INŻYNIERIA i BUDOWNICTWO

Miesięcznik Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa

DYPLOM

w konkursie dotyczącym wyróżniającej się współpracy
z redakcją w 2022 roku

Kolegium Redakcyjne „Inżynierii i Budownictwa"
przyznało

NAGRODĘ

za przygotowanie artykułów:
studium przypadku „Tunel Świnoujście" – opublikowanych w **nr. 3-4/2022**

Laureatami zostali

- **eng. Mert Vardar** – „Dobór maszyny TBM, instalacja oraz drążenie tunelu"
- **mgr inż. Myroslava Hetsko** – „Projekt i realizacja odcinków dojazdowych do tunelu TBM"
- **mgr inż. Patryk Mikulski CEng, MICE** – „Uwarunkowania projektowania obudowy tunelu TBM w Świnoujściu"
- **mgr inż. Marta Szymańska** – „Warunki geologiczno-inżynierskie na obszarze lokalizacji tunelu pod Świną a monitoring osiadań"
- **mgr inż. Paweł Segit** – „Wsparcie BIM i modelowanie 3D"
- **mgr inż. Łukasz Chodakowski** – „Wyzwania związane z wykonaniem wyjść ewakuacyjnych"
- **mgr inż. Jacek Król** – „Doświadczenia nadzoru z dotychczasowej realizacji tunelu pod Świną"

SERDECZNIE GRATULUJEMY

W imieniu Kolegium Redakcyjnego

Barbara Goszczyńska

Prof. dr hab. inż. Barbara Goszczyńska
Redaktor naczelna

Warszawa, czerwiec 2023 r.

Eng. MERT VARDAR
Tłumaczenie z języka angielskiego **Patryk Mikulski**

Dobór maszyny TBM, instalacja oraz drążenie tunelu

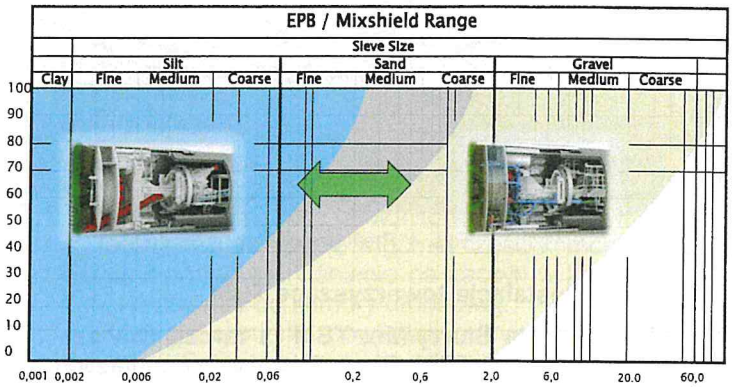
Maszyny TBM EPB działają wg zasady utrzymywania równowagi ciśnień na przodku tunelu. Stateczność przodka jest zapewniona przez parcie urobionego gruntu w komorze roboczej oraz prędkość obrotową głowicy i prędkość posuwu maszyny.

Tarcze TBM typu Slurry/Mix (płuczkowe – zawiesinowe) zostały zaprojektowane jako system zamknięty, utrzymujący ciśnienie przez tworzenie „poduszki" (ekranu) z zawiesiny bentonitowej i dostarczanego pod ciśnieniem powietrza. Zawiesina i skrawany grunt są uswane systemem rur szlamowych do zakładu separacji płuczki (STP – slurry treatment plant).

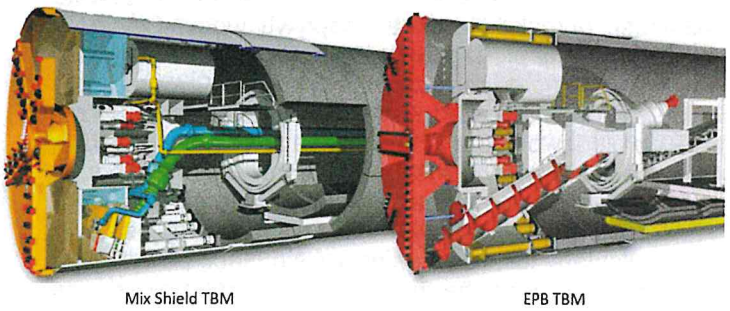
Dla maszyn EPB TBM idealne warunki to grunty spoiste i niespoiste o dużej zawartości gliny lub iłu oraz małej przepuszczalności wody. Maszyny zawiesinowe są bardziej efektywne w gruntach niespoistych, od drobnoziarnistego piasku do gruboziarnistego żwiru.

Wybór pomiędzy maszynami EPB i Slurry/Mix jest uzależniony od warunków gruntowo-wodnych. W przypadku materiałów ziarnistych lepszym wyborem są maszyny płuczkowe (zawiesinowe) – TBM Slurry/Mix Shield. Mogą one szybciej reagować na zmienne warunki gruntowe, ponieważ nacisk czoła jest kontrolowany przez ciśnienie powietrza regulowane za pomocą urządzenia Samson. W przypadku stosowania EPB w warunkach mieszanych, tzn. tam, gdzie czoło tunelu znajduje się częściowo w twardym ośrodku gruntowym, np. miękkiej skale, a częściowo w gruntach, część siły napędowej może zostać utracona. Natomiast w przypadku materiałów spoistych korzystniejsze jest zastosowanie maszyny typu EPB, ponieważ system hydrauliczny maszyny typu Slurry/Mix może ulec zamuleniu (zostać zatkany), a ponadto oddzielenie drobnych frakcji ilastych i pylastych jest technicznie skomplikowane i kosztowne. Podsumowując, w przypadku materiałów niespoistych (np. piasków i żwirów) lepsza jest maszyna płuczkowa, natomiast w gruntach spoistych stosowanie maszyny typu Slurry/Mix Shield może stanowić problem. Na rysunku 1 pokazano maszynę TBM z tarczą typu zawiesinowego wykonaną dla inwestycji w Świnoujściu, na rys. 2 – ideę doboru odpowiedniej maszyny, a na rys. 3 – schemat TBM EPB i Slurry/Mix Shield. Oprócz warunków gruntowych należy wziąć pod uwagę również inne parametry, takie jak: sposób postępowania z urobkiem, dostępną przestrzeń dla STP (stacji separacji płuczki), zużycie wody itp.

Rys. 1. Maszyna Mix Shield TBM



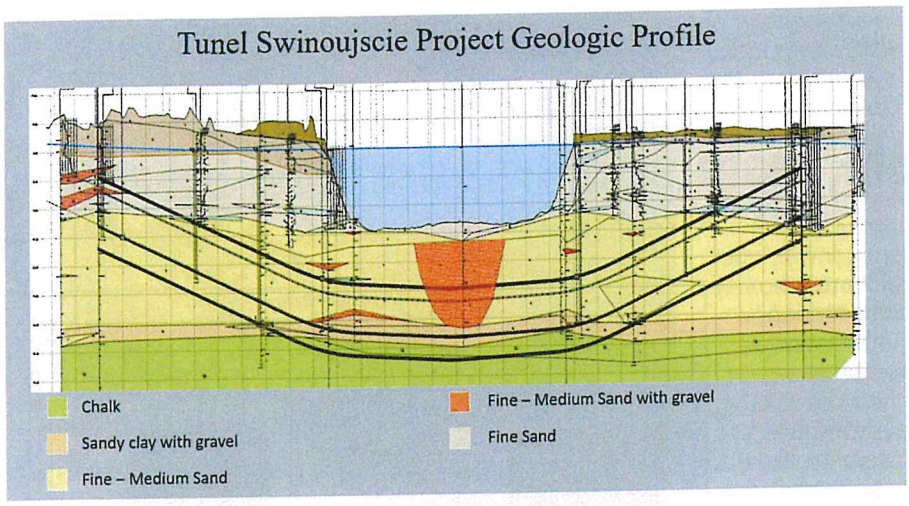
Rys. 2. Dobór maszyny TBM



Rys. 3. Schemat maszyny EPB i Mix Shield

W przypadku maszyn TBM EPB łatwiej jest zarządzać transportem urobku z placu budowy na zwałowisko i w większości przypadków nie ma potrzeby oczyszczania urobku na placu budowy. Natomiast w przypadku TBM typu Slurry/Mix sytuacja jest zupełnie inna. Przede wszystkim proces oczyszczania jest bardziej kosztowny, ponieważ w celu oddzielenia urobku od zużytej zawiesiny bentonitowej potrzebna jest stacja separacji płuczki, co wymaga dużej powierzchni terenu, dobrej organizacji dostaw bentonitu, wykwalifikowanego personelu, dużej ilości wody, wirówek lub pras filtracyjnych oraz dobrze zorganizowanej gospodarki odpadami dla materiału pochodzącego z wirówek lub pras filtracyjnych.

Na budowie tunelu w Świnoujściu zastosowano maszynę typu Slurry/Mix ze względu na wysoki poziom wody i niespoiste warunki gruntowe, od piasku drobnoziarnistego do żwiru gruboziarnistego (rys. 4). Dodatkowo na trasie tunelu w niektórych miejscach nadkład jest mniejszy niż jedna średnica tunelu, istnieje więc ryzyko wystąpienia problemów z utrzymaniem ciśnienia w komorze wykopu. W przypadku maszyny typu Slurry/Mix utrzymanie wymaganego ciśnienia jest znacznie łatwiejsze niż w przypadku tarcz EPB.



Rys. 4. Profil geologiczny – Świnoujście

Instalacje towarzyszące TBM

• **Technologia Slurry/Mix TBM (z tarczą zawiesinową).** W tarczach TBM Slurry/Mix wykorzystujących zawiesinę, podczas drążenia wyrobiska wymagane jest utrzymanie ciśnienia w komorze roboczej, aby zapewnić stabilność przodka i uniknąć napływu wody. Ciśnienie jest zapewniane przez zawiesinę pod ciśnieniem znajdującą się w komorze roboczej i urobkowej. Komora urobkowa jest oddzielona od komory roboczej ścianą. Przepływ pomiędzy obiema komorami zapewnia otwór w dolnej części ściany. W trakcie drążenia komora robocza jest całkowicie wypełniona zawiesiną bentonitową, natomiast poziom zawiesiny w komorze urobkowej jest zwykle regulowany tak, aby znajdował się nieco powyżej osi maszyny. Ciśnienie na przodku jest kontrolowane za pośrednictwem poduszki sprężonego powietrza, która wytwarza się w części komory roboczej. Wahania objętości w komorach można łatwo kompensować bez istotnej zmiany ciśnienia naporu. Podczas posuwania się maszyny TBM urobek jest mieszany z zawiesiną i pompowany przez system pomp i rurociągów na powierzchnię terenu, do zakładu separacji urobku. Świeża lub zregenerowana zawiesina jest stale dostarczana do komory roboczej przez system rurociągów i pomp aż do maszyny TBM przez cały tunel.

Wymagane ciśnienie robocze TBM określa się, biorąc pod uwagę warunki geotechniczne i osiadanie.

• **Właściwości zaczynu.** W TBM zawiesina pełni dwie główne funkcje:

– stabilizuje czoło tunelu i zapobiega napływowi wody;

– transportuje urobek z komory roboczej do zakładu separacji płuczki.

Właściwości zawiesiny bentonitowej, a w szczególności jej reologia, muszą być określone, aby prawidłowo spełniała ona obie te funkcje. Drugorzędne funkcje i właściwości zawiesiny to:

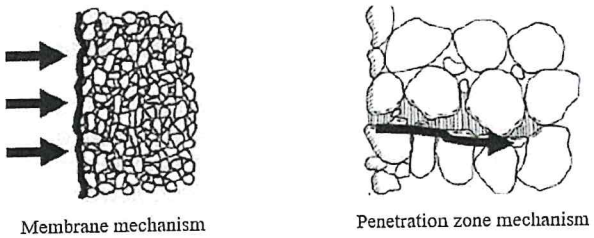
– smarowanie, aby ograniczyć zużycie urządzeń,

– ograniczenie hydratacji gruntów spoistych, a tym samym zmniejszenie ich lepkości.

W maszynach TBM z zawiesiną stosuje się zawiesinę bentonitową, czyli zawiesinę cząstek bentonitu w wodzie z ewentualnymi dodatkami specjalnymi.

• **Mechanizm utrzymywania zawiesiny.** Mechanizm nacisku czoła gruntowego zaczynem zawiesinowym można opisać za pomocą teorii opracowanej przez *Müllera-Kirchenbauera*. Możliwe są dwa mechanizmy przenoszenia ciśnienia (rys. 5).

Mechanizm membranowy (lub warstwy filtracyjnej): podczas drążenia wyrobiska zawiesina tworzy membranę, która pod ciśnieniem infiltruje pory urabianego gruntu, wypełniając je bentonitem, zmniejszając przepuszczalność gruntu, nadając mu spójność i tym samym poprawiając jego samostateczność. Membrana ta umożliwia bezpośrednie przenoszenie ciśnienia zawiesiny na grunt jako skutecznego przeciwciśnienia stabilizującego, również w przypadku gruntów o dużej przepuszczalności.



Rys. 5. Mechanizm przenoszenia ciśnienia

Mechanizm strefy penetracji: zawiesina penetruje grunt i przenosi swoje ciśnienie na cząstki gruntu w postaci naprężeń ścinających.

• **Podstawowe dane techniczne maszyny TBM**

Moc całkowita: 7174 kW
Masa: 3120 t
Długość tarczy wraz z zapleczem: 105 m
Prędkość wiercenia: 60 mm/min
Średnica tarczy TBM: 13 460 mm

• **Zakład separacji płuczki (STP).** Zaprojektowano zakład separacji płuczki z 6 stopniami technologicznymi o łącznej wydajności 2800 m^3/h, który służy do oddzielania wydobytego urobku od zawiesiny bentonitowej powracającej z maszyny TBM. STP zaprojektowano o wydajności do 800 t/h fazy stałej pochodzącej z TBM.

Ze względu na niezawodność i elastyczność działania, równocześnie pracuje sześć modułowych podukładów o wydajności 500 m^3/h każdy.

Dla systemu separacji o wydajności 3000 m^3/h zaprojektowano kolejne etapy procesu przedstawione w tablicy.

• **Zasilanie powietrzem – sprężarki.** Układ sprężonego powietrza składa się z dwóch oddzielnych i niezależnych linii zasilania powietrzem: linii roboczej i linii awaryjnej. Linia robocza jest normalną linią zasilającą TBM w powietrze. W przypadku awarii linii eksploatacyjnej linia awaryjna uruchamia się automatycznie poprzez uruchomienie automatycznego dopływu powietrza do maszyny TBM. Każda linia jest w stanie dostarczyć odpowiednią ilość powietrza do komory roboczej maszyny TBM.

Linia robocza składa się ze sprężarek elektrycznych o łącznej objętości przepływu powietrza ok. 67 m^3/min przy ciśnieniu roboczym 8 barów.

Linia awaryjna składa się ze sprężarek z napędem dieslowskim o całkowitym przepływie powietrza ok. 69 m^3/min.

Tablica

Specyfikacja STP

Klasyfikacja wstępna	Górny pokład Wydajność cieczy maks.: 3000 m³/h Wydajność gruntu maks.: 300 t/h Punkt odcięcia: 10 mm
Sito klasyfikujące	Dolny pokład Wydajność cieczy maks.: 3000 m³/h Wydajność gruntu maks.: 100 t/h Punkt odcięcia: 2,5 mm
Stopnie hydrocyklonu głównego	6 jednostek potrójnych Wydajność cieczy: 3000 m³/h Wydajność gruntu: 450 t/h Punkt odcięcia D_{50}: ok. 80 µm
Stopnie hydrocyklonu wtórnego	Po 6 zespołów multicyklonowych typu 24 x PC 100 Wydajność cieczy: 3000 m³/h Wydajność gruntu: 300 t/h Punkt odcięcia D_{50}: ok. 20–25 µm
Filtr odwadniający dla pierwszego i drugiego stopnia hydrocyklonu	Oba pokłady po 6 dwupokładowych filtrów odwadniających
Dokładna separacja z użyciem wirówki	Trzy wirówki, każda o wydajności 25 t/h

- **Wytwórnia zaczynu cementowego.** Zbudowano węzeł dozowania o wydajności 30 m³/h w celu przygotowania zaczynu odpowiedniego dla dwuskładnikowego zaczynu. Przyspieszacz chemiczny był przesyłany pompami do tunelu bezpośrednio przez system rurociągów.
- **Suwnica portalowa.** Użyto żurawia portalowego o nośności 42,5 t, który umożliwił jednoczesne opuszczenie 3 segmentów na pojazd MSV.
- **Wentylator tunelowy.** Wentylator tunelowy o wydajności 52 m³/s został użyty w celu dostarczenia świeżego powietrza do tunelu.
- **Pojazd wielozadaniowy (MSV).** Dwa pojazdy typu MSV o ładowności 100 t zostały użyte do transportu segmentów i wszystkich niezbędnych urządzeń do drążenia tunelu.
- **Oczyszczalnia wody.** Oczyszczalnia wody o wydajności 120 m³/h została wykorzystana do oddzielenia substancji chemicznych i cząstek stałych ze zużytej wody z tunelu, szybu i zakładu separacji płuczki.

Technologia drążenia TBM

W tarczy typu Slurry/Mix stosuje się zawiesinę w dwóch celach: zapewnienia wymaganego przeciwciśnienia na przodku oraz usunięcia urobku z komory wyrobiskowej i wyprowadzenia go poza tunel. W związku z tym, aby zawiesina mogła zawsze spełniać te dwie funkcje, musi być rozprowadzana w systemie hydraulicznym o odpowiednich właściwościach, ciśnieniu i przepływie. Układ pompowania zawiesiny, zakład separacji płuczki oraz wszystkie urządzenia w maszynie TBM są projektowane i eksploatowane w celu spełnienia tych warunków.

Do transportu zawiesiny w TBM mogą być stosowane różne procedury, w zależności od konkretnych prac wykonywanych na przodku i/lub w urządzeniu. Przed uruchomieniem maszyny TBM w normalnym trybie drążenia, pilot TBM w trybie obejścia reguluje prędkość obrotową pomp zasilających i tłoczących, a także podobnych pomp w tunelu, przy czym prędkość obrotowa steruje ciśnieniem w przewodach hydraulicznych płuczki, aż do osiągnięcia wymaganego natężenia przepływu.

Po uzyskaniu wymaganych wartości można rozpocząć pracę w trybie drążenia. Otwierają się linie zasilające z przodu. Płuczka trafia bezpośrednio do komory urobkowej. Natężenie przepływu i ciśnienie płuczki muszą być regulowane w zależności od prędkości posuwu maszyny TBM i warunków geologicznych oraz na podstawie przeciwciśnienia dla danego odcinka wyrobiska.

Podczas drążenia z użyciem TBM należy stale monitorować następujące wartości:

- ciśnienie w komorze roboczej, które musi być zgodne z wartością progową ciśnienia w danej sekcji;
- gęstość i strumień wlotu i wylotu płuczki;
- objętości i ciśnienia iniekcji zaczynu wypełniającego;
- właściwości płuczki.

Monitorowanie ciśnienia czołowego

Ciśnienie zawiesiny bentonitowej jest regulowane przez powietrze znajdujące się w górnej części komory roboczej. Powietrze przenosi ciśnienie na zaczyn w komorze roboczej i przez rury do komory urobkowej.

Kontrola ciśnienia powietrza odbywa się za pomocą systemu Samson, który umożliwia bardzo precyzyjną regulację ciśnienia, a tym samym zawiesiny bentonitowej.

Ciśnienie zaczynu jest monitorowane przez 5 czujników ciśnienia umieszczonych na ścianie komory roboczej, rozmieszczonych po lewej i prawej stronie na całej wysokości. Czujniki te pozwalają na stałą kontrolę ciśnienia w komorze roboczej. Ponadto, w celu kontroli ciśnienia, monitorowany jest poziom zawiesiny w górnej części komory roboczej, gdzie utrzymywana jest „poduszka" sprężonego powietrza.

Ciśnienie zawiesiny jest automatycznie kontrolowane i regulowane przez sterownik PLC.

W przypadku monitorowania ciśnienia czołowego zdefiniowane są dwa progi (górna i dolna granica alarmu i ostrzeżenia). Progi te są kontrolowane w celu zapewnienia bezpieczeństwa i uniknięcia możliwych skutków przekroczenia projektowych wartości ciśnienia, takich jak niestabilność przodka tunelu, nadmierne osiadanie gruntu czy przebicie hydrauliczne.

Monitorowanie bilansu masy i gęstości zaczynu

Podczas drążenia wyrobiska należy stale kontrolować bilans masy między świeżą płuczką (materiałem wejściowym) a płuczką zużytą (materiałem wyjściowym). Służą do tego detektory wykorzystujące metodę radiometryczną, które umożliwiają pomiar zarówno gęstości, jak i przepływu masy płuczki.

Na podstawie bilansu masy należy ocenić objętość urobku i stale porównywać ją z wartością teoretyczną. Ponadto gęstość materiału w komorze roboczej można w przybliżeniu ocenić na podstawie pomiarów z 5 czujników ciśnieniowych umieszczonych na ścianie komory roboczej.

Iniekcja pustki między obudową tunelu a gruntem

Wstrzykiwanie zaczynu wypełniającego do szczeliny powstałej między obudową tunelu a gruntem powinno być monitorowane zarówno pod względem wstrzykiwanej objętości, jak i ciśnienia poprzez ciągły pomiar parametrów.

Teoretyczna objętość, która ma być wtłoczona do szczeliny pierścieniowej, wynosząca 9,55 m³/m, musi być stale porównywana z pomiarami uzyskanymi przez przepływomierze na rurach iniekcyjnych.

Wartości objętości niższe lub wyższe od teoretycznych mogą stanowić wskazówkę dotyczącą wyrobiska i ozna-

czać np.: nadmierne lub zbyt małe wydobycie, obecność np. pustek, pęcznienie gruntu lub nadmierne zużycie elementów tarczy skrawającej.

Objętość iniekcji musi być stale kontrolowana przez sterownik PLC maszyny TBM, aby można było w porę wykryć ewentualne problemy.

Ciśnienie iniekcji zaczynu jest funkcją przeciwciśnienia czoła, zawsze nieco wyższego od ciśnienia czoła. W projekcie przyjęto, że ciśnienie iniekcji jest o 0,5 bara wyższe od przeciwciśnienia na przodku.

Budowa pierścieni

Po każdym pojedynczym skoku (związanym z długością betonowego prefabrykatu pierścieniowego 1500–2000 mm) posuwanie się maszyny TBM musi zostać przerwane, aby umożliwić montaż pierścienia tunelu. Faza montażu pierścienia jest nazywana również „trybem montażowym TBM" i zwykle trwa ok. 25–40 minut na pierścień. Czas trwania każdego pojedynczego montażu pierścienia zależy głównie od geometrii poszczególnych segmentów, sposobu łączenia segmentów/pierścieni i doświadczenia załogi TBM.

Tryb montażowy maszyny TBM jest również wykorzystywany do tego, aby umożliwić operatorowi podnośnika próżniowego (tzw. erektora) demontaż ostatniego zbudowanego pierścienia w celu wymiany co najmniej dwóch rzędów stalowych szczotek uszczelnienia z tyłu tarczy oraz usunięcia uszkodzonych segmentów ze zmontowanego pierścienia w ciągu pierwszych 500 mm kolejnego posuwu TBM (podwozie erektora jest zaprojektowane tak, aby mogło przemieszczać się na odległość 2500 mm).

Wydłużanie rur

Postęp wyrobiska wiąże się z koniecznością wydłużenia rur systemu płuczki (odprowadzających i zasilających). Podczas tej operacji konfiguracja systemu płuczki musi być prawidłowo dostosowana w celu utrzymania właściwego ciśnienia na przodku.

Rurociągi służące do transportu płuczki zostaną odłączone od systemu globalnego za pomocą zasuw, które umożliwiają również odprowadzanie płuczki pozostałej w rurociągu. Gdy płuczka zostanie prawie całkowicie usunięta, przystępuje się do przedłużenia rurociągu, po czym płuczka zostanie ponownie przeniesiona do systemu dzięki działaniu powietrza.

Operacja ta jest zwykle wykonywana po zakończeniu fazy wykopu, przed fazą montażową pierścienia: port wyładowczy płuczki zostanie połączony z zamkniętym zbiornikiem płuczki, co umożliwia regulację ciśnienia na przodku za pomocą sprężonego powietrza.

PIŚMIENNICTWO

[1] TBM tunnel technology – Slurry design, document no.: E-SWIN--SWS-E-TUN-TGY-REP-1001, SWS Engineering S.p.A, 2020.

Organizator

Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa
Komitet Młodej Kadry

HONOR INŻYNIERA

Główny patronat medialny

SEKTOR KOLEJOWY

XXI Krajowy Zjazd Naukowo-Techniczny Młodej Kadry PZITB

W dniach 20–22.05.2022 r. na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie odbędzie się XXI Krajowy Zjazd Naukowo-Techniczny Młodej Kadry PZITB połączony z III edycją konferencji „Honor Inżyniera" pod nazwą „Budownictwo kolejowe – pociąg do Przyszłości". Właśnie budownictwu kolejowemu zostanie poświęcona III konferencja „Honor Inżyniera", która odbędzie się w Olsztynie, realizowana przez Komitet Młodej Kadry Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa w ramach projektu „Honor Inżyniera".

Celem projektu jest promowanie etyki, właściwych postaw oraz historii budownictwa. Konferencja otworzy XXI Zjazd Młodej Kadry PZITB, który odbędzie się w stolicy Warmii i Mazur. W trakcie konferencji zostaną wygłoszone 2 prelekcje dotyczące historii kolei na ziemiach polskich oraz polskich inżynierów kolejowych i mostowych, którzy zapisali się w historii budownictwa i to nie tylko polskiego. Ponadto poprosimy partnerów konferencji o to, żeby opowiedzieli o swoich sztandarowych realizacjach kolejowych, a także zwrócimy się do młodych inżynierów pracujących w budownictwie kolejowym, żeby opowiedzieli o tym, jak planowali swoją karierę zawodową i zdobywali uprawnienia budowlane w branży kolejowej.

W gronie partnerów naszego wydarzenia znajdują się wiodące firmy, takie jak: Budimex, Factrail, Trakcja – Kolej drogi obiekty oraz PORR. Serdecznie zapraszamy wszystkie osoby związane z kolejnictwem do wzięcia udziału w konferencji, a firmy do przyłączenia się jako partnerzy.

Patronat

POLSKA IZBA INŻYNIERÓW BUDOWNICTWA

fundacja ProKolej

WYDZIAŁ GEOINŻYNIERII

Partnerzy

budimex

FACRAIL

KOLEJ DROGI OBIEKTY TRAKCJA

PORR

Miejsce na Twoje logo

Patronat medialny

PRZEGLĄD budowlany

INŻYNIERIA i BUDOWNICTWO

Mgr inż. MYROSLAVA HETSKO
Inżynier budowy – Tunel Świnoujście s.c.

Projekt i realizacja odcinków dojazdowych do tunelu TBM

Układ konstrukcyjny odcinków rampowych

Ze względu zarówno na wymagania technologiczne, jak i warunki bezpieczeństwa wymagające zapewnienia minimalnego nadkładu nad tunelem drążonym TBM o grubości równej jednej średnicy maszyny, konieczne było zaprojektowanie i wykonanie odcinków dojazdowych do tunelu drążonego TBM. Odcinki te zostały podzielone na sekcje w zależności od układu konstrukcyjnego (rys. 1):

S1 / R1-R31[1] – najpłytsze odcinki na wjeździe/wyjeździe do/z tunelu – otwarta rama z płytą fundamentową i ze sztywnym połączeniem między ścianami a płytą;

S2-S3 / R4-R8 – rama otwarta w ścianach szczelinowych połączonych z płytą denną;

S4-S7 / R9-R13 – rama w ścianach szczelinowych połączonych z płytą denną i żelbetowymi rozporami stałymi;

S8-S11 / R14-R16 – żelbetowa rama zamknięta utworzona ze ścian szczelinowych połączonych z płytą denną i stropem górnym.

Ponadto w najgłębszych sekcjach odcinka dojazdowego zaprojektowano i zrealizowano komory startową i odbiorczą w postaci ramy zamkniętej utworzonej ze ścian szczelinowych połączonych z płytą denną i stropem górnym. Komory te umożliwiły montaż oraz demontaż maszyny na obu krańcach tunelu.

Komory startowa i odbiorcza

Gabaryty komór startowej i odbiorczej zostały podyktowane wymiarami maszyny TBM i zaplecza technologicznego. Ze względu na średnicę maszyny TBM i niezbędną przestrzeń technologiczną rozpiętość pomiędzy stropem górnym a płytą denną w najniższej części komory wynosi ponad 16 m. Jednocześnie w celu przyspieszenia montażu i startu maszyny TBM zaprojektowano komorę startową o długości 110 m, tak aby umożliwić montaż całej maszyny wraz z zapleczem wewnątrz komory, co pozwoliło na uzyskanie założonych „kamieni milowych" związanych z pracami tunelowymi.

Obydwie komory zostały zaprojektowane w technologii ścian szczelinowych, których panele sięgają głębokości ok. –35 m p.p.m., a ich długość całkowita wynosi ok. 40 m. Ze względów logistycznych i technologicznych kosze zbrojeniowe dla ścian szczelinowych dostarczano na budowę w sekcjach o długości 19 m i łączono na budowie bezpośrednio przed wbudowaniem (rys. 2).

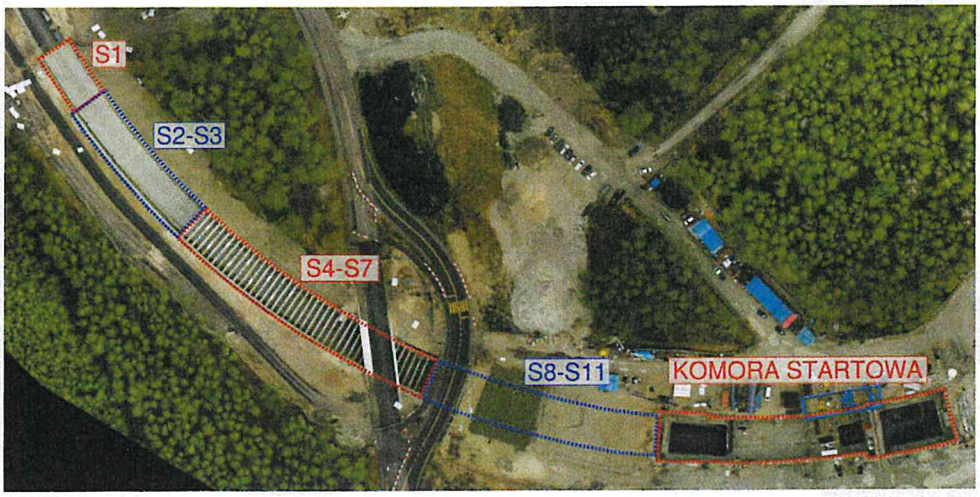
Rys. 2. Łączenie segmentów tradycyjnych koszy zbrojeniowych ścian szczelinowych (źródło: Tunel Świnoujście s.c.)

Ponieważ zbrojenie tradycyjne w ścianie okularowej, przeznaczonej do przebicia przez maszynę TBM, mogłoby uszkodzić jej głowicę tnącą, zastąpiono je prętami zbrojeniowymi z włókna szklanego. Kosze zbrojeniowe z włókna szklanego zostały połączone z koszami zbrojeniowymi ze zbrojenia tradycyjnego za pomocą specjalnych łączników, tworząc tak zwany 'soft eye' w obu komorach (rys. 3).

Panele ścian szczelinowych w komorach o grubości 1,2/1,0 m mają min. 2 m zakotwienia w warstwie kredy piszącej w celu ograniczenia dopływu wód gruntowych do wnętrza komór. Dodatkowo, w celu zapewnienia suchego wykopu, na czas wykonania płyty dennej w komorze zastosowano igłofiltry.

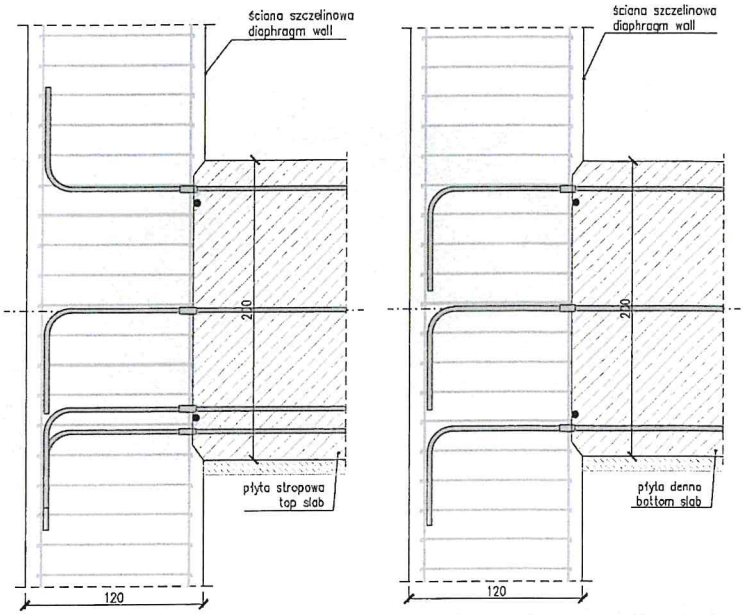
Po wykonaniu ścian szczelinowych, przed rozpoczęciem wykopu, na poziomie poniżej płyty dennej wykonano rozpory ścian szczelinowych z iniekcji jet grouting w postaci kolumn o średnicy 3,8 m i wysokości 4 m.

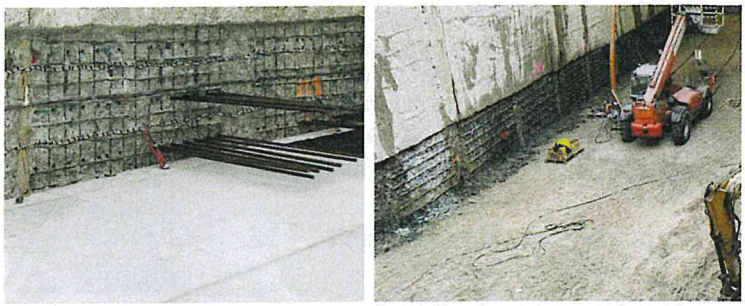
[1] S – oznaczenie sekcji po stronie Uznam, R – po stronie Wolin.



Rys. 1. Przekrój podłużny odcinka dojazdowego na przykładzie rampy po stronie Uznam (źródło: SWS Engineering S.p.A.)

Rys. 3. Kosz zbrojeniowy z włókna szklanego oraz łączenie koszy zbrojeniowych różnego typu (źródło: Tunel Świnoujście s.c.)





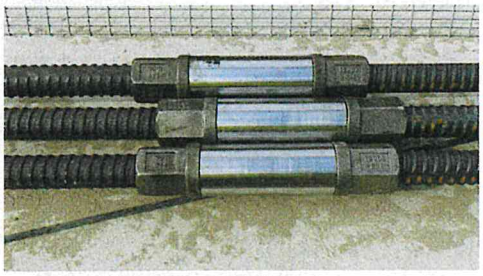
Rys. 4. Projekt i realizacja bruzdy dla stropu górnego i płyty dennej w komorze startowej (źródło: projekt – SWS Engineering S.p.A., zdjęcia – Tunel Świnoujście s.c.)

Wykop w komorach startowej i odbiorczej wykonano metodą podstropową. Metoda ta pozwala na wykonanie głębokich wykopów przez otwory tymczasowe w stropie przy minimalnym wpływie na otoczenie oraz wykonanie wielkogabarytowych stropów bez zastosowania skomplikowanych szalunków. Najpierw wykonuje się wykop do poziomu spodu stropu górnego, gdzie jest realizowany strop górny o grubości 1,5/2,0 m bezpośrednio na gruncie. Konieczne było zapewnienie odpowiedniego połączenia między zbrojeniem ścian szczelinowych i stropu, co zrealizowano poprzez połączenie mufowe (rys. 4). Pręty z mufą zostały zamontowane do zbrojenia paneli ścian szczelinowych przed zabetonowaniem w specjalnych bruzdach zabezpieczonych styropianem przed wypełnieniem betonem. Następnie przed rozpoczęciem montażu zbrojenia stropu górnego bruzdy oczyszcza się ze styropianu, odkrywając dostęp do muf i umożliwiając przyłączenie do nich prętów z gwintem.

Montaż maszyny wymagał pozostawienia w stropie górnym dwóch otworów technologicznych o wymiarach 22 × 14 m (rys. 6) i 22 × 12 m, przy czym pierwszy służył do opuszczania zaplecza maszyny, a drugi do opuszczania elementów tarczy. Pozostawione otwory umożliwiły również wykonanie wykopu podstropowego.

Pozostawienie tak dużych otworów w stropie wymagało dozbrojenia strefy otworu specjalnymi prętami zbrojeniowymi o średnicy 63,5 mm, łączonych na długości specjalnymi mufami systemowymi (rys. 5). Ponadto w stropie górnym założono wykonanie otworu o wymiarach 9 × 8 m, który służyłby do transportu segmentów tunelu, a następnie, po wybudowaniu tunelu drążonego, do transportu elementów prefabrykowanych konstrukcji wewnątrz tunelu. Po zakończeniu robót konstrukcyjnych duże otwory w stropach zostaną zamknięte. W tym celu podczas betonowania w otworach pozostawiono pręty z mufą, aby zapewnić ciągłość zbrojenia na styku konstrukcji wylewanych w różnym terminie.

Ze względu na tak duży prześwit między stropem górnym a płytą denną podczas kolejnych etapów wykopu zostały zamontowane dwa rzędy rozpór tymczasowych na poziomach 5,5 m i 9,5 m poniżej stropu górnego (rys. 7), co uwzględniono w obliczeniach. Na najniższym poziomie wykopu zaprojektowano i wykonano płytę denną o grubości 2 m. Po wykonaniu płyty dennej oraz osiągnięciu przez beton projektowej wytrzymałości, rozpory tymczasowe zostały zdemontowane.

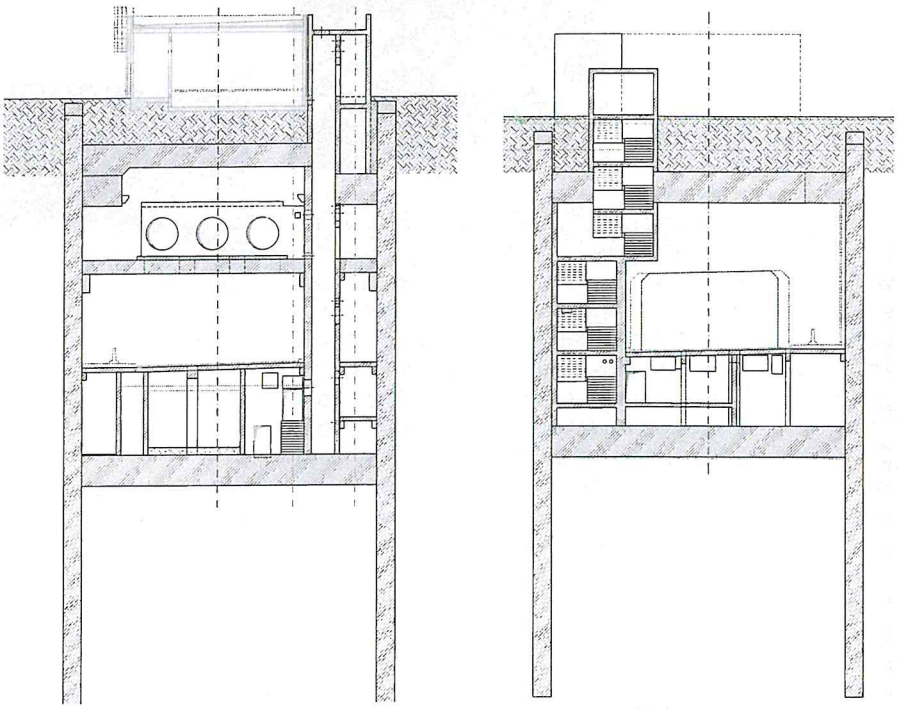


Rys. 5. Pręty zbrojeniowe Ø 63,5 mm wraz z mufami (źródło: Tunel Świnoujście s.c.)

Rys. 6. Wykop w otworze stropu górnego 22 × 12 m w komorze startowej (źródło: Tunel Świnoujście s.c.)

Rys. 7. Rozpory tymczasowe i zbrojenie płyty dennej w komorze startowej (źródło: Tunel Świnoujście s.c.)

Obecnie w komorze startowej wykonywane są konstrukcje wewnętrzne stanowiące klatkę schodową ewakuacyjną, szachty pionowe dla sieci elektrycznych, teletechnicznych i sanitarnych oraz przygotowywane są do realizacji strop pośredni z pomieszczeniami wentylatorni i płyta jezdni (rys. 8).



Rys. 8. Przekroje poprzeczne przez komorę startową i odbiorczą (źródło – SWS Engineering S.p.A.)

Pozostałe odcinki w ścianach szczelinowych

Pozostałe sekcje odcinków dojazdowych zostały zaprojektowane i zrealizowane w technologii ścian szczelinowych. Na tych odcinkach wykonano przesłonę jet grouting, zbudowaną u podstawy paneli ścian szczelinowych w celu odcięcia dopływu wody do wykopu oraz rozparcia ścian szczelinowych podczas wykopu.

Ponieważ część odcinka jest zaprojektowana jako sekcja podstropowa, w celu umożliwienia wykopu w stropie górnym o grubości 1,5 m pozostawiono dwa tymczasowe otwory technologiczne o wymiarach 4,5 × 12 m, które po wykonaniu wykopu zostały zamknięte, a łączenie zbrojenia na styku betonu zapewniono poprzez łączenie mufowe. Na odcinku podstropowym na najniższym poziomie wykopu wykonano płytę denną o grubości 1,125 m.

Na odcinku z żelbetowymi rozporami stałymi 0,8 × 0,8 m wykop jest utrudniony ze względu na niewielki prześwit pomiędzy rozporami, które zaprojektowano w rozstawie 2,5 m w osi. Z tego powodu na czas wykopu pominięto realizację dwóch rozpór, a w ich miejscu wykonano tym-

a)

b)

Rys. 9. Tymczasowe konstrukcje stalowe na czas wykopu w miejscu rozpory: a) rama stalowa, b) łata belkowa (źródło: Tunel Świnoujście s.c.)

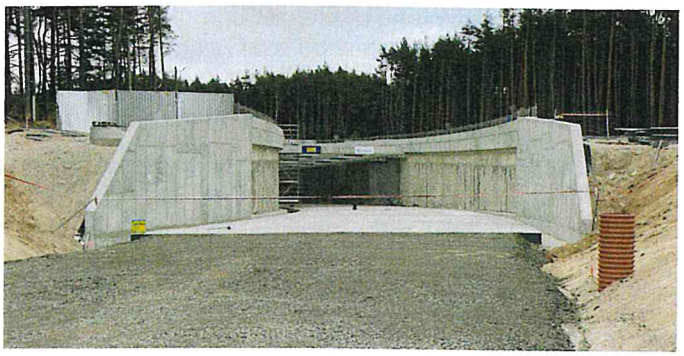
czasowe konstrukcje stalowe rozpierające (rys. 9), zabezpieczające panele ścian szczelinowych. Rama stalowa (rys. 9a) jest wykonana w miejscu rozpory w najgłębszej części odcinka, a łata belkowa (rys. 9b) – w miejscu rozpory w płytszej części odcinka.

Na najniższym poziomie wykopu na tym odcinku wykonano płytę denną o grubości 0,925 m.

Na danej części odcinka dojazdowego połączenie stropu górnego ze ścianami szczelinowymi zapewniono poprzez systemowe łączenie mufowe, a połączenie między płytą denną a ścianami szczelinowymi – poprzez system zbrojenia odginanego z dodatkowymi prętami, wklejanymi bezpośrednio przed wykonaniem płyty dennej. Pręty z mufą i system zbrojenia odginanego zamontowano do koszy zbrojeniowych ścian szczelinowych przed betonowaniem, a później odsłonięto podczas realizacji obu płyt.

Odcinek wannowy

Na wjeździe/wyjeździe do/z tunelu jako element zamykający odcinek dojazdowy zaprojektowano i wykonano konstrukcję monolityczną ramową, wykonaną w wykopie otwartym, na który składa się płyta denna o grubości 0,925 m i pionowe ściany o grubości 0,6 m i zmiennej wysokości (rys. 10).



Rys. 10. Wanna S1 (źródło: Tunel Świnoujście s.c.)

Podsumowanie

Podczas realizacji odcinków dojazdowych zostały wykonane ściany szczelinowe, sięgające nawet do – 35 m p.p.m. w komorach, pozyskano prawie 200 tys. m^3 urobku z wykopów, wylano ponad 60 tys. m^3 betonu, wbudowano ponad 8,5 tys. ton stali zbrojeniowej, a sukces danego przedsięwzięcia zawdzięczamy doświadczeniu głównego wykonawcy, projektantów oraz podwykonawców, realizujących projekt.

POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

FAIL no more

WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

ZAPROSZENIE

na seminarium naukowo-techniczne organizowane w ramach europejskiego projektu FAILNOMORE*

MITIGATION OF THE RISK OF PROGRESSIVE COLLAPSE IN STEEL AND COMPOSITE BUILDING FRAMES UNDER EXCEPTIONAL EVENTS

które odbędzie się w dniu 19 maja 2022 roku (czwartek) w Rzeszowie
na terenie Politechniki Rzeszowskiej (budynek „P", ul. Poznańska 2, sala P-24, piętro VI)

RAMOWY PROGRAM SEMINARIUM:

8:00-9:00	Rejestracja uczestników
9:00-9:30	Powitanie uczestników (*A. Kozłowski*), Informacje o projekcie FailNoMore (*K. Szylak*), Wprowadzenie do zagadnienia (*Sz. Woliński*)
9:30-10:30	Ogólne zasady projektowania na odporność (*Sz. Woliński*), Projektowanie węzłów (*L. Ślęczka*)
10:30-11:00	Przerwa kawowa
11:00-13:00	Projektowanie na określone zagrożenia (*D. Nykiel, Z. Pisarek, A. Raczak, A. Wojnar*)
13:00-14:00	Przerwa obiadowa
14:00-16:00	Projektowanie na nieokreślone zagrożenia (*R. Budziński, M. Górski, W. Kubiszyn, Z. Plewako, K. Sieńkowska, J. Zięba*)
16:00-16:30	Przerwa kawowa
16:30-17:30	Dyskusja, podsumowanie, zamknięcie seminarium (*A. Kozłowski*)

Politechnika Rzeszowska, budynek „P"

ADRES KOMITETU ORGANIZACYJNEGO:
Politechnika Rzeszowska
Katedra Konstrukcji Budowlanych
ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów
tel. 17 865 1553
e-mail: kszylak@prz.edu.pl
Strona internetowa i rejestracja on-line

Zgłoszenie uczestnictwa (formularz)

* Projekt finansowany w ramach Funduszu Badawczego Węgla i Stali (RFCS) – umowa o grant nr 899371

Mgr inż. PATRYK MIKULSKI CEng, MICE
Tunel Świnoujście s.c.

Uwarunkowania projektowania obudowy tunelu TBM w Świnoujściu

Celem projektu jest powiązanie drogowe wysp Uznam i Wolin, umożliwiające połączenie systemu transportowego po obu stronach cieśniny Świny w skali lokalnej, regionalnej i międzynarodowej oraz zwiększenie dostępności ekonomicznej i komunikacyjnej miasta Świnoujścia.

Zakres inwestycji obejmuje budowę tunelu drążonego w technologii TBM pod cieśniną Świną o długości ok. 1484 m, a także odcinków wannowych wykonywanych metodą odkrywkową, przechodzących następnie w odcinki tunelu wykonywane metodą stropową. Elementami układu drogowego będą również: drogi dojazdowe do tunelu, plac manewrowy, skrzyżowanie – rondo na wyspie Wolin i skrzyżowanie typu T na wyspie Uznam. W zakresie inwestycji jest również przebudowa istniejących przyległych ulic.

Wewnętrzna średnica tunelu wynosi 12,0 m. Obiekt ten będzie największym tunelem drogowym w Polsce, a także najdłuższą przeprawą pod ciekiem wodnym, w czasie oddania inwestycji do użytkowania.

Kryteria projektowe

Projekt segmentów obudowy tunelu został wykonany z uwzględnieniem wszystkich poniższych aspektów:

- wymagań kontraktowych;
- trasy tunelu;
- warunków geotechnicznych;
- stałych oddziaływań;
- tymczasowych oddziaływań na etapie produkcji (rozformowanie i składowanie segmentów, przechowywanie, transport);
- tymczasowych oddziaływań na etapie budowy (przeniesienie sił od siłowników TBM, iniekcja ogona tarczy, efekt miejscowej iniekcji);
- weryfikacji akcesoriów (śruby, dyble, uszczelki itp.);
- odporności ogniowej.

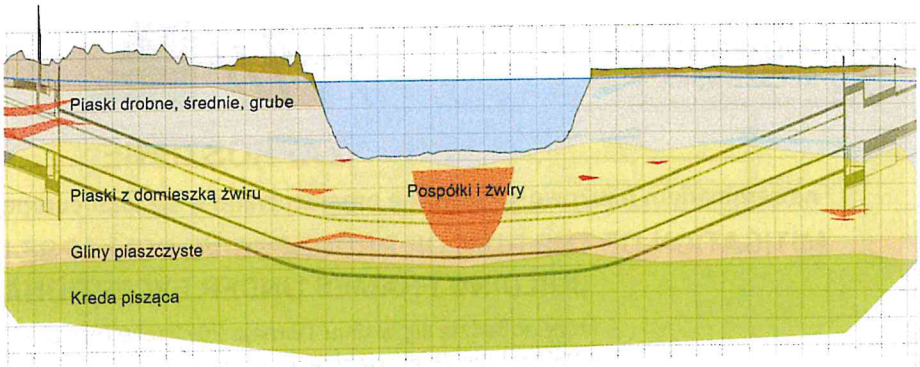
Projekt wykonano zgodnie z podejściem projektowym opisanym w eurokodach z uwzględnieniem *fib* Model Code 2010 [1] dla rozproszonych włókien stalowych.

Trasa tunelu

Zaprojektowano tunel drążony o długości 1484 m. Trasa projektowanej drogi rozpoczyna się w łuku o promieniu 300 m, natomiast ze względów technologicznych rozpoczęcie drążenia tunelu wymagało wykonania odcinka prostego, po którym trasa mogła wrócić do projektowanego łuku. Dzięki odpowiedniemu zaprojektowaniu maszyny TBM (doborowi skrawaków znajdujących się na głowicy urabiającej) oraz analizie sekwencji startowej różnych wariantów ułożenia pierścieni, można było wykonać ten odcinek, mieszcząc się w narzuconych kontraktowo tolerancjach wykonania (±100 mm względem osi).

Warunki geotechniczne

Trasa tunelu jest zlokalizowana pod dnem Świny, gdzie w głównej mierze występują utwory sedymentacyjne. Tunel przechodzi przez utwory holoceńskie reprezentowane przez piaski morskie (piaski drobne, średnie i grube), piaski rzeczno-lodowcowe i żwiry pochodzące z okresu plejstocenu. W zdecydowanej większości tunel będzie drążony w gruntach niespoistych. Schematyczny przekrój geotechniczny pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Schematyczny przekrój geotechniczny przez tunel drążony

Parametry geotechniczne przyjęto na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych i polowych.

Poziom wód gruntowych waha się od około 1,5 m do 2,0 m powyżej poziomu morza.

Stałe oddziaływania

Obudowa tunelu została przeanalizowana dla krytycznych odcinków wzdłuż trasy tunelu (maksymalna grubość naziomu, minimalna grubość naziomu, lokalizacje przyszłych otwarć segmentów w obszarach wyjść ewakuacyjnych). W analizach uwzględniono obciążenie własne obudowy tunelu, ciężar gruntu i wody gruntowej działający na obudowę oraz ciężar naziomu.

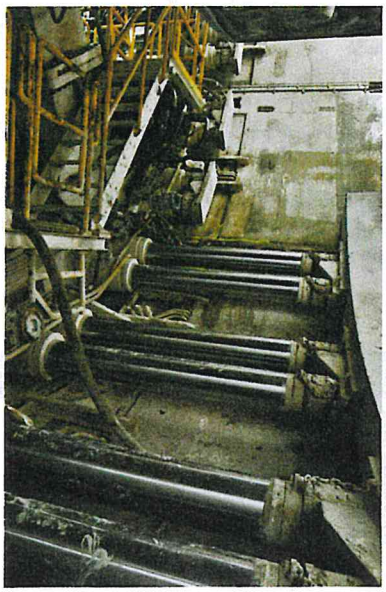
Tymczasowe oddziaływania

Projekt obudowy tunelu został wykonany wspólnie z wykonawcą i uwzględnia tymczasowe oddziaływania w trakcie produkcji prefabrykatów, takie jak: rozformowanie (rys. 2) i składowanie segmentów (rys. 3), przechowywanie (rys. 4), transport. Ponadto w projekcie uwzględnione zostały tymczasowe oddziaływania na etapie budowy, takie jak przeniesienie sił od siłowników TBM (rys. 5), iniekcja ogona tarczy oraz efekt miejscowej iniekcji.

Rys. 2. Rozformowanie segmentów (fot. Tunel Świnoujście s.c.)

Rys. 3. Składowanie segmentów po rozformowaniu (fot. Tunel Świnoujście s.c.)

Rys. 4. Przechowywanie segmentów na placu budowy (fot. Tunel Świnoujście s.c.)

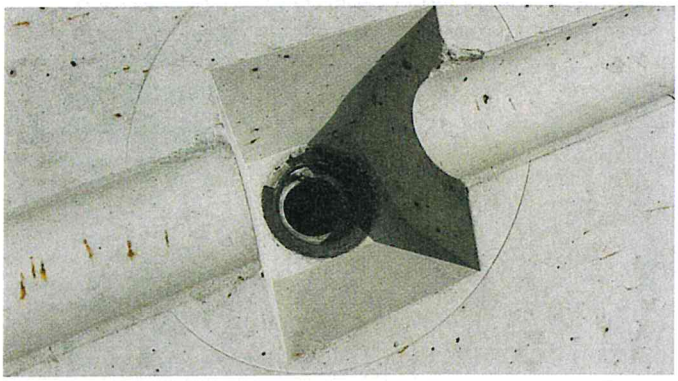


Rys. 5. Siłowniki hydrauliczne działające na obudowę tunelu (fot. *Patryk Mikulski*)

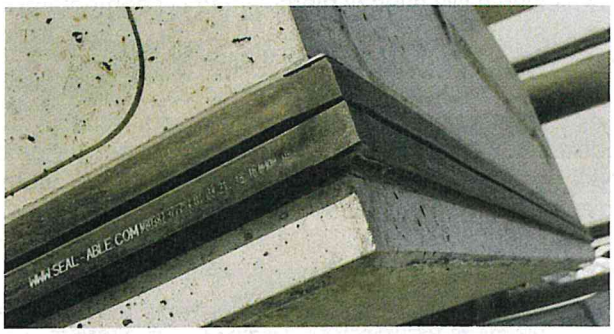
W przypadku obudowy zbrojonej rozproszonym włóknem stalowym powyższe oddziaływania mogą być najniekorzystniejszymi przypadkami obciążeń.

Weryfikacja akcesoriów

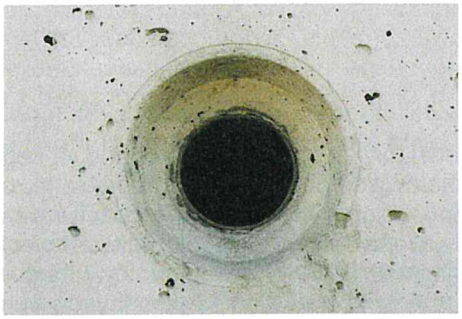
Pojedynczy segment składa się z wielu elementów, które mogą zostać nazwane ogólnie akcesoriami (śruby, dyble, uszczelki itp.). Projekt obudowy tunelu wymaga szczególnej uwagi podczas projektowania akcesoriów i odpowiedniej geometrii segmentu, która zapewni dostateczną ochronę przed uszkodzeniem oraz proste i szybkie wbudowanie segmentów w tunel (rys. 6÷9).



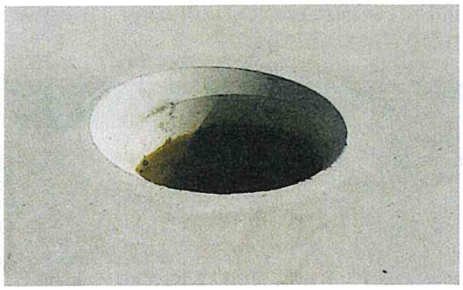
Rys. 6. Detal gniazda śrub (fot. *Patryk Mikulski*)



Rys. 7. Detal naroża segmentu z uszczelką (fot. *Patryk Mikulski*)



Rys. 8. Detal gniazda montażowego dla dybli (fot. *Patryk Mikulski*)



Rys. 9. Detal gniazda erektora (fot. *Patryk Mikulski*)

Odporność ogniowa

Analiza oddziaływań na konstrukcje tunelu w warunkach pożaru została wykonana na podstawie PN-EN 1991-1-2 dla krzywej węglowodorowej (wymaganie kontraktowe).

Projekt obudowy

• **Geometria obudowy.** Zaprojektowana obudowa tunelu ma średnicę wewnętrzną 12,0 m oraz grubość 0,5 m.

Ze względu na niewielki promień krzywizny trasy tunelu, wynoszący zaledwie 300 m, wykonawca zaproponował dwa typy pierścieni – typ C (dł. 1,5 m) oraz typ S (dł. 2,0 m). Pierścienie typu C zostały zastosowane na początkowym odcinku tunelu z minimalnym projektowym promieniem krzywizny, a na pozostałym odcinku zastosowano pierścienie typu S, co wpłynęło na zmniejszenie całkowitej liczby połączeń między poszczególnymi pierścieniami, tym samym zwiększenie szczelności konstrukcji.

Zaprojektowano pierścień uniwersalny, w układzie 8+0, gdzie segment kluczowy (zwornik) ma takie same wymiary jak pozostałe segmenty. Rozwiązanie z 8 segmentami tego samego wymiaru ma następujące zalety:

– Zmniejszona geometria segmentów sprawia, że ich waga i długość będą mniejsze. W ten sposób obsługa, transport i instalacja segmentów są łatwiejsze i bezpieczniejsze.

– Reakcja obudowy pod względem odkształcenia i przeniesienia siły między pierścieniami i segmentami jest bardziej symetryczna, co przekłada się na większą szczelność wykonanej obudowy.

– Podczas instalacji każdy segment zostanie połączony z poprzednim segmentem za pomocą trzech dybli (podczas gdy w rozwiązaniu z kluczem, kluczowy element zwykle jest połączony tylko z jednym dyblem). Dlatego w niepożądanym przypadku uszkodzenia jednego dybla unika się upadku segmentu. Dzięki temu rozwiązanie 8+0 jest bezpieczniejsze również podczas montażu.

• **Zbrojenie.** Na budowie pierwszego tunelu drążonego metodą zmechanizowaną TBM w Polsce zastosowano zbrojenie obudowy tunelu w postaci rozproszonego włókna stalowego. Ze względu na statykę konstrukcji, standardowe zbrojenie za pomocą koszy stalowych ograniczono jedynie do lokalizacji wyjść ewakuacyjnych oraz odcinków o długości 15÷20 m na początku i na końcu tunelu.

W porównaniu ze standardową obudową segmentową koszami stalowymi, obudowa segmentowa zbrojona rozproszonym włóknem stalowym ma pozytywny wpływ na produkcję, jakość i trwałość segmentów. Zbrojenie rozproszonym włóknem stalowym segmentów obudowy tunelu znacznie poprawia właściwości po zarysowaniu i poprawia kontrolę zarysowań.

W związku z ograniczonym terenem budowy i koniecznością przeprowadzenia wycinki lasów w celach zwiększenia placu budowy, stosowanie stalowych włókien rozproszonych zmniejszyło zapotrzebowanie placu produkcyjnego ze względu na brak konieczności stosowania urządzeń zarówno do prefabrykacji koszy stalowych, jak i ich składowania.

Niższe nakłady pracy w zakładzie produkcyjnym w zakresie spawania, przenoszenia prętów zbrojeniowych itp. przełożyły się na niższe koszty związane z przygotowaniem produkcji, jednocześnie zmniejszając prawdopodobieństwo wystąpienia wypadków na budowie poprzez eliminację prac potencjalnie niebezpiecznych.

Ponadto zastosowanie rozproszonego włókna stalowego pozwoliło zmniejszyć zapotrzebowanie na stal zbrojeniową. Współczynnik zbrojenia dla typowego zbrojenia koszowego obudowy tunelowej zawiera się pomiędzy 70÷120 kg/m^3, natomiast segmenty zbrojone rozproszonym włóknem stalowym 25÷50 kg/m^3. Zatem rozwiązanie to jest bardziej ekonomiczne i przyjazne środowisku.

Odpowiednia technologia produkcji w zakładzie prefabrykacji pozwoliła zapewnić równomierne rozproszenie włókien w całym segmencie, w tym także w obszarze wokół krawędzi segmentu. Zastosowanie rozproszonych włókien zmniejsza szerokości zarysowań i charakteryzuje się wyższą trwałością przez cały okres eksploatacji obiektu. Ponadto oprócz lepszej redystrybucji naprężeń rozrywających i odprysków, które powstają podczas procesu postępu maszyny drążącej i nacisku siłowników TBM, liczna literatura techniczna, jak np. *Bakhshi* [2] i *Schnütgen* [3], podkreśla korzystny wpływ włókien stalowych w obecności skoncentrowanych odłamań i pęknięć. Co więcej, obecność włókna w betonowej matrycy zwiększa wytrzymałość segmentów na zmęczenie i uderzenia, tym samym pomagając zmniejszyć skutek niezamierzonych obciążeń udarowych podczas obsługi segmentów i budowy tunelu.

Powyższe przekłada się na wymóg dokładniejszego przygotowania rozwiązania projektowego i weryfikacji geometrii segmentów, a zwłaszcza naroży, wnęk oraz szczegółów rozwiązań akcesoriów, np. uszczelki. Ponadto rozwiązanie wymaga dokładnego sprawdzenia naprężeń w segmencie spowodowanych obciążeniami tymczasowymi od siłowników hydraulicznych maszyny TBM [4].

PIŚMIENNICTWO

[1] Fib Bulletin No. 55 Model Code 2010, Ernst & Sohn 2010.

[2] *Bakhshi M., Nasri V.*: Design of fiber-reinforced tunnel segmental lining according to new ACI report; TBM DiGs, Singapore 2015.

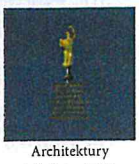
[3] *Schnütgen B.*: Design of precast steel fibre reinforced tunnel elements; RILEM TC 162-TDF Workshop. 2003. Bochum (Germany).

[4] *Ciesielski R.*: O identyfikacji parametrów dynamicznych budowli. „Inżynieria i Budownictwo", nr 4/2001.

Serdecznie zapraszamy do zakupu naszych wydawnictw:

Gdańskie Inwestycje Komunalne
Historia i Dokonania

Absolwenci
Politechniki Gdańskiej
i ich osiągnięcia w dziedzinie


Architektury
i Budownictwa

Mechaniki
i Okrętownictwa

Elektrotechniki
i Elektroniki

Zamówienie
prosimy kierować
e-mail: apoteranska@zgpzitb.org.pl

Mgr inż. MARTA SZYMAŃSKA
Tunel Świnoujście s.c.

Warunki geologiczno-inżynierskie na obszarze lokalizacji tunelu pod Świną a monitoring osiadań

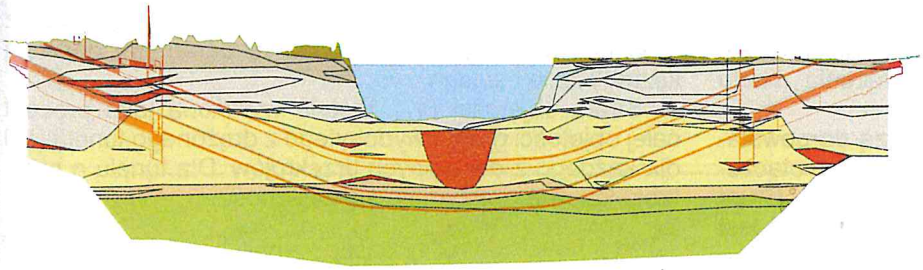
Świnoujście to jedyne miasto w Polsce położone w całości na wyspach. Komunikację pomiędzy wyspami umożliwiają mosty, a w przypadku dwóch największych wysp, jakimi są Uznam i Wolin, jedynym rozwiązaniem są przeprawy promowe. Promy dosłownie łączą Świnoujście z resztą Polski. Korzystanie z promów stanowi znaczne utrudnienie nie tylko dla mieszkańców, ale także dla przedsiębiorców i turystów, co jest szczególnie odczuwalne w sezonie letnim. Zdarzające się w Świnoujściu niesprzyjające warunki pogodowe mogą powodować problemy w kursowaniu promów, co skutkuje praktycznie tym, że Świnoujście zostaje odcięte od reszty kraju. Stanowi to potencjalne zagrożenie dla bezpieczeństwa miasta. W takim wypadku jedynym sposobem wydostania się z miasta jest przekroczenie granicy z Niemcami. Budowa stałego połączenia – tunelu, zdecydowanie rozwiąże te problemy i spowoduje znaczny rozwój miasta.

Realizacja konstrukcji podziemnej niesie ze sobą potencjalne zagrożenia. W czasie realizacji robót związanych z wykonywaniem tunelu drążonego za pomocą maszyny TBM o nazwie „Wyspiarka" warunkiem koniecznym była i jest analiza oraz ocena ryzyka związanego z oddziaływaniem prac zarówno na powierzchni terenu, jak i w gruncie. Zastosowanie rozwiązań technologii monitoringu geotechnicznego pozwala na ich wczesne wykrycie.

Dzięki ciągłej kontroli w czasie prowadzenia prac tunelowych wykonawca mógł na bieżąco śledzić wpływ prac na otoczenie. Dało to możliwość zaplanowania dalszych etapów, odpowiednio wczesnego wprowadzenia koniecznych zmian, a w konsekwencji osiągnięcia zamierzonego celu, jakim było wydrążenie tunelu.

Warunki geologiczne

Trasa tunelu przecina warstwy piasku drobnego i średniodrobnego ze żwirem po stronie Uznam i po stronie Wolin, natomiast pod cieśniną Świną znajdują się głównie piaski drobnoziarniste ze żwirem, gliną z frakcją kamienistą, margle kredowe (rys. 1).



Rys. 1. Przekrój geologiczny [5]

Na obszarze prac tunelowych zidentyfikowanych zostało 7 warstw geologicznych (tabl. 1). Pierwszą z nich stanowią tereny nasypowe zlokalizowane w rejonie przybrzeżnym cieśniny. Kolejne dwie warstwy to piaski drobne. Warstwa czwarta składa się z warstwy gliny normalnie skonsolidowanej o małej miąższości i małej przepuszczalności. Kolejne dwie warstwy to piasek średnio- drobnoziarnisty ze żwirem o średnio dużej przepuszczalności oraz prekonsolidowana piaszczysta glina ze żwirem; grubość tej warstwy waha się od 2 m do 5 m. W niektórych przypadkach warstwa gliny jest nieciągła. Ostatnia, najniżej położona warstwa to kreda pisząca.

Tablica 1

Warstwy geotechniczne gruntów

Warstwa	Geologia
I	Teren nasypowy (działalność antropogeniczna)
HOLOCEN	
II	Drobny piasek (akumulacja eoliczna)
III	Drobny piasek (pochodzenia morskiego)
IV	Organiczna glina mułowa
PLEJSTOCEN	
V	Piasek drobnoziarnisty ze żwirem
VI	Prekonsolidowana piaszczysta glina ze żwirem
KREDA	
VII	Kreda pisząca (skała macierzysta)

Analiza osiadań powierzchni terenu wywołanych drążeniem tunelu tarczą zmechanizowaną TBM

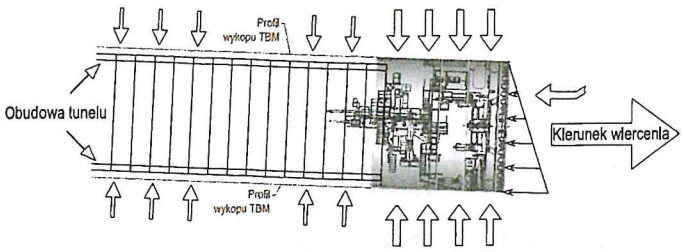
Osiadania to ruch gruntu wywołany zmianami naprężeń w jego obrębie, a ich wielkość jest zależna od panujących warunków gruntowo-wodnych, działających obciążeń i rodzaju prowadzonych prac budowlanych.

Istnieje wiele czynników, które podczas prowadzenia robót w Świnoujściu miały wpływ na przemieszczenia gruntu. Podzielono je na kilka grup.

1. Osiadania krótkoterminowe

Największy wpływ na deformację gruntu mają osiadania krótkoterminowe, czyli te, które są spowodowane przejściem tarczy maszyny drążącej TBM.

Czynniki wpływające na osiadania krótkoterminowe wynikające z procesu tunelowania przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Czynniki wpływające na osiadanie krótkoterminowe

• **Typ tarczy i stateczność przodka.** Osiadania zależą od rodzaju zastosowanej tarczy i sposobu zapewnienia stateczności przodka. Zastosowanie zawiesiny bentonitowej podanej pod odpowiednim ciśnieniem równoważy zewnętrzne parcie gruntu wraz z ciśnieniem wody napierającym na konstrukcje tunelu. W Świnoujściu zastosowano tarczę zawiesinową. Dzięki działaniu zawiesiny wzrasta spójność gruntu, tym samym zmniejsza się jej przepuszczalność.

Rolą zawiesiny jest także transport wydobywanego urobku. W konsekwencji przejścia zmechanizowaną tarczą TBM ośrodek gruntowy ulega przemieszczeniu, co niewątpliwie działa na zmianę stanu naprężeń w gruncie.

Tunel tworzą żelbetowe segmenty ułożone w kształcie wielkiego okręgu o średnicy zewnętrznej wynoszącej 13,46 m. Geometria tunelu oraz rodzaj i kształt geometrii obudowy wpływają na proces przemieszczania się gruntu.

• **Kształt obudowy tarczy.** Tarcza maszyny TBM ma kształt stożka, w którym średnica na przodzie jest większa niż na ogonie. W przypadku „Wyspiarki" różnica jest niewielka i wynosi około 0,4%. Ta niewielka różnica umożliwia wykonanie tunelu dla projektowanych parametrów trasy.

• **Czas robót tunelowych z uwzględnieniem instalacji pierścieni obudowy tunelu.** Wielkość osiadań zależna jest także od czasu, w jakim jest wykonywany tunel za tarczą. Im czas ten będzie krótszy, tym mniejsze będą osiadania. Jak wcześniej wspomniano, w obrębie tunelu przeważającą część stanowią piaski. Podczas prowadzenia prac tunelowych, w rejonie centralnym tunelu znajdowały się również takie warstwy gruntowe jak glina czy kredy, co wpłynęło na czas wydrążenia tunelu i instalacji poszczególnych pierścieni.

• **Czas wypełnienia pustek za ogonem tarczy (między obudową, płaszczem tarczy i gruntem).** Pierścienie były montowane do siebie w sposób szczelny, tak aby przerwa pomiędzy zewnętrzną stroną obudowy tunelu a otaczającym go gruntem była wypełniana zaprawą wiążąco-uszczelniającą, która zapobiegałaby ryzyku powstawania osiadań podłoża gruntowego i jednocześnie zagwarantowała jak najlepszą współpracę pomiędzy tunelem a otaczającym go gruntem.

Zagłębienie terenu powstałe wskutek zapadnięcia się warstw gruntu w wyniku podziemnego drążenia tunelu tworzy tak zwaną nieckę osiadań.

Wszystkie wymienione czynniki prowadzą do powstania przemieszczeń w obrębie ośrodka gruntowego otaczającego wyrobisko oraz wytworzenia strat objętości. Grunt wydobyty w czasie drążenia tarczą, którego objętość jest większa od objętości tunelu, ujawnia się w postaci tzw. niecki osiadań na powierzchni terenu.

2. Osiadania spowodowane odkształceniem obudowy tunelu

Jest to rodzaj osiadań, który mimo dużej średnicy tunelu ma niewielkie znaczenie z uwagi na możliwość dostosowania geometrii konstrukcji do panujących warunków gruntowych i działających obciążeń, dzięki zaprojektowaniu odpowiedniego typu obudowy stanowiącej sztywną konstrukcję.

Osiadanie gruntu jest wynikiem obciążenia konstrukcją (obudową tunelu) oraz gabarytem samej maszyny, której ciężar przekracza nośność gruntu. Powoduje to tym samym konsolidację gruntu, a w konsekwencji wpływa na zmianę jego położenia w obrębie konstrukcji w kierunkach pionowym i poziomym.

3. Osiadania długoterminowe

Zależne są od rodzaju gruntu – wywołane konsolidacją gruntów spoistych lub ściśliwych. To naturalny proces zachowania gruntu po naruszeniu jego struktury wewnętrznej pod wpływem prowadzenia prac odwiertowych. Wpływ na osiadanie ma także sama wilgotność gruntu, który w przypadku nasyconych gruntów spoistych uplastycznia się.

Pozyskana na podstawie prac geologicznych charakterystyka gruntów w obrębie prowadzonych prac, pokazuje, że w większości są to piaski drobne z licznymi przewarstwieniami i niżej zalegającymi glinami piaszczystymi, zwięzłymi piaskami gliniastymi czy kredą.

Ocena rozwoju niecki osiadań nad tunelem drążonym

Do prognozy pionowych ruchów gruntu wywołanych tunelowaniem zastosowano metodę półempiryczną *New* i *O'Reilly* [1, 2] z wykorzystaniem krzywej *Gaussa*.

Osiadanie przypowierzchniowe zostało wyznaczone ze wzoru:

$$s = s_{max} e^{\left(\frac{-y^2}{2i^2}\right)}, \tag{1}$$

w którym:

s_{max} – maksymalne osiadanie pionowe mierzone w osi tunelu [mm],

y – pozioma odległość mierzona od osi tunelu [mm],

i – odległość pozioma mierzona od osi tunelu do punktu przegięcia na krzywej [m].

Określenie parametru i opisuje w przybliżeniu funkcja liniowa głębokości z_0, nieuzależniona od metody konstrukcji tunelu:

$$i = kz_0,$$

gdzie:

k – stała empiryczna do wyznaczania punktu przegięcia zależna od rodzaju gruntu [–],

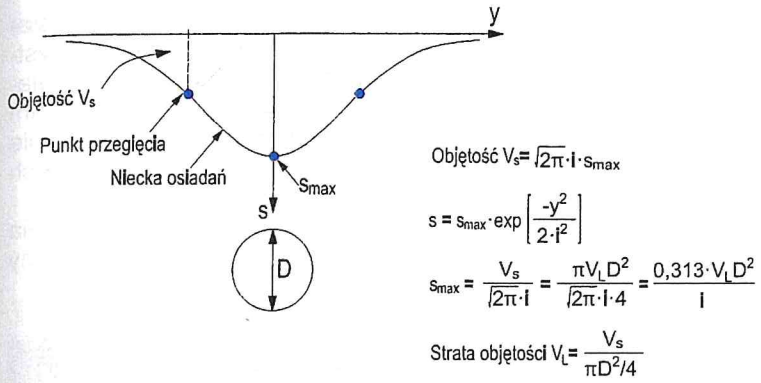
z_0 – głębokość od powierzchni terenu do osi tunelu [m].

W przypadku gruntów uwarstwionych wartość parametru k stanowi średnią ważoną z wartości k_i przy założeniu jednakowej rozciągliwości gruntów w poziomie mających wpływ na osiadanie.

Oprócz współczynnika k należy wyznaczyć również procent straty objętości V_L. Oba te parametry definiują kształt niecki osiadań (rys. 3).

Strata objętości (V_L) została wyrażona jako procent całej objętości gruntu wydobytego z drążonego tunelu (V_s) dla każdego z dostępnych przekrojów. Dla tunelu o przekroju kołowym otrzymuje się zależność:

$$V_L = \frac{V_s}{\pi D^2 / 4} \cdot 100\%,$$



Rys. 3. Rozkład niecki osiadań nad pojedynczym tunelem [3]

gdzie:
D – średnica tunelu,
V_s – procent całej objętości gruntu wydobytego z drążonego tunelu w danym przekroju, wyznaczony na podstawie wzoru:

$$V_s = \sqrt{2\pi}\ i\ s_{max}.$$

Monitoring geotechniczny osiadań

Celem prowadzenia monitorowania geotechnicznego była analiza reakcji gruntu na przejście maszyny drążącej i weryfikacja możliwych oddziaływań zarówno na istniejące obiekty, jak i nowo budowany tunel.

Uzyskane dane pozwoliły na weryfikację, czy powstałe w gruncie deformacje są zgodne z dopuszczalnymi wartościami zawartymi w projekcie.

Oprzyrządowanie monitorujące zostało umieszczone na powierzchni terenu, wzdłuż osi tunelu i wzdłuż przekrojów prostopadłych do osi oraz na fasadach budynków, które mogą zostać uszkodzone podczas procesu tunelowania, a także na nowo wybudowanej obudowie tunelu.

Do kontroli przemieszczeń zastosowano ekstensometry i repery gruntowe.

- **Ekstensometry.** Służą do wyznaczenia przemieszczenia liniowego nad osią tunelu. To monitoring osiadania terenu powstałego pod wpływem odwiertu, co przykładowo przedstawiono za pomocą wykresu na rys. 4 z wszystkich punktów kontrolnych znajdujących się po stronie wyspy Wolin.

Ekstensometry zostały zainstalowane w odwiertach do głębokości 1 m nad projektowaną obudową tunelu w jego osi. W celu dokładnej obserwacji wyników, pomiary rozpoczęły się 4 miesiące przed przejściem maszyny drążącej tunel przez dany przekrój.

- **Repery gruntowe.** Na budowie zainstalowano przekroje monitorowania składające się między innymi z reperów gruntowych. Repery gruntowe służą do wyznaczenia przemieszczeń pionowych. Przekroje monitorowania są złożone z 7 punktów z ręcznym lub automatycznym odczytem: jeden w osi, dwa odpowiednio blisko średnicy tunelu, dwa cele zlokalizowane 15 m od osi tunelu oraz dwa cele 30 m od osi tunelu.

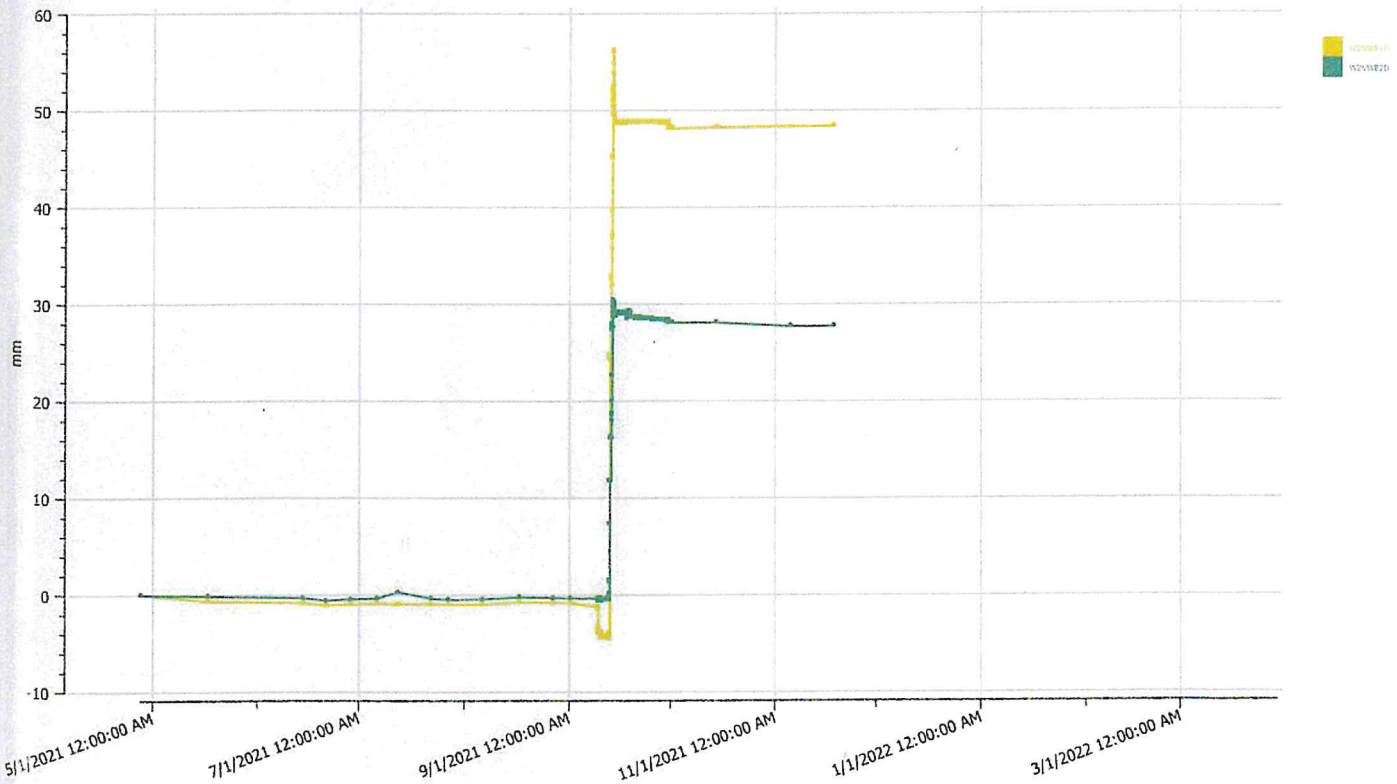
Na rysunkach 5 oraz 6 przedstawiono rozmieszczenie punktów pomiarowych wzdłuż trasy tunelu wraz z typowym przekrojem sekcji.

Pomiary z punktów kontrolnych po stronie wyspy Uznam (rys. 7) wykonywane były ręcznie, ponieważ teren nie był zurbanizowany i warunki nie wymagały tak częstych pomiarów.

W celu kontrolowania pionowego ruchu powierzchni terenu zainstalowane zostały punkty odniesienia dla osiadań.

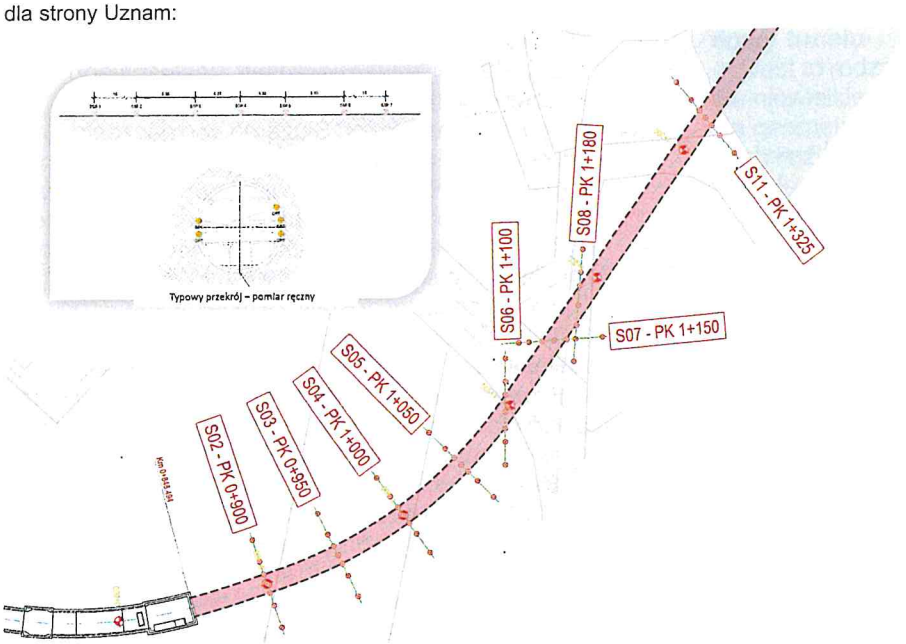
Pierwszy pomiar wykonano 4 miesiące przed rozpoczęciem prac drążeniowych.

Pozostałe pomiary były prowadzone z częstotliwością dostosowaną do warunków na budowie, dostępności do



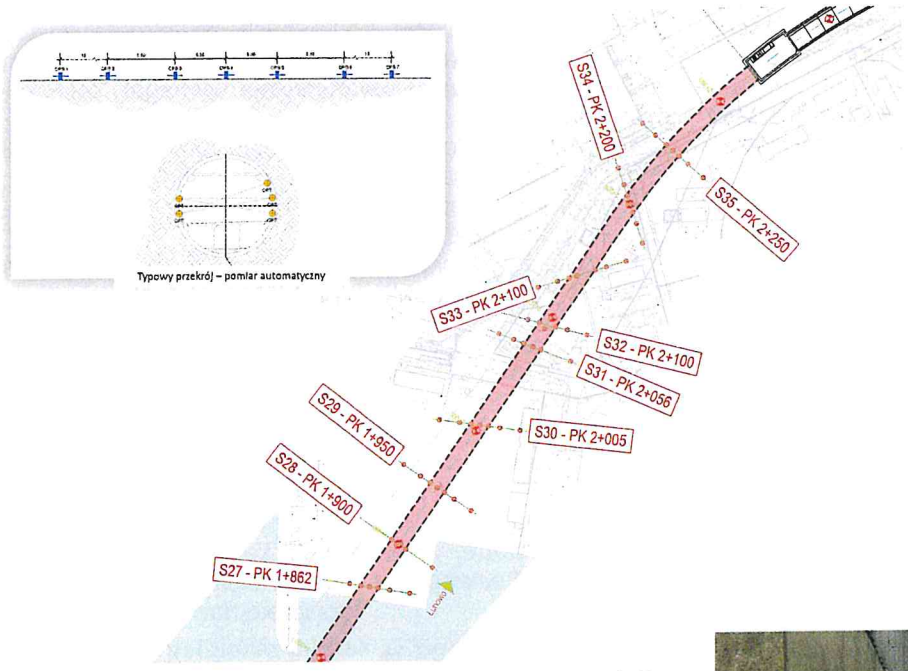
Rys. 4. Przykładowy wykres osiadań w osi tunelu wyznaczony za pomocą ekstensometru

dla strony Uznam:



Rys. 5. Rozmieszczenie punktów pomiarowych. Typowy przekrój – pomiar ręczny (strona Uznam)

dla strony Wolin:



Rys. 6. Rozmieszczenie punktów pomiarowych. Typowy przekrój – pomiar automatyczny (strona Wolin)

punktów pomiarowych oraz wcześniejszych wyników w zależności od otrzymywanych wartości osiadań.

Odczyty z punktów kontrolnych na wyspie Wolin (rys. 8) prowadzone były automatycznie w odstępach ok. 15-minutowych. Strona wolińska to tereny, na których znajdują się m.in. obiekty mieszkalne, stacja paliw. Monitoring w tym rejonie wymagał prowadzenia częstszych pomiarów.

Do prowadzenia pomiarów zarówno automatycznych, jak i ręcznych stosowano specjalne urządzenia – tachimetry (rys. 9).

Rozpoczęcie drążenia tunelu nastąpiło 12 marca 2021 r. i trwało pół roku, do 21 września 2021 r. Całkowita długość tunelu drążonego wynosi 1484 m.

Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono sumaryczne wykresy wszystkich punktów kontrolnych znajdujących się po stronie wysp Uznam i Wolin wygenerowane w programie Geoscope na podstawie wszystkich przeprowadzonych pomiarów.

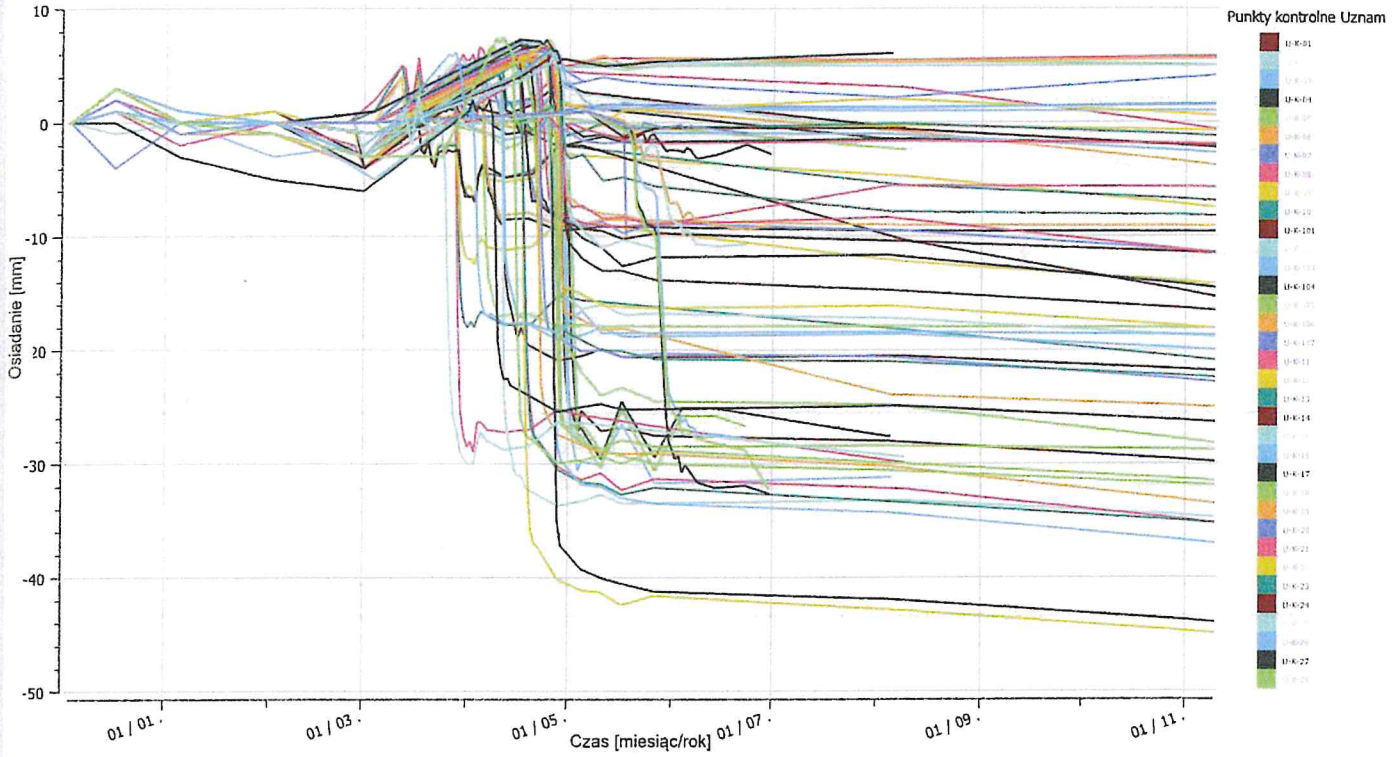
Pokazane na wykresach załamania to miejsca przejścia tarczy maszyny drążącej.

Rys. 7. Przykładowy punkt pomiarowy – strona Uznam (odczyt ręczny)

Rys. 8. Przykładowy punkt pomiarowy – strona Wolin (odczyt automatyczny)

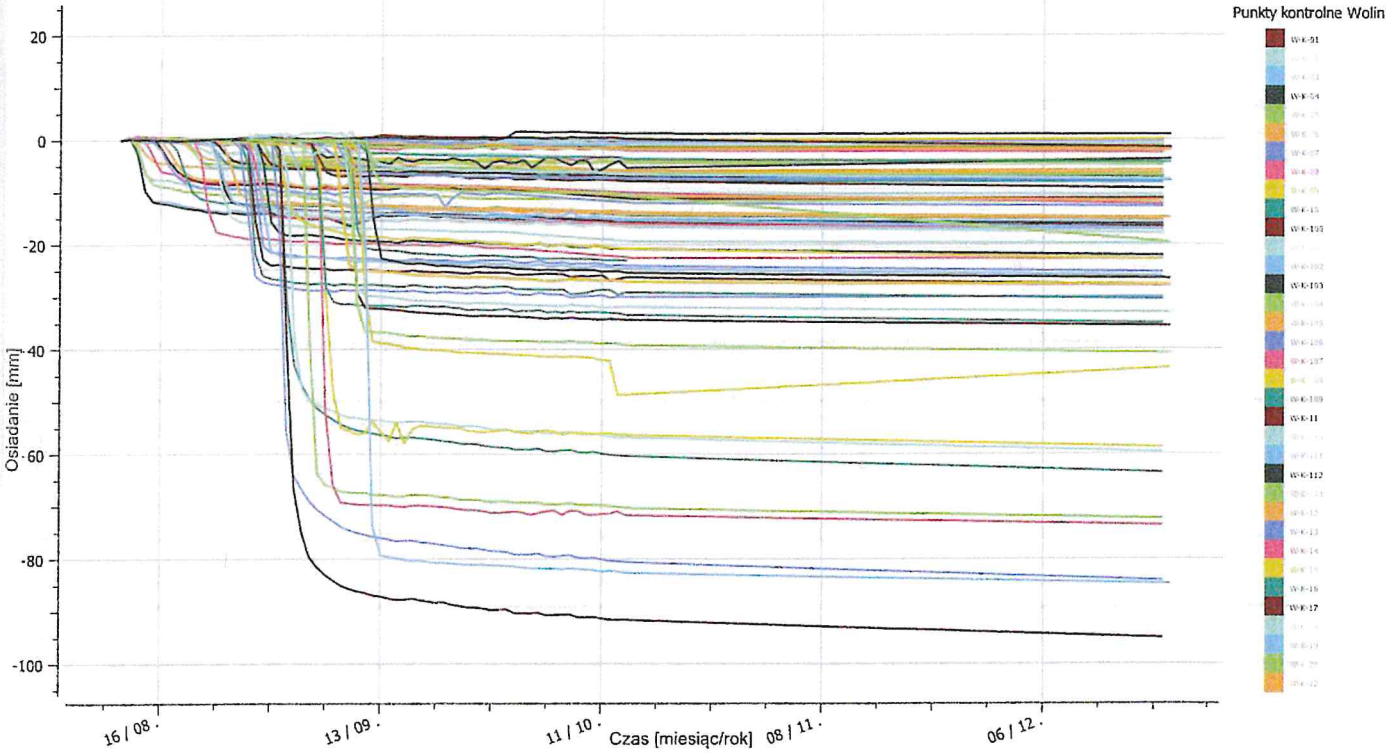
Rys. 9. Pomiar za pomocą tachimetrów

Strona Uznam



Rys. 10. Sumaryczny wykres osiadań punktów kontrolnych po stronie Uznam

Strona Wolin

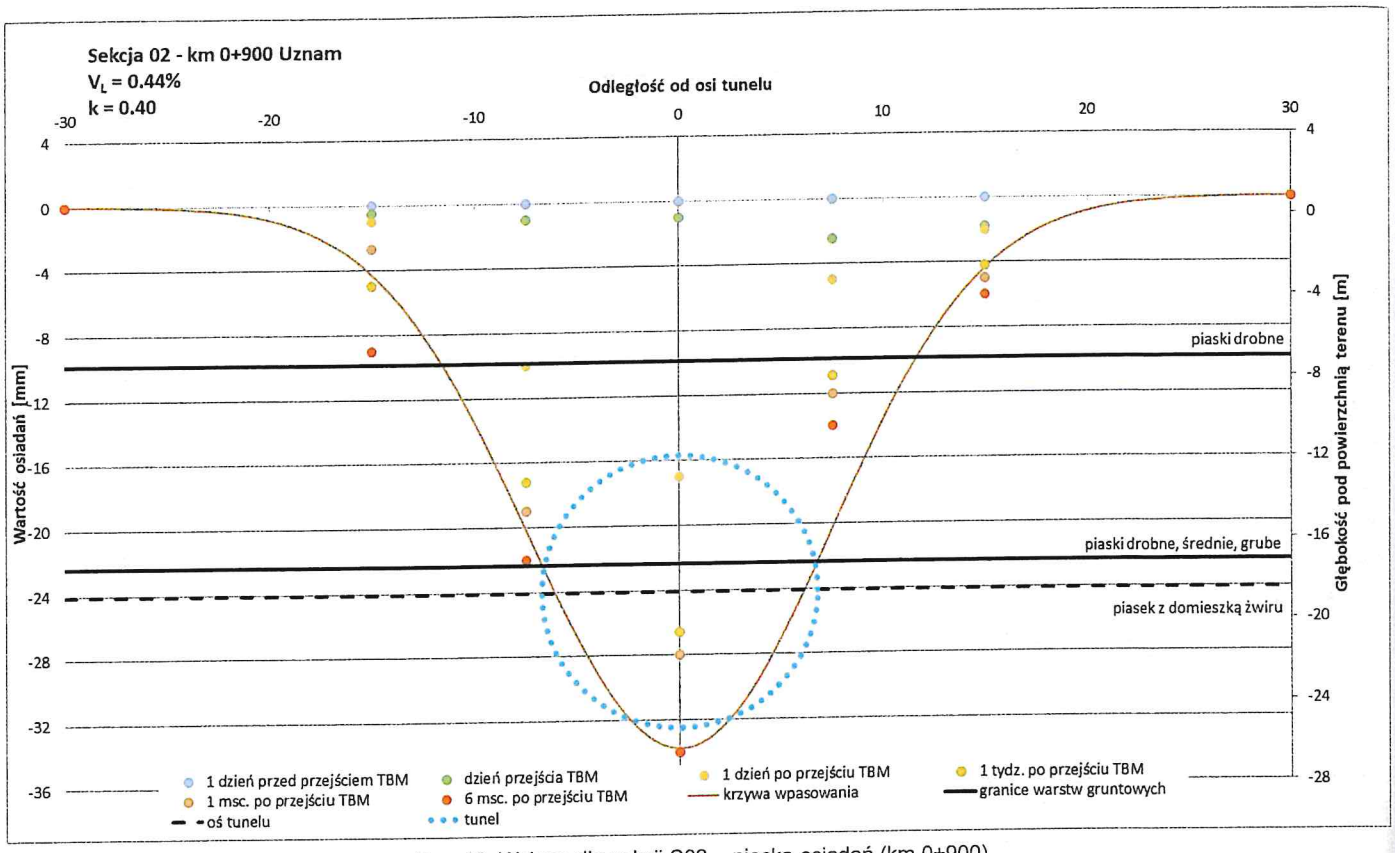


Rys. 11. Sumaryczny wykres osiadań punktów kontrolnych po stronie Wolin

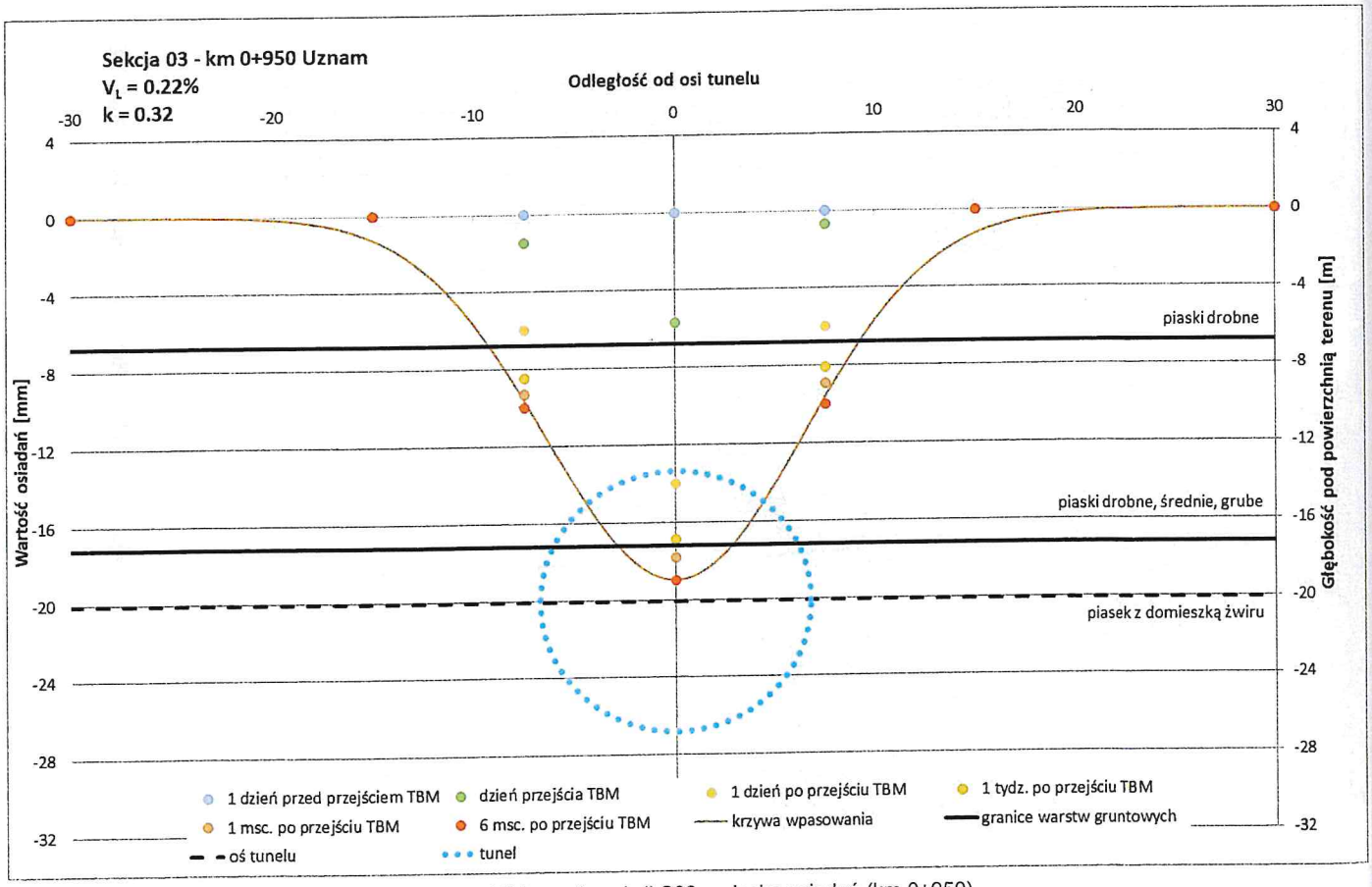
Wyniki prowadzonych analiz w postaci wykresów dla poszczególnych sekcji przedstawiono dla strony Uznam na rys. 12÷19, a dla strony Wolin – na rys. 20÷28.

Wyniki prowadzonych analiz – Ocena rozwoju niecki osiadań [3]

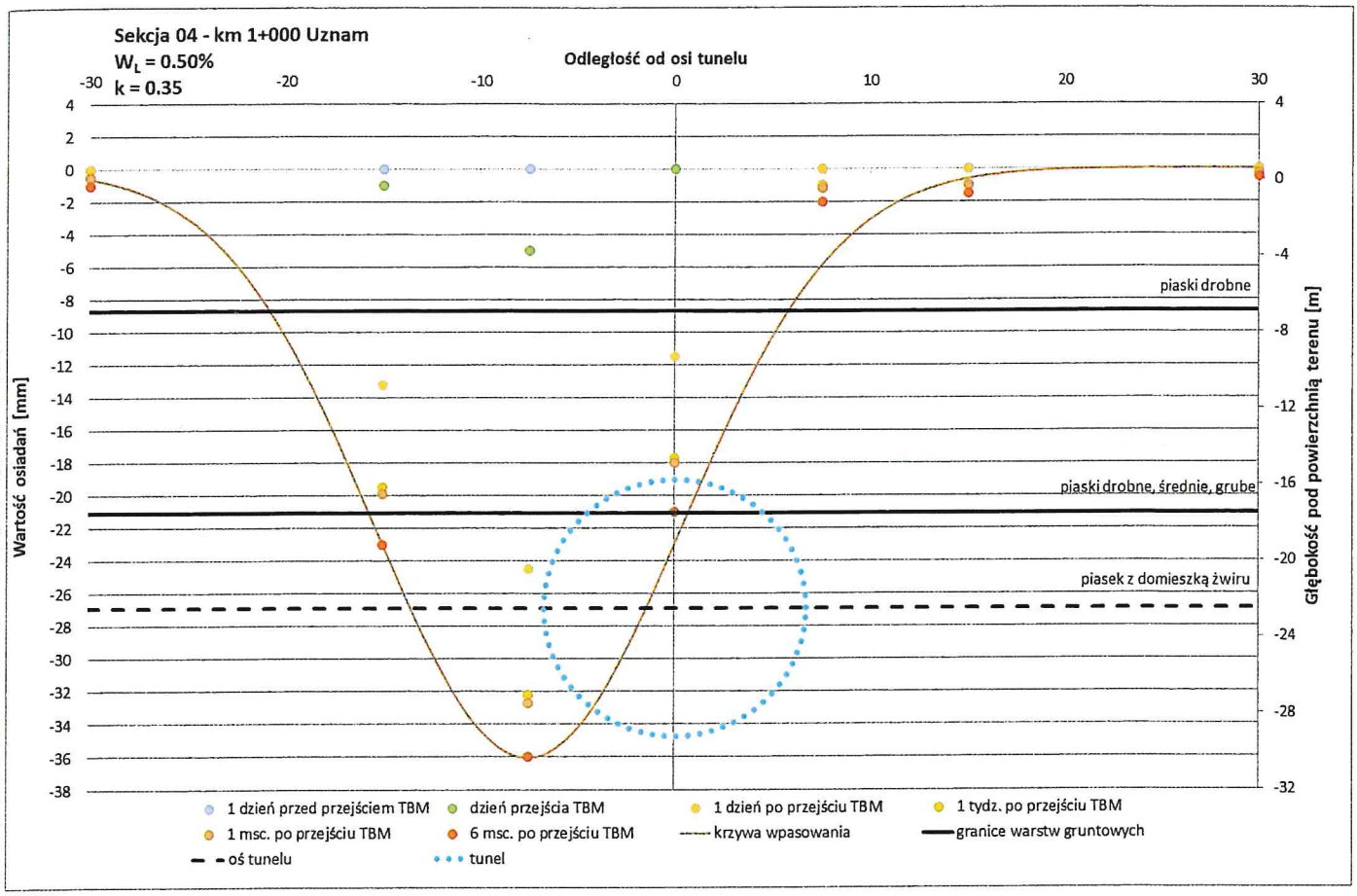
Strona Uznam



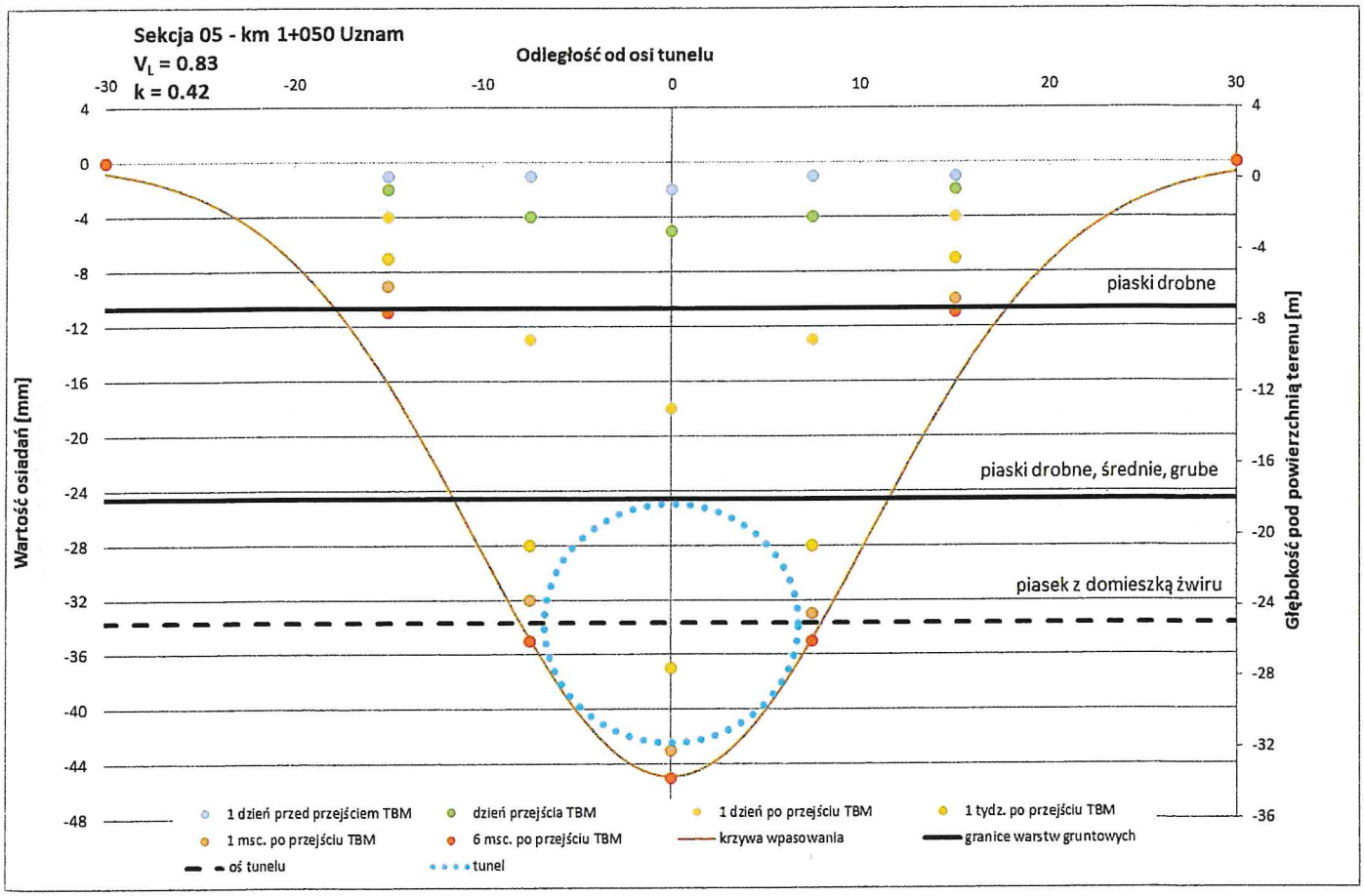
Rys. 12. Wykres dla sekcji S02 – niecka osiadań (km 0+900)



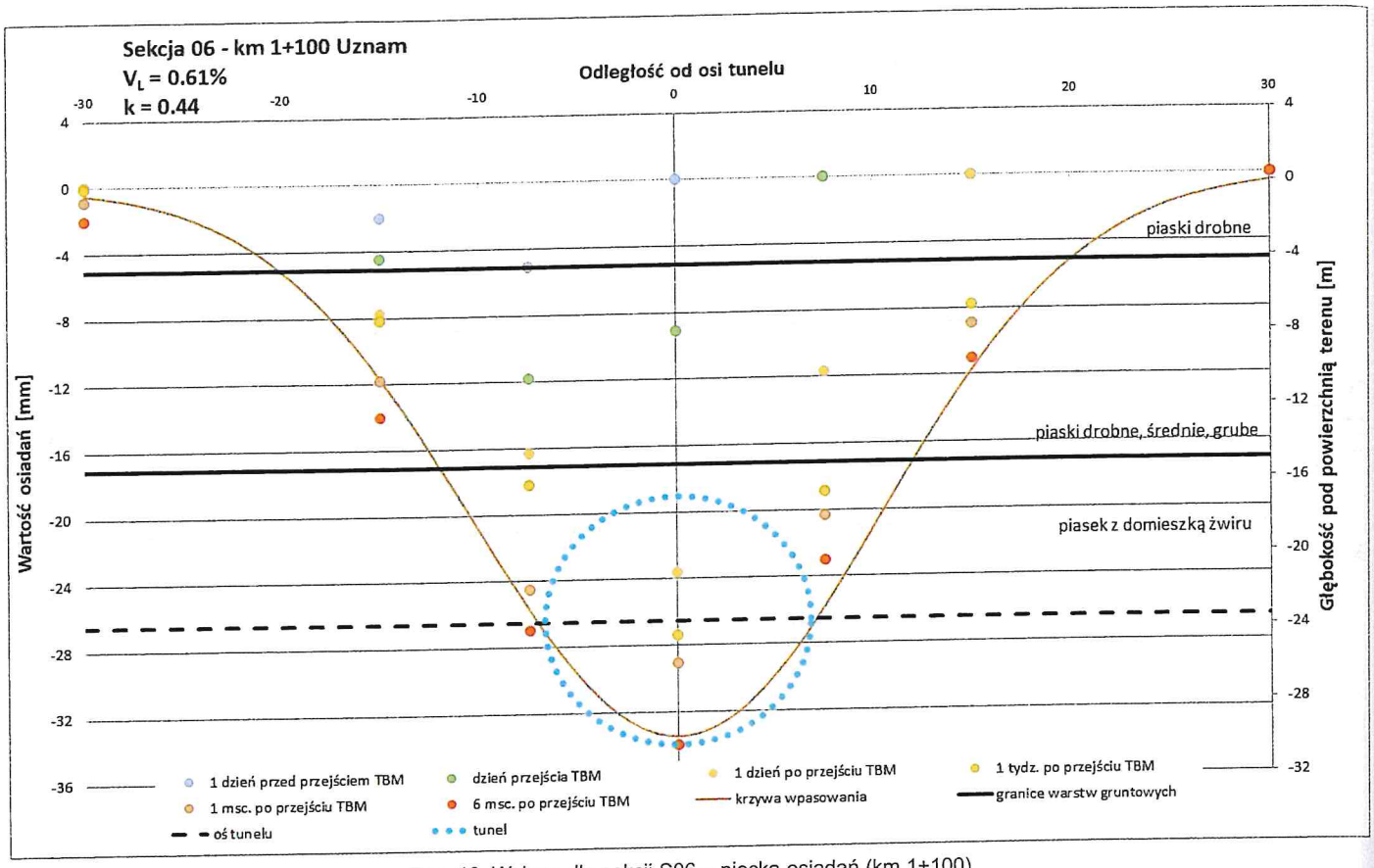
Rys. 13. Wykres dla sekcji S03 – niecka osiadań (km 0+950)



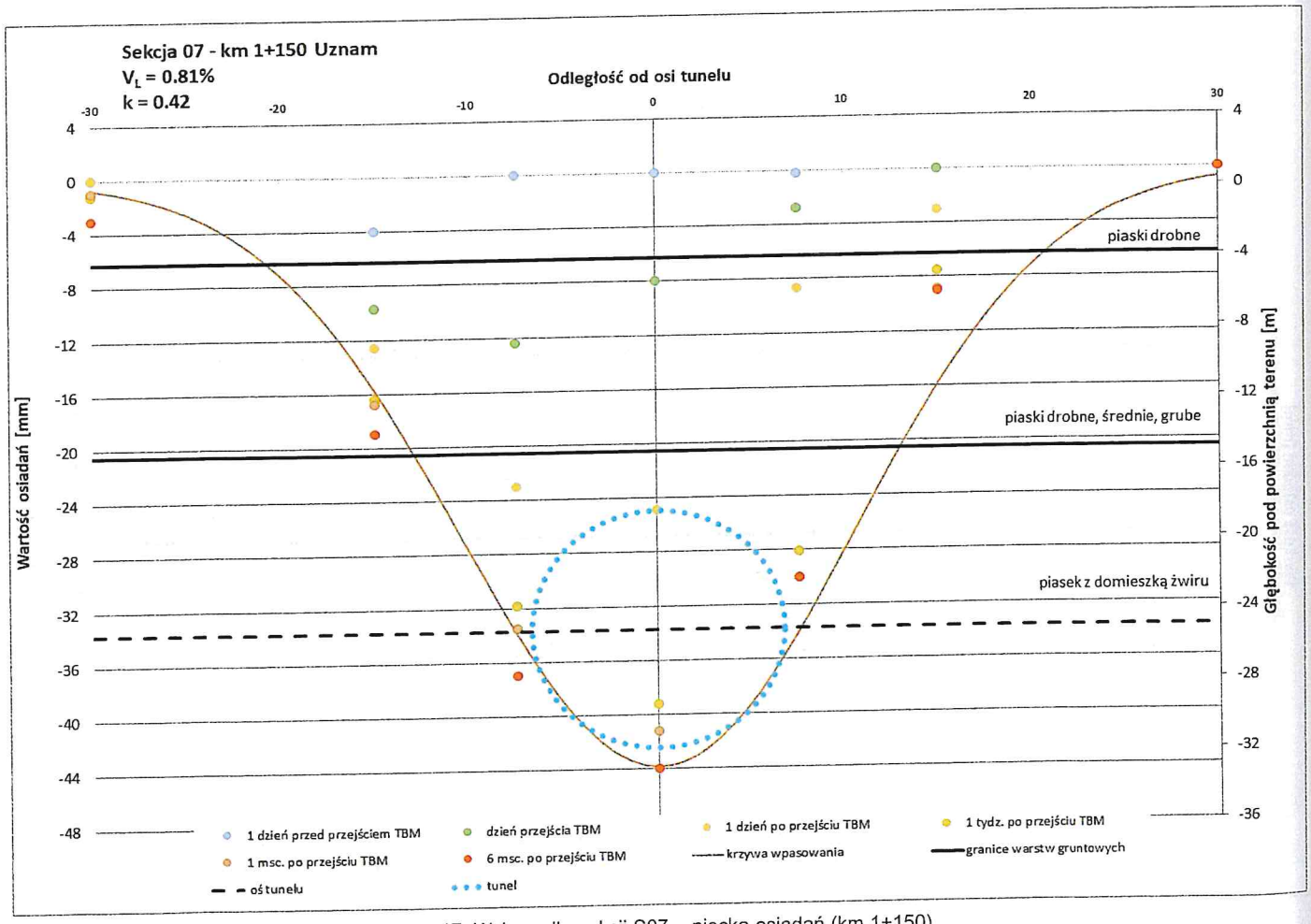
Rys. 14. Wykres dla sekcji S04 – niecka osiadań (km 1+000)



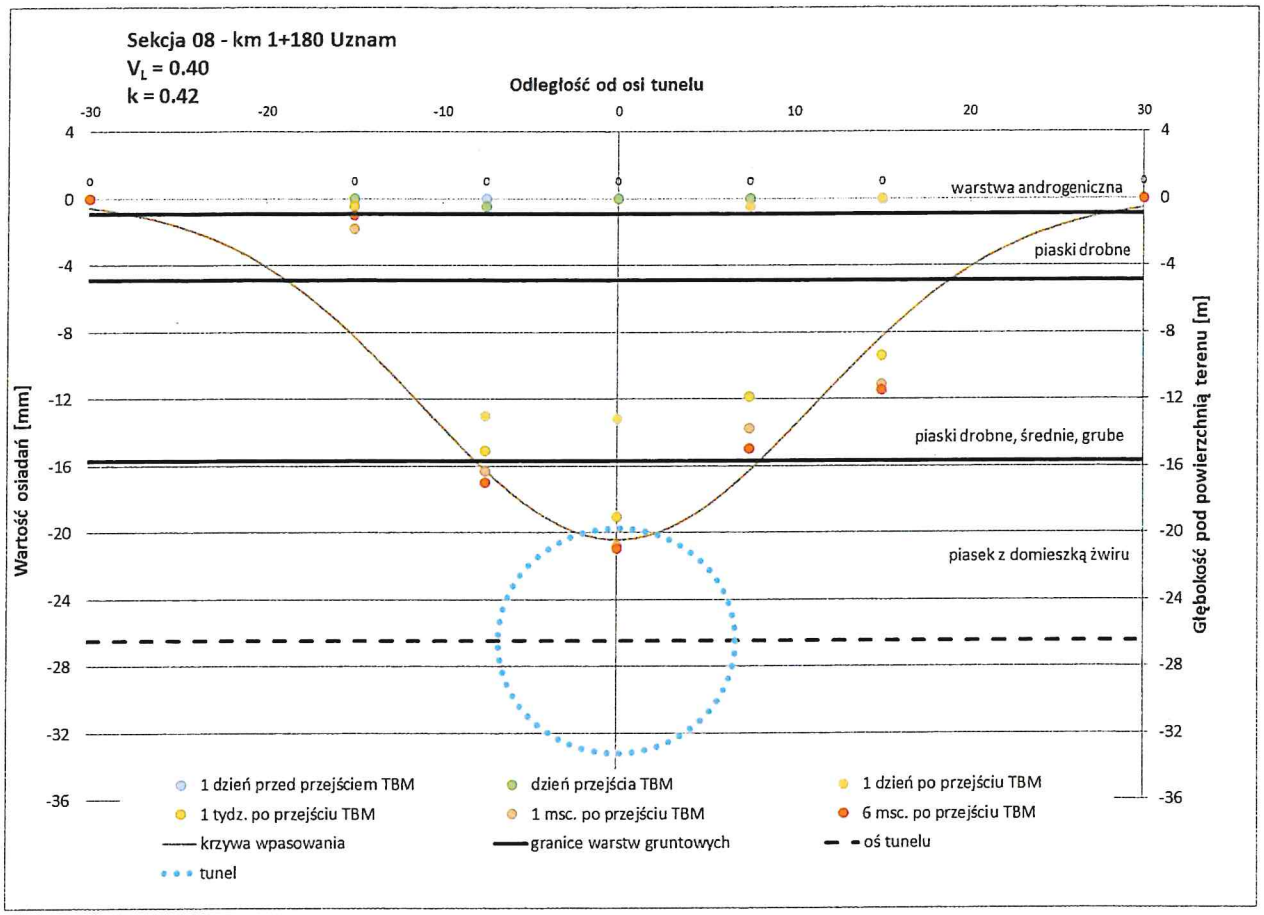
Rys. 15. Wykres dla sekcji S05 – niecka osiadań (km 1+050)



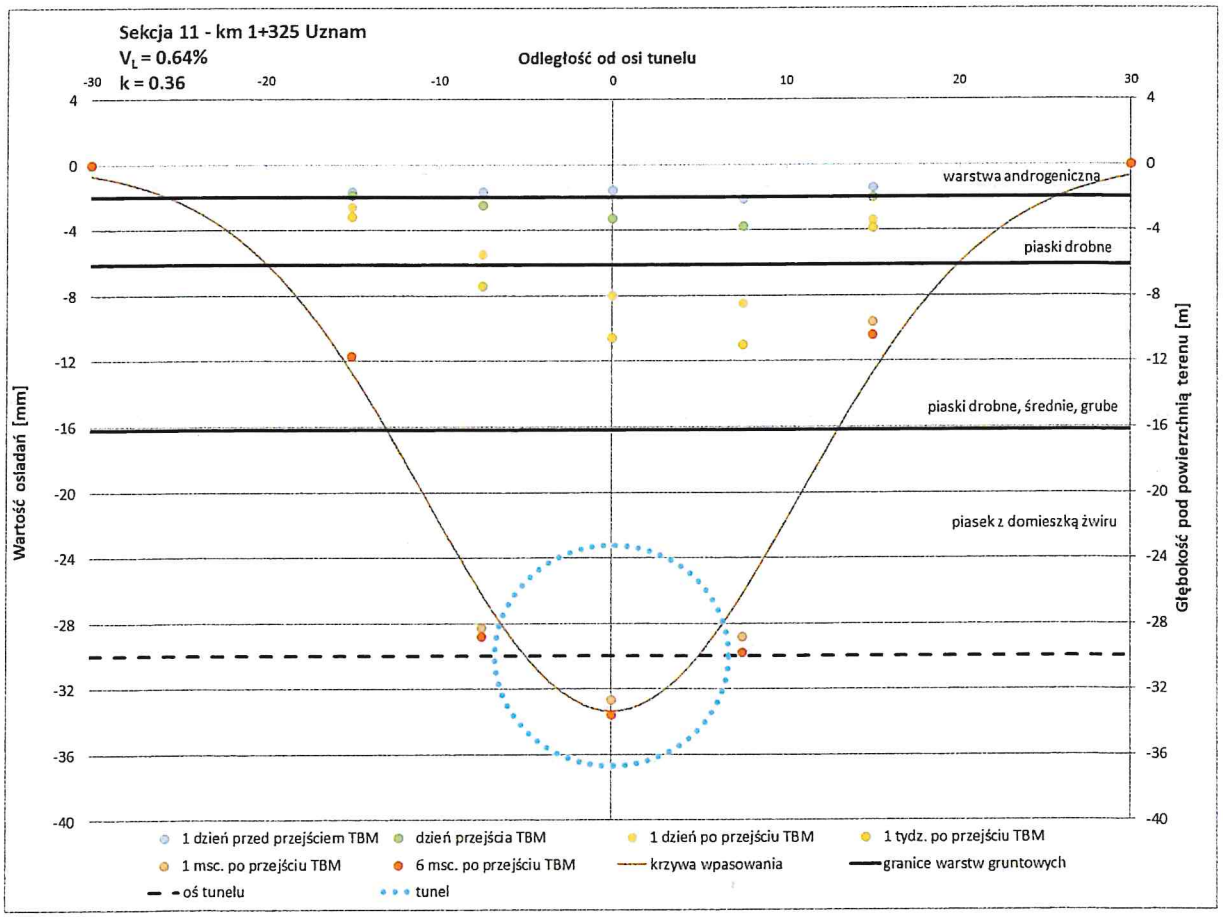
Rys. 16. Wykres dla sekcji S06 – niecka osiadań (km 1+100)



Rys. 17. Wykres dla sekcji S07 – niecka osiadań (km 1+150)

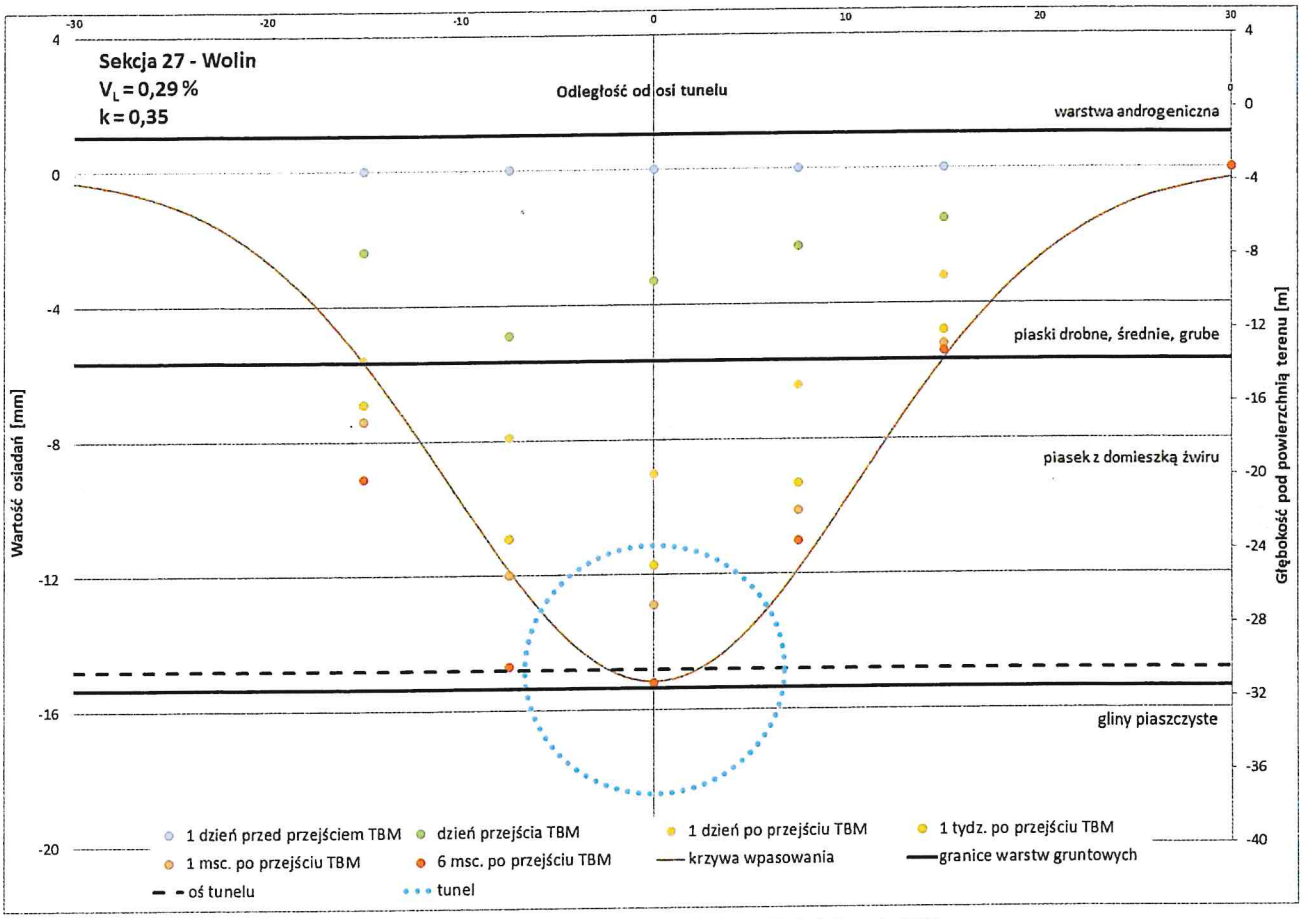


Rys. 18. Wykres dla sekcji S08 – niecka osiadań (km 1+180)

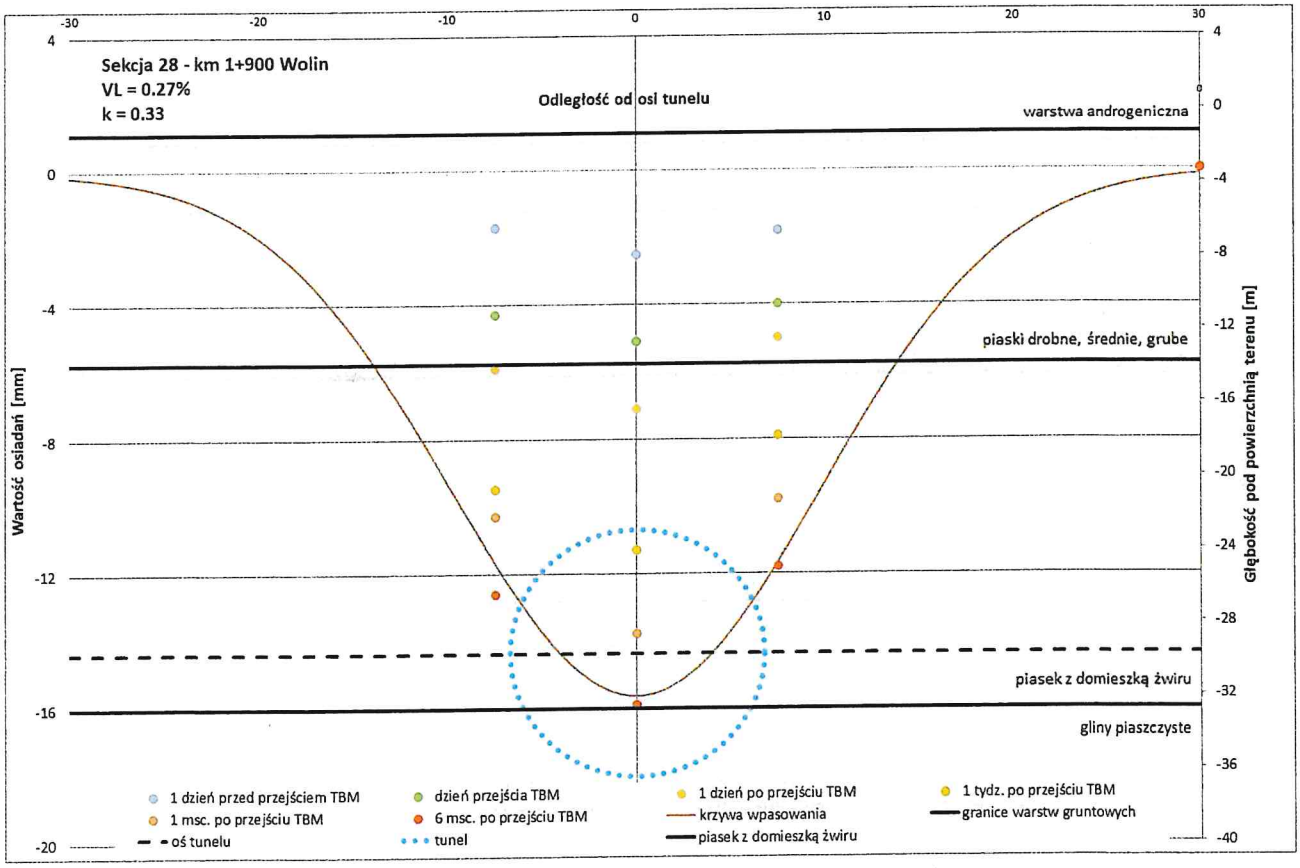


Rys. 19. Wykres dla sekcji S11 – niecka osiadań (km 1+325)

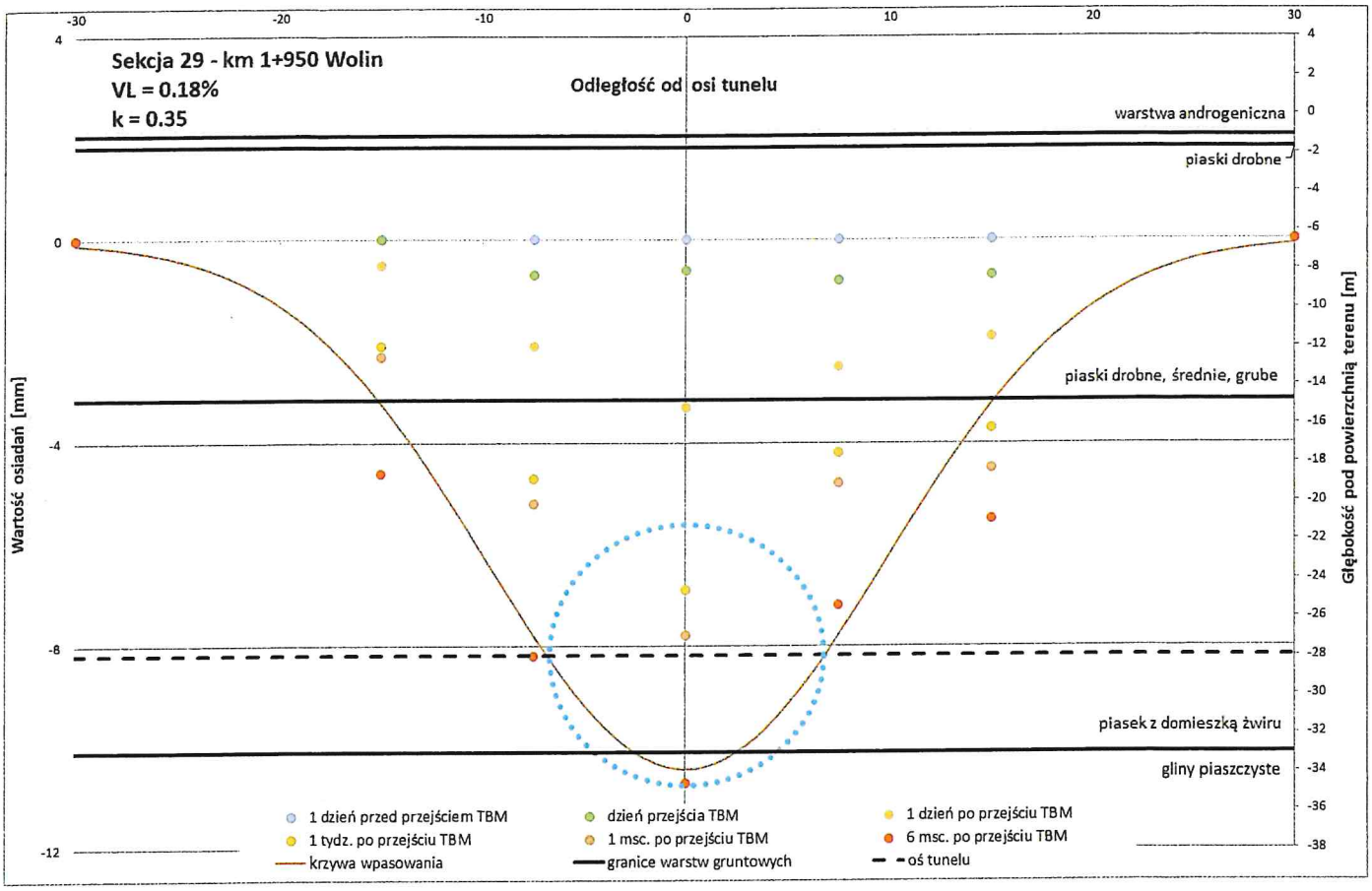
Strona Wolin



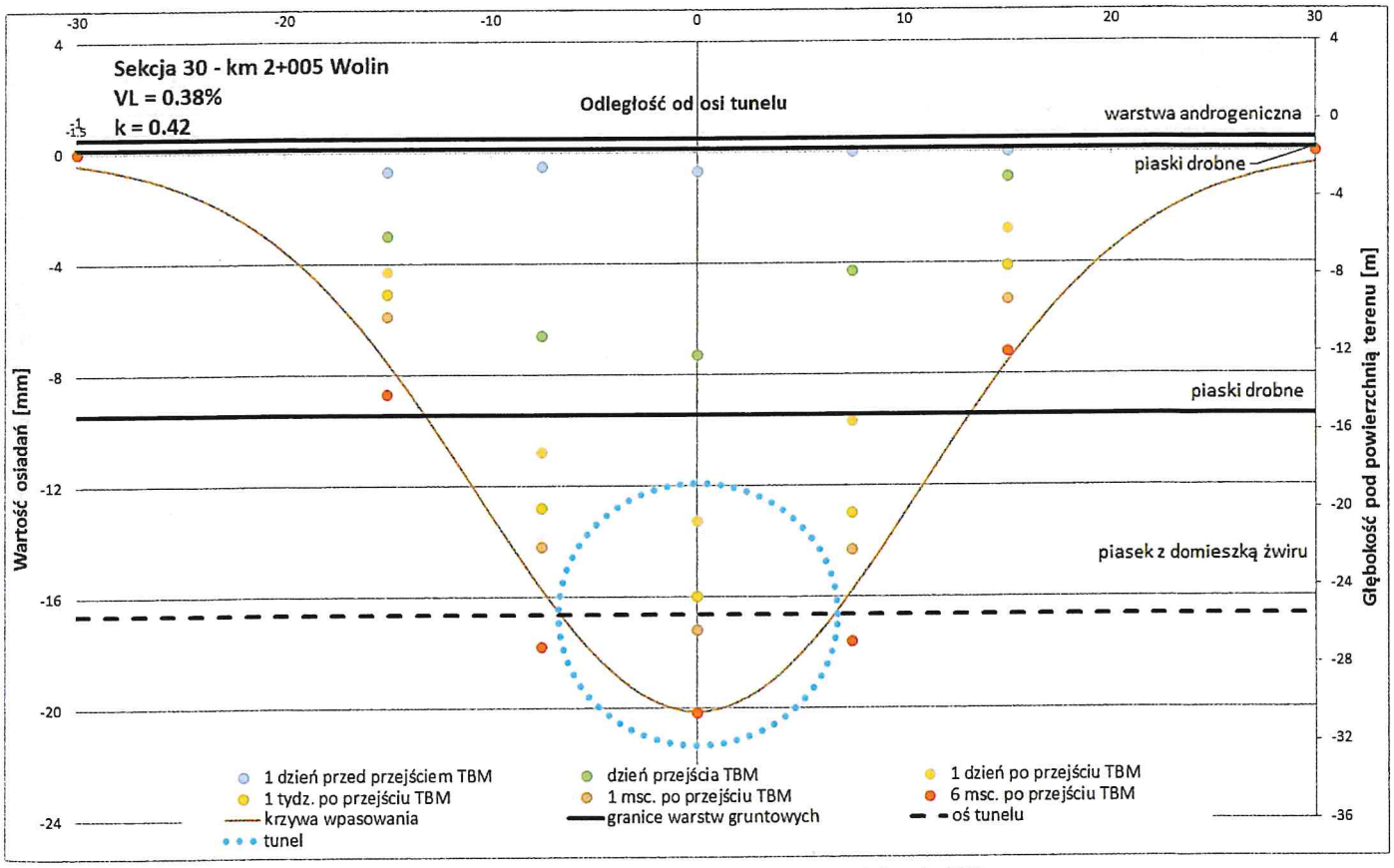
Rys. 20. Wykres dla sekcji S27 – niecka osiadań (km 1+862)



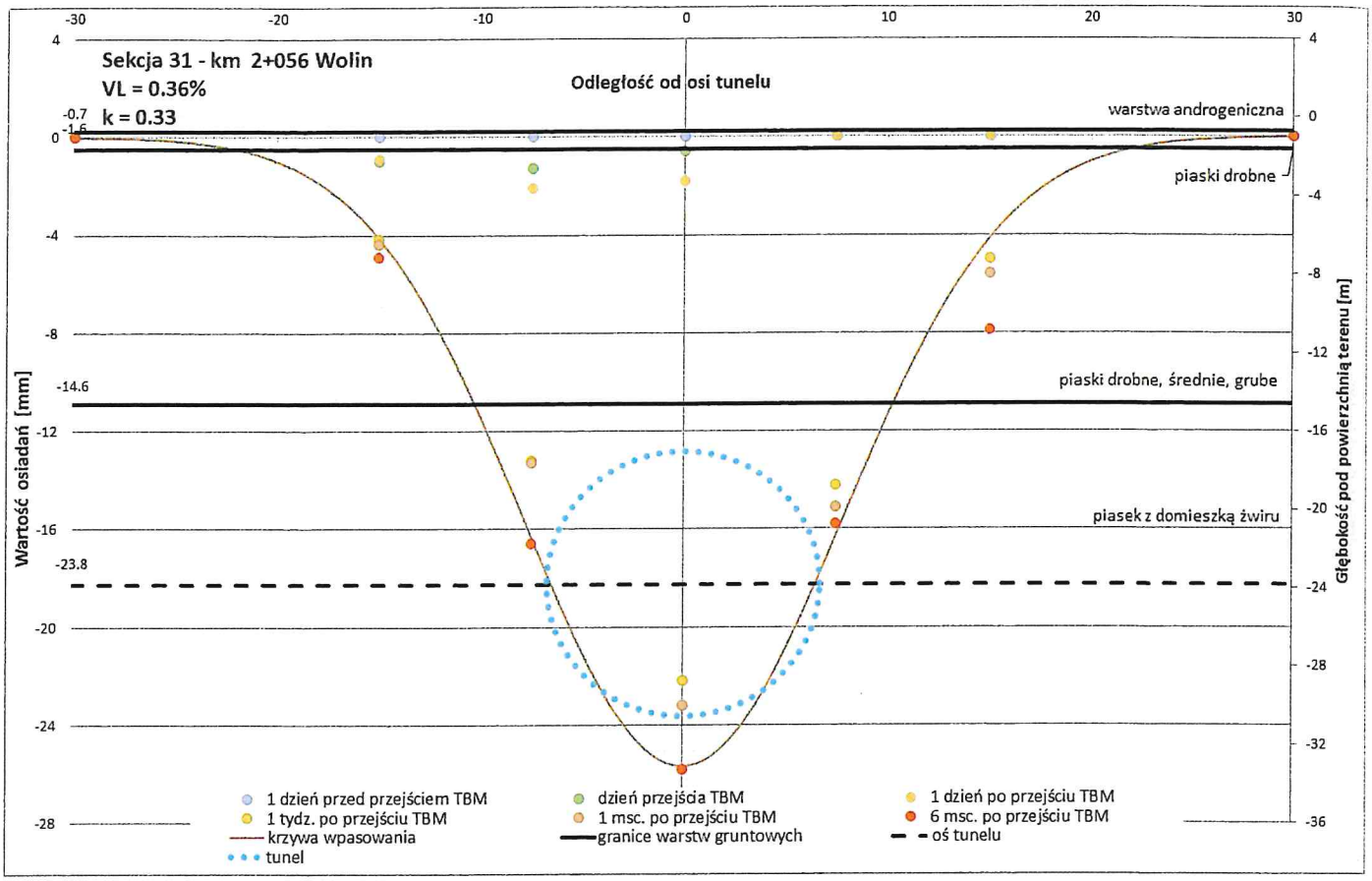
Rys. 21. Wykres dla sekcji S28 – niecka osiadań (km 1+900)



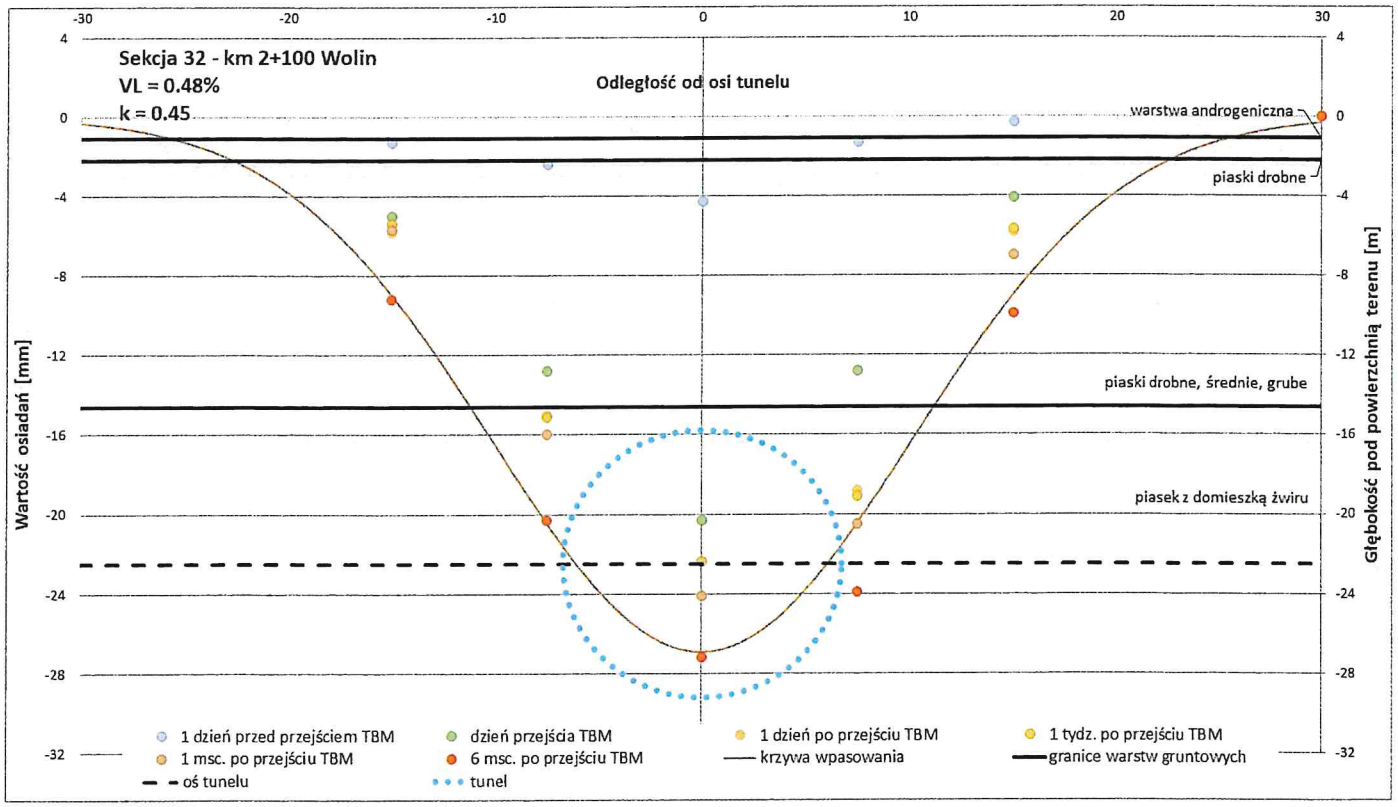
Rys. 22. Wykres dla sekcji S29 – niecka osiadań (km 1+950)



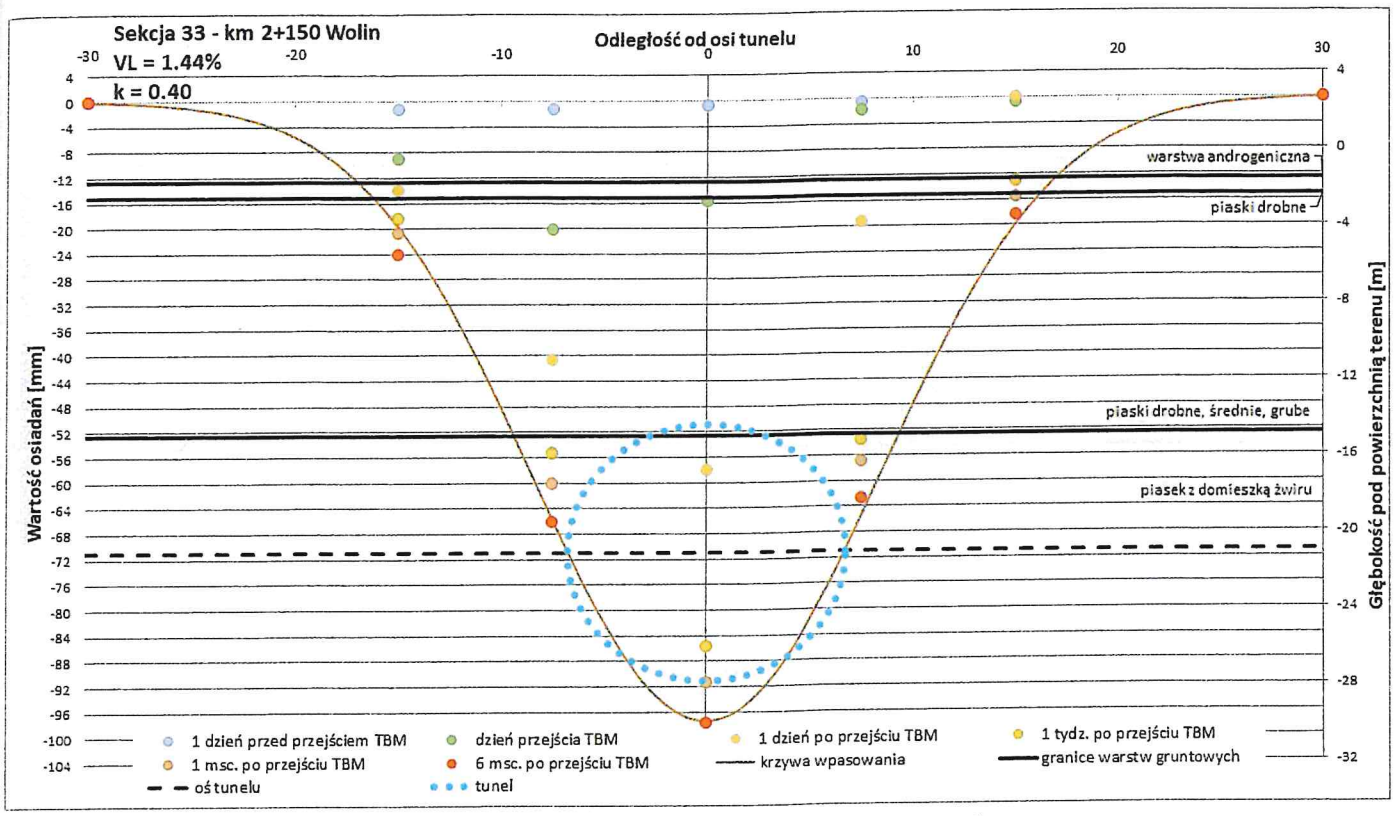
Rys. 23. Wykres dla sekcji S30 – niecka osiadań (km 2+005)



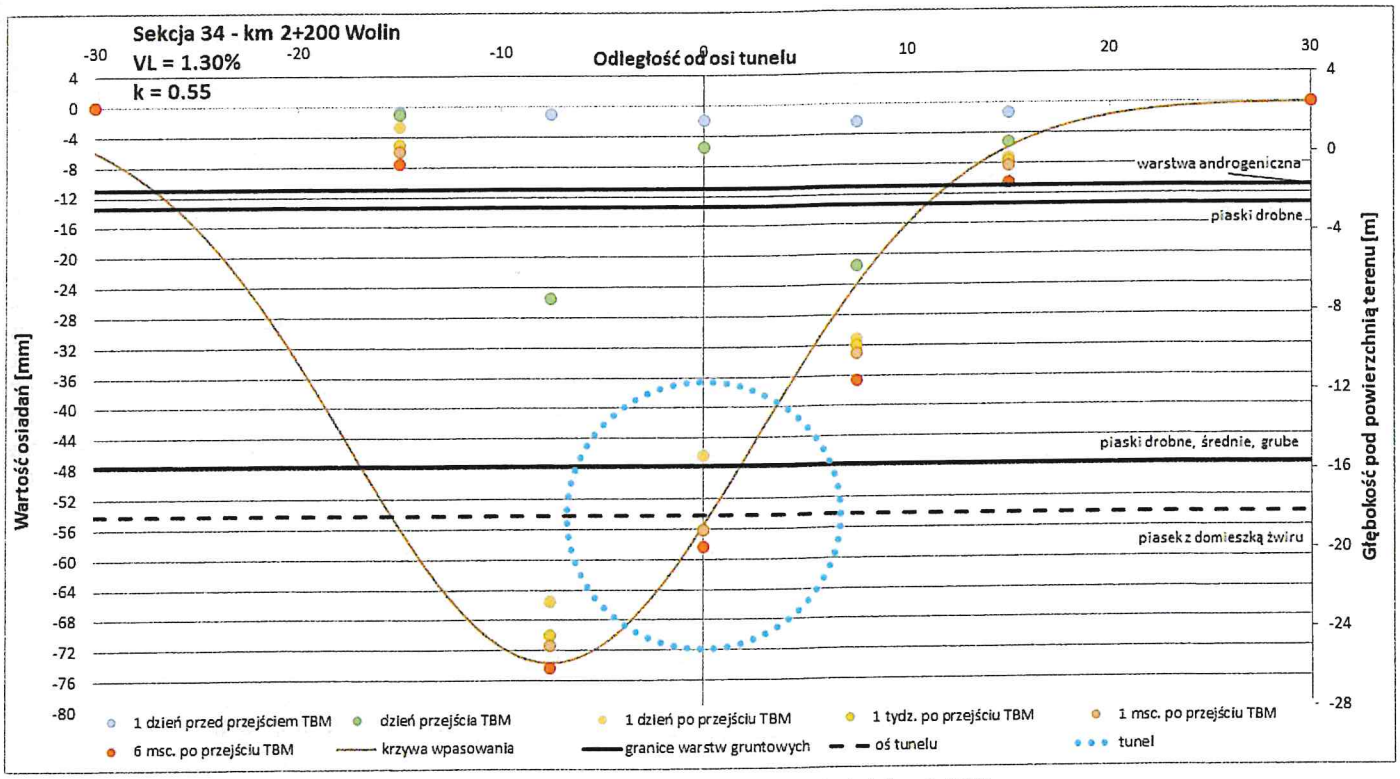
Rys. 24. Wykres dla sekcji S31 – niecka osiadań (km 2+056)



Rys. 25. Wykres dla sekcji S32 – niecka osiadań (km 2+100)



Rys. 26. Wykres dla sekcji S33 – niecka osiadań (km 2+150)

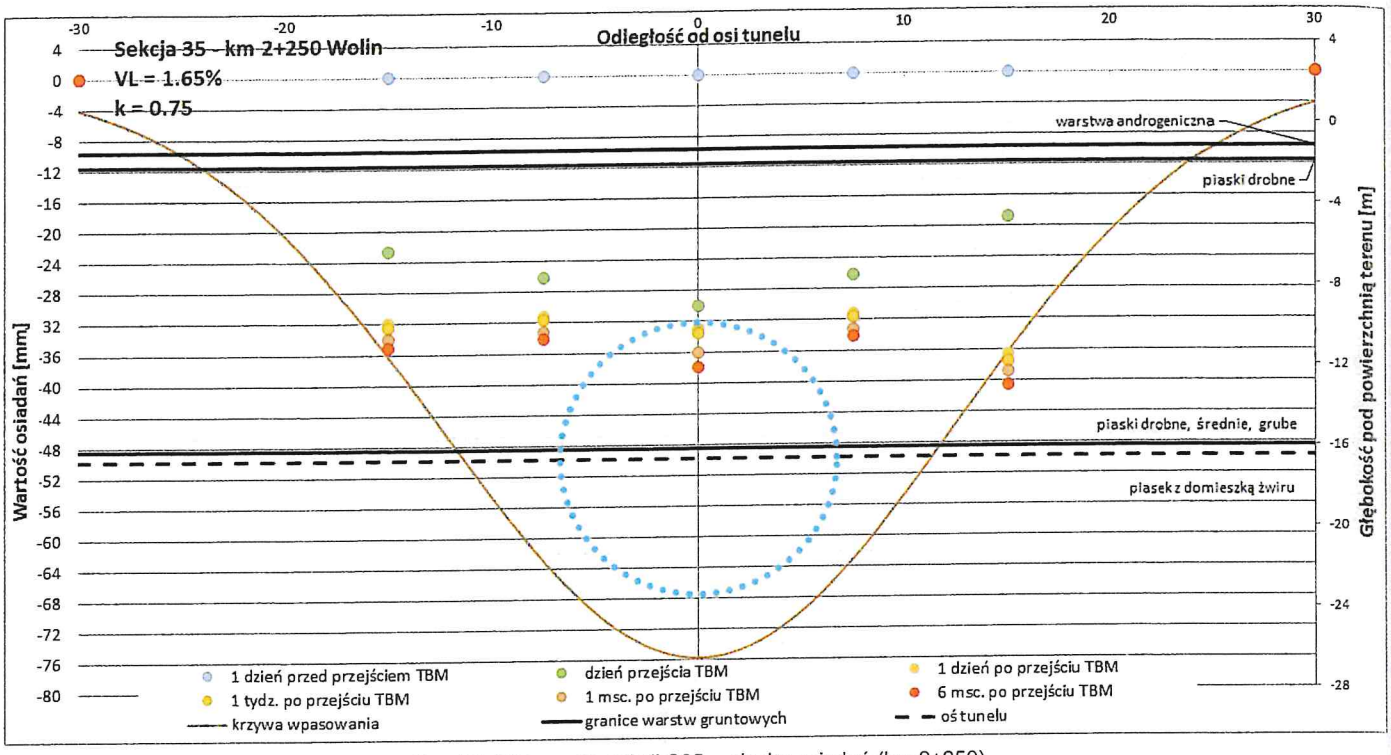


Rys. 27. Wykres dla sekcji S34 – niecka osiadań (km 2+200)

Wnioski

Maksymalna zaobserwowana wartość osiadań po stronie Uznam wynosi 45 mm, a po stronie Wolin – prawie 100 mm (tabl. 2). Największy wpływ na osiadanie można zaobserwować na ostatnich trzech sekcjach. W obszarze tym parametry maszyny TBM były kontrolowane, mieszczące się w granicach projektowych. Również prowadzona iniekcja w ogonie tarczy nie wykazała problemów ani odchyleń od wartości teoretycznych.

Możliwym powodem tak dużych różnic w osiadaniach są warunki gruntowe w rejonie komory odbiorczej, gdzie występują warstwy gruntów organicznych składające się z namułów i torfów.



Rys. 28. Wykres dla sekcji S35 – niecka osiadań (km 2+250)

Tablica 2

Rzeczywiste osiadania i straty objętości spowodowane procesem tunelowania – strony Uznam i Wolin

Nr sekcji	Kilometraż	Głębokość osi tunelu z_0	Maksymalna wartość osiadań*	Współczynnik k	Strata objętości V_L	Rodzaj pomiaru
	[km]	[m]	[mm]	[–]	[%]	
Strona Uznam						
S02	0+900	18,5	34	0,4	0,44	ręczny
S03	0+950	20,1	19	0,32	0,22	ręczny
S04	1+000	22,5	21	0,35	0,5	ręczny
S05	1+050	25	45	0,42	0,83	ręczny
S06	1+100	23,5	34	0,44	0,61	ręczny
S07	1+150	25	44	0,42	0,81	ręczny
S08	1+180	26,5	21	0,42	0,4	ręczny
S11	1+325	30	33,6	0,36	0,64	ręczny
Strona Wolin						
S27	1+862	30,5	15,2	0,35	0,29	automatyczny
S28	1+900	29,7	15,9	0,33	0,27	automatyczny
S29	1+950	28	10,7	0,35	0,18	automatyczny
S30	2+005	25,5	20,2	0,42	0,38	automatyczny
S31	2+056	23,8	25,8	0,33	0,36	automatyczny
S32	2+100	22,5	27,2	0,45	0,48	automatyczny
S33	2+150	21	97,7	0,4	1,44	automatyczny
S34	2+200	18,2	58,4	0,55	1,3	automatyczny
S35	2+250	16,5	38	0,75	1,65	automatyczny

* – wartość w osi tunelu

Podsumowanie

Zmiany w środowisku otaczającym tunel powstają głównie na skutek nadmiernego wybierania gruntu. Jak przedstawiono na wykresach, niecka osiadań powstaje tuż przed czołem tarczy, a swoją maksymalną wartość osiąga w czasie po zamontowaniu obudowy zależnym od rodzaju gruntu. Powstałe osiadania na powierzchni gruntu nie miały wpływu na znajdującą się nad nim zabudowę. Podczas prowadzenia tak skomplikowanego procesu budowlanego, jakim jest konstrukcja tunelu pod Świną, bardzo trudne jest całkowite uniknięcie zagrożeń związanych z realizacją projektu. Bez wątpienia zastosowanie monitorowania geotechnicznego w trakcie realizacji robót w dużym stopniu daje komfort zapewnienia ciągłości prac. Poprzez odpowiednio wczesne rozpoznanie tendencji zachowania się gruntu lub obiektów, analizę oraz podjęcie decyzji, jesteśmy w stanie dobrać właściwe rozwiązanie. Dzięki współpracy wszystkich zespołów zaangażowanych w prowadzenie prac tunelowych, projektowych oraz monitoringowych roboty budowlane zostały zakończone bez większych problemów i z niewielkimi opóźnieniami.

PIŚMIENNICTWO

[1] *New B.M., Bowers K.H.*: Ground movement model validation at the Heathrow Express trial tunnel, 1994, pp. 301-329.

[2] *O'Reilly M.P., New B.M.*: Settlements above tunnels in the United Kingdom – their magnitude and prediction. In: Tunnelling '82. London 1982, pp. 173-181.

[3] *Kuszyk R., Siemińska-Lewandowska A.*: Ocena rozwoju niecki osiadań nad tunelem drążonym tarczą zmechanizowaną. „Górnictwo i Geoinżynieria", zeszyt 3/1, 2009.

MATERIAŁY WYKORZYSTANE W PRACY

[4] *Mazurek A.*: Opinia geotechniczna i dokumentacja badań podłoża gruntowego pod planowane drogi związane z budową tunelu w Świnoujściu. Geoprojekt Szczecin, czerwiec 2017.

[5] *Cucino P.*: Podstawowa Dokumentacja Geotechniczna, dokument nr: P-SWIN-SWS-E-TUN-GEO-PCG-2402, SWS Engineering S.p.A, listopad 2019.

Mgr inż. PAWEŁ SEGIT
Tunel Świnoujście

Wsparcie BIM i modelowanie 3D

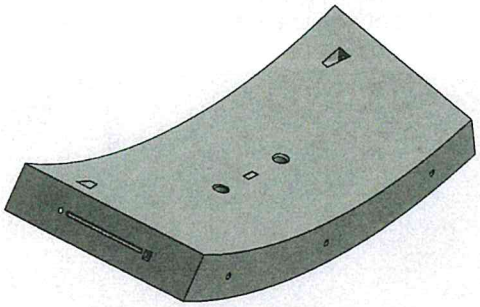
Budowa tunelu w Świnoujściu jest jedną z nielicznych inwestycji tego typu na terenie naszego kraju. Jest to drugi podwodny tunel drogowy wykonywany w technologii TBM. Ranga przedsięwzięcia oraz jego kluczowe znaczenie dla usprawnienia ruchu na wyspach Świnoujścia wymaga stosowania najnowocześniejszych technologii oraz procesów. Jednymi z innowacji stosowanymi w projekcie jest wykorzystanie modelowania 3D oraz metodologii BIM. Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie praktycznych rozwiązań mających zastosowanie bezpośrednio na placu budowy.

Plan realizacji BIM

Plan realizacji BIM definiuje strategię wykorzystania technologii BIM w trakcie realizacji projektu. Określa cele, które mają zostać osiągnięte w zakresie tworzenia, wymiany oraz wykorzystania modeli opracowanych specjalnie dla tego projektu przez wszystkie zespoły projektowe. Nie tylko odpowiada na potrzeby i wymagania zamawiającego, ale także dostarcza przydatnych informacji na temat standardów, procedur, rozwiązań informatycznych oraz systemu wymiany danych. W dokumencie tym możemy znaleźć m.in. schemat organizacyjny, obieg dokumentacji, macierz odpowiedzialności oraz „kamienie milowe" projektu.

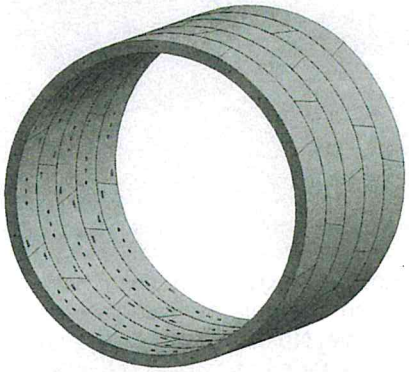
Tunel drążony TBM

Obudowa segmentowa tunelu drążonego składa się z prefabrykowanych pierścieni żelbetowych. Każdy pierścień jest złożony z 8 segmentów. Elementy zamodelowano ze szczegółowością na najwyższym poziomie, odwzorowując skomplikowaną geometrię. W modelach segmentów znajdziemy informacje o łącznikach segmentów, gniazdach montażowych, rowkach na pręty prowadzące oraz gniazdach erektora (rys. 1).



Rys. 1. Segment obudowy tunelu

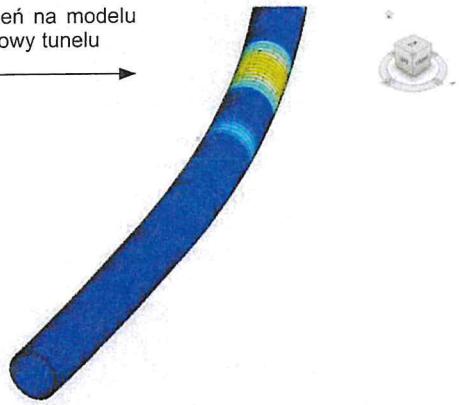
Zmienna geometria pierścienia (stożkowatość) pozwala na kształtowanie łuków pionowych oraz poziomych. Przewidziano 24 pozycje ułożenia pierścieni wraz z dopuszczalną sekwencją montażu. Nakładanie się styków czy powielanie tej samej pozycji jest niepożądane i może skutkować osłabieniem konstrukcji. Na rysunku 2 przedstawiono przykładową sekwencję montażu.



Rys. 2. Sekwencja ułożenia pierścieni

W celu minimalizacji odchyleń od projektowanej osi tunelu oraz wytypowania optymalnej pozycji początkowej wykonano analizę z wykorzystaniem skryptów w języku Python oraz oprogramowania Dynamo. Jest to podejście innowacyjne w porównaniu z tradycyjnymi metodami projektowania. Uwzględniając aspekty geometryczne, konstrukcyjne oraz geotechniczne i wybierając odpowiednią pozycję początkową, zminimalizowano wartości odchylenia na długości całego tunelu (rys. 3).

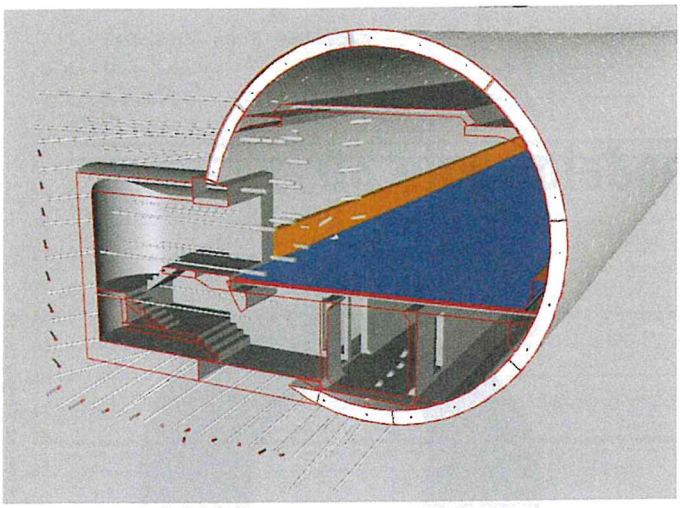
Rys. 3. Analiza odchyleń na modelu segmentowej obudowy tunelu



Wyjścia ewakuacyjne

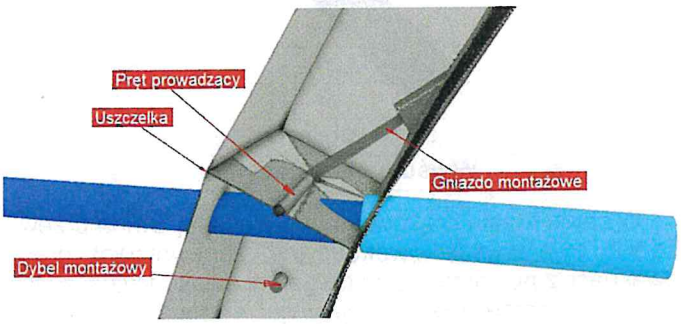
W ciągu tunelu drążonego pod cieśniną Świną przewidziano dwa wyjścia ewakuacyjne, zapewniające drogę ewakuacji z poziomu jezdni do galerii ewakuacyjnej zlokalizowanej poniżej. Konstrukcje wyjść ewakuacyjnych znajdują się poza obrysem tunelu i do ich wykonania potrzebne jest otwarcie obudowy tunelu (rys. 4).

Jest to skomplikowany proces, wymagający uprzedniego wzmocnienia konstrukcji tunelu oraz zmrożenia gruntu. Koncepcja układu lanc mrożeniowych w procesie projektowym zakładała jednakowy układ mrożenia dla obydwu wyjść ewakuacyjnych. Niestety, specyfika maszyny TBM i technologia montażu pierścieni tunelu wymusza pewne odstępstwa od projektu. W zależności od napotka-



Rys. 4. Przekrój przez wyjście ewakuacyjne

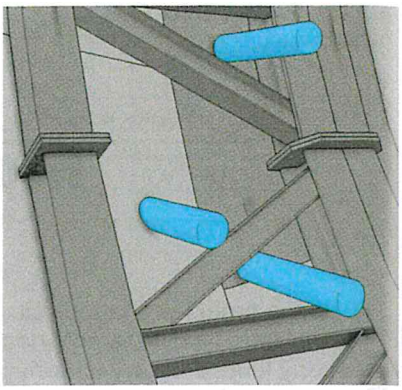
nych warunków geologicznych oraz innych zmiennych, podczas procesu drążenia sekwencja ułożenia pierścieni może ulec zmianie. Należy również wziąć pod uwagę tolerancje wykonania segmentów oraz odchyłki konstrukcji. Do planowania prac mrożeniowych niezbędna jest więc szczegółowa analiza projektowanego układu w korelacji z wydrążonym tunelem. W celu zapewnienia możliwie najdokładniejszego pomiaru zdecydowano się na wykonanie inwentaryzacji tunelu w postaci skanowania laserowego. Otrzymana chmura punktów pozwoliła na precyzyjną analizę prac w obrębie wyjść ewakuacyjnych. Dzięki wpasowaniu segmentów obudowy tunelu do skanu otrzymano dokładny kilometraż oraz sekwencję pozycji pierścieni. Do zapewnienia bezpiecznego wykonania otworu w obudowie tunelu konieczny jest montaż tymczasowej ramy stalowej. Dodatkowo w celu umożliwienia wykonania i montażu instalacji mrożeniowej oraz zapewnienia logistyki w tunelu zaprojektowano stalową platformę roboczą oraz najazdy z kruszywa. Konstrukcje tymczasowe zostały zamodelowane w 3D i umiejscowione w rzeczywistych współrzędnych zgodnie z wykonanym skanem tunelu. Układ lanc mrożeniowych został zweryfikowany pod kątem kolizji z połączeniami między segmentami, dyblami montażowymi, uszczelką obwodową, prętami prowadzącymi oraz konstrukcjami tymczasowymi (rys. 5, 6).



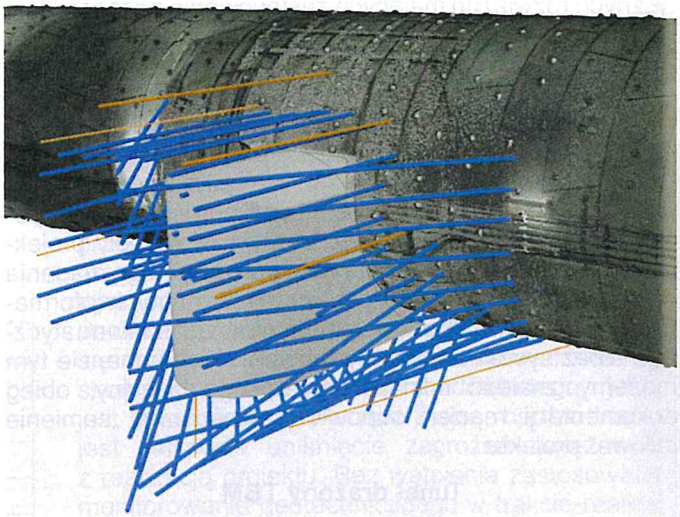
Rys. 5. Potencjalne kolizje z akcesoriami w segmentach tunelu

Każdy z otworów został indywidualnie zweryfikowany i przesunięty tak, aby uniknąć kolizji, zachowując wymaganą geometrię płaszcza mrożeniowego (rys. 7). Omawiane analizy wykazały konieczność przygotowania odrębnych układów instalacji mrożeniowych dla obydwu wyjść ewakuacyjnych. Dzięki wykorzystaniu trójwymiarowych modeli możliwe było zaplanowanie sekwencji robót

Rys. 6. Potencjalne kolizje z ramą stalową



wiertniczych oraz zapewnienie logistyki w tunelu. Pokazuje to przewagę modelowania 3D nad podejściem klasycznym, gdzie potencjalne problemy zostały wytypowane i rozwiązane w procesie projektowym.



Rys. 7. Układ lanc mrożeniowych

Fotogrametria

Fotogrametria jest to technologia pozwalająca na generowanie modeli 3D z obrazów rejestrowanych z różnych punktów widzenia. Realistyczny model obiektu może dodatkowo zawierać tekstury zaczerpnięte ze zdjęć. Modele terenu uzyskane dzięki technologii fotogrametrii służą m.in. do optymalizacji wykorzystania składowanych

Rys. 8. Zbiornik retencyjny – numeryczny model terenu

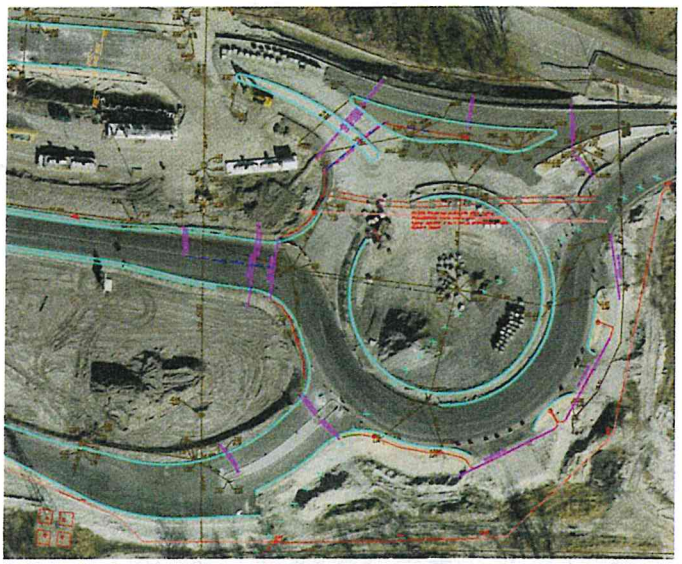
materiałów sypkich, inwentaryzacji wykonanych robót ziemnych oraz analiz bilansu mas ziemnych. Na rysunku 8 przedstawiono numeryczny model terenu wykonanego zbiornika retencyjnego.

Kolejną pochodną fotogrametrii jest ortofotomapa. Od zwykłego zdjęcia odróżnia ją fakt, że jest rzutem ortogonalnym w skali, wpasowanym w projektową osnowę geodezyjną. Dzięki temu na jej podstawie można wykonywać pomiary z dużą dokładnością. Na budowie tunelu w Świnoujściu ortofotomapy posłużyły m.in. do planowania placów składowych prefabrykatów (rys. 9). Dodatkowo pozwoliły na regularną kontrolę postępu prac (rys. 10) oraz szczegółowe planowanie zagospodarowania placu budowy.

Podsumowanie

Wykorzystanie nowoczesnych technologii na placu budowy może w znacznym stopniu usprawnić prowadzenie projektu, zaczynając od procesu projektowego, gdzie wdrożenie metodologii BIM pomaga eliminować kolizje międzybranżowe, po inwentaryzację prac z wykorzystaniem skanowania laserowego i fotogrametrii. Trójwymiarowe modele pomagają w lepszym zrozumieniu geometrii obiektów i są atrakcyjną formą przekazu dla zainteresowanych stron, niekoniecznie mających doświadczenie w czytaniu skomplikowanej dokumentacji rysunkowej (rys. 11).

Rys. 9. Plac składowy prefabrykatów



Rys. 10. Mapa dyżurna z podłączoną ortofotomapą

Rys. 11. Skan wyjścia ewakuacyjnego

MATERIAŁY WYKORZYSTANE W PRACY

[1] *Cucino P.*: Prefabrykowane segmenty obudowy tunelu – opis techniczny, SWS Engineering S.p.A, listopad 2019.

[2] *Cucino P.*: Trasa tunelu – opis techniczny, SWS Engineering S.p.A, wrzesień 2020.

[3] *Borkowski M.*: Plan realizacji BIM, Europrojekt Gdańsk S.A, luty 2019.

SZCZECIN

zapobieganie
diagnostyka
naprawy
rekonstrukcje

ICSF 2022

XXX Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna
AWARIE BUDOWLANE
Międzyzdroje, 23-27 maja 2022

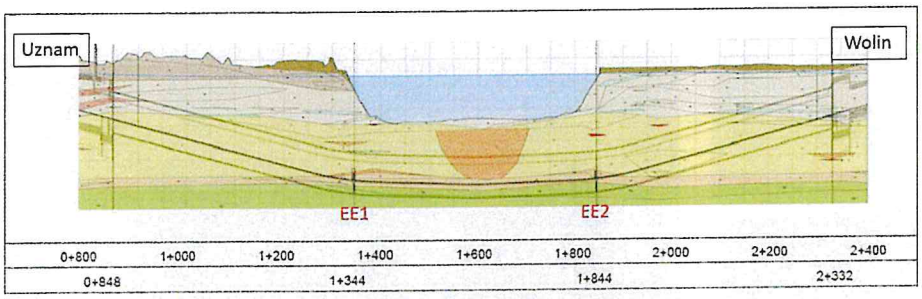
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa, Oddział Szczecin

Mgr inż. ŁUKASZ CHODAKOWSKI
Tunel Świnoujście

Wyzwania związane z wykonaniem wyjść ewakuacyjnych

Na odcinku tunelu drążonego TBM o długości około 1484 m zaprojektowano dwa wyjścia ewakuacyjne, dzieląc odcinek na trzy niemal równe strefy o długości około 494 m (rys. 1). Celem wyjść ewakuacyjnych jest umożliwienie bezpiecznego opuszczenia tunelu w razie wystąpienia pożaru, dotarcie do wyjść ewakuacyjnych znajdujących się po obu stronach tunelu, zlokalizowanych w komorach po stronie Uznam oraz Wolin i umożliwienie ewakuacji na powierzchnię terenu.

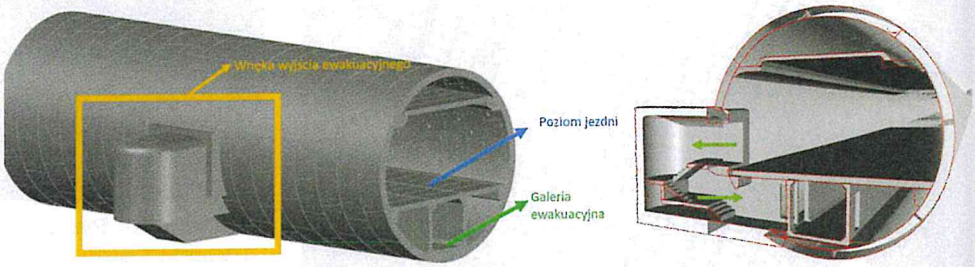


Rys. 1. Lokalizacja wyjść ewakuacyjnych, oznaczonych EE1, EE2

Wyjście ewakuacyjne składa się z bocznej wnęki, umożliwiającej komunikację z poziomu jezdni do galerii ewakuacyjnej, znajdującej się pod płytą drogową, w uszczelnionym prefabrykacie typu „U-shape". Wykonanie wyjść ewakuacyjnych w tunelu drążonym jest jednym z najbardziej wymagających i niebezpiecznych etapów budowy tunelu pod Świną. Wysokość wnęki wynosi 7,65 m, głębokość około 7,2 m, mierząc na poziomie płyty drogowej, szerokość 4,8 m. Wnękę wyjścia ewakuacyjnego wykonano metodą górniczą, w technologii betonu natryskowego jako obudowy wstępnej. Konstrukcja żelbetowa obudowy docelowej w przekroju poprzecznym o grubości 60 cm jest wykonana metodą tradycyjną, przy użyciu deskowania systemowego dostosowanego do kształtu obudowy wstępnej. Aby bezpiecznie wykonać wykop oraz obudowę wnęk, konieczne jest odpowiednie przygotowanie gruntu. W tym celu wybrano metodę zmrażania gruntu, która pozwala tymczasowo poprawić właściwości mechaniczne oraz uzyskać szczelność. Technologia mrożenia polega na zamrożeniu wody zawartej w porach gruntu i dzięki temu utworzeniu zamkniętej bryły. Ponadto przewidziano zamrożenie rdzenia wykopu, aby zapewnić stateczność czoła i zachować bezpieczeństwo wykonania robót.

Realizacja zadania wyjść ewakuacyjnych wymaga takich prac, jak:

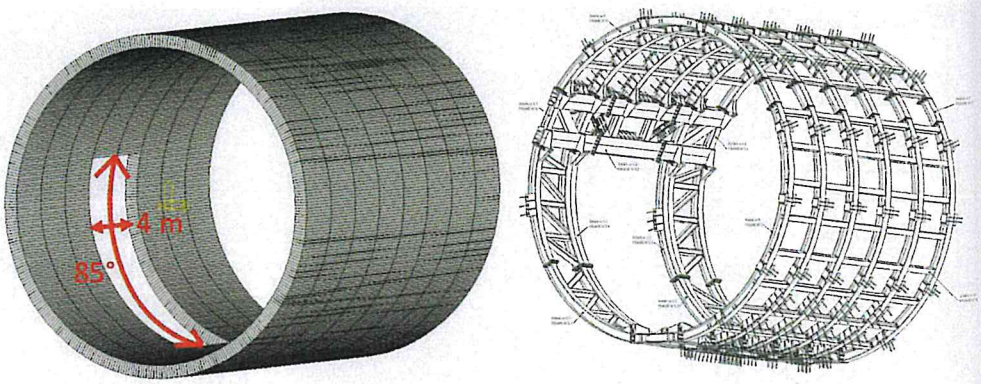
- montaż tymczasowej stalowej ramy podpierającej;
- realizacja odwiertów pod system mrożenia z poziomu rampy najazdowej;
- montaż instalacji mrożeniowej oraz mrożenie aktywne gruntu;
- demontaż obudowy segmentowej tunelu;
- urabianie gruntu oraz realizacja obudowy wstępnej;
- montaż hydroizolacji;
- wykonanie żelbetowej obudowy docelowej;
- demontaż instalacji mrożeniowej;
- demontaż tymczasowej stalowej rampy.



Rys. 2. Wizualizacja wnęki wyjścia ewakuacyjnego wraz z przekrojem poprzecznym

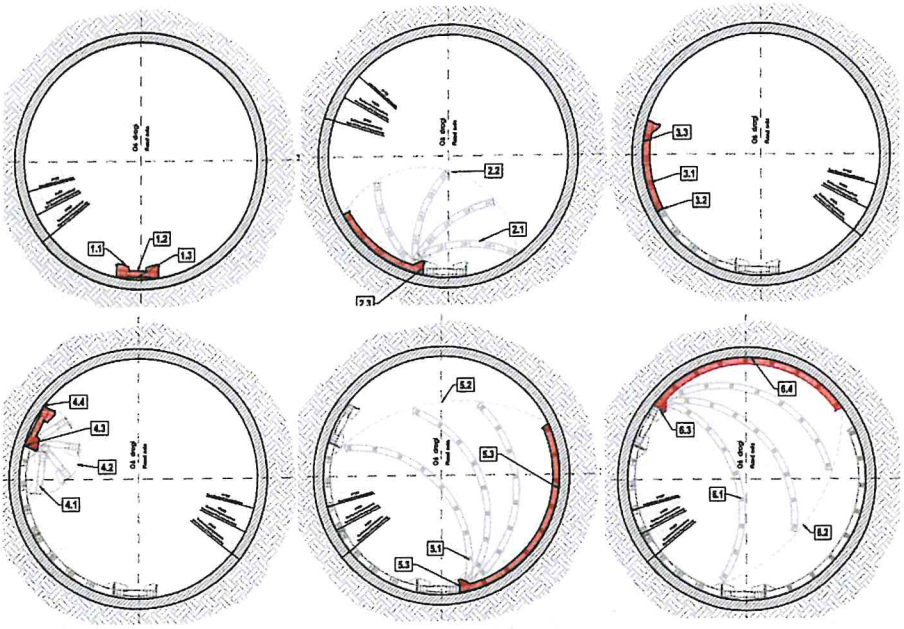
Etap I – Tymczasowa stalowa rama podpierająca

Wycięcie obudowy segmentowej tunelu jest możliwe tylko w przypadku zastosowania podpierającej konstrukcji tymczasowej. Aby zrealizować wnękę, konieczne jest wycięcie 85° obudowy, przecinając dwa kolejne segmenty na łączną długość 4 metrów (rys. 2).

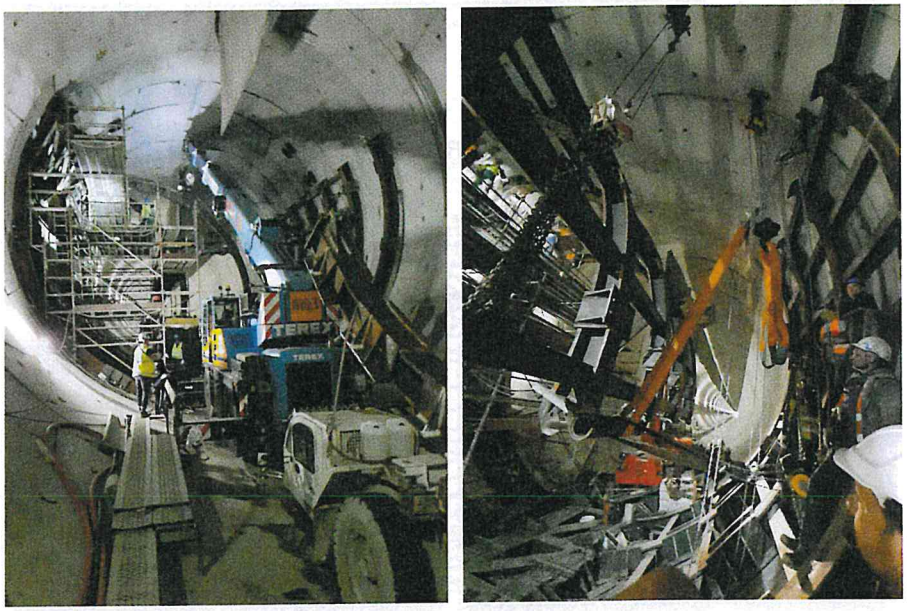


Rys. 3. Wymiar otworu w obudowie segmentowej oraz rama stalowa

Stalowa rama przywraca ciągłość konstrukcji, gwarantuje utrzymanie obudowy w niezmiennej pozycji. Zaprojektowano rozwiązanie „pełnookrągłe" składające się z 6 stalowych pierścieni żebrowych i 2 poziomych oraz 2 pionowych kratownic. Rozwiązanie „pełnookrągłe" umożliwiło zachowanie przejezdności w tunelu przez obszar prowadzonych robót przy wyjściu ewakuacyjnym. Montaż ramy składa się z 6 głównych etapów (rys. 4). Zaprojektowana średnica zewnętrzna ramy stalowej wynosi 11,96 m przy wewnętrznej średnicy tunelu 12 m. Masa całej konstrukcji stalowej jest równa ok. 96 t. Przed przystąpieniem do prefabrykacji wykonano skanowanie 3D obudowy segmentowej w obszarze montażu. Wykonano również montaż próbny w celu weryfikacji spasowania elementów konstrukcji. Zadanie wymagało dużej precyzji podczas montażu (rys. 5).



Rys. 4. Etapy montażu ramy stalowej



Rys. 5. Montaż ramy stalowej w tunelu

Metoda zamrażania gruntu

Jako technologię zabezpieczenia i wzmocnienia gruntu wybrano sztuczne zamrażanie (AGF) metodą pośrednią. Metoda zamrażania polega na przeprowadzeniu płynu chłodzącego przez system rur zamrażających, uprzednio zainstalowanych w gruncie, w odpowiednio rozmieszczonych otworach wokół objętości, która ma być wykopana. W tej metodzie jako płyn chłodzący wykorzystuje się solankę. Solanka jest schładzana do –35°C w agregacie mrożeniowym, a następnie pompowana do rur zamrażających. Pojedyncza rura mrożeniowa jest złożona z dwóch koncentrycznych rur: wewnętrznej otwartej z polietylenu oraz zewnętrznej stalowej, zamkniętej. Środek mrożący jest pompowany przez wewnętrzną rurę, następnie podczas powrotu płynu chłodzącego do głowicy odwiertu ciecz absorbuje ciepło z gruntu. Ogrzana solanka jest ponownie schładzana w instalacji i w obiegu zamkniętym ponownie pompowana.

Zaprojektowano 7 grup odwiertów pod lance mrożeniowe, 8 odwiertów pod sondy termiczne do pomiaru temperatury oraz 4 drenaże. Łącznie 86 odwiertów na jedno wyjście ewakuacyjne, w tym 74 odwierty układu mrożenia przedstawiono na rysunku 6. Odwierty mają długość od około 5 m do niespełna 16 m. Niezwykle skomplikowany układ lanc mrożeniowych (rys. 7) tworzy zamkniętą bryłę wokół planowanej wnęki wyjścia ewakuacyjnego.

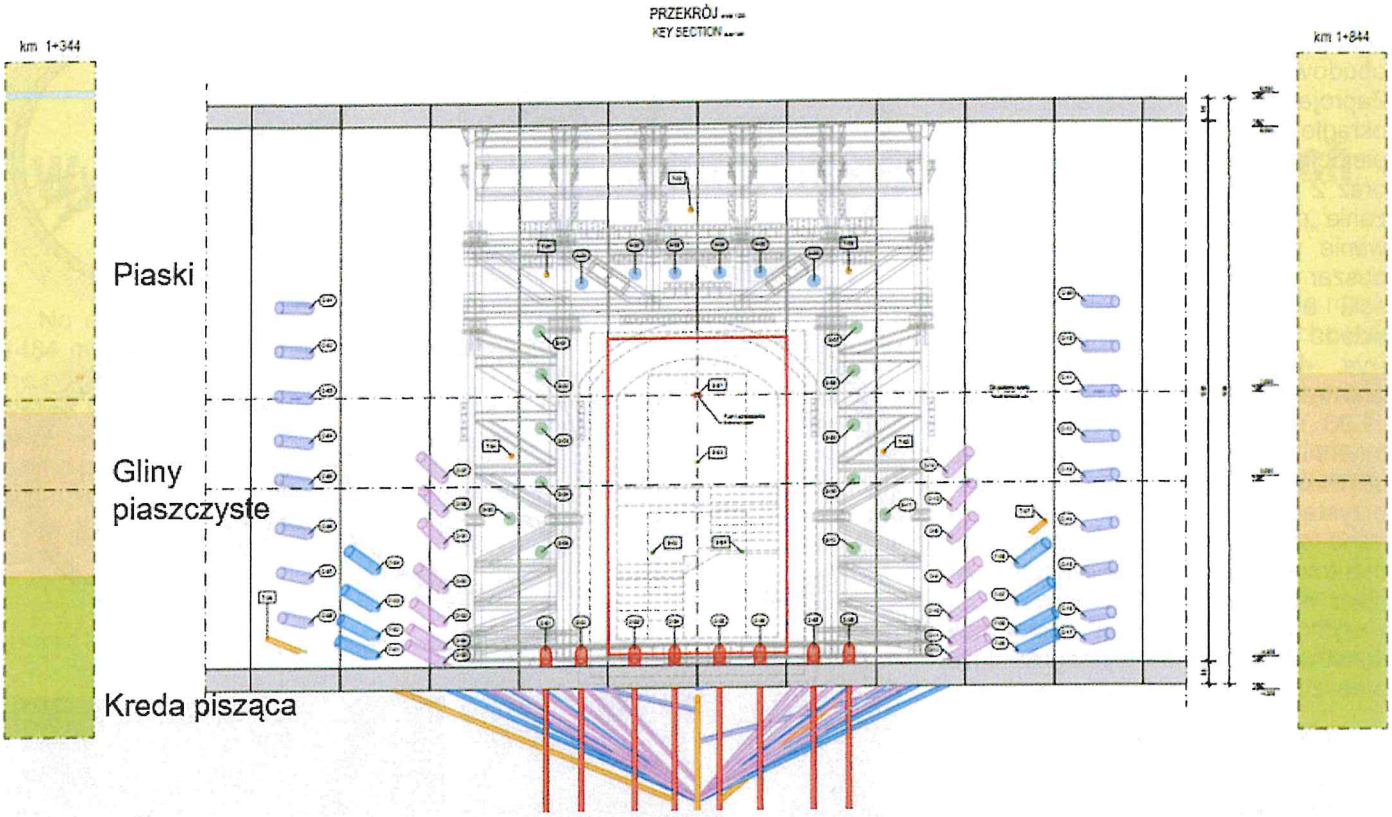
Na technologię zamrażania duży wpływ ma prędkość przepływu wody gruntowej, zasolenie wody oraz warunki geotechniczne. Układ rur zamrażających przechodzi przez 3 główne warstwy geologiczne: piaski, gliny piaszczyste oraz kreda pisząca, ostatecznie determinując czas mrożenia. Wyróżnia się 2 etapy mrożenia: pierwszy dotyczy zamykania ściany lodowej, czyli kolumny zamarzniętego gruntu stały się styczne wokół pojedynczych rur zamrażających. Drugi etap dotyczy uzyskania docelowej grubości zamarzniętej ściany (rys. 8). Na rysunku 9 przedstawiono model 3D obrazujący kolumny zamarzniętego gruntu wokół wyjścia ewakuacyjnego.

Etap II – Wiercenie odwiertów kierunkowych pod lance mrożeniowe

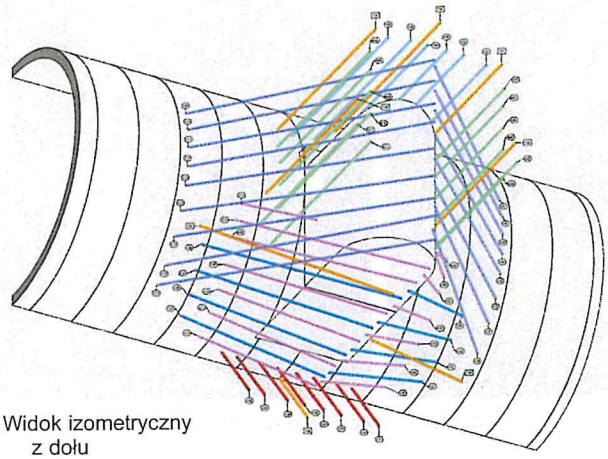
W celu wykonania odwiertów oraz umożliwienia prowadzenia logistyki w tunelu zaprojektowano platformę roboczą, złożoną z demontowanych paneli stalowych oraz ramp z kruszywa (rys. 10).

Podczas projektowania rampy oraz przygotowując się do jej wykonania, przeanalizowano ustawienie wiertnic do każdej grupy odwiertów, biorąc pod uwagę ograniczenia sprzętowe (rys. 11).

Do realizacji skomplikowanego układu odwiertów przewidziano użycie aż trzech różnych wiertnic, zapewniając elastyczność pracy przy każdej z grup odwiertów (rys. 12,

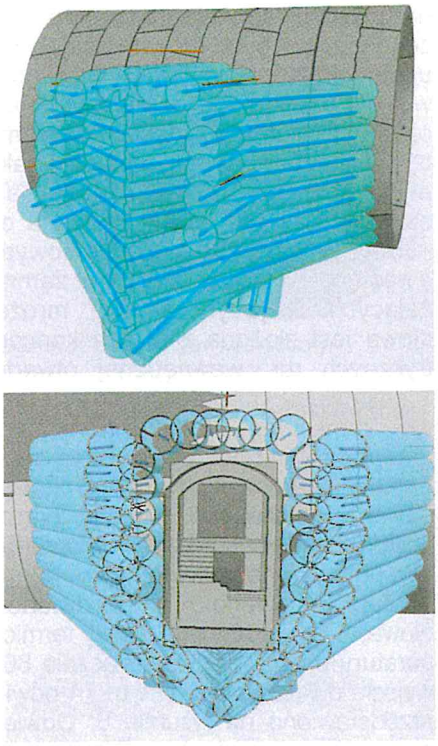


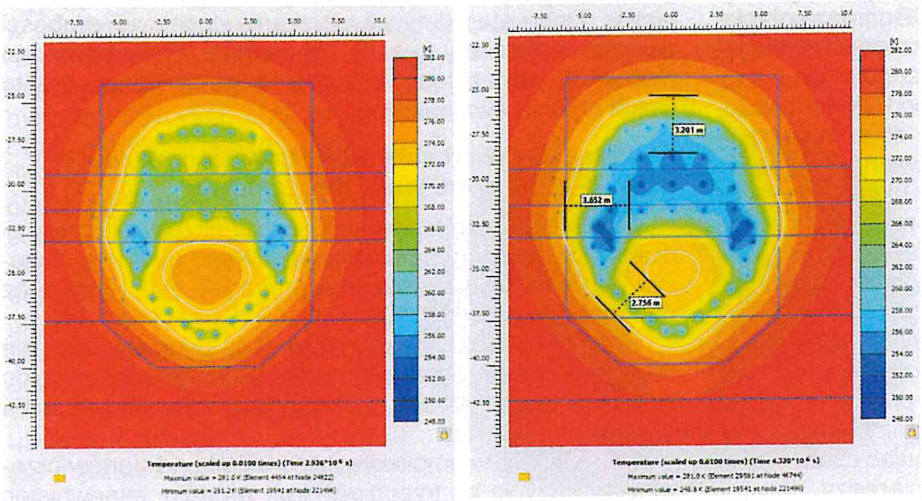
Rys. 6. Przekrój obrazujący układ lanc mrożeniowych



Rys. 7. Widok izometryczny z dołu

Rys. 9. Model obrazujący kolumny zamarzniętego gruntu wokół wnęki wyjścia ewakuacyjnego

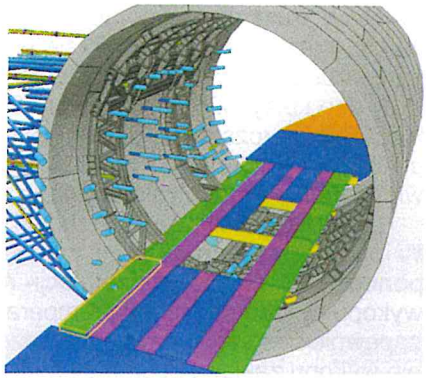




Rys. 8. Profil temperatury etapu I oraz II wraz z grubością ściany lodowej

rys. 13). Wiercenie odbywało się w bliskim sąsiedztwie styków segmentów oraz już wykonanych odwiertów, co wymagało dużej precyzji w celu uniknięcia potencjalnych kolizji. Szczególnie utrudnione było wykonanie odwiertów dolnych w warstwie kredy (rys. 13).

Rys. 10. Model platformy roboczej złożonej z demontowanych paneli stalowych

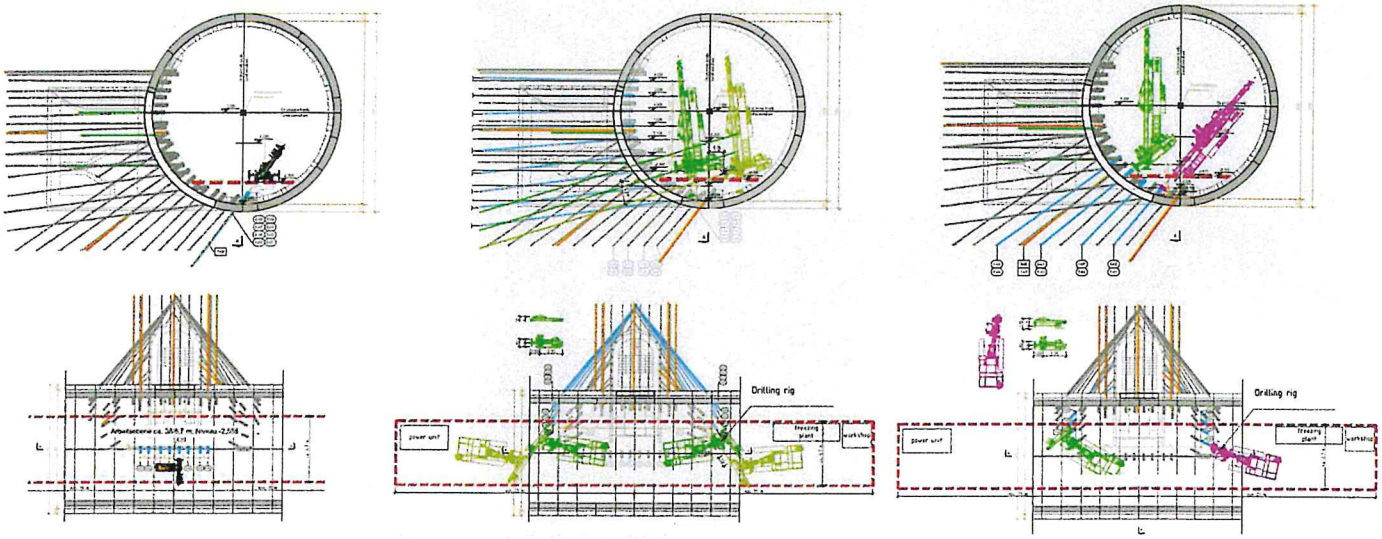


Etap III – Montaż instalacji mrożeniowej oraz rozpoczęcie mrożenia

Przy każdym z wyjść ewakuacyjnych zainstalowano agregat mrożeniowy o mocy około 170 kW (rys. 14) – zbiorniki z solanką. W rdzeniu niszy na rurach drenarskich zainstalowano manometry do pomiaru ciśnienia. Wzrost ciśnienia oznacza zamykanie ściany lodowej, co stanowi zakończenie pierwszego etapu mrożenia. Zaizolowany system aktywnej instalacji mrożeniowej przedstawiono na rysunku 15.

System zamrażający jest utrzymywany w eksploatacji do końca budowy wnęki. Z chwilą przystąpienia do wykonania wykopu zostanie odłączonych 9 lanc mrożeniowych w czole, zaprojektowanych w celu zagwarantowania stabilności czoła wykopu.

Zarówno podczas zamrażania, jak i wykonywania wykopu, należy stale monitorować temperaturę gruntu, w celu sprawdzenia wymaganej grubości i efektywnej temperatury zamarzniętej ściany.

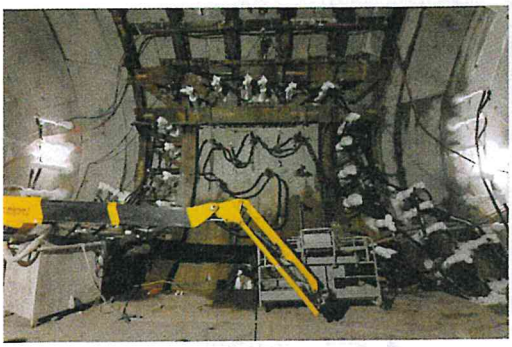


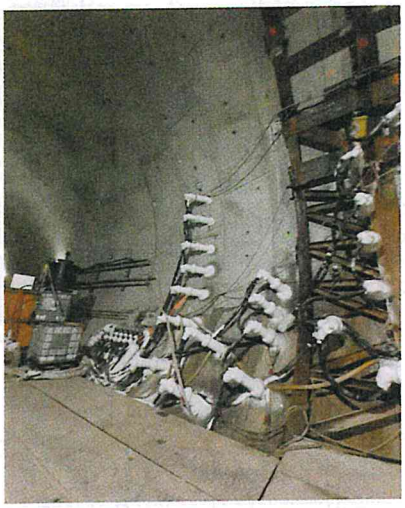
Rys. 11. Ustawienie różnych typów wiertnic do wykonywania odwiertów

Rys. 12. Wykonywanie odwiertów przy użyciu różnych modeli wiertnic

Rys. 13. Wykonywanie odwiertów w dolnej części tunelu

Rys. 14. Agregat instalacji mrożeniowej





Rys. 15. Instalacja mrożeniowa – etap mrożenia aktywnego

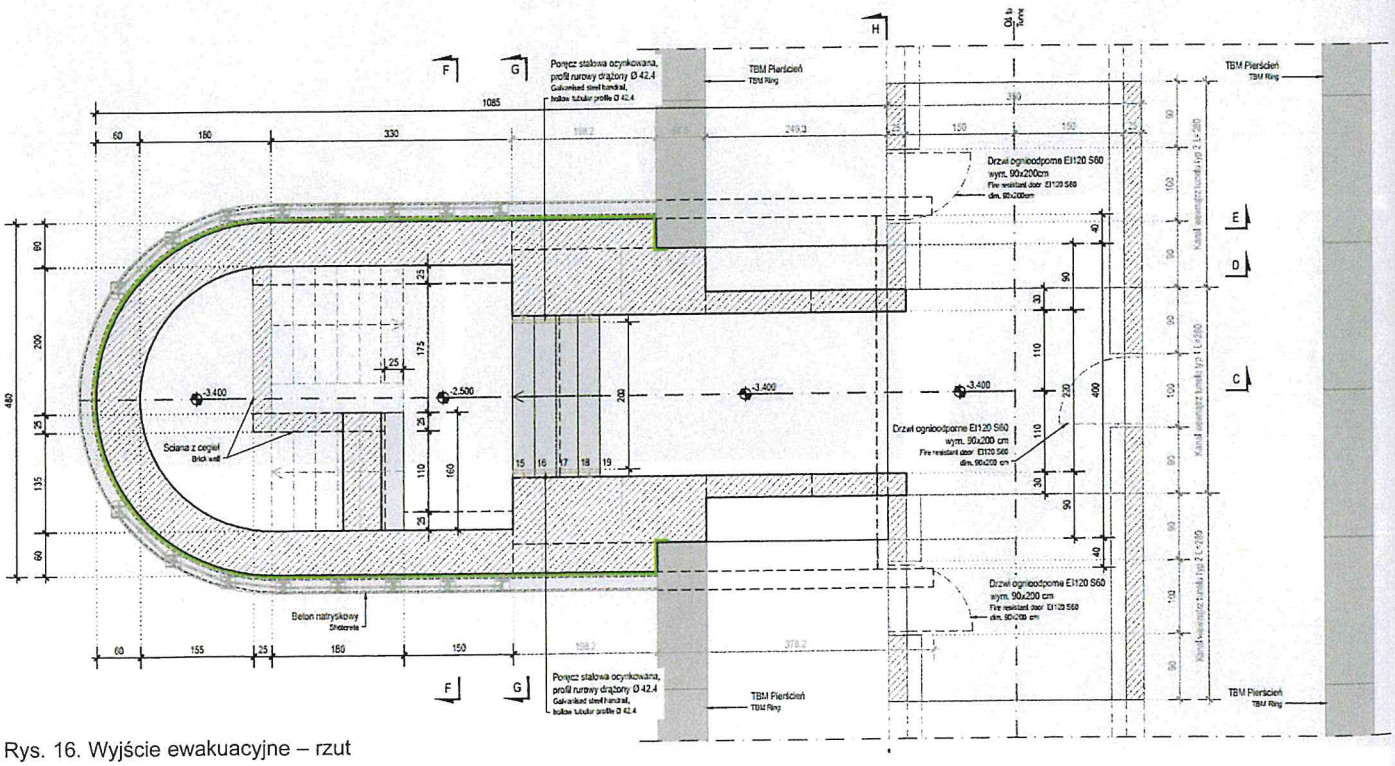
Etap IV – Realizacja konstrukcji wyjścia ewakuacyjnego

Do wykonania konstrukcji wyjścia ewakuacyjnego przewidziano wykop pełnootworowy, który zostanie rozpoczęty wraz z zakończeniem etapu mrożenia aktywnego. Najpierw zostanie zdemontowana obudowa segmentowa tunelu, następnie rozpocznie się urabianie gruntu i wykonanie obudowy wstępnej, składającej się z betonu natryskowego klasy C25/30 grubości 25 cm i stalowych żeber HEB 160 w rozstawie 75 cm, połączonych usztywniającymi prętami zbrojeniowymi Ø25. Na rysunku 16 przedstawiono rzut wyjścia ewakuacyjnego.

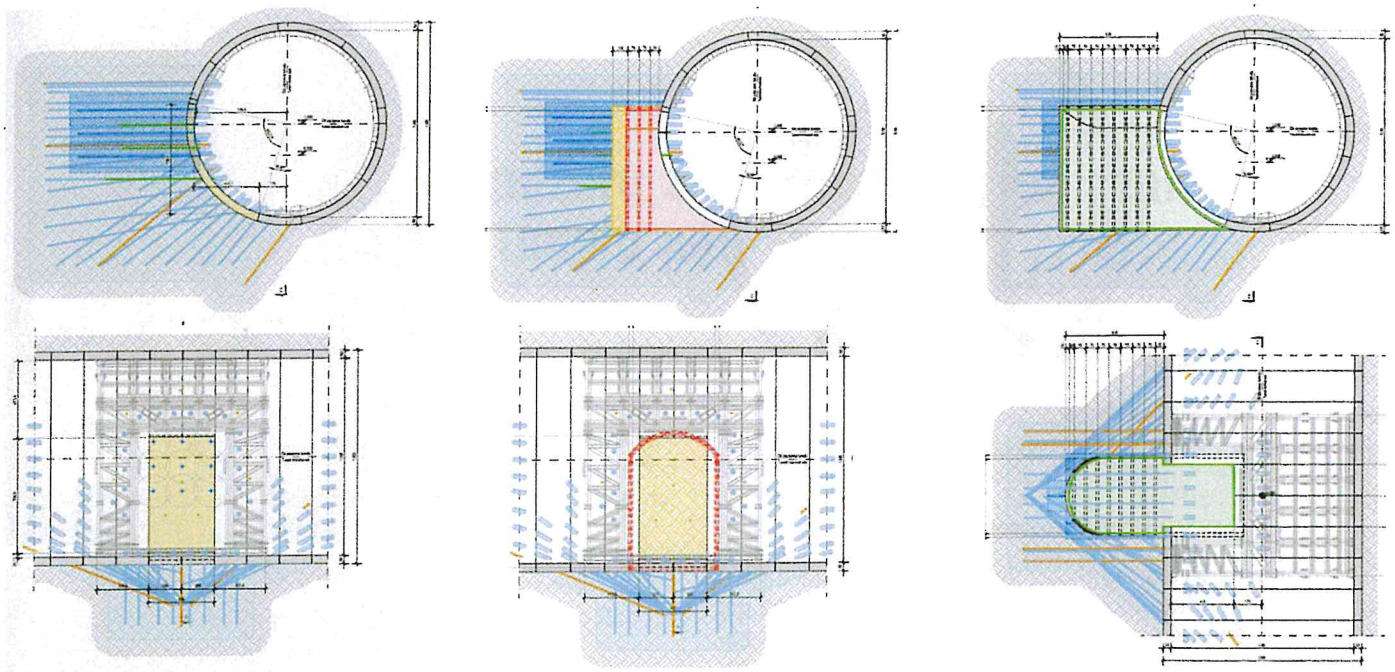
Czas realizacji wykopu został określony na 14 dni. W przypadku komplikacji i przestoju przewidziane jest ponowne podłączenie instalacji mrożeniowej w czole wykopu, w celu utrzymania temperatury poniżej –2°C, aby zapewnić bezpieczeństwo prowadzonych robót. Etapowanie wykopu zakłada postęp o kroku 1 m. Etapy wykonania obudowy wstępnej przedstawiono na rys. 17.

Obudowa docelowa to konstrukcja żelbetowa, zawierająca wewnętrzne konstrukcje wyjścia ewakuacyjnego (rys. 18). Przed rozpoczęciem obudowy docelowej zostanie wykonana membrana hydroizolacyjna. Konstrukcja na zewnątrz tunelu musi być odporna na ciśnienie gruntu i wody. Po wybudowaniu wnęki i bramy wejściowej będą wykonane wewnętrzne konstrukcje wyjść: schody i spoczniki. Brama wejściowa z żelbetowej konstrukcji ramowej zapewni przeniesienie sił z obudowy tunelu. Po uzyskaniu projektowanej wytrzymałości betonu C45/55 można uznać bramę za trwały zamiennik stalowej ramy tymczasowej.

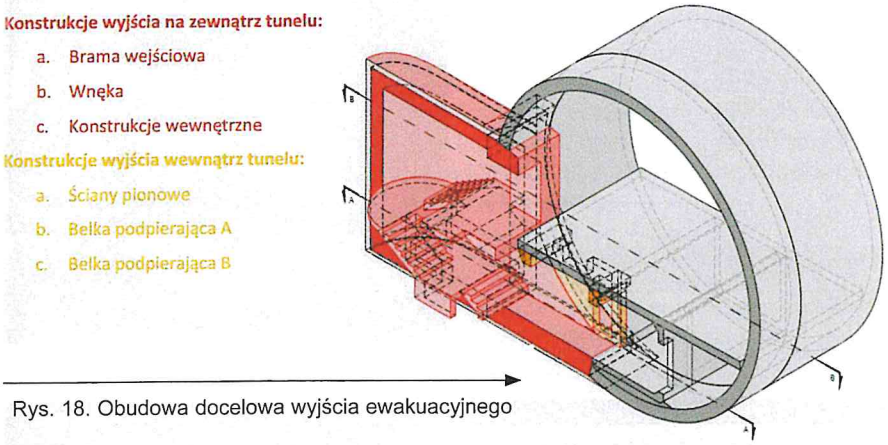
Instalacja mrożeniowa zostanie zdemontowana wraz z zakończeniem etapów wykonania konstrukcji żelbetowej (rys. 19), następnie zostaną zlikwidowane otwory po odwiertach mrożeniowych oraz zdemontowana rama stalowa wraz z rampą najazdową. Na koniec zostanie



Rys. 16. Wyjście ewakuacyjne – rzut



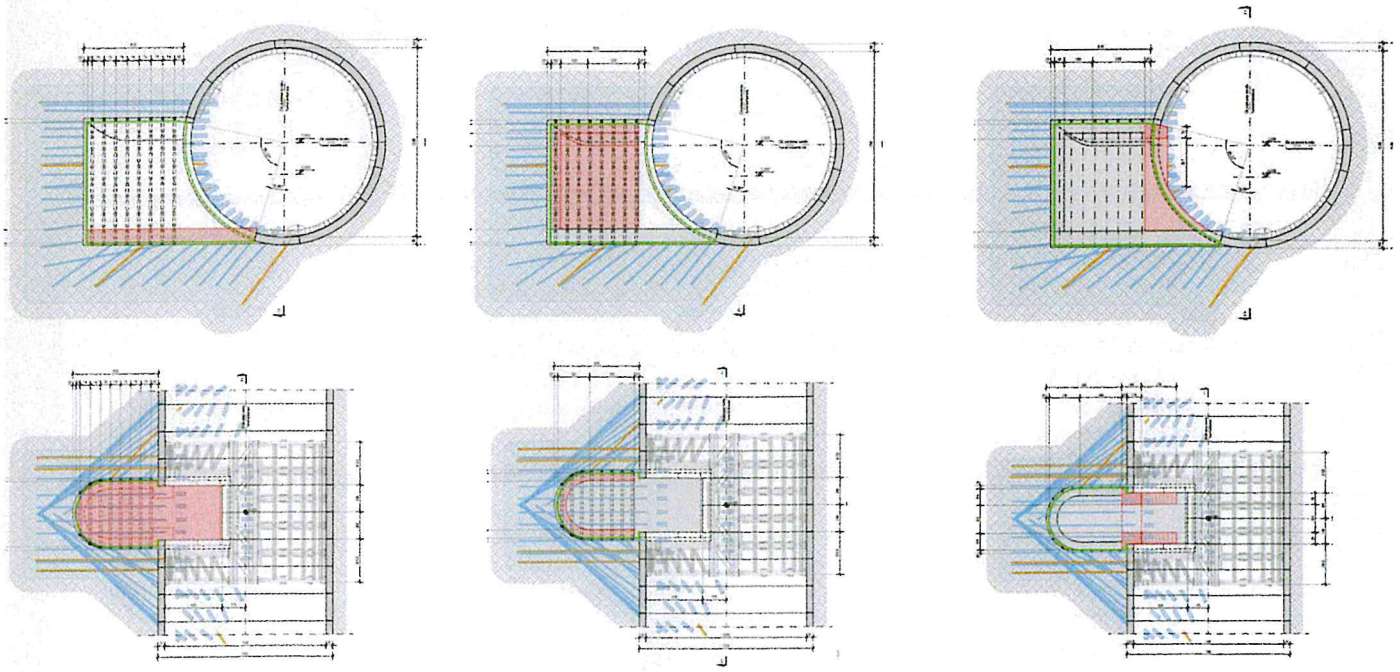
Rys. 17. Etapy wykonania obudowy wstępnej o kroku 1 m



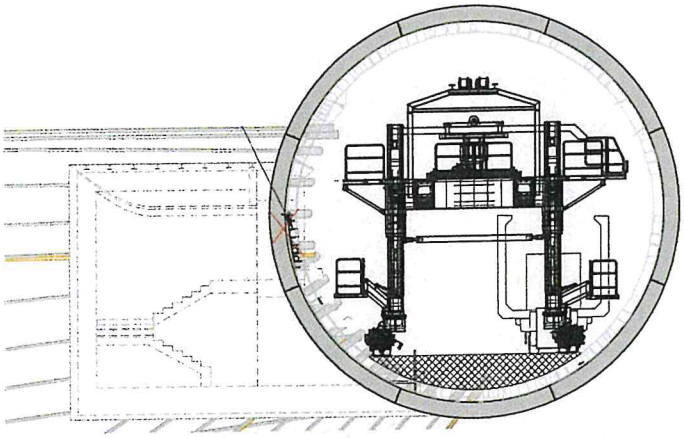
Rys. 18. Obudowa docelowa wyjścia ewakuacyjnego

uzupełniona konstrukcja układu jezdni przy obu wyjściach, tworząc ciągłą galerię ewakuacyjną.

W czasie realizacji całego zadania dużym wyzwaniem jest logistyka prowadzenia robót, wymagająca szczegółowego planowania pod względem harmonogramu, jak i technicznym. Podczas wykonywania wyjść trwały roboty konstrukcyjne w tunelu, transport materiałów budowlanych, przejazd specjalistycznej suwnicy umożliwiającej wykonanie wsporników czy montaż prefabrykatów układu jezdni oraz wentylacji (rys. 20, 21).



Rys. 19. Etapy wykonania obudowy docelowej



Rys. 20. Szkic obrazujący przejazd specjalistycznej suwnicy oraz transport prefabrykatów

Podsumowanie

Wykonanie wyjść ewakuacyjnych na budowie tunelu pod Świną w Świnoujściu jest jednym z najtrudniejszych etapów budowy. Zmienne warunki geologiczne, geometria konstrukcji wyjścia, skomplikowany układ lanc mrożeniowych, ograniczona przestrzeń robocza na każdym z etapów, utrudniona logistyka wpływały na zwiększenie ryzyka wykonania robót. Wszystkie te uwarunkowania oraz zagrożenia wymagały wysokich standardów zarówno w zakresie przygotowania przed rozpoczęciem każdego etapu robót, jak też w zakresie jakości wykonania, bezpieczeństwa prowadzonych prac oraz kontroli technicznej.

PIŚMIENNICTWO

[1] *Cucino P., Luciani A., Lo Faro V.*: Wyjścia ewakuacyjne – Wzmocnienie gruntu, SWS Engineering S.p.A, czerwiec 2021.

[2] *Cucino P., Luciani A., Perbellini A., Lo Faro V.*: Wyjścia ewakuacyjne – Konstrukcja, SWS Engineering S.p.A, czerwiec 2021.

Rys. 21. Przejazd specjalistycznej suwnicy przez obszar wykonywania wyjścia ewakuacyjnego

Zapraszamy na XXII KONFERENCJĘ NAUKOWO-TECHNICZNĄ

KONTRA' 2022

TRWAŁOŚĆ BUDOWLI I OCHRONA PRZED KOROZJĄ

Warszawa-Cedzyna **13-14 października 2022 r.**

KONTAKT: e-mail: kontra@il.pw.edu.pl www.kontra.il.pw.edu.pl

TEMATYKA KONFERENCJI

- odporność materiałów budowlanych na działanie agresywnych czynników zewnętrznych,
- trwałość i ochrona przed korozją konstrukcji żelbetowych, stalowych, drewnianych i murowych,
- trwałość nawierzchni drogowych i mostów,
- modelowanie procesów degradacji materiału i konstrukcji, badania laboratoryjne,
- metody diagnostyki korozyjnej konstrukcji,
- wyroby antykorozyjne, systemy naprawcze, technologie prac antykorozyjnych i metody napraw,
- inne związane z trwałością materiałów i konstrukcji.

WAŻNE DATY

01.06.2022 r. Przesłanie pełnych tekstów artykułów i wniesienie opłaty konferencyjnej

15.09.2022 r. Przesłanie uczestnikom Komunikatu nr 2 z programem konferencji oraz informacji o akceptacji referatów

ORGANIZATOR
Komitet Trwałości Budowli ZG PZITB

WSPÓŁORGANIZATOR
Wydział Inżynierii Lądowej
Politechnika Warszawska

Mgr inż. JACEK KRÓL
Lafrentz Polska Sp. z o.o.

Doświadczenia nadzoru z dotychczasowej realizacji tunelu pod Świną

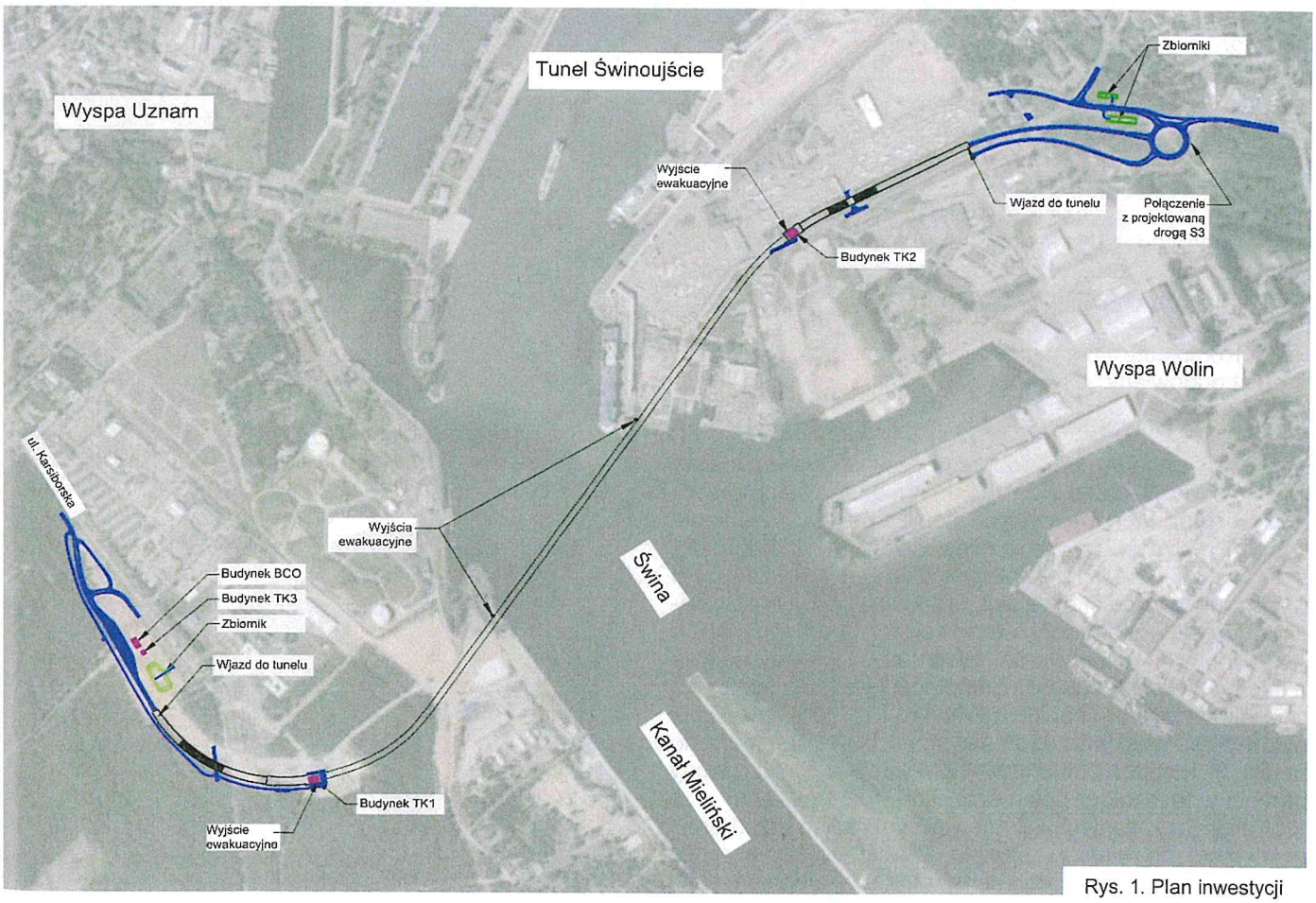
W wyniku postępowania przeprowadzonego w trybie przetargu niegraniczonego na pełnienie nadzoru nad projektowaniem i realizacją robót oraz zarządzanie kontraktem pn. „Usprawnienie połączenia komunikacyjnego pomiędzy wyspami Uznam i Wolin w Świnoujściu – budowa tunelu pod Świną", Inwestor Zastępczy (GDDKiA) dokonał wyboru oferty:

Konsorcjum:
Sweco Polska Sp. z o.o.,
ul. Franklina Roosevelta 22, 60-829 Poznań
Sweco GmbH, Karl-Ferdinand-Braun-Straße 9, 28359 Brema
Lafrentz Polska Sp. z o.o.,
ul. Kamiennogórska 22, 60-179 Poznań

W dniu 17.09.2018 r. została zawarta umowa pomiędzy gminą Miasto Świnoujście a konsorcjum firm Sweco/Lafrentz zwanym dalej Konsultantem, na pełnienie nadzoru oraz zarządzanie kontraktem – budowa tunelu pod Świną. W tym samym dniu została również zawarta umowa pomiędzy gminą Miasto Świnoujście a konsorcjum firm Porr/Gülermak/Energopol Szczecin na zaprojektowanie i wykonanie zadania jak w tytule kontraktu, zwanym dalej Wykonawcą.

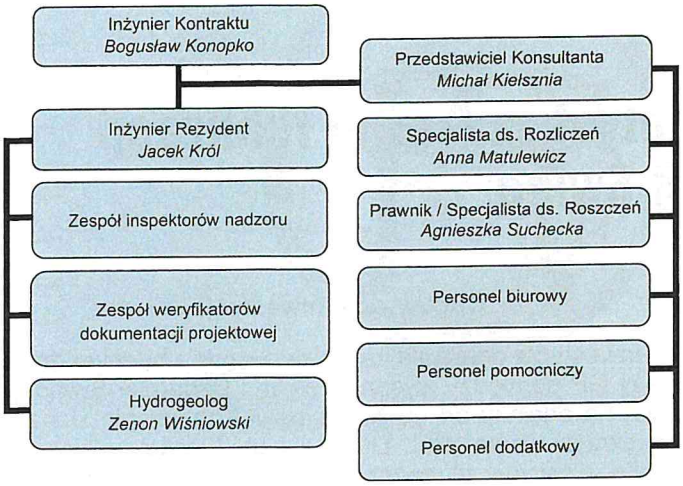
Ogólny opis inwestycji

Inwestycja obejmuje zaprojektowanie i budowę drogi klasy GP pomiędzy wyspami Wolin i Uznam w Świnoujściu, na odcinku od ul. Karsiborskiej na wyspie Uznam do skrzyżowania z ul. Duńską i ul. Fińską na wyspie Wolin, o łącznej długości ok. 3,2 km. Zakres inwestycji obejmuje budowę tunelu drążonego w technologii TBM (ang. Tunnel Boring Machine) pod cieśniną Świną o długości ok. 1484 m, wraz z dojazdami do tunelu w postaci wykopu otwartego i tunelu wykonywanego metodą podstropową na wyspie Uznam oraz na wyspie Wolin. Elementami projektu są również drogi dojazdowe do tunelu, plac manewrowy, skrzyżowanie typu rondo na wyspie Wolin i skrzyżowanie typu T na wyspie Uznam. W zakresie inwestycji jest również przebudowa istniejących przyległych ulic oraz infrastruktury będącej w kolizji z projektowaną inwestycją (rys. 1). Tunel zaprojektowano jako jednonawowy z ruchem dwukierunkowym, w kierunku wschodnim i zachodnim.



Rys. 1. Plan inwestycji

Zespół Konsultanta



Łącznie w pełnienie nadzoru nad projektowaniem i realizacją robót oraz zarządzanie kontraktem zaangażowanych jest około 60 osób personelu Konsultanta.

Etap Projektu budowlanego

Warunki kontraktu definiują pierwszy Kamień Milowy (KM nr 1) – złożenie do właściwego organu administracji publicznej w terminie 10 miesięcy od daty rozpoczęcia (17.09.2018 r.) kompletnego wniosku o ZRID. Kamień Milowy nr 1 został przez Wykonawcę osiągnięty i wniosek został złożony dokładnie w dniu 17.07.2019 r. wraz z kompletem dokumentów, zgodnie z wymaganiami Ustawy z dnia 10 kwietnia 2003 r. o szczególnych zasadach przygotowania i realizacji inwestycji w zakresie dróg publicznych. W okresie od daty zawarcia umowy z Wykonawcą, tj. 17.09.2018 r., praktycznie do dnia złożenia wniosku, odbywały się konsultacje Wykonawcy z Zespołem Inżyniera Kontraktu, uzgodnienia z Inwestorem Zastępczym (GDDKiA) i Zamawiającym oraz miała miejsce ostateczna weryfikacja wszystkich wymaganych dokumentów koniecznych do uzyskania ZRID przez Zespół Konsultanta. Kompletny wniosek zawierał 13 załączników, w tym Projekt budowlany.

Przygotowanie terenu budowy

Poza standardowymi robotami przygotowawczymi na terenie budowy, przed przystąpieniem do realizacji zasadniczych robót konstrukcyjnych konieczne było usunięcie kolizji. Po stronie Uznam w miejscu realizowanej komory startowej TBM nie występowały kolizje z infrastrukturą. Po wykonaniu wycinek i niwelacji terenu wykonawca przystąpił do realizacji komory startowej w technologii ścian szczelinowych. Po stronie Wolin występowały kolizje z uzbrojeniem terenu, w szczególności kolizja z istniejącą linią napowietrzną i kablową WN 110 kV, której usunięcie było najtrudniejszym zadaniem przed przystąpieniem do realizacji komory odbiorczej TBM oraz odcinka rampy i tunelu w technologii ścian szczelinowych (rys. 2).

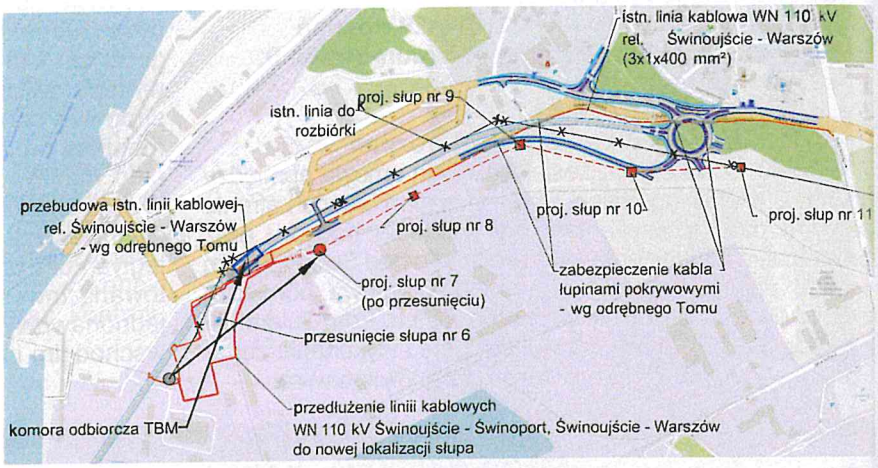
Kolejnym zadaniem wykonawcy, tym razem przed przystąpieniem do wiercenia tunelu TBM, była konieczność sprawdzenia i oczyszczenia terenu budowy z przedmiotów wybuchowych i niebezpiecznych pochodzenia wojskowego. Sprawdzeniu podlegało również dno Świny (rys. 3).

Oczyszczenia dokonała firma SeaTerra w dniach od 26.11.2020 do 11.12.2020 na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań magnetometrycznych, które wykazały 111 potencjalnie niebezpiecznych przedmiotów w dnie Świny (rys. 4 i 5).

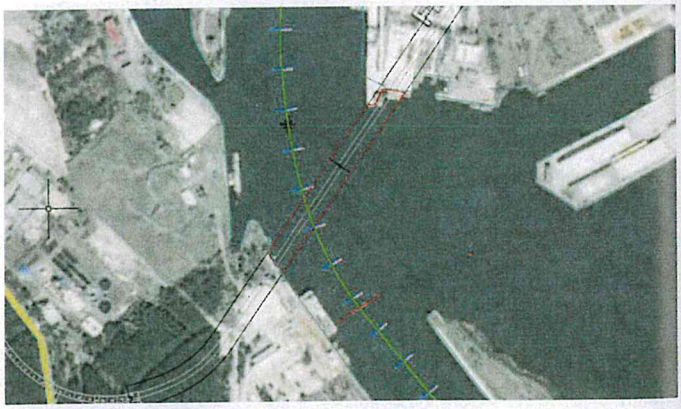
Operacja sprawdzenia i oczyszczenia dna Świny zakończona została sprawdzeniem 111 obiektów i w części ich wydobyciem oraz wystawieniem odpowiedniego certyfikatu przez podwykonawcę, firmę SeaTerra. Wyniki sprawdzenia i oczyszczenia przedstawiono w tabl. 1.

Tymczasowe obiekty

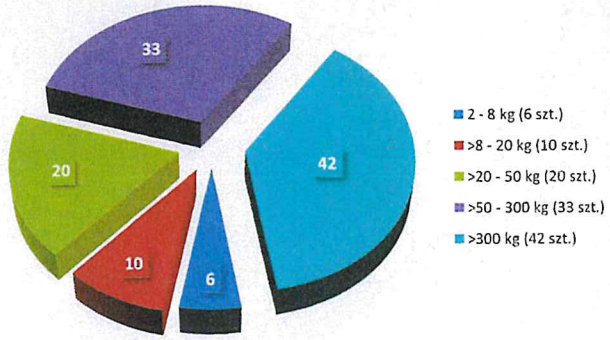
Na terenie budowy po stronie Uznam, w pobliżu komory startowej TBM wykonawca zlokalizował i wybudował tymczasowe obiekty budowlane, m.in. węzeł betoniarski oraz zakład prefabrykacji segmentów obudowy tunelu



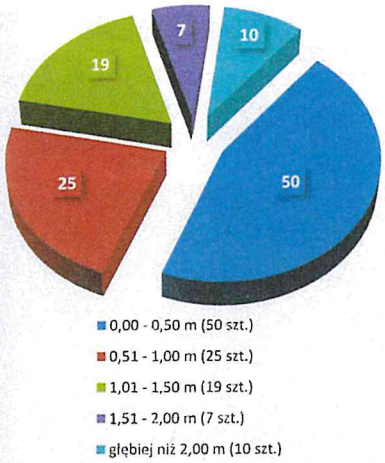
Rys. 2. Przebudowa linii kablowej i napowietrznej WN 110 kV



Rys. 3. Obszar objęty badaniami magnetometrycznymi w dnie Świny



Rys. 4. Obiekty potencjalnie niebezpieczne wg obliczonej masy ferromagnetycznej



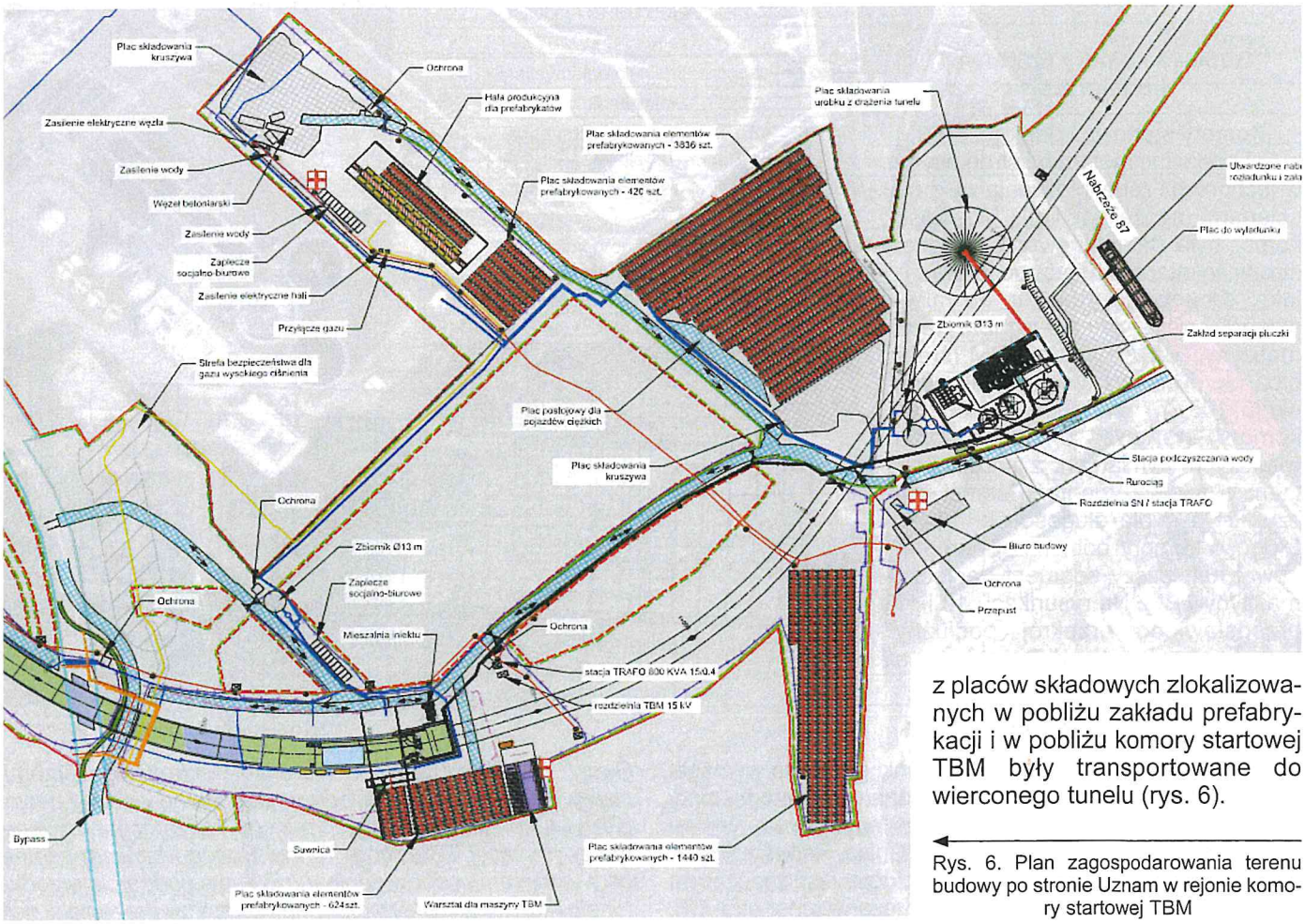
Rys. 5. Obiekty potencjalnie niebezpieczne wg obliczonej głębokości zalegania od dna, w [m]

oraz elementów na konstrukcje wewnętrzne docelowe w tunelu TBM. Wybór lokalizacji tych obiektów po stronie Uznam wiązał się oczywiście z kierunkiem wiercenia tunelu TBM od komory startowej zlokalizowanej właśnie na wyspie Uznam do komory odbiorczej zlokalizowanej na wyspie Wolin. Podstawowy materiał do obudowy wierconego tunelu to segmenty obudowy, które bezpośrednio

Tablica 1

Wyniki sprawdzenia 111 obiektów potencjalnie niebezpiecznych

Poz.	Liczba	Target identification / Identyfikacja obiektu	Location / Lokalizacja	Status
a	0	Explosive and hazardous objects of military origin as follows / Przedmioty wybuchowe i niebezpieczne pochodzenia wojskowego	handoverand removed by Navy/Army / przekazane Marynarce Wojennej/Wojsku	clear / czysto
b	86	Ferrous objects which have not constituted explosive nor hazardous objects of military origin / Przedmioty ferromagnetyczne niebędące przedmiotami wybuchowymi i niebezpiecznymi pochodzenia wojskowego	removed, disposed and/ or cleared by Sea Terra / wydobyte, usunięte i/lub oczyszczone przez Sea Terra	clear / czysto
c	0	Ferrous boulders, which have not constituted explosive nor hazardous objects of military origin / Ferromagnetyczne głazy, niezawierające materiałów wybuchowych oraz materiałów niebezpiecznych pochodzenia wojskowego	removed, disposed and cleared by Sea Terra / wydobyte, usunięte i oczyszczone przez Sea Terra	clear / czysto
d	9	Locations where only small parts of corroded object was found are clear and free of hazardous objects of military origin / Miejsca, w których znaleziono tylko małe części skorodowanego obiektu, są oczyszczone i wolne od niebezpiecznych przedmiotów pochodzenia wojskowego	nothing recovered / nic nie wydobyto	clear / czysto
e	16	Locations with strong signal below artificial river's fortification / Lokalizacje z silnym sygnałem poniżej sztucznych umocnień rzecznych	in situ / na miejscu	unknown / nieznany
g	0	Other targets (oversized, pier construction, lost non UXO targets) / Inne obiekty (za duże, konstrukcja nabrzeża, utracone obiekty niebędące niewybuchami)	in situ / na miejscu	clear / czysto



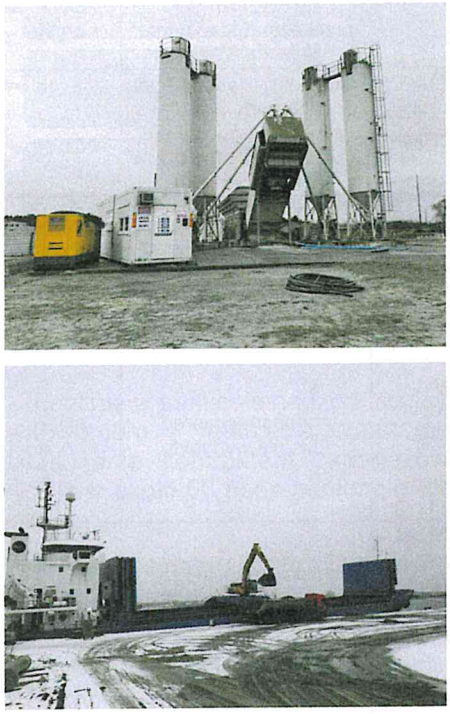
z placów składowych zlokalizowanych w pobliżu zakładu prefabrykacji i w pobliżu komory startowej TBM były transportowane do wierconego tunelu (rys. 6).

Rys. 6. Plan zagospodarowania terenu budowy po stronie Uznam w rejonie komory startowej TBM

W związku z lokalizacją węzła betoniarskiego i zakładu prefabrykacji po stronie Uznam uzasadniony był transport kruszyw do produkcji betonu drogą wodną. Na poniższych zdjęciach (rys. 7÷9) przedstawiono tymczasowe obiekty budowlane oraz sposób dostawy kruszywa.

W odniesieniu do Wymagań Zamawiającego – PFU rozdział 1.6.3 – Tunel drążony TBM:

Tunel łączący wyspę Uznam z wyspą Wolin wykonać przy wykorzystaniu zmechanizowanej metody budowy tuneli. Drążenie należy rozpocząć od zachodniego brzegu cieśniny Świny tj. wyspy Uznam w kierunku wschodniego brzegu, czyli wyspy Wolin. Ze względu na napotkane warunki geologiczne tunel należy wydrążyć przy użyciu zmechanizowanej tarczy drążącej TBM (ang. Tunnel Boring Machine) zdolnej do wytworzenia odpowiedniego ciśnienia podparcia przodka tunelu. Maszyna TBM rozpocznie i zakończy drążenie w por-



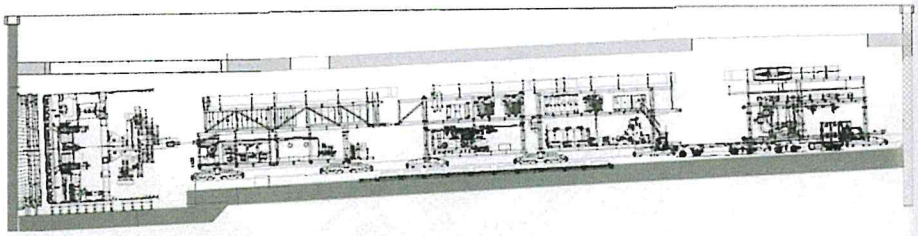
Rys. 7. Węzeł betoniarski i transport kruszywa drogą wodną

Rys. 8. Zakład prefabrykacji – produkcja segmentów obudowy tunelu TBM

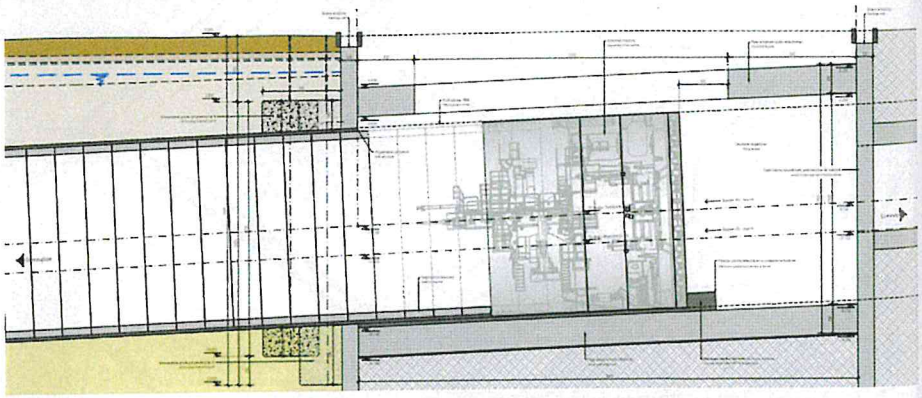
Rys. 9. Zakład prefabrykacji – produkcja prefabrykatów na konstrukcje wewnętrzne w tunelu TBM

Budowa komory startowej i odbiorczej

Komory startowa i odbiorcza TBM były budowane metodami stropowymi w technologii zabezpieczenia wykopu ścianami szczelinowymi. Wielkość komór była determinowana z jednej strony wymiarami tunelu docelowego jako drogowego obiektu inżynierskiego, a z drugiej gabarytami maszyny TBM. Wymiary TBM (średnica ok. 13,5 m i długość całkowita około 105 m) wymagały wykonania komory startowej o odpowiednio większych wymiarach, z przegłębieniem w miejscu montażu samej tarczy, która miała długość ok. 14 m. Długość komory odbiorczej determinował najdłuższy segment zaplecza maszyny TBM. Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono przekrój podłużny komory startowej i odbiorczej, a na rys. 12 komory w fazie realizacji.



Rys. 10. Przekrój podłużny komory startowej TBM



Rys. 11. Przekrój podłużny komory odbiorczej TBM

Maszyna TBM

Zamawiający ze względu na warunki gruntowe wymagał zastosowania tarczy płuczkowej z podparciem przodka przy pomocy zawiesiny bentonitowej. Wykonawca wybrał dostawcę maszyny – firmę CREG (China Railway Engineering Equipment Group Co., Ltd.), która jest znaczącym światowym producentem maszyn do drążenia tuneli (rys. 13).

Rys. 12. Komora startowa i odbiorcza TBM w fazie realizacji

Średnica wyrobiska 13,43 m
ZMECHANIZOWANA TARCZA PŁUCZKOWA CTS13400E-4200

Rys. 13. Dobrana maszyna TBM

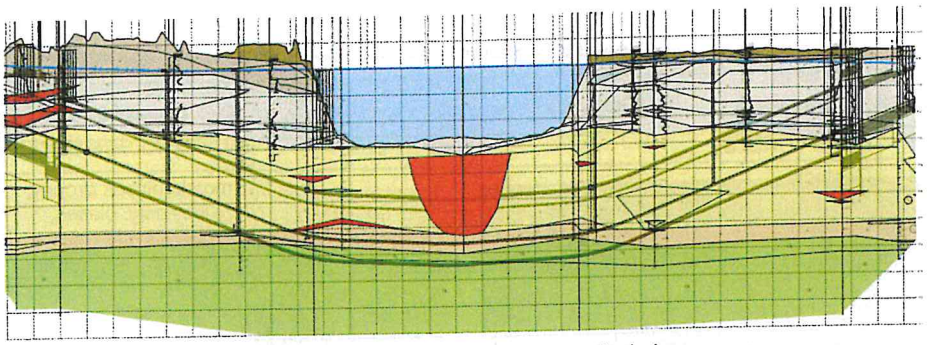
Tablica 2
Podstawowe dane maszyny TBM

Lp.	Opis	Jednostka	Specyfikacja
1	DANE TUNELU		
2	Geologia		morski piasek drobny, ił pylasty, piasek, ił piaszczysty i sporadycznie żwir, kreda
3	Profil trasy tunelu		
4	Długość tunelu	m	1483
5	Minimalny promień krzywizny w poziomie	m	300
6	Minimalny promień krzywizny w pionie	m	4000
7	Maks. gradient profilu trasy w górę		0,04
8	Maks. gradient profilu trasy w dół		0,04
9	Maks. nadkład	m	26
10	Maks. poziom wód gruntowych powyżej korony tunelu	m	25
11	Szyb startowy		
12	Wymiary		min.: wys. 16 m × dł. 105 m
13	Szyb odbiorczy		
14	Wymiary		min.: 26 m × 16 m
15	Dane dotyczące obudowy segmentowej		
16	Typ pierścienia		8 segmentów + 0 wpustów
17	Średnica zewnętrzna	mm	13 000
18	Średnica wewnętrzna	mm	12 000
19	Grubość segmentu	mm	500
20	Długość segmentu	mm	2000 i 1500
21	Produkcja TBM		CREG
22	OGÓLNA SPECYFIKACJA TECHNICZNA		
23	Typ TBM		tarcza płuczkowa
24	Maksymalne ciśnienie robocze (na osi)	bar	4,5
25	Dane eksploatacyjne		
26	Teoretyczna prędkość posuwu	mm/min	60
27	Min. promień krzywizny (TBM + rezerwa) w poziomie	m	250
28	Min. promień krzywizny (TBM + rezerwa) pionowo w górę	m	400
29	Minimalny promień krzywizny (TBM + rezerwa) pionowo w dół	m	400
30	Wymiary maszyny do drążenia tuneli		
31	Długość całkowita	m	około 105
32	Masa całkowita TBM	t	około 2740
33	Masa tarczy	t	około 1700
34	Masa układu rezerwowego	t	około 1040
35	Długość TBM		
36	GŁOWICA SKRAWAJĄCA		
37	Średnica cięcia	mm	13 460
38	Likwidacja pustki za obudową segmentową – zaczyn 2-składnikowy do iniekcji pierwotnej		dwuskładnikowy
39	Objętość teoretyczna	m^3	dla pierścienia 2,0 m = 19,12 m^3 dla pierścienia 1,5 m = 14,34 m^3
40	Moc zainstalowana łącznie	kW	7174,2

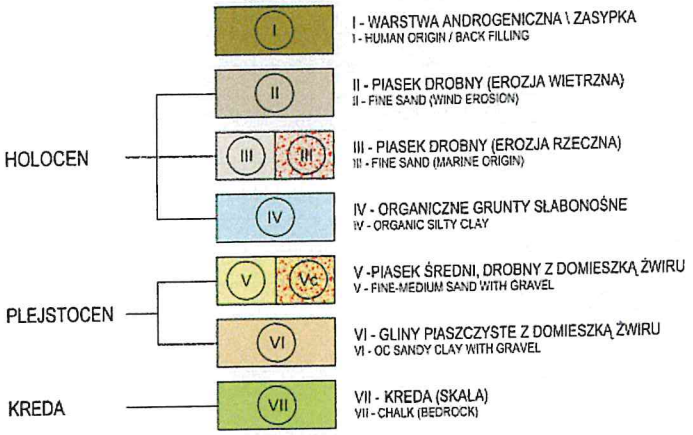
talu odpowiednio początkowym i końcowym. Należy zastosować tarczę drążącą z podparciem przodka tunelu przy wykorzystaniu zawiesiny iłowej (ang. Slurry Shield). W tablicy 2 przedstawiono podstawowe dane maszyny TBM dobranej zgodnie z Wymaganiami Zamawiającego.

Drążenie tunelu

Trasa tunelu przecina drobny i drobnoziarnisty piasek ze żwirem po stronach Uznam i Wolin, natomiast pod cieśniną Świną znajdują się główne złoża piasku drobnoziarnistego ze żwirem, piaszczysta glina prekonsolidowana ze żwirem i kredą piszącą (rys. 14 i 15).



Rys. 14 Przekrój podłużny tunelu – geotechniczny



Rys. 15 Przekrój podłużny tunelu – geotechniczny – legenda

Obudowę tunelu stanowią dwa typy pierścieni: dla pierwszej części trasy typ C o minimalnym promieniu 300 m, na pozostałym odcinku typ S o minimalnym promieniu 500 m (tabl. 3).

Długości pierścieni wynoszą odpowiednio 1,5 i 2,0 metry; optymalne wartości zbieżności dla obu trapezowych pierścieni uniwersalnych zostały określone na podstawie wyników analizy trasy w planie i profilu oraz parametrów maszyny TBM i wynoszą odpowiednio 80 i 65 milimetrów. Na przekroju (rys. 16) pokazano pierścień obudowy składający się z 8 segmentów oraz konstrukcję wewnętrzną docelową w tunelu, a także zestawiono parametry geometryczne pierścienia.

Parametry geometryczne pierścienia:

- Średnica zewnętrzna = 13 m
- Średnica wewnętrzna = 12 m
- Grubość = 0,5 m
- Długość = 1,5 m (typ C) / 2,0 m (typ S)

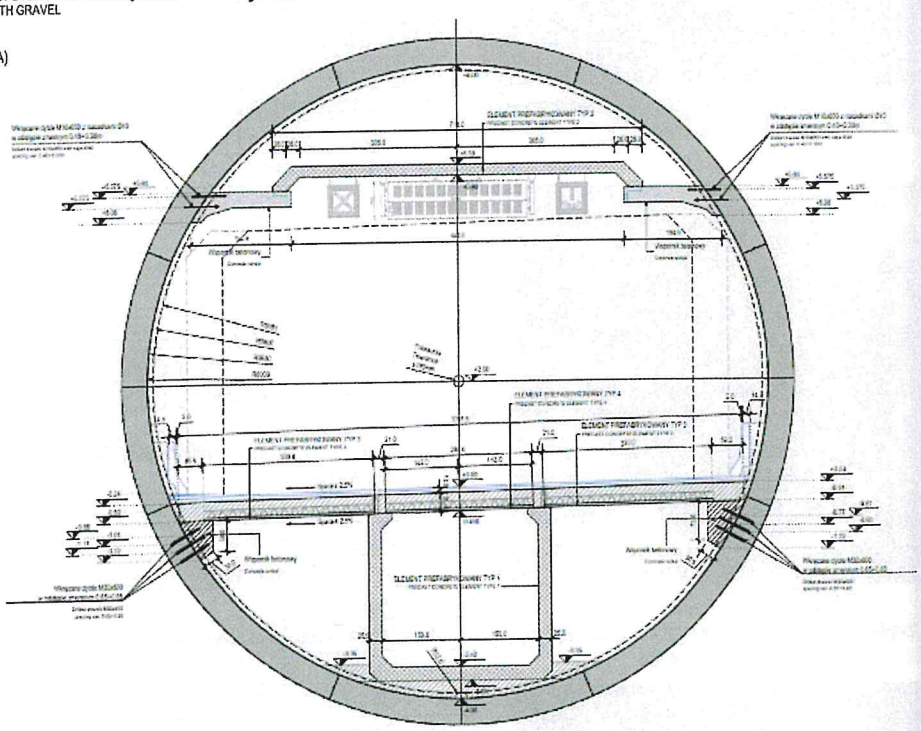
Tablica 3

Zastosowanie typu pierścienia wzdłuż przebiegu trasy

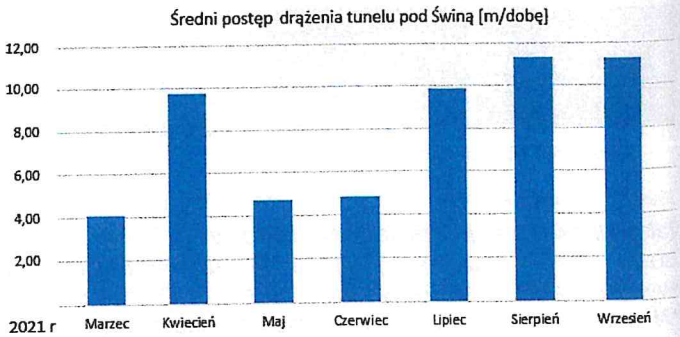
Typ pierścienia	Minimalny promień trasy	Początek odcinka	Koniec odcinka
Typ C (L=1,5 m)	300 m	0+848.51	1+103.03
Typ S (L=2,0 m)	500 m	1+103.03	2+332.29

- Fazowanie = 80 mm (typ C) / 65 mm (typ S)
- Liczba segmentów = 8 + 0
- Liczba złączy = 24
- Kąt segmentu (αs) = 45°
- Kąt złącza (αc) = 15°

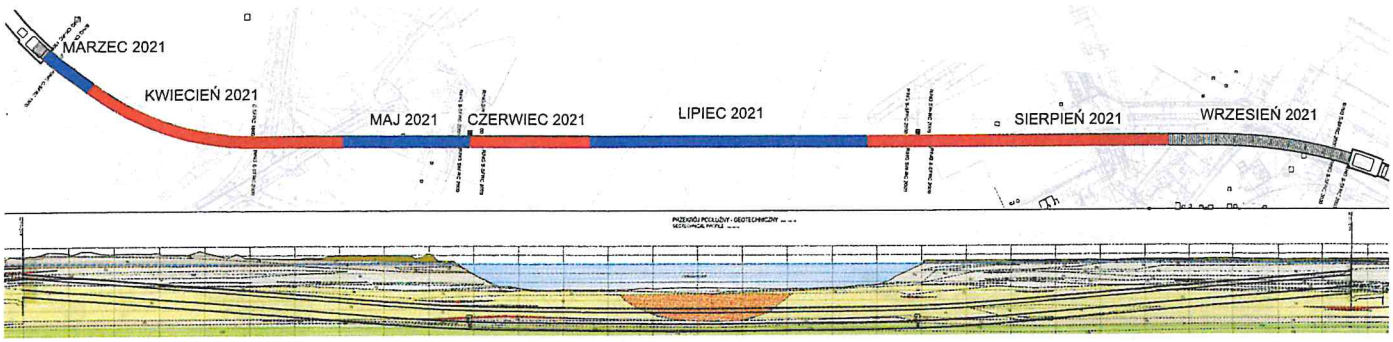
Postęp drążenia w poszczególnych miesiącach przedstawiono na wykresie (rys. 17), natomiast wykonany w poszczególnych miesiącach – na planie tunelu (rys. 18). Drążenie tunelu rozpoczęto 13 marca 2021 r., w marcu 2021 r. wykonano 73 metry tunelu w ciągu 19 dni, co daje średni postęp wiercenia na dobę ok. 3,8 m; okres ten obejmuje fazę wprowadzania maszyny w grunt. W początkowej fazie wiercenia tunelu dokonano również przeglądu narzędzi urabiających po pokonaniu ściany szczelinowej komory startowej. Na początku maja 2021 r. maszyna osiągnęła warstwy kredy i średni postęp drążenia spadł dwukrotnie w maju i czerwcu. Po doposażeniu systemu separacji zawiesiny w dodatkowe wirówki i uruchomieniu odstawy części urobku w postaci szlamu na pole refulacyjne, postęp wzrósł do ok. 10 m/dobę i utrzymał się do końca wiercenia, tj. do 19 września 2021 r.



Rys. 16. Przekrój poprzeczny tunelu TBM z konstrukcją wewnętrzną



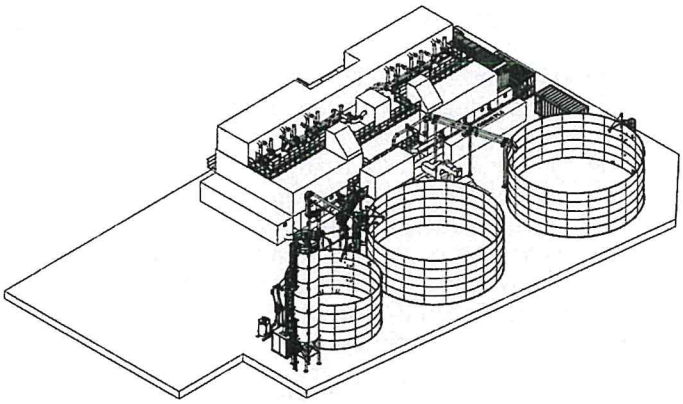
Rys. 17. Postęp wiercenia w poszczególnych miesiącach



Rys. 18. Trasa tunelu w planie i profilu

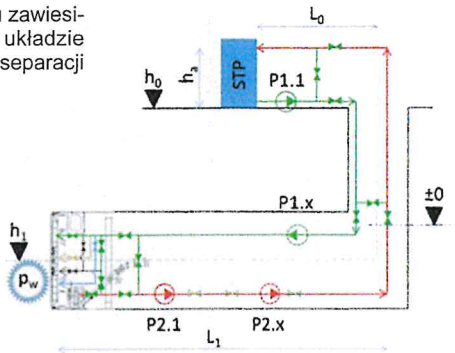
Separacja zawiesiny (urobku)

Całkowita ilość urobku wydobytego w fazie drążenia tunelu TBM wyniosła ok. 210 tys. m^3. Zastosowana tarcza płuczkowa (zawiesinowa) wymagała systemu odseparowania urobku od zawiesiny bentonitowej w celu ponownego jej wykorzystania przy ewentualnym wzbogacaniu jej w związku z normalnymi ubytkami w cyklu drążenia tunelu. Zastosowano stację separacji MAB 3000 firmy SCHAUENBURG MAB GMBH (rys. 19). Rurociągi zasilające tarczę w zawiesinę bentonitową i odprowadzające zawiesinę z urobkiem miały średnicę wewnętrzną 500 mm (rys. 20). Stacja separacji MAB 300 z 6-etapowym procesem oczyszczania (tabl. 4), miała łączną wydajność oddzielania urobku od zawiesiny bentonitowej powracającej z TBM 2800 m^3/h i mogła odseparować do 800 t/h składników stałych. Gwarantowało to uzyskanie maksymalnego postępu w fazie wiercenia do 60 mm/min. W momencie osiągnięcia warstw kredy w czasie drążenia tunelu TBM konieczne było uzupełnienie systemu o dodatkowe wirówki. Część urobku w postaci szlamu powstałego w procesie separacji zawiesiny transportowano na pole refulacyjne barkami z załadunkiem koparkami na nabrzeżu portowym przy stacji separacji (rys. 20a).



Rys. 19. Widok przestrzenny stacji separacji zawiesiny bentonitowej MAB 3000

Rys. 20. System obiegu zawiesiny bentonitowej w układzie maszyna TBM – stacja separacji STP



Tablica 4

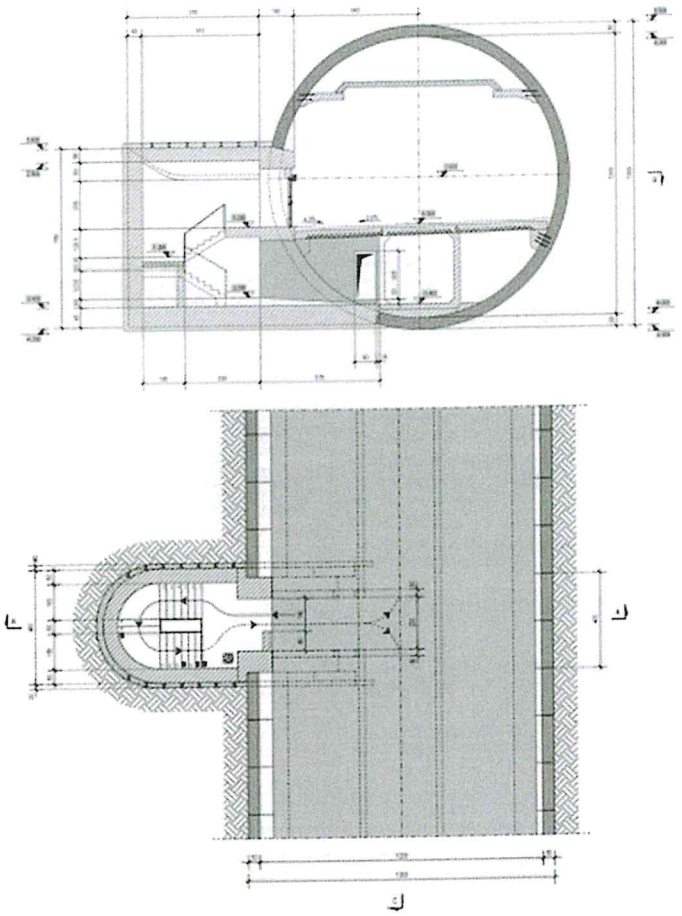
Etapy procesu separacji zawiesiny bentonitowej

Wstępna klasyfikacja	Punkt odcięcia: 10 mm
Sito klasyfikacyjne	Punkt odcięcia: 2,5 mm
Etapy pierwotnego hydrocyklonu	Punkt odcięcia D_{50}: ok. 80 µm
Etapy wtórnego hydrocyklonu	Punkt odcięcia D_{50}: ok. 20–25 µm
Przesiewacz odwadniający dla głównego i wtórnego etapu hydrocyklonu	
Separacja najdrobniejszych frakcji w wirówce	Wirówka o wydajności 25 t/h składników stałych. W czasie przechodzenia przez warstwy kredy system uzupełniono o dwie dotykowe wirówki.

Rys. 20a. Transport szlamu na pole refulacyjne w czasie przechodzenia TBM przez warstwy kredy

Wyjścia ewakuacyjne w tunelu TBM

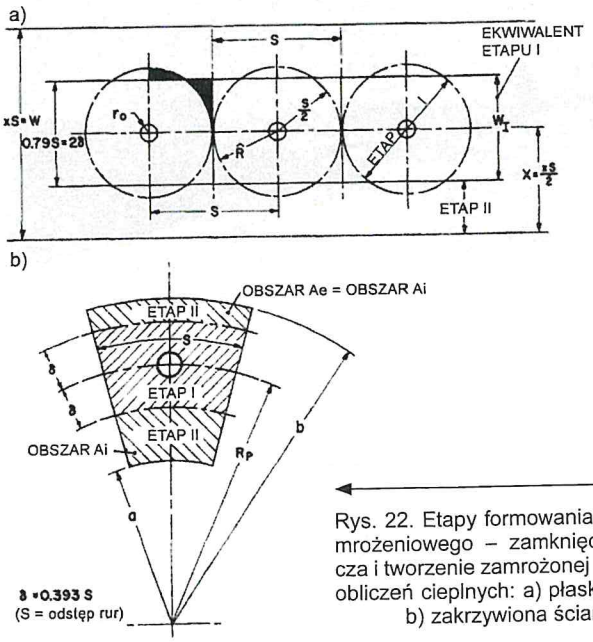
Zaprojektowano dwa wyjścia ewakuacyjne w km 1+344 i km 1+844 trasy tunelu TBM. Odległość między wyjściami będzie wynosiła 500 m. Dodatkowo zaprojektowano wyjścia ewakuacyjne w komorze startowej i odbiorczej w postaci klatek schodowych, łączące galerię ewakuacyjną znajdującą się pod jezdnią w tunelu TBM z powierzchnią terenu (rys. 21). Do klatek schodowych zapewniony będzie również dostęp z poziomu drogi. W celu wykonania wnęki w gruncie do realizacji wyjść ewakuacyjnych w tunelu TBM należy przebić się przez obudowę segmentową, wykonać wykop oraz obudowę wstępną z torkretu i docelową żelbetową. W miejscu projektowanych wyjść wewnątrz w tunelu TBM została zamontowana tymczasowa rama stalowa wzmacniająca obudowę segmentową na czas realizacji wyjść. Do wzmocnienia gruntu zastosowano technologię sztucznego zamrażania skał. Obudowa wstępna składa się z warstwy betonu natryskowego gr. 20 cm i stalowych żeber HEB



Rys. 21. Wyjście ewakuacyjne – rzut i przekrój

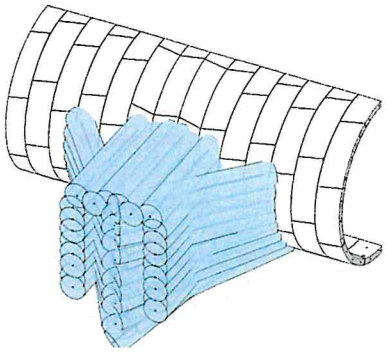
160 w rozstawie 0,75 m. Obudowa docelowa jest wykonana z betonu zbrojonego na miejscu (rys. 21).

W celu bezpiecznego wykonania wyjść zastosowano metodę zamrażania gruntu [1], aby zabezpieczyć wykop w fazie realizacji obudowy wstępnej i ostatecznej oraz połączyć konstrukcję wyjść z obudową segmentową tunelu TBM. Na rysunkach poniżej przedstawiono zasadę mrożenia gruntu, formowanie płaszcza mrożeniowego (rys. 22) oraz ułożenie w przestrzeni kolumn mrożeniowych do uzyskania szczelnego płaszcza wokół konstrukcji wyjścia (rys. 23).

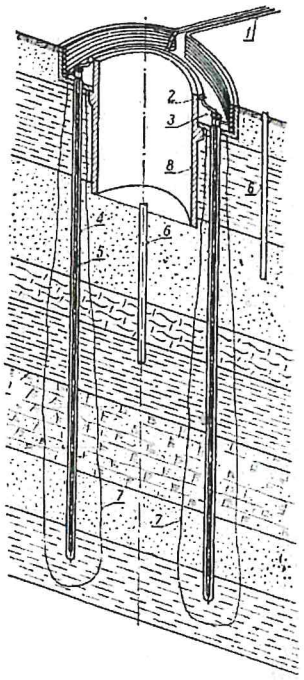


Rys. 22. Etapy formowania płaszcza mrożeniowego – zamknięcie płaszcza i tworzenie zamrożonej ściany do obliczeń cieplnych: a) płaska ściana, b) zakrzywiona ściana

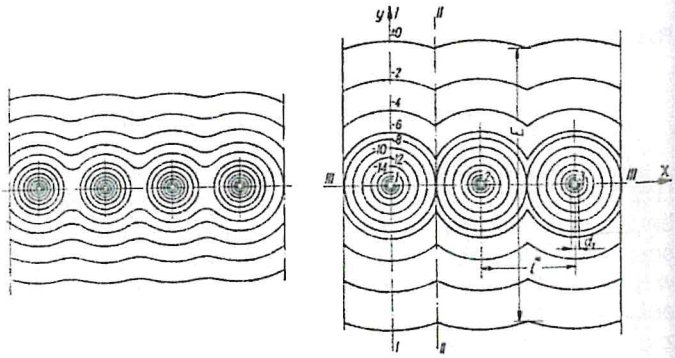
Rys. 23. Układ kolumn mrożeniowych tworzących szczelny płaszcz wokół konstrukcji wyjścia



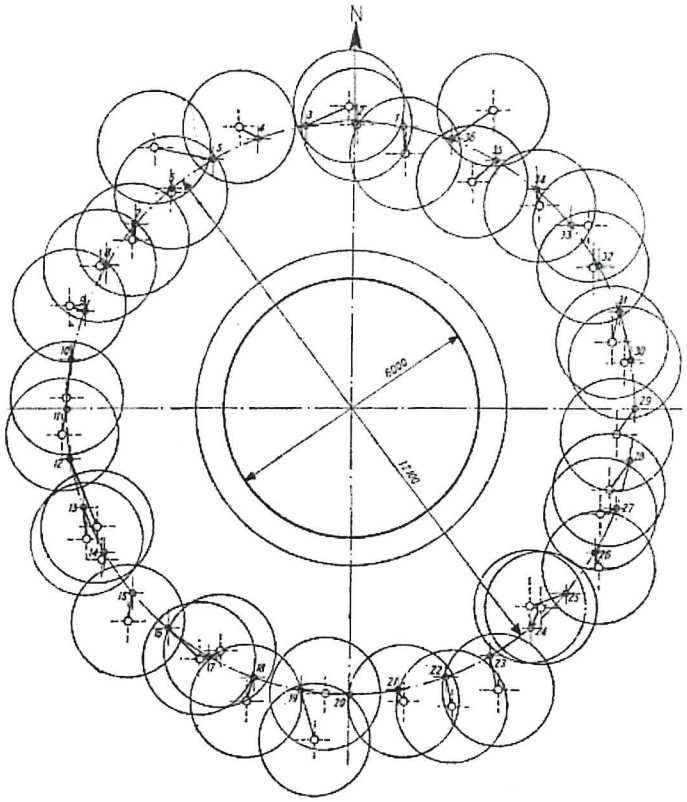
Rys. 24. Zasada sztucznego zamrażania skał: *1* – kanał ługowy, *2* – pierścień mrożeniowy, *3* – piwnica mrożeniowa, *4* – rura mrożeniowa, *5* – rurka ługowa, *6* – otwór kontrolny, *7* – cylinder zamrożonej skały, *8* – obudowa szybu



Technologia zamrażania górotworu jest znana i stosowana od lat, w szczególności jest szeroko stosowana w górnictwie [2] przy budowie szybów dla kopalń głębinowych. Technologia ta polega na wprowadzeniu stalowych rur mrożeniowych w grunt (górotwór) za pomocą technik wiertniczych, w które to rury wprowadza się rury ługowe służące do wytworzenia obiegu medium chłodniczego. Zazwyczaj jest to roztwór soli pozwalający uzyskać temperatury płynnego medium nawet do kilkudziesięciu stopni poniżej zera. Na rysunku 24 przedstawiono zasadę zamrażania nawodnionych partii górotworu do budowy szybów, a geometrię wzajemnego ułożenia otworów mrożeniowych na różnych poziomach oraz formowanie płaszcza mrożeniowego wokół przyszłego wyrobiska górniczego pokazano na rys. 25. Utrzymanie kierunku wiercenia w celu zainstalowania rur mrożeniowych i zachowanie odpowiedniego rozstawu pomiędzy nimi jest bardzo istotne, bo od tego m.in. zależy jakość wykonanego płaszcza mrożeniowego (rys. 26). Podobna



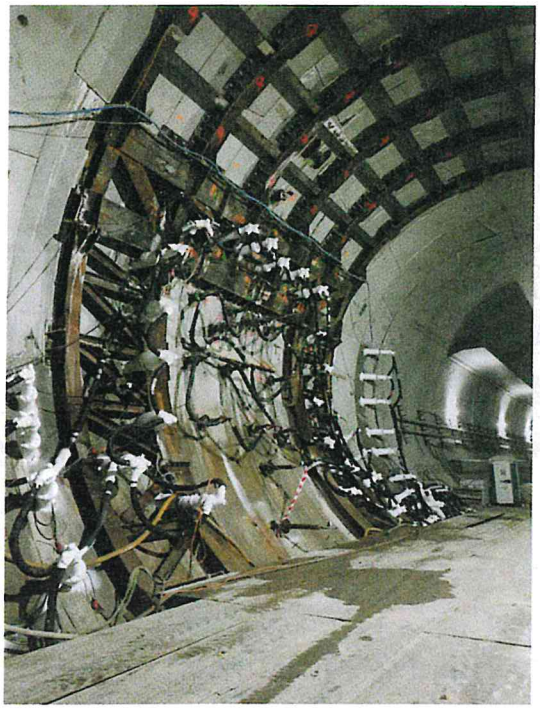
Rys. 25. Izotermy wokół połączonych walców zamrożonej skały (z lewej) oraz w ściance zamrożonej skały (z prawej)



Rys. 26. Wykres pionowości otworów mrożeniowych dla wyrobiska górniczego

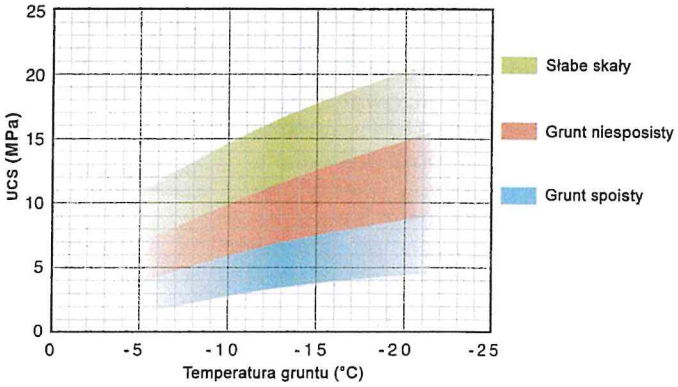
zasada jest stosowana do zabezpieczenia wykopu wyjść ewakuacyjnych w technologii mrożenia gruntu, z tą różnicą, że układ rur mrożeniowych jest dostosowany do geometrii wyjścia (rys. 27). Dla uzyskania odpowiedniej grubości płaszcza mrożeniowego w założonym czasie solanka osiąga temperaturę –35°C.

Zastosowanie mrożenia gruntu w celu zabezpieczenia wykopu wynika z faktu, iż wytrzymałość zamrożonego gruntu rośnie w miarę spadku temperatury, w związku



Rys. 27. Instalacja mrożeniowa w tunelu pod Świną

z czym niestabilny nawodniony grunt sypki oraz nawodnione grunty spoiste i słabe skały o niewielkiej wytrzymałości na ścinanie i ściskanie, na skutek zamrożenia zawartej w nich wody i przekształcenia jej w lód, a także oziębienia części stałych gruntu i lodu uzyskują odpowiednią wytrzymałość (rys. 28). Po uzyskaniu odpowiedniej grubości zmrożonego gruntu stabilna zmrożona ściana gruntu stanowi zabezpieczenie wykopu w czasie realizacji konstrukcji wyjścia ewakuacyjnego.



Rys. 28. Wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe różnych typów gruntów jako funkcja temperatury [4, 5]

Instalacje w tunelu

Tunel wraz z obiektami zewnętrznymi (stacjami trafo i budynkiem Centrum Obsługi) oraz zaprojektowanym układem drogowym stanowiącym połączenie z istniejącym układem drogowym został wyposażony we wszystkie wymagane instalacje i urządzenia, zgodnie z obowiązującymi w tym zakresie przepisami oraz Wymaganiami Zamawiającego. Instalacje i urządzenia zapewnią użytkowanie obiektu zgodnie z przeznaczeniem. Zaprojektowano instalacje sanitarne, grzewcze, wentylacyjne, klimatyzacyjne, gazowe, elektryczne, telekomunikacyjne, piorunochronne, a także sposób powiązania instalacji obiektu z sieciami zewnętrznymi (rys. 29).

Jednym z głównych systemów zapewniających bezpieczeństwo w tunelu jest system wentylacji bytowej i pożarowej jako wentylacji podstawowej w tunelu. Wentylację podsta-

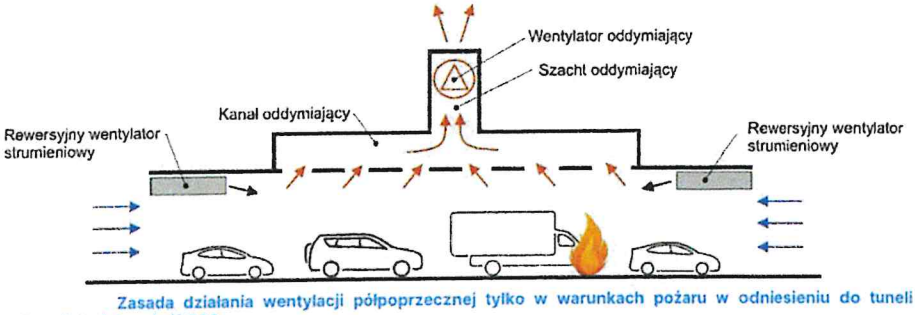
2.2.1.11	Infrastruktura techniczna w tunelu
2.2.1.11.1	Kanalizacja deszczowa w tunelu
2.2.1.11.2	Wodna instalacja ppoż w tunelu
2.2.1.11.3	Instalacja tryskaczowa w tunelu
2.2.1.11.4	Instalacja sygnalizacji pożarowej tunelu
2.2.1.11.5	System radiołączności
2.2.1.11.6	Sieć CCTV
2.2.1.11.7	Instalacje teletechniczne: SOS
2.2.1.11.8	System nagłośnienia
2.2.1.11.9	Sieć IT
2.2.1.11.10	Sieć INTERCOM
2.2.1.11.11	Automatyka i sterowanie systemami oraz wyposażeniem technicznym w tunelu
2.2.1.12	Instalacje elektryczne w tunelu
2.2.1.13	Oświetlenie w tunelu (podstawowe, ewakuacyjne, orientacyjne, galeria)
2.2.1.14	Wentylacja - tunel
2.2.1.15	Budynek Centrum Obsługi
2.2.1.16	Budynek stacji transformatorowej TK1
2.2.1.17	Budynek stacji transformatorowej TK2
2.2.1.18	Budynek stacji transformatorowej TK3
2.2.1.19	Centrala wentylacyjna VC1

Rys. 29. Wykaz projektów dotyczących systemów i obiektów pomocniczych

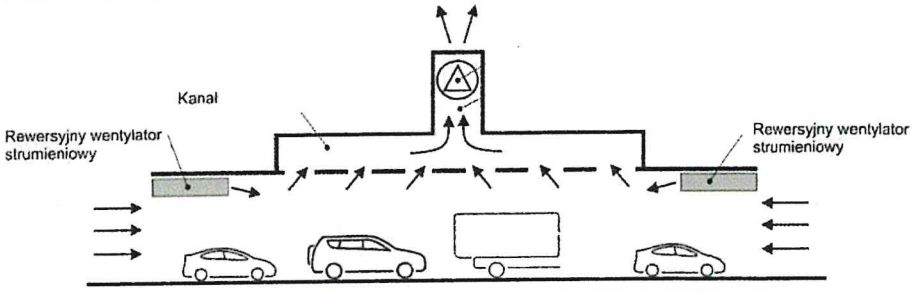
Rys. 30. System wentylacji półpoprzecznej w tunelach

wową zaprojektowano jako mieszaną: wzdłużną i półpoprzeczną z kanałem wyciągowym w stropie tunelu (rys. 30).

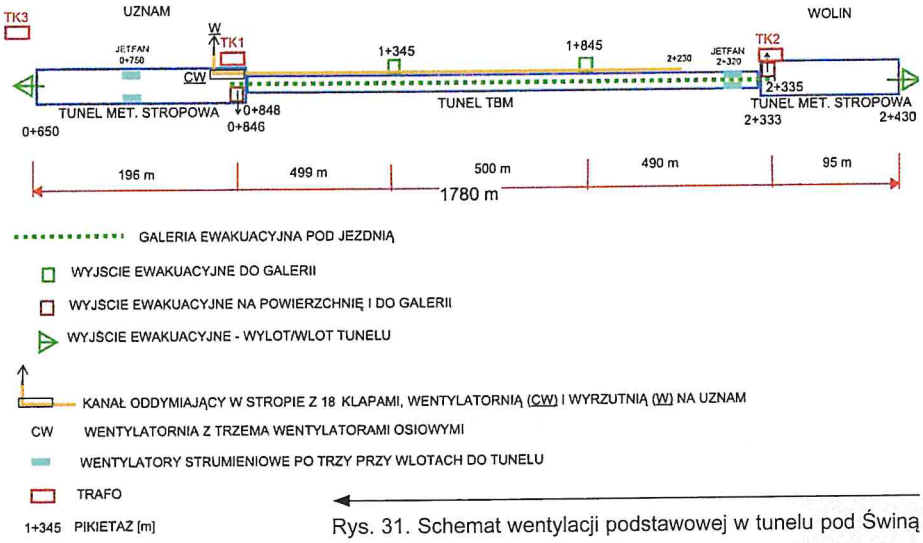
Kanał ten na odcinku ok. 1380 m w tunelu TBM jest wyposażony w 18 klap odcinających. Wentylacja wyciągowa realizowana będzie za pomocą trzech wentylatorów osiowych o łącznej wydajności ok. 220 m^3/s. Wentylatory zlokalizowane są w komorze startowej TBM w centrali wentylacyjnej na stropie pośrednim, nad częścią drogową. Wentylacja pomocnicza składa się z 3 wentylatorów strumieniowych po stronie Uznam i 3 wentylatorów strumieniowych po stronie Wolin (rys. 31).



Zasada działania wentylacji półpoprzecznej tylko w warunkach pożaru w odniesieniu do tuneli o długości większej niż 500 m



Zasada działania wentylacji półpoprzecznej w warunkach normalnej eksploatacji



Rys. 31. Schemat wentylacji podstawowej w tunelu pod Świną

PIŚMIENNICTWO

[1] *Sanger F.J., Sayles F.H.*: Thermal and rheological computations for artificially frozen ground construction. In Ground Freezing Developments in Geotechnical Engineering. Amsterdam: Elsevier, vol. 26, pp. 311–37; Eng. Geol. 13(1979): 311–37.

[2] Praca zbiorowa: Poradnik górnika. T. I-V. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1982.

MATERIAŁY WYKORZYSTANE W PRACY

[3] *Konsorcjum Porr S.A, Porr Bau GmbH, Gülermak Ağir Sanayi İnşaat ve Taahhüt A.Ş.*: Dokumentacja budowy sporządzona w ramach Zamówienia publicznego dla zadania jak w tytule.

[4] GEO-SLOPE International Ltd., 2014. Thermal Modeling with TEMP/W, An Engineering Methodology.

[5] Trevi S.p.a., 2013. Artificial ground freezing – technology. Accessed on March 6th, 2019.