

BEATA ŚWIĄTEK

TS-26 – najdłuższy pozamiejski tunel drogowy w Polsce, realizowany w technologii NATM.

Studium przypadku

W artykule szczegółowo opisano uwarunkowania prawne, techniczne oraz geologiczne, z jakimi musieli zmierzyć się projektanci i wykonawcy tunelu TS-26, znajdującego się w ciągu drogi ekspresowej S3. Tunel, będący najdłuższym pozamiejskim tunelem drogowym w Polsce, został zrealizowany przy użyciu nowej metody austriackiej budowy tuneli (NATM), stosowanej w górnictwie. Projekt ten stanowił ogromne wyzwanie inżynierskie ze względu na skomplikowane warunki geologiczne oraz konieczność zapewnienia najwyższych standardów bezpieczeństwa. W artykule omówiono proces projektowania, w tym szczegółowe analizy geologiczne, oraz etapy realizacji tunelu, które obejmowały drążenie, wykonanie obudowy wstępnej i ostatecznej, a także instalację zaawansowanych systemów bezpieczeństwa. Tunel TS-26 jest kluczowym elementem infrastruktury drogowej, który znacząco poprawi komunikację w regionie oraz przyczyni się do rozwoju gospodarczego Dolnego Śląska.

Słowa kluczowe: tunel, drążenie i budowa tunelu, metoda górnicza drążenia tuneli

1. WSTĘP

Początek XXI wieku przyniósł w Polsce dynamiczny rozwój sieci komunikacyjnych i budownictwa infrastrukturalnego. Wraz z nimi zaczęła się rozwijać jego szczególna gałąź – budownictwo podziemne, pozwalające na bezkolizyjne prowadzenie dróg pod przeszkodami terenowymi.

Z sukcesem zrealizowano budowy kilkunastu tuneli drogowych, w tym tunelu pod Świną w Świnoujściu, tunelu pod Martwą Wisłą w Gdańsku, tunelu Emilia w Lalikach czy tuneli TS-26 i TS-32 w ciągu drogi ekspresowej S3, a kolejne m.in. w ciągu dróg ekspresowych S1 czy S19 są w realizacji.

Wśród technik drążenia tuneli obecnie najczęściej stosowane są: metody odkrywkowe, metody górnicze oraz metody specjalne (w tym coraz bardziej popularna w Polsce metoda tarczowa) [1]. Wybór metody drążenia zależy od wielu czynników, tj. warunków hydro- i geologicznych oraz parametrów charakterystycznych projektowanego tunelu, przede wszystkim długości i wymaganej skrajni, ale także instalacji i urządzeń wyposażenia tunelu.

Przykładem tunelu drążonego z wykorzystaniem metody górniczej jest tunel TS-26, który został oddany do użytku 31 lipca 2024 roku. Tunel wykona-

ny został z wykorzystaniem nowej metody austriackiej (ang. NATM, *New Austrian tunnelling method*, niem. NÖT, *Neue Österreichische Tunnelbaumethode*), sformułowanej w 1948 roku przez prof. Ladisława von Rabcewicza. Główną zaletą tej metody jest uniwersalność w odniesieniu do wymaganego kształtu wyrobiska i wymiarów jego przekroju. Cechą wspólną dla wszystkich metod górniczych drążenia tuneli jest etapowość prowadzenia prac, z głównym podziałem na drążenie i wykonanie obudowy wstępnej oraz wznoszenie obudowy ostatecznej zwanej również zasadniczą. Założeniem metody NATM jest to, aby ośrodek skalny był elementem nośnym i mógł swobodnie się odkształcać, a bieżące monitorowanie jego zachowania pozwala na dynamiczne dostosowanie do panujących warunków.

Podstawową zasadą technologii NATM jest dążenie do wykorzystania w możliwie jak największym stopniu efektu samonośności górotworu, będącego podstawowym elementem obudowy wstępnej. Aby spełnić ten warunek, kluczowe jest prawidłowe wykonanie wylomu pozwalające na wykorzystanie naturalnego rozkładu naprężeń [5].

Zależnie od cech ośrodka skalnego, korzystając z bieżącego monitoringu geotechnicznego (metoda obserwacyjna [2]), parametry elementów składowych

obudowy wstępnej, takie jak grubość warstwy betonu natryskowego (torkretu) wraz ze stopniem jego zbrojenia (siatkami stalowymi lub włóknami stalowymi), liczbę kotew skalnych czy rozstaw stalowych dźwigarów kratowych dobiera się do zastanych warunków lokalnych.

W dalszym etapie prac – tuż po zakończeniu drażenia, wykonaniu obudowy wstępnej i ustabilizowaniu osiadań – przystępuje się do konstruowania żelbetowej obudowy ostatecznej tunelu [5, 6].

2. CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU

Konstrukcja tunelu TS-26 składa się z dwóch naw głównych (długości ok. 2300 m), połączonych ośmioma ewakuacyjnymi przejściami poprzecznymi (w rozstawie co maks. 250 m) oraz jednym przejazdem awaryjnym zlokalizowanym w środku tunelu.

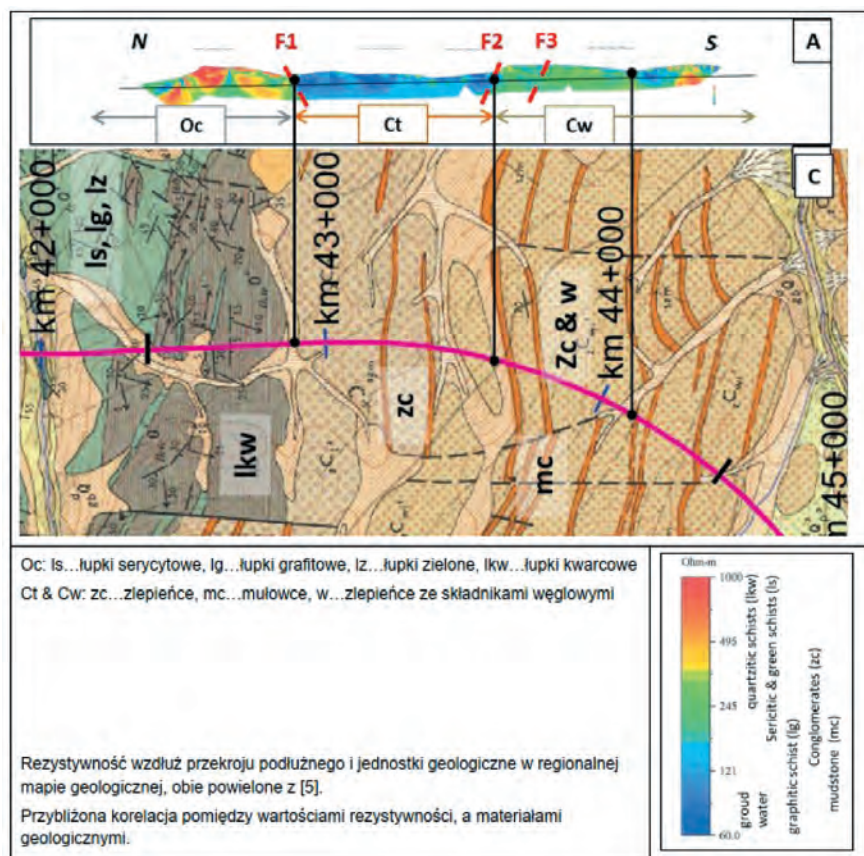
W każdej z naw tunelu wykonano punkty alarmowe – zaopatrzone w telefony alarmowe i gaśnice oraz nisze przeciwpożarowe, w których zlokalizowane są hydranty będące istotnym elementem zapewnienia bezpieczeństwa w tunelu. Ponadto tunel wyposażony

jest w szereg instalacji i systemów bezpieczeństwa, takich jak system oświetlenia awaryjnego, wentylacji wzdłużnej, wykrywania i sygnalizacji pożaru, monitoringu i detekcji, nadzoru i sterowania ruchem, komunikacji radiowej dla służb ratowniczych i porządkowych, nagłośnienia i telefonii dla obsługi, a także system automatycznego sterowania i zarządzania tunelami.

3. ZAŁOŻENIA PROJEKTOWE

Rozpoczęcie realizacji tunelu TS-26 poprzedziła analiza warunków geologicznych oraz opracowanie projektu wykonawczego. Obszar realizacji znajduje się na styku dwóch jednostek geologicznych: kompleksu metamorficznego Gór Kaczawskich na północy i osadów Obniżenia Śródsudeckiego na południu (rys. 1).

Na potrzeby opracowania modelu geologicznego wykonano 48 odwiertów badawczych na głębokości od 11 m do 70 m o łącznej długości ponad 1900 m. Ponadto wykonano 13 badań dylatometrycznych. W tym celu powstały trzy otwory wiertnicze.



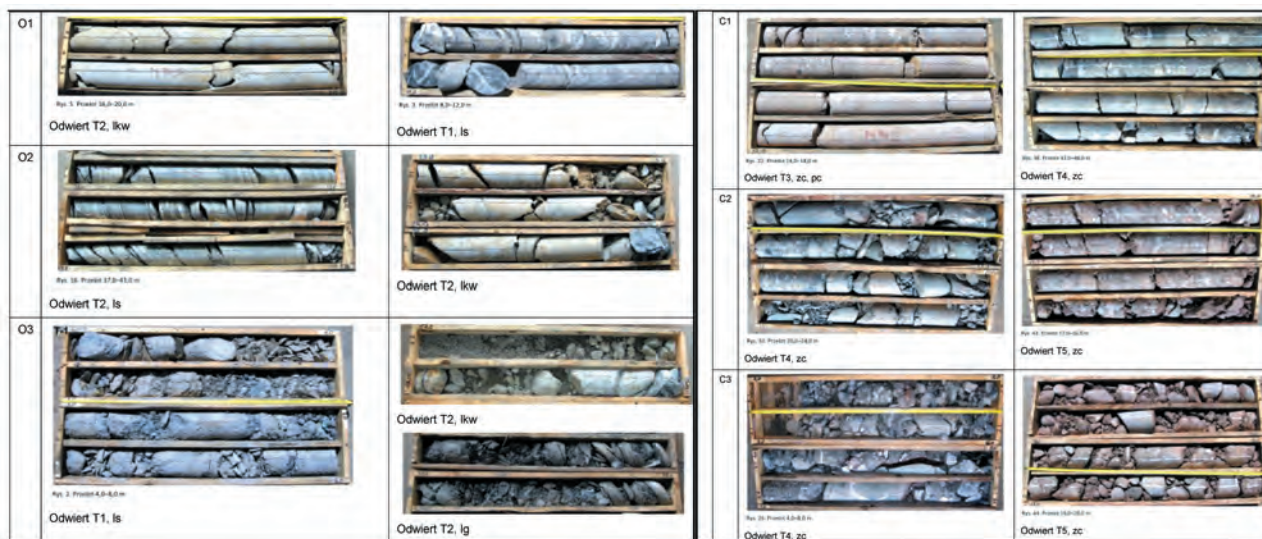
Rys. 1. Przekrój geologiczny – zarys ogólny [3] za [5]

Skały napotkane wzdłuż linii tras tunelu (od N do S) obejmowały łupki ordowickie (związane z Górami Kaczawskimi Oc) oraz zlepieńce karbonu, piaskowce i piaskowce szarogłazowe (zdeponowane w synorogennym Obniżeniu Ct i Cw). Po wykonaniu nowych badań rozszerzono definicję rodzajów gruntów dla podłoża skalnego i dostosowano ich wartości do odpowiednich właściwości charakterystycznych.

Bazując na nowych odwiertach oraz danych archiwalnych dostarczonych przez inwestora oraz dokumentacji regionalnej geologii przyjęto sześć rodzajów

gruntów – od O1 do O3 dla łupków ordowickich (jednostka Oc) i od C1 do C3 dla osadów karbonu (jednostki Ct/Cw = C*) (rys. 2, 3).

Na podstawie odwiertów badawczych oraz interpretacji pozyskanych danych powstał kompletny trójwymiarowy model geologiczny górotworu, wykorzystany do wszystkich dalszych obliczeń, w toku których wyznaczono cztery główne klasy obudowy wstępnej wyrobiska od klasy A, będącej najlżejszą klasą stosowaną w najkorzystniejszych warunkach gruntowych, po D – najcięższą klasę obudowy.



Rys. 2. Typowy wygląd rodzajów gruntów O1, O2 oraz O3 (po lewej), oraz C1, C2 i C3 (po prawej) w rdzeniach odwiertów [3]

Ground type Typ gruntu	Rock type Typ skały	Characteristics RQD Charakterystyczne RQD	Standard classification Standardowa klasyfikacja	Density Gęstość	Cohence Spójność	Fraction angle Kąt tarcia	Rockmass strenght Wytrzymałość górotworu	Deformation modulus Moduł deformacji	Elasticity modulus Moduł elastyczności	Poissons' ratio Współczynnik Poissona	At-rest earth pressure Ciśnienie gruntu w stanie spoczynku
GT		RQD [%]	GSI [-]	ρ [g/cm ³]	c [MPa]	ϕ [°]	UCS _{rm} [MPa]	D [GPa]	E [GPa]	v [-]	k ₀ [-]
O1	schist unit jednostka łupka	>50	40–55	2,6	1,500	30	5,2	3,0	6,0	0,25	0,33
O2		25–50	20–40	2,6	0,400	21	1,2	1,5	3,0	0,30	0,43
O3		<25	?20	2,5	0,150	14	0,4	0,3	0,6	0,35	0,54
SO		–	–	2,1	0,010	25	–	0,1	0,1	0,35	0,58
C1	conglomerate unit jednostka zlepieńca	>50	50–60	2,6	2,500	35	9,6	3,0	6,0	0,20	0,25
C2		25–50	35–50	2,6	1,200	35	4,6	1,2	2,4	0,25	0,33
C3		<30	15–35	2,5	0,020	35	0,1	0,2	0,4	0,35	0,43
SC		–	–	–	2,1	0,010	28	–	0,1	0,1	0,35

Rys. 3. Przyjęte rodzaje gruntu [3]

4. TECHNOLOGIA WYKONANIA, UWARUNKOWANIA PRAWNE I ETAPOWANIE PRAC

Podstawową zasadą nowej austriackiej metody budowy tuneli (NATM) jest dążenie do wykorzystania możliwie w jak największym stopniu efektu samonośności górotworu, będącego podstawowym elementem obudowy wstępnej. Aby to było możliwe, ważne jest, aby stale monitorować napotkane warunki gruntowe geologiczne oraz geotechniczne. Kluczowe jest prawidłowe wykonanie wyłomu pozwalające na wykorzystanie naturalnego rozkładu naprężeń. Jednocześnie ważne jest, aby sukcesywnie w miarę postępu prac wykonać obudowę wstępną z torkretu, zbrojonego (siatką lub włóknami stalowymi) [4].

Metoda NATM przewiduje budowę tunelu w dwóch podstawowych etapach:

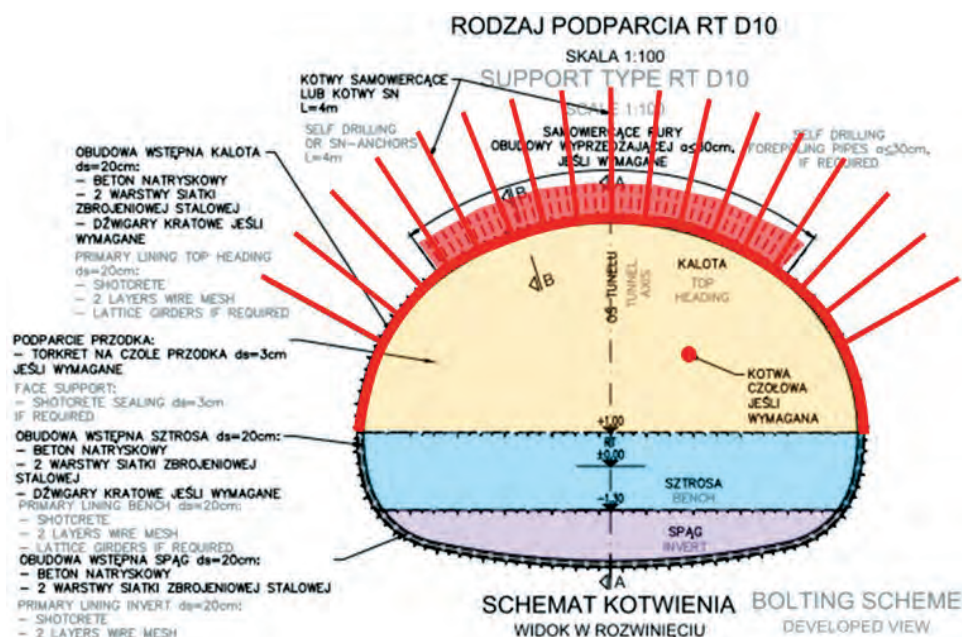
- drażnienie i wykonanie obudowy wstępnej (Prawo geologiczne i górnicze [8]),
- wykonanie obudowy ostatecznej (Prawo geologiczne i górnicze [8], Prawo budowlane [9]).

Mając na uwadze zapisy art. 2, ust. 1 Prawa budowlanego oraz art. 2, ust. 1, pkt 4 Prawa geologicznego i górniczego oraz wybraną metodę drażnienia z wykorzystaniem techniki górniczej, rozpoczęcie prac związanych z drażnieniem i wykonaniem obudowy wstępnej wyrobiska poprzedzone zostało utworzeniem zakładu górniczego, w ramach którego powołano kierownika ruchu zakładu, opracowano plan ruchu oraz strukturę organizacyjną. W następnym etapie plan ruchu zakładu został zatwierdzony decyzją dyrektora OUG.

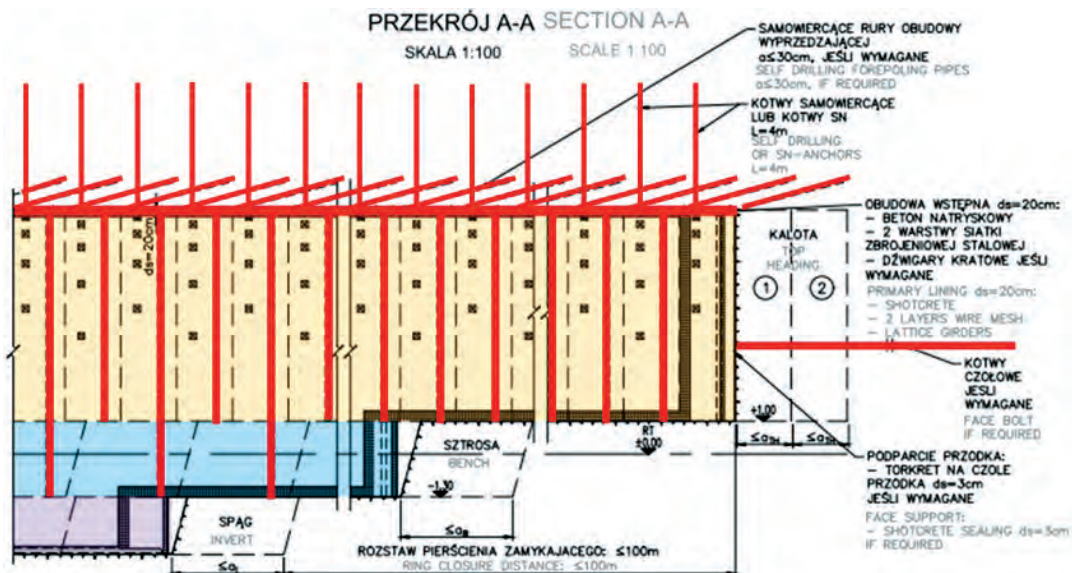
Ostatecznie drażnienie rozpoczęto 5 grudnia 2020 roku na portalu południowym w nawie wschodniej. Prace odbywały się w cyklach równoległe w czterech przodkach o powierzchni około 150 m² każdy, w systemie 24-godzinnym, siedem dni w tygodniu. Długości cykli (zabiorów) oraz dobór klasy podparcia uzależnione były od napotkanej geologii. Wyróżniono cztery podstawowe klasy (od najłżejszej A, wykorzystywanej w najkorzystniejszych warunkach gruntowych do D – najcięższej) podparcia oraz cztery podklasy w ramach każdej z klas głównych (10–40), (rys. 4–6).

Pierwszym etapem było wiercenie otworów strzałowych (rys. 7), następnie zakładano ładunki materiałów wybuchowych (rys. 8), następował odstrzał i wywóz urobku. Niezwłocznie zabezpieczano wyrobisko, wykorzystując dźwigary kratowe, siatki stalowe i beton natryskowy (rys. 9). W trakcie prac prowadzono stały monitoring geologiczny (rys. 10) i geotechnicznych (rys. 11), pozwalający na bieżącą ocenę napotkanych warunków gruntowych i właściwy dobór klasy podparcia.

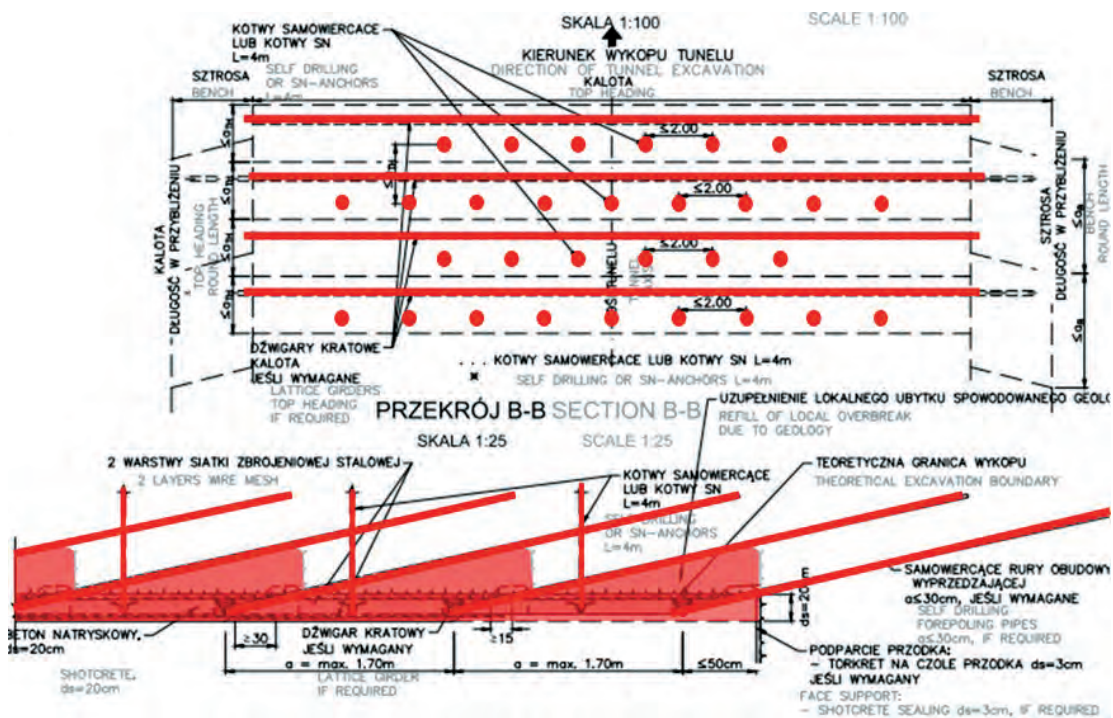
W przypadku napotkania niekorzystnych warunków geologicznych, blokowego charakteru górotworu i konieczności stabilizacji wyrobiska i zapewnienia bezpieczeństwa pracowników zabudowane były również kotwy skalne w czole przodka, a także – w przypadku słabych warunków gruntowych – rury obudowy wyprzedzającej, których ilość i rozmieszczenie uzależnione były od zastosowanej klasy obudowy. Drażnienie obu naw tunelu oraz wykonanie obudowy wstępnej zakończyło się przebiciem 22.02.2022 roku.



Rys. 4. Klasa podparcia D10, przekrój podziału wyrobiska wraz elementami obudowy wstępnej [3]



Rys. 5. Klasa podparcia D10, przekrój A-A podziału wyrobiska wraz elementami obudowy wstępnej [3]



Rys. 6. Klasa podparcia D10, schemat kotwienia – rozwinięcie [3]



Rys. 7. Wiercenie otworów strzałowych [3]

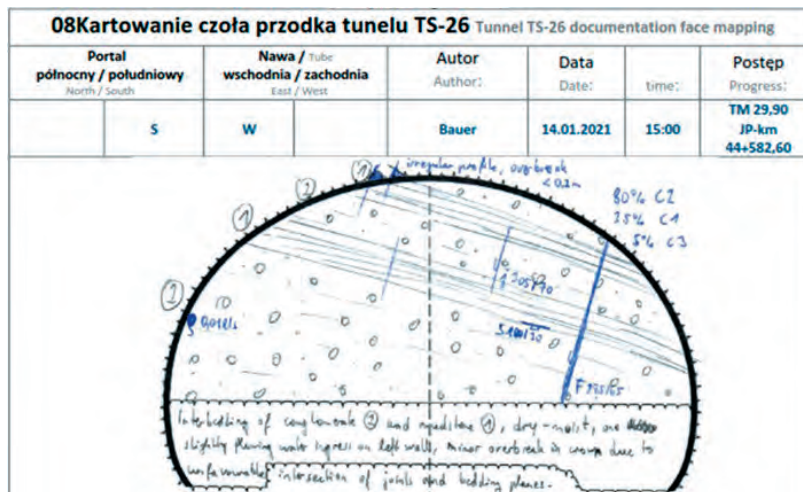


Rys. 8. Zakładanie materiałów wybuchowych [3]



Rys. 9. Wykonanie obudowy wstępnej (tu: montaż kotwi skalnych) [3]

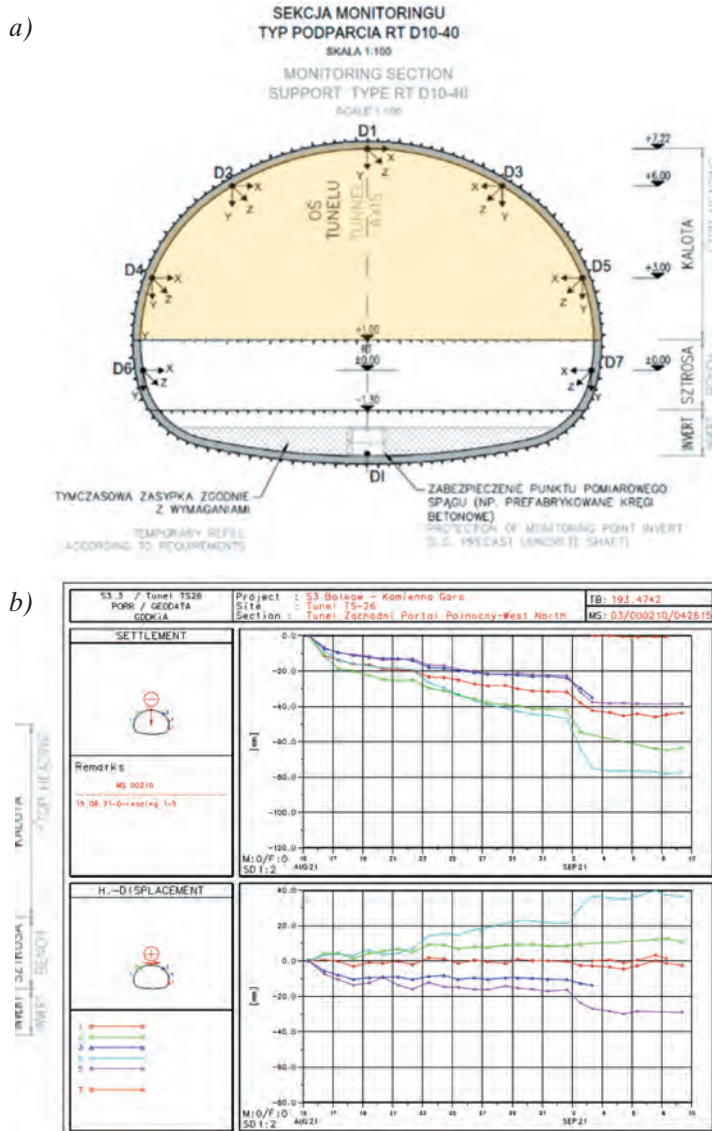
a)



b)



Rys. 10. Monitoring geologiczny: a) dokumentacja geologiczna kartowania czoła przodka; b) dokumentacja fotograficzna [3]



Rys. 11. Monitoring geotechniczny: a) rozmieszczenie sekcji monitoringu; b) raport geotechniczny [3]

Kolejny etap prac poprzedzony był sukcesywnym przekazywaniem tunelu przez kierownika ruchu zakładu górniczego – kierownikowi budowy. W tym czasie dokonano demontażu urządzeń i instalacji górniczych oraz

wykonano warstwę wyrównawczą z torkretu niezbrojonego na całym łuku wyrobiska. Przygotowano również drogę technologiczną z betonu wałowanego (rys. 12) na całej długości obu naw tunelu oraz instalacje technologiczne.



Rys. 12. Tunel po zakończeniu drążenia, wykonaniu warstwy wyrównawczej z torkretu oraz drogi technologicznej [3]

Przed rozpoczęciem prac zasadniczych związanych z realizacją żelbetowej obudowy ostatecznej wykonano żelbetowe płyty spągowe w sekcjach, gdzie parametry górotworu były niekorzystne, oraz żelbetowe fundamenty (przyczółków) bloków obudowy ostatecznej tunelu, które posłużyły również jako fundamenty dla torowiska bramownic technologicznych – izolacyjnej, zbrojarskiej, szalunkowej oraz naprawczej.

W następnym kroku wykonano warstwę hydroizolacji składającej się z geowłókniny oraz zgrzewanej membrany PVC (rys. 13), a także drenaż ścian bocznych osadzony w warstwie betonu filtracyjnego.

W kolejnym etapie rozpoczęto montaż zbrojenia obudowy ostatecznej przy użyciu bramownic zbrojarskich wyposażonych w podnośniki platformowe ułatwiające przemieszczanie pakietów zbrojarskich. Prace betoniarskie rozpoczęły się 8 maja 2022 roku wykonaniem pierwszego bloku obudowy ostatecznej tunelu, poza drażonym odcinkiem, w sekcji odkrywkowej na portalu północnym. Każdy z segmentów obudowy

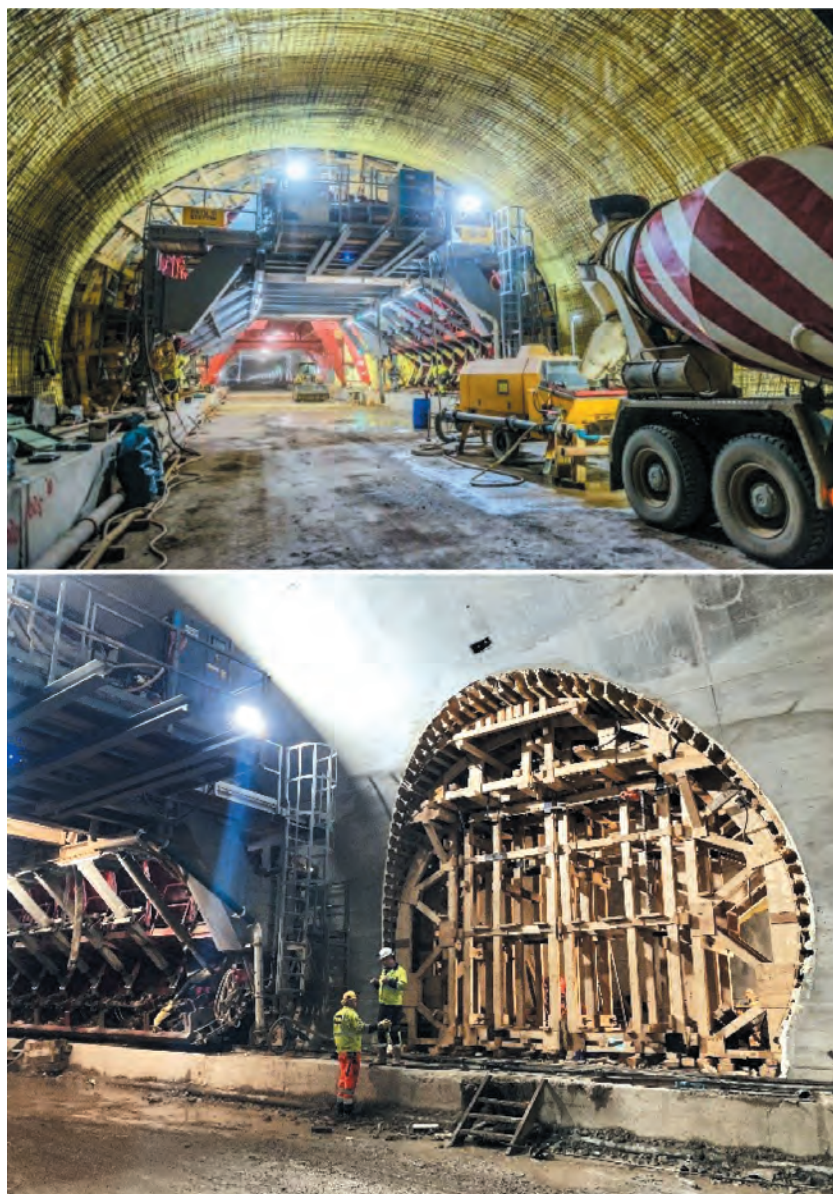
ostatecznej miał długość 12,5 m, łącznie na całej długości obu naw tunelu wykonano ich 369 sztuk. Pierwszy z bloków obudowy ostatecznej wyrobiska powstał 29 maja 2022 roku, a wszystkie prace związane z wykonaniem obudowy ostatecznej naw głównych tunelu, a także przejść poprzecznych, przejazdu awaryjnego oraz nisz utrzymaniowych, przeciwpożarowych i punktów alarmowych zakończone zostały 356 dni później. Układanie mieszanki betonowej z wykorzystaniem bramownicy szalunkowej wyposażonej w system rurociągów przedstawia rysunek 14.

Realizacja wszystkich prac związanych z wykonaniem obudowy ostatecznej pochłonęła ponad 100 tys. m³ betonu, produkowanego w węźle betoniarskim na placu budowy.

Finalizacja prac nie kończyła jednak realizacji obiektu. W dalszych krokach wykonano żelbetowe kapy chodnikowe wraz z kanalizacją kablową, warstwy drogowe, instalacje i systemy bezpieczeństwa oraz sterowania ruchem.



Rys. 13. Wykonanie hydroizolacji: warstwa ochronna z geowłókniny, membrana PVC [3]



Rys. 14. Montaż zbrojenia i bramownica szalunkowa [3]

5. PODSUMOWANIE

Technologia NATM jest metodą bardzo elastyczną i z uwagi na swoją sekwencyjność, dającą możliwość stałego dostosowywania do zróżnicowanych, niekiedy skomplikowanych warunków hydrogeologicznych, gdzie prognozowanie parametrów górotworu jest utrudnione.

Jednakże nie jest ona metodą doskonałą, wymaga rzetelnej organizacji placu budowy, zapewnienia ciągłości dostaw i utrzymania ruchu, a przede wszystkim – dużej koordynacji i współpracy międzybranżowej podczas prowadzenia prac. Każdy etap budowy musi być precyzyjnie zaplanowany i skoordynowany, aby zapewnić bezpieczeństwo i efektywność realizacji projektu.

Budowa tunelu TS-26 jest doskonałym przykładem współpracy dwóch ważnych dziedzin inżynierii: górnictwa i budownictwa, ale także geologów i geodetów. Projekt ten pokazuje, jak istotna jest integracja wiedzy i doświadczenia z różnych dziedzin, aby sprostać wyzwaniom technicznym i logistycznym. Dzięki zaangażowaniu i współpracy wielu specjalistów możliwe było zrealizowanie tego ambitnego projektu.

Podsumowując, tunel TS-26 nie tylko stanowi ważny element infrastruktury drogowej, ale także jest przykładem nowoczesnych technologii i efektywnej współpracy inżynierskiej.

Literatura

- [1] Furtak K., Kędracki M.: *Podstawy budowy tuneli*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2005.
- [2] Eurokod 7 (EC 7, EN 1997): *Projektowanie geotechniczne*.

- [3] Dokumentacja projektowa i wykonawcza dla zadania: „Zaprojektowanie i wybudowanie drogi S3 Legnica (A4) – Lubawka, zadanie III od węzła Bolków (bez węzła) do węzła Kamienna Góra Północ (bez węzła), o dł. ok. 16,1 km”.
- [4] ÖGG Austriackie Stowarzyszenie Geomechaniki: Wytuczne do projektowania i wykonawstwa sekwencyjnie drażonych tuneli.
- [5] Galler R., Schneider E., Bonapace P., Moritz B., Eder M.: *The new guideline NATM – The Austrian Practice of Conventional Tunneling*. BHM Berg- und Huetttenmaennische Monatshefte, Nr 154, 2009, s. 441–449, <https://doi.org/10.1007/s00501-009-0503-9>.
- [6] Maidl B., Thewes M., Maidl U.: *Handbook of Tunnel Engineering*. Volume I: Structures and Methods, Ernst & Sohn, 2013.
- [7] Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. – Prawo geologiczne i górnicze, Dz.U. 2024, 1290.
- [8] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane, Dz.U. 2024, 725.

mgr inż. Beata Świątek
beata.swiatek@porr.pl

PORR S.A.
ul. Hołubcowa 123
02-854 Warszawa