier, poprawa dostępności.

Wybrana w wyniku wielu analiz (zarówno technicznych, społecznych jak i ekonomicznych) metoda drążenia jako metoda realizacji tunelu zapewniła tunelowi w Gdańsku status pierwszego w Polsce tunelu drogowego wykony-

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2015. Wkład autorów w publikację: I. Żygowska 17%, P. Czech 17%, Sz. Gapiński 17%, A. Łosiński 17%, K. Smolibowska 16%, A. Templin 16%.

wanego przy użyciu Tunnel Boring Machine (maszyny TBM). Jednak realizacja tunelu metodą drążoną nie od początku procesu inwestycyjnego była oczywistą. Pierwsze studia projektowe rozpatrywały rozwiązania konstrukcyjne przeprawy w postaci mostów wysokowodnych i ruchomych oraz w postaci tunelu zatapianego, w wykopie otwartym i drążonego. W latach 2008–2010 szczegółowo rozważano wykonanie przeprawy mostowej lub tunelowej w każdym możliwym wariancie.

Analiza ekonomiczna projektu budowy tunelu drogowego pod Martwą Wisłą z racji swojego infrastrukturalnego charakteru różni się znacząco od analizy ekonomicznej prowadzonej w przypadku inwestycji „produkcyjnych”. Wobec powyższego analiza takiej inwestycji musi uwzględniać koszty i korzyści ciągnięte – czyli nie tylko związane bezpośrednio z realizacją danego przedsięwzięcia, ale także efekty zewnętrzne dla ludzi i podmiotów gospodarczych nie zaangażowanych bezpośrednio w proces inwestycyjny. W pierwszej kolejności urbarńscy i specjaliści od transportu kołowego ocenili zasadność realizacji przeprawy przez Martwą Wisłę. Ich analiza nie pozostawiała wątpliwości, iż korzyści z takiej przeprawy nie tylko ułatwią życie okolicznym mieszkańcom i obniżą koszty funkcjonowania firm zlokalizowanych wzdłuż nowej trasy, ale też udrożnią cały system komunikacyjny Trójmiasta, zmniejszą korki, zużycie paliwa, liczbę wypadków itp.

Kolejny etap analizy dotyczył wyboru rozwiązania technicznego przeprawy, przy czym argumenty ekonomiczne i społeczne realizacji inwestycji były w tym względzie równie istotne jak techniczne. Przy analizach brano pod uwagę wszystkie uwarunkowania realizacji przeprawy, m.in.:

- występujące dla lokalizacji przeprawy warunki hydrogeologiczne, geologiczno-inżynierskie i geotechniczne;
- umożliwienie użytkowania Martwej Wisły, jako jedynej żeglownej drogi wodnej, łączącej Motławę i Martwą Wisłę z Zatoką Gdańską, a następnie z pełnym morzem, z uwzględnieniem parametrów jednostek pływających, korzystających z kanału żeglownego Martwej Wisły, w tym wyniki konsultacji z kluczowymi użytkownikami (Zarząd Morskiego Portu Gdańsk SA, Gdańska Stocznia Remontowa SA, Stocznia Gdańsk SA itd.);
- konieczność umożliwienia korzystania z instalacji energetycznych i wodno-kanalizacyjnych, przebiegających poniżej poziomu dna Martwej Wisły w sąsiedztwie przeprawy oraz zachowania istniejącej infrastruktury portowej i zabudowy kubaturowej eksploatowanej dotychczas w Porcie Gdańsk, a więc umożliwienie w pełni użytkowania terytorium i akwariów portu łącznie z istniejącymi nabrzeżami, znajdującymi się po obu stronach Martwej Wisły i Motławy;
- połączenie płynności transportu lądowego i wodnego.

Wnioski z przeprowadzonych analiz doprowadziły do podjęcia decyzji o realizacji przeprawy w postaci tunelu

drogowego, realizowanego metodą drążenia. Choć realizacja tunelu przy użyciu maszyny TBM jest droższa na etapie prowadzenia prac budowlanych uznano, iż z punktu widzenia budowlanego i eksploatacyjnego przeprawa tunelowa w postaci tunelu drążonego jest najkorzystniejsza. Za wyborem tej metody przemówiły między innymi następujące argumenty:

- tunel drążony nie ingeruje w jakikolwiek sposób w drogę wodną. Nie ma więc żadnych przeszkód w eksploatacji drogi wodnej przez Port Gdański i podmioty gospodarcze w nim działające;
- podczas realizacji tunelu metodą drążoną nie występują żadne prace mające na celu przebudowę istniejących nabrzeży po obu stronach Martwej Wisły;
- z punktu widzenia trwałości i szczelności tunel drążony, ze względu na przekrój kołowy, zwiększa gwarancję szczelności w porównaniu z tunelem o przekroju prostokątnym;
- drążenie tunelu jest korzystne dla wód podziemnych, gdyż odkrycie poziomego wodonośnego jest mniejsze niż dla tuneli wykonywanych w otwartym wykopie, jak i zatapianych. Oznacza to, że mniejsze jest zagrożenie bezpośredniego wprowadzenia do warstwy wodonośnej zanieczyszczeń technicznych związanych z budową;
- budowa tunelu metodą drążoną nie oddziałuje negatywnie na naturalne środowisko wodne;
- czas budowy tunelu metodą drążoną jest zbliżony do czasu realizacji tunelu metodą zatapialną lub w wykopie otwartym.

Realizacja projektu „Połączenie Portu Lotniczego z Portem Morskim Gdańsk–Trasa Słowackiego”, którego całkowity koszt wynosi 1 420 000 000 zł, rozpoczęła się w 2011 roku. 14 października 2011 roku podpisano umowę na wykonanie ostatniego etapu – zadania IV Trasy Słowackiego, w skład którego wychodzi budowa tunelu wraz z trzypoziomowym węzłem drogowym Marynarki Polskiej. Generalnym Wykonawcą zadania jest konsorcjum, którego liderem jest hiszpańska firma Obrascón Huarte Lain SA. Wielkość podpisanego kontraktu wynosi 885 600 000 złotych.

Tunel drogowy pod Martwą Wisłą, w Gdańsku wraz z węzłem Marynarki Polskiej, jest obiektem inżynierskim o całkowitej długości 2.155 metrów. Połączy on wschodnie tereny portowe z zachodnimi w rejonie nabrzeży „Dworzec Drzewny” oraz „Nabrzeże Wiślane”. Długość trasy, na którą składa się tunel i wanny dojazdowe, wynosi 1.700 metrów. Długość sekcji tunelowej to 1.377,5 metra, w tym tunel drążony metodą TBM o długości 1.072,5 metra i średnicy 12,5 metra. W miejscu przeprawy tunelowej aktualna szerokość Martwej Wisły wynosi około 210 metrów, a głębokość około 12,5 metra. Tunel składać się będzie z dwóch rur tunelowych, po jednej dla każdego kierunku ruchu. Rozstaw rur tunelowych wynosi 25 metrów. Tunel w swoim najgłębszym punkcie znajdzie się 34,25 metra poniżej zwierciadła wody Martwej Wisły, natomiast minimalne zagłębienie tunelu pod dnem Martwej Wisły

wyniesie około 9 metrów. Część wejściowa do tunelu, w formie wykopu otwartego, obejmuje ściany szczelinowe, uszczelnienie dna metodą iniekcji strumieniowej oraz wykonanie pali kotwiących. Wykop w najgłębszym miejscu sięga około 22 metrów poniżej powierzchni terenu.

Warunki geotechniczne

Badania geologiczno-inżynierskie i hydrogeologiczne związane z projektowaniem tej budowli wykonano na podstawie zatwierdzonych projektów prac geologicznych w dwóch zasadniczych etapach. Pierwszy dotyczył projektowanego tunelu zatapianego, a drugi – realizowanego tunelu drążonego. Ponadto przeprowadzono badania uzupełniające i kontrolne związane z realizacją tunelu drążonego. W sumie wykonano badania następujących rodzajów: wiercenia badawcze, wiercenia do celów hydrogeologicznych (studnie badawcze i piezometry w węzłach hydrogeologicznych), sondowania DPSH, CPT, CPTU i BDP, badania dylatometryczne DMT, badania presjometryczne PMT oraz badanie modelowe przepływu wód.

Z wymienionych badań na potrzeby dwóch zasadniczych etapów wykonano 136 wierceń rurowanych z łądu i wody oraz 75 sondowań CPT i CPTU. Inne badania wykonano w mniejszym zakresie.

Najgłębszy odwiert sięgał 70,0 metrów poniżej powierzchni terenu. Podczas wierceń pomiary zwierciadła wody gruntowej i pobieranie prób gruntu wykonywano zgodnie z normą.

Badania laboratoryjne obejmowały ustalenie fizycznych i mechanicznych właściwości gruntów, ze szczególnym uwzględnieniem uziarnienia, gdyż decyduje ono o przepuszczalności gruntu. Ponadto zbadano adhezję i wykonano badanie abrazyjności oraz badania mineralogiczne. Wody poddano analizie chemicznej. Wykonano też badania gruntów na zawartość węglowodorów gazowych.

Budowa geologiczna i warunki hydrogeologiczne

Tunel pod Martwą Wisłą jest usytuowany w obrębie czwartorzędowego poziomu wodonośnego Żuław Gdańskich. Holocenijskie osady tej części delty Wisły składają się głównie z drobnoziarnistych piasków rzecznych, mułków (pyłów) i iłów z domieszką szczątków organicznych, namułów organiczno-mineralnych oraz torfów. Czwartorzędowa warstwa wodonośna jest zbudowana zatem z piaszczysto-żwirowych serii wodnolodowcowych i rzecznych oraz przepuszczalnych osadów holocenu należących do serii deltowej, a bliżej zatoki do holocenijskich piasków morskich. Średnia miąższość tego wodonośnego kompleksu piaszczystego wynosi 40 metrów. Wody podziemne stwierdza się również w zalegających powyżej holocenijskich namulach i torfach. W warunkach naturalnych wody warstw plejstocenijskich zasilają wody gruntowe holocenijskiej serii deltowej. Taki układ ciśnień jest obserwowany również obecnie. Należy podkreślić, że w warunkach naturalnych obszar Żuław Wiślanych był terenem podmokłym, częściowo zalany wodą, a odmienna obecnie sytuacja jest związana z eksploatacją wód podziemnych i melioracją tego obszaru deltowego.

Zagrożenia hydrogeologiczne związane z realizacją tunelu

Istotnym czynnikiem wpływającym na kształtowanie reżimu przepływu wód podziemnych na analizowanym obszarze jest Martwa Wisła. Wyniki obserwacji wahań zwierciadła wody w piezometrach, przedstawione w dokumentacji geologiczno-inżynierskiej, wykazały bezpośredni wpływ poziomów zwierciadła wody w rzece na położenie poziomu zwierciadła wody w czwartorzędowej warstwie wodonośnej. Silny wpływ rzeki, stabilizujący zwierciadło wody podczas próbnych pompowań, stwierdzano nawet w piezometrach odległych kilkaset metrów od brzegu. Ten niemal bezpośredni kontakt między warstwą wodonośną i Martwą Wisłą przyczynił się w latach osiemdziesiątych XX wieku do znacznej degradacji zasobów wód podziemnych. Wskutek intensywnej eksploatacji doszło do intruzji zasolonych wód Martwej Wisły i Zatoki Gdańskiej do czwartorzędowej warstwy wodonośnej. Do lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku pobór wód z poziomu czwartorzędowego nie przekraczał 1000 m³/h, natomiast w latach osiemdziesiątych zwiększył się do ponad 4500 m³/h. W efekcie doszło do pogłębienia i rozprzestrzenienia się regionalnego leja depresji.

Obniżenie zwierciadła wody spowodowało zmianę kierunku przepływu i do warstwy wodonośnej napłynęły zasolone wody Martwej Wisły. Zawartość jonu chlorkowego w rejonie Starego Miasta przekroczyła 300 mg/dm³, a na ujściu Grodza Kamienna osiągnęła ponad 2000 mg/dm³. Pod koniec lat dziewięćdziesiątych, gdy eksploatacja ustabilizowała się na poziomie 1500 m³/h, zaobserwowano stopniowe zmniejszanie koncentracji jonu chlorkowego. Intensywność wysładzania wód okazała się szybsza, niż można było oczekiwać. Według badań prowadzonych w 2010 roku zasolenie dotyczy kilkusetmetrowego pasa wzdłuż brzegu Martwej Wisły. W piezometrach położonych najbliżej brzegu rzeki stwierdzano stężenia chlorków nawet powyżej 3000 mg/dm³. Jest to dowód na niemal bezpośredni kontakt wód podziemnych z zasolonymi wodami Martwej Wisły. Zjawiska sztormowe, a w ich efekcie tworząca się cofka powodują, że poziomy zwierciadła wody w Martwej Wiśle wahają się od 0,93 do 1,37 metra n.p.m.

Obliczenia modelowe przepływu wód podziemnych wykazały, że tunel w najmniejszym stopniu nie zaznacza się w bilansie przepływu wód, a na układ hydroizohips wpływa bardzo nieznacznie, powodując wygięcie hydroizohips o zaledwie 0,03 metra. Podobne wyniki uzyskano w innych badaniach modelowych wykonanych przy założeniu, że kierunek przepływu wód podziemnych jest równoległy do Martwej Wisły. Parametry filtracyjne warstwy wodonośnej są zatem wystarczające do wyeliminowania zmian poziomu zwierciadła wód podziemnych, jakie mogłyby powstać w wyniku budowy tunelu. Wartości współczynnika filtracji wynoszą od $1,1 \cdot 10^{-4}$ do $0,3 \cdot 10^{-3}$ m/s, w zależności od zastosowanej metody obliczeń. Utwory wodonośne można określić jako dobrze i bardzo dobrze przepuszczalne. Najlepsze parametry filtracyjne dotyczą plejstocenijskiego przewarstwienia

żwirów wodnolodowcowych występujących na głębokości około 30 metrów, czyli w miejscu, gdzie tunel przebiega bezpośrednio pod Martwą Wisłą.

Warunki geologiczno inżynierskie i parametry geotechniczne

W ramach dokumentacji wydzielono liczne warstwy geotechniczne. Ich podział i opis przedstawiono niżej, z tym, że I_D i I_L są wartościami charakterystycznymi:

- I – torfy i miękkoplastyczne namuły organiczne
- II – gliny próchniczne i ropy próchniczne, miękkoplastyczne i plastyczne, $I_L = 0,51$
- III – piaski drobne i średnie luźne, $I_D = 0,27$
- IVa – piaski drobne i lokalnie pylaste średnio zagęszczone, $I_D = 0,49$
- IVb – piaski drobne lokalnie pylaste, zagęszczone i średnio zagęszczone, $I_D = 0,68$
- IVc – piaski drobne bardzo zagęszczone, $I_D = 0,89$
- Va – piaski średnie i grube, średnio zagęszczone, $I_D = 0,51$
- Vb – piaski średnie i grube, zagęszczone, $I_D = 0,69$
- Vc – piaski średnie i grube, bardzo zagęszczone, $I_D = 0,85$
- VIa – piaski średnie i grube, bardzo zagęszczone, $I_D = 0,85$
- VIIb – ropy przewarstwione pyłami, twarodoplastyczne, $I_L = 0,11$
- VII – pospółki i żwiry, bardzo zagęszczone, $I_D = 0,82$
- VIII – pyły półzwarte, $I_L = 0,00$
- IX – gliny piaszczyste półzwarte, $I_L = 0,00$
- Xa – ropy lokalnie gliny pylaste zwarte, twarodoplastyczne, $I_L = 0,1$
- Xb – ropy i gliny pylaste zwarte, półzwarte, $I_L = 0,00$.

Warstwy od I do VIIb są gruntami holoceniowymi, VII do IX – plejstoceniowymi, a Xa do Xb – mioceńskimi.

Przy drążeniu tunelu istotną rolę odgrywa adhezja i abrazja gruntów. Adhezyność gruntów zależy od wskaźnika plastyczności i wskaźnika konsystencji. Z przeprowa-

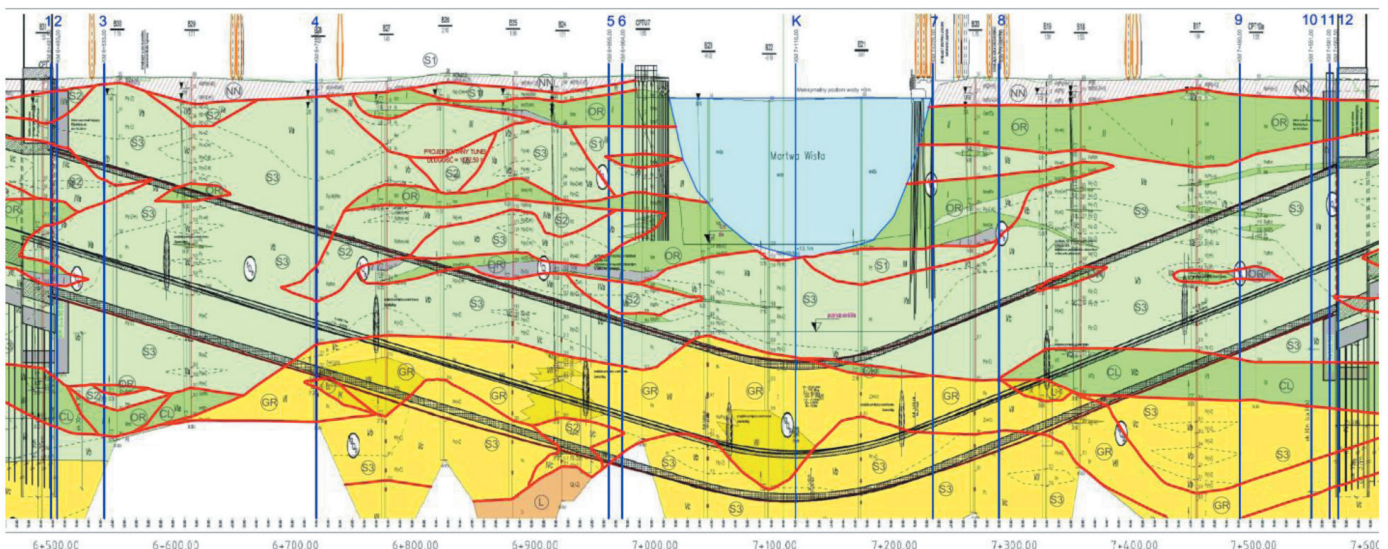
dzonych badań wynika, że ropy charakteryzują się wysoką adhezynością, natomiast namuły umiarkowaną. Test abrazyjności LCPC wykazał, że piaski nie odznaczały się ścieralnością lub ich ścieralność była niewielka, natomiast bardzo duża ścieralność dotyczy pospółek i żwirów zalegających w rejonie największego przegłębienia tunelu pod Martwą Wisłą. Jest to związane z ich dużym zagęszczeniem, wymiarem ziaren i zawartością kwarcu.

Wnioski wynikające z rozpoznania geologicznego i hydrogeologicznego

W odniesieniu do warunków geotechnicznych należy podkreślić fakt, iż wyniki wszystkich przeprowadzonych badań geotechnicznych zostały, tak w zakresie rodzajów gruntów, jak również układu warstw, potwierdzone podczas drążenia tunelu. Istotne różnice zaobserwowano jedynie w odniesieniu do występowania kamieni i gładów. Ponadto nie stwierdzono abrazyjności i adhezyność przekraczającej wartości określone na podstawie zrealizowanych badań geotechnicznych.

Analiza warunków hydrologicznych wykazała, iż parametry filtracyjne warstwy wodonośnej okazały się wystarczające dla wyeliminowania zmian poziomu zwierciadła wód gruntowych, jakie powstawały w wyniku drążenia tunelu. Rezygnacja z syfonów wyrównujących ciśnienie wód gruntowych po obu stronach konstrukcji tunelu znalazła podczas realizacji drążenia pierwszej rury swoje pełne uzasadnienie. Przy realizacji przejść poprzecznych z zastosowaniem mrożenia gruntu istnieje bezwzględna potrzeba prowadzenia stałego monitoringu jakości wód podziemnych, a w szczególności badań zawartości chlorków i mineralizacji. Sprawa jest niezwykle ważna ze względu na to, iż zasolenie wód gruntowych może w sposób znaczny utrudnić zamrażanie nawodnionego gruntu.

Już po wykonaniu pierwszej linii tunelu uznano, że wybór tarczy z płuczkowym systemem transportu urobku był prawidłowy. Rozwiązanie to pozwoliło na bezproblemowe wykonanie drążenia również drugiej rury tunelu, szczególnie w miejscach, gdzie występowały kamienie i gładzy.



Rys. 1. Warstwy geotechniczne

Źródło: [10]

Realizacja tunelu w wykopie otwartym komory startowej i wyjściowej dla TBM

Pierwotnie przewidziano wykonanie wykopu fundamentowego metodą „na mokro”, czyli pod wodą. Rozwiązanie to obejmowało zarówno wybieranie gruntu z wykopu pod wodą, jak i wykonanie uszczelnienia dna za pomocą korka betonowego, wykonanego metodą betonowania podwodnego. Dodatkowo pod wodą należało także połączyć konstrukcyjnie korek betonowy z mikropalami kotwiącymi, zabezpieczającymi korek przed wyparciem pod działaniem siły wyporu. Należy podkreślić, że roboty pod wodą, zwłaszcza głęboko i na dużej powierzchni dna, są trudne do wykonania i charakteryzują się, w porównaniu do prac prowadzonych w suchym wykopie, gorszą jakością i niższym poziomem kontroli. Do najważniejszych utrudnień technologii wykonywania robót „na mokro” można zaliczyć:

- niekontrolowane gromadzenie się pylastych osadów dennych na dnie wykopu w czasie kopania podwodnego (sedymentacja), utrudniające wykonanie betonu podwodnego (ryzyko jakości i załamywania się warstw betonu podwodnego);
- trudność uszczelnienia styku korka betonowego ze ścianą szczelinową (duże ryzyko nieszczelności połączenia);
- technologiczne problemy zapewnienia ciągłości betonowania na dużej powierzchni dna wykopu oraz jakości betonu podwodnego;
- problemy związane z wykonywaniem mikropali i montażem zakotwień pod wodą;
- konieczność, w przypadku najgłębszych sekcji wykopu, montażu rozpór stalowych pod wodą (założenie rozpór w takich warunkach jest bardzo ryzykowne);
- potrzebę zainstalowania złożonego systemu gospodarki wodą w wykopie podczas głębiania pod wodą, obejmującego napełnianie wykopu oraz opróżnianie i zrzut wody w celu zapewnienia stałego nadciśnienia hydrostatycznego wody w wykopie oraz budowy odstożników o powierzchni co najmniej 10 000 m² i wysokości obwałowania 3 metry.

Finalnie wdrożono technologię wykonania robót „na sucho”, opartą na wykonaniu ścian obwodowych i poziomych ekranów uszczelniających Soilcrete w rejonach pozbawionych naturalnego uszczelnienia dna, która ma niżej podane zalety techniczne.

- Głębienie wykopu na sucho zapewnia bieżącą kontrolę stopniowo odsłanianych styków sekcji ściany szczelinowej oraz umożliwia natychmiastową lokalizację i likwidację ewentualnych przecieków.
- Zapewnia kontrolowane warunki wykonania szczelnego połączenia płyty dennej tunelu ze ścianą szczelinową, łącznie z zabezpieczeniem zbrojenia przed korozją, co ma duże znaczenie ze względu na bezpieczeństwo i prawidłowe funkcjonowanie tunelu.
- Dzięki wykonaniu poziomych uszczelnień poniżej dna wykopu oraz dodatkowych pionowych przegród przeciwfiltracyjnych uzyskano możliwość wczesnego

sprawdzenia szczelności wydzielonych sekcji wykopu w czasie odpompowywania wody, co zwiększa bezpieczeństwo realizacji robót oraz umożliwia szybszą lokalizację ewentualnych przecieków.

- W najgłębszych sekcjach wykopu masywne ekrany Soilcrete, grubości około 3,5 m (zwiększonej w stosunku do projektowanej grubości korka podwodnego 1,5 m), pełnią rolę dodatkowej rozpory poziomej i znacząco redukują przemieszczenia ściany szczelinowej w fazie budowlanej, co istotnie zmniejsza ryzyko wystąpienia spękań ściany i nieszczelności na połączeniach sekcji.
- Wykonywanie mikropali kotwiących w suchym wykopie, z poziomu spodu płyty fundamentowej, znacząco zwiększa jakość wykonania elementów zakotwienia w porównaniu do robót pod wodą. Wykonywanie mikropali jest kontrolowane, co umożliwia na bieżąco korektę parametrów technologicznych wiercenia i podawania zaczynu. Zmniejsza się także ryzyko odchyłek w poziomie zakotwienia oraz odchyłek od pionu, które mogą niebezpiecznie zwiększyć naprężenia w żerdzi kotwiącej wskutek dodatkowego zginania podczas wyciągania.
- Montaż oraz odbiór elementów kotwiących na głowicach mikropali odbywa się w sposób kontrolowany, w korzystniejszych warunkach niż pod wodą. Jakość połączenia zwiększa się i wpływa tym samym korzystnie na poziom bezpieczeństwa realizowanych robót.
- Możliwość sprawdzenia nośności mikropali na palach produkcyjnych. Technologia wykonania robót na mokro eliminowała taką możliwość sprawdzenia pali, gdyż ze względu na kolejność robót mikropale musiały być zakotwione w betonie podwodnym. Tym samym zastosowanie metody na sucho w istotny sposób zwiększa poziom kontroli wykonania elementów kotwiących, które mają podstawowe znaczenie ze względu na stateczność wykopu i tunelu. Ponadto w warunkach „na sucho” mikropale mogą być kontrolowane zgodnie z odpowiednią normą.
- Dostosowano sposób rozparcia ścian szczelinowych, nie rozwiązany szczegółowo w projektach pierwotnych, do całego układu zabezpieczenia wykopu fundamentowego. Uwzględniono przy tym geometrię i sztywność poszczególnych segmentów tunelu i obudowy oraz odpowiednich sekcji ściany szczelinowej.

Tunel w otwartym wykopie wraz z węzłem drogowym
Doświadczenia uzyskane podczas budowy tunelu w otwartym wykopie pozwalają na stwierdzenie, iż dzięki zastosowaniu stalowych ścianek szczelnych, ścian szczelinowych o grubości od 80 do 120 centymetrów, rozparcia ścian szczelinowych między innymi metodą podstropową, zakotwienia za pomocą mikropali żelbetowych i stalowych płyty fundamentowej tunelu przy wykorzystaniu warstw nieprzepuszczalnych lub ekranów przeciwfiltracyjnych dla zredukowania działającego wyporu na płytę fundamentową, zrealizowano szczelną obudowę tunelu, która w końcowej fazie będzie ściśle powiązana z drążoną częścią tunelu.

Bardzo szczegółowa analiza realizacji tej części tunelu pozwala również na stwierdzenie, że o sukcesie zdecydowały najnowsze technologie, tak w zakresie wykonawstwa ścian szczelinowych, jak i wykonawstwa różnego rodzaju pali oraz ekranów przeciwfiltracyjnych. Pomijając technologię całej budowy, wymagającej przykładowo wykonania 11 przegród technologicznych, zwrócić należy uwagę na szeroko zakrojoną kontrolę jakości, polegającą między innymi na przeprowadzeniu szeregu badań na poletkach doświadczalnych oraz sprawdzanie wszystkich elementów konstrukcyjnych tunelu w trakcie realizacji i po wykonaniu poszczególnych robót. Można zatem wyciągnąć istotny wniosek, iż podczas realizacji odpowiedzialnych budowli w nawodnionym podłożu, sprawa skutecznej kontroli niezależnie od zastosowanej technologii, wybija się na pierwsze miejsce. Możemy dzisiaj powiedzieć, że omawiane obiekty tunelu w otwartym wykopie zostały wykonane w sposób wzorcowy i z tego względu powinny być przedmiotem dalszych szczegółowych rozważań oraz analiz, szczególnie dla przeprowadzenia szkoleń z realizacji takich obiektów.

Przy omawianiu realizacji tunelu w otwartym wykopie należy zwrócić uwagę na konieczność bardzo ścisłej współpracy między wykonawcą i projektantem, szczególnie wobec konieczności optymalizowania rozwiązań technologicznych i ich dostosowania do możliwości materiałowych i sprzętowych wykonawcy. W odniesieniu do omawianego tunelu można z pełnym przekonaniem stwierdzić, że nadzór autorski w sposób profesjonalny rozpatrywał na bieżąco schematy pracy konstrukcji w jej stanie bieżącym i docelowym oraz podejmował decyzje mające na celu pełne wykorzystanie potencjału technologicznego dla bezpiecznego prowadzenia budowy oraz osiągnięcia założonego celu w postaci gotowego tunelu. Należy założyć, że działanie nadzoru autorskiego będzie w dalszym ciągu skuteczne, przy czym będzie wymagało bardzo dużego zintensyfikowania, szczególnie podczas realizacji przejść poprzecznych. W każdym przypadku należy wyciągnąć wniosek, oparty również na doświadczeniach zdobytych podczas drażenia tunelu, iż zapewnienie dobrego funkcjonowania nadzoru autorskiego jest zadaniem podstawowym podczas dalszych etapów realizacji omawianej inwestycji.

Komora startowa i wyjściowa maszyny TBM

Rozpatrując przebieg realizacji komór umożliwiających wprowadzenie i wyprowadzenie maszyny TBM, można stwierdzić, iż niezwykle istotną i decydującą o przyjętym rozwiązaniu obudowy i dna głębokich wykopów była bardzo szczegółowa analiza stratygrafii podłoża, w którym dany wykop był realizowany. Chodzi głównie o identyfikację warstw gruntów o małej przepuszczalności, łącznie z określeniem ich miąższości.

Dla ustalenia metody uszczelnienia warstwy gruntu leżącej pod dnem wykopu istotne było bardzo dokładne określenie poziomu napiętego zwierciadła wód gruntowych oraz miąższości i przepuszczalności warstwy napinającej. Przeprowadzone bardzo dokładne dodatkowe badania geotechniczne i ich wszechstronna analiza pozwoliły na bezpieczne wykonanie ścian szczelinowych obudowy wykopu

i poziomego, kotwionego ekranu przeciw filtracyjnego w technologii iniekcji strumieniowej.

Wykonanie bezbłędne komory startowej i wyjściowej w wybranej technologii, z uwzględnieniem uzupełnionej i dzięki temu zagęszczonej siatki wierceń badawczych, stało się dowodem konieczności przyporządkowania liczby i rodzajów wierceń badawczych do konkretnego obiektu budowlanego i rozpatrywanej technologii jego realizacji.

Przy obecnym rozwoju komputerowych metod obliczeniowych bezpieczne i oszczędne projektowanie bardzo skomplikowanych obiektów budowlanych musi uwzględniać przestrzenne modele rozpatrywanej budowli oraz najnowsze i sprawdzone metody obliczeniowe, przykładowo metody elementów skończonych w płaskim i przestrzennym stanie odkształcenia.

Realizacja komory startowej i wyjściowej maszyny TBM wykazała, że niemożliwe jest wykonywanie odpowiedzialnych konstrukcji budowlanych bez zapewnienia monitoringu zachowania się poszczególnych elementów konstrukcyjnych, decydujących o bezpieczeństwie całego przedsięwzięcia.

Drażenie tunelu

Instalacja maszyny TBM

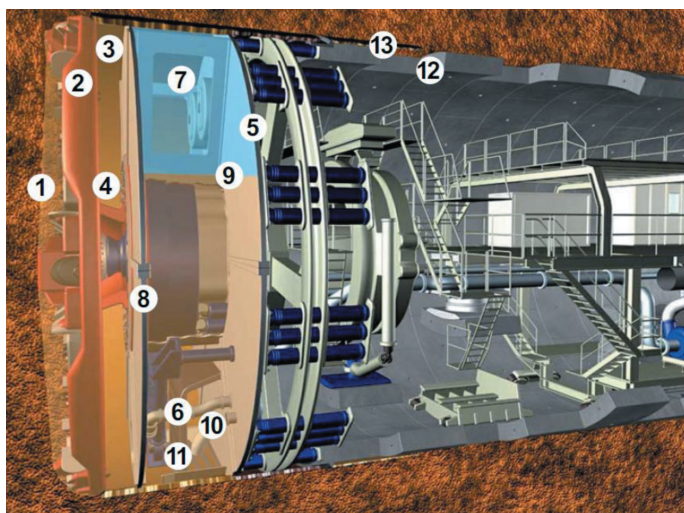
Maszynę o numerze S-745 wyprodukowano w fabryce Herrenknecht AG w Schwanau, Niemcy. Prace z tym związane trwały około 9 miesięcy. Maszyna została rozłożona i przetransportowana do Polski w wielu częściach. Większość elementów przewieziono do Gdańska transportem samochodowym, a 19 części o największych gabarytach i najcięższych przywiózł do Gdańska holenderski transportowiec „Deo Volente”. Na statku znajdowały się m.in.: 245-tonowy silnik, zespół napędowy, podzielona na segmenty obudowa tarczy. Ze względu na gabaryty transportowanych części rozładunku dokonano największym w Polsce pływającym dźwigiem o nazwie „Maja”, który przeniósł je bezpośrednio na przygotowane wcześniej jednostki transportowe do przewozu towarów ponadgabarytowych.

Warunkiem rozpoczęcia instalacji maszyny TBM na budowie było wykonanie wspomnianej w poprzednim rozdziale komory startowej. Proces montażu podzielono na kilka etapów. Po zakończeniu robót przygotowawczych rozpoczęto operację scalania i montażu maszyny TBM w pozycji umożliwiającej rozpoczęcie drażenia. Do szybu opuszczono głowicę skrawającą oraz elementy tarczy, z których najcięższy ważył 245 ton. Całość maszyny umieszczono na wspomnianej wcześniej zmontowanej kołysce. Następnie przez otwór technologiczny w stropie żuraw gąsienicowy o udźwigu 600 ton podał wcześniej przygotowane trzy bramy. Masa jednej zmontowanej bramy wynosiła 270 ton. Maszynę zmontowano w około 90-metrowy ustrój połączony z zakładem separacji płuczki.

Tarcza typu mix – zasada działania

Obrotowa głowica skrawająca odspaja grunt na całej powierzchni czoła tunelu. Odspojony grunt wraz z płuczką wiertniczą trafiają do wylotu w przegrodzie. Przestrzeń przed głowicą stanowi komorę eksploatacyjną, którą od komory roboczej oddziela przegroda. Wydobyty grunt razem z płuczką

z komory roboczej zasysany jest przez pompy do wlotu linii odprowadzającej, a następnie pompowany rurociągami do zakładu separacji zlokalizowanego na zewnątrz tunelu. Usuniętą objętość zawiesiny uzupełnia się mieszanką bentonitową. Poduszka powietrzna reguluje ciśnienie w komorze roboczej. Ciśnienie poduszki powietrznej równoważy ciśnienie gruntu i wody, zapobiegając niekontrolowanym obwałom gruntu i utracie stateczności czoła tunelu. Ciśnienie w sporcie czoła tunelu w komorze eksploatacyjnej jest kontrolowane poprzez poduszkę powietrzną, a nie bezpośrednio za pomocą ciśnienia zawiesiny. System sprężonego powietrza utrzymuje pod precyzyjną kontrolą poduszkę sprężonego powietrza dokładnie na poziomie wymaganej wartości ciśnienia. Aby ekonomicznie dysponować płuczką, mieszanina zawiesiny bentonitowej i gruntu musi być rozdzielona na zewnątrz tunelu na części stałe i płynne. Pozwala to, w stosunkowo dużym stopniu, na powrót do obwodu oczyszczonej zawiesiny bentonitowej.



- | | | |
|---------------------------|---------------------------|--------------------|
| [1] Czoło tunelu | [6] Linia doprowadzająca | [11] Krata |
| [2] Głowica skrawająca | [7] Poduszka powietrzna | [12] Segmenty |
| [3] Płuczka wiertnicza | [8] Przegroda | [13] Obudowa ogona |
| [4] Komora eksploatacyjna | [9] Komora robocza | |
| [5] Ściana ciśnieniowa | [10] Linia odprowadzająca | |

Rys. 2. Schemat tarczy TBM
Źródło:[8]

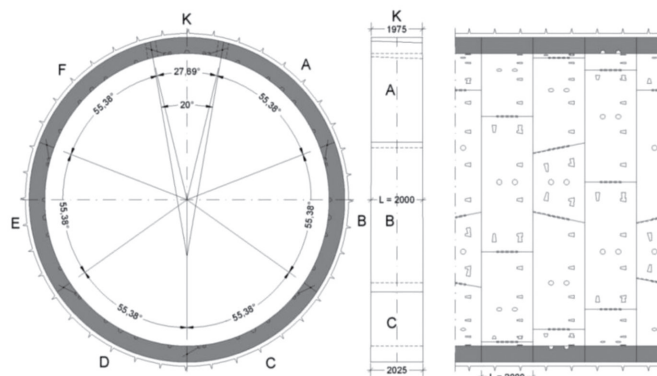
Postęp TBM

Postęp tarczy odbywa się dzięki siłownikom, które odpychają się od prefabrykowanej obudowy tunelu (pierścienia segmentu) zbudowanej w poprzednim cyklu. Podczas gdy w czole odbywa się drążenie, segmenty, które tworzą pierścień, są rozładowywane na podajniku. Przestrzeń pomiędzy wcześniej wbudowanymi pierścieniami a terenem jest wypełniana zaprawą.

We wprowadzonym typie maszyny TBM, a mianowicie TBM MIXSHIELD, w każdym cyklu postępu tarczy prowadzone są następujące działania:

- drążenie odcinka o długości 2 metrów i jednoczesne wypełnianie wolnych przestrzeni na zewnątrz obudowy;
- montaż pierścienia obudowy;
- przedłużenie toru i instalacji (co 6 metrów);
- prace utrzymaniowe i naprawcze, jeśli wymagane.

Budowa pierścienia



Rys. 3. Schemat pierścienia
Źródło:[9]

Po każdym dwumetrowym postępie tarczy, za pomocą erektora (podajnika), instalowany jest nowy pierścień segmentowy, który służy jako oparcie dla siłowników umożliwiających ruch postępowy tarczy. Tworzy on wodoszczelną obudowę tunelu. Geometria pierścienia obudowy pozwala na wykonanie łuków, zarówno w kierunku poziomym, jak i pionowym. Jest to możliwe dzięki obrotowi kolejnego pierścienia względem poprzedniego. W zależności od umiejscowienia tubingu kluczowego uzyskuje się wymagany łuk tunelu. Tubing kluczowy montowany jest zawsze jako ostatni segment w pierścieniu. Pierścień podawany erektorem montuje się w taki sposób, aby nie pokrywały się połączenia radialne segmentów kolejnych pierścieni. Ma to na celu uniknięcie tworzenia osłabionej płaszczyzny obudowy. W tym celu przewidziano 26 różnych kombinacji ułożenia pierścienia.

Erektor jest podajnikiem typu pierścieniowo-obrotowego, wyposażonym w urządzenia do próżniowego podnoszenia, który umożliwia przemieszczanie segmentów obudowy w trzech kierunkach wraz z ich obrotem.

Każdy segment zostaje ustawiony w prawidłowej pozycji przez podajnik i po uzyskaniu założonej pozycji jest przytwierdzony do poprzedniego segmentu. Następnie na zamocowanym tubingu oparte zostają odpowiadające mu siłowniki. Po tym etapie, podajnik zwalnia segment i powtarza ten sam cykl z drugim elementem pierścienia. Ta sama procedura jest stosowana dla wszystkich elementów pierścienia. Gdy pierścień jest kompletny i zamknięty, rozpoczyna się nowy cykl drążenia.

Postęp drążenia oraz przedłużanie przewodów i kabli
W miarę postępu drążenia, cyklicznie po każdym wydrążonych 6 metrach, przedłużane są następujące elementy niezbędne do prowadzenia robót związanych z budową tunelu:

- rurociągi doprowadzające i odprowadzające urobek i zawiesinę wodno-bentonitową, przyłącza zasilania wody i powietrza, tory, wentylacja, zasilanie elektryczne (co 350 metrów).

Postój w bloku *jet-grouting*

Aby „przejść” pod rzeką w sposób bezpieczny, przed drążeniem pod rzeką wykonano w gruncie blok betonowy. Jest to obszar wzmocnionego gruntu na długości 8 metrów,



Fot. 1. Widok wnętrza tunelu podczas budowy

Źródło: GIK

wykonany na głębokości od 15,8 do 32,8 metra p.p.m. Blok został wykonany w technologii *jet-grouting*, czyli istniejący grunt wymieszano z zaczynem stabilizującym, wtłaczanym strumieniowo pod wysokim ciśnieniem. Planowany postój maszyny w bloku trwał kilkanaście dni i pozwolił na dokonanie rzeczywistej oceny zużytych narzędzi oraz ich wymianę. Specjalistyczne trzyosobowe grupy nurków, po uprzednim przejściu przez komory hiperbaryczne, wchodziły do komory eksploatacyjnej. Wszystkie elementy zostały poddane analizie, po której nastąpił proces demontażu oraz dokonano koniecznej wymiany zużytych lub zniszczonych narzędzi. Dla realizacji powyższych prac zapewniono ekipę pracowników składającą się między innymi z: 36 profesjonalnych nurków, 2 operatorów komory hiperbarycznej i 2 lekarzy specjalistów medycyny hiperbarycznej.

Zakład separacji

Zadaniem zakładu separacji jest oczyszczenie płuczki, czyli zawiesiny bentonitowej wykorzystywanej w czasie drążenia tunelu do podpierania przodka, transportu urobku oraz chłodzenia i smarowania narzędzi wiertących. Urządzeniem, bez którego nie może pracować zastosowana głowica maszyny TBM, jest zakład separacji. Separator HSP2400 jest największym urządzeniem tego typu, jakie do tej pory pracowały na terenie Polski. Płuczka wraz z wydrążonym gruntem trafia do zakładu separacji.

Zakład separacji (STP) składa się z następujących elementów: mieszalnik płuczki HK60, separator HSP2400, wirówka, zbiorniki płuczki, rurociągi płuczki i pompy transferowe.

Mieszalnik płuczki produkuje w trybie automatycznym lub ręcznym około 40 m³ na godzinę płuczki wiertniczej o żądanej konsystencji. Silos mieszalnika może pomieścić do 75 ton bentonitu.

Separator HSP2400 ma budowę kontenerową o wymiarach w planie: 23 na 9 metrów i wysokość 10 metrów. Ma wbudowanych 6 sit wibracyjnych dwupokładowych, w tym dwa sita wstępne i cztery sita dokładnego oczyszczania. Separator wyposażony jest w 8 pomp płuczki o wydajności po 350 m³/godz. każda. Pompy napędzane są silnikami elektrycznymi o mocy 200 kW.

Bezpośrednio przy separatorze zlokalizowana jest pompa, o wydajności do 2400 m³ na godzinę, napędzana silnikiem elektrycznym o mocy 750 kW. Pompa przesyła czystą płuczkę wiertniczą do maszyny TBM. W chwili zakończenia drążenia każdej z dwóch rur tunelu była to odległość 1.440 metrów + 1.070 metrów tunelu + 370 metrów – odległości zakładu separacji od szybu startowego. Płuczkę wzbogaconą urobkiem z maszyny na najwyższą kondygnację separatora pompuje kolejna pompa zlokalizowana w maszynie tuż za tarczą oraz pompa zlokalizowana w szybie startowym. Po przejściu przez skrzynię rozdziału i skrzynie tłumiące płuczka trafia na sita wstępne, które odbierają pokruszone głązy i kamienie o krawędzi od 4 do 14 milimetrów. Frakcje drobniejsze wraz z wstępnie oczyszczoną płuczką trafiają na baterie hydrocyklonów i na sita dokładnego oczyszczania. Hydrocyklony oczyszczają płuczkę z drobin o rozmiarach do 30 mikronów. Pozbawiony płynu urobek, za pośrednictwem dwu taśmociągów, trafia na składowisko wewnętrzne, skąd samochodami wywożony jest na składowisko docelowe.

Oczyszczona płuczka ponownie trafia do obiegu. W ciągu godziny separator odbiera około 500 ton urobku (pokruszonych głązów, kamieni, żwiru i piasku). W całym procesie drążenia 2 rur tunelu wydobyto i odseparowano około 500 tysięcy m³ urobku.

W skład zakładu separacji wchodzi również dwa zbiorniki płuczki o pojemności po 800 m³ każdy. W jednym magazynowana jest płuczka czysta, przygotowana do wprowadzenia do obiegu, drugi służy do przechowywania płuczki przeznaczonej do regeneracji.

Średnica tarczy wiertniczej (12,56 metrów) jest większa niż miąższość większości warstw napotkanych na trasie tunelu. Urobek odbierany w danej chwili przez zakład separacji pochodził zatem z kilku wyodrębnionych w dokumentacji geotechnicznej warstw, to znaczy, że piaski czy żwiry zmieszane zostały z torfem, gliną czy namułami. Taka różnorodność gruntów wymagała od załogi zakładu separacji szczególnej uwagi i dbałości o parametry płuczki wiertniczej.

Pewnym zaskoczeniem była duża liczba kamieni, otczaków i głązów. Na sicie wstępnym odbierano fragmenty pokruszonych głązów o krawędzi do 35 centymetrów. Duża zawartość kamieni była również powodem znacznej liczby i różnego rodzaju uszkodzeń narzędzi skrawających tarczy wiertniczej.

Produkcja tubingów

Do wykonania prefabrykatów, zgodnie z dokumentacją projektową, zastosowano beton klasy C45/55 o stopniu wodoszczelności W8 i stopniu mrozoodporności F150 oraz nasiąkliwości poniżej 5%. Proces produkcji tubingów rozpoczął się w magazynie kruszyw – prawidłowe uziarnienie i gatunek kruszyw to warunek uzyskania dobrego betonu. Drugim ważnym elementem decydującym o wytrzymałości obudowy przy zginaniu jest zbrojenie prefabrykatów – zbrojenie w postaci gotowego kosza układane było w formie.

Formy wykonano jako stalowe konstrukcje spawane, z tolerancją odchyłek poniżej 1 mm. Elementy prefabrykowane

są układane „na sucho”, a stabilność konstrukcji uzyskuje się dzięki współpracy obudowy z gruntem. Przez parcie i odpór zapewnia się równomierny rozkład naprężeń ściskających w tubingach i kleszczenie się na suchych powierzchniach styku. Dodatkowym elementem wypełniająco-uszczelniającym jest iniekcja betonowa pomiędzy gruntem rodzimym i obudową oraz system gumowych uszczeltek. Powierzchnie styku tubingów muszą idealnie do siebie pasować.

Gotowe prefabrykаты poddawane były ostatecznej kontroli, następnie dzielone na komplety (1 komplet zawiera pełny pierścień) i składowane w oczekiwaniu na transport na budowę.

Wykonanie przejść poprzecznych

W tunelu zaprojektowano przejścia poprzeczne między ramami w odstępach co około 175 metrów. Uwzględniając warunki środowiskowe, przepuszczalność gruntu oraz bezpieczeństwo realizacji przejścia poprzeczne zostaną wykonane w technologii mrożenia gruntu. Technologię tą stosuje się w celu czasowego wzmocnienia gruntu, wykorzystując jedynie fizyczne właściwości gruntu i wody, bez naruszania w sposób trwały jego właściwości początkowych.

Proces mrożenia gruntu solanką obejmuje kolejno następujące roboty, które będą powtarzane dla każdego z przejść poprzecznych:

- wiercenie (częściowe) przez obudowę tunelu dla instalacji rury osłonowej i prewentera, które zapobiegają niekontrolowanym napływom wody i gruntu do tunelu podczas wiercenia i instalacji rur;
- wiercenie przez pozostałą część obudowy tunelu z użyciem prewentera;
- wiercenie w gruncie oraz instalacja rur mrożeniowych, pomiaru temperatury i odwodnieniowych;
- podłączenie rur mrożeniowych do agregatów mrożeniowych zlokalizowanych w tunelu głównym (obieg zamknięty rozprowadzania solanki);
- instalację czujników pomiaru temperatury wewnątrz rur pomiaru temperatury (również czujników w obudowie tunelu północnego), podłączenie ich do rejestratorów danych oraz głównego czytnika i bazy danych w biurze technicznym;
- mrożenie gruntu zgodnie z parametrami i wymaganiami projektu;
- utrzymanie mrożenia podczas realizacji przejścia, które po wykonaniu stałej obudowy przejścia zostaje zatrzymane.

Podczas realizacji przejść poprzecznych stosowane są agregaty mrożeniowe (schłodzarki) chłodzące solankę do ustalonej z góry temperatury. Solanka jest rozprowadzana w rurach mrożeniowych w obiegu zamkniętym, a główny czynnik chłodniczy, zazwyczaj amoniak, znajduje się w obiegu wewnątrz agregatu. Jako czynnik obiegający rury mrożeniowe (tzw. wtórny czynnik chłodniczy) stosuje się solankę, czyli roztwór soli (chlorku soli). Zmieniając stężenie soli w roztworze, uzyskuje się różne punkty topnienia.

Podsumowanie

Szczegółowe rozpoznanie bardzo trudnych warunków gruntowo-wodnych pozwoliło na sterowanie pracą maszyny TBM przy optymalnych parametrach uwzględniających stan i rodzaj gruntów. Pozwoliło to jednocześnie na bezpieczną i sprawną realizację według procedur przewidzianych w dokumentacji. Drażenie pierwszych metrów pierwszego tunelu wymagało przetestowania maszyny w warunkach rzeczywistych.

Na podstawie doświadczeń z drażenia można generalnie stwierdzić, że zarówno rodzaj gruntów występujących w świetle drażonego tunelu, jak również układ warstw geologicznych, wykazanych w dokumentacji sporządzonej na etapie powstawania projektu, pokrył się z realnymi warunkami stwierdzonymi w trakcie drażenia pierwszej oraz drugiej rury tunelu.

Efekty, jakie osiągnięto podczas drażenia tunelu pod Martwą Wisłą, wynikają również z wysokiej jakości elementów prefabrykowanych składających się na obudowę tunelu tj. tubingów oraz sposobu ich precyzyjnego wbudowywania.

Współpraca zespołu nadzoru z wykonawcą, projektantem i konsultantami naukowymi zapewniła optymalną i bezpieczną realizację inwestycji oraz umożliwiła implementację w środowisku inżynierskim najbardziej nowoczesnych i spektakularnych osiągnięć technicznych. Można mieć nadzieję, iż zdobyta praktyczna wiedza o sposobie i metodach realizacji tak skomplikowanego i złożonego obiektu budowlanego (tj. konstrukcji tunelu) pozwoli uzyskane doświadczenia w pełni wykorzystać przy realizacji kolejnych priorytetowych przedsięwzięć.

Literatura

1. Materiały i referaty z sympozjum *Tunel drogowy pod Martwą Wisłą w Gdańsku*, „Inżynieria i Budownictwo”, 2013, nr 1.
2. Materiały i referaty z sympozjum *Tunel drogowy pod Martwą Wisłą. Doświadczenia z budowy pierwszej rury tunelu*, „Inżynieria i Budownictwo”, 2014, nr 2.
3. *Instrukcja sporządzania i obróbki płuczki wiertniczej*, Obrascón Huarte Lain SA, Gdańsk 2013.
4. *Metodologia realizacji kierunku drażenia tunelu dla systemu TBM*, Obrascón Huarte Lain SA, Gdańsk 2013.
5. *Monitoring terenu oraz obiektów budowlanych w ramach drażenia tunelu metodą TBM*, Obrascón Huarte Lain SA, Gdańsk 2013.
6. Projekt budowlany „Połączenie Portu Lotniczego z Portem Morskim Gdańsk–Trasa Słowackiego” Zadanie IV Odcinek Węzeł Marynarki Polskiej–Węzeł Ku Ujściu TUNEL POD MARTWĄ WISŁĄ”, Europrojekt Gdańsk Sp z o.o., SSF Ingenieure GmbH, Gdańsk, listopad 2010.
7. *Projekt monitoringu*, Obrascón Huarte Lain SA, Gdańsk 2013.
8. *Program zapewnienia jakości i organizacji robót, tunel drażony*, Obrascón Huarte Lain SA, Gdańsk 2013.
9. *Program zapewnienia jakości i organizacji robót. Mrożenie gruntu*, Obrascón Huarte Lain SA, Gdańsk 2014.
10. *Raport parametrów geotechnicznych*, Obrascón Huarte Lain SA, Gdańsk 2013.
11. *Raport z wymiany narzędzi tnących głowicy skrawającej TBM*, Obrascón Huarte Lain SA, Gdańsk 2013.