

Realizacja i monitoring komory startowej i wyjściowej maszyny TBM

W trakcie realizacji specjalistycznych robót fundamentowych na budowie tunelu pod Martwą Wisłą prawdziwym wyzwaniem technicznym było zabezpieczenie stateczności i szczelności wykopów pod komorę startową oraz komorę wyjściową maszyny TBM. Głębokość otwartych wykopów komory startowej (strona Ku Ujściu) oraz komory wyjściowej (strona Marynarki Polskiej) wynosiła odpowiednio 20,5 i 22,0 m p.p.t. [7].

Komory, podobnie jak pozostałe odcinki tunelu, były realizowane w bardzo trudnych warunkach geotechnicznych, charakteryzujących się naprzemiennym zaleganiem osadów morskich i aluwialnych, wykształconych w postaci piasków oraz miękkoplastycznych namułów, o bardzo małych wartościach parametrów wytrzymałościowo-odkształceniowych. W spągu tej serii, na głębokości około 23,0 m p.p.t. (komora startowa) oraz 22,0 m p.p.t. (komora wyjściowa), zalegała warstwa słabo przepuszczalnych osadów lodowcowych wykształconych w postaci glin pylastych o miąższości około 4,0 m [1, 2]. Warstwa ta miała kluczowe znaczenie przy zaproponowanych rozwiązaniach technicznych uszczelnienia dna wykopu, zarówno w obu komorach, jak i na pozostałej części tunelu realizowanego w otwartym wykopie [4, 7]. Zwierciadło wody gruntowej o charakterze napiętym stabilizowało się na głębokości około 0,5 m n.p.m., tzn. około 1 m poniżej platformy roboczej, co stanowiło dodatkowe utrudnienie podczas realizacji robót fundamentowych.

Zabezpieczenie wykopów fundamentowych pod komorę wykonano zgodnie z koncepcją technologiczno-wykonawczą [4], w której w celu ograniczenia dopływu wody gruntowej do wykopu założono wykonanie ścian szczelinowych oraz – ze względu na występowanie pod dnem komór gruntów słabo przepuszczalnych na niewystarczającej ze względów statycznych głębokości – poziomego, kotwionego ekranu przeciwytrącyjnego w technologii iniekcji strumieniowej Soilcrete.

Parametry konstrukcyjno-technologiczne komory startowej i wyjściowej

Komorę startową (rys. 1) maszyny TBM stanowi siedem wygradzonych przegrodą wodoszczelną segmentów (segmenty 19÷25) szerokości od 30 do 51 m oraz łącznej długości około 110 m. Płytę denną komory zaprojektowano [3] w spadku; w najpłytszym miejscu jej wierzch znajduje się na rzędnej

-12,63 m n.p.m., a w najgłębszym, czyli na wejściu maszyny, na rzędnej -17,57 m n.p.m. Oznacza to, że należało zabezpieczyć wykop fundamentowy o głębokości od 16,40 do 20,50 m poniżej terenu znajdującego się na rzędnej 1,50 m n.p.m., tj. około 1,0 m powyżej zwierciadła wody gruntowej.

Dodatkowym utrudnieniem było to, że konstrukcja rozparcia ścian wykopu (rys. 2) musiała zapewnić bezpieczny i precyzyjny montaż w dnie komory wielkogabarytowych elementów składowych maszyny, w tym [8]:

- tarczy średnicy 12,58 m i masie 230 t,
- 7-elementowej głowicy średnicy 12,58 m, o długości z płaszczem ogona 10,24 m i masie 1090 t,
- 3 bram zagłowicowych, o łącznej długości około 79 m i masie 680 t.

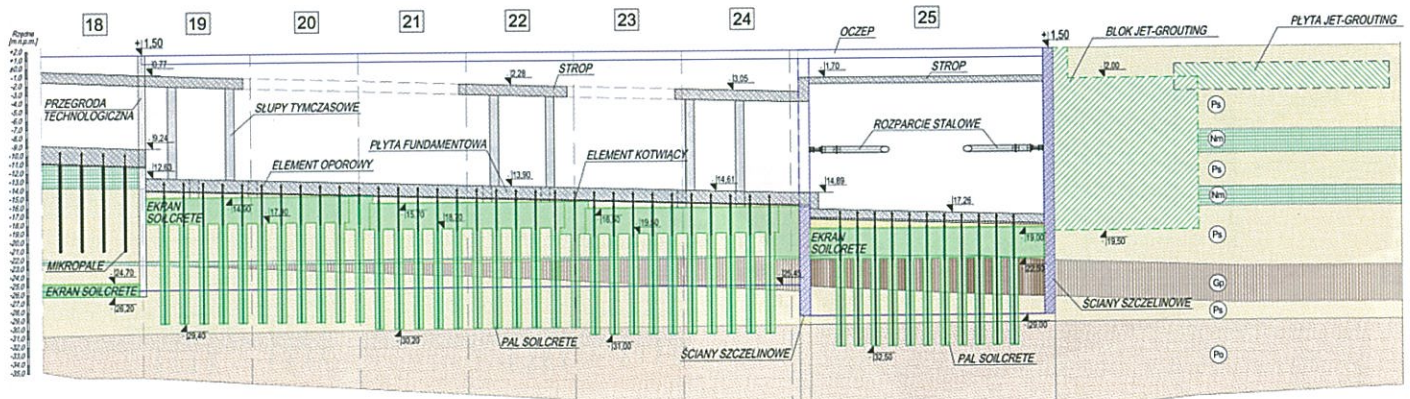
Mając na uwadze powyższe, w konstrukcji stropu rozpięającego opartego na dwugątelowych ($2 \times$ IPE500) słupach tymczasowych, wykonanych według technologii iniekcji strumieniowej Soilcrete, przewidziano cztery okna montażowe (por. rys. 2), największe o wymiarze około 22×25 m.

Komorę wyjściową (por. rys. 6b) maszyny TBM stanowi jeden niezależny segment (segment 28) szerokości około 51 m i długości 28 m, wygradzony ze wszystkich stron ścianami szczelinowymi. Płytę denną zaprojektowano [3] w spadku; w najgłębszym miejscu, czyli na wejściu maszyny do komory, jej wierzch znajduje się na rzędnej -18,92 m n.p.m., a w najpłytszym na rzędnej -17,90 m n.p.m. Uwzględniając grubość płyty oraz warstwy podbudowy, należało zabezpieczyć wykop fundamentowy o głębokości maksymalnej 22 m poniżej powierzchni terenu.

Konstrukcja stropu rozpięającego ściany (rys. 3) na rzędnej -3,60 m n.p.m. musiała umożliwić demontaż oraz wydobywanie na powierzchnię terenu tarczy wiercącej maszyny TBM.

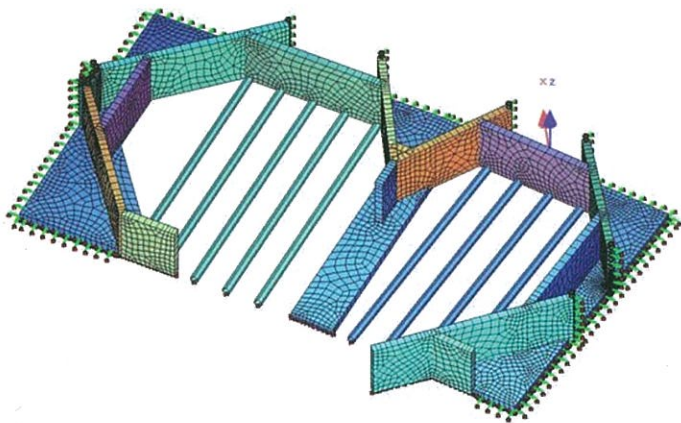
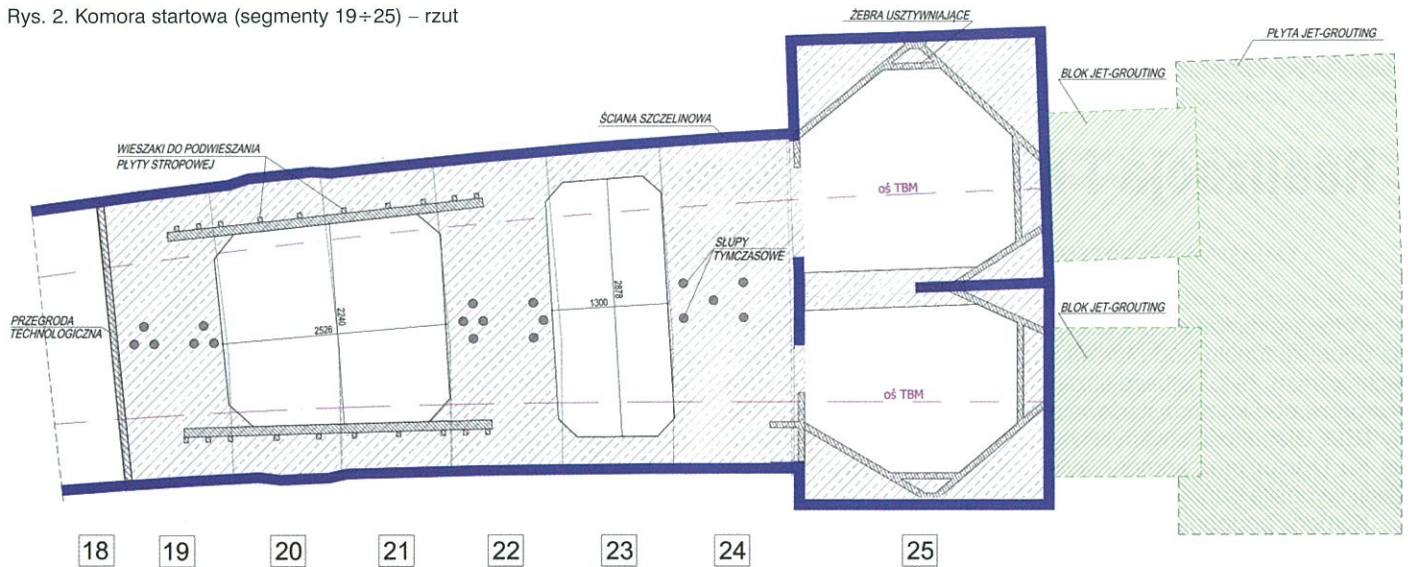
Zakres oraz kolejność robót w komorach

Zakres oraz kolejność robót związanych z zabezpieczeniem obu komór określono na podstawie obliczeń statycznych metodą elementów skończonych w płaskim i przestrzennym stanie odkształcenia, przy użyciu programu PLAXIS [10], dodatkowo zweryfikowanych programem SOFISTIK [11] oraz metodami analitycznymi z wykorzystaniem pakietu GGU [12].



Rys. 1. Komora startowa (segmenty 19÷25) – przekrój

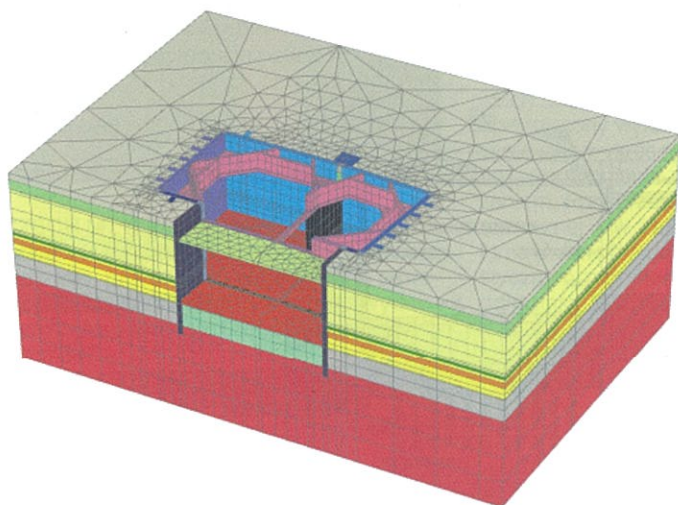
Rys. 2. Komora startowa (segmenty 19÷25) – rzut



Rys. 3. Model stropu rozporającego komorę wyjściową – SOFISTIK [11]

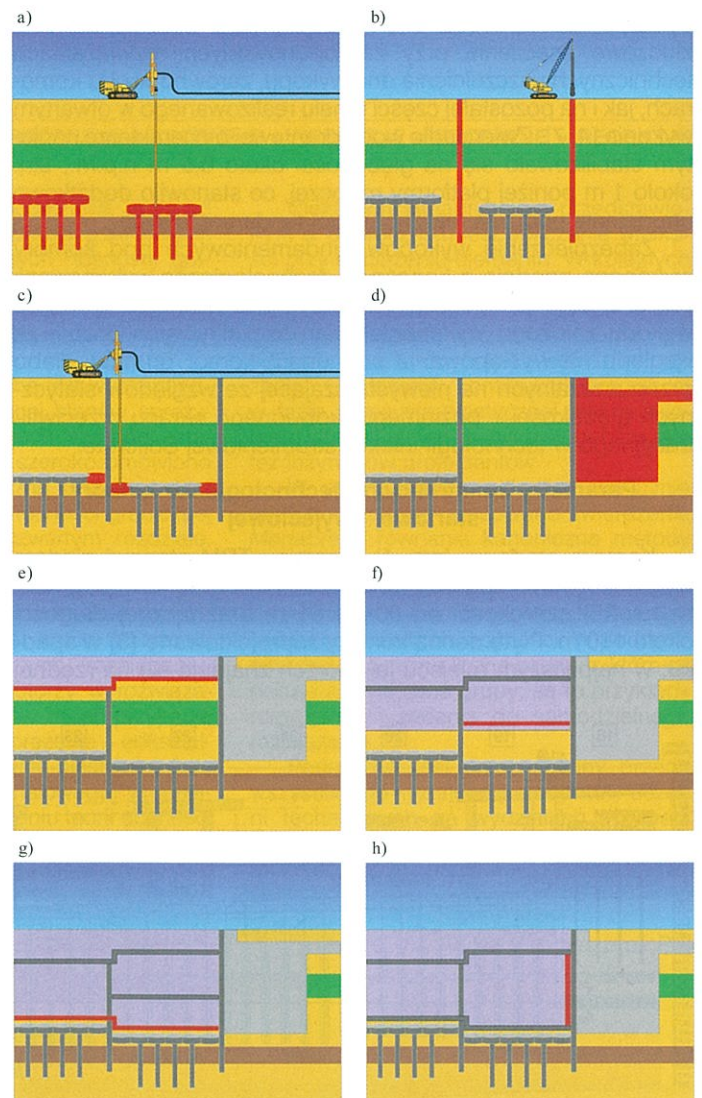
Przestrzenny model komory wyjściowej (rys. 4) został skalibrowany na podstawie wyników przemieszczeń ścian szczelinowych oraz sił w rozparciu stalowym pomierzonych w trakcie realizacji komory startowej. Przeprowadzona analiza wsteczna pozwoliła na rezygnację z jednego poziomu rozparcia stalowego, co znacząco ułatwiło roboty w komorze wyjściowej oraz przyspieszyło ich tempo.

Uwzględniając specyfikę oraz wzajemne oddziaływania poszczególnych technologii, przyjęto analogiczne w przypadku obu komór etapowanie robót [7]:



Rys. 4. Przestrzenny model komory wyjściowej – PLAXIS 3D [10]

- etap I – wykonanie poziomego kotwionego ekranu przeciwfiltracyjnego według technologii iniekcji strumieniowej Soilcrete (rys. 5a);
- etap II – wykonanie ścian szczelinowych grubości 120 cm (rys. 5b);



Rys. 5. Etapy zabezpieczenia komory startowej i wyjściowej maszyny TBM (objaśnienia w tekście)

- etap III – wykonanie doszczelniających kolumn Soilcrete (rys. 5c);
- etap IV – wykonanie przed ścianami czołowymi komór bloków doszczelniających Soilcrete, umożliwiających bezpieczne wyjście i wejście maszyny TBM (rys. 5d);
- etap V – wykop wstępny do rzędnej spodu stropu żelbetowego; wykonanie stropu żelbetowego z otworami technologicznymi umożliwiającymi montaż i demontaż maszyny TBM (rys. 5e);
- etap VI – wykop do rzędnej rozparcia stalowego; montaż tymczasowego rozparcia stalowego (rys. 5f);
- etap VII – wykop do rzędnej spodu płyty fundamentowej; wykonanie płyty fundamentowej (rys. 5g);
- etap VIII – demontaż rozparcia stalowego; wykonanie pierścienia żelbetowego dla maszyny TBM; komory gotowe na wyjście i wejście maszyny TBM (rys. 5h).

Rzędne poszczególnych elementów zabezpieczenia wykopów fundamentowych komory startowej i wyjściowej przedstawiono na rys. 6.

Kluczowym elementem przyjętego sposobu zabezpieczenia i uszczelnienia wykopu w obu komorach jest poziomy ekran Soilcrete, wykonany w komorze wyjściowej na głębokości aż 30,5 m p.p.t. (por. rys. 6b), poprawiając tym samym aż o 6,5 m poprzedni „rekord Polski” [8] ustanowiony w komorze startowej na głębokości 24 m p.p.t. (por. rys. 6a).

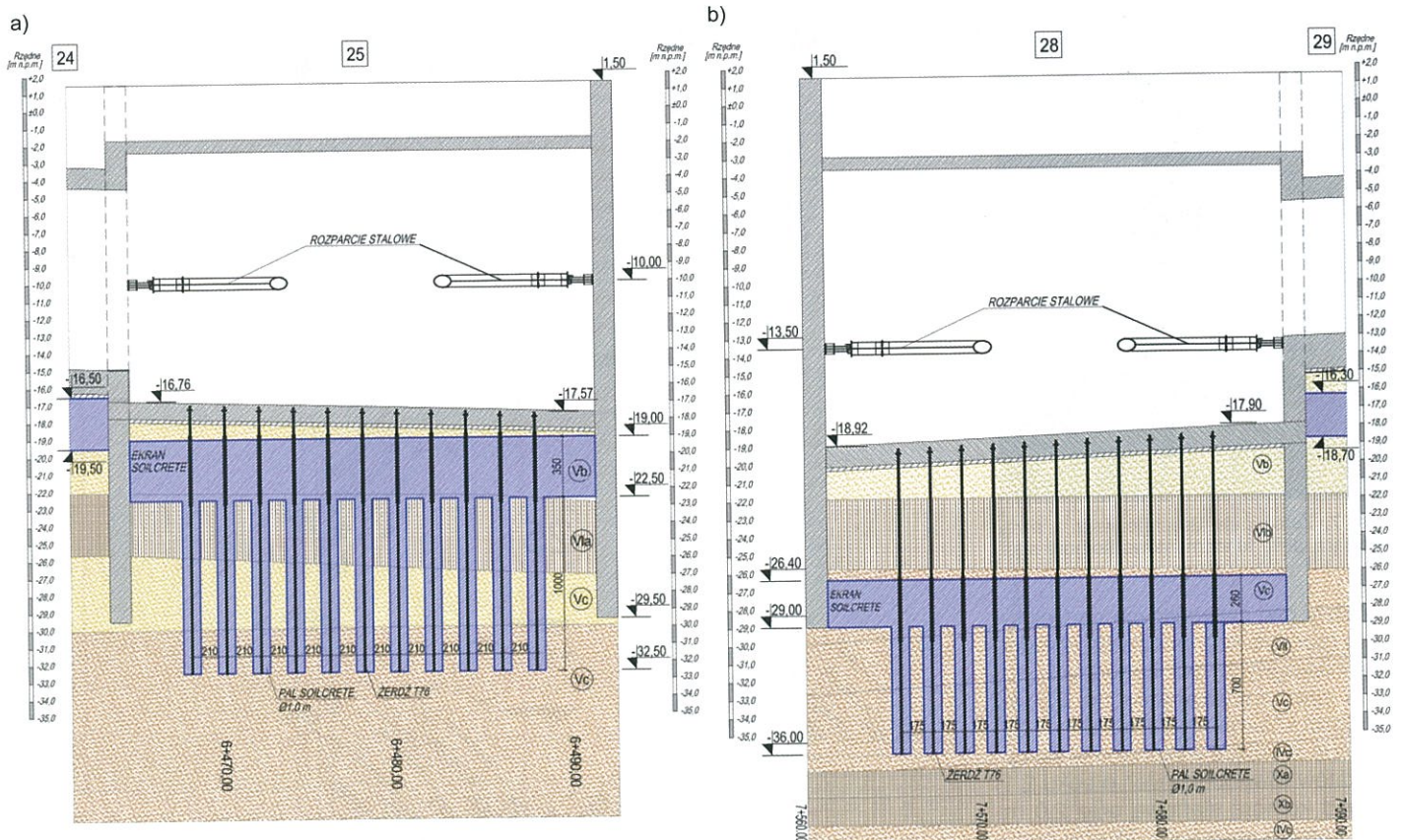
Ekran Soilcrete wykonano za pomocą iniekcji strumieniowej systemu D [9], wykorzystując monitory Super Jet systemu Kellera. Przed przekształceniem w cementogrunt grunt zalegający w podłożu został rozluźniony i częściowo wymieniony w wyniku oddziaływania skoncentrowanego strumienia o dużej energii i prędkości wylotowej. W systemie D, tzw. podwójnym (ang. Double), wprowadza się otulenie strumienia zaczynu sprężonym powietrzem w celu poprawienia spójności strumienia i skuteczności erodowania gruntu. Cząstki gruntu, wymieszane z zaczynem cementowym przy udziale silnej turbulencji,

wypełniają „wyciętą” przestrzeń w podłożu, która ma kształt kolumny. Nadwyżka powstałej mieszaniny wypływa na powierzchnię przez pierścieniową szczelinę wokół żerdzi wiertniczej. Parametry technologiczne iniekcji strumieniowej, w tym zwłaszcza liczbę i średnicę dysz, gęstość zaczynu cementowego, ciśnienie robocze i wydatek pompowanego zaczynu oraz prędkość podciągania i obracania żerdzi ustalono na podstawie prób terenowych, dążąc do wykonania kolumn o maksymalnej średnicy, która podlegała sprawdzeniu na poziomie ekranu.

Na podstawie badań przyjęto wykonywanie pod komorą startową kolumn średnicy 3,10 m, a pod komorą wyjściową kolumn średnicy 2,90 m. Redukcja średnicy kolumn pod komorą wyjściową wynikała z nieznacznie zwiększonej zawartości frakcji pylastej oraz obecności osadów morskich (muszelek) w warstwie piasków drobnych (warstwa Vc na rys. 6b), w których był wykonywany poziomy ekran Soilcrete.

Przy dużych głębokościach wiercenia jest konieczne również kontrolowanie pionowości każdego wywierconego otworu za pomocą specjalistycznego inklinometru. Pomiar pionowości umożliwia bieżące wykrycie ewentualnych przesunięć kolumn w planie i wypełnianie potencjalnych nieszczelności ekranu w strefach rozchodzenia się kolumn. W czasie prac iniekcyjnych średnia odchyłka pionowości wiercenia wyniosła zaledwie 0,4%, co wskazuje na bardzo dużą dokładność wykonanych robót, przewyższającą standardowe założenia.

W projektach wykonawczych [5, 6] założono, że ekran Soilcrete pełni, oprócz funkcji uszczelniającej, także ważną funkcję statyczną i działa jak dodatkowa rozpory w poziomie dna wykopu, ograniczając przemieszczenia i siły wewnętrzne w ścianie szczelinowej w stanie budowlanym (etap VII). Efektywność ekranu Soilcrete jako dodatkowej rozpory najlepiej pokazuje porównanie układu ścian szczelinowych w komorze startowej i wyjściowej. Zaprojektowany w dnie komory startowej ekran Soilcrete (por. rys. 6a) pozwolił na zredukowanie maksymalnego momen-



Rys. 6. Zabezpieczenie ścian i uszczelnienie dna komory: a) startowej, b) wyjściowej

tu przęsłowego do wartości obliczeniowej około 4050 kN·m przy odpowiadającym maksymalnym momencie podporowym wynoszącym około 4400 kN·m/m, co pozwoliło na zaprojektowanie i wykonanie ściany szczelinowej grubości 120 cm, zbrojonej prętami średnicy 32 mm rozmieszczonymi w trzech rzędach.

Obecność w dnie komory wyjściowej warstwy twardoplastycznych glin pylastych o miąższości około 4,0 m (warstwa VI b na rys. 6b), w której zasięg iniekcji byłby znacznie mniejszy, przy czym niemożliwe byłoby osiągnięcie wymaganej wytrzymałości cementogruntu na ściskanie, wynoszącej 5,0 MPa, spowodowała konieczność obniżenia ekranu poniżej spągu tej warstwy i jego wykonanie w warstwie piasków drobnych, na rzędnej spodu ścian szczelinowych, tj. -29,0 m n.p.m. (por. rys. 6b). Obniżenie ekranu znacząco zredukowało jego efektywność jako dodatkowej rozporu w stanie budowlanym (etap VII).

W przypadku tego niekorzystnego schematu statycznego, po uwzględnieniu osłabienia parametrów wytrzymałościowych gliny pylastej wskutek jej przewiercania, konieczne stało się zaprojektowanie ściany szczelinowej grubości 120 cm, z przekrojami teowymi w rozstawie co 4,7 m (por. rys. 9). Maksymalny obliczeniowy moment przęsłowy w przekroju teowym wyniósł około 36 500 kN·m, przy odpowiadającym maksymalnym momencie podporowym na poziomie ekranu wynoszącym około 8000 kN·m.

W celu zrównoważenia siły wyporu ekran pod komorą startową zakotwiono za pomocą zbrojonych pali iniekcyjnych Soilcrete (rys. 7) średnicy co najmniej 1 m i długości 10 m, wykonywanych w jednym ciągu technologicznym z kolumnami ekranu średnicy 3,1 m i długości 3,5 m (por. rys. 6a). W przypadku komory wyjściowej uwzględnienie w obliczeniach statycznych [6] ciężaru

sowano do podstawowego układu kolumn tworzących poziomy ekran przeciwfiltracyjny. Dzięki równoczesnemu wykonywaniu pali iniekcyjnych i kolumn ekranu zwiększono pewność wytworzenia monolitycznych połączeń obu elementów, zapewniając tym samym wymaganą sztywność oraz szczelność całego systemu zabezpieczenia dna wykopu. Przed przystąpieniem do zasadniczych robót iniekcyjnych wykonano specjalistyczne badania kontrolne w celu wyznaczenia granicznej przyczepności między cementogruntem, a różnymi rodzajami żerdzi kotwiących, zastosowanych do zbrojenia pali iniekcyjnych.

Według technologii iniekcji strumieniowej Soilcrete wykonano także bloki uszczelniające po zewnętrznej stronie czołowej ściany komory startowej i wyjściowej (rys. 8 i 9). Zadaniem bloków było zapewnienie bezpiecznego oraz kontrolowanego wyjścia i wejścia maszyny TBM z obu komór. Bloki Soilcrete uwzględniono także w obliczeniach statycznych do zredukowania wartości parcia gruntu, co umożliwiło zaprojektowanie ścian czołowych zbrojonych koszami z włókna szklanego GFRP (glass fibre reinforced plastic), tworzącymi tzw. „soft eye”, przez które przewierca się tarcza TBM.

Monitoring komory startowej i wyjściowej

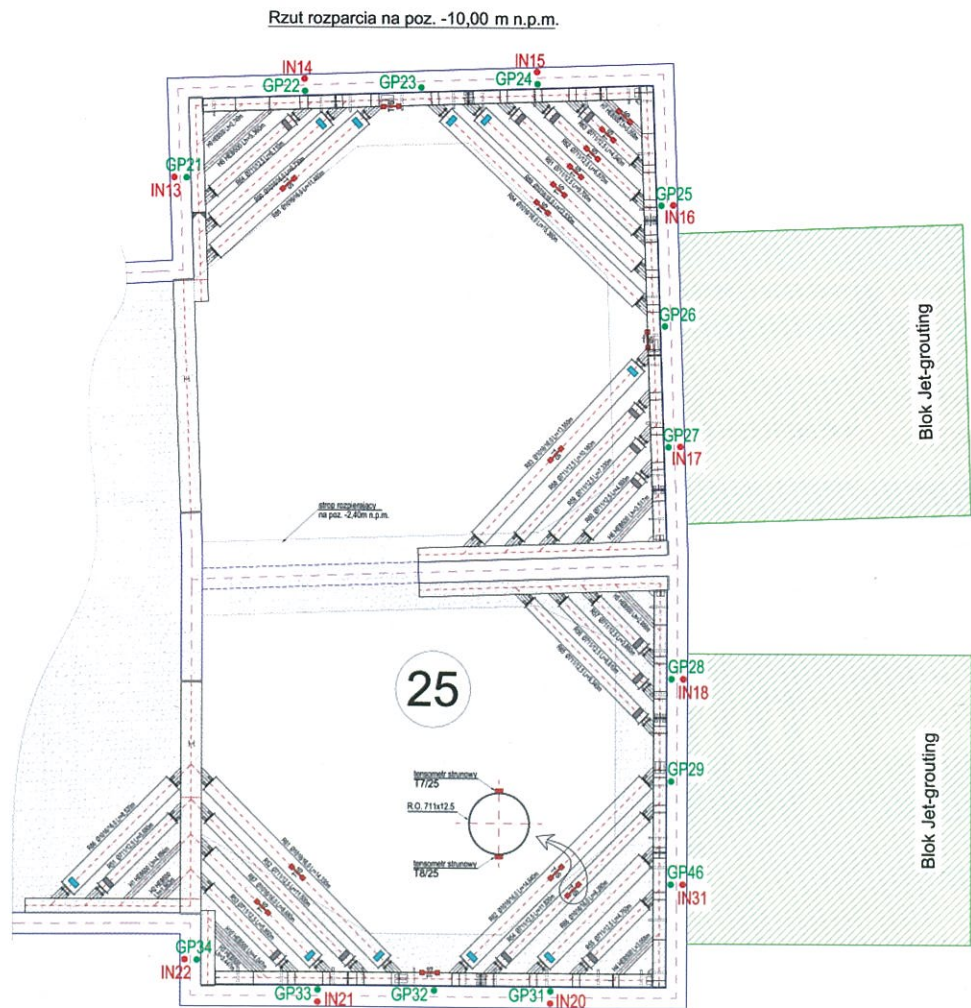
W celu zapewnienia bezpieczeństwa realizacji robót zainstalowano w ścianach szczelinowych komory startowej i wyjściowej inklinometry pomiarowe oraz dodatkowo punkty geodezji precyzyjnej (por. rys. 8 i 9). Do momentu wykonania docelowej płyty fundamentowej monitoringiem objęto także kotwione ekrany przeciwfiltracyjne. Pomiary były wykonywane co drugi dzień i każdorazowo po osiągnięciu poszczególnych etapów głębienia wykopu oraz demontażu rozparcia stalowego.



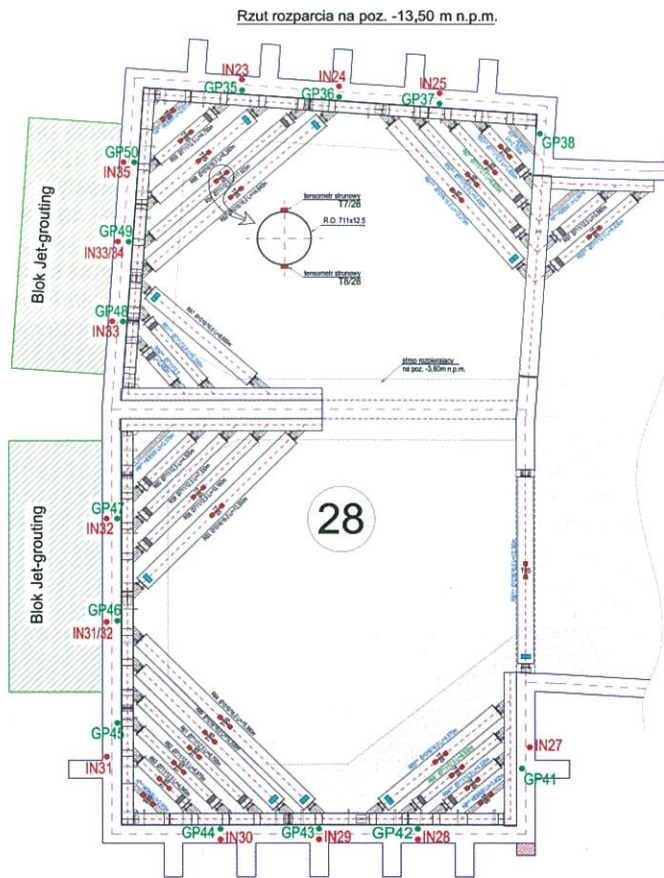
Rys. 7. Żerdź pala Soilcrete wraz z płytą kotwiącą płytę fundamentową komory startowej

warstwy glin zalegających nad ekranem (por. rys. 6b) umożliwiło skrócenie iniekcyjnych pali kotwiących do 7 m oraz zredukowanie do 2,6 m długości kolumn średnicy 2,9 m.

Pale kotwiące wykonano w siatce trójkątów równobocznych o boku 2,1 m pod komorą startową oraz 2,0 m pod komorą wyjściową. W obu przypadkach rozmieszczenie pali dosto-



Rys. 8. Lokalizacja inklinometrów oraz punktów geodezji precyzyjnej w komorze startowej

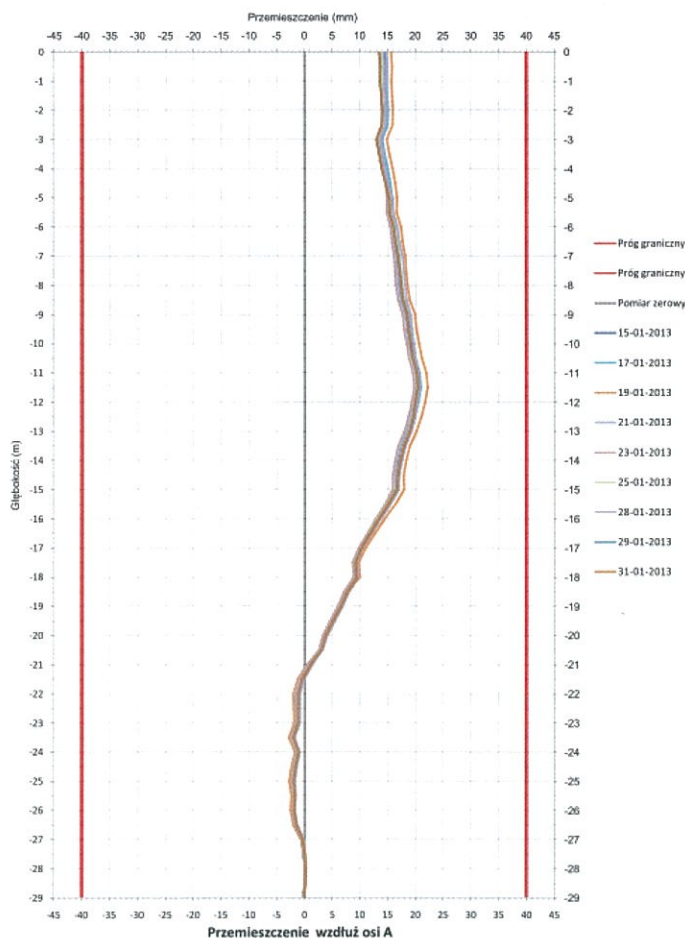


Rys. 9. Lokalizacja inklinometrów oraz punktów geodezji precyzyjne w komorze wyjściowej

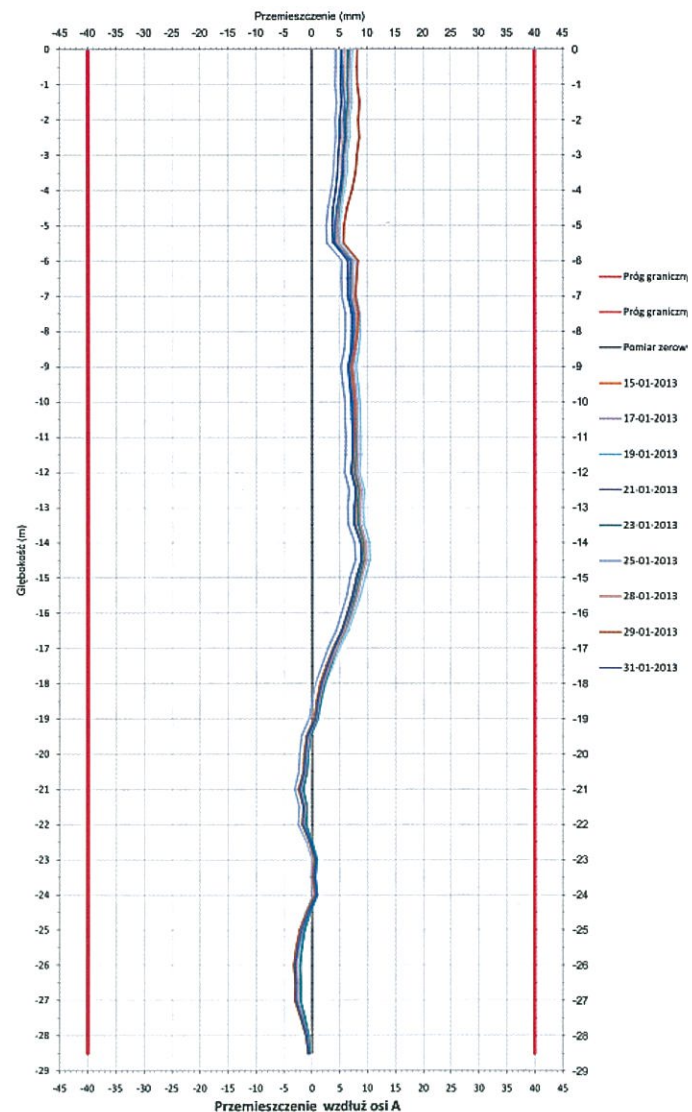
Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono wyniki pomiarów inklinometrycznych ściany bocznej oraz ściany czołowej segmentu 25 komory startowej gotowej na wprowadzenie maszyny TBM [8] (por. etap VIII na rys. 5h). Maksymalne pomierzone przemieszczenie ściany bocznej (por. rys. 10) wynosiło 22 mm a ściany czołowej (por. rys. 11) było dwukrotnie mniejsze dzięki odciążeniu tej ściany blokiem Soilcrete (por. rys. 1 i 2). Maksymalne przemieszczenie ściany bocznej oszacowane na etapie projektu wynosiło 32 mm, a ściany czołowej 12 mm potwierdzając dokładność modelowania. Warto zaznaczyć, że znacząca część przemieszczeń ściany czołowej wygenerowała się w czasie, gdy ściana była jeszcze nieodkopana, a za ścianą był wykonywany blok Soilcrete. Wskazuje to, jak ważne znaczenie ma zaplanowanie i wykonywanie iniekcji strumieniowej w odpowiedniej kolejności robót.

Na rysunkach 10 i 11 jest widoczna znaczna efektywność poziomego ekranu Soilcrete znajdującego się na głębokość od 20,5 do 24,0 m p.p.t. jako wspomnianej wcześniej rozporę redukującej przemieszczenia ściany szczelinowej.

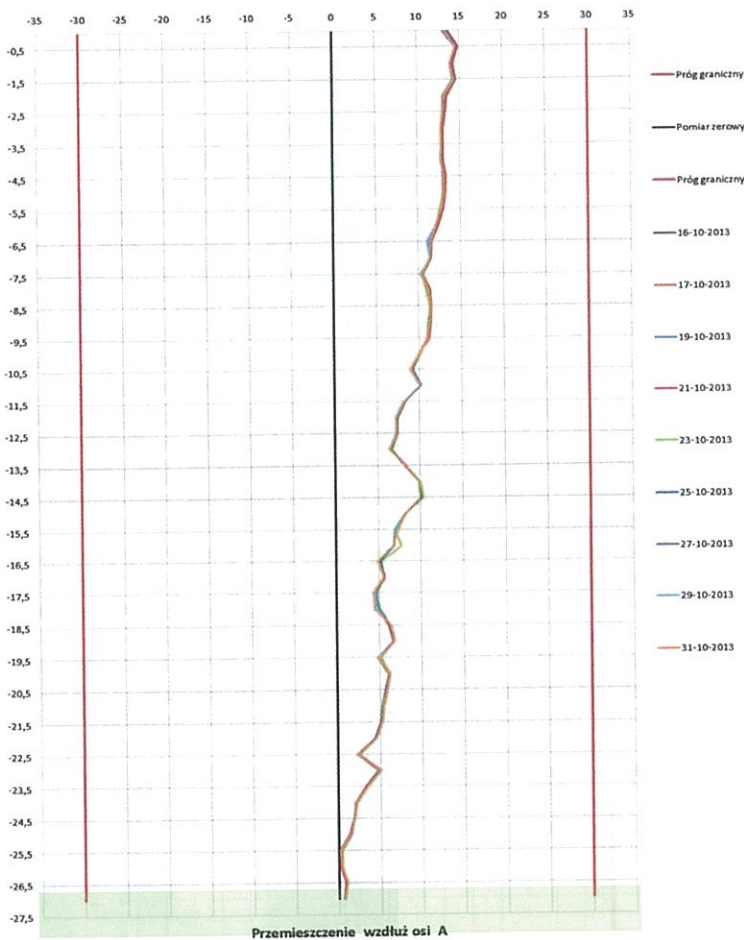
Na rysunku 12 przedstawiono wyniki pomiaru inklinometrycznego ściany teowej w komorze wyjściowej po zdjęciu



Rys. 10. Pomiar inklinometryczny IN20 w ścianie bocznej segmentu 25 komory startowej



Rys. 11. Pomiar inklinometryczny IN17 w ścianie czołowej segmentu 25 komory startowej



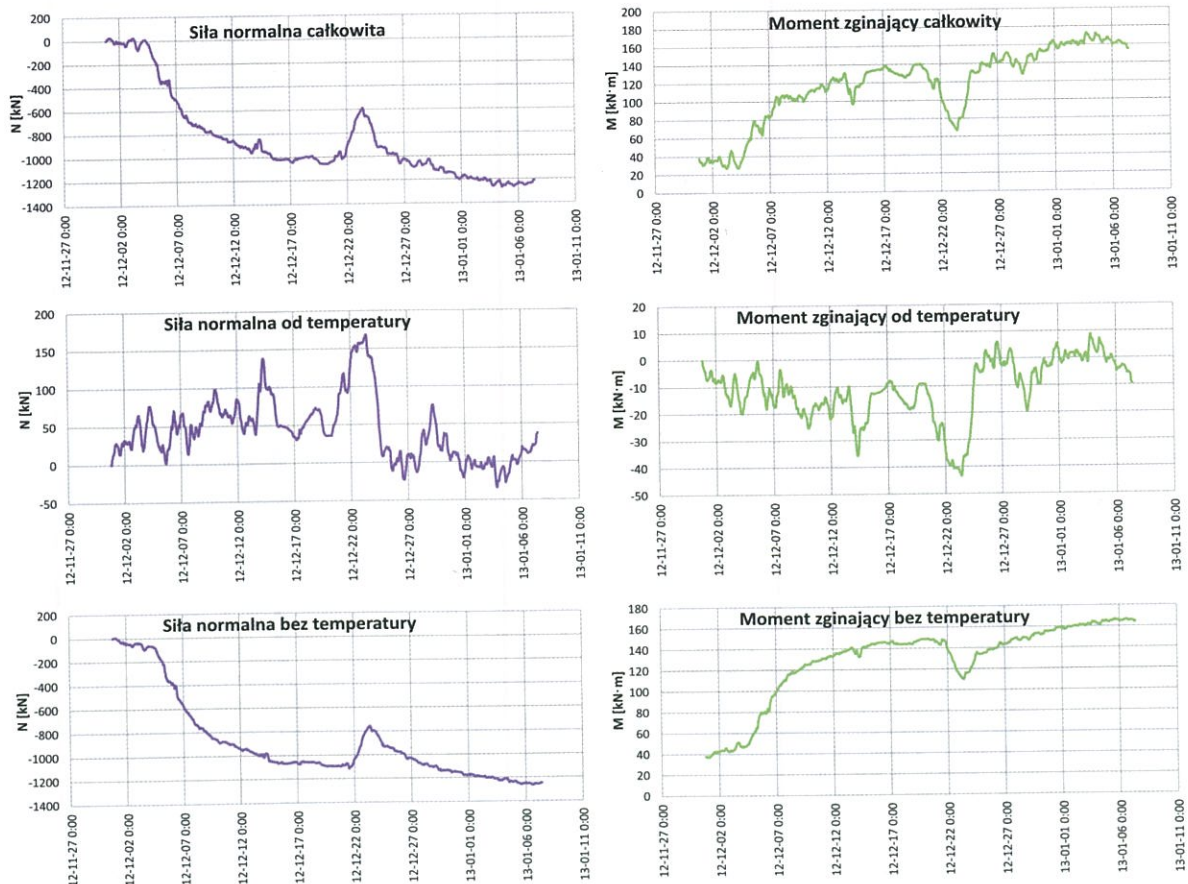
Rys. 12. Pomiar inklinometryczny IN24 w ścianie teowej komory wyjściowej

rozparcia stalowego, w fazie gotowości na przyjęcie maszyny TBM. W porównaniu z rys. 10 i 11 jest widoczny odmienny charakter przemieszczeń ściany, odpowiadający w przybliżeniu sztywnemu przechyłowi. Efekt ten jest spowodowany znacznie większą sztywnością przekroju teowego w stosunku do ściany grubości 120 cm oraz wspomnianą wcześniej zredukowaną efektywnością ekranu Soilcrete jako dodatkowej rozporu na spodzie ściany szczelinowej (por. rys. 6b).

Ciągłym monitoringiem objęto także rozparcia stalowe na poziomie $-10,0$ m n.p.m. w komorze startowej (rys. 8) oraz $-13,50$ m n.p.m. w komorze wyjściowej (por. rys. 9). W systemie pomiarowym zastosowano tensometry strunowe (rys. 13) instalowane na górnej i dolnej powierzchni wybranych rozpor, rejestratory oraz moduł prezentacji wyników (rys. 14). Wyniki ciągłego pomiaru uwzględniają zarówno odkształcenia konstrukcji rozparcia wynikające bezpośrednio z oddziaływania parcia gruntu na ściany szczelinowe, jak również odkształcenia wywołane zmianami temperatury zewnętrznej (por. rys. 14).



Rys. 13. Tensometr strunowy zainstalowany na rozporze

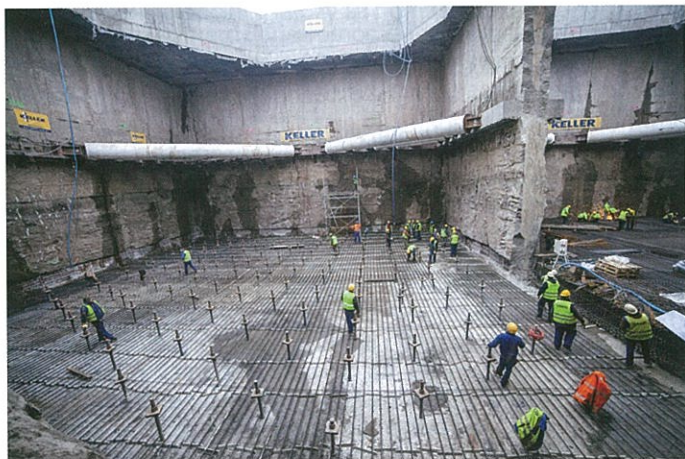


Rys. 14. Wynikowe wykresy siły normalnej oraz momentu zginającego w rozporze w zależności od temperatury

Pomiary wykazały, że w żadnej z rozpór naprężenia nie przekroczyły wartości dopuszczalnych, co potwierdziło poprawność przyjętych założeń oraz wykonanych obliczeń statycznych.

Podsumowanie

Przyjęty sposób rozparcia komór fragmentami stropu docelowego oraz technologia wykonania robót „na sucho” (rys. 15), oparta na wykonaniu ścian szczelinowych i poziomego ekranu uszczelniającego Soilcrete, miała następujące zalety techniczne:



Rys. 15. Montaż zbrojenia płyty fundamentowej w suchym wykopie komory startowej TBM

a) umożliwiła bezpieczny i precyzyjny montaż maszyny TBM z uwzględnieniem geometrii jej poszczególnych elementów oraz możliwości manewrowych ciężkiej dźwigni montażowej;

b) bloki Soilcrete wykonane przed ścianami czołowymi obu komór umożliwiły kontrolowane wyjście i wejście maszyny TBM, dodatkowo redukując wartość parcia gruntu na ściany;

c) głębinie wykopu na sucho zapewniło bieżącą kontrolę stopniowo odsłanianych styków sekcji ściany szczelinowej oraz dało możliwość natychmiastowej lokalizacji i likwidacji lokalnych przecieków;

d) zapewniono kontrolowane warunki wykonania szczelnego połączenia płyty dennej tunelu ze ścianą szczelinową, łącznie z zabezpieczeniem zbrojenia przed korozją, co ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa i prawidłowego funkcjonowania tunelu;

e) ekran kotwiony Soilcrete spełnił w komorze startowej rolę dodatkowej rozpory poziomej, znacząco redukując przemiesz-

czenia ściany szczelinowej w fazie budowlanej, co miało istotny wpływ na znaczące ograniczenie nieszczelności na połączeniach sekcji;

f) montaż oraz odbiór elementów kotwiących na głowicach pali odbywał się w sposób kontrolowany, w korzystniejszych warunkach niż pod wodą; jakość połączenia się zwiększyła, podnosząc tym samym poziom bezpieczeństwa realizowanych robót.

Prowadzony ciągły pomiar przemieszczeń ścian szczelinowych oraz sił w rozparciach stalowych umożliwiał bieżącą kontrolę założeń projektowych, co zwiększyło poziom bezpieczeństwa robót w głębokich wykopach fundamentowych. Wyniki pomiarów z realizacji komory startowej wykorzystano do optymalizacji rozwiązania zabezpieczenia komory wyjściowej na podstawie analizy wstecznej i kalibracji modelu obliczeniowego.

PIŚMIENICTWO I WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla ustalenia geotechnicznych warunków posadowienia projektowanego tunelu pod Martwą Wisłą w ciągu Trasy Słowackiego w Gdańsku. Geoprojekt Szczecin Sp. z o.o. Szczecin, październik 2010.
- [2] Sprawozdanie z badań geotechnicznych wykonanych na terenie budowy zlokalizowanej przy ulicy Kujawskiej i Marynarki Polskiej w Gdańsku. Geoteko. Warszawa, maj 2012.
- [3] Projekt wykonawczy „Połączenie Portu Lotniczego z Portem Morskim Gdańsk – Trasa Słowackiego”. Zadanie IV. Odcinek Węzeł Marynarki Polskiej – Węzeł Ku Ujściu. Tunel pod Martwą Wisłą. Europrojekt Gdańsk Sp. z o.o./SSF Ingenieure GmbH. Gdańsk, styczeń 2011.
- [4] Koncepcja technologiczno-wykonawcza zabezpieczenia otwartych wykopów fundamentowych dla budowy tunelu pod Martwą Wisłą oraz węzła Marynarki Polskiej. Rew.2, Keller Polska, marzec 2012.
- [5] Projekt technologiczno-wykonawczy tunelu pod Martwą Wisłą oraz węzła Marynarki Polskiej. Segmenty 19÷24 i 25. Keller Polska Sp. z o.o., kwiecień 2012.
- [6] Projekt technologiczno-wykonawczy tunelu pod Martwą Wisłą oraz węzła Marynarki Polskiej. Segment 28. Keller Polska Sp. z o.o., lipiec 2013.
- [7] Topolnicki M., Buca R.: Parametry eksploatacyjne i konstrukcyjne wybranego tunelu drogowego wraz z założoną technologią i bezpieczeństwem realizacji tunelu. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 1/2013.
- [8] Topolnicki M., Buca R.: Projektowanie i realizacja zabezpieczenia wykopu komory startowej TBM dla tunelu drogowego pod Martwą Wisłą. Seminarium IBDiM i PZWS „Głębokie wykopy 2013”. Warszawa, marzec 2013.
- [9] Topolnicki M.: Podchwytywanie i podnoszenie obiektów budowlanych za pomocą kontrolowanych iniekcji geotechnicznych. XXV konferencja naukowo-techniczna „Awaryjne budowlane”, Międzyzdroje 24-27 maja 2011 r., tom I.
- [10] Program Plaxis 3D Version 2011.01.
- [11] SOFiSTiK FEA Version 2012.
- [12] Program GGU-Retain do obliczeń stateczności i wymiarowania konstrukcji oporowych. GGU Software.

OFERUJEMY ZAMIESZCZANIE OGŁOSZEŃ NA ŁAMACH

„INŻYNIERII I BUDOWNICTWA”

Szczegółowe informacje pod adresem redakcji, tel./fax 22 629 69 86

www.inzynieriaibudownictwo.pl www.zgpzibt.org.pl