

Konstrukcje i metody budowy tunelu drogowego na Wisłostradzie w Warszawie

Tunel Wisłostrady jest zbudowany na odcinku Wybrzeża Kościuszkowskiego od ulicy Karowej do ulicy Jaracza. Celem podstawowym budowy tunelu było uzyskanie dodatkowych terenów miejskich i przybliżenie aglomeracji warszawskiej do rzeki. Kontynuacją idei przybliżenia Warszawy do Wisły będzie projekt budowy drugiego tunelu od ulicy Sanguszkii do mostu Śląsko-Dąbrowskiego. Dzięki wybudowaniu tunelu osiągnięto cele komunikacyjne – usprawniony został ruch tranzytowy północ-południe oraz ruch lokalny w rejonie mostu Świętokrzyskiego i powiększono obszar miejski o 6 ha.

Warunki gruntowo-wodne

Badania geologiczne wykonane przed rozpoczęciem budowy tunelu wykazały następującą budowę podłoża:

- Od głębokości 3,30 m do 10 m od powierzchni terenu stwierdzono występowanie gruntów nasypowych w postaci gruzu, cegły, kawałków drewna, popiołów, piasków gliniastych, żużli, glin i żwiru.

- Pod warstwą nasypów występują grunty niespoiste w postaci piasków drobnych, pylastych, średnich i grubych, pyłów piaszczystych oraz pospółek. Charakteryzują się one stanem średnio oraz bardzo zagęszczonym. Grunty niespoiste zalegają na głębokości od 8 do 12 m pod powierzchnią terenu.

- Poniżej znajdują się grunty spoiste wykształcone w postaci osadów plicieńskich, ilów, glin pylastych.

Występują dwa zwierciadła wody gruntowej. Woda w utworach czwartorzędowych ze zwierciadłem swobodnym występuje na głębokości 3,6–8,0 m od powierzchni terenu, tj. 0,7–1,2 m nad poziom „0” Wisły. W utworach plicieńskich woda występuje lokalnie na głębokości 12–16 m. Jest to woda napięta i stabilizuje się na poziomie 0,8 m nad „0” Wisły.

W celu określenia wpływu poziomu wody w Wiśle na poziom wody w gruncie wykonany został monitoring wód podziemnych w okresie od roku 1998 do roku 2000. Wykonano obserwację w piezometrach zlokalizowanych w rejonie planowanego tunelu. Z analizy odczytów



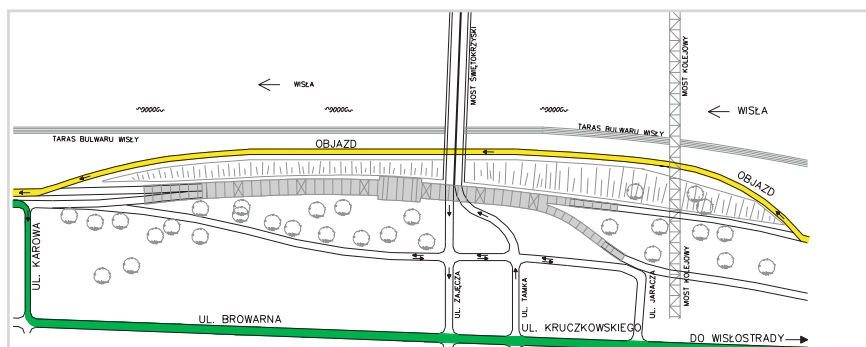
Rys. 1. Podział na etapy: kolor niebieski – etap I, kolor czerwony – etap II



Rys. 2. Place budów etapu A (kolor żółty – ruch w kierunku północnym, kolor zielony – ruch w kierunku południowym)



Rys. 3. Place budów Etapu B (kolor żółty – ruch w kierunku północnym, kolor zielony – ruch w kierunku południowym)



Rys. 4. Wykonanie podłączenia tunelu zachodniego w ciąg zachodniej jezdni Wisłostrady (kolor żółty – ruch w kierunku północnym, kolor zielony – ruch w kierunku południowym)

wynikało, że w czasie wysokich stanów wody w Wiśle w piezometrach zlokalizowanych najbliżej koryta rzeki (ok. 20–60 m) poziom wody podnosi się bardzo szybko, a amplituda wahań wody wynosi 2,00–2,05 m i jest ok. 2 m mniejsza niż amplituda wahań wody w Wiśle. W miarę oddalania się od koryta rzeki (obserwacje w piezometrach odległych o 90–120 m od koryta rzeki) wpływ ten maleje, amplituda wahań wody wynosi od 1,2 m do 1,7 m. W piezometrze najbardziej oddalonym od koryta rzeki wpływ poziomu wody w Wiśle jest najmniejszy i amplitudy wahań wynoszą odpowiednio 0,4 m i 0,7 m. W okresie niskich stanów wód, Wisła jest rzeką drenującą, a w okresach wysokich stanów wód – infiltrującą.

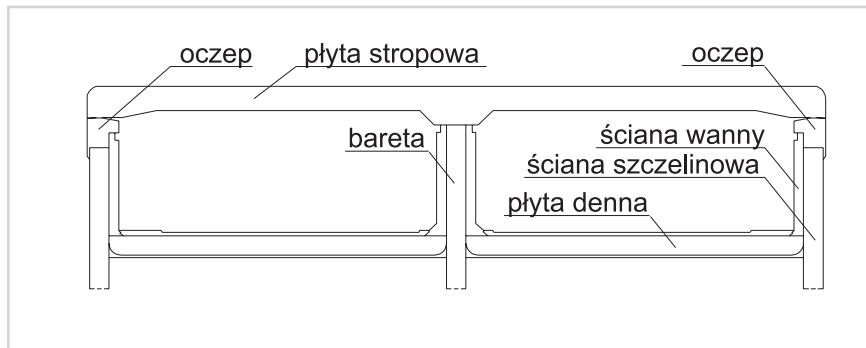
Organizacja budowy

Wykonawcą tunelu było Konsorcjum, którego głównym partnerem była Hydrobudowa-6 S.A. Zaplanowano, że tunel zostanie wykonany w 22 miesiące, z czego 16 miesięcy miały trwać roboty konstrukcyjne. Budowa tunelu rozpoczęła się dnia 1 kwietnia 2001 r. Roboty konstrukcyjne zakończono 4 lipca 2002 r. Ze względu na konieczność zachowania ruchu tranzytowego na kierunku północ-południe budowę tunelu podzielono na dwa etapy:

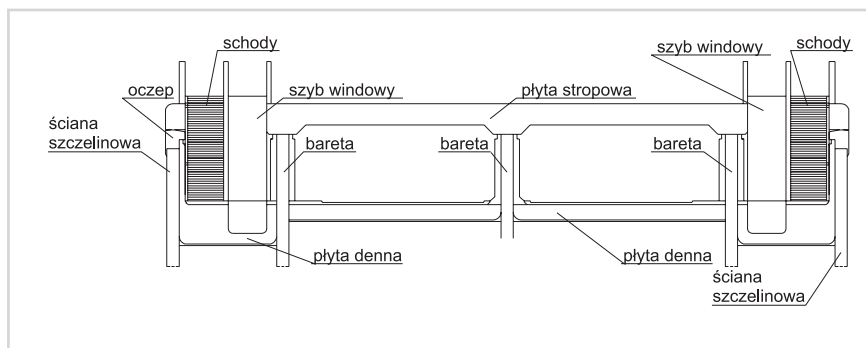
- Etap I – obejmował część południową tunelu (31 segmentów). Etap ten zrealizowany został w okresie 1.04.2001–18.02.2002 r.
- Etap II – obejmował część północną tunelu (29 segmentów) oraz 5 segmentów na wlocie południowo-wschodnim. Etap ten był realizowany w okresie 16.08.2001–4.07.2002 r.

W ramach etapu I zostały zorganizowane 3 place budów z oddzielnymi ogrodzeniami, bramami wjazdowymi, myjniami samochodowymi, systemami zrzutu wody z odwodnienia. W etapie II zorganizowano dwa place budów. W okresie realizacji tunelu wystąpiły trzy etapy organizacji ruchu:

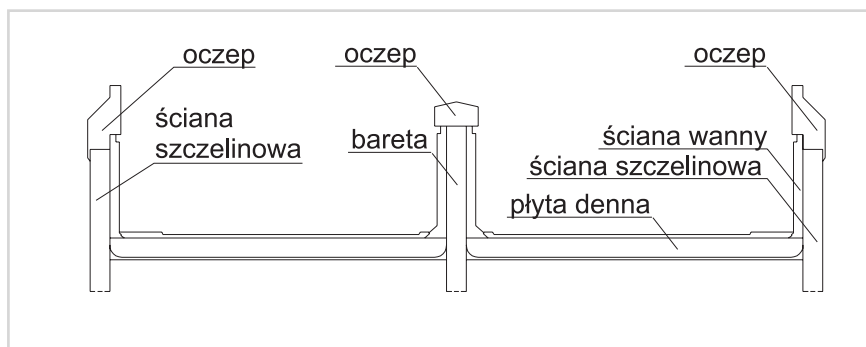
- Etap A (rys. 2) – od 1 kwietnia do 26 lipca 2001 r. (4 miesiące). Ruch kołowy odbywał się po dotychczasowych trasach. W czasie trwania tego etapu wykonany został strop i izolacja segmentu 14Lz.
- Etap B (rys. 3) – od 26 lipca 2001 do 12 października 2002 (14,5 miesiąca). Ruch tranzytowy w kierunku południowym odbywał się dwoma pasami zachodniej jezdni Wybrzeża Kościuszkowskiego. Ruch samochodów ciężarowych i autobusów w kierunku północnym odbywał się jednym pasem jezdni zachodniej Wybrzeża Kościuszkowskiego. Dla pozostałych pojazdów udających się w kierunku



Rys. 5. Przekrój przez tunel dwunawowy – przekrój A



Rys. 6. Przekrój poprzeczny tunelu na odcinku przystanku autobusowego – przekrój E



Rys. 7. Przekrój tunelu na wlocie i wlocie północnym – przekrój B

północnym wykonano objazd po dolnym tarasie bulwaru Wisły.

- Etap C (rys. 4) – od 14.08.2003 do 29.08.2003. W tym etapie zostały wykonane: wlot północno-zachodni i wylot południowo-zachodni. W kierunku południowym samochody osobowe i autobusy miejskie skierowano ulicami Karową, Browarną, Kruczkowskiego, aż do Ludnej. W kierunku północnym ruch samochodów osobowych dalej odbywał się objazdem po dolnym tarasie bulwaru Wisły. Dla samochodów ciężarowych wykonano objazd przez most Grota - Roweckiego, ul. Jagiellońską, Wybrzeżem Helskim, Wybrzeżem Szczecińskim, przez most Siekierkowski do Wisłostrady.

Konstrukcja tunelu

Tunel jest konstrukcją żelbetową złożoną z dwóch naw rozdzielonych ścianą środkową. Długość nawy zachodniej wynosi 930 m, w tym 776 m pod stropem. Długość nawy wschodniej wynosi 889 m,

w tym 684 m pod stropem. Konstrukcja tunelu jest podzielona na 65 zdylatowanych sekcji. Długość jednej sekcji wynosi 17 m. 15 sekcji tunelowych jest otwartych (nieprzykrytych stropem).

Cechą charakterystyczną tunelu jest brak połączeń konstrukcyjnych wanny żelbetowej z pozostałymi elementami: ocepem i ścianami szczelinowymi. Konstrukcja wanny żelbetowej składająca się z płyty dennej i ścian ma możliwość przemieszczania się w dół z powodu osiadania oraz może być podniesiona do góry przez wypór wody gruntowej podczas wysokich stanów Wisły. W tunelu występują 4 podstawowe elementy konstrukcyjne: ściany szczelinowe, ocepki, stropy, konstrukcja żelbetowa wanny wewnętrznej. Ściany szczelinowe spełniają rolę zakotwienia tunelu przed wyporem wody. Ocepki służą do przeniesienia na ściany szczelinowe sił wyporu działających na wannę żelbetową. Ściany szczelinowe spięte ocepami stanowią element słu-

pów ramy, natomiast rygiel w formie płyty stropowej oparty jest przegubowo na ścianach skrajnych i utwierdzony na ścianie środkowej. W nawach ramy znajdują się żelbetowe, szczelne wanny, posadzone bezpośrednio na gruncie. Boczne ściany wanny wyprowadzone są do góry, aż do wsparcia o oczepy ścian szczelinowych (zewnętrznych) i płytę stropu. W części środkowej tunelu, w rejonie mostu Świętokrzyskiego, przewidziano poszerzenie na przystanki autobusowe, czerpnie powietrza, zejścia dla pieszych oraz windy dla osób niepełnosprawnych.

Wykonanie elementów konstrukcyjnych

Ściany szczelinowe, baretę i ściany wypełniające w osi baret

Ściany szczelinowe tunelu pełnią funkcję zakotwienia tunelu przed wyporem wody oraz stanowią fundament podpierający stropu. Zewnętrzne ściany szczelinowe mają grubość 80 cm. Sekcje płytkie o głębokości 5,50 m umożliwiają filtrację wody prostopadle do osi tunelu. Sekcje o głębokości 12,0 m stanowią właściwy fundament. Ściana szczelinowa wewnętrzna (w osi tunelu) wykonana jest jako pojedyncze baretę o szerokości 80 cm, długości 250 cm i głębokości 21 m. Ściana wewnętrzna jest dwa razy głębsza z uwagi na dwa razy większą siłę wyporu przekazywaną przez wewnętrzne ściany tunelu wschodniego i zachodniego. Przestrzeń pomiędzy baretami jest wypełniona ścianami żelbetowymi wykonanymi po robotach ziemnych.

Różne głębokości ścian szczelinowych zewnętrznych oraz przerwy między baretami miały na celu umożliwienie spływu wody ze Skarpy Wiślanej do Wisły.

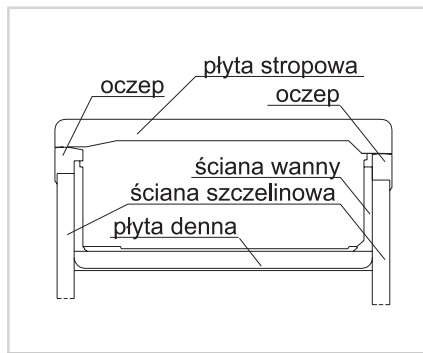
Według obliczeń hydraulicznych przepływu wody w gruncie konstrukcja tunelu ogranicza swobodny spływ wody do Wisły. Spowoduje to podniesienie wody gruntowej po stronie zachodniej tunelu nawet o 2 m. Podpiętrzenie wody gruntowej nie spowoduje jednak zagrożenia dla stateczności Skarpy Wiślanej.

Płyty stropowe poza otworami technologicznymi

Płyty dwuprzęsłowe oparte są przegubowo na oczepach i utwierdzone w środku na baretach. Wymiary: długość 17 m, rozpiętość 2 x 15 m (w poszerzonej części przystankowej 22 m), grubość w przeszle 1,0 m (w części przystankowej 1,4 m).

Płyty jednoprzęsłowe oparte są przegubowo na oczepach. Wymiary: długość 17 m, rozpiętość 16 m, grubość 1,0 m.

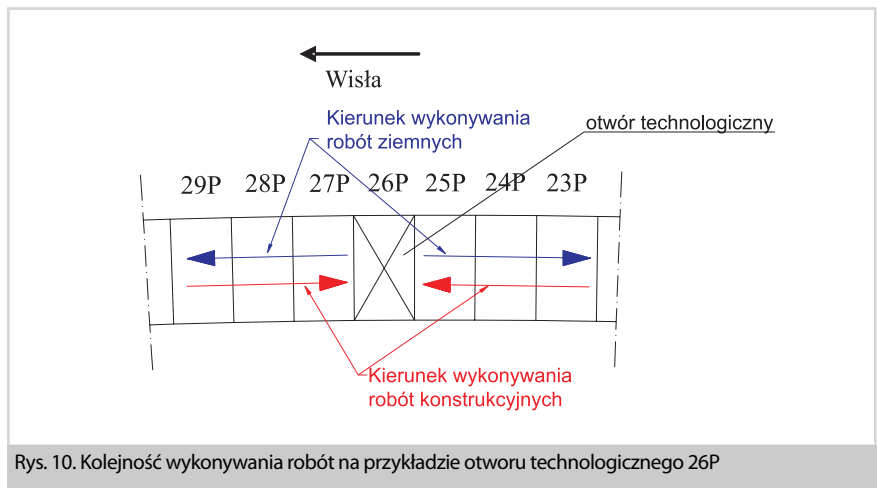
Wykonanie stropów obejmuje: wykonanie szalunku na gruncie, ułożenie chudego betonu i folii, zbrojenie i szalowanie



Rys. 8. Przekrój tunelu jednonawowego – przekrój C



Rys. 9. Przekrój tunelu jednonawowego w części dojazdowej na południu – przekrój D



Rys. 10. Kolejność wykonywania robót na przykładzie otworu technologicznego 26P

powierzchni bocznych, betonowanie (beton B30, W8, F150).

Wykop pod stropem

Tunel realizowany był metodą stropową. W tej metodzie w pierwszym etapie wykonuje się ściany szczelinowe, następnie stropy zewnętrzne, które spełniają funkcję rozparcia ścian. W drugim etapie wykonuje się roboty ziemne oraz pozostałe roboty konstrukcyjne.

Wykop pod stropem realizowany był przez otwory technologiczne w stropie tunelu. Ilość otworów i ich rozmieszczenie było tak określone, aby odcinek transportowy pod stropem nie był zbyt długi i aby nie było konieczności stosowania wentylacji mechanicznej. Otwory technologiczne były w miejscach niezabetonowanych stropów. Stropy te były betonowane po zakończeniu wszystkich robót konstrukcyjnych w każdym odcinku tunelu. W celu zapewnienia stateczności ścian szczelinowych na długości otworu technologicznego było konieczne obniżenie nazium na zewnątrz tunelu o 3 m.

Wykonanie wykopu pod stropem obejmuje: wybranie gruntu wraz z odspojeniem od spodu stropu folii szalunkowej i chudego betonu, wywóz gruntu na zwalnię, lokalną wymianę gruntu, oczyszczenie ścian szczelinowych i baret.

Z jednego otworu technologicznego realizowano wykop pod trzema segmen-

tami tunelu w każdym kierunku. Przykładowo z segmentu 26P wykonywano pod stropem wykop aż do segmentów 23P i 29P włącznie, a następnie cofając się, układano chudy beton i wykonywano płyty denne poszczególnych segmentów.

Płyty denne wanny

Płyty denne wraz ze ścianami szczelinowymi tworzą szczelną wannę – odwróconą ramę posadzoną na gruncie. Wymiary: długość 17 m, szerokość 14 m, grubość 0,8 m (1,0 m w rejonie przystanku). Wykonanie płyty dennej obejmuje: ułożenie chudego betonu, ułożenie izolacji Dualseal LG pod płytę i na ścianach, zbrojenie i szalowanie powierzchni betonowych, betonowanie (beton B40, W8, F150).

Wykonanie ścian bocznych

Wymiary ścian: długość 17 m, wysokość 4,5 m, grubość 0,4 m.

Wykonanie wanny obejmuje: ułożenie izolacji Dualseal LG, zbrojenie i szalowanie, betonowanie (beton SCC B40, W8, F150).

Izolacja przeciwwodna

Rodzaj izolacji tunelu oraz rozwiązanie uszczelnień przerw roboczych i dylatacji wynikały ze zmiennego poziomu wody gruntowej spowodowanego zmieniającym się poziomem wody w Wiśle, a także

z oryginalnego rozwiązania konstrukcji tunelu polegającego na przemieszczaniu się wanny żelbetowej w stosunku do ścian szczelinowych.

Izolacja stropu

Izolacja przeciwwodna stropu jest wykonana z membrany bentonitowej Dualseal LG. Izolacja pozioma stropu została wywinęta na ścianę szczelinową, poniżej jej połączenia z oczepem. Cała izolacja (pozioma i pionowa) została zabezpieczona betonem ochronnym B15 gr. 10 cm, zbrojonym siatką zbrojeniową. Dylatacje płyt stropowych uszczelniono taśmami Tricomer D320 i FA130/32. Jako rozwiązanie alternatywne zastosowano uszczelnienie taśmą Sikadur Combiflex przyklejoną do betonu.

Izolacja powłokowa wanny

Izolację powłokową wanny wykonano również z membrany Dualseal LG. Pod płytą denną membrana została ułożona na warstwie chudego betonu B15 gr. 10 cm, powierzchnią łożową skierowaną do konstrukcji wanny. Izolacja ścian wanny również została ułożona powierzchnią łożową skierowaną do konstrukcji ściany. Izolacja ściany wanny została oddzielona od ściany szczelinowej warstwą geowłókniny w celu zabezpieczenia izolacji przed ewentualnym uszkodzeniem spowodowanym osiadaniami wanny. Odpowiednie przygotowanie powierzchni ścian szczelinowych miało na celu wyeliminowanie możliwości uszkodzenia izolacji. Dopuszczalna nierówność ścian szczelinowych mogła się mieścić w zakresie +/- 3 cm na długości 2 m. Dopuszczalne odchylenie od pionu 1:70. Lokalne nierówności i zagłębienia przekraczające 7 mm wymagały uzupełnienia zaprawą cementową.

Szczegóły uszczelnień

Izolacja powłokowa stropu jest oddzielona od izolacji powłokowej wanny. Brak ciągłości został uzupełniony przez uszczelnienie połączenia oczepu i wierchu ściany szczelinowej oraz przez uszczelnienie połączenia wanny i oczepu. Zastosowano również rozwiązania umożliwiające wprowadzenie przez konstrukcję tunelu instalacji wodociągowej, kanalizacyjnej, energetycznej i teletechnicznej. Uszczelnienie realizowano za pomocą membrany Bituthene 4000.

Technologia robót betonowych

W czasie realizacji budowy tunelu zużyto duże ilości betonu konstrukcyjnego w krótkich cyklach realizacyjnych. Łącznie od maja 2001 do lipca 2002 wbudowano ponad 90 000 m³ betonu. Technologia ro-

bót betonowych została opracowana przy współdziałaniu ITB i IBDiM. Obejmowała zagadnienia: produkcja betonu, dostawy betonu, szalowanie i układanie betonu, pielęgnacja i monitoring temperatur, nadzór nad wszystkimi etapami produkcji w oparciu o normę ISO 9001 „Zarządzenie Jakością”.

Technologia betonowania elementów konstrukcyjnych obejmująca układanie betonu i pielęgnację musiała być dostosowana do:

1. zmiennych warunków pogodowych,
2. wymagań czasowych w zakresie długości cykli realizacyjnych.

Płyty stropowe, oczepy i płyty denne były realizowane w warunkach letnich i zimowych.

Technologia betonowania stropów i oczepów

Warunki wykonania i pielęgnacji musiały zapewnić:

- maksymalny przyrost temperatury w dowolnym przekroju pionowym, nie większy niż 12°C,
- maksymalna różnica temperatur w dowolnym przekroju pionowym, nie większa niż 12°C,
- maksymalna różnica temperatur między dwoma dowolnymi przekrojami, nie większa niż 20°C.

W przypadku stropów i oczepów nadmiernym przyrostom temperatur zapobiegano, stosując następujące działania:

- w miejscach ukrytych belek montowana była instalacja wodna chłodzona z rurą $\phi 1"$. Woda pobierana ze studni głębinowych, przepływając przez spiralę chłodzącą, odbierała część ciepła hydratacji z najgrubszych elementów stropu;
- odbieranie ciepła hydratacji przez chłodzenie pewnej powierzchni.

Chłodzenie należało prowadzić do czasu aż aktualny przyrost temperatury będzie niższy od połowy maksymalnego przyrostu. Do kontroli i sterowania procesami pielęgnacyjnymi służył monitoring temperatur, który obejmował temperaturę wewnętrzną betonu, temperaturę wody chłodzącej i temperaturę powietrza. Wszystkie pomiary były prowadzone co godzinę od czasu rozpoczęcia betonowania do czasu osiągnięcia maksymalnej temperatury oraz przez następne dwie doby. Monitoring temperatury wewnętrznej betonu płyty stropowej prowadzony był w 7 punktach. W każdym punkcie temperatura była mierzona w odległości 2 cm od górnej powierzchni płyty oraz w 1/3 grubości, licząc od spodu. Celem pomiaru było ustalenie maksymalnej temperatury, maksymalnej różnicy temperatury w przekroju oraz zmian temperatury w czasie, co umożli-



Fot. 1. Betonowanie ściany szczelinowej



Fot. 2. Szalowanie spodu i boków płyty stropowej



Fot. 3. Zbrojenie i szalowanie płyty stropowej



Fot. 4. Otwory technologiczne

liwiało prawidłowe dobranie składu mieszanki betonowej. Monitoring temperatury wewnętrznej betonu ocze- pu prowadzony był w 2 punktach pomiarowych na przeciwległych końcach ocze- pu. Monitoring temperatury wewnętrznej betonu płyty dennej prowadzony był w 3 punktach. Monitoring temperatury wody prowadzony był oddzielnie dla chłodzenia wewnętrznego oraz dla chłodzenia powierzchniowego. Niezbędny był pomiar temperatury wody napływającej do układu i wypływającej, w celu prawidłowego dobrania niezbędnego wydatku wody chłodzącej.

Technologia betonowania ścian wanny tunelu

Betonowanie ścian wanny tunelu wymagało opracowania technologii, która eliminowała utrudnienia związane z realizacją metodą stropową oraz umożliwiała maksymalne skrócenie cykli realizacyjnych. Wykonanie ścian wanny tunelu wymagało zrealizowania 260 betonowań ścian o długości 17 m w czasie pięciu miesięcy.

W metodzie stropowej także betonowania można realizować dwoma sposobami:

1. betonowanie przez przepusty zasto- wione w stropach,
2. betonowanie dwuetapowe.

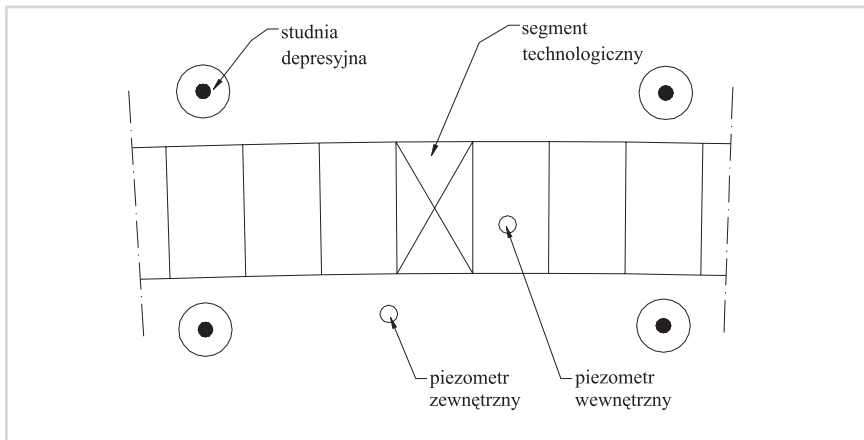
Pierwsza metoda była nieodpowiednia, gdyż pozostawiała otwory wstrzymujące postęp robót izolacyjnych i ziemnych (zasy- pka stropów).

Druga metoda wymagała dużych ilości szalunków. Cykl realizacyjny jednej ścia- ny był za długi (około 5 dni).

Zdecydowano się na betonowanie ścian z wykorzystaniem betonu SCC pompowanego rurociągiem. Z powodu braku doświadczeń zostały wykonane próby poligonowe polegające na zabe- tonowaniu próbných ścian przy użyciu rurociągów o długości 120 m.



Fot. 5. Deskowanie ścian bocznych wanień, ustawione na płycie dennej



Rys. 11. Schemat typowego układu studni odwodnienia

Betonowanie ścian tunelu odbywało się trzema otworami bocznymi zainsta- lowanymi w szalunku i wyposażonymi w zasuwę odcinającą.

Dodatkowo szalunek ścian był wypo- sażony w odpowietrzenia i rurę przele- wową.

Po raz pierwszy w Polsce zastosowano na budowie tunelu beton SCC (samoza- gęszczalny) na tak dużą skalę przemysłową. Dotychczas były wykonywane tylko krótkie, próbne odcinki ścian.

W celu skrócenia długości cyklu po- stanowiono wykonywać rozdeskowanie ścian przed powstaniem szczytu tempera- tur w betonie, po osiągnięciu wytrzyma- łości minimalnej betonu 6 MPa.

Odwodnienie tymczasowe w czasie budowy tunelu

Przy wyborze metody odwodnienia wykopu tunelu Wykonawca kierował się wymaganiami organizacyjnymi budowy oraz istniejącymi warunkami technolo- gicznymi. Zaplanowano realizację budo- wy tunelu metodą stropową, a roboty ziemne odcinkami, sukcesywnie za wy- konaniem ścian szczelinowych. W pro- jekcie założono, że poszczególne odcinki realizacji obiektu (fronty robót) będą trak- towane jako obiekty indywidualne i dla każdego z nich będzie określony zespół odwodnieniowy z określoną intensywno- ścią eksploatacji. Dla łatwiejszego wyko- nania robót przyjęto, że odwodnienie bę- dzie realizowane studniami depresyjnymi znajdującymi się na zewnątrz konstrukcji tunelu. Obszar objęty odwodnieniem miał rozmiary: długość 1400 m, szerokość 150 m. Wykop tunelu znajdował się w odległości ok. 70 m od brzegu Wisły i ok. 700 m od Skarpy Wiślanej. Zabez- pieczenie się przed zmiennym stanem Wisły było najważniejszym celem działa- nia odwodnieniowego.

Projekt odwodnienia opracowany zo- stał na podstawie obliczeń wykonanych na modelu hydrogeologicznym opraco-

wanym przez Danish Hydraulic Institute. Zastosowana metoda modelowania prze- strzennego obiegu wód uwzględniała ele- menty zmiennych stanów wód, opadów atmosferycznych, czasu trwania i inten- sywności pompowania oraz całego cyklu obiegu wód w środowisku. W projekcie wymagane obniżenie zwierciadła wody odnoszono do stanu średniego +1,0 m n.p. „0” Wisły oraz od stanu wysokiego +4,0 m n.p. „0” Wisły. Poziom dna wyko- pu zaprojektowany był w zakresie rzęd- nych od +0,30 n.p. „0” Wisły do +1,0 n. p. „0” Wisły. Zaprojektowany system od- wodnienia tymczasowego składał się z 48 studni depresyjnych połączonych kolektorami zrzutowymi skierowanymi do Wisły.

Podsumowanie

Realizacja tunelu dała wiele doświad- czeń technicznych i organizacyjnych:

- Sprawna koordynacja robót przygo- towawczych i konstrukcyjnych zdecydo- wała o terminowym zakończeniu budo- wy.
- Dla metody stropowej wdrożona została technologia betonowania ścian tunelu przy użyciu betonu SCC. Dzięki tej metodzie zastosowanej w Polsce po raz pierwszy na tak dużą skalę uzyska- no dużą oszczędność czasu i dzięki temu można będzie lepiej planować terminy podobnych projektów.
- Zastosowany system monitorowania temperatury pozwolił na prawidłowe ste- rowanie procesem dojrzewania i pielę- gnacji betonu.
- Ciekawe wnioski powstały z analizy wyników monitorowania systemu odwo- dnienia. Dotyczy to wpływu zmian poziomu wody w rzece na poziom wody gruntowej z uwzględnieniem działania przegrody w postaci ściany szczelinowej. ●

mgr inż. Wojciech Puścikowski
HYDROBUDOWA-6 S.A.