

Możliwość wykonania metra w rejonie krakowskiej AGH

The ability to construct the subway in the area of Cracow AGH



Mgr inż. Krzysztof Ostrowski^{*)}



Prof. dr hab. inż. Antoni Tajduś^{*)}

Treść: Celem niniejszej pracy było przeprowadzenie analizy możliwości wykonania metra w rejonie Akademii Górniczo-Hutniczej. Przedstawiono w niej istotne informacje na temat warunków geotechnicznych w rozważanym obszarze, które stanowią podstawę do wykonania oceny masywu gruntowego, dzięki której możliwe jest poznanie zachowania się ośrodka podczas wykonywania wyrobisk. Co więcej, informacje te są fundamentem do przeprowadzenia wiarygodnej analizy numerycznej. Dokonano optymalnego wyboru warstwy geologicznej, w której powinny być wykonane tunele metra, głębokości ich posadowienia, metody drażenia oraz odległości pomiędzy nimi. Na podstawie analizy stwierdzono, iż wykonanie metra w Krakowie w rejonie AGH jest możliwe przy zastosowaniu się do zaleceń wskazanych we wnioskach pracy.

Abstract: The purpose of this paper was to analyse the feasibility to construct a subway in Cracow in AGH area. This article presents crucial information in the subject of geotechnical conditions in the area in question, which are the basis to classify the soil mass allowing to identify the behavior of environment during drilling. Moreover, these facts are fundamental for performance of a reliable numerical analysis. This paper includes also the features of geotechnical massif, where the tunnels should be driven, depth of foundation, selection of optimum drilling method and distance between them. The results of the analysis indicate that the performance of a subway in Krakow in AGH area is possible if recommendations shown in the results would be applied.

Słowa kluczowe:

geologia rejonu AGH, metro, analiza numeryczna, metody drażenia tuneli

Key words:

geology of AGH area, subway, numerical analysis, tunnel excavation methods

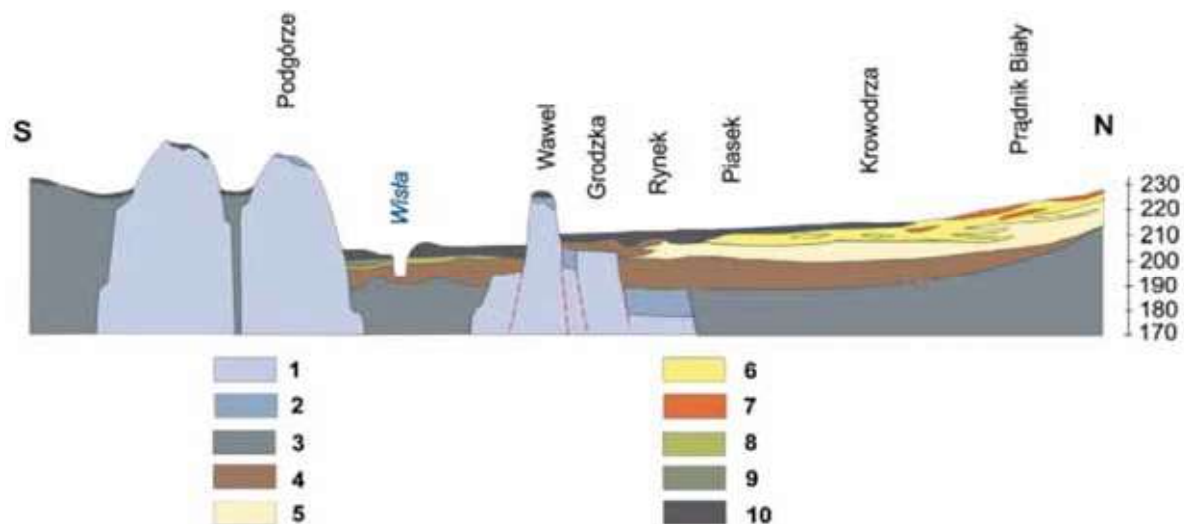
1. Wprowadzenie

W dzisiejszych czasach ludność zmaga się z wieloma niedogodnościami spowodowanymi znaczącym rozwojem cywilizacyjnym. Miasta stają się z każdym dniem bardziej zatłoczone, a korki komunikacyjne wpisują się w naszą codzienność. Dotarcie do celu zajmuje nam coraz więcej czasu. Nagłą potrzebą staje się udrożnienie komunikacji publicznej oraz jej ciągły rozwój dostosowany do potrzeb mieszkańców. Olbrzymią przeszkodą w rozbudowie sieci infrastruktury, zwłaszcza w miastach wysoce zurbanizowanych, jest brak niezbędnej przestrzeni do przeprowadzania nowych inwestycji, a nawet modernizacji już istniejących. Ponadto istniejące obiekty, szczególnie w mieście o charakterze zabytkowym, jakim jest Kraków, podlegają często ścisłej ochronie, a ceny gruntów w dużych aglomeracjach miejskich są z reguły bardzo wysokie, co stanowi istotne ograniczenie i niemożność wykonania danej inwestycji. Dlatego warto

zaczernąć rozwiązania z budownictwa podziemnego, które pozwala sytuować ciągi komunikacyjne pod powierzchnią terenu, co niesie ze sobą wiele zalet. W przypadku metra są to przede wszystkim: skrócenie czasu podróży oraz znacząca poprawa jakości ruchu naziemnego i co z tego wynika - spadek zanieczyszczeń.

Dyskusje nad budową metra w Krakowie trwają już od kilkudziesięciu lat. Ostatnimi czasy nabrały jednak dynamicznego charakteru za sprawą wypowiedzenia się mieszkańców w referendum za budową metra, jak i dzięki zapisom w „Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego miasta Krakowa”, w których stwierdza się, iż podstawowym środkiem transportu zbiorowego będą tramwaj i metro [9]. Planowana trasa pierwszej linii metra biegnie od węzła drogi S7 przy ul. Igołomskiej do dworca kolejowego w Bronowicach. W pracy przeprowadzono wstępną analizę możliwości wykonania krakowskiego metra w rejonie Akademii Górniczo-Hutniczej. W tym celu sporządzono opis warunków geologicznych i hydrogeologicznych ze szczególnym uwzględnieniem rozważanego obszaru, co

^{*)} AGH w Krakowie



Rys. 1. Schematyczny przekrój geologiczny przez podłoże Krakowa [1]: 1 – wapień jurajskie, 2 – margle kredowe, 3 – łył mioceńskie, 4 – żwiry karpackie, 5 – żwiry wapienne stożka Prądnika, 6 – piaski plejstoceńskie, 7 – lesy, 8 – piaski holocenięskie, 9 – gliny holocenięskie, 10 – nasypy

Fig. 1. Schematic geological cross section through subsoil of Cracow [1]: 1 – Jurassic limestones, 2 – Cretaceous marls, 3 – Miocene clays, 4 – Carpathian gravels, 5 – limestone gravels of Prądnik Stream, 6 – Pleistocene sands, 7 – loess, 8 – Holocene sands, 9 – Holocene loam, 10 – anthropogenic fills

stanowi podstawę do oceny masywu gruntowego oraz wyboru optymalnej technologii drażenia. W pracy wykonano obliczenia numeryczne tuneli metra, które pozwalają dobrać odpowiednią grubość obudowy, odległość pomiędzy tunelami oraz określić ich stateczność.

2. Geologia miasta Krakowa

Kraków jest położony u zbiegu kilku jednostek fizjograficznych: Wyżyny Krakowskiej, Zapadliska Podkarpackiego i Przedgórze Karpat. Warunki geologiczno-inżynierskie podłoża miasta należy uznać za skomplikowane. Wynika to nie tylko z naturalnej historii geologicznej, ale też jest istotnie związane z działalnością człowieka na przestrzeni wieków. Podłoże Krakowa pozostające w dużej mierze w zasięgu zainteresowań budownictwa podziemnego (tunele, parkingi i garaże podziemne) zbudowane jest z utworów mezozoicznych jury i lokalnie kredy, utworów trzeciorzędowych (łył mioceńskie), a także czwartorzędowych, takich jak piaski, żwiry, gliny [7]. Rysunek 1 przedstawia przekrój geologiczny przez podłoże Krakowa.

Bardzo istotną rolę w kształtowaniu warunków geologiczno-inżynierskich w Krakowie, zwłaszcza w rejonie Starego Miasta odgrywają nasypy, których mięszkość sięga nawet kilkunastu metrów. Najczęściej są to konglomeraty piasku, piasków próchnicznych, glin oraz gruntów rodzimych. Zawierają się w nich składniki antropogeniczne, takie jak fragmenty cegieł, zaprawy wapiennej, gruzu, betonu, składników organicznych (drewno, kości) o zróżnicowanej grubości. Nasypy te są na ogół słabo zagęszczone, ściśliwe i mają niską wytrzymałość mechaniczną. Z uwagi na ich niejednorodność należy stwierdzić, iż nie są one dobrym podłożem dla budowli [7].

3. Najistotniejsze aspekty tunelowania

Proces planowania w odniesieniu do tuneli jest wieloetapowy, zawiera wiele aspektów, takich jak: finansowanie, badania terenu, warunki wodne, utylizacja urobku, przetargi,

projektowanie, budowa, eksploatacja, konserwacja, zarządzanie ryzykiem [2].

W świadomości społecznej, a nawet w niektórych kręgach specjalistów budownictwa nadziemnego utrwalony jest pogląd, iż budowa obiektów podziemnych w porównaniu z budową obiektów naziemnych jest znacznie droższa oraz że taka inwestycja może być uzasadniona tylko nadzwyczajnymi warunkami technicznymi i topograficznymi. Dotyczy to zwłaszcza porównania kosztów budowy odcinka drogi z tunelem. Przy porównaniu tych kosztów z reguły nie uwzględnia się [8]:

- kosztów z tytułu wykupu terenu (w przypadku tuneli nie ma potrzeby wykupywania działek leżących powyżej),
- kosztów wynikających z konieczności przenoszenia istniejących obiektów infrastruktury (rurociągi, kable, linie wysokiego napięcia etc.),
- kosztów utrzymania i eksploatacji drogi, szczególnie w warunkach zimowych,
- niezwykle trudnych do oszacowania kosztów związanych z ekologią.

W ostatnich latach miał miejsce ogromny postęp techniczny, bez którego rozwój budownictwa podziemnego nie byłby możliwy. Sprawia on, że podziemne rozwiązania komunikacyjne z uwagi na aspekt technologiczny są możliwe do wykonania praktycznie w każdych warunkach. Stosowane obecnie metody budowy tuneli, w których drażnienie zaplanowane jest przy użyciu najnowocześniejszych komputerowych metod obliczeniowych, wraz z wykorzystaniem zwiększającego się doświadczenia projektantów, pozwalają w sposób sprawny i ekonomiczny realizować nowe budowle podziemne, bądź też modernizować istniejące.

4. Ocena geotechnicznych właściwości masywu gruntowego

Dla rozwiązania problemu dotyczącego możliwości wykonania metra w rejonie AGH, należy oprzeć się na rzetelnych danych geologicznych, hydrogeologicznych i geotechnicznych. Przyjęte do analizy warunki geologiczne zostały określone

Tablica 1. Warunki geologiczne i wartości poszczególnych parametrów w rejonie AGH
Table 1. Geological conditions and values of geotechnical parameters in AGH area

Lp.	Strop m	Spąg m	Miąższość m	Litologia	ρ kg/m ³	E MPa	ν [-]	α [°]	c kPa
1.	0,0	2,2	2,2	grunty antropogeniczne	2050	14,5	0,3	9	9
2.	2,2	2,6	0,4	namuły	2050	14,5	0,3	9	9
3.	2,6	4,0	1,4	piasek drobny i pylasty	1900	35	0,3	30	0
4.	4,0	6,0	2	piasek drobny	1850	35	0,3	32	0
5.	6,0	15,0	9	pospółka i żwir	2050	80	0,3	39	0
6.	15,0	30,0	15	ił szary mioceniński	2050	50	0,26	13-16,9	60-228
7.	30,0	78,0	48	ilołupek szary	2150	100	0,3	20	100

Źródło: Opracowanie własne

na podstawie profili litologicznych dla otworów badawczych wymienników ciepła, znajdujących się w Międzywydziałowej Polowej Stacji Badań Środowiskowych na terenie Akademii Górniczo - Hutniczej. Parametry gruntów zalegających od powierzchni terenu do ilów miocenińskich włącznie, w odniesieniu do gęstości objętościowej, spójności i kąta tarcia wewnętrznego zostały ustalone na podstawie dokumentacji projektowej, wykonanej na potrzeby budowy Centrum Energetyki AGH [4]. Wartości Modułu Younga, liczby Poissona oraz wszystkie parametry dla ilołupek szarych zostały dobrane na podstawie literatury [10]. Tablica 1 przedstawia warunki geologiczne i przyjęte wartości poszczególnych parametrów w rejonie AGH.

Przyjęto, że warstwą, w której przeprowadzone zostanie drążenie są iły miocenińskie. Ponad nią zalegają utwory czwartorzędowe, w których warstwa wodonośna występuje od 2 m do 15 m poniżej powierzchni terenu. Aby uniknąć dopływu wód gruntowych do tunelu, zdecydowano się na przeprowadzenie drążenia i jego analizę w warstwie ilów o dość dobrych parametrach geotechnicznych. Przebadana w rejonie AGH część stropowa warstwy ilów o miąższości 1,3 metra posiada następujące parametry wytrzymałościowe: kąt tarcia wewnętrznego $\alpha = 13^\circ$ oraz spójność $c = 60$ kPa. Wilgotność naturalna wynosi 28,8%, a gęstość objętościowa 2050 kg/m³. Natomiast z pracy [7] wynika, że przeciętne parametry wytrzymałościowe dla tej warstwy są wyższe i wynoszą: kąt tarcia wewnętrznego $\alpha = 16,9^\circ$, natomiast spójność $c = 228$ kPa. Dlatego też, by odzwierciedlić wzrost tych parametrów wraz z głębokością, w całej miąższości ilów miocenińskich w rejonie AGH począwszy od 15 metra poniżej poziomu terenu do 30 metra p.p.t., zwiększono w sposób liniowy wartości parametrów co 1 metr od wartości przyjętej z dokumentacji [4] do wartości średniej na podstawie opracowania [7]. Uwzględniony w analizie numerycznej kąt tarcia wewnętrznego wzrasta od 13° do $16,9^\circ$, czyli o $0,26^\circ/\text{m}$, spójność zaś od 60 kPa do 228 kPa, tj. o 11,2 kPa/m.

Masyw ilów miocenińskich oceniono na podstawie nomogramu Casagrande'a i jego modyfikacji, klasyfikacji gruntów Terzagiego oraz kryteriów zawartych w normie PN-B-06050:1999. Po dokonaniu oceny okazuje się, że są to grunty trudno urabialne, bardzo spójne, o bardzo wysokiej plastyczności i pęcznieniu. Istniejące rozwarstwienia gruntu w części stropowej prowadzić mogą do zwiększenia oddziaływania warstwy wodonośnej na jego właściwości w tym obszarze.

5. Dobór metody wykonania tuneli

Niezwykle istotną kwestią jest prawidłowy wybór metody drążenia tunelu. Musi on być poprzedzony dokładnym rozpoznaniem geologicznym i geotechnicznym trasy tuneli oraz decyzją o wyborze systemu tuneli szlakowych. W pracy przyjęto model dwóch tuneli jednotorowych. Warunki geologiczne i hydrogeologiczne są podstawowym kryterium doboru metody wykonania tego typu przedsięwzięcia, jednakże jak w przypadku dużych miast, szczególnie zabytkowych, takich jak Kraków, istotny jest również wpływ metody drążenia na deformację terenu i ich skutki.

Istnieje wiele sposobów wykonania tuneli. Są to m.in. metody górnicze i odkrywkowe, Nowa Austriacka Metoda Budowy Tuneli, Norweska Metoda Budowy Tuneli, metoda dzielenia przodka na części, metody tarczowe, z użyciem maszyn wierzących; TBM, TBMs. Dobrze dobrany system urabiania musi harmonizować ze sobą zarówno minimalizację osiadania terenu wraz z osiągnięciem zakładanych postępów, jak i optymalizację kosztów.

Dlatego też drążenie powinno zostać przeprowadzone przy użyciu kombajnu TBMs EPB, gruntowo-plastyfikatorowego, równoważące ciśnienie gruntu (rys. 2), który to pozwala na wykonanie konstrukcji tuneli metra krakowskiego w tym ośrodku. Wśród zalet tej metody należy wymienić



Rys. 2. Przekrój tarczy TBMs EPB [3]: 1 – głowica urabiająca, 2 – zespół napędowy, 3 – silowniki główne, 4 – śluza powietrzna, 5 – przenośnik ślimakowy, 6 – układarka, 7 – wysyp przenośnika ślimakowego, 8 – podajnik segmentów, 9 – dźwig do przenoszenia segmentów, 10 – przenośnik taśmowy

Fig. 2. Cross-section of EPB shield [3]: 1 – ripping head, 2 – power plant, 3 – main actuators, 4 – airlock, 5 – screw conveyor, 6 – stacker, 7 – tip of screw conveyor, 8 – elements feeder, 9 – elevator to transfer elements, 10 – belt conveyor

możliwość pracy zarówno w ośrodku spoistym, jak i niespoistym, a także minimalizację osiadań powierzchni z uwagi na wykonywanie obudowy w krótkim czasie. Jest to rozwiązanie wielosystemowe, pozwalające na optymalną pracę w skomplikowanych, niejednorodnych i różniących się często w sposób drastyczny warunkach geotechnicznych.

6. Analiza numeryczna

Dzięki przeprowadzeniu analizy numerycznej, możliwe jest udzielenie odpowiedzi na istotne pytania dotyczące doboru odpowiedniej grubości żelbetowej obudowy segmentowej czy też odległości pomiędzy tunelami.

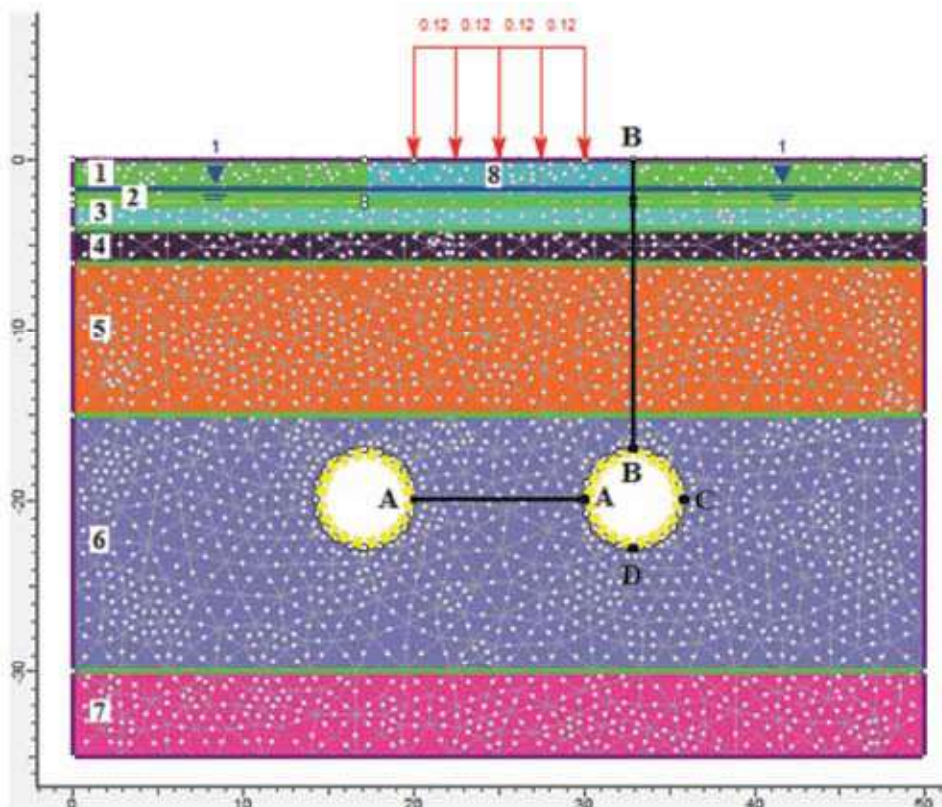
Analiza numeryczna została przeprowadzona w programie RS2 9.0 firmy Rocscience. Jest to program służący do przeprowadzania płaskiej analizy 2D, który bazuje na metodzie elementów skończonych, a przeznaczony jest do rozwiązywania zagadnień geotechnicznych, związanych z ośrodkiem skalnym i gruntowym.

Wykonano dwa przypadki obliczeniowe. W pierwszym z nich założono hydrostatyczny stan naprężenia w całym ośrodku gruntowym, w drugim zaś przyjęto, iż w iłach mioceńskich i iłolupku szarym naprężenia poziome p_x są dwukrotnie większe od naprężeń pionowych p_z . Założenie to wynika z faktu, iż w rejonie Krakowa grunty zostały poddane prekonsolidacji wskutek obciążenia terenu lodowcem [10]. Należy podkreślić, że przed przystąpieniem do procesu projektowania metra krakowskiego trzeba przeprowadzić

badania pierwotnego stanu naprężenia ośrodka gruntowego.

Przyjęta do obliczeń tarcza w modelu numerycznym miała wymiary 50 m x 140 m. Górna krawędź tarczy sięga powierzchni terenu. Na krawędziach bocznych przyjęto przemieszczenia poziome równe zero. Natomiast na dolnej krawędzi tarczy przyjęto przemieszczenia pionowe i poziome równe zero. Na powierzchni terenu zostało przyjęte obciążenie od hipotetycznego budynku o wartości $q = 120$ kPa rozłożone na długości 10 metrów. Uwzględniona została plejstocenska warstwa wodonośna na poziomie od -2 m do -15 m. Parametry ośrodka gruntowego przyjęto zgodnie z tabelą 1. Średnica wewnętrzna obydwu tuneli została dobrana jak w przypadku premetra w Kopenhadze i wynosi 5,78 metra. Przyjęta odległość pomiędzy tunelami wynosi 10 metrów. Tunele umiejscowiono na głębokości 2 metrów poniżej stropu warstwy iłów mioceńskich. Poziom spąg wyrobisk wynosi -22,78 m. Rysunek 3 przedstawia fragment analizowanej tarczy. Obliczenia zostały przeprowadzone w płaskim stanie odkształcenia. Tarczę podzielono na 5000 elementów skończonych - sześciowęzłowych elementów trójkątnych.

Dobrano żelbetową obudowę składającą się z elementów belkowych. Przyjęto beton klasy C50/60, którego: obliczeniowa wytrzymałość na ściskanie $f_{cd} = 33,3$ MPa, obliczeniowa wartość wytrzymałości na rozciąganie $f_{ctd} = 1,93$ MPa, moduł Younga $E = 37$ GPa, liczba Poissona $\nu = 0,2$. Jako zbrojenie przyjęto siatkę stalową wykonaną ze stali klasy AIIIIN, gatunku RB 500W o obliczeniowej granicy plastyczności $f_{yd} = 420$ MPa, składającą się z prętów o średnicy $\varnothing = 12$ mm o rozstawie $s = 200$ mm. Przyjęty moduł Younga stali

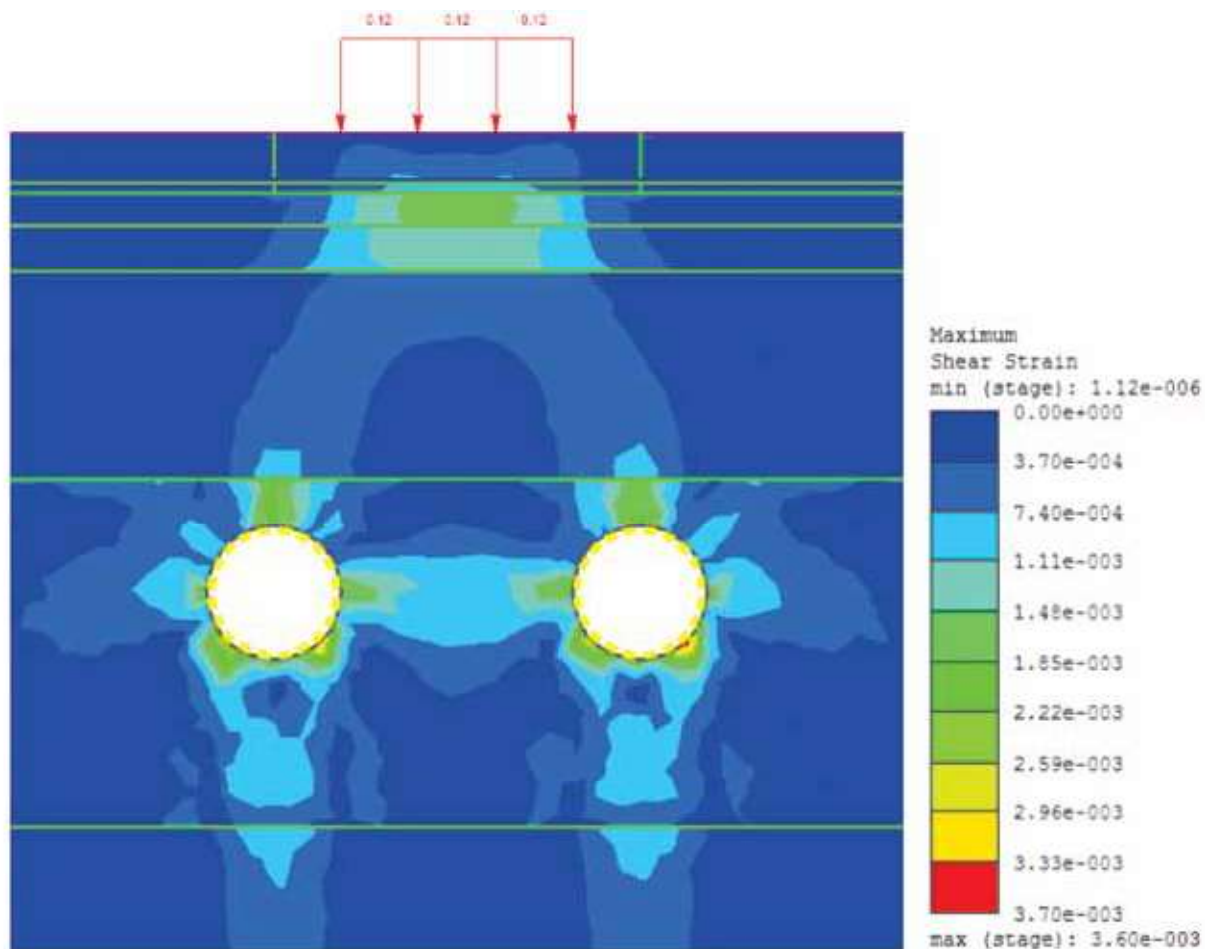


Rys. 3. Fragment tarczy wraz z założoną obudową i punktami charakterystycznymi. Oznaczenia warstw: 1- grunty antropogeniczne, 2- namuły, 3- piasek drobny i pyłasty, 4- piasek drobny, 5- pospółka i żwir, 6- ił szary, 7- iłolupek, 8 - pospółka i żwir

Źródło: opracowanie własne, RS2 9.0

Fig. 3. Fragment of shield with tunnel housing and characteristic points. Layers symbols: 1 – anthropogenic soils, 2 – muds, 3 – fine and dusty sand, 4 – fine sand, 5 – sandy gravel and gravel, 6 – gray clay, 7 – clump, 8 – sandy gravel and gravel

Source: own elaboration, RS2 9.0

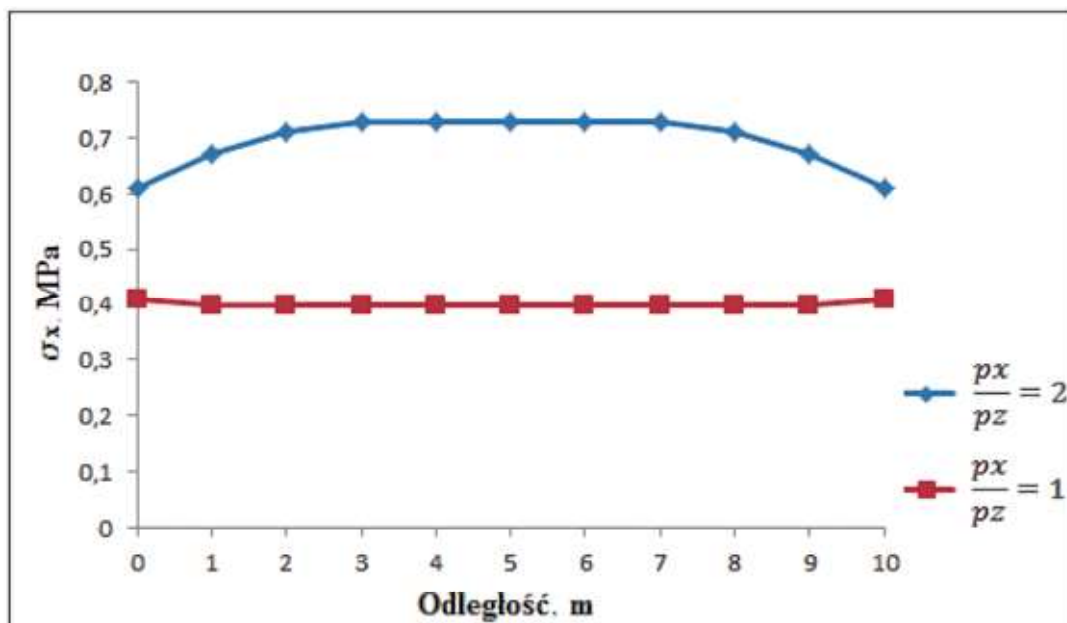


Rys. 4. Rozkład odkształceń postaciowych dla $\frac{p_x}{p_z} = 2$

Źródło: opracowanie własne, RS2 9.0

Fig. 4. Share strain distribution for $\frac{p_x}{p_z} = 2$

Source: own elaboration, RS2 9.0



Rys. 5. Naprężenia poziome w przekroju A-A

Źródło: opracowanie własne, RS2 9.0

Fig. 5. Horizontal stresses in A-A cross-section

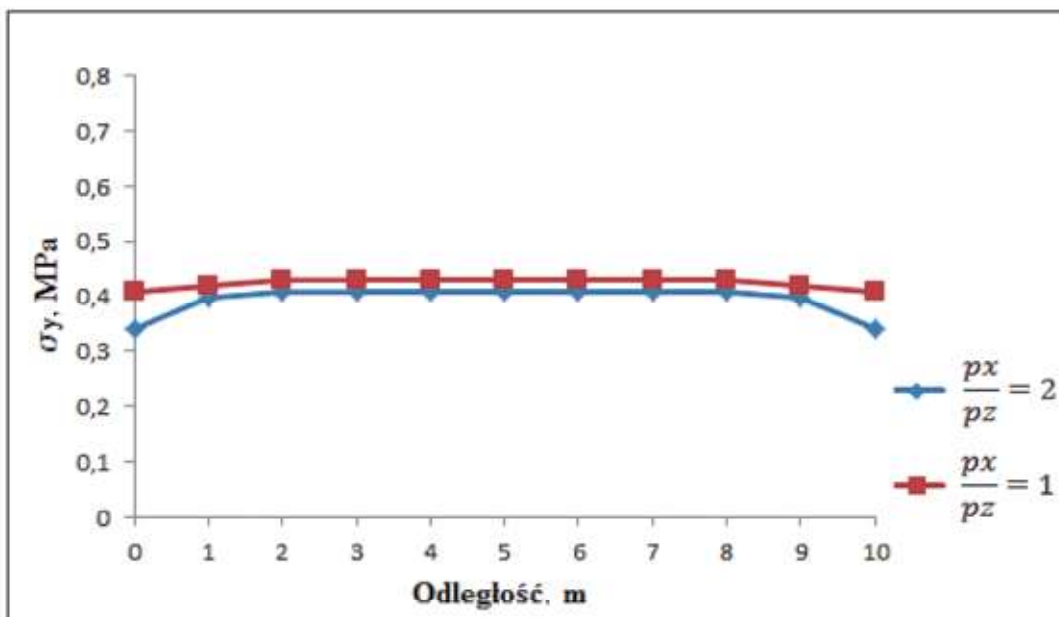
Source: own elaboration, RS2 9.0

Rys. 6. Naprężenia pionowe w przekroju A-A

Źródło: opracowanie własne, RS2 9.0

Fig. 6. Vertical stresses in A-A cross-section

Source: own elaboration, RS2 9.0

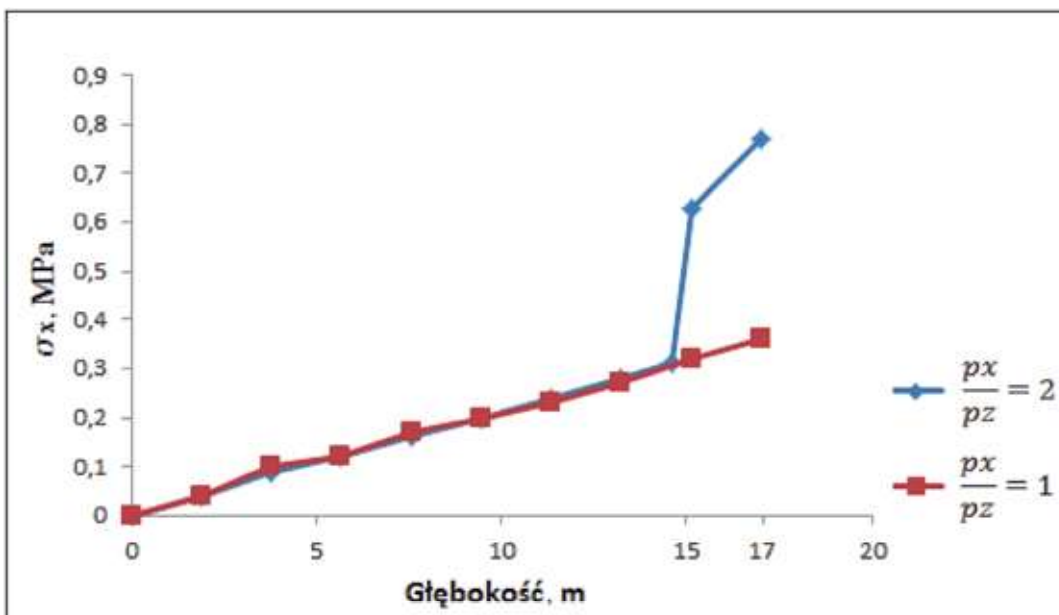


Rys. 7. Naprężenia poziome w przekroju B-B

Źródło: opracowanie własne, RS2 9.0

Fig. 7. Horizontal stresses in B-B cross-section

Source: own elaboration, RS2 9.0

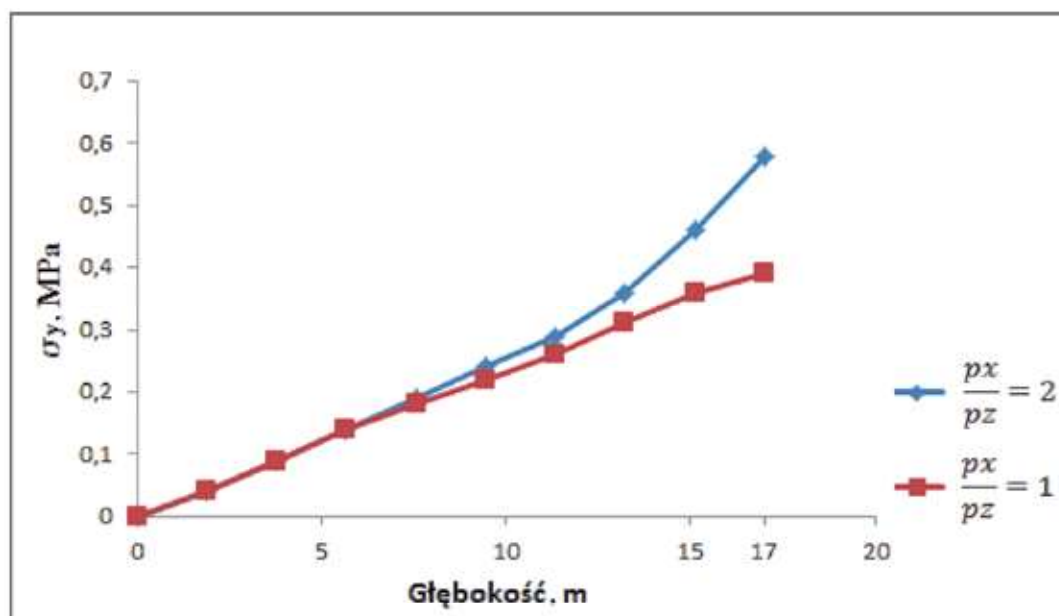


Rys. 8. Naprężenia pionowe w przekroju B-B

Źródło: opracowanie własne, RS2 9.0

Fig. 8. Vertical stresses in B-B cross-section

Source: own elaboration, RS2 9.0



$E = 210$ GPa. Dobrana grubość obudowy wynosi $d = 0,3$ m i pozostaje stała bez względu na zmiany stanu naprężenia w gruntach spoistych.

Rysunek 4 przedstawia rozkład odkształceń postaciowych w rejonie wyrobisk dla $\frac{px}{pz} = 2$. Na kolejnych rysunkach pokazano: rozkład naprężeń poziomych i pionowych w przekroju A-A (rys. 5 i 6), rozkład naprężeń poziomych i pionowych w przekroju B-B (rys. 7 i 8). W tabelicy nr 2 zestawiono wartości naprężeń w wyznaczonych punktach charakterystycznych obudowy.

Tabela 2. Naprężenia w wybranych punktach obudowy
Table 2. Stresses in selected points of tunnel houses

Punkt na konturze tunelu	$\frac{px}{pz} = 1$		$\frac{px}{pz} = 2$	
	s_x , MPa	s_y , MPa	s_x , MPa	s_y , MPa
A	0,41	0,41	0,62	0,34
B	0,36	0,39	0,77	0,58
C	0,40	0,41	0,60	0,35
D	0,38	0,43	0,81	0,64

Źródło: opracowanie własne, RS2 9.0

Wyniki przeprowadzonych rozważań wskazują na to, iż możliwe jest wykonanie tuneli metra w rejonie Akademii Górniczo-Hutniczej. Wskazuje na to między innymi brak uplastycznienia w dobranej obudowie w obydwu przypadkach obliczeniowych oraz stosunkowo niewielkie wartości odkształceń postaciowych w rejonie wyrobisk (w drugim przypadku obliczeniowym wartość maksymalna występuje w spagu wyrobisk i osiąga wartość 0,036). Odległość pomiędzy tunelami jest wystarczająca, nie ma potrzeby jej zwiększania. Dobrana grubość obudowy tuneli zapewnia ich stateczność. Jednakże należy pamiętać, że obliczenia zostały wykonane dla szacunkowych danych geologicznych i hydrogeologicznych. Jak zostało już wspomniane, można się spodziewać pęcznienia ilów mioceńskich w zależności od ich struktury (możliwe rozwarstwienia w części górnej, wpływ plejstoceniowego poziomu wodonośnego na zmianę właściwości i pęcznienie). Dlatego też w przypadku stwierdzenia na podstawie rozpoznania geologicznego, iż ropy te są bardzo rozwarstwione, mocno pęczniące, o wysokim ciśnieniu pęcznienia - to należy uwzględnić to jako dodatkowe obciążenie działające na obudowę tuneli i zapewne dokonać korekty jej grubości.

7. Wnioski

Z przeprowadzonej analizy wynikają następujące wnioski:

1. Najwłaściwszą metodą wykonania tuneli metra jest przeprowadzenie drażenia przy użyciu tarczy TBMs, gruntowo-plastyfikatorowej EBP; równoważącej parcie gruntu. Użycie tej właśnie tarczy ma swoje uzasadnienie w zróżnicowanych warunkach geologicznych wzdłuż planowanej trasy metra
2. Tunele w rejonie AGH powinny być ulokowane w warstwie ilów mioceńskich z uwagi na leżącą powyżej warstwę wodonośną. Jeżeli wyniki badań wskażą na duże

rozwarstwienie w stropowej części tego gruntu, należy liczyć się z jego zmiennymi właściwościami w tym obszarze. Konieczne może być wtedy uwzględnienie ciśnienia pęcznienia ilów jako dodatkowego obciążenia obudowy tuneli, co skutkować będzie zwiększeniem jej grubości.

3. W celu ograniczenia wpływu plejstoceniowego poziomu wodonośnego na drażenie tuneli metra, ich strop powinien być umiejscowiony w odległości minimum 2 metrów od stropu warstwy ilów mioceńskich. Nie zaleca się wykonywania tuneli w warstwie żwirów leżących powyżej, ze względu na przewidywane utrudnienia w drażeniu wynikające z istniejącej tam warstwy wodonośnej. W rejonie AGH proponuje się posadowienie tunelu na głębokości 23 metrów.
4. Wstępnie zaleca się stosowanie żelbetowej obudowy segmentowej o grubości 0,3 m.
5. Odległość pomiędzy tunelami w rozważanym obszarze powinna wynosić minimum 10 metrów, aby uniknąć wzajemnych oddziaływań pomiędzy nimi.
6. W związku z wysoką agresywnością wód gruntowych Krakowa [7], beton, z którego zostaną wykonane tubingi żelbetowe powinien cechować się zwiększoną odpornością na oddziaływanie środowiska agresywnego.

Warto podkreślić jest to, iż najodpowiedniejszym rozwiązaniem dla miasta Krakowa jest system bezzałogowego premetra składający się z części podziemnej, biegnącej przez starą zabytkową część miasta, części naziemnej, prowadzonej po powierzchni terenu oraz części naziemnej prowadzonej po estakadach. Jest to rozwiązanie optymalne, zdecydowanie tańsze w porównaniu do budowy metra przebiegającego w całości pod ziemią.

Literatura

1. *Kmietowicz-Drathowa I.*: Podłoże podczwartorzędowe Krakowa i ukształtowanie stropu mioceenu. Konferencja „Geologia podłoża miasta Krakowa”. Kraków 1964.
2. *Kołybas D.*: Tunelling and tunnel mechanics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Innsbruck 2005.
3. *Kosmowski M., Kozłowski R.*: Nowoczesne metody rozbudowy metra warszawskiego w oparciu o zmechanizowane tarcze pełnoprzekrojowe. „Górnictwo i Geoinżynieria” 2005, z. 3/1.
4. *Krupińska-Lempart E., Kusia W.*: Projekt robót geologicznych na wykonanie studni odwadniającej do spompowania wody z obrębu ścian szczelinowych na potrzeby budowy Centrum Energetyki AGH z garażem podziemnym i infrastrukturą techniczną przy ulicy Czarnowiejskiej w Krakowie. Kraków 2013.
5. PN-B-06050:1999 Geotechnika. Roboty ziemne. Wymagania ogólne.
6. Rociencie. RS2 9.0
7. *Rybicki S., Krokoszyński P., Herzig J.*: Charakterystyka warunków geologiczno-inżynierskich podłoża Krakowa z uwzględnieniem nawarstwień historycznych. „Górnictwo” 2009, z. 1, t. 35.
8. *Tajduś A., Cala M., Tajduś K.*: Geomechanika w budownictwie podziemnym: projektowanie i budowa tuneli. Wydawnictwa AGH, Kraków 2012.
9. Uchwała Rady Miasta Krakowa Nr CXII/1700/14 z dnia 9 lipca 2014 r.: „Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego miasta Krakowa”.
10. *Witun Z.*: Zarys geotechniki. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2013.