

TUNELE – nowoczesne podejście do projektowania

Małgorzata Jończyk

Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii

Obserwowany w ostatnich latach dynamiczny rozwój budownictwa tunelowego skutkuje koniecznością przeprowadzenia głębokiej analizy w zakresie stosowanych dotychczas metod projektowania obiektów tunelowych. Problem ten dotyczy zarówno określania wielkości obciążeń działających na obudowę tunelu na etapie jej wymiarowania, jak również technologii ich drążenia.



Rozwój infrastruktury drogowej w wielu krajach skutkuje koniecznością budowania tuneli i mostów nad naturalnymi przeszkodami występującymi w terenie. W Polsce dotychczas wykonano stosunkowo niewiele tuneli drogowych, jednak wraz z rozwojem gospodarczym kraju oraz coraz lepiej wykształconą kadrą inżynierską obserwuje się istotny wzrost zainteresowania technologiami związanymi z budową tuneli. Należy przy tym zauważyć, że w ostatnich dziesięcioleciach nastąpił istotny postęp w rozwoju metod projektowania obiektów podziemnych. Dotychczas stosowane metody, oparte m.in. o teorię Cymbariewicza, Protodiakonowa, Bierbaumera czy też Sautowicza, coraz częściej zastępowane są metodami numerycznymi lub tzw. metodami sterowania konwergencją w tunelach [1]. W niniejszej pracy przedstawiono ogólne założenia jednej z takich metod, nazywanej ADECO-RS (analiza kontrolowanych odkształceń w skałach i gruntach), która została zastosowana podczas projektowania aktualnie drążonego Tunelu Mały Luboń. Metoda ta, oparta na tzw. krzywej

reakcji masywu skalnego (GRC), znajduje coraz szersze zastosowanie szczególnie w trudnych warunkach geomechanicznych, jakimi cechuje się flisz karpacki.

Charakterystyka obiektu

Główne założenia metody ADECO-RS przedstawiono na podstawie opisu technologii drążenia rzeczywistego obiektu – Tunelu Mały Luboń, który jest częścią zadania inwestycyjnego obejmującego budowę drogi ekspresowej Kraków–Rabka-Zdrój na odcinku Lubień–Rabka-Zdrój oraz budowę nowego odcinka drogi nr 47 klasy GP na odcinku Rabka-Zdrój–Chabówka (rys. 1.). Za realizację obiektu odpowiedzialna jest firma ASTALDI, która posiada duże doświadczenie w wykonywaniu tego typu obiektów. Tunel drążony jest metodą górnictwą i składa się z dwóch równoległych nitek, każda dla jednej jezdni z 2 pasami o szerokości 3,50 m i 1 pasem awaryjnym o szerokości 3,00 m. Całkowita szerokość jezdni wynosi 12,50 m.

W połowie długości tunelu przewiduje się zatoki postojowe z 1 dodatkowym pasem o szerokości 2,50 m. Na tym samym kilometrażu przewiduje się przejazd poprzeczny dla pojazdów ratunkowych oraz pomieszczenie techniczne.

Obie nitki tunelu zostaną połączone ze sobą przewiązkami w rozstawie co 172,5 m spełniającymi funkcję przejść ewakuacyjnych. W tym samym rozstawie, lecz na przemian z przejściami, zaprojektowano nisze sygnalizacyjno-alarmowe i teletechniczne po zewnętrznych stronach każdej z rur tunelu.

Wewnętrzny odcinek tunelu posiada kształt policentryczny u góry oraz okrągły w rejonie sklepienia spągowego. Grubość obudowy wstępnej zaprojektowano jako zmienną zależnie od geologii i przewidywanej deformacji; obudowę ostateczną zaprojektowano z betonu zbrojonego o grubości od 50 do 100 cm na sklepieniu kalotowym i 50 cm na sklepieniu spągowym. Założono, że obudowa będzie całkowicie wodoszczelna.

Nad planowaną trasą tunelu znajdują się budynki mieszkalne i gospodarcze, a w ich otoczeniu zlokalizowane są ujęcia wody. W rejonie portalu południowego znajdują się dwa ważne cieki wodne, które należy wyposażyć w korytka ściekowe. W pobliżu portalu południowego po stoku góry biegnie droga asfaltowa. Łączna długość tunelu wynosi 2057,15 m.

Metoda ADECO-RS

ADECO-RS (ang. *Analysis of COntrolled Deformations in Rocks and Soils* – Analiza Kontrolowanych Odkształceń w Skalach i Gruncie) to metoda rozwinięta w latach 80. przez profesora Lunardiego, oparta na dogłębnych badaniach w zakresie reakcji naprężeń i odkształceń w różnych warunkach geologicznych.

Opiera się ona na analizie odkształceń lub, inaczej mówiąc, odpowiedzi deformacyjnej drążonego tunelu. Rozważa się trzy różne formy odkształcenia wyrobiska (rys. 2.):

- wyciskanie czoła przodka, tworzące się w dużej mierze wewnątrz przesuwającego się przodka i objawiające się jego odkształceniami wzdłuż osi tunelu;
- prekonwergencja przed ścianą przodka;
- konwergencja wyrobiska.

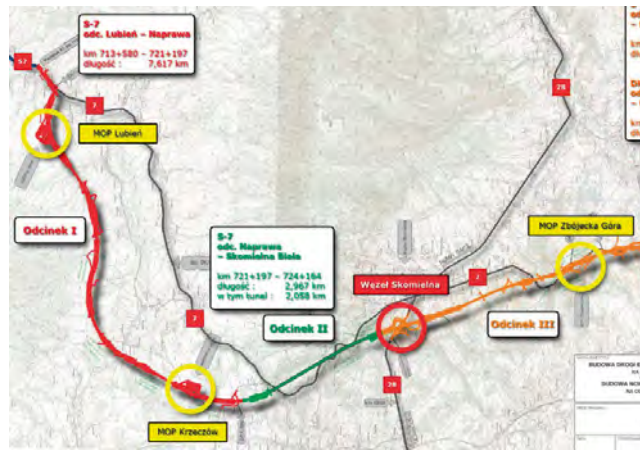
Metoda ADECO-RS przewiduje drążenie tunelu metodą „pełnego przekroju” (ang. *full face*) poprzez zastosowanie wzmocnienia przodka.

W przodku tunelu mogą wystąpić trzy podstawowe sytuacje (rys. 3.):

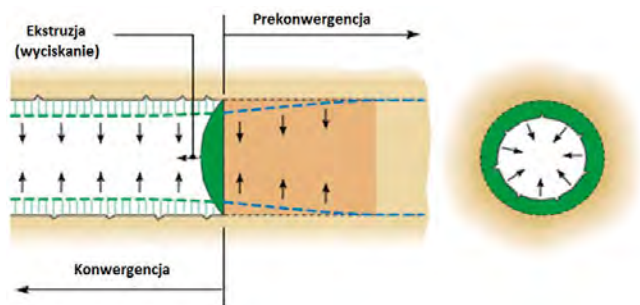
- stateczność,
- stateczność krótkoterminowa,
- niestateczność.

Do określenia kategorii zachowania się przodka wykorzystuje się rdzenie pozyskane z odwiertów geologicznych. Przykładowe rdzenie charakteryzujące warunki gruntowe i odpowiadającą im odpowiedź mechaniczną zachowania przodka pokazano na rysunku 4.

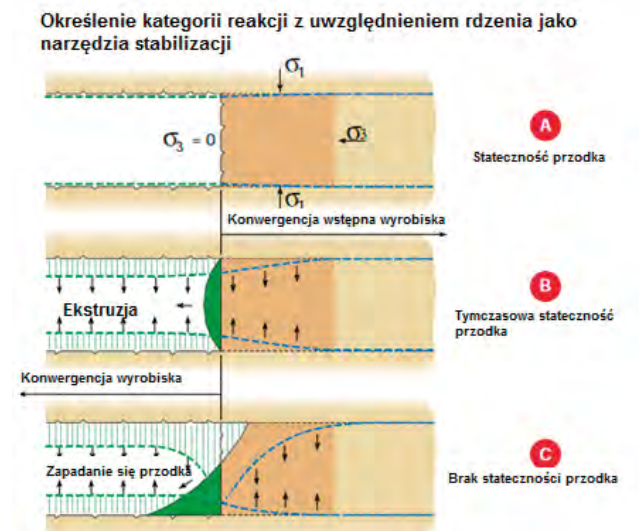
Z jakością górotworu związane są również metody wyznaczania obciążeń działających na obudowę tunelu. Dla warunków, gdzie masyw zachowuje stateczność lub tymczasową stateczność przodka, parcie wywierane na konstrukcję wyznaczamy z metody krzy-



Rys. 1. Lokalizacja Tunelu Mały Luboń – kolor zielony [2]



Rys. 2. Konwergencja wstępna, ekstruzja przodka oraz konwergencja tunelu [4]



Rys. 3. Kategorie zachowania się przodka tunelu [4]



Rys. 4. Rdzenie wiertnicze i odpowiadające im kategorie odpowiedzi mechanicznej się przodka: stateczność przodka; tymczasowa stateczność przodka; brak stateczności przodka [3]

wej reakcji górotworu. Natomiast dla górotworu silnie spękanego, dla którego przodek nie wykazuje stateczności, należy przeprowadzić obliczenia numeryczne do wyznaczenia obciążeń działających na obudowę.

Obliczanie obciążeń działających na obudowę

Metoda wykorzystywana do obliczenia obciążeń działających na obudowę tuneli drążonych w skałach o różnym stopniu spękania umożliwia również analizę zachowania się górotworu podczas drążenia. Dla gruntów, których zachowanie można porównać do zachowania się skał, wykorzystuje się krzywą reakcji Hoeka-Browna i jego kryterium wytrzymałościowe.

Zakłada się sprężysto-plastyczno-kruchą reakcję górotworu oraz zwiększenie się jego objętości na skutek plastyczności. Reakcja naprężenie–odkształcenie pozostaje sprężysta do momentu osiągnięcia wytrzymałości granicznej, następnie obserwuje się natychmiastowy spadek do wartości resztkowej.

Kryterium wytrzymałościowe określa zależność:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + s \cdot \sigma_c^2)^{0.5}$$

gdzie:

- σ_1 – maksymalne naprężenie rzeczywiste przy zniszczeniu,
- σ_3 – minimalne naprężenie rzeczywiste przy zniszczeniu,
- σ_c – wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe próbek skały nienaruszonej,
- m, s – stała zależna od charakterystyki górotworu dla strefy reakcji sprężystej.

Ocena warunków stateczności oraz typu obudowy nie może odwoływać się tylko do próbek laboratoryjnych. W dużym stopniu o właściwościach mechanicznych górotworu decyduje jego jakość, na którą duży wpływ mają nieciągłości pojawiające się w masywie, których nie uwidaczniają próbki laboratoryjne.

Do klasyfikacji górotworu i jego opisu użyto następujących parametrów [3]:

- wytrzymałości na ściskanie oraz modułu sprężystości skały nienaruszonej,
- *Rock Quality Designation* (RQD) – wskaźnik podzielności rdzenia określający jakość skały lub intensywność spękań,
- parametry spękań oraz ich jakość.

Klasyfikacja górotworu i wyznaczenie wskaźnika jego jakości (RMR) jest niezbędna do określenia parametrów, które potrzebne są do ustalenia obciążenia działającego na obudowę stałą i wstępną za pomocą metody krzywej reakcji górotworu.

Parametry wymagane do określenia obciążeń górotworu, korzystając z krzywej reakcji, to:

- promień tunelu,
- ciśnienie litostatyczne,
- wytrzymałość skały nienaruszonej na ściskanie jednoosiowe,
- moduł Younga górotworu,
- wskaźniki m i s dla górotworu niezaburzonego,
- wskaźniki mr i sr dla górotworu zaburzonego.

Wyznaczanie obciążenia działającego na obudowę zależne jest od wartości ciśnień wywieranych na konstrukcję oraz przemieszczeń masywu (rys. 5.). Na podstawie pomiarów przemieszczeń i wartości ciśnień podejmowane są decyzje o instalacji kolejnych etapów obudowy. Krzywa sztywności obudowy wstępnej wrysowywana jest na wykresie w momencie osiągnięcia pewnej wartości przemieszczeń czół przodka. Jej nachylenie zależne jest od sztywności tworzącego ją materiału. Wartość przemieszczeń czola przodka, dla których instalowana jest obudowa wstępna, wyznaczona jest przez krzywą reakcji górotworu w przodku, której nachylenie zależne jest od parametrów górotworu. Instalacja obudowy ostatecznej rozpoczyna się po osiągnięciu pewnej wartości przemieszczeń na konturze wyrobiska, której wartość wyznacza przecięcie krzywej reakcji górotworu na konturze z krzywą sztywności obudowy wstępnej. Nachylenie krzywej obudowy ostatecznej również zależne jest od sztywności materiału, z którego jest ona wykonana.

Dobór obudowy tunelu

W obszarze tunelu występuje flisz paleoceński składający się z na przemienne warstw piaskowców i łupków ze zmiennym udziałem piaskowców. W obrębie warstw fliszowych wyróżnia się kompleksy łupkowe, łupkowo-piaskowcowe, piaskowcowo-łupkowe oraz piaskowcowe. W celu scharakteryzowania geotechnicznego obszaru budowy tunelu pod górą Mały Luboń wyniki badań podane w dokumentacji przetargowej zostały połączone z wynikami dodatkowych badań wykonanych w czerwcu i lipcu 2016 podczas etapu budowy przez firmę Astaldi. Na podstawie badań terenowych/laboratoryjnych i analizy kart otworów tunel podzielono na jednorodne odcinki pod względem właściwości górotworu.

Po ustaleniu charakterystyki skał i jej zachowania podczas drążenia określono metodę drążenia i wzmocnienia skały w celu zbudowania tunelu w sposób bezpieczny. Obudowę podzielono na cztery typy.

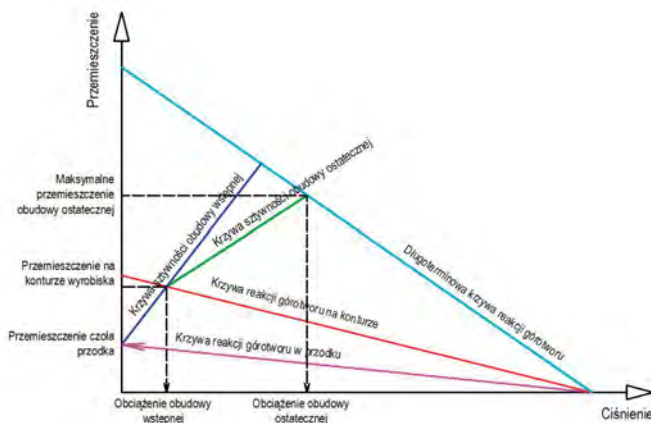
Typ 1a

Stosowany na odcinkach o dobrej jakości górotworu. Rozwiązanie nie przewiduje stosowania stabilizacji na czole przodka, jedynym wyjątkiem jest zastosowanie odwodnienia.

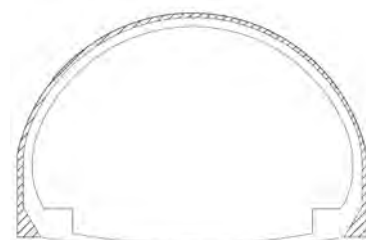
Tabela 1. Obudowa wstępna i ostateczna typu 1a

Obudowa wstępna	Obudowa ostateczna
Podwójne żebra stalowe IPE180 w rozstawie co 2 m	Obudowa żelbetowa o grubości 50 cm zarówno na kalocie, jak i sklepieniu spągowym
Torkret o grubości 25 cm zbrojony siatką stalową	

Przewidywana metoda drążenia: wiercenie i strzelanie z postępowaniem 3–4 m.



Rys. 5. Metoda wyznaczania obciążenia działającego na obudowę wstępną i ostateczną na podstawie krzywej reakcji górotworu. (opracowanie własne na podstawie [1] i [3])



Rys. 6. Schemat obudowy typ 1a (opracowanie własne, na podstawie [3])

Typ 1b

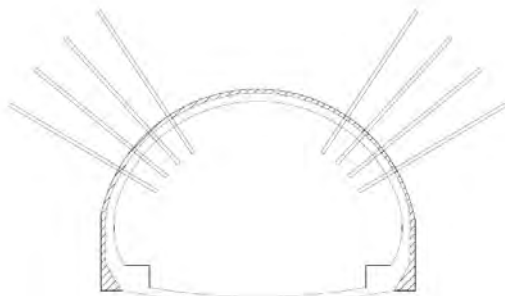
Stosowany na odcinkach o średnio dobrej jakości, szczególnie pod względem stanu spękań. Tak samo jak w obudowie typu 1a, stabilizacja na czole przodka stosowana jest tylko w przypadku odwodnienia.

Tabela 2. Obudowa wstępna i ostateczna typu 1b

Obudowa wstępna	Obudowa ostateczna
Podwójne żebra stalowe IPE180 w rozstawie co 2 m	Obudowa żelbetowa o grubości 50 cm zarówno na kalocie, jak i sklepieniu spągowym
Torkret o grubości 25 cm zbrojony siatką stalową	

W celu zapewnienia stabilności izolowanych bloków skalnych i uniknięcia degradacji granicy tunelu przewidziano zastosowanie betonowanych kotew stalowych o średnicy 28 mm i długości 6,00 m. Kotwy będą ustawione w „wachlarzu” składającym się z 8–6 szt. w odstępach wzdłużnych co 2,00 m.

Podobnie jak w typie 1a, drążenie będzie wykonywane metodą wiercenia i strzelania.



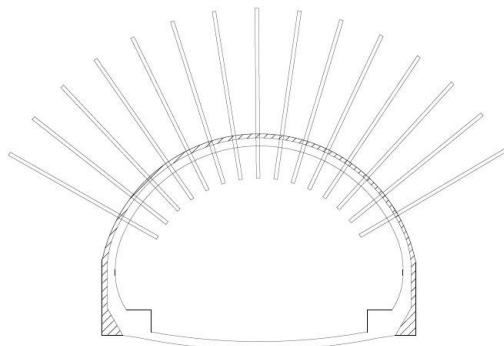
Rys. 7. Schemat obudowy typ 1b. (opracowanie własne, na podstawie [3])

Typ 2

Tabela 3. Obudowa wstępna i ostateczna typu 2

Obudowa wstępna	Obudowa ostateczna
Podwójne żebra stalowe IPE180 w rozstawie co 1,5 m	Obudowa żelbetowa o grubości 50 cm zarówno na kalocie, jak i sklepieniu spągowym
Torkret o grubości 25 cm zbrojony siatką stalową	

W celu uniknięcia oderwania się istniejących bloków skalnych i degradacji granicy skały przewidziano zastosowanie betonowanych kotew stalowych o średnicy 28 mm i długości 6,00 m. Kotwy będą ustawione w „wachlarzu” składającym się z 15 szt. w odstępach wzdłużnych co 1,50 m.



Rys. 8. Schemat obudowy typ 2 (opracowanie własne na podstawie [3])



Rys. 9. Montaż łuków stalowych IPE 180 (opracowanie własne)



Rys. 10. Deskowanie obudowy ostatecznej (opracowanie własne)

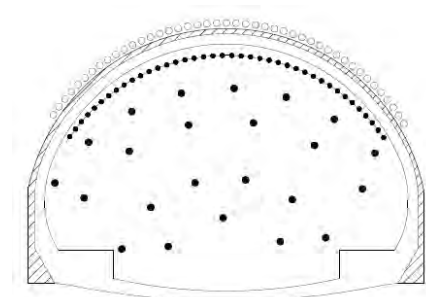
Typ 3

Typ ten charakteryzuje się wyprzedzającym wzmocnieniem konturu rdzenia tunelu przed jego drążeniem. Wzmocnienie to polega na wykonaniu stalowej obudowy wyprzedzającej oraz wzmocnieniu czola przodka rurami z włókna szklanego.

Tabela 4. Obudowa wstępna i ostateczna typu 3

Obudowa wstępna	Obudowa ostateczna
Podwójne żebra stalowe IPE180 w rozstawie co 1 m	Obudowa żelbetowa o grubości 50 cm do 100 cm na kalocie oraz 50 cm na sklepieniu spągowym
Torkret o grubości 25 cm zbrojony siatką stalową	

Drążenie będzie wykonywane młotem z krokiem 1,00 m oraz natychmiastowym założeniem żeber stalowych i torkretowaniem.



Rys. 11. Schemat obudowy typ 3 (opracowanie własne na podstawie [3])

Monitoring obudowy

Monitoring tunelu pozwala z jednej strony na zapewnienie bezpieczeństwa drążenia, a z drugiej na sprawdzenie reakcji górotworu na proces drążonego tunelu. Odpowiedź ta musi odpowiadać tej, którą obliczono na etapie projektowym. Z tego powodu monitoring reprezentuje istotną fazę dla właściwego wykonania tunelu. Co więcej, pozwala podjąć ostateczną decyzję w zakresie zabudowy poszczególnych etapów tunelu.

W szczególności celem systemu monitoringu jest obserwowanie rozwoju zjawisk fizycznych wywołanych przez drążenie tunelu za pomocą wykonania kilku pomiarów rozłożonych w przestrzeni i w czasie.

Monitoring podzielony może być na:

- monitoring podczas faz wykonania konstrukcji tunelu;
- monitoring w czasie pracy, po wybudowaniu tunelu, mający na celu identyfikację wszelkich długoterminowych wahań pomierzonych wartości.

Plan monitoringu analizowanego tunelu zawiera wykonanie pomiarów/badań in situ oraz wykorzystanie instrumentów topograficznych i elektrycznych umiejscowionych w obudowie wzdłuż linii tunelu.

Położenie stacji monitorujących uzależniono od warunków geomechanicznych określonych podczas etapu projektowego, podczas gdy częstotliwość odczytów związana jest głównie z etapem poszczególnych procesów technologicznych. Instrumentarium stosowane do kontroli obudowy wstępnej składa się z:

- tarcz optycznych dla pomiarów konwergencji,
- ogniw obciążnikowych i tensometrów dla pomiarów sił oraz naprężeń w obudowie.

Podobnie instrumentarium stosowane do kontroli obudowy ostatecznej składa się z:

- tensometrów dla pomiarów naprężeń zainstalowanych w obudowie betonowej.

Dla każdego typu sekcji wyposażonej w instrumenty wykonywane jest „odczyt zerowy” lub odczyt bez obecności zakłóceń spowodowanych drążeniem tuneli, tak by odseparować ilość ewentualnych osiadań wywołanych poprzedzającymi pracami. Następnie pomiary wykonane podczas monitoringu są sprawnie analizowane i wykorzystane do określenia faktycznego rozwoju stanu naprężeń oraz odkształcenia obudowy tunelu w czasie i przestrzeni wywołanych drążeniem tuneli. Pomierzone dane pozwalają sprawdzić i w razie potrzeby zweryfikować obecne założenia projektowe. Dla niektórych pomierzonych zmiennych określono dodatkowo wartości graniczne ostrzegawcze i alarmowe. Granice te mają na celu wykrycie wszelkich sytuacji anormalnych w bardzo krótkim czasie, co odpowiada potrzebie umożliwienia odpowiednich procedur pomiarowych dla rozwiązania stanu krytycznego.

Podsumowanie

Nowoczesne metody drążenia, do których bez wątpienia możemy zaliczyć metodę ADECO-RS, w znacznym stopniu wykorzystują współpracę górotworu z obudową, co z kolei wpływa bezpośrednio na jej grubość oraz prędkość prowadzenia drążenia. Należy jednak podkreślić, że w dużej mierze metoda ta oparta jest na skutecznie realizowanym monitoringu. Dane z monitoringu wykorzystuje się do bieżącego doboru sposobu drążenia, rodzaju obudowy wstępnej, a także określenia czasu wykonania obudowy ostatecznej. W ramach monitoringu prowadzone są pomiary przemieszczeń pionowych, poziomych i podłużnych punktów w stropie i w ociosach tunelu, siły i odkształceń w obudowie wstępnej oraz odkształceń obudowy ostatecznej. Dodatkowo podczas drążenia tunelu dokonuje się pełnej dokumentacji zmian geologicznych zachodzących w czole przodka i jego otoczeniu. Tylko w ten sposób realizowane pomiary umożliwiają prowadzenie procesu drążenia tuneli w bezpieczny sposób.



Rys. 12. Stan wydrążenia tunelu na dzień 26.01.2018 (opracowanie własne)

Bibliografia:

1. Tajduś A., Cała M., Tajduś K.: Geomechanika w budownictwie podziemnym. Projektowanie i budowa tuneli. Wydawnictwo AGH, Kraków 2012.
2. <http://www.dziennikzachodni.pl/polska-i-swiat/g/dts-katowice-nadzoruje-remont-zakopianki-na-trasie-s7-powstanie-tunel-przez-masyw-lubonia-malego,9922759,18232425/>.
3. Projekt warsztatowy obiektu: BUDOWA DROGI EKSPRESOWEJ S7 KRAKÓW-RABKA ZDRÓJ NA ODCINKU LUBIEŃ – RABKA ZDRÓJ KM 713+580,21 – KM 729+410,00, ORAZ BUDOWA NOWEGO ODCINKA DROGI NR 47 KLASY GP NA ODCINKU RABKA ZDRÓJ – CHABÓWKA KM 0+000,00 – KM 0+877,22. Astaldi SpA via G.V. Bona 65, 00156 Roma (Włochy) Spółka Akcyjna Oddział w Polsce ul. Sapiieżyńska 10A, 00-215 Warszawa.
4. Schiavone Felice – ASTALDI SpA: Podejście metodologiczne do Analizy i Projektowania Tunelu S7 Mały Luboń.

ABSTRACT. MODERN APPROACH TO TUNNEL DESIGN. The dynamic development of tunnelling construction that has been observed in recent years results in the necessity to carry out a deeper analysis of previously used methods of designing tunnel facilities. The problem concerns both determining the magnitude of loads acting on the tunnel casing at the stage of its dimensioning and the technology of their drilling. Current studies suggest the possibility of using new design methods taking into account, to a much greater extent, the cooperation of the rock mass with the tunnel lining. An example of such approach is the ADECO-RS method (analysis of controlled deformations in rocks and soils), which was used in the project of a road tunnel under the Mały Luboń mountain along the S7 expressway Kraków-Rabka Zdrój on the Lubień - Rabka Zdrój section. The paper presents the main assumptions of the ADECO-RS method and the way of determining the load acting on the preliminary and final lining based on the rock mass reaction curve. This method relies to a large extent on the measurements and observations of the behaviour of the face of the tunnel's ancestor and its contour. The paper also presents the results of geodetic measurements carried out in the tunnel, which form the basis for making decisions regarding the construction of individual stages of the tunnel casing. Based on the site visits, the work describes the next stages of ongoing works as well and discusses the issues related to the methods used to identify the rock mass used in the tunnel.

Keywords: ADECO-RS method, tunnel lining, tunnel monitoring