

## INIEKCYJNE WZMACNIANIE I USZCZELNIANIE GRUNTÓW PRZY BUDOWIE METRA

UKD 624.138.4:624.193(438.111)

Budowa metra warszawskiego postawiła przed jego projektantami i realizatorami wiele nowych problemów technicznych. Wynikają one z nowatorskiego charakteru oraz niespotykanej w polskich budowach inżynierskich skali. Warszawskie metro jest budowane płytką trasą zagłębianą od 9,0 m do 15,5 m. Dlatego szczególnego znaczenia nabierają tutaj zagadnienia geotechniczne związane z realizacją metra bezpośrednio przy istniejących obiektach lub pod nimi. Przyjęto dwie podstawowe metody budowy. Stacje oraz część tuneli są wykonywane w wykopach otwartych, natomiast część tuneli w środkowej części miasta jest realizowana metodą tarczową. Rozwiązanie problemów geotechnicznych w warunkach przyjętej budowy metra wymaga zastosowania na dużą skalę następujących technologii:

1) drążenie tunelu metodą tarczową (7), tj. podziemną metodą wykonywania tunelu za pomocą urządzenia, tzw. tarczy. Zastosowanie tej technologii w obszarach o zwartej zabudowie miejskiej zmniejsza dla mieszkańców uciążliwość robót ziemnych, jak również ogranicza konieczność przebudowy istniejącej sieci podziemnej oraz bieżących znajdujących się na powierzchni;

2) wykonywanie obudowy wykopów za pomocą ścianki berlińskiej lub ścianek szczelinowych w wariantcie tradycyjnym „na mokro”, albo też w wersji nowoczesnej „prefabrykowanej” w samoteżęjącej zawieszynie (6);

3) wykonywanie kotwi gruntowych tradycyjnych lub iniekcyjnych w celu wyeliminowania rozpór między ścianami obudowy wykopu;

4) iniekcyjne wzmocnianie i uszczelnianie gruntów w celu poprawy fizyczno-mechanicznych właściwości gruntu

i chronienie w ten sposób najbardziej zagrożonych budową metra obiektów inżynierskich, czy też szczególnie cennych elementów środowiska naturalnego.

Autorzy niniejszego artykułu ograniczają się do rozpatrzenia problemu zastosowania technik iniekcyjnych, ich zakresu oraz znaczenia podczas budowy metra, przede wszystkim w aspekcie możliwości stosowania w warunkach budowy geologicznej Warszawy.

### OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA TECHNIK INIEKCYJNYCH

Chemiczne wzmocnianie i uszczelnianie gruntu metodą iniekcji stało się już dziś stałym elementem praktyki inżynierskiej w zakresie budowli ziemnych i tunelowych. Odgrywa ono wielką rolę przy rekonstrukcji dużych miast, rozbudowie i modernizacji ich sieci komunikacyjnej. Szczególnie ważną rolę odgrywa podczas budowy metra. Przykłady zastosowania technik iniekcyjnych można spotkać prawie na wszystkich obecnie prowadzonych budowach i pracach modernizacyjnych (Praga, Budapeszt, Moskwa, Paryż; 2, 11). Wzrost znaczenia technik iniekcyjnych jest związany z faktem, że wiele problemów geotechnicznych można w sposób racjonalny rozwiązać przez sztuczne wzmocnienie i uszczelnienie gruntów. Konkurencyjne dla tej metody jest stosowanie metod mroźniowych, typowych dla budownictwa górniczego, lecz koszt takiego przedsięwzięcia jest nieporównywalnie większy.

W sposób ogólny iniekcyjne metody stabilizacji gruntów można podzielić na iniekcję klasyczną, w której struktura szkieletu gruntowego pozostaje nienaruszona, oraz

iniekcje z naruszeniem struktury tego szkieletu. Metoda iniekcji klasycznej polega na powolnym wtłaczaniu w grunt środków wiążących, które wypierają z por gruntu ciecz lub gaz i po pewnym czasie przechodzą z fazy ciekłej w stałą spajając ziarna mineralne w monolit. Metodę tę można stosować w gruntach praktycznie przepuszczalnych dla wody, tj. wówczas, gdy współczynnik filtracji jest większy od  $10^{-6}$  m/s.

Charakterystycznym przykładem iniekcji z naruszeniem struktury szkieletu gruntowego jest zdobywająca coraz szersze zastosowanie iniekcja ciśnieniowo-strumieniowa. Polega ona na wstrzykiwaniu w grunt środków wiążących przy wykorzystaniu wysokich ciśnień (ok. 30–60 MPa) w taki sposób, aby wprowadzony w grunt czynnik tworzył strumień zdolny do cięcia i burzenia struktury gruntu na dostatecznie dużą odległość. Wstrzyknięty czynnik, wymieszany z gruntem rodzimym, przechodzi z fazy ciekłej w stałą i tworzy wraz z nim bryły o ulepszonych właściwościach fizyczno-mechanicznych. Metodę tę można stosować zarówno w gruntach spoistych, jak i sypkich zawierających do 50% frakcji żwirowej. Przy stosowaniu iniekcji ciśnieniowo-strumieniowej często konieczne jest odprowadzenie ze wzmacnianego obszaru gruntu części materiału w postaci mieszaniny zaczynu z gruntem rodzimym.

Zakres stosowania technik iniekcyjnych uzależniony jest od dostępności i ekonomiczności środków iniekcyjnych, jak również stopnia opanowania techniki iniekcyjnej przez wyspecjalizowane przedsiębiorstwa mające odpowiedni sprzęt. Jako środków iniekcyjnych używa się przede wszystkim zaczynów i zapraw na bazie szkła wodnego lub żywic syntetycznych. Wybór odpowiedniego środka iniekcyjnego uzależniony jest od parametrów ośrodka gruntowego przewidzianego do wzmocnienia (wielkość ziarn gruntu, współczynnik filtracji), cech samego iniektu (lepkość, wytrzymałość, przepuszczalność, właściwości reologiczne), planowanych efektów (wzmocnienie, uszczelnienie gruntu) oraz wpływu jego zastosowania na środowisko naturalne.

Stosowanie zaczynów cementowych znane jest od przeszło stu lat i ciągle ich receptura jest doskonała. W zależności od oczekiwanych właściwości zaczynu mogą być dodawane wypełniacze mineralne, jak bentonit, piasek oraz dodatki chemiczne mające na celu uzyskanie odpowiednich do założeń parametrów, takich jak: gęstość, rozlewność, rozwarstwialność, początek wiązania, koniec wiązania, wytrzymałość, wodoprzepuszczalność, odporność na korozję i inne. Lepsze właściwości iniekcyjne zaczynów można uzyskać również przez stosowanie wysokich marek cementów oraz obróbki mechanicznej w szybkoobrotowych mieszadłach. Jednak ze względu na wielkość cząstek cementu, stosowanie cementacji przy iniekcji klasycznej możliwe jest w gruntach o współczynniku filtracji większym od ok.  $10^{-3}$  m/s. Gdy współczynnik filtracji jest mniejszy, muszą być stosowane roztwory chemiczne na bazie żywic lub szkła wodnego. Środki iniekcyjne na bazie żywic stanowią roztwory związków chemicznych w wodzie lub rozpuszczalnikach bezwodnych. Literatura światowa podaje przekłady stosowania żywic mocznikowych, acetonowo-formaldehydowych, fenolowych, rezorcynowych, akrylamidów, poliakrylanów (AM-9, Geoseal, Sumisol). Użycie wielocząsteczkowych polimerów szczególnie istotne jest w warunkach awaryjnych, występujących np. przy uszkodzeniu wałów przeciwpowodziowych, pęknięć tam, przecieków toksycznych ścieków, w których istnieje konieczność użycia środków z regulowaną szybkością wiązania, niezależną od warunków panujących w górotworze. Tworzący się po iniekcji polimer powinien charakteryzować

się odpornością na starzenie, dobrą adhezją, dostateczną wytrzymałością. Stosunkowo najlepiej warunki te spełniają monomery akrylowe, pochodne kwasu akrylowego i metakrylowego, zwłaszcza typu amidów, hydroksymetaloamidów, soli nieorganicznych i niektórych estrów.

Literatura krajowa podaje przykłady produkcji i stosowania krajowych żywic: kleju 116, żywicy mocznikowo-formaldehydowej MS-10K, żywicy acetonowo-formaldehydowej AF-3, żywic akrylowych (Solakryl M, Solakryl S-100, Budokryl). Parametrem, który determinuje stosowanie w technice iniekcyjnej roztworów na bazie żywic, jest ich koszt. P. Auriol, przyjmując koszt zaczynu itowo-cementowego jako 1, określa stosunek kosztów:

- zawiesiny stałej 2–4,
- roztworów na bazie szkła wodnego 6–12,
- roztworów na bazie żywic 10–50.

Jest to szczególnie istotne przy stosowaniu techniki iniekcyjnej w budownictwie inżynierskim typu metro, gdzie istnieje często konieczność zeskalania tysięcy metrów sześciennych gruntu. Stąd w ostatnim dziesięcioleciu nawrót do stosowania tańszych i znacznie bezpieczniejszych dla środowiska naturalnego roztworów na bazie szkła wodnego.

Roztwory żelujące na bazie szkła wodnego znane są od dawna. Iniekcje dwurozтворowe i jednorozтворowe systemu Joostena, Jöhdego, Francaisa, Rodio, Langera, polegały na jedno- lub dwurozтворowym wtłaczaniu szkła wodnego oraz dodatków regulujących, takich jak: chlorek wapnia, sole metali  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{FeSO}_4$ , siarczan glinu, wapno gaszone. Wszystkie ww. metody nie pozwalały na regulowanie czasu żelowania przy zachowaniu niskiej lepkości i istotnej wytrzymałości. Oprócz tego charakteryzowane były jako nietrwałe, dlatego ich zakres stosowania w praktyce był niewielki i ograniczył się do specyficznych wypadków. W ostatnich latach opublikowano informacje o wielu nowych roztworach wzmacniających i uszczelniających na bazie szkła wodnego i związków organicznych. Zastosowano w nich nowy typ odczynnika żelującego dającego odpowiedni wzrost wytrzymałości żelu. Reagent jest odczynnikiem organicznym, który nie daje natychmiastowej reakcji z krzemianem sodowym, lecz powoli przemienia się na nowe produkty, które są rzeczywistym składnikiem żelu krzemianowego. Dzięki temu możliwy jest wzrost koncentracji krzemianu sodowego i reagentu żelującego w roztworze iniekcyjnym, co powoduje otrzymanie żeli twardych i nieprzepuszczalnych w wodzie.

Nowoczesne odczynniki żelujące wpłynęły na swoisty renesans szkła wodnego w zastosowaniach inżynierskich, jak również na zwiększony zakres ich stosowania (2, 5, 11). Granice stosowania żeli do piasków określa ich współczynnik filtracji w granicach od  $10^{-3}$  do  $10^{-6}$  m/s.

#### ZAKRES STOSOWANIA INIEKCyjNEJ STABILIZACJI GRUNTÓW DLA METRA WARSZAWSKIEGO

Poza względami ekonomicznymi i związanymi z ochroną środowiska, zakres stosowania iniekcyjnego wzmacniania i uszczelniania gruntów przy budowie metra zależy od:

- możliwości dysponowania technikami iniekcyjnymi,
- warunków geologiczno-inżynierskich na trasie budowy,
- przyjętej metody budowy metra,
- lokalizacji linii metra względem obiektów inżynierskich.

Obecnie na budowie metra jest stosowana iniekcja klasyczna, dlatego też omówienie możliwości iniekcyjnej stabilizacji autorzy ograniczają do tej metody. Na jej

zakres w sposób bardzo istotny wpływa budowa geologiczna oraz warunki hydrogeologiczne występujące na trasie metra. Wzdłuż całej I linii zalegają osady plejstoceny, przy czym dominują tutaj utwory z okresu zlodowacenia środkowopolskiego, następnie interglacjału mazowieckiego oraz w mniejszym stopniu zlodowacenia południowopolskiego i utworów pliocenu (1, 9). Utwory plejstoceny są wykształcone głównie w postaci glin zwałowych, piasków rzeczno-lodowcowych oraz ilów i pyłów zastoiskowych. Ogólnie układ tych warstw jest bardzo nieregularny. W wielu miejscach gliny zwałowe przedzielone są piaskami zastoiskowymi, wodnolodowcowymi i lodowcowymi oraz piaskami gliniastymi lodowcowymi, jak również ilami i pyłami zastoiskowymi. Utwory te występują w formie warstw lub soczew i są silnie zaburzone glaciektonicznie.

Można wydzielić tutaj dwa poziomy wodonośny. Pierwszy, górny poziom wodonośny jest nieciągły i tworzy jedną, rzadziej dwie warstwy lub soczewki śródmorenowych piasków pylastych, drobno- i średnioziarnistych. Drugi, główny poziom wodonośny budują piaski zlodowacenia środkowopolskiego i interglacjału mazowieckiego. Współczynnik filtracji tych warstw ma stosunkowo niewielką zmienność i wynosi ok.  $1,2 \cdot 10^{-4}$  do  $4,0 \cdot 10^{-4}$  m/s. Współczynniki filtracji górnego poziomu wodonośnego są dość znacznie zróżnicowane i mogą wynosić w piaskach pylastych  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s i mniej, a w piaskach średnioziarnistych od  $2,1 \cdot 10^{-4}$  do  $2,4 \cdot 10^{-4}$  m/s.

Zakłada się, że podczas drążenia tunelu metra – na odcinkach, gdzie zwierciadło wód gruntowych kształtuje się powyżej projektowanego zagłębienia tunelu – będzie prowadzone odwodnienie za pomocą studni. Jednakże prognozy odwodnienia przewidują, że w momencie prac związanych z wykonaniem tunelu nie zawsze uda się obniżyć zwierciadło wody do zakładanego poziomu. Z fizycznego punktu widzenia, sytuacje takie zaistnieją zawsze na przecięciu lokalnego zagłębienia spągu utworów wodonośnych z tunelem. Ponadto, ze względu na niską wodoprzepuszczalność i tym samym wolną i czasochłonną odsączalność górnego poziomu wodonośnego, ukształtowanego często w postaci wkładek i soczewek, bardzo trudnych do zlokalizowania i określenia powiązań hydraulicznych, zakłada się wystąpienie problemów z jego odwodnieniem. Przecięcie tunelem nieodwodnionych gruntów piaszczystych

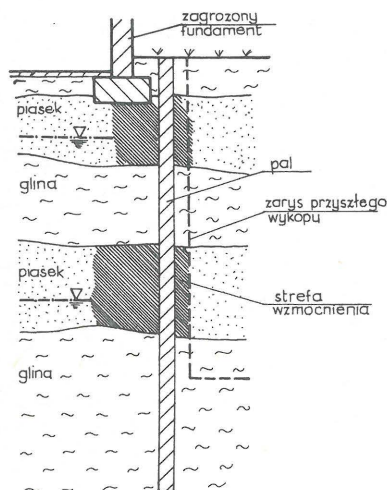
pociąga za sobą rozwój w mniejszym lub większym stopniu sufozji gruntu i zjawisk kurzawkowych. Sytuacja taka stwarza dodatkowe, bardzo duże zagrożenie dla istniejących obiektów inżynierskich położonych w pobliżu prowadzonych robót związanych z wykonywaniem tunelu. Uwzględniając powyższe uwagi, budowę geologiczną oraz przyjęte metody budowy tunelu, można przewidywać możliwość zastosowania klasycznej iniekcji gruntów w następujących wypadkach:

**A. Wzmocnienie przewarstwień piaszczystych pod istniejącymi fundamentami budowli, znajdującymi się w bezpośrednim sąsiedztwie wykopu (ryc. 1).** Zabieg taki jest szczególnie wskazany, gdy zastosowana obudowa wykopu nie gwarantuje w pełni, że nie nastąpi rozluźnienie gruntu pod fundamentami lub w wypadku występowania nawodnionych przewarstwień piaszczystych, stwarzających możliwość rozwoju sufozji i kurzawki przez nieszczelną obudowę, np. berlińską. Iniekcyjne wzmocnienie gruntów piaszczystych można dodatkowo uzupełnić wykonaniem pali, przechodzących przez grunty spoiste i zeskalone piaski, co powoduje powstanie bardzo odpornych na deformację obszarów podłoża gruntowego.

**B. Wykonanie poziomego ekranu uszczelniającego, rozpiętego na dolnych krawędziach szczelin ścian (ryc. 2).** Budowa tunelu metra w „wannie” utworzonej przez ściany szczelne (np. szczelinowe) oraz poziomy ekran, pozwala na utrzymanie – poza strefą samych robót – zwierciadła wód gruntowych na nie zmienionym poziomie. Omawiana technologia zapobiega powstawaniu niekorzystnych zjawisk, jakie mogą zachodzić przy długotrwałym i rozległym obniżeniu wód gruntowych w wypadku występowania w podłożu ściśliwych warstw gruntu. Chodzi tu przede wszystkim o wyeliminowanie awarii związanych z nierównomiernym osiadaniami budynków, tras komunikacyjnych i rurociągów, znajdujących się w obrębie zasięgu leja depresji.

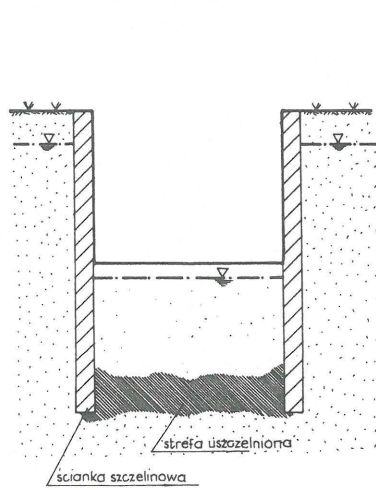
**C. Wzmacnianie przewarstwień piaszczystych pod fundamentami budynków i rurociągami znajdującymi się w strefie deformacji związanych z drążeniem tunelu metodą tarczową (ryc. 3).** Wielkość osiadań gruntu na powierzchni terenu nad osią tunelu może dochodzić przy tej metodzie drążenia do 5 cm (1). Dzięki zastosowaniu iniekcji osiadania te można w znaczny sposób zredukować.

**D. Stabilizowanie na przedpolu tarczy trudno odsączal-**



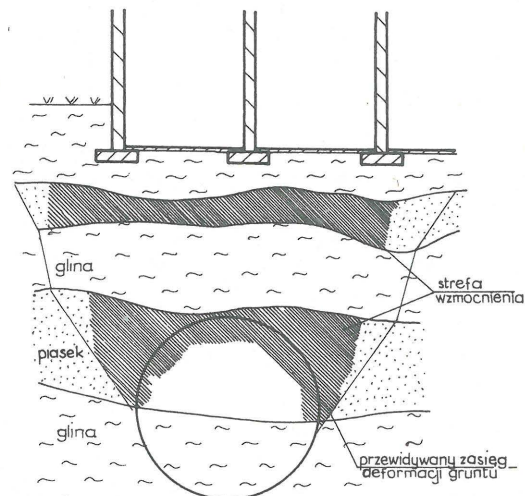
Ryc. 1. Wzmocnienie i uszczelnienie skarp wykopu

Fig. 1. Strengthening and grouting of escarpments of underground cut



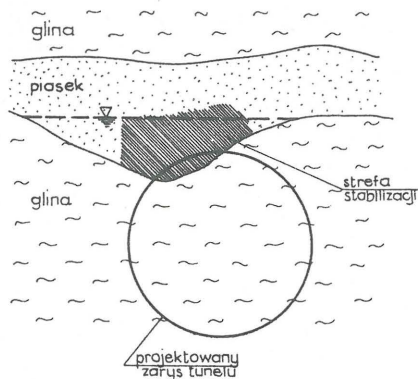
Ryc. 2. Poziomy ekran uszczelniający

Fig. 2. Horizontal grouting screen



Ryc. 3. Wzmocnienie w strefie deformacji gruntu wywołanej drążeniem tunelu metodą tarczową

Fig. 3. Strengthening in zone of deformations due to tunnelling works carried out by the shield method



Ryc. 4. Stabilizacja nawodnionych piasków na przedpołu tarczy

Fig. 4. Stabilization of saturated sands in front of drilling shield

nych, nawodnionych soczewek piasków pylastych i drobnoziarnistych mogących prowadzić do powstania zjawisk kurzkawkowych (ryc. 4). Stwarzają one szczególnie duże zagrożenie w momencie nacięcia ich przez nóż tarczy. Może wówczas dojść do upłynnienia dużych mas piasków i ich napływu do tunelu. Skutkiem tego może być tworzenie się zapadłisk na powierzchni terenu.

E. Wykonywanie pionowych ekranów uszczelniających wokół drzew lub innych obiektów, w celu zachowania na nie zmienionym poziomie zwierciadła wód gruntowych. W warunkach budowy geologicznej na trasie metra wspomniana metoda może być efektywna zwłaszcza w takich wypadkach, gdy w przekroju geologicznym udział przewarstwień piaszczystych jest nieduży.

F. Wzmacnianie i uszczelnianie obudowy tubingowej tuneli wykonywanych metodą tarczową. Celem wspomnianych zabiegów iniekcyjnych jest wypełnienie wolnej przestrzeni powstającej między obudową tunelu a górotworem w taki sposób, aby zapewnić dobrą pracę obudowy i w maksymalny sposób zahamować dopływ wody. W tym wypadku wykonuje się iniekcję w dwóch etapach – najpierw tzw. iniekcję wypełniającą, a następnie uszczelniającą.

G. Wzmacnianie gruntów piaszczystych przylegających do obudowy z bloków żelbetowych, które – obok tubingów żeliwnych – mogą być stosowane podczas drążenia tunelu metodą tarczową. Wspomniane wzmocnienie jest szczególnie ważne w piaskach pylastych i drobnoziarnistych. Ma ono na celu niedopuszczenie do wystąpienia „klawiszowania” i przerwania szczelności obudowy wskutek dynamicznych obciążeń wywołanych przejeżdżającymi w tunelu wagonami metra.

H. Stabilizacja gruntów między tunelem a zabudową mieszkalną, w celu zmniejszenia przenoszonych wibracji (3). Wspomniany sposób może być wykorzystany dla zwiększenia „masy” tunelu lub wykonania przesłony; zwłaszcza w wypadkach, gdy częstotliwość drgań propagowanych przez tunel stanowi częstotliwość rezonansową drgań własnych chronionej zabudowy.

We wszystkich wypadkach – z wyjątkiem wymienionych w punkcie F – mogą być stosowane wyłącznie chemiczne środki iniekcyjne. Wielkości kanalików tworzonych przez pory gruntów piaszczystych występujących na trasie metra są zbyt małe i tym samym uniemożliwiają przepływ zaczynów cementowych.

#### PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ

Jak już wcześniej wspomniano, klasyczna iniekcja gruntów jest już stosowana przy budowie metra warszaw-

skiego. Roboty iniekcyjne są prowadzone przez Instytut Geotechniki Politechniki Wrocławskiej. Przy pracach tych wykorzystywany jest opracowany również w instytucie sposób iniekcji, umożliwiający stabilizację płytko zalegających utworów piaszczystych o bardzo małym współczynniku filtracji oraz nowy oryginalny środek iniekcyjny na bazie szkła wodnego „geożel” (10), pozwalający na jednoroztworowe sterowanie w czasie żelowania stężonego szkła wodnego. Stabilizowane geożelem piaski charakteryzują się współczynnikiem filtracji w granicach  $1 \cdot 10^{-8}$  –  $8 \cdot 10^{-7}$  m/s i wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie od 2 do 5 MPa. Ponadto, wymuszony przepływ wody przez próbki stabilizowanego piasku, przy gradientach hydraulicznych  $I = 5-20$ , nie powoduje istotnych zmian ich właściwości filtracyjnych (8).

Po raz pierwszy chemiczną stabilizację gruntów na budowie metra w Warszawie zastosowano na odcinku doświadczalnym zlokalizowanym w Dolinie Służewieckiej i stanowiącym część tunelu szlakowego B-6. Zrealizowano tutaj, zgodnie z opisem w punkcie B, na głębokości 18 m pod powierzchnią terenu, poziomy ekran uszczelniający o miąższości 2 m. Omawiany ekran rozpięty był na dolnych krawędziach ścian szczelinowych, miał długość 41,4 m i szerokość 9,7 m. Do jego realizacji wtłoczono łącznie ok. 250 m<sup>3</sup> geożelu w siatce złożonej z 224 otworów. Badania kontrolne ekranu wykazały jego szczelność zgodną z zakładaną.

Następnie zastosowano iniekcijną stabilizację gruntu na Polu Mokotowskim przy budynku w Al. Niepodległości 186, znajdującym się w strefie wpływu deformacji związanej z drążeniem tunelu metodą tarczową (4). Wzmacniano tutaj przewarstwienia piaszczyste pod fundamentami budynku oraz w strefie między budynkiem a tunelem. Zastosowano dwa rodzaje środków iniekcyjnych: geożel oraz żel półtwardy, a we wzmocnionych gruntach dodatkowo wykonano pale. Łącznie wtłoczono ok. 41 m<sup>3</sup> środków iniekcyjnych i wykonano 10 pali  $\phi$  216 mm. W wyniku przeprowadzonych prac nie zaobserwowano żadnego osiadania budynku, podczas gdy w analogicznym miejscu po przeciwnej stronie tunelu osiadania przekraczały 30 mm.

Kolejnymi przykładami zastosowań iniekcji środków chemicznych do gruntu jest uchronienie budynku przy ul. Batorego 39, zlokalizowanego na skraju projektowanego wykopu pod stację metra, oraz uchronienie kanałów ściekowych przebiegających równolegle i prostopadle do tunelu szlakowego B-8, biegnącego wzdłuż Al. Niepodległości i drążonego metodą tarczową. Podobnie jak w poprzednim wypadku, iniekcję wykonano w występujące tu liczne przewarstwienia piasków średnioziarnistych, drobnoziarnistych i pylastych, stosując geożel i żel półtwardy.

Na budowie metra, niezależnie od iniekcyjnej stabilizacji gruntów środkami chemicznymi, stosuje się również iniekcję zapraw i zaczynów na bazie cementów. Środki te tłoczy się w szczeliny za obudowę tubingową tuneli wykonywanych metodą tarczową. Na Politechnice Wrocławskiej opracowano receptury zapraw do iniekcji wypełniającej oraz zaczynów do iniekcji uszczelniającej, które charakteryzują się dobrymi parametrami wytrzymałościowymi i wodoprzepuszczalnością, odpornością na agresję siarczanową o stężeniu jonów  $SO_4^{2-}$  w wodzie gruntowej do 800 mg/l, a także brakiem skurczu i rozwarstwialności. Opracowane środki są stosowane niemal od początku drążenia tunelu metodą tarczową.

Przedstawione przykłady świadczą, że w warunkach geologicznych i hydrogeologicznych występujących na trasie metra warszawskiego oraz przyjętej technologii budowy istnieje szeroka możliwość stosowania technik iniekcyjnych.

Znaczenie stosowania tych technik będzie wzrastać w miarę wchodzenia z budową w centralne, gęsto zabudowane i uzbrojone części miasta. Prowadzona analiza wpływu prac iniekcyjnych na środowisko naturalne wskazuje, że i ten aspekt nie powinien w istotny sposób wpływać na ograniczenie iniekcyjnej stabilizacji gruntu. Stale prowadzone analizy wód podziemnych ze stref bezpośrednio przylegających do wzmacnianych partii gruntu wskazują, że ich jakość nie odbiega w sposób istotny od jakości wód z rejonów znajdujących się poza wpływem prac iniekcyjnych.

## LITERATURA

1. Borowczyk M., Pinińska J. — Aspekty geotechniczne środowiska przyrodniczego w różnych fazach wykonywania I linii metra w Warszawie. [W:] Metro a środowisko przyrodnicze. Sympozjum, Generalna Dyrekcja Budowy Metra Warszawa 1986.
2. Borys B. et al. — Sztuczne wzmacnianie skarp głębokich wykopów ziemnych dla obiektów inżynierskich. Raporty Inst. Geotech. PWr. ser SPR 1980 nr 54.
3. Ciesielski R., Blarowski A. — O wpływach parasejsmicznych wywołanych eksploatacją metra. [W:] Metro a środowisko przyrodnicze. Sympozjum, Generalna Dyrekcja Budowy Metra Warszawa 1986.
4. Etel Z., Łukasinski S., Żak S. — Zabezpieczenie budynku metodą iniekcyjnego wzmacniania podłoża gruntowego. [W:] Problemy geotechniczne w rewaloryzacji zabytków. Konf. Środowiska KILiW PAN Kraków 18 czerwiec 1986.
5. Grodecki W., Stomatello H. — Zastrzyki do gruntów drobnoziarnistych (z doświadczeń francuskich). Inż. i Bud. 1977 nr 2.
6. Jancek V. — Samotvrđnica supenzia VUIS a jej aplikacija na hibkove konstrukcie. Pr. doktorska. Bratysława 1978.
7. Köhle J. — Budowa tuneli szlakowych warszawskiego metra metodą tarczową. Prz. Bud. 1985 nr 10.
8. Łukasinski S., Zemбаты A., Żak S., — Geożel — środek do iniekcyjnej stabilizacji gruntów. [W:] Problemy geotechniczne w rewaloryzacji zabytków. Konf. Środowiska KILiW PAN Kraków 18 czerwiec 1986.
9. Paczyński B., Perzek M. — Warunki geologiczno-inżynierskie i hydrogeologiczne na trasie pierwszej linii metra w Warszawie. [W:] Metro a środowisko przyrodnicze. Sympozjum, Generalna Dyrekcja Budowy Metra Warszawa 1986.

10. Patent, Polska nr 121399 T. — Sposób stabilizacji skał na drodze iniekcji mieszaniny stabilizującej MKP C13 F02D) 3/14, 009K 70/2 E21B 33/13. Polit. Wrocł. Wrocław. Współtwórcy Mazij Wł. i in. Zgłosz. nr P 222174 z 1980.02.20. Opubl. 1983.09.30.
11. Vertel J., Jerabek M. — Pouziti chemických iniekčních směsi ve stavebnictví. Inž. stavby 1983 nr 10.

## SUMMARY

Construction of a shallow underground in Warsaw requires introduction of some new technologies. The technology of injectional strengthening and sealing of soils may serve as an example here. It is of special importance in the case of works carried out along the first underground line, i.e. in Pleistocene sediments mainly developed as tills, fluvio-glacial sands and ice-dammed lake clays and silts, strongly and irregularly interfingering. When sands are treated by the classic injection method, it becomes possible to eliminate disadvantageous effects of the construction works and subsequent operation of the underground on both engineering structures and natural environment. This method has been used with positive results in several cases by the Institute of Geotechnics of the Wrocław Polytechnical Institute.

## РЕЗЮМЕ

Выполнение неглубокого варшавского метро требует применения новых технологий. Одной из них является инъекционное крепление и уплотнение грунтов. Эта технология имеет большое значение в условиях геологического строения на трассе первой линии метро, где находятся плеистоценовые отложения: валунные глины, речноледниковые пески, а также застойные глины и пыли, нерегулярно переслоенные. Применяя классическую инъекцию можно предохранять от невыгодных последствий постройки метро как инженерные объекты, так и элементы природной среды — в ходе постройки и эксплуатации метро. Институт Геотехники Вроцлавской Политехники применял эту технологию с положительными результатами уже в нескольких случаях.