

Technologia mrożenia gruntu podczas budowy tunelu pod Świną

Soil freezing technology during the construction of the tunnel under Świna river

dr hab. inż. Teresa Rucińska, prof. ZUT (ORCID: 0000-0003-2550-2480), Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Janusz Kozanecki, Maciej Kokolus, Studenckie Koło Naukowe Młodzi Inżynierowie PZITB

DOI: 10.5604/01.3001.0053.9353

Streszczenie: Budowa tuneli komunikacyjnych to ogromne wyzwanie dla kadry inżynierskiej. Tunel pod Martwą Wisłą w Gdańsku oraz pod Świną, łączący wyspy Uznam i Wolin, dowodzą, jak wymagające są tego typu inwestycje, nie tylko z uwagi na koszty czy ich realizację, ale również zarządzanie budową. To także konieczność korzystania z nowoczesnych technologii, które wymagają najwyższych kompetencji od wszystkich uczestników procesu inwestycyjno-budowlanego, a zakończona budowa tunelu pod Świną jest tego dowodem. Realizacja tej inwestycji wymagała zastosowania metody pozwalającej na wykonanie wyjść awaryjnych poza obudowę tunelu. Wiercenie należało przeprowadzić w gruncie składającym się głównie z piasków, gliny oraz kredy, do tego zawodnionym. Wybrano więc metodę mrożenia solanką schładzaną w agregatach mroźniowych, co dało pożądaną efekt.

Słowa kluczowe: tunel podwodny, budownictwo podziemne, technologia mrożenia gruntu.

Abstract: The construction of communication tunnels is a huge challenge for the engineering staff. The tunnel under the Martwa Wisła in Gdańsk and under Świna, connecting the islands of Uznam and Wolin, prove how demanding these types of investments are, not only in terms of costs or their implementation, but also in terms of construction management. It is also a necessity to use modern technologies that require the highest competences from all participants of the investment and construction process, and the completed construction of the tunnel under Świna is proof of this. The implementation of this investment required the use of a method that would allow emergency exits to be made outside the tunnel lining. Drilling had to be carried out in soil consisting mainly of sands, clay and chalk, which was also waterlogged. Therefore, the method of freezing with brine cooled in freezing units was chosen, which gave the desired effect.

Keywords: underwater tunnel, underground construction, ground freezing technology.

1. Wprowadzenie

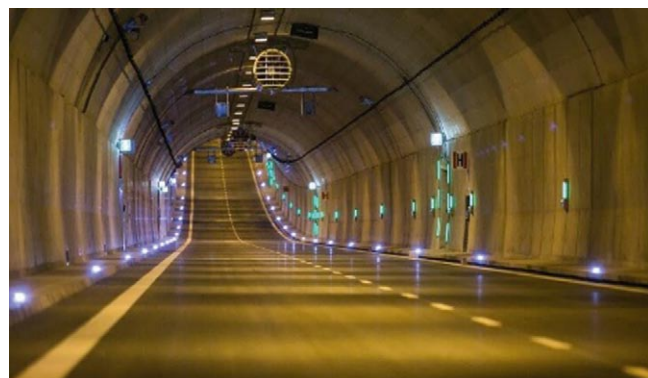
W ostatnich latach w Polsce głośno jest o inwestycjach tuneli podwodnych. Tak było w przypadku podwodnego tunelu przesyłowego Oczyszczalni Ścieków Czajka, zlokalizowanego pod dnem Wisły (2013, rys. 1) i podwodnego tunelu pod Martwą Wisłą w Gdańsku (2016, rys. 2). Tak też się stało,

gdy budowa podwodnego tunelu pomiędzy wyspami Uznam i Wolin w Świnoujściu stała się faktem, a którego uroczyste otwarcie miało miejsce 30 czerwca 2023 roku (rys. 3). Każde tego typu przedsięwzięcie to możliwości tworzenia innowacyjnych i nowoczesnych obiektów inżynierskich dzięki wykorzystaniu specjalistycznego sprzętu oraz materiałów i komponentów budowlanych o parametrach



Rys. 1. Tunel prowadzący ścieki do Oczyszczalni Czajka pod dnem Wisły

Fot. Kuba Atys/Agencja Wyborcza.pl



Rys. 2. Tunel pod Martwą Wisłą w Gdańsku

Fot. Karol Stańczak/GZDIZ

Fot. Hanna Lachowska, Urząd Miasta Świnoujście



Rys. 3. Uroczystość otwarcia tunelu pod Świną



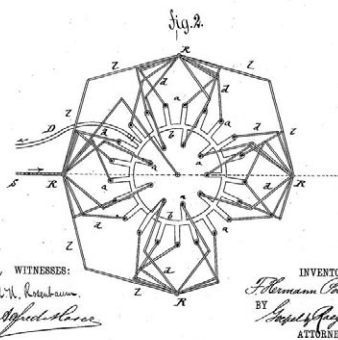
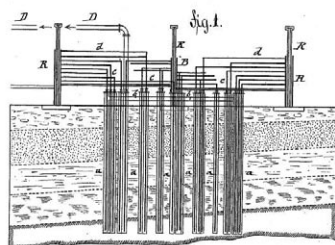
technicznych i użytkowych najwyższej jakości, z jednoczesnym zastosowaniem metod ich wykorzystywania w trudnym terenie, gdzie występują skomplikowane warunki gruntowe. Jeżeli to połączymy z koncepcją BIM (ang. *Building Information Modeling*), która diametralnie zmieniła podejście do projektowania, realizacji i zarządzania inwestycjami w okresie ich całego cyklu życia, wszyscy uczestnicy tak kompleksowo stworzonego projektu korzystają z komfortu pracy w zintegrowanym środowisku. Tak też się stało w przypadku podwodnego tunelu pod Świną, jednej z najbardziej wyczekiwanych inwestycji – zarówno w regionie, jak i w całym kraju. Być może turyści stracą atrakcję przeprawy promowej, ale z pewnością zyskają na czasie i płynności komunikacyjnej. Natomiast dla mieszkańców Świnoujścia przeprawa promowa z wyspy Wolin na Wyspę Uznam była czasochłonna i niewygodna, dlatego o budowie podziemnej przeprawy mówiło się od dawna, ale dopiero kilka lat temu udało się pozyskać fundusze, i to co dla wielu wydawało się nierealne do zrealizowania, stało się faktem. Warto też dodać, że koszt budowy tunelu pokryto w 85% ze środków Unii Europejskiej (przeszło 775 mln zł), natomiast 15% pochodzi z budżetu miasta Świnoujście (ok. 137 mln zł). To zadanie inwestycyjne zostało zrealizowane w ramach projektu pn. „Usprawnienie połączenia komunikacyjnego pomiędzy wyspami Uznam i Woli w Świnoujściu – budowa tunelu pod Świną”, Działanie 4.2 – Zwiększenie dostępności transportowej ośrodków miejskich leżących poza siecią drogową TEN-T i odciążenie miasta od nadmiernego ruchu drogowego, Oś Priorytetowa IV – Infrastruktura drogowa dla miast, Program Operacyjny Infrastruktura i Środowisko 2014–2020.

2. Technologia mrożenia gruntu w budownictwie podziemnym

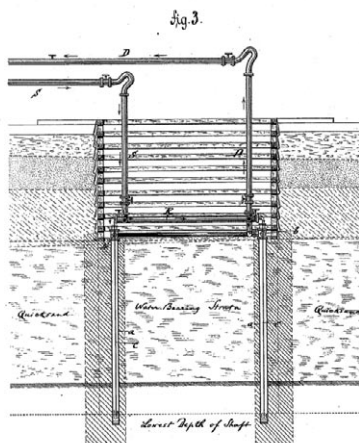
Metodę mrożenia górotworu po raz pierwszy zastosowali inżynierowie francuscy w roku 1853, wykorzystując właściwości naturalnie zamrożonego gruntu w czasie zimy, co umożliwiło wykonanie szybu w gruncie sypkim i nawodnionym. Także w kopalniach złota na Syberii podczas głębinienia szybu wykorzystywano naturalne warunki zimnego,

kontynentalnego klimatu z długimi chłodnymi zimami. Proces ten odbywał się stopniowo techniką skuwania zmarzniętej warstwy górotworu, po czym odkrytą powierzchnię pozostawiano na działanie mrozu przez ok. 2 do 3 dni. Tak zamrożoną warstwę skuwano i ponownie pozostawiano odkrytą powierzchnię na działanie mrozu. Niestety była to żmudna praca, w efekcie której uzyskiwano głębienie szybu od 1 do 1,5 m na miesiąc [1]. Natomiast sztuczne zamrażanie przeprowadzono po raz pierwszy w roku 1862, w południowej Walii. Do zamrożenia zawodnionej skały podczas pogłębiania szybu wykorzystano rurę spiralną, przez którą, po jej ułożeniu na dnie szybu, przepuszczano schłodzone medium. Po uzyskaniu zakładanego efektu instalację mrozącą demontowano, a następnie pogłębiano dno szybu o kilka metrów. Czynność tą powtarzano cyklicznie, aż do osiągnięcia zamierzonego celu. Niestety metoda okazała się mało wydajna i dopiero Friedrich Hermann Poetsch (Pötsch) metodę zmodernizował, stosując rury pionowe umieszczone w otworach wierconych z poziomu powierzchni [2], za co uzyskał w lutym 1883 r. w Niemczech patent, a metodę na głębinienie pionowych szybów w zawodnionym górotworze opisał w pracy „Das Gefrierverfahren. Methode für schnelles, sicheres und lotrechtes Abteufen von Schächten im Schwimmsande und überhaupt im wasserreichen Gebirge; für Herstellung tiefgehender Brückenpfeiler und für Tunnelbauten in rolligem und schwimmendem Gebirge” wydanej w roku 1886 we Freibergu [3]. F. H. Poetsch uzyskał również patenty na metodę mrożenia w budownictwie górnictwem w Stanach Zjednoczonych w czerwcu 1884 r. oraz w maju 1887 r. [4, 5]. W swoim patencie [4], oprócz szczegółowego opisu metody, przedstawił 3 rysunki poglądowe, w jaki sposób przeprowadzić operację mrożenia według opracowanej przez siebie technologii – rysunek 4., natomiast w patencie [5] opisał metodę głębinienia szybów i budowy fundamentów, tuneli kanałów w warstwach wodnych i pod wodą – rysunek 5. Niestety w pierwszych latach stosowania metody F. H. Poetscha, z uwagi na wysokie koszty oraz problemy z występowaniem braku ciągłości mrożenia w założonej strefie, co powodowało wdzieranie się do szybu wody, nie zyskała ona dostatecznej popularności wśród ówczesnych inżynierów górnictwa w Niemczech.

(No Model.) F. H. POETSCH. 2 Sheets—Sheet 1.
METHOD OF AND APPARATUS FOR SINKING SHAFTS THROUGH QUIKSAND.
No. 300,891. Patented June 24, 1884.



(No Model.) F. H. POETSCH. 2 Sheets—Sheet 2.
METHOD OF AND APPARATUS FOR SINKING SHAFTS THROUGH QUIKSAND.
No. 300,891. Patented June 24, 1884.



WITNESSES:
F. H. Poetsch
BY Joseph Rogener
ATTORNEYS.

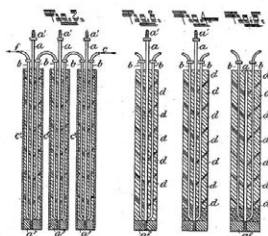
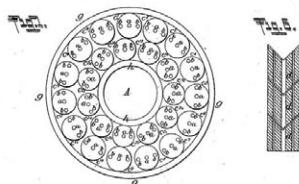
3. Mrożenie gruntu podczas budowy tunelu pod Świną

W czasie budowy podwodnego tunelu pod Świną jedną z najciekawszych technologii wykorzystanej przy budowie wyjść ewakuacyjnych było sztuczne zamrażanie gruntu metodą mrożenia, która wciąż jest popularna na całym świecie w budownictwie górniczym i tunelowym do stworzenia stabilnego środowiska podczas prac tunelowych i uszczelnienia obrzeży tunelu przed napływającą wodą gruntową. To również metoda stosowana do wzmacniania niestabilnego gruntu, w celu zminimalizowania odkształceń podczas prac budowlanych [6–8].

Aby wykonać wyjścia ewakuacyjne poza obudowę tunelu, należało przebić się przez betonową segmentową obudowę tunelu, co było możliwe dzięki zamrożeniu całego obwodu wykopu tymczasowego (rys. 6).

Rys. 4. Szkice do metody mrożenia górotworu według patentu F. H. Poetscha uzyskanego w roku 1884 [4]

(No Model.) F. H. POETSCH.
METHOD OF SINKING SHAFTS, BUILDING FOUNDATIONS, &c., IN
AQUEOUS STRATA.
No. 363,419. Patented May 24, 1887.



WITNESSES:
F. H. Poetsch
BY Joseph Rogener
ATTORNEYS.

Rys. 5. Szkice rozmieszczenia i funkcjonowania instalacji z otworami mroźniowymi według patentu F. H. Poetscha uzyskanego w roku 1887 [5]

Sytuacja uległa jednak zmianie i od początku XX w. metoda mrożenia górotworu była częściej wykorzystywana, o czym świadczy fakt, że do roku 1914 liczba szybów wykonanych metodą mrożenia wzrosła do 155, natomiast w okresie kolejnych ok 40 lat liczba ta wzrosła do ponad 300 [2].

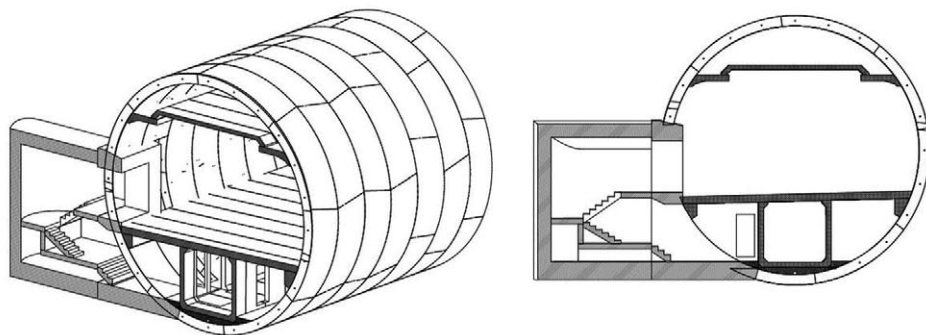
Obecnie w praktyce inżynierskiej wyróżnia się dwie metody mrożenia. Pierwszą z nich jest metoda mrożenia solanką schłodzoną w agregatach mroźniowych. Druga, to tzw. mrożenie kriogeniczne z rozprężaniem skroplonych gazów. Szczegółowy opis obydwu metod mrożenia przedstawiono w pracy [1].

W miejscu zaplanowanego wyłomu zamontowano ramę stalową w celu wzmocnienia konstrukcji tunelu (rys. 7). Stalowa rama podpierająca składała się z 6 stalowych pierścieni żebrowych i 2 poziomych oraz 2 pionowych kratownic. Po wycięciu części segmentów obudowy (rys. 8), stanowiła zabezpieczenie tunelu TBM, zapewniając ciągłość konstrukcji.

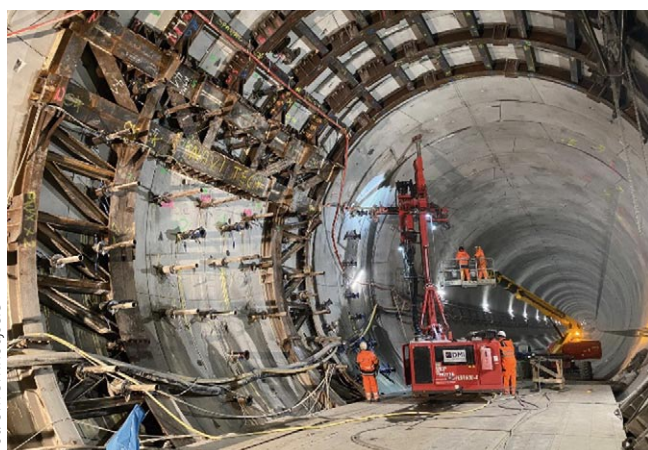
Podobnie jak podczas budowy tunelu pod Martwą Wisłą, w projekcie budowy tunelu pod Świną zaplanowano metodę mrożenia z wykorzystaniem solanki. W metodzie tej czynnikiem chłodzącym są wodne roztwory soli ($MgCl_2$, $CaCl_2$ lub amoniaku NH_3) o minimalnych temperaturach schłodzenia, odpowiednio do $-34^\circ C$ i do $-55^\circ C$. Proces mrożenia odbywa się z powierzchni ziemi. Czynnikiem mrozącym jest schłodzona solanka przepływająca w systemie rur mroźniowych. W metodzie tej bardzo ważny jest dobór agregatów chłodniczych o niezbędnej sprawności, zapewniającej ciągłość pracy we wszystkich etapach mrożenia. W okresie aktywnego mrożenia stosuje się solankę mniej schłodzoną, np. do temperatury $-15^\circ C$, po czym następuje obniżenie temperatury do np. $-30^\circ C$ lub do temperatury jeszcze niższej [1].

W przypadku tunelu pod Świną okres mrożenia aktywnego, w celu obniżenia temperatury gruntu do ok. $-12^\circ C$ w części środkowej płaszcza mroźniowego, trwał ok. 65 dni, po czym nastąpił etap mrożenia pasywnego, podtrzymującego niską temperaturę przez ok. 100 dni. W tym okresie przebijano się przez betonową obudowę tunelu i wykonywano konstrukcję wyjść ewakuacyjnych. Należy dodać, że średnia temperatura zamrożonej bryły gruntu wynosiła $-10^\circ C$ w przypadku piasków i gliny oraz $-8^\circ C$ dla kredy. Oznacza to, że założona temperatura mrożenia na poziomie $-12^\circ C$ powinna była zapewnić wodoszczelną strukturę gruntu.

Rys. 6. Przekrój tunelu z wyjściem ewakuacyjnym w części podwodnej



Przy obydwu wyjściach ewakuacyjnych zainstalowano agregat mroźniowy o mocy ok. 180 kW oraz zbiorniki z solanką. Sumaryczna długość odwiertów pod system rur do przepuszczania płynu chłodzącego wyniosła 643 m. Posłużyły one do przepuszczania w obiegu zamkniętym roztworu solanki schładzanej do temperatury -35°C . W wyni-



Fot. UM Świnoujście

Rys. 7. Stalowa rama podpierająca

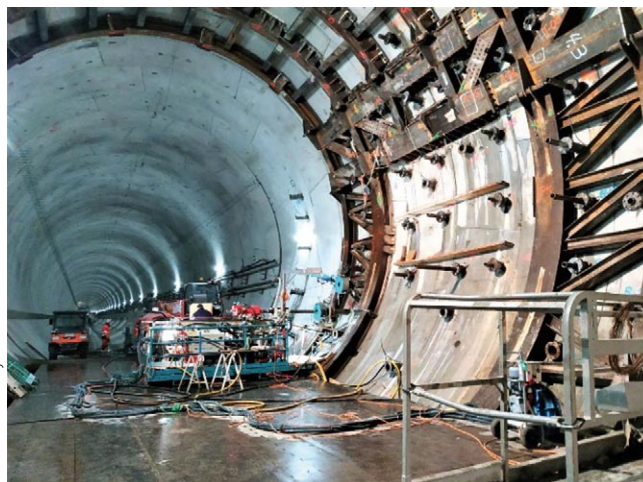
Rys. 8. Wyjście ewakuacyjne



Fot. UM Świnoujście

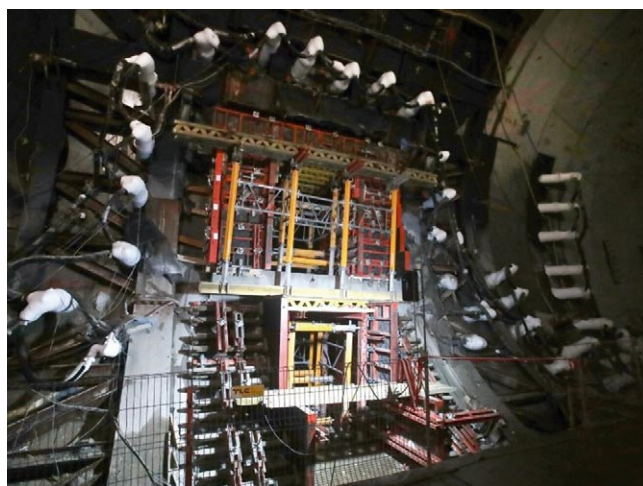
ku tego procesu roztwór solanki absorbował ciepło z gruntu, a następnie przynosił do instalacji, by ostatecznie nadmiar ciepła został uwolniony do atmosfery.

Warto dodać, że prace poprzedzające mrożenie gruntu trwały ok. 4 miesiące. W tym czasie wykonywano m.in. niezbędne odwierty oraz zamontowano instalację mrożenia (rys. 9), która składała się ze sprężarki, skraplacza, parownika oraz systemu rur mroźniowych i technologicznych tj. drenazowych i temperaturowych. Wykonano montaż zasilania oraz czujników chłodzenia. Podłączono lance mroźniowe, ustawiono zakład zamrażania oraz zamontowano przyrządy pomiarowe. Po zakończeniu tych prac rozpoczęto mrożenie gruntu (rys. 10). W okresie mrożenia niezwykle istotna była ciągła kontrola



Fot. UM Świnoujście

Rys. 9. Montaż instalacji mroźniowej z platformy roboczej



Fot. A. Szkocki

Rys. 10. Mrożenie gruntu na etapie budowy wyjścia ewakuacyjnego

postępujących prac. W pierwszym etapie mrożenia (trwającym 30 dni) sprawdzano, czy grunt wokół lanc staje się styczny względem siebie i czy odcięto dopływ wody, a tym samym czy uzyskano efekt szczelności. W drugim etapie dążono do uzyskania odpowiedniej grubości ściany lodowej, co było istotne z uwagi na zachowanie bezpieczeństwa podczas wykonywania wykopu. Prace rozpoczęto od wykonania odwiertów kierunkowych, wykorzystując 3 typy specjalnych wiertnic przystosowanych do tego zadania. Były one wykonywane równolegle na dwóch wyjściach ewakuacyjnych z 14-dniowym przesunięciem. W następnej kolejności

podłączono instalację mrozeniową i rozpoczęto wprowadzanie lanc mrozeniowych do odwiertów. Po sprawdzeniu szczelności wprowadzono rurę z polietylenu. Tak przygotowana lanca była gotowa do pompowania chlorku wapnia. Przed rozpoczęciem budowy rozważano użycie ciekłego azotu, także używanego w metodzie mrożenia gruntu, jednak ze względu na logistykę transportu to rozwiązanie zostało wykluczone. Następnie do odwiertów rozstawionych na długości 1 m, wykonanych w różnych płaszczyznach, wprowadzono 84 rurki o długości między 5 a 16 m. Do układu w systemie obiegu zamkniętego wtłoczono medium chłodzące do temperatury około -35°C . Rozpoczynając tłoczenie płynu chłodzącego zapoczątkowano mrożenie poza częścią rdzenia, aby sprawdzić, czy pierwszy etap zamrażania postępuje zgodnie z planem, przy czym proces mrożenia monitorowano za pomocą manometrów. Gdy pierwszy etap mrożenia został potwierdzony, rozpoczęto mrożenie rdzenia i przystąpiono do całkowitego zamrażania gruntu. Na tym etapie mrożenia woda zalegająca w porach gruntu zmienia swój stan skupienia w lód, który łączy cząsteczki gleby lub skały, tworząc zamrożony szkielet o zwiększonej wytrzymałości na ściskanie, stając się nieprzepuszczalnym. W przypadku gdy w glebie nie ma wystarczającej ilości wody, aby wypełnić wszystkie pory po zamrożeniu, konieczne jest dostarczenie dodatkowej wody, aby pory zostały całkowicie zamknięte. Warto nadmienić, że zamrażanie jest związane w niektórych gruntach z pęcznieniem. Następuje wtedy deformacja mogąca spowodować uszkodzenia w sąsiadujących obszarach, zwłaszcza w przypadku wykopów w obrębie urządzeń miejskich. Dlatego niezwykle ważne były prace geologiczne towarzyszące budowie tunelu pod Świną, przede wszystkim z uwagi na zróżnicowaną budowę podłoża, w tym pokłady kredy. Dzięki temu maszyna TBM (ang. *Tunnel Boring Machine*) na bieżąco była dostosowywana do procesu drążenia.

Jednym z podstawowych problemów, jakie napotkano podczas mrożenia gruntu, było domrażanie obszaru nad lancami mrozeniowymi przy wyjściu ewakuacyjnym. W tym miejscu temperatura wynosiła około 0°C , gdzie założona temperatura zamrożonego gruntu miała utrzymywać się poniżej zera ze względu na zasolenie. Wykonano więc odwierty kontrolne w czole wykopu, co pozwoliło nadzorować ewentualne ryzyko przebicia w tym obszarze. Ostatecznie proces mrożenia trwał 65 dni do momentu otwarcia budowy wyjść ewakuacyjnych. Wstępną obudowę o grubości 25 cm wykonano z betonu w technologii natryskowej, natomiast obudowę ostateczną podzielono na etapy, takie jak: płyta fundamentowa grubości 85 cm, ściany oraz strop grubości 60 cm. Wyjście połączono z obudową segmentową, łączącą całość konstrukcji. Po demontażu lanc mrozeniowych odwierty kierunkowe wypełniono zaprawą cementową, następnie zamknięcia odwiertów zespawano blachą stalową i wypełniono szybko wiążącą zaprawą cementową, tworząc zamknięcie w postaci szczelnego korka. Dodatkowo zdecydowano się na iniekcję każdej lancy, ponieważ w czasie rozmrażania zauważono

wycieki wody. Okres mrożenia od pierwszego wyjścia do zakończenia realizacji drugiego wyjścia w odstępie 14 dni zajęł razem 162 dni, zgodnie ze wstępnymi planami wykonawców. Sprawne prowadzenie całego procesu inwestycji zostało podsumowane uroczystym otwarciem tunelu pod Świną w dniu 30 czerwca 2023 r. Dla województwa zachodniopomorskiego jest to jedna z najważniejszych inwestycji ostatnich lat. Tunel to nie tylko jezdnia, ale także pomieszczenia techniczne, kanały technologiczne, galeria ewakuacyjna oraz strop z kanałem wentylacyjnym. Na terenie budowy powstała hala prefabrykacji, by w sposób kontrolowany i precyzyjny powstawały betonowe prefabrykaty i segmenty obudowy tunelu. Po wykonaniu konstrukcji tunelu nastąpił etap niezbędnych prac montażowych. W sąsiedztwie tunelu powstała infrastruktura drogowa i techniczna. Oznacza to, że połączenie wyspy Uznam i Wolin stało się faktem.

4. Podsumowanie

Metoda mrożenia gruntu stosowana w budownictwie tunelowym ułatwia wykonanie głębin zarówno w gruntach luźnych, niestabilnych, jak i zawodnionych, czego dowodem jest m.in. tunel pod martwą Wisłą i Świną. Jest to metoda skuteczna i bezpieczna, a także umożliwiająca indywidualne przystosowanie do potrzeb inwestycji. Gwarantem sukcesu prawidłowego procesu mrożenia jest wysokiej klasy wykwalifikowana i doświadczona kadra inżynierska, nadzór techniczny, doświadczeni wykonawcy, dysponujący wymaganym specjalistycznym sprzętem. Jest to interaktywny proces wymagający zaawansowanej inżynierii, dokładnego wiercenia, a także wykonanego na zamówienie sprzętu chłodniczego i oprzyrządowania. Spełniając powyższe warunki w tunelu pod Świną, udało się wykonać wyjścia ewakuacyjne bezpiecznie i zgodnie z założeniami.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Więckowski A., Hajto D., Proficz P., Technika zamrażania gruntów i skał luźnych. Przegląd Budowlany 3/2018
- [2] Gontaszewska-Piekarz A., Preidl W., Kopalnia „Bach” w Cybince – historia zastosowania metody zamrażania górotworu w górnictwie węgla brunatnego, Kwartalnik Historii Nauki i Techniki 2020, str. 9–28, doi: <https://doi.org/10.4467/0023589XKHNT.20.017.12600>
- [3] Gontaszewska A., Preidl W., Wójcik A., Friedrich Hermann Poetsch, twórca metody mrożenia górotworu w budownictwie podziemnym, Hereditas Minariorum 6/2020, str. 9–13
- [4] Poetsch F. H., Method of and apparatus for sinking shafts through quicksand. Specification forming part of Letters Patent No. 300, 891, dated June 24, 1884, United States Patent Office
- [5] Poetsch F.H., Method of Sinking Shafts, Building Foundations, &c, in Aqueous Strata. Specification forming part of Letters Patent No.363,419, dated May 24, 1887, United States Patent Office
- [6] Alireza A., Hirokazu A., Artificial ground freezing application in shield tunnel. International Workshop on Geotechnics for Resilient Infrastructure. The Second Japan-India Workshop in Geotechnical Engineering, tom 3, 2/2015, str. 71–75, <https://doi.org/10.3208/jgssp.v03.j01>
- [7] Hu J., Liu Y., Li Y. et al., Artificial Ground Freezing In Tunnelling Through Aquifer Soil Layers: a Case Study in Nanjing Metro Line 2, KSCE Journal Civil Engineering 22, 2018, str. 4136–4142, <https://doi.org/10.1007/s12205-018-0049-z>
- [8] Lackner R., Pichler C., Kloiber A., Artificial Ground Freezing of Fully Saturated Soil: Viscoelastic Behavior, Journal of Engineering Mechanics 2008, tom 134, 1–11, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2008\)134:1\(1\)1](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2008)134:1(1)1)