



MACIEJ KIENIEWICZ

Główny Projektant Tunelu
Transprojekt-Warszawa Sp. z o.o.
mkieniewicz@transprojekt.pl

Tunel drogowy pod Ursynowem w ciągu drogi ekspresowej S-2 jako kluczowy element Południowej Obwodnicy Warszawy

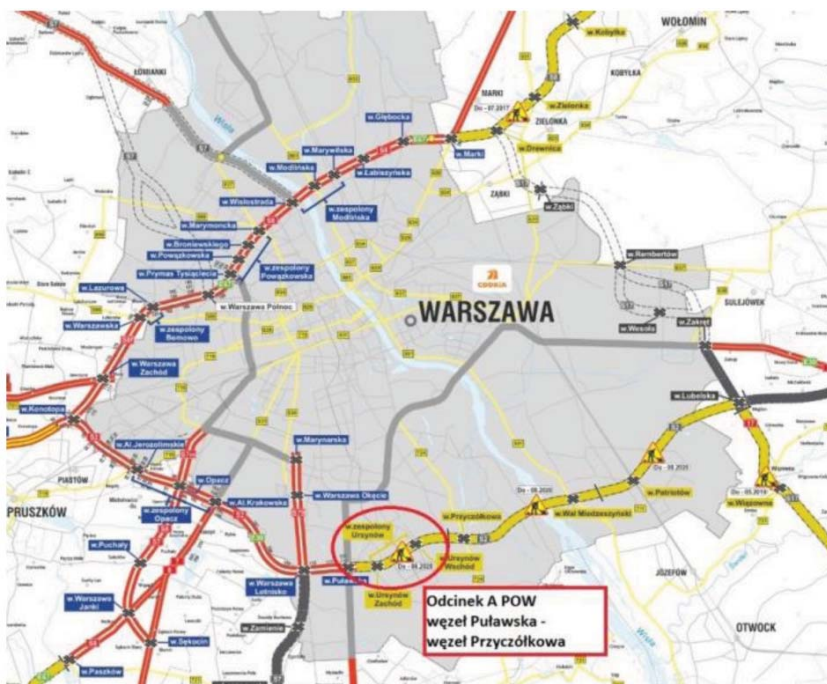
Zgodnie ze starym porównaniem powtarzającym wśród projektantów mostowych, obiekty inżynierskie są jak perły nawleczone na wstęgę drogi. W przypadku omawianego poniżej obiektu można

śmiało powiedzieć, że mamy do czynienia z diamentem na ekspresowym ringu obwodnicy Warszawy. Mowa o najdłuższym obecnie tunelu drogowym w kraju, tunelu pod Ursynowem o długości 2335 m, stanowiącym kluczowy element na 34 km odcinku Południowej Obwodnicy Warszawy [POW]. Jednak nie sama długość obiektu świadczy o jego wyjątkowości. Zastosowane rozwiązania projektowe, począwszy od konstrukcji tunelu, poprzez liczne systemy bezpieczeństwa, aż do systemów zarządzania ruchem drogowym, sięgające na odległość do 50 km od Warszawy, były projektowane jako pierwsze rozwiązanie o tej skali złożoności w kraju.

POW od węzła Konotopa do węzła Lubelska jest elementem ekspresowej obwodnicy Warszawy, łącząc zachodni

i wschodni odcinek autostrady A2 z drogami ekspresowymi, doprowadzającymi ruch samochodowy do aglomeracji warszawskiej: S7, S8, S17. Zrealizowany ostatnio odcinek drogi usprawnił również ruch wewnątrzaglomeracyjny w południowej części Warszawy. Dodatkowo ekspresowy ring warszawski ma znaczenie ponadregionalne w europejskim ruchu tranzytowym na kierunku wschód-zachód i będzie je pełnił do czasu oddania do ruchu Obwodnicy Aglomeracyjnej Warszawy. Prognozowane na etapie projektowania natężenie ruchu w tunelu na rok 2035 dochodzi do 4800 poj/h w jednym kierunku.

Tunel został wykonany w ramach zadania obejmującego realizację odcinka POW od węzła Puławska (bez węzła) do węzła Przyczółkowa (bez węzła) o długości 4,6 km. Inwestycja była realizowana w formule „projektuj i buduj”. Postępowanie przetargowe zostało rozpoczęte w 2013 r., a umowa o wartości ponad 1,2 mld zł brutto z Głównym Wykonawcą, włoską firmą Astaldi, została podpisana w grudniu 2015 r. Za opracowanie kompleksowej dokumentacji projektowej odpowiedzialne było warszawskie biuro projektowo-badawcze Transprojekt-Warszawa Sp. z o.o.



Rys. 1. Lokalizacja inwestycji na tle ekspresowej obwodnicy Warszawy (mapa GDDKiA)



Rys. 2. Schemat odcinka A POW (fragm. projektu)



Rys. 3. Plan sytuacyjny odcinka A POW (fragm. projektu)

Lokalizacja tunelu

Odcinek „A” POW zlokalizowany jest na terenie miasta stołecznego Warszawy. Przebieg tunelu w kierunku wschód-zachód przez tereny zurbanizowane, przez ścisłe centrum dzielnicy mieszkaniowej. Na budowanym odcinku bezpośrednio przed portalami tunelu zlokalizowane są dwa węzły drogowe: Ursynów Wschód i Ursynów Zachód.

Budowa drogi tranzytowej w tej lokalizacji była przewidziana w planach rozwoju miasta od wielu lat. Wzdłuż pla-

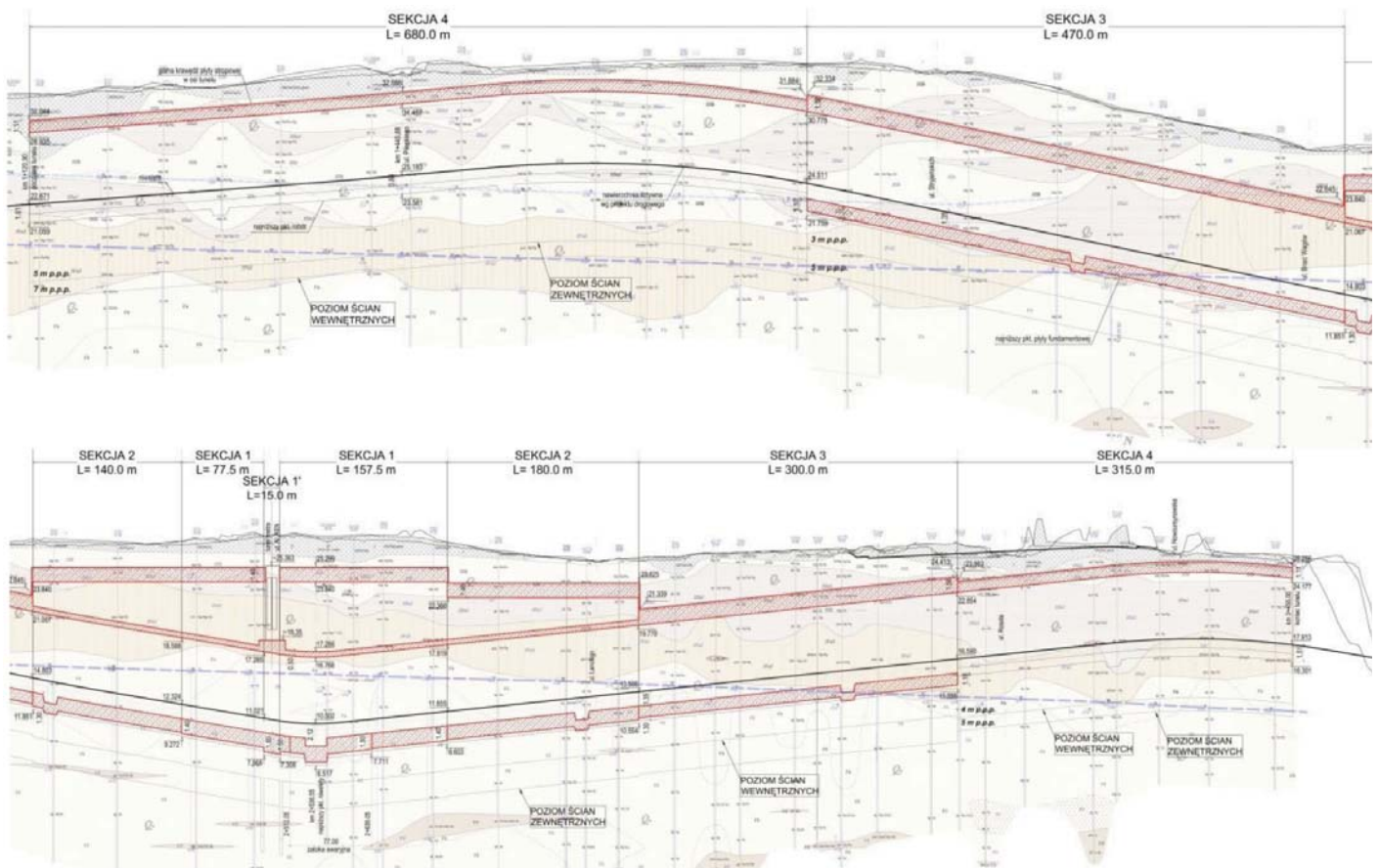
nowanej trasy, w pasie szerokości ok. 100 m nie były lokalizowane żadne trwałe budowle, natomiast okoliczne tereny zabudowane zostały wielorodzinnymi budynkami mieszkalnymi budowanymi na przestrzeni ostatnich 40 lat. Zarówno po prawej, jak i lewej stronie trasy, występuje zabudowa wielorodzinną, wysokość budynków jest zróżnicowana, od 4 do 16 kondygnacji. W większości są to osiedla z lat 70–80 XX wieku. Poza układem dróg miejskich, teren zarezerwowany na planowany tunel był niezagospodarowany i zajęty był głównie przez prowizoryczne parkingi. W poprzek planowanego tunelu drogowego w latach 80 XX wieku wybudowano tunel metra linii M1.



Fot. 1. Konstrukcja tunelu na tle zagospodarowania terenu sprzed budowy (podkład mapowy Google Earth)

Warunki gruntowe

Projektowany obiekt położony jest w obrębie niecki warszawskiej, wykształconej w czwartorzędzie przez procesy geomorfologiczne. Głębokie podłoże budują skały mezozoiczne – jury i kredy, tworzące charakterystyczne nieckowate zagłębienie. Na nich zalegają osady pliocenские przykryte osadami czwartorzędowymi. Podłoże osadów czwartorzędowych stanowią osady pliocenu wykształcone w postaci „pstrych” iłów i iłów pylastych. Powierzchnia stropu osadów pliocenu (zarazem spągu czwartorzędowego) wykazuje znaczne deniwelacje spowo-



Rys. 4. Przekrój podłużny tunelu z warunkami gruntowymi (fragm. projektu)

dowane procesami glaciektonicznymi, które doprowadziły do wypiętrzenia i pofałdowania osadów plioceńskich podczas kolejnych zlodowaceń, a następnie długotrwałymi procesami erozyjnymi związanymi z okresami interglacjalów. Na utworach pliocenu zalegają osady czwartorzędowe, z których zbudowane są obecne jednostki geomorfologiczne. Bezpośrednio pod powierzchnią terenu występują głównie grunty antropogeniczne piaszczysto-gliniaste, z domieszkami gruzu i kamieni, o zróżnicowanej miąższości. Pod nasypami bądź bezpośrednio pod powierzchnią terenu, występują piaszczyste osady wodnolodowcowe stadiału Warty, wykształcone w postaci piasków drobnych i pylastych, lokalnie zaglinionych oraz piasków średnich i grubych. Poniżej serii osadów wodnolodowcowych nawiercono pakiet gruntów spoistych, których strop wykazuje znaczne zróżnicowanie i lokalnie pojawiają się bezpośrednio pod nasypami. Osady te wykształciły się głównie w postaci glin zwałowych i piasków gliniastych brązowych i brązowo-szarych stadiału Warty oraz szarych i ciemnoszarych glin stadiału Odry. Poniżej występuje seria osadów fluwioglacjalnych wykształconych w postaci piasków różnej granulacji z domieszkami żwiru i otoczków oraz w postaci żwirów i pospółek. Pod osadami czwartorzędowymi budującymi obszar wysoczyzny polodowcowej w rejonie projektowanego tunelu stwierdzono występowanie utworów pliocenu, wykształconych w postaci utworów ilastych. Powierzchnia stropu osadów pliocenu wykazuje znaczne deniwelacje spowodowane procesami glaciektonicznymi i erozyjnymi. Od wschodu wysoczyznę

polodowcową ogranicza wysoka krawędź, tzw. Skarpa Warszawska opadająca stromo do poziomu niższego tarasu nadzalewowego Wisły.

W podłożu stwierdzono występowanie dwóch poziomów zawieszonych wód podziemnych oraz poziomu zasadniczego będącego jednocześnie Głównym Użytkowym Piętnem Wodonośnym. Pierwszy poziom zawieszony wód podziemnych jest nieciągły i posiada charakter okresowy. Drugi poziom zawieszony wód podziemnych stwierdzono na całej długości tunelu na głębokości od 7,0 do 12 m ppt. Jest to poziom wykazujący ciągłość zwierciadła wody, głównie o zwierciadle swobodnym, występujący nad stropem glin zwałowych. Poziom ten jest dużo bardziej zasobny niż I poziom wodonośny i wykazuje cechy stałego poziomu wodonośnego. Zasilanie tego poziomu odbywa się przez infiltrację opadów atmosferycznych poprzez warstwy nadległe oraz wyższe poziomy zawieszony. Jak wskazuje układ hydroizohips tego poziomu, przepływ wód podziemnych odbywa się tu w kierunku wschodnim w kierunku rzeki Wisły. Poziom zasadniczy wód podziemnych, będący jednocześnie Głównym Poziomem Użytkowym, nawiercono w każdym wykonanym otworze badawczym. Poziom ten występuje pod ciągłą warstwą glin zwałowych o zmiennej miąższości od 2 m do nawet 14 m. Na odcinku tunelowym stwierdzono występowanie lustra wody o charakterze naporowym. Lustro wody nawiercono tu na głębokości od 13,5 do 20,0 m ppt, lustro wody ustabilizowało się na głębokości 9,5–17,5 m ppt. Maksymalna różnica między poziomem

nawierconym i ustabilizowanym wynosi średnio 4 m. Porównując otwory archiwalne – zarówno poziomy zawieszony, jak i poziom zasadniczy wód podziemnych, wykazują dużą okresową zmienność w położeniu zwierciadła wody, a w przypadku poziomów zawieszonych również zmienność w miejscu ich występowania.

Po analizie warunków gruntowo wodnych, Projektant we współpracy z personelem Wykonawcy zdecydowali, że najbardziej korzystne pod względem czasowym, jak i finansowym będzie realizowanie robót tunelowych po obniżeniu zasadniczego poziomu wód gruntowych. W tym celu poziom wód należało obniżyć o około 8,0 m. Zaprojektowano zainstalowanie 22 studni, które ze względu na dostępność terenu znajdowały się po jednej stronie budowanego tunelu. Na podstawie obliczeń założono wydajność systemu 300 l/s. W trakcie robót maksymalnie pompowano do 250 l/s. Woda była odprowadzana tymczasowym rurociągiem do odbiornika naturalnego na terenie Wilanova. Zasięg leja depresji wynosił do 400 m.

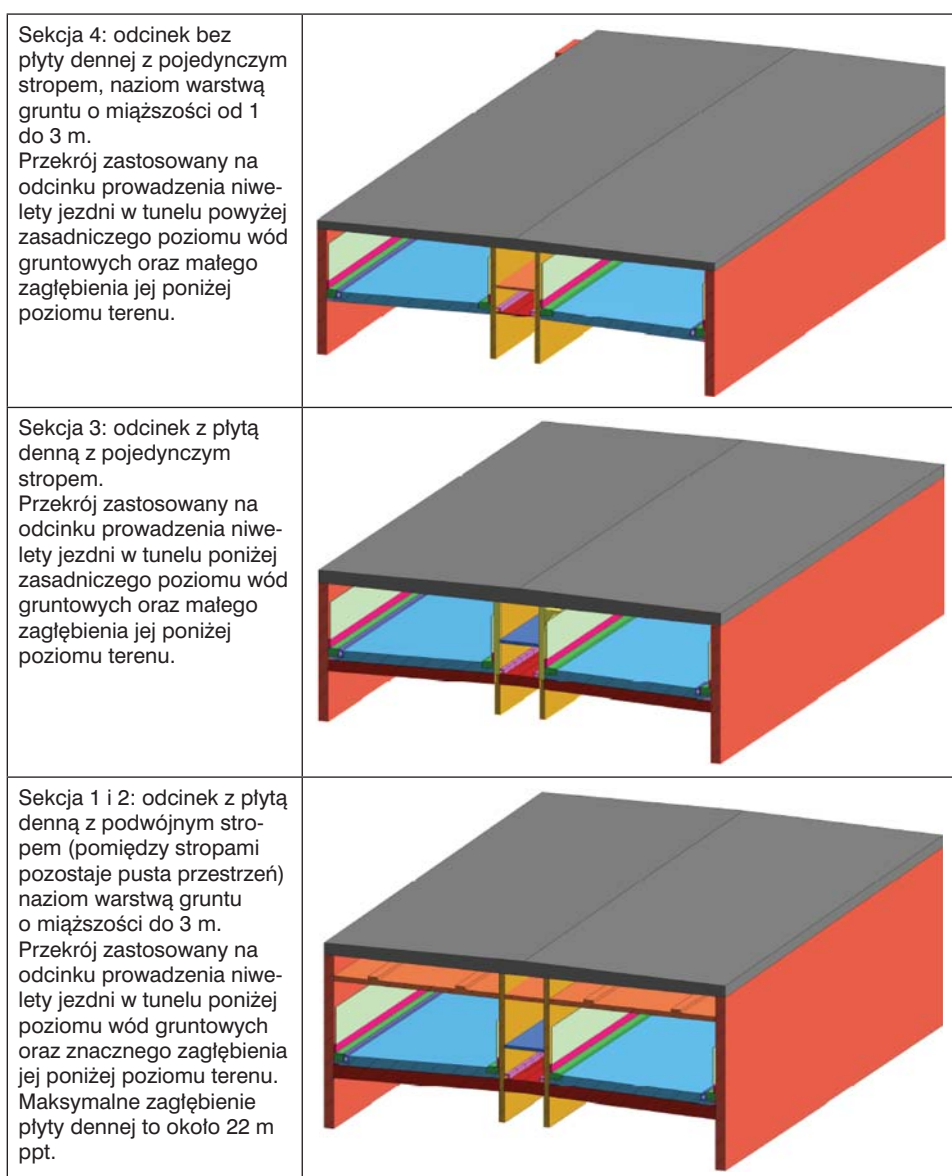
Założenia projektowe

Tunel został zaprojektowany przy założeniu jego zrealizowania metodą podstropową, polegającą na kolejnym wykonaniu ścian konstrukcyjnych tunelu (ściany szczelinowe), płyty stropowej na gruncie oraz usunięciu gruntu między ścianami do poziomu spodu dolnej warstwy konstrukcyjnej drogi. W przekroju poprzecznym tunel składa się z 3 naw, a całkowita szerokość szlakowa konstrukcji to 41,2 m (na odcinku zatok awaryjnych szerokość konstrukcji dochodzi do 50 m). Każdy z kierunków ruchu znajduje się w oddzielnej nawie o szerokości w świetle 17,0 m. W obydwu nawach znajdują się trzy pasy ruchu po 3,5 m każdy, pas awaryjny 3,5 m (rezerwa na utworzenie w przyszłości czwartego pasa ruchu) oraz dwustronne drogi ewakuacyjne po 1,0 m. W środku, pomiędzy nawami głównymi, zlokalizowana jest nawa technologiczna z kanałami wentylacyjnymi o szerokości 4,0 m w świetle ścian. Konstrukcję nośną tunelu stanowi rama żelbetowa, składająca się ze ścian szczelinowych grubości 0,8/1,0 m (ściany zewnętrzne) i 0,6 m (ściany środkowe) połączonych monolitycznie z rygłem płytowym, żelbetowym o zmiennej grubości od 0,8 do 1,55 m. Prowadzenie wysokościowe niwelety tunelu było uwarunkowane koniecznością przeprowadzenia drogi ekspresyjnej

pod tunelem metra linii M1. Ze względu na formułę kontraktu „projektuj i buduj” kierunki projektowania określił na wstępie Generalny Wykonawca. Przede wszystkim wszelkie rozwiązania projektowe były oceniane pod kątem technologii ich wykonania. Dodatkowo, w przypadku odcinka na skrzyżowaniu tuneli, głównym priorytetem było bezpieczeństwo konstrukcji na każdym etapie realizacji robót budowlanych, a koszt rozwiązań był sprawą drugorzędną (sytuacja niespotykana na kontraktach projektuj buduj). Natomiast dla pozostałej części tunelu główny nacisk położony był na zastosowaniu optymalnych rozwiązań pod kątem szybkości prowadzenia prac budowlanych z jednoczesnym trymowaniem pod kontrolą współczynników zużycia materiałów.

Odcinek zasadniczy tunelu

Zgodnie z oczekiwaniem Wykonawcy, konstrukcja tunelu drogowego została zoptymalizowana w dostosowaniu do:

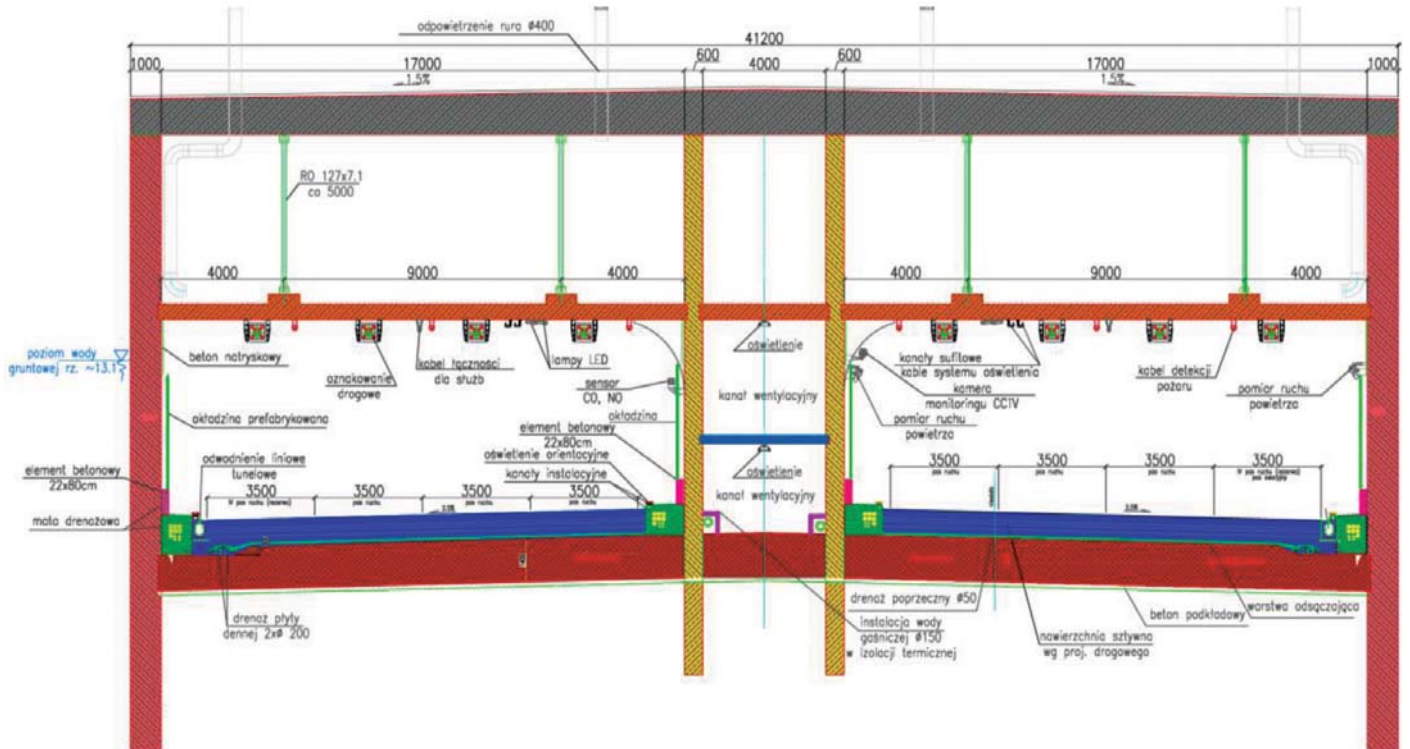


Rys. 5. Grafiki – fragm. projektu

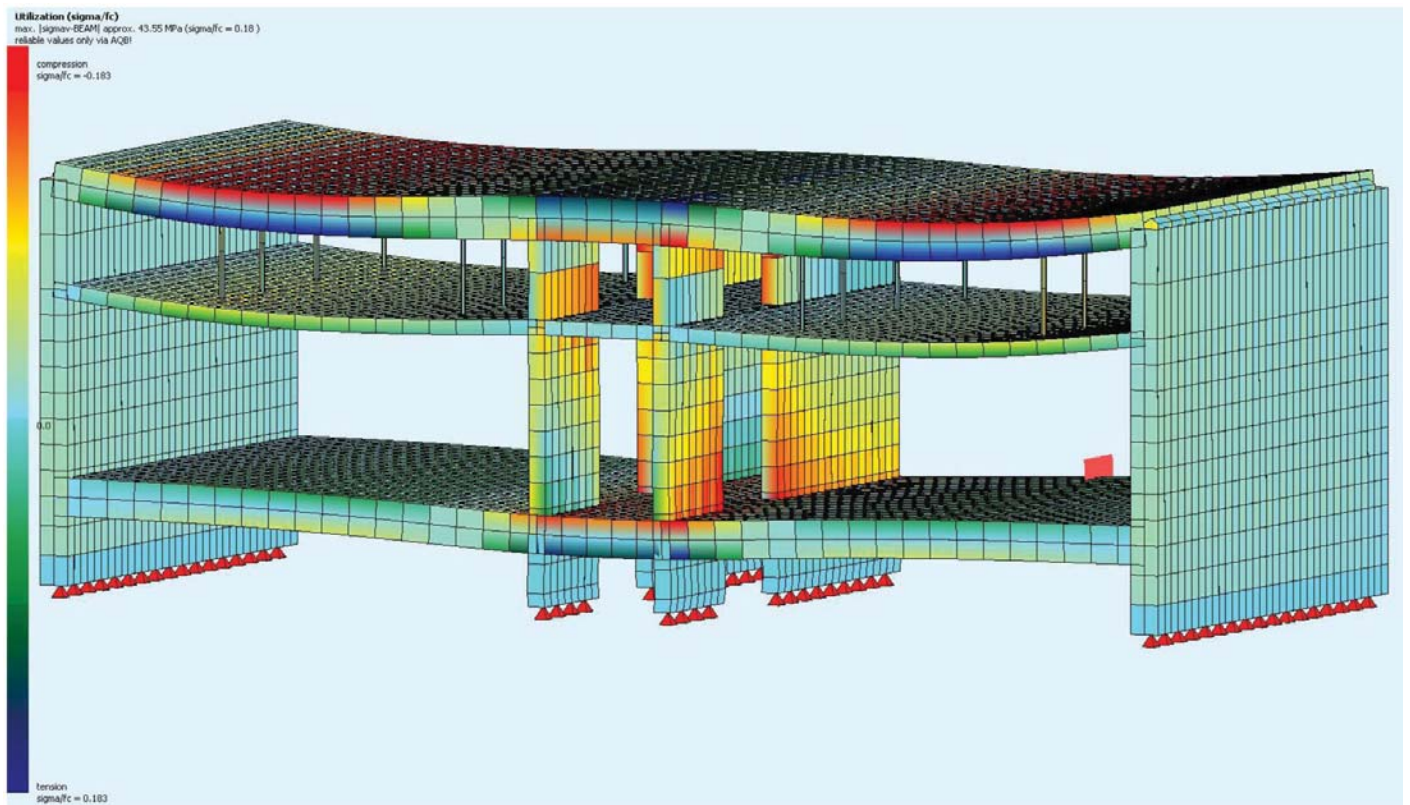
- zagłębienia poniżej poziomu terenu,
- poziomu wód gruntowych.

Wspólnie z projektantami drogowymi szukano rozwiązania pozwalającego na maksymalne wypłycenie konstrukcji,

co ograniczało zakres konieczności zagłębienia konstrukcji poniżej poziomu wód gruntowych. Przy uwzględnieniu tych czynników zaprojektowano trzy podstawowe typy (sekcje) konstrukcji.



Rys. 6. Przekrój normalny tunelu w sekcji ze stropem pośrednim – sekcja 1 i 2 (fragm. projekt)



Rys. 7. Model obliczeniowy dla jednego z segmentów (fragm. projektu)

W trakcie całego procesu projektowego Projektant ściśle współpracował z Wykonawcą, koordynując zastosowane rozwiązania projektowe z oczekiwaniami realizacyjnymi, w celu usprawnienia procesu budowy. Jednym z zagadnień było podzielenie tunelu na niezależne segmenty realizacyjne, pozwalające na prowadzenie prac jednocześnie na różnych odcinkach obiektu w zależności od dostępności terenu. W szczytowym etapie prac na budowie pracowało jednocześnie 7 zestawów do głębinienia ścian szczelinowych. Całość tunelu podzielono zatem na 55 segmentów o długościach od 11,35 m do 55,95 m. Podział wynikał z uwarunkowań realizacyjnych (np. etapowanie przekładania ruchu na drogach poprzecznych) oraz z uwarunkowań technologicznych w celu ograniczenia wartości skurczu na krawędziach płyt do poziomu akceptowalnego z jednoczesnym ograniczeniem ilości dylatacji w konstrukcji. Dla każdego segmentu wykonano model obliczeniowy dla analizy statyczno-wytrzymałościowej elementów nośnych konstrukcji: płyty i węzły. Dodatkowo oddzielnie modelowano ściany szczelinowe, uwzględniając oddziaływanie z modelem całego segmentu. W obliczeniach różnicowano wartość naziomu gruntu dla każdego segmentu, w celu optymalnego zaprojektowania konstrukcji pod względem zużycia ilości zbrojenia.

Kolejnym zagadnieniem realizacyjnym uwzględnionym w dokumentacji na etapie projektowania był sposób betonowania płyt tunelu. Płyta stropu zasadniczego oraz płyta stropu pośredniego miały być betonowane w całości sekcjami zgodnie z podziałem na segmenty realizacyjne. W stykach dylatacyjnych sekcji zastosowano uszczelnienia zapewniające szczelność płyty stropu zasadniczego bądź uszczelnienie przeciwpożarowe w stykach stopu pośredniego. Zgoła inne podejście projektanci zastosowali przy projektowaniu płyty dennej chroniącej tunel przed napływem wód gruntowych. Ze względu na konieczność zapewnienia szczelności elementu zrezygnowano z przerw dylatacyjnych i wykonano płytę ciągłą o długości 1340 m. Do betonowania elementu o takich gabarytach zaprojektowano podział płyty na pola betonowania z określeniem wymaganych odstępów czasowych pomiędzy betonowaniami sąsiednich pól, kolejnością domknięcia segmentów oraz wymaganą ilością dozbrojenia w stykach. Dodatkowym utrudnieniem był harmonogram, gdyż ze względów czasowych nie było możliwości betonowania płyty dennej w optymalnej kolejności po wykonaniu całości wykopu podstropowego. Z tego względu płyta była betonowana sukcesywnie, zgodnie z postępem robót ziemnych, zaczynając z kilku punktów jednocześnie. Oczywiście, ponieważ budowa to „organizm żywy”, kolejność betonowań była kilkakrotnie zmieniana a projektant każdorazowo wykonywał korekty w projekcie betonowania płyty dennej.

Podsumowanie konstrukcji tunelu w liczbach:

- wykopy 1 300 000 m³

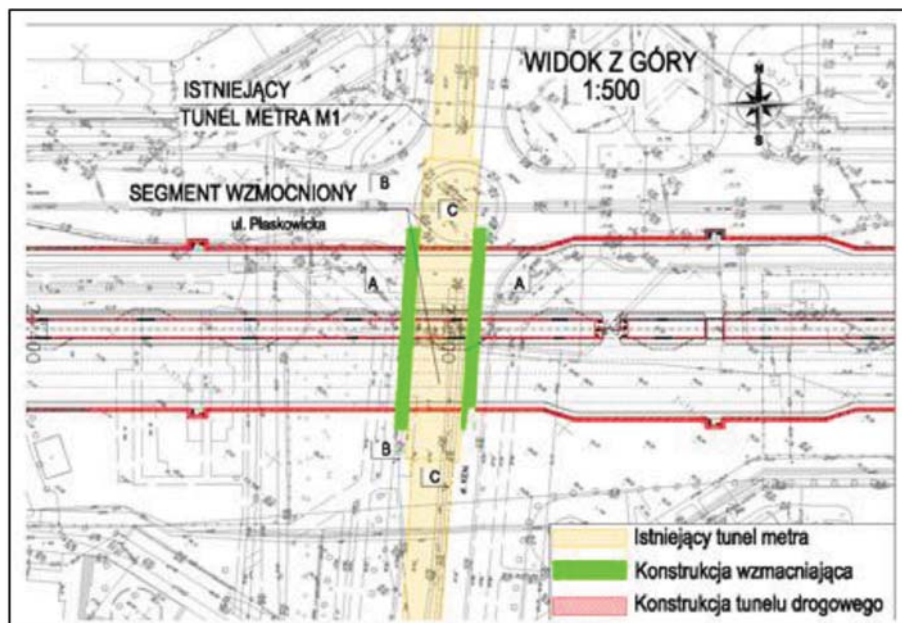
- zasypania stropu 370 000 m³
- powierzchnia ścian szczelinowych 125 000 m²
- beton konstrukcyjny 295 000 m³
- stal zbrojeniowa 32 313 ton.

Projekt skrzyżowania tuneli

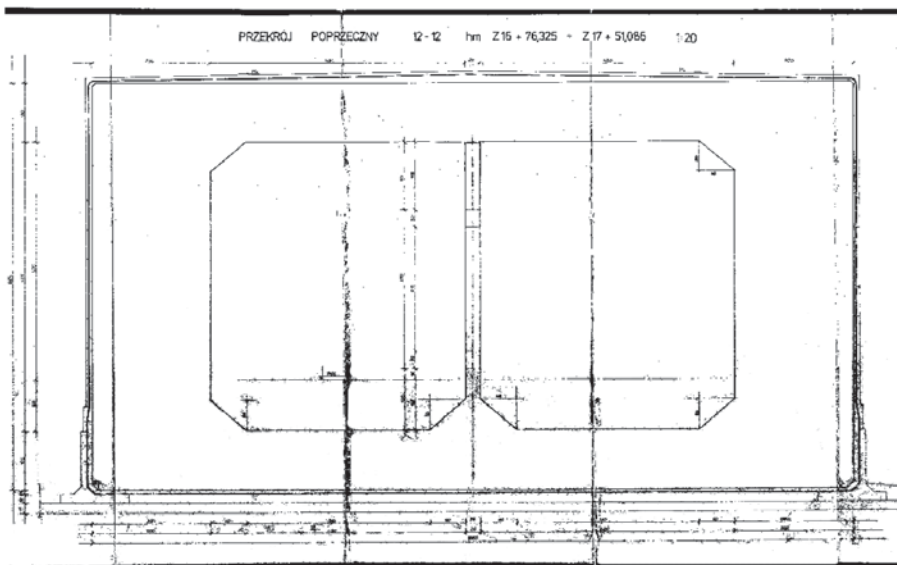
Na długości projektowanego tunelu drogowego była konieczność zaprojektowania skrzyżowania nowej konstrukcji z istniejącym tunelem warszawskiego metra linii M1.

Podstawowym warunkiem koniecznym do uwzględnienia w projekcie było zachowanie ciągłości ruchu pociągów metra przez cały czas realizacji robót. Miasto nie dopuszczało możliwości nawet okresowego wstrzymania bądź ograniczenia ruchu w tunelu. Na potrzeby tej inwestycji Metro Warszawskie opracowało w 2014 r. zeszyt „Wymagania techniczne dla projektowania i realizacji tunelu drogowego POW pod tunelem szlaku B3 I linii metra” zawierający wytyczne z opisem warunków i procedur, jakie należy uwzględnić w trakcie projektowania. Głównym warunkiem, jaki należało spełnić, były dopuszczalne przemieszczenia główki szyny metra oraz kąty załamań przemieszczonego torowiska na całym odcinku oddziaływania budowy POW.

Projektanci i budowniczowie metra na początku lat 80 XX wieku uwzględnili przeprowadzenie pod nim w przyszłości tunelu drogowego. Konstrukcja tunelu była projektowana przy założeniu realizacji dwunawowego tunelu autostrady E-8 o dwóch pasach ruchu na każdej z jezdni. W tym celu wykonano dwa segmenty tunelu metra jako wzmocnione. Zakładano wówczas, że konstrukcja tunelu metra oparta będzie bezpośrednio na ścianach dwunawowego tunelu drogowego o rozstawie w świetle 15,6 m. Tunel metra dostosowano do takich założeń. Segmenty wzmocniono poprzez wykonanie ich na długości 75,36 m jako żelbetowej, monolityczne skrzynie dwunawowe o ścianach zewnętrz-



Rys. 8. Plan sytuacyjny na przecięciu tuneli (fragm. projektu)

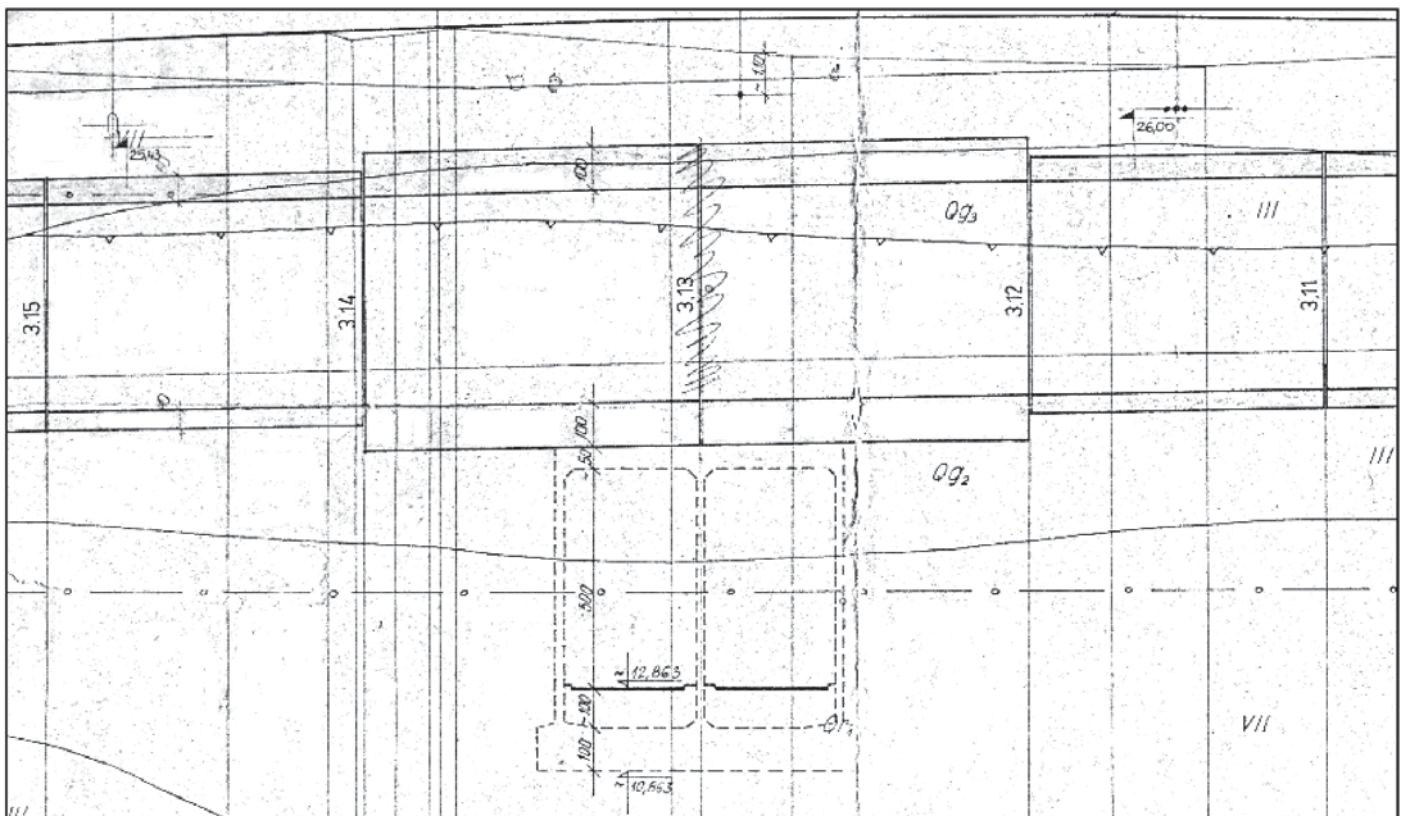


Rys. 9. Przekrój poprzeczny segmentu wzmocnionego tunelu metra (graf. Metroprojekt lata 80)

nych grubości 2,0 m (dla porównania sąsiednie segmenty były wykonane z prefabrykatów o grubości ściany 70 cm). Segmenty rozdzielono skośną dylatacją pionową dostosowaną do przewidywanej osi tunelu drogowego i lokalizacji jego ściany środkowej. Długość i masę segmentów dobrano przy założeniu ich jednostronnego podkopania i pracy jako wsporników. Głębokość posadowienia tunelu metra na tym odcinku wynosi około 9,5 m ppt, a nadkład gruntu wynosi ok. 3,0 m.

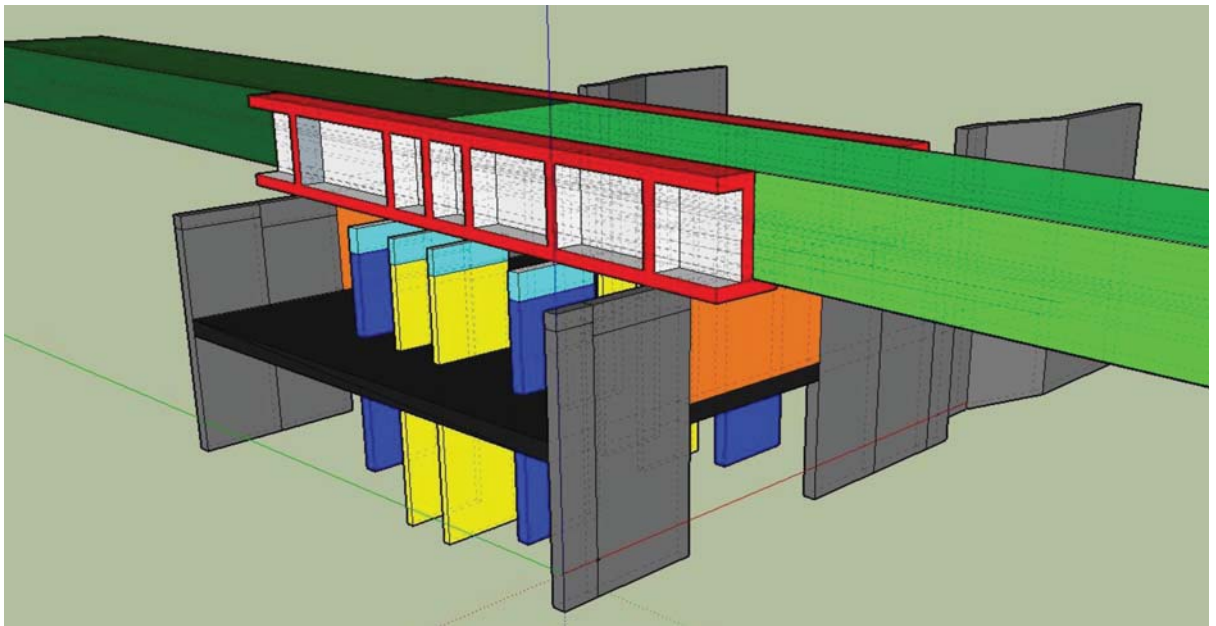
w tunelu metra zinwentaryzowano liczne zarysowania jego konstrukcji. Pomimo iż rysy mają charakter technologiczny, skurczowy i powstały prawdopodobnie na etapie realizacji konstrukcji, to w wyniku zarysowania integralność i sztywność konstrukcji betonowej uległa osłabieniu. Ponieważ założenia sprzed czterdziestu lat okazały się być zbyt odległe od realizowanego współcześnie projektu tunelu, Wykonawca początkowo rozważał realizację metodą *pipe roofing* lub metodą przecisku. Szczegółowa analiza wymagań Metra

Obecnie nie wszystkie przyjęte ówczesnie założenia mają potwierdzenie w projekcie realizowanego tunelu. Lokalizacja osi trasy POW została przesunięta o około 3,6 m na południe w stosunku do założeń pierwotnych. Dodatkowo zwiększeniu uległa szerokość projektowanej trasy, do 4 pasów ruchu, i liczba naw tunelu. Wykonano dla pewności obliczenia sprawdzające, na podstawie których jednoznacznie stwierdzono, że założenia dotyczące sposobu wykonania tunelu drogowego z etapu budowy tunelu metra nie mają obecnie zastosowania. Zbrojenie segmentów wzmocnionych nie pozwala na wykonanie szerszego tunelu. Ukształtowanie zbrojenia ścian o grubości 2,0 m nie odpowiada obecnym miejscom ich podparcia (ściany tunelu drogowego). Dodatkowo w trakcie wizji lokalnej



Rys. 10. Przekrój podłużny segmentów wzmocnionych (graf. Metroprojekt lata 80)

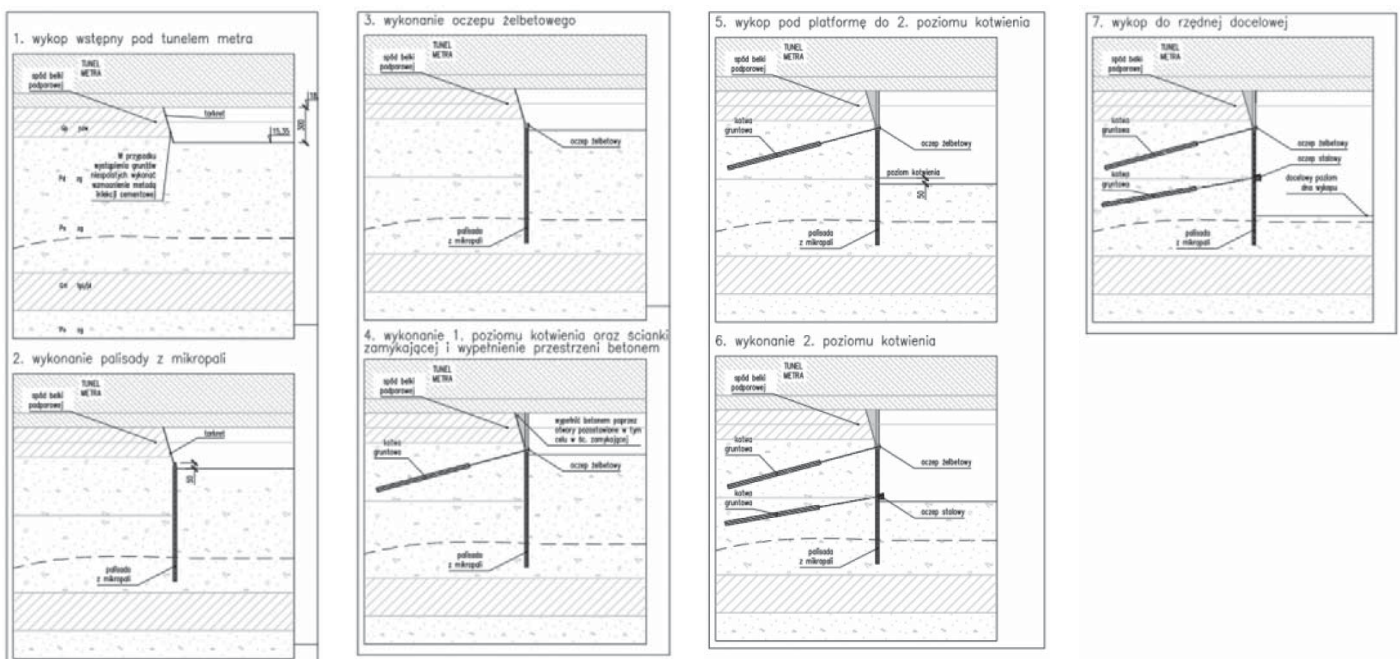
Rys. 11.
Elementy konstrukcyjne na przecięciu tuneli (fragm. projektu)



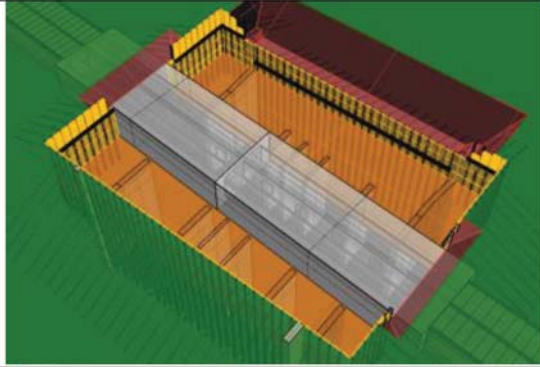



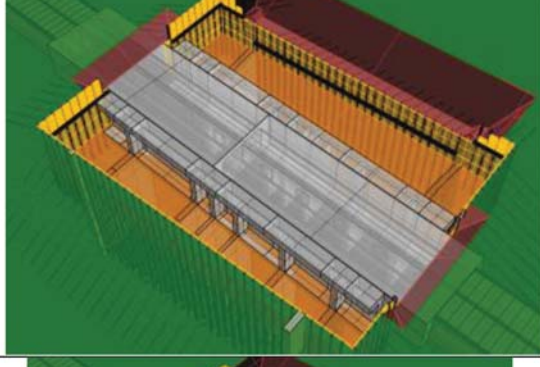

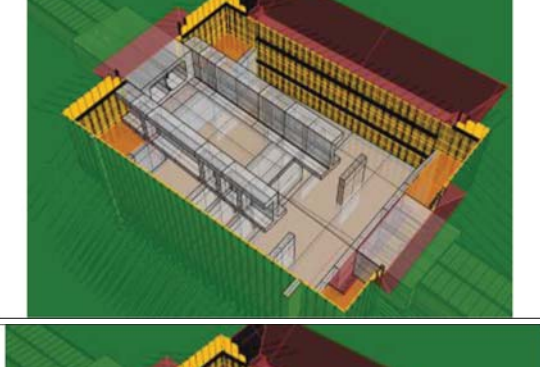

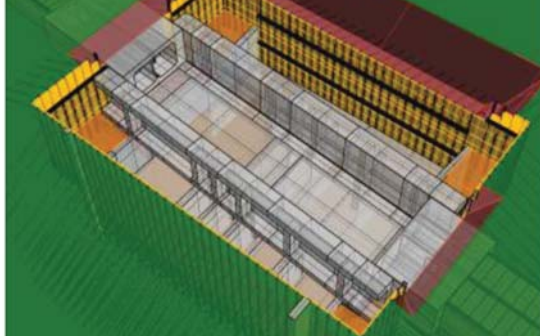

Warszawskiego dotycząca reżimów realizacyjnych nie dawała gwarancji wystarczającego bezpieczeństwa wykonywanej w ten sposób konstrukcji. Projektanci w poszukiwaniu właściwego rozwiązania powrócili do idei pierwotnej, próby wykorzystania dwóch istniejących masywnych sekcji konstrukcji tunelu metra po ich wzmocnieniu i uciążeniu. Zaproponowano wykonanie belek transferowych, zespolonych z istniejącymi segmentami wzmocnionymi i opartymi na ścianach szczelinowych obudowy tunelu drogowego. Taka połączona struktura umożliwiła wykonanie szerszego tunelu drogowego przy zachowaniu reżimów użytkowych postawionych przez Metro Warszawskie. Biorąc pod uwagę

rolę metra w systemie komunikacyjnym miasta i ewentualne konsekwencje zaburzeń w jego funkcjonowaniu, Wykonawca i Inwestor zaakceptowali zaproponowane rozwiązanie jako właściwe. Zmiana rozwiązania skutkowałą koniecznością przeprowadzenia dodatkowych zewnętrznych, niezależnych analiz, o które wnioskowało Metro Warszawskie. Analizy te dotyczyły potwierdzenia poprawności rozwiązań konstrukcyjnych, poprawności założonej współpracy z ośrodkiem gruntowym oraz analizę dynamiczną wzajemnego oddziaływania zespolonych konstrukcji pod wpływem ruchu pociągów i ruchu samochodowego. Analizy zostały wykonane odpowiednio przez Instytut Techniki Budowlanej

ETAPOWANIE PALISADY Z MIKROPALI w ramach faz VIa i VIb (na przykładzie strony lewej –faza VIa, strona prawa analogicznie)



Rys. 12. Etapowanie wykonania palisady z mikropali (fragm. projektu)

<p>Odkopanie tunelu metra</p>		
<p>Wykonywanie pierwszych segmentów belek transferowych</p>		
<p>Wykonywanie kolejnych segmentów belek transferowych</p>		
<p>Podkopanie tunelu metra</p>		
<p>Wykonanie płyty dennej tunelu drogowego</p>		

grafiki – fragm. projektu, foto – autor

Rys. 13. Etap docelowy konstrukcji na skrzyżowaniu tuneli (fragm. projektu)



w Warszawie, Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej i Politechnikę Turyńską. Wyniki analiz były pozytywne, co ostatecznie przekonało wszystkich do słuszności podjętych decyzji.

Ze względu na zakładaną czasochłonność wykonania konstrukcji na skrzyżowaniu tuneli, Projektant uzyskał oddzielną decyzję administracyjną umożliwiającą rozpoczęcie robót na tym odcinku równo rok przed uzyskaniem decyzji ZRID dla całości odcinka drogi ekspresowej. Dało to Wykonawcy komfort realizacji prac bez presji czasu dla tak odpowiedzialnego zadania. Prace rozpoczęto od wykonania obudowy wykopu w postaci ścian szczelinowych i ścianek berlińskich oraz baret dla oparcia wzmocnionego tunelu metra na czas wykonywania segmentu pod tunelem metra. Prace wymagały również obniżenia poziomu wód gruntowych. Dodatkowym utrudnieniem było ograniczenie terenowe, ponieważ skrzyżowanie tuneli znajduje się bezpośrednio pod skrzyżowaniem głównych arterii komunikacyjnych dzielnicy, a bezpośrednio przy placu budowy znajdują się wysokie budynki mieszkalne. Na czas budowy ulice zostały zwężone i przesunięte bliżej budynków. Drobnym, ale skomplikowanym elementem do zaprojektowania, był fragment ścian zewnętrznych obudowy tunelu drogowego zamykający wykop bezpośrednio pod tunelem metra. Wybrano zastosowanie technologii mikropali z kotwami gruntowymi. Takie rozwiązanie umożliwiło prowadzenie robót w ograniczonej przestrzeni wykopu pod czynnym tunelem metra.

Realizacja segmentu tunelu drogowego na skrzyżowaniu tuneli została w dokumentacji „rozpisana” na kilkanaście etapów, w celu zapewnienia maksymalnej pewności zachowania stabilności wzmocnionej i podkopywanej konstrukcji na każdym z kolejnych etapów. Przyjęto założenie wykonywania „małych kroków”. W trakcie prac budowlanych prowadzony był ciągły, automatyczny monitoring przemieszczeń zarówno tunelu metra, torowiska metra, okolicznych budynków, jak i wykonanych elementów tunelu drogowego. W trakcie prowadzenia prac zaobserwowano, iż przyjęte za-

łożenia były zbyt rygorystyczne i asekuracyjne. W związku ze stwierdzoną większą sztywnością tunelu metra, obudowy wykopu i ośrodka gruntowego, niż zakładano w projekcie, w celu zwiększenia tępa prac scalono wcześniej zakładane etapy cząstkowe i wykonywano część prac równocześnie. Pomierzone przemieszczenia torowiska nie osiągnęły dopuszczonych przez Metro Warszawskie wartości, a pociągi kursowały bez żadnych utrudnień i ograniczeń.

Odporność ogniowa konstrukcji tunelu

Kolejnym uwarunkowaniem wpływającym na przyjęte rozwiązania konstrukcyjne była odporność ogniowa elementów nośnych. Konstrukcja tunelu została zaprojektowana zgodnie z zapisami Dziennika Ustaw Nr 63 z dnia 3 sierpnia 2000 r. „Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie” (w brzmieniu sprzed nowelizacji w 2019 r.) o odporności R240. Oznacza to pożar wg krzywej standardowej w czasie 240 min. Odporność ogniowa konstrukcji nośnej tunelu została wyznaczona na podstawie procedur i nomogramów określonych na podstawie Eurokodów metodą izotermi 500°C dla odporności ogniowej R240. Jednak z doświadczeń innych krajów wiadomo, iż krzywa standardowa pożaru nie jest wystarczająca do wyznaczenia odporności ogniowej tuneli drogowych. Przebieg pożaru w przypadku takiego obiektu przebiega z większą intensywnością i osiąga wyższe temperatury, czego krzywa standardowa nie odwzorowuje. Z tego powodu podjęto decyzję o przeprowadzeniu dodatkowego sprawdzenia konstrukcji nośnej tunelu na obciążenie pożarem zgodnie z normą holenderską, krzywa RWS. W tym celu do procedury określonej w ogólnej normie europejskiej PN-EN wprowadzono obciążenie wg krajowego, holenderskiego załącznika do systemu norm europejskich definiującego krzywą RWS, norma NEN-EN. Norma ta nie

jest zaimplementowana do polskiego systemu norm, jednak jest zgodna z europejskim systemem Eurokodów, więc jej zastosowanie w połączeniu z normą PN-EN jest technicznie prawidłowe i zgodne z założeniami wspólnego, europejskiego systemu Eurokodów. Norma NEN-EN określa funkcję temperatury w czasie do 120 min. Do obliczeń przyjęto zatem maksymalny czas i wyznaczono odporność konstrukcji nośnej tunelu na krzywą RWS 120. Z uwagi na brak opracowań normowych dla profilu temperatury w konstrukcji wg krzywej RWS 120 przywołanej w normie holenderskiej NEN-EN, wykonano analizę przepływu ciepła w konstrukcji w warunkach pożaru dla w/w krzywej. Analizę przeprowadzono za pomocą programu MIDAS FEA, będącego specjalistycznym oprogramowaniem MES umożliwiającym analizę przepływu ciepła w konstrukcji w zależności od czasu trwania sytuacji pożarowej. W celu określenia profilu temperatury RWS 120 dla przekroju żelbetowego, wykonano model 2D wycinka konstrukcji o gabarytach szerokości 100 cm i wysokości 100 cm. Płaszczyzna została poddana dyskretyzacji elementami skończonymi. Na podstawie analiz potwierdzono obliczeniowo zachowanie wymaganych warunków nośności konstrukcji tunelu zabezpieczonej w sposób strukturalny, obciążonej pożarem rozwijającym się zarówno wg. krzywej standardowej w czasie 240 min, jak i wg. krzywej RWS w czasie 120 min bez stosowania dodatkowych okładzin przeciwpożarowych.

Wyposażenie tunelu

W celu zagwarantowania prawidłowego funkcjonowania tunelu i zapewnienia bezpieczeństwa dla jego użytkowników, tunel jest wyposażony w szereg urządzeń, systemów i instalacji technicznych:

- system zasilania podstawowego i awaryjnego,
- system oświetlenia podstawowego, awaryjnego i ewakuacyjnego,
- system wentylacji,
- system pomiaru jakości powietrza,
- system wykrywania i sygnalizacji pożaru,
- system punktów alarmowych,
- system komunikacji radiowej służb ratowniczych,
- system telefonii GSM,

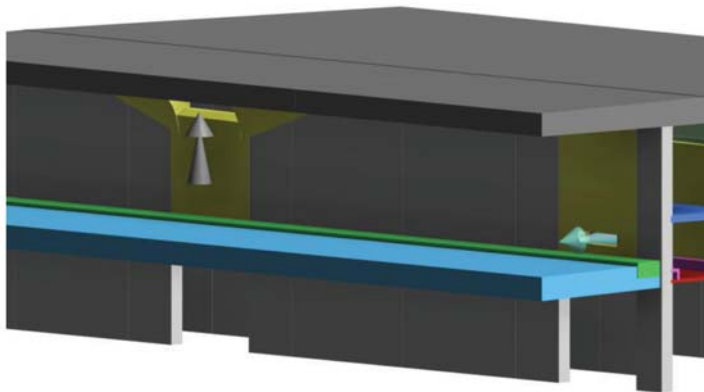
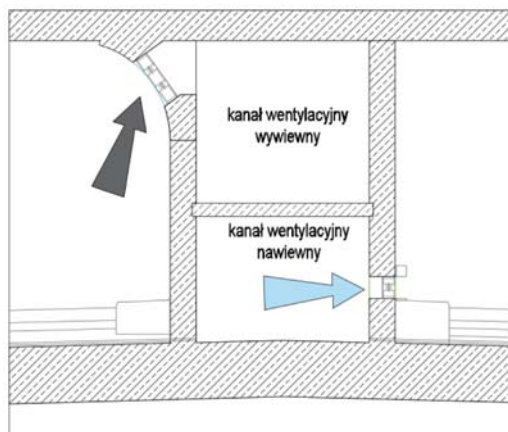
- system hydrantów przeciwpożarowych,
- system odwodnienia dla odprowadzenia wód pożarowych, technologicznych i drenażowych,
- system przejść ewakuacyjnych,
- system przesyłu danych,
- system zarządzania ruchem,
- system monitoringu wizyjnego wyposażony w kamery z automatyczną detekcją zdarzeń,
- system odladzania nawierzchni drogowej na dojazdach,
- system odcinkowego pomiaru prędkości.

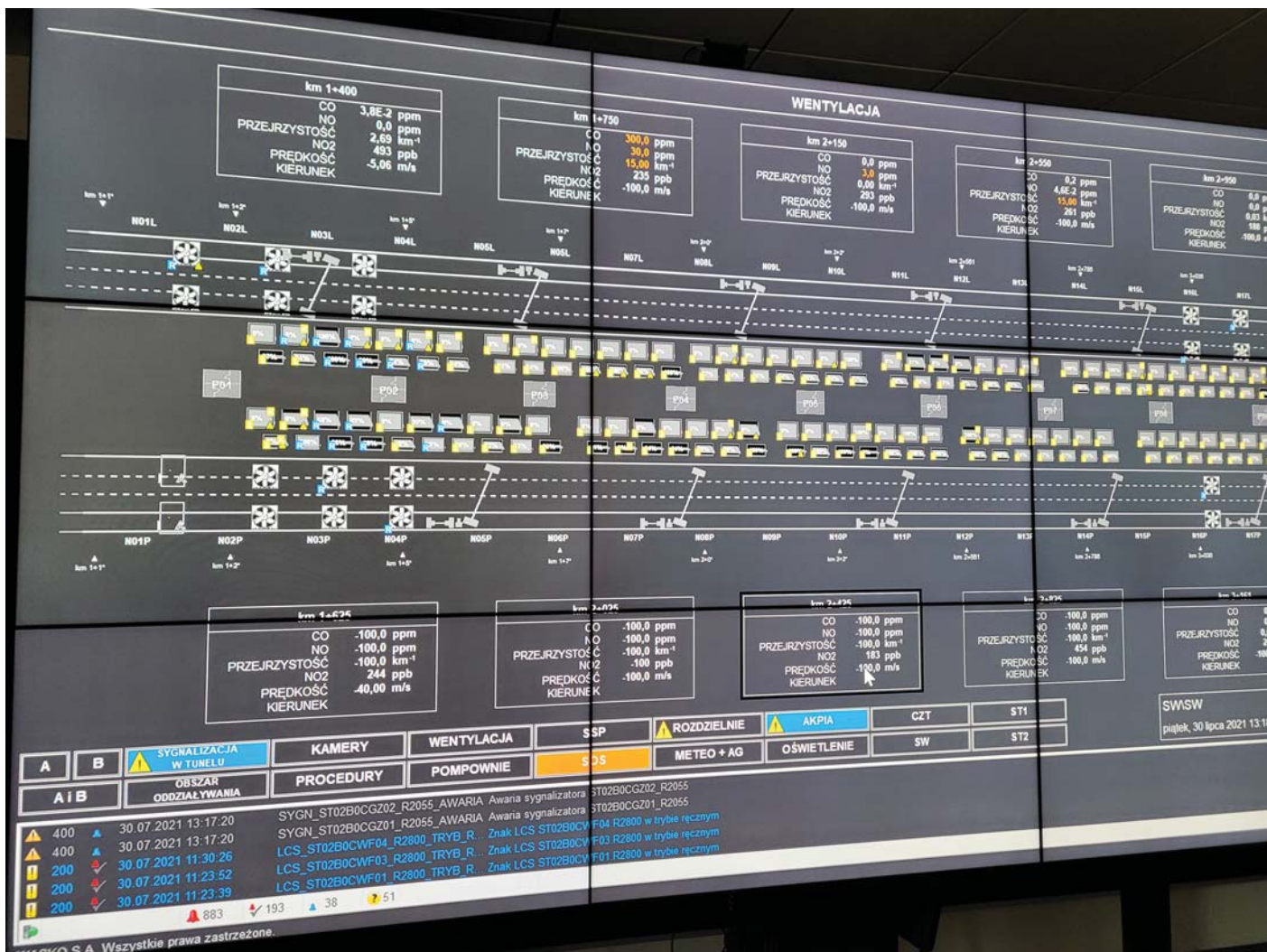
Są to złożone systemy, które nie były dotychczas w tej ilości stosowane przy realizacji tuneli drogowych w kraju. Szczególnie wartym przybliżenia jest system wentylacji tunelu, który z opinii m.in. Straży Pożarnej jest najbardziej złożonym z dotychczas zrealizowanych systemów wentylacji w kraju.

W tunelu zaprojektowano system wentylacji poprzecznej, uzupełniony o instalację rewersyjnych wentylatorów strumieniowych umieszczonych na stropie tunelu, w celu kontrolowania prędkości występującego wzdłużnego przepływu powietrza w nawach tunelu. Wentylatory strumieniowe są zgrupowane w pary i rozmieszczone co 100 m na odcinkach 400 m od portali tunelu. W tunelu zastosowano oddzielne kanały do odprowadzania i doprowadzania powietrza. Kanały wentylacyjne zostały zlokalizowane w środkowej części tunelu, pomiędzy nawami. Świeże powietrze będzie dostarczane do naw tunelu poprzez otwory zlokalizowane w dolnej części ściany tunelu. Przewidziano rozstaw otworów co 50 m. Powietrze zużyte będzie odprowadzane spod stropu poprzez otwory zlokalizowane w obniżeniach stropu w rozstawie co 50 m. W otworach zabudowane będą kłapy systemu wentylacji pożarowej. System kłap nawiewnych i odciągowych będzie sterowany zdalnie z Centrum Zarządzania Tunelem. W celu uniknięcia zjawiska odciągania świeżego powietrza, lokalizacja kłap odciągowych i nawiewnych jest przesunięta względem siebie o 25 m.

W rejonie obydwu portali wjazdowych do tunelu, na powierzchni terenu nad tunelem zlokalizowane zostały budynki mieszczące wentylatory wyciągowe dla systemu wentylacji – stacje wentylatorów. Budynki zostały posadzone bezpośrednio na płycie stropowej tunelu. Zużyte powietrze z tunelu odprowadzane będzie przez wyrzutnie wyniesione 15 m ponad teren przyległy. W budynkach zlo-

Rys. 14.
Lokalizacja kanałów wentylacyjnych oraz kłap nawiewnych i wywiewnych (fragm. projektu)



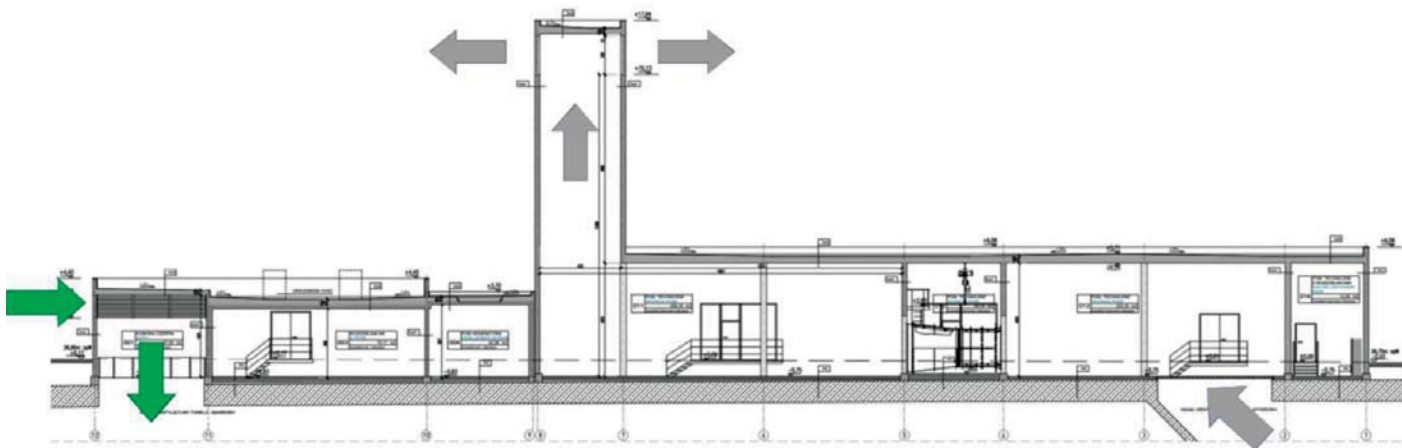


Fot. 2. Wizualizacja w systemie SCADA dla systemu wentylacji tunelu – budynek CZT (fot. autor)

kalizowano również czerpnie świeżego powietrza oraz inne urządzenia niezbędne do funkcjonowania tunelu (stacje trafo, agregaty itd.)

System wentylacji pełni funkcje wentylacji bytowej i pożarowej. W okresie normalnej eksploatacji system wentylacji

mechanicznej jest wyłączony, w celu obniżenia kosztów eksploatacji. Jeżeli zaistnieje sytuacja przekroczenia dopuszczalnych limitów zanieczyszczeń, system wentylacji zostanie uruchomiony automatycznie, aby zapewnić odpowiednie rozcieńczenie zanieczyszczeń w powietrzu



Rys. 15. Przekrój podłużny budynku wschodniej stacji wentylatorów (fragm. projektu)

i utrzymanie wymaganej jakości powietrza wewnątrz tunelu. W tym trybie powietrze zużyte będzie uwalniane do atmosfery poprzez stacje wentylatorów wywiewnych przez wyrzutnie. Wentylację poprzeczną można stosować odcinkowo lub na całej długości tunelu, w zależności od lokalizacji stwierdzenia przekroczonych stężeń zanieczyszczeń.

W sytuacjach awaryjnych system wentylacji bytowej tunelu przechodzi w tryb wentylacji pożarowej, zapewniając następujące tryby działania:

- kontrola prędkości przepływu powietrza wewnątrz tunelu,
- usuwanie dymu z tunelu poprzez system oddymiania i wentylacyjny kanał wywiewny,
- otwarcie szeregu kłap dymowych w strefie zarzewia pożaru, w celu uzyskania strefy oddymiania,
- dostarczanie świeżego powietrza poprzez wentylacyjny kanał nawiewny i szereg kłap nawiewnych,
- wspomaganie działań ratowniczo-gaśniczych,
- wytworzenie nadciśnienia w nawie nieobjętej pożarem, służącej jako nawa ewakuacyjna, w celu przeciwdziałania przedostawania się dymu do jej wnętrza.

Należy podkreślić, że system wentylacji został zwymiarowany w taki sposób, by zapewnić bezpieczne warunki w tunelu w każdym ze scenariuszy pożarowych, zakładana moc pożaru to **100 MW** oraz ilość powstałego dymu i gazów pożarowych na poziomie 200 m³/s. Kierując się wytycznymi technicznymi oraz uznaną praktyką inżynierską, w trakcie procesu projektowania zwiększono wydajność systemu wyciągowego do **400 m³/s**. Przyjęcie takiej

wydajności systemu uwzględnia rezerwę na ewentualne awarie wentylatorów lub ich planowe wyłączenie w celu prac konserwatorskich.

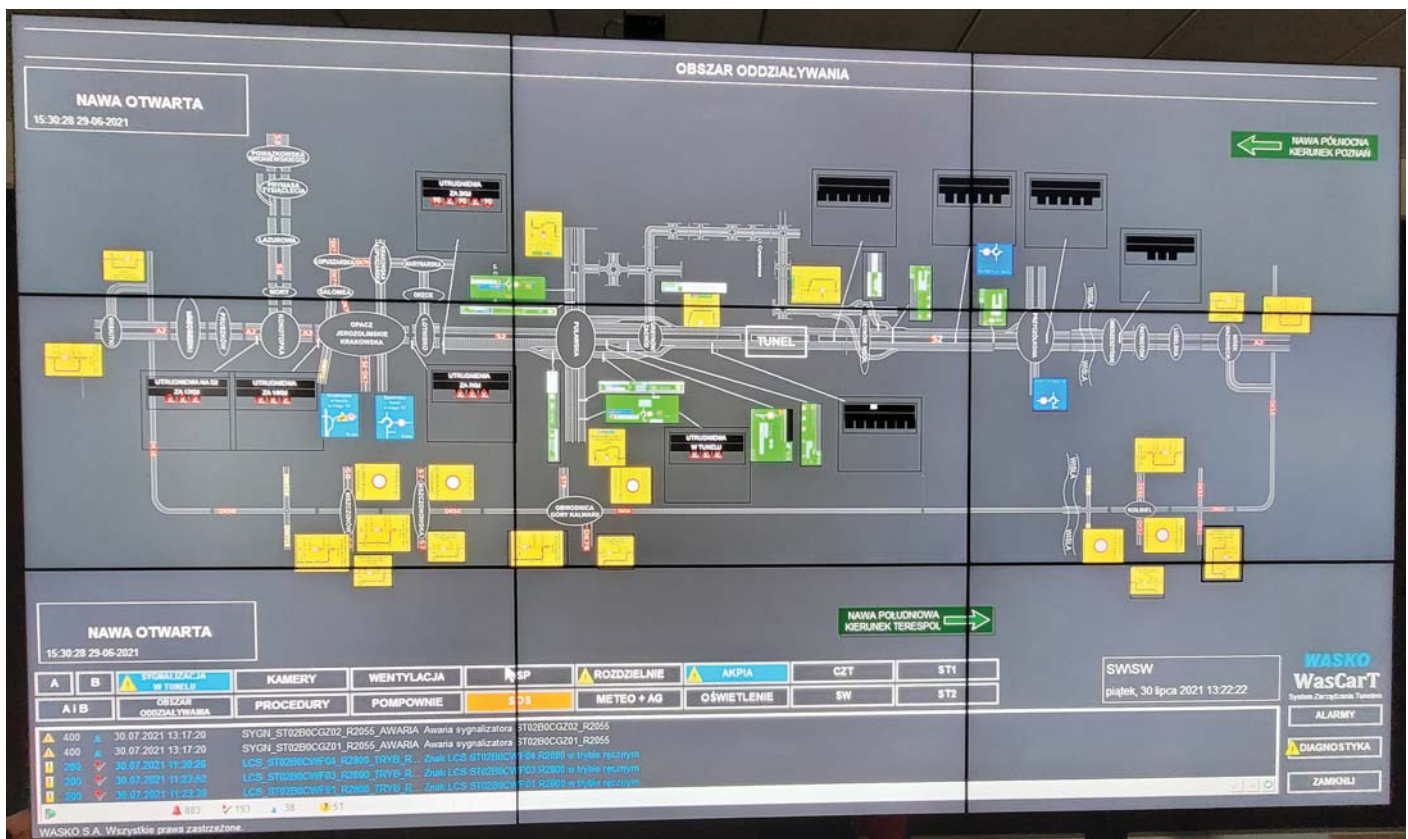
System wentylacji w liczbach:

- kanał wywiewny o przekroju poprzecznym 15 m²;
- kanał nawiewny o przekroju poprzecznym 7,5 m²;
- 2 stacje wentylatorów umieszczone w pobliżu portali tunelu, każda z nich jest wyposażona w 3 wentylatory wywiewne oraz 2 wentylatory nawiewne;
- kłapy wywiewne o przekroju poprzecznym ok. 5 m²;
- kłapy nawiewne o przekroju poprzecznym ok. 1,25 m²;
- maksymalny przepływ wyciągowy 400 m³/s;
- wydajność pojedynczego wentylatora wyciągowego to ok. 70 m³/s;
- wydajność pojedynczego wentylatora nawiewnego to ok. 25 m³/s;
- rewersyjne, osiowe wentylatory strumieniowe, o sile ciągu ok. 1000 N każdy, 28 szt.

Założenia projektowe zostały potwierdzone w trakcie licznych testów wykonywanych na etapie kalibracji systemu i oddawania tunelu do użytkowania.

Centrum Zarządzania Tunelem i system zarządzania ruchem

Na powierzchni terenu w rejonie portalu zachodniego zlokalizowany jest budynek Centrum Zarządzania Tunelem (CZT). Budynek umożliwia zdalne sterowanie wszystkimi



Fot. 3. Wizualizacja w systemie SCADA dla systemu sterowania ruchem drogowym na obszarze oddziaływania tunelu – budynek CZT (fot. autor)

systemami wyposażenia tunelu oraz jest miejscem pracy dla służb jego utrzymania. Tunel został wyposażony w System Zarządzania Ruchem, składający się z modułów: detekcji, nadzoru i sterowania ruchem w obrębie samego tunelu, jak i na obszarze oddziaływania tunelu. Budynek CZT został połączony z miejskim systemem sterowania ruchem oraz wdrażanym obecnie przez GDDKiA, Krajowym Systemem Sterowania Ruchem, którego centralna dyspozytornia została ulokowana w dodatkowej kondygnacji budynku CZT. W ten sposób zostanie stworzony spójny system pozwalający na efektywne sterowanie ruchem w obszarze warszawskiego węzła drogowego, którego newralgiczny element stanowi tunel POW i od którego przejezdności zależy płynność ruchu w dużej części województwa mazowieckiego na jego głównych ciągach komunikacyjnych. Opracowano scenariusze dla różnych zdarzeń w tunelu – od zamknięcia pojedynczego pasa ruchu, do całkowitego zamknięcia tunelu w obydwu kierunkach i skierowania pojazdów na trasy objazdowe. Obszar oddziaływania został określony na odległość do 50 km od tunelu. Związane jest to z wyznaczeniem dwóch tras objazdowych: duży objazd tranzytowy realizowany wzdłuż drogi krajowej DK 50, mały objazd lokalny w obrębie ulic miejskich. Organizacja ruchu na obydwu tych objazdach została zaprojektowana jako uruchamiana zdalnie poprzez 68 modułów wdrożeniowych ze znakami zmiennej treści zlokalizowanymi na wszystkich węzłach z drogami krajowymi (duży objazd) i wszystkich skrzyżowaniach (objazd miejski). W obrębie miasta zaprojektowano również koordynację kilkunastu sygnalizacji świetlnych, dając priorytet przejazdu wzdłuż objazdu.

Podsumowanie

Jako podsumowanie należy przytoczyć dane podane przez GDDKiA w czerwcu 2022 r. W pierwszym półroczu po oddaniu do ruchu tunelem przejechało około 11,5 mln pojazdów, a przez ten okres nie doszło w tunelu do żadnego niebezpiecznego zdarzenia i nie zanotowano żadnego wypadku. W ocenie projektantów, projekt broni się sam. Zrealizowano z sukcesem nowoczesny, bezpieczny obiekt infrastrukturalny niemający precedensu w dotychczasowym budownictwie drogowym w Polsce. Przez cały okres budowy nie wydarzyło się nic, co by zaskoczyło Wykonawcę bądź Projektanta. Element, o który wszyscy drżeli, czyli skrzyżowanie tuneli, został wykonany wzorcowo. Ruch metra odbywał się bez żadnych zmian, a miliony pasażerów metra nie zdawało sobie sprawy, że przejeżdża wiaduktem

przez plac budowy. Opracowanie tak złożonej dokumentacji i jej późniejsze wdrożenie na budowie było wynikiem ścisłej współpracy Projektanta z Wykonawcą od początku procesu projektowania, aż do oddania obiektu do eksploatacji. Poza personelem Transprojektu-Warszawa w proces ten zaangażowani byli projektanci oraz specjaliści różnych dziedzin z innych firm projektowych, m.in. MDR-Projekt, Archi 5, Elkab, Imgeco (Włochy) i wiele innych.

Podzielę się natomiast następującym spostrzeżeniem po zakończeniu inwestycji. Kiedy 7 lat temu rozpoczynały się prace projektowe nad tunelem, funkcjonowaliśmy jako projektanci w zgoła odmiennej rzeczywistości niż mamy obecnie. Rozpoczynając od przepisów. Mianowicie Rozporządzenie Dz.U. nr 63 z 2000 r. w zakresie tuneli było oparte na wiedzy teoretycznej i do 2019 r. nie było zasadniczo nowelizowane w nawiązaniu do obserwowanego postępu wiedzy i rozwoju budownictwa tunelowego na świecie. Na przykład dopiero w 2019 r. wprowadzono obligatoryjne stosowanie krzywej RWS. Obserwowany był brak doświadczenia tunelowego u inżynierów zaangażowanych w proces inwestycyjny zarówno po stronie projektantów, zamawiającego, weryfikatorów, jak i nadzoru. Braki te były głównie w zakresie wiedzy związanej bardziej z tematyką pozakonstrucyjną – bezpieczeństwo, odpowiednie wyposażenie, procedury. Brak było odpowiedniej wiedzy po stronie służb ratunkowych, które w przyszłości będą działały w obszarze tunelu. Z posiadanego obecnie doświadczenia można wskazać, iż podstawą do prawidłowo funkcjonującego tunelu spełniającego oczekiwane funkcje, bez zbędnego wydawania środków publicznych na niepotrzebne elementy, jest jasna wizja inwestora, z określeniem funkcji i ograniczeń, jaką dany obiekt będzie miał pełnić w sieci drogowej. Następnie rolę projektanta posiadającego szeroką interdyscyplinarną wiedzę, również tę poza typowo konstrukcyjną, w zakresie m.in. bezpieczeństwa ruchu drogowego, bezpieczeństwa pożarowego, organizacji transportu drogowego, procedur związanych z zarządzaniem ruchem, odpowiedniego wyposażenia tunelu, jest takie dobranie poszczególnych elementów, aby zrealizowany finalnie obiekt spełniał rolę założoną przez inwestora, bez narażania go na zbędne koszty na etapie inwestycji, jak i późniejszej eksploatacji. Z tego względu rekomendowane jest, aby dla tak złożonych inwestycji nie stosować formuły „zaprojektuj i zbuduj”. Ponieważ w najbliższych latach należy się spodziewać znacznego wzrostu liczby inwestycji tunelowych w kraju, liczymy że doświadczenia zdobyte przy projekcie ursynowskim będą mogły być wykorzystane ponownie.