



Prof. zw. dr hab. inż. Kazimierz SZULBORSKI  
Dr inż. Hanna MICHALAK  
Mgr inż. Stanisław PEŃSKI  
Dr inż. Stefan PYRAK  
Mgr inż. Paweł PRZYBYSZ  
Politechnika Warszawska

## **DEGRADACJA, USZCZELNIENIE I WZMOCNIENIE BETONOWEJ OBUDOWY PODZIEMNYCH TUNELI ZBIORCZYCH**

### **DEGRADATION, WATER TIGHTNESS PROCEDURES AND REINFORCEMENT WORKS OF A CONCRETE SHELL PROTECTING UNDERGROUND COLLECTIVE TUNNELS**

**Streszczenie** Referat dotyczy dwóch tuneli o konstrukcji żelbetowej z usytuowanymi wewnątrz magistralami wodociagowymi. Tunele te zostały zbudowane pod torami kolejowymi PKP w Warszawie i po okresie ponad 30-letniej eksploatacji wykazują uszkodzenia. W niniejszym referacie scharakteryzowano i zdiagnozowano przyczynę zaistniałych uszkodzeń tuneli oraz podano technologie robót naprawczych.

**Abstract** This paper is dedicated to two reinforced concrete tunnels with water mains located within their structure. These tunnels have been build under railway tracks – the property of Polish Railway Warsaw – and after more than thirty years of exploitation show various damages. This paper characterizes and diagnoses the reasons of those damages to tunnel structure, including description of proposed corrective and repair work technologies.

### **1. Rozwiązanie konstrukcji tuneli**

Opracowanie dotyczy dwóch tuneli (galerii) średnicy wewnętrznej 3200 mm, w których znajduje się magistrala wodociagowa średnicy 1200 mm. Tunele zbudowano pod terenami PKP (torami kolejowymi) w Warszawie (rys. 1).

**Pierwszy tunel** został wybudowany w latach 1973-1975. Jego długość, wraz z komorami umieszczonymi na końcach, wynosi około 403,0 m. Tunel wykonano metodą podziemną górniczą. Konstrukcję tymczasową podtrzymującą wyrobisko stanowią ramy żelbetowe rozstawione co 1,0 m. Każda rama składała się z czterech elementów, tj. spągnicy, która w przekroju poprzecznym ma szerokość 20 cm i wysokość 16 cm, dwóch elementów bocznych o wysokości 22 cm i szerokości 12 cm w przekroju poprzecznym oraz stropnicy o przekroju poprzecznym jak elementy boczne. Elementy żelbetowe ram na swych końcach mają blachy czołowe, które umożliwiły połączenie elementów za pomocą czterech śrub średnicy 18 mm w każdym połączeniu.

Wyrobisko między ramami było podtrzymywane za pomocą wbijanych podczas drążenia klepek żelbetowych. Po wykonaniu wyrobiska podtrzymywanego obudową tymczasową, wykonano obudowę stałą betonową. Betonowanie odbywało się sekcjami długości około 2,5 m, po ustawieniu deskowań.

Grubość obudowy betonowej pomiędzy ramami tymczasowymi wynosi około 40 cm. W projekcie przewidziano zastosowanie betonu marki 170 (obecnie klasy C12/15). Nadkład gruntu nad tunelem jest zmienny i wynosi od 3,70 do 11,80 m.

Na obu końcach tunelu znajdują się komory o konstrukcji żelbetowej, przekryte żelbetowymi płytami prefabrykowanymi. Wymiary komór umożliwiają demontaż magistrali wodociągowej oraz jej ponowny montaż z odcinków rur długości 6,0 m.

Magistrala wodociągowa jest w tunelu oparta na ramowych podporach żelbetowych. Najmniejsza odległość (w poziomie) magistrali od wewnętrznej powierzchni tunelu wynosi 40 cm. Tunel jest położony w żwirach i piaskach średnio nawodnionych.

**Drugi tunel**, wybudowany również w latach 1973-1975, wraz z komorami montażowymi umieszczonymi na jej końcach, ma około 270,0 m. Nadkład gruntu nad tunelem wynosi od 4,90 do 6,70 m. Tunel jest położony w nawodnionych piaskach średnich.



Rys. 1 Widok ogólny wnętrza tuneli

## 2. Warunki gruntowo-wodne

**Warunki te** nad tunelami i w ich bezpośrednim sąsiedztwie rozpoznano za pomocą wierceń, sondowań udarowych oraz podczas wykonywania piezometrów. Wykonano 8 piezometrów głębokości do 13,4 m oraz 4 otwory wiertnicze do 10,0 m oraz 12 sondowań. Stwierdzono, że we wszystkich profilach pod nasypami, których miąższość dochodzi do 3,5 m, występują piaski średnioziarniste z ziarnami żwirowymi, średnio zagęszczone.

Sondowania udarowe wykazały, że w strefie 2 ÷ 3 m nad tunelami grunty są bardzo luźne (stopień zagęszczenia  $I_D = 0,2$ ). Wskazuje to na brak zagęszczenia piasków, a jedynie utrzymywanie struktury na zasadzie luźnych kontaktów ziaren. Strefa rozluźnienia wokół tunelu została stwierdzona także sondowaniami, które wykonano w pobliżu konstrukcji tunelu, około 5 m od jego osi.

Z analizy wyników sondowań w gruncie, na który nie miało wpływu wykonanie tunelu wynika, że średnie zagęszczenie piasków średnioziarnistych wokół tunelu wynosi średnio  $I_D = 0,55$  (od 0,45 do 0,65).

Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono parametry fizykomechaniczne gruntu, które uwzględniono w wykonanych sprawdzających obliczeniach statycznych tuneli.

### 3. Ocena stanu technicznego tuneli

W tunelu pierwszym, w celu dokonania oceny stanu jego konstrukcji, powierzchnię wewnętrzną oczyszczono przy użyciu wody pod wysokim ciśnieniem (około 15 MPa). Zużyta woda była wypompowywana poza przestrzeń tuneli. W wyniku mycia z powierzchni betonowej usunięto nalot powstały w trakcie zalewania tunelu przez wodę gruntową, a także większe wykwity węgla wapnia. Z dolnej części przekroju tunelu usunięto zgromadzony osad.

Po oczyszczeniu tunelu pobrano próbki (odwierty) do badania wytrzymałości betonu na ściskanie oraz przeprowadzono badania nieniszczące betonu i badania wytrzymałości betonu na odrywanie. Wykonano też inwentaryzację rysunkową i fotograficzną uszkodzeń (zarysowań) tunelu.

Stwierdzono występowanie dwóch głównych rodzajów rys:

a) rys obwodowych (rys. 2) rozmieszczonych dość regularnie co około 2,45 m na całej długości tunelu, tj. na połączeniach betonowanych sekcji (przerwy robocze),



a)



b)

Rys. 2 Uszkodzenia tuneli – rysy obwodowe: a) widok ogólny, b) detal

b) rys wzdłużnych w kluczu tunelu (rys. 3).

Oceniono, że szerokość rys wynosi od 0,3 do 5 mm. Przez znaczną część rys wnika do tunelu woda gruntowa, powodując zawilgocenia ścian w pasach szerokości około 1,0 m od rysy. Napływ wody do wnętrza galerii oszacowano na około  $4 \text{ dm}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ .

We wnętrzu tunelu były widoczne wcześniejsze uszczelnienia rys obwodowych i wzdłużnych. Zastosowane uszczelnienia nie były jednak w pełni skuteczne. Można potwierdzić jedynie, że przecieki wody zostały zmniejszone. Stwierdzono również powierzchniowe wykwity węglanu wapnia, które były częściowo eliminowane w wyniku powierzchniowego szpachlowania tworzywem na bazie cementu.



a)



b)

Rys. 3 Uszkodzenia tuneli – rysy wzdłużne w kluczu: a) widok ogólny, b) detal

Cała powierzchnia wewnętrzna tunelu (bez chodnika) została pokryta izolacją powłokową bitumiczną grubości około  $0,5 \div 1,0 \text{ mm}$ . Dodatkowo zostały zaszpachlowane zaprawą cementową wszystkie podłużne złącza elementów deskowania.

Stwierdzono też przenoszenie się do wnętrza tunelu odczuwalnych drgań od ruchu pociągów na poziomie terenu.

W **tunelu drugim** przed jego oczyszczeniem (analogicznie jak w tunelu pierwszym) konieczne było wypompowanie wody, która wypełniała całe jego wnętrze, wraz z komorami końcowymi do poziomu około 4,0 m powyżej ich dna. We wnętrzu tunelu stwierdzono uszkodzenia (zarysowania) i naprawy analogiczne jak w tunelu pierwszym (por. rys. 2 i 3). Napływ wody do tunelu oszacowano na około  $15 \text{ dm}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ .

**Badania betonu.** Na podstawie badań odwiertów betonu stwierdzono, że jego wytrzymałość na ściskanie jest zróżnicowana. Okazała się jednak na ogół większa niż przyjęta w projekcie (przyjęto klasę C12/15). Oceniono, że stwierdzona niejednorodność betonu wynika prawdopodobnie z faktu stosowanej ręcznej technologii układania mieszanki betonowej, ze zróżnicowanym stopniem zagęszczenia, oraz z przygotowania tej mieszanki na placu budowy. Do obliczeń wytrzymałościowych sprawdzających przyjęto, że beton spełnia wymagania dotyczące betonu klasy C16/20 (dawniej klasy B20).

Wykonano również **badania nieniszczące** (sklerometryczne), które traktowano jednak jako umożliwiające oszacowanie wytrzymałości betonu, z uwzględnieniem tego, że błąd oceny może wynosić do około 20%.

Z kolei **badania wytrzymałości betonu na odrywanie metodą „pull-off”** wykonano w miejscach wybranych co 20 m wzdłuż tuneli. Stwierdzono, że wytrzymałość ta wynosi od 0,8 do 3,5 MPa. Rozrzut wyników okazał się duży, co potwierdza niejednorodność betonu w tunelach, podobnie jak w badaniu wytrzymałości betonu na ściskanie wykonanym na próbkach (odwiertach) pobranych z konstrukcji. **Sprawdzające obliczenia statyczne.** Obliczenia wykonano przy założeniu (potwierdzonym badaniami), że woda gruntowa jest ustabilizowana około 0,5 m powyżej zewnętrznego sklepienia tunelu pierwszego i około 2,0 m powyżej tego sklepienia w tunelu drugim. Przyjęto też, co potwierdziły wyniki sondowań, że nad tunelami wytworzyło się sklepienie w gruncie, które zmniejsza ich obciążenie. Jako potwierdzenie istnienia sklepień uznano fakt, że na powierzchni terenu nie stwierdzono osiadania torów kolejowych ułożonych na nasypach. Do obliczeń przyjęto wartość charakterystyczną ciężaru objętościowego gruntu  $\gamma_k = 18 \text{ kN/m}^3$ , a wartość obliczeniową  $\gamma = 18 \cdot 1,1 = 19,8 \approx 20 \text{ kN/m}^3$ , kat tarcia wewnętrznego  $\varphi = 34^\circ$ , beton klasy C16/20, średnicę zewnętrzną tunelu równą 4,00 m i wewnętrzną 3,20 m (por. rys. 1).

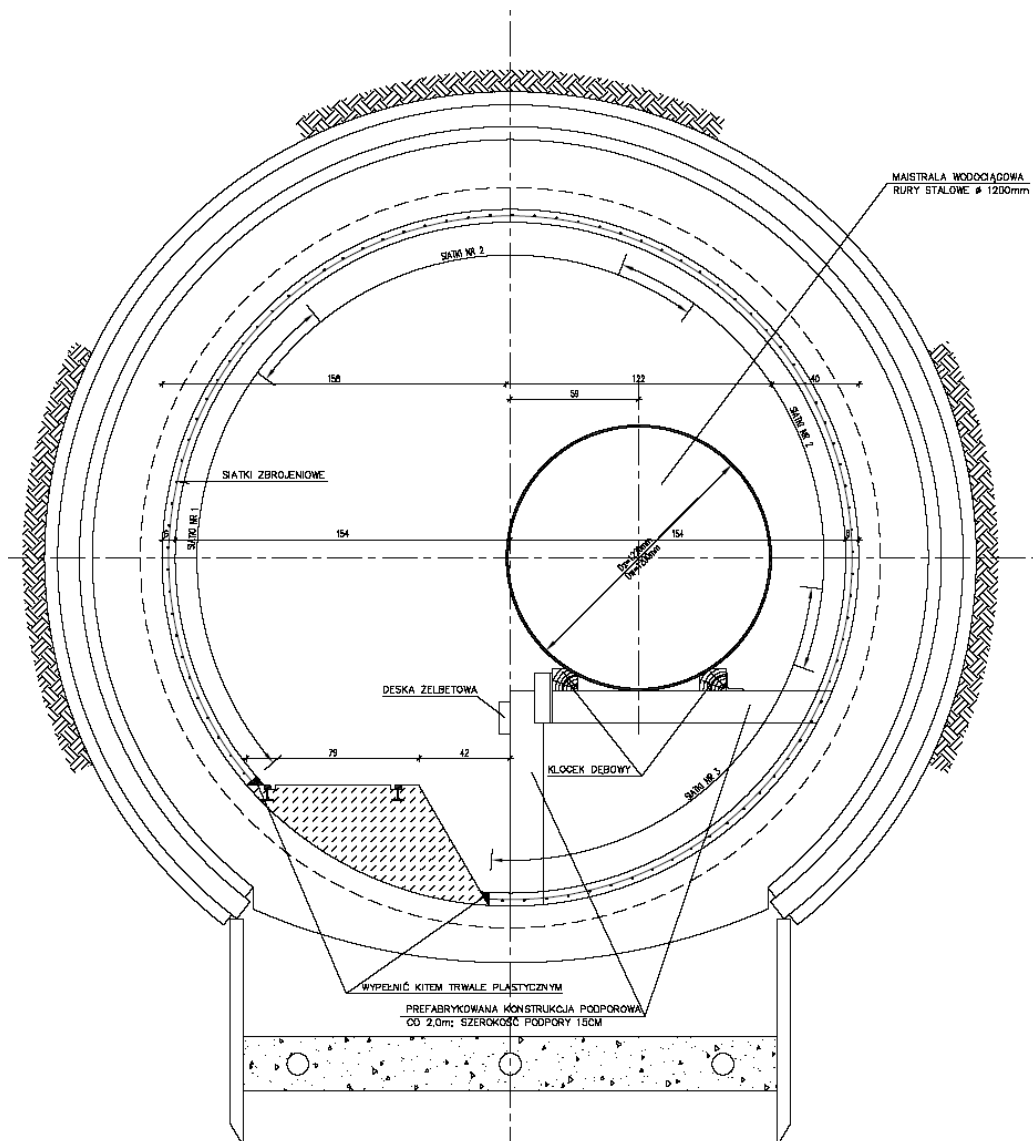
Obliczenia momentów zginających i sił podłużnych w przekroju poprzecznym tunelu wykonano jak w przypadku budowli zbudowanej sposobem tunelowym, wykorzystując wzory podane w pracy [1], a także metodą elementów skończonych przy wykorzystaniu programu komputerowego ABC6.2 – Obiekt 3D.

Na podstawie wyników przeprowadzonych obliczeń oraz zarejestrowanych zarysowań galerii stwierdzono, że w celu spełnienia stanu granicznego użyteczności należy uszczelnić (zlikwidować) wszystkie występujące zarysowania w obudowie tuneli. Ogólnie stwierdzono, że tunele po ponad 30-letniej eksploatacji w bardzo trudnych warunkach gruntowo-wodnych wymagają przeprowadzenia kapitalnego remontu, w tym uszczelnienia i wzmocnienia.

#### 4. Naprawa i wzmocnienie konstrukcji tuneli

Uszczelnienie zarysowań tuneli oraz wzmocnienie ich konstrukcji zaproponowano wykonać w niżej podany sposób (rys. 4):

- a) etap I – oczyszczenie wewnętrznej powierzchni tuneli,
- b) etap II – zlikwidowanie przecieków wody gruntowej przez uszczelnienie istniejących zarysowań konstrukcji tuneli,
- c) etap III – wykonanie warstwy zbrojonego torkretu na wewnętrznej powierzchni tuneli.



Rys. 4 Przekrój poprzeczny tunelu z projektowanym wzmocnieniem

**W etapie pierwszym** przewidziano:

- wypompowanie wody z tuneli, a następnie zabezpieczenie istniejącej magistrali wodociągowej średnicy 1200 mm np. folią polietylenową grubości 0,5 mm, aby zapobiec zniszczeniu powłoki izolacyjnej,
- oczyszczenie wewnętrznej powierzchni tuneli np. za pomocą hydropiaskowania,
- usunięcie, po zakończeniu czyszczenia, odpadów powstałych podczas tej czynności.

**W etapie drugim** przewidziano uszczelnienie rys powstałych w obudowie tuneli. Uszczelnienie rysy powinno obejmować:

- rozkucie rysy i wykonanie po jej obu stronach naprzemiennie nawiertów średnicy 14 mm pod kątem  $45^{\circ}$  w stosunku do powierzchni elementu iniekowanego i w kierunku rysy,
- wmontowanie w wykonane nawierty pakerów iniekcyjnych oraz wyszpachlowanie rysy materiałem szybkosprawnym; odległość między pakerami i osią rysy a pakerem powinna wynosić połowę grubości elementu iniekowanego, lecz nie więcej niż 20 cm,
- wykonanie iniekcji rys odpowiedniki preparatami uszczelniającymi.

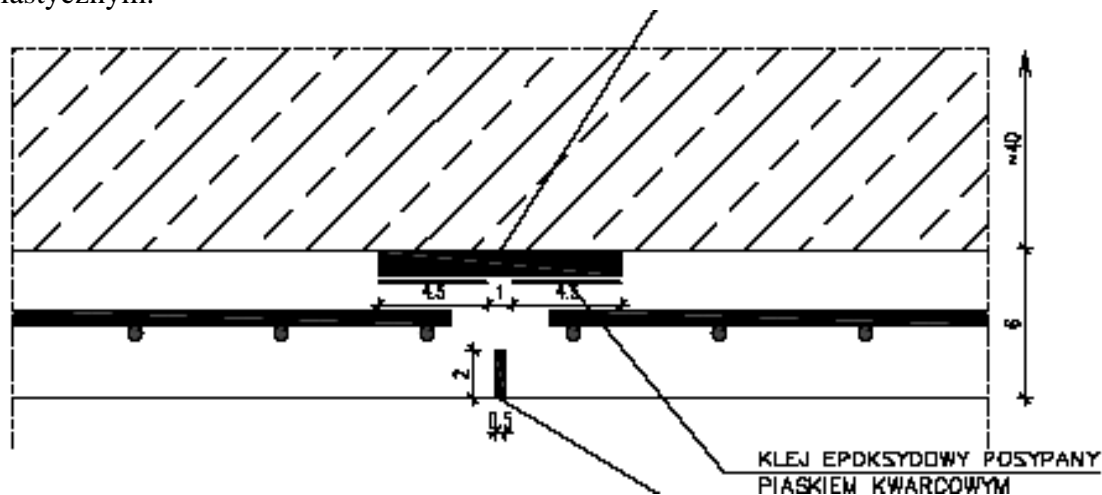
**W etapie trzecim**, przed przystąpieniem do wykonania torkretu, przewidziano zmontowanie zbrojenia. Przyjęto, że zbrojenie będzie dostarczone na miejsce wbudowania w

postaci siatek zgrzewanych szerokości 2,0 m i montowane na obwodzie tuneli. Siatki zaprojektowano z prętów obwodowych średnicy 6 mm rozstawionych co 6,0 cm i prętów wzdłużnych średnicy 6 mm, rozstawionych co 10 cm. Zbrojenie to zaprojektowano ze stali klasy A-IIIN gatunku RB500W. Pręty w siatkach zalecono łączyć przez zgrzewanie.

Siatki zalecono tak montować, żeby zachować dystans pomiędzy prętami zbrojeniowymi siatek a powierzchnią tunelu wynoszący 25 mm. Zaprojektowano połączenie siatek z istniejącą konstrukcją tuneli za pomocą prętów średnicy 6 mm wklejanych na głębokość 10 cm. Na 1 m<sup>2</sup> przewidziano zastosowanie około 10 tego rodzaju prętów. Rozstaw tych prętów wzdłuż obwodu przyjęto równy 40 cm, a wzdłuż tuneli co 24 cm. Styki siatek na obwodzie przewidziano zazbroić siatkami nakładkowymi szerokości 40 cm.

Torkret grubości 6,0 cm zalecono wykonać w dwóch etapach, warstwami grubości po około 3,0 cm, przy użyciu gotowej mieszanki torkretowej firm specjalistycznych. Przyjęto torkret klasy C30/37. Zalecono stosowanie do mieszanki dodatków ograniczających skurcz wykonanego torkretu.

Dylatowanie warstwy torkretu przewidziano co około 16,0 m (rys. 5), a więc co 8 szerokości siatek zbrojeniowych. Ze względu na małą grubość tej warstwy zamiast typowych wkładek dylatacyjnych zalecono stosować taśmy z modyfikowanej gumy, o szerokości 10 cm, przyklejone do betonowej powierzchni tunelu klejem epoksydowym. Przewidziano, że powierzchnia wewnętrzna boków taśmy, na szerokości około 4,5 cm, zostanie pokryta również klejem epoksydowym, a następnie posypana piaskiem kwarcowym, zapewniającym współpracę taśmy z torkretem. Na środkowej powierzchni taśmy, o szerokości 1,0 cm, zalecono umieścić taśmę np. z tworzywa sztucznego, zdejmowaną przed narzuceniem torkretu. Aby zachować regularny kształt rysy w torkrecie, po jego naniesieniu w miejscu dylatacji, zalecono wykonanie przecięcia świeżego torkretu w miejscu dylatacji (szczelina szerokości 0,5 cm i grubości 2,0 cm). Po związaniu torkretu szczelinę wypełnić kitem trwale plastycznym.



Rys. 5 Detal dylatacji warstwy torkretu

Na obu końcach tuneli znajdują się komory żelbetowe. Zarysowania ścian tych komór przewidziano uszczelnić, stosując rozwiązanie identycznie jak w tunelach, opisane wyżej.

Istniejące przejście magistrali przez ściany komór zaproponowano oczyścić, z jednoczesnym usunięciem resztek istniejącego uszczelnienia, a następnie uszczelnić specjalnym sznurem oraz kitem trwale plastycznym.

Przy wyborze materiałów do naprawy galerii należy korzystać z ofert firm specjalistycznych. Materiały te powinny mieć certyfikaty dopuszczające je do stosowania w budownictwie polskim.

Placem budowy podczas robót będzie wewnątrz tuneli, komory położone na ich końcach oraz teren w otoczeniu komór. Materiały budowlane będą dostarczane przez komory, po zdemontowaniu płyt przekrywających. Odkryte komory ułatwiają również wentylację galerii, którą należy dodatkowo wspomóc roboczą wentylacją mechaniczną.

## 5. Podsumowanie

Przyczyną uszkodzeń tuneli (zarysowań) oraz przecieków wody do ich wnętrza było zastosowanie betonowej konstrukcji obudowy (zamiast żelbetowej) oraz technologii ręcznego układania mieszanki betonowej, a także brak dylatacji i wkładek dylatacyjnych na łączeniu sekcji jednorazowo betonowanych. Dodatkowym czynnikiem sprzyjającym powstawaniu rys obwodowych było zjawisko skurczu betonu oraz przekazywania drgań na konstrukcję galerii od ruchu pociągów po torach ułożonych na powierzchni terenu.

Podjęte w latach ubiegłych próby uszczelnienia zarysowań nie zapewniły zlikwidowania przecieków. Najnowsze uszczelnienie, wykonane w grudniu 2004 r., za pomocą żywic epoksydowych kilku rysach obwodowych, w różnych miejscach tuneli, spowodowało zmniejszenie przecieków wody, natomiast ich nie zlikwidowało.

Wykonanie uszczelnienia i wzmocnienia konstrukcji tuneli uznano za niezbędne w celu wyeliminowania przecieków wody oraz zapewnienia spełnienia przez tę konstrukcję stanów granicznych nośności i użyteczności. Zaproponowany sposób wykonania robót naprawczych został zaakceptowany przez użytkownika tuneli.

Omówione przykłady świadczą o tym, że w projektowaniu budowli należy brać pod uwagę warunki ich eksploatacji, a także stosować rozwiązania charakteryzujące się odpowiednią trwałością i niezawodnością.

## Literatura

1. Kobiak J., Stachurski W.: Konstrukcje żelbetowe. Część II, Arkady, Warszawa 1969.
2. Kuczyński J.: Miejskie budowle sanitarne i podziemne. Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa – Wrocław 1980.
3. Lessaer S.: Miejskie tunele, przejścia podziemne i kolektory. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1979.
4. Wykonanie betonu natryskowego. Instytucja ITB nr 299. Warszawa 1991.