

*Jacek Jakubowski**

ANALIZA PORÓWNAWCZA SCHEMATÓW KOTWIENIA TUNELU METODĄ STOCHASTYCZNEJ SYMULACJI STATECZNOŚCI BLOKÓW**

1. Wstęp

W skałach mocnych z silnie rozwiniętymi sieciami nieciągłości [15, 16] wyodrębniającymi duże bloki skalne, gdy stateczność wyrobiska zależy głównie od przemieszczeń tych bloków, inżynierskie klasyfikacje masywu skalnego są nieadekwatne [1, 6, 19]. Stateczność wyrobiska należy w takich warunkach badać poprzez analizę możliwych przemieszczeń bloków a obudowę i zabezpieczenia projektować tak, aby im przeciwdziałały [3, 5]. Odpowiednimi dla modelowania numerycznego warunków masywu skalnego o strukturze blokowej są mechaniczne modele ośrodka dyskretnego (metody elementów dyskretnych, teoria bloków). Największą ich wadą w zastosowaniu do takich warunków jest nieunikniona rozbieżność pomiędzy rzeczywistą geometrią sieci nieciągłości a jej deterministycznym modelem [13, 14]. Jest to poważny problem, który stawia pod znakiem zapytania stosowalność metod ośrodka dyskretnego w takich warunkach. Symulacja stochastyczna, która wykorzystuje statystyczny opis nieciągłości, stochastyczne modele sieci nieciągłości oraz mechaniczne modele ośrodka dyskretnego, może być rozwiązaniem tego problemu. Przedstawiony tutaj przykład porównawczej analizy schematów kotwienia jest ilustracją zastosowania takiego podejścia.

Metody probabilistycznej analizy stateczności wyrobisk tunelowych z zastosowaniem modeli bloków sztywnych zaproponowali między innymi McCullagh i Lang [18], Hatzor [4], Mauldon [17] (metody analityczne), Chan [2], Hoerger [7], Jakubowski [8, 9] oraz Song i inni [20] (metody symulacyjne) a dla bloków odkształcalnych Jakubowski [10, 11] (stochastyczna metoda elementów odrębnych).

* Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Artykuł przygotowano w ramach badań 11.11.100.197.

2. Opis problemu

Atlanta w stanie Georgia jest jedną z największych aglomeracji miejskich na południowym wschodzie USA. Razem z otaczającymi ją miejscowościami ma ponad 5 mln mieszkańców. Miasto zbudowało niedawno system tuneli o dużym przekroju, który jest zbiornikiem wód opadowych oraz ścieków i doprowadza je do nowej oczyszczalni nad rzeką Chattahoochee (West Area CSO Project). Tunel West Area CSO Project ma długość około 13,7 km i składa się z dwóch głównych tuneli, dwóch tuneli łącznikowych, trzech tuneli dopływowych. Dwa tunele główne to Clear Creek Tunnel i North Avenue Tunnel. Projektowana średnica w wyłomie każdego z nich wynosiła około 8,13 m (26 ft 8 in) a średnica użytkowa 7,32 m (24 ft). Obydwa były projektowane w skałach mocnych, na średniej głębokości około 61 m (200 ft) poniżej powierzchni gruntu.

Celem przedstawionych tutaj obliczeń była ocena wpływu zmiany osiowego rozstawu kotew z 1,52 m (5 ft) do 2,13 m (7 ft), na warunki stateczności tunelu w obudowie kotwowej [12]. Zadanie sprowadzono do porównania warunków stateczności tunelu dla dwóch schematów kotwienia z zastosowaniem metody symulacji bloków (MSB).

Utwory geologiczne w rejonie Atlanty to skały metamorficzne z intruzjami granitowymi poddane lokalnym wypiętrzeniom. W rejonie drażenia tuneli występują mocne skały: granity i pegmatyty, białe i czarne mylonity, gnejsy. Skały w rejonie Atlanty podlegały silnym deformacjom wywołującym uskoki, pofałdowania i spękania. Struktury geologiczne można podzielić na starsze, związane z powstawaniem Apalachów i młodsze, związane z wypiętrzeniami i zjawiskami tektonicznymi. Starsze struktury to struktury metamorficzne, strefy ścinania i mylonityzacji, sieci kruchych spękań, często wypełnionych. Młodsze struktury to głównie spękania związane z wypiętrzeniami o szerokim zasięgu i odprężeniami.

3. Metoda stochastycznej symulacji stateczności bloków (MSB)

Mechaniczną naturę masywu skalnego o strukturze blokowej dobrze odwzorowuje teoria bloków [3, 21] i jej modyfikacja [8, 9], oparte na prostym modelu fizycznym oraz analizie przemieszczalności i stateczności układu sztywnych bloków skalnych. Stochastyzacja deterministycznych metod teorii bloków pozwala na naturalne uwzględnienie w modelach geomechanicznych silnie losowego charakteru rzeczywistych sieci nieciągłości i ich wpływu na mechaniczne zachowanie się blokowego masywu skalnego. Dla metody symulacji bloków (MSB) naturalnym opisem sieci nieciągłości jest opis statystyczny za pomocą empirycznych histogramów częstości i rozkładów prawdopodobieństwa. W przeciwieństwie do opisu deterministycznego (zwykle niepełnego i uśrednionego), jest to realistyczny sposób opisu rzeczywistych, rozwiniętych sieci nieciągłości w masywie skalnym o strukturze blokowej, wykorzystujący pełen zakres dostępnych danych pomiarowych. Model mechaniczny, którym posługuje się MSB, stanowi uogólnienie klasycznych metod teorii bloków. Podobnie jak one, zakłada sztywność bloków i posługuje się analizą równowagi granicznej oraz koncepcją bloków kluczowych. Metoda MSB wykorzystuje własne, oryginalne algorytmy wyszukiwania bloków przemieszczalnych oraz stochastycznego filtrowania rozmiaru i kształtu bloków [8, 11]. Zaletą metody symulacji

bloków (MSB) jest m.in. korzystanie ze statystycznego opisu sieci nieciągłości oraz uwolnienie się z wielu założeń upraszczających, ograniczających zastosowanie metod deterministycznych oraz innych metod probabilistycznych wymienionych wcześniej.

4. Dane przyjęte do obliczeń

Po zebraniu i analizie dostępnych danych geologicznych uznano, że są one wystarczające do analizy porównawczej warunków stateczności dla dwóch różnych rozstawów osiowych kotew. Cały tunel podzielono na 14 części i dla każdej z nich przeprowadzono osobne obliczenia i symulacje stochastyczne. Przyjęto, że główne parametry sieci nieciągłości (orientacja, odstęp i zasięg) są statystycznie jednorodne oraz niezależne. Przyjęte na podstawie dostępnej dokumentacji projektowej, podstawowe dane wejściowe dla symulacji numerycznej MSB przedstawiono w tabelach 1 i 2.

TABELA 1

Podstawowe dane wejściowe dla symulacji numerycznej

Kształt przekroju poprzecznego tunelu	kołowy
Azymut osi tunelu	dany, różny dla każdego odcinka tunelu
Nachylenie osi tunelu	przyjęto bez nachylenia
Średnica tunelu w wyłomie	8,23 m (27 ft)
Liczba zespołów nieciągłości	3
Parametry zespołów nieciągłości	patrz tabela nr 3
Nośność kotew	230 kN
Schemat kotwienia A	rozstaw podłużny 1,52 m (5 ft), poprzeczny około 2,13 m (7 ft), 4 kotwy dł. 3,05m (10 ft) w rzędzie, symetrycznie
Schemat kotwienia B	rozstaw podłużny 2,13 m (7 ft), poprzeczny około 2,13 m (7 ft), 4 kotwy dł. 3,05m (10 ft) w rzędzie, symetrycznie
Schemat kotwienia C	bez kotew

TABELA 2

Parametry zespołów nieciągłości dla przyjętego stochastycznego modelu sieci nieciągłości. Płaszczyznę średnią zespołów nieciągłości podano w formacie: azymut upadu/kąt upadu

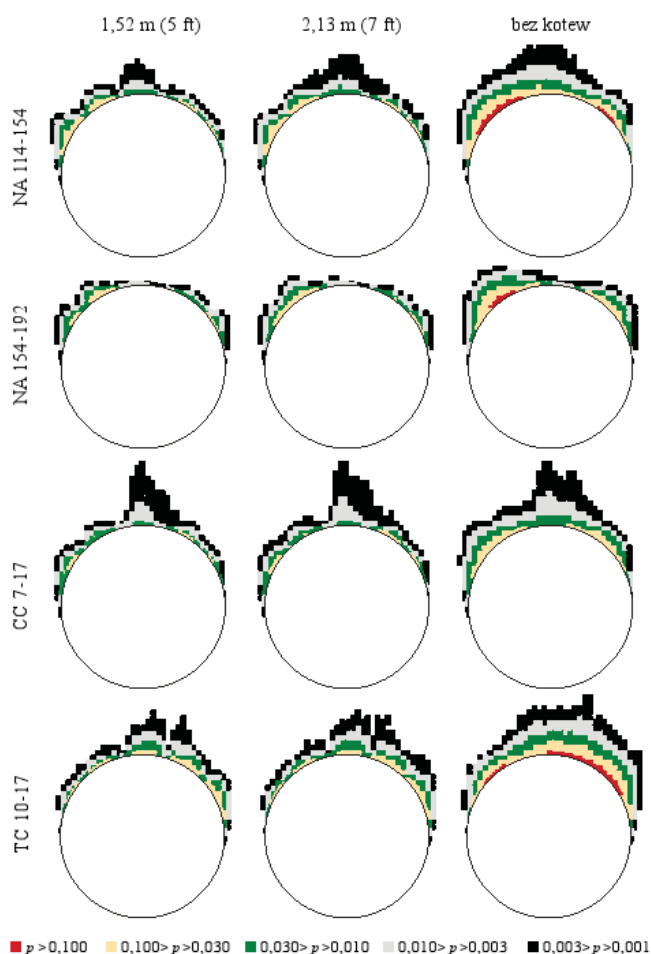
Zespół nieciągłości	Średni odstęp	Rozkład prawdopodobieństwa odstepu	Średni zasięg	Kąt tarcia	Płaszczyzna średnia zespołu	Funkcja rozkładu prawdopodobieństwa orientacji zespołów	Parametr rozproszenia rozkładu Fishera
1	1,5 m	Wykładniczy	15,0 m	40°	50° / 84°	Fishera	50
2	1,5 m	Wykładniczy	15,0 m	40°	310° / 81°	Fishera	50
3	1,5 m	Wykładniczy	15,0 m	40°	120° / 12°	Fishera	50

5. Wyniki symulacji

Wszystkie przedstawione tu wyniki symulacji stochastycznej opisują stateczności tunelu w postaci statystyk i miar prawdopodobieństwa. Są one wynikiem przeprowadzenia 150 realizacji (pojedynczych symulacji odcinków o długości 100 m) dla każdego zestawu danych. Taka liczba realizacji zapewnia odpowiednią dokładność estymacji.

Obliczenia przeprowadzono dla 42 różnych zestawów danych wejściowych (14 części tunelu, 3 schematy kotwienia) czyli w sumie przeprowadzono 6300 pojedynczych symulacji.

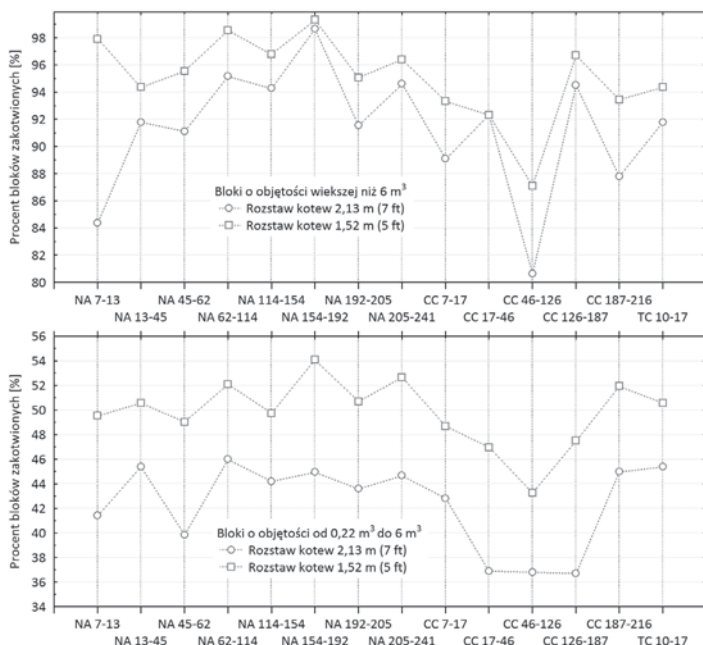
Na rysunku 1 przedstawiono konturowe wykresy prawdopodobieństwa niestateczności dla przykładowych czterech odcinków tunelu. Strefa zawierająca punkty o prawdopodobieństwie niestateczności nie mniejszym niż 0,001 jest nazywana strefą niestateczną 0,001. Na



Rys. 1. Konturowe wykresy prawdopodobieństwa niestateczności dla przykładowych 4 z 14 odcinków tunelu dla trzech schematów kotwienia

pokazanych na rysunku 1 wykresach konturowych, jest to strefa o największym zaznaczonym zasięgu. Wykresy prawdopodobieństwa niestateczności są rodzajem zbiorczych statystyk przedstawianych graficznie. Są one skondensowanym i łatwym do percepcji sposobem przedstawiania wyników w MSB [9, 11].

Rysunek 2 i tabela 3 przedstawiają statystyki bloków dla różnych schematów kotwienia i różnych kategorii objętości bloków.



Rys. 2. Procent bloków zakotwionych dla dwóch schematów kotwienia i dwóch kategorii objętości bloków

TABELA 3

Podsumowanie statystyk bloków niestatecznych dla różnych schematów kotwienia w trzech kategoriach objętości bloków

Odcinek tunelu	Rozstaw kotew	Średnia liczba bloków niestatecznych na 100 m tunelu w trzech kategoriach objętości		
		0–0,22 m³	0,22–6,0 m³	> 6,00 m³
NA 7–13	bez kotew	54,7	21,8	0,64
	2,13 m (7ft)	52,7	12,8	0,10
	1,52 m (5ft)	51,8	11,0	0,01
NA 13–45	bez kotew	81,7	40,3	2,84
	2,13 m (7ft)	77,6	22,0	0,23
	1,52 m (5ft)	76,4	19,9	0,16

TABELA 3 cd.

Odcinek tunelu	Rozstaw kotew	Średnia liczba bloków niestatecznych na 100 m tunelu w trzech kategoriach objętości		
		0–0,22 m ³	0,22–6,0 m ³	> 6,00 m ³
NA 45–62	bez kotew	53,2	21,4	0,60
	2,13 m (7ft)	51,5	12,9	0,05
	1,52 m (5ft)	50,7	10,9	0,03
NA 62–114	bez kotew	75,2	33,3	1,38
	2,13 m (7ft)	72,2	18,0	0,07
	1,52 m (5ft)	71,3	15,9	0,02
NA 114–154	bez kotew	81,0	37,4	1,87
	2,13 m (7ft)	77,5	20,8	0,11
	1,52 m (5ft)	76,0	18,8	0,06
NA 154–192	bez kotew	68,7	29,3	0,99
	2,13 m (7ft)	66,3	16,2	0,01
	1,52 m (5ft)	65,5	13,5	0,01
NA 192–205	bez kotew	39,8	18,2	0,95
	2,13 m (7ft)	37,9	10,3	0,08
	1,52 m (5ft)	37,5	9,0	0,05
NA 205–241	bez kotew	72,9	31,9	1,11
	2,13 m (7ft)	70,1	17,6	0,06
	1,52 m (5ft)	69,1	15,1	0,04
CC 7–17	bez kotew	41,6	18,6	1,10
	2,13 m (7ft)	39,9	10,6	0,12
	1,52 m (5ft)	39,1	9,5	0,07
CC 17–46	bez kotew	56,8	22,4	0,52
	2,13 m (7ft)	55,4	14,1	0,04
	1,52 m (5ft)	54,5	11,9	0,04
CC 46–126	bez kotew	51,3	21,3	0,83
	2,13 m (7ft)	49,2	13,5	0,16
	1,52 m (5ft)	48,6	12,1	0,11
CC 126–187	bez kotew	57,2	22,1	0,61
	2,13 m (7ft)	55,7	14,0	0,03
	1,52 m (5ft)	54,8	11,6	0,02
CC 187–216	bez kotew	68,1	34,3	2,24
	2,13 m (7ft)	64,5	18,9	0,27
	1,52 m (5ft)	63,5	16,5	0,15
TC 10–17	bez kotew	81,7	40,3	2,84
	2,13 m (7ft)	77,6	22,0	0,23
	1,52 m (5ft)	76,4	19,9	0,16

Dla oceny stanu zabezpieczenia tunelu kotwami i wydania rekomendacji co do możliwości zastąpienia schematu kotwienia A (z rozstawem 1,52 m) schematem B (z rozstawem 2,13 m), wybrano 3 następujące miary stateczności:

- 1) Wielkość strefy niestatecznej 0,001 na konturowym wykresie prawdopodobieństwa niestateczności.
- 2) Średnia liczba bloków dużych, o objętości powyżej 6 m^3 .
- 3) Średnia liczba bloków średnich, o objętości pomiędzy $0,22 \text{ m}^3$ i 6 m^3 .

Z zastosowaniem tych 3 statystyk sformułowano odpowiednio 3 kryteria akceptacji schematu kotwienia B:

Kryterium 1. Jest oparte na wielkość pola strefy niestatecznej 0,001 na konturowym wykresie prawdopodobieństwa niestateczności, tzn. powierzchni ograniczonej konturem 0,001 na tym wykresie. Pole strefy niestatecznej 0,001 to dla schematu kotwienia A mieści się w zakresie od $6,1 \text{ m}^2$ do $14,0 \text{ m}^2$. Schemat kotwienia A został uznany za bezpieczny i zapewniający stateczność tunelu na dla wszystkich odcinków tunelu, dlatego wartość $14,0 \text{ m}^2$ można uznać za wartość bezpieczną w danych warunkach, również dla schematu kotwienia B. Przyjęto, że dla schematu kotwienia B (z rozstawem 2,13 m) progową wartością dopuszczalną jest wartość $14,0 \text{ m}^2$. Dla 13 z 14 odcinków tunelu kryterium to jest spełnione.

Kryterium 2. Średnia liczba dużych niestatecznych bloków (tj. bloków o objętości powyżej 6 m^3) na 100m tunelu dla schematu kotwienia A mieści się w zakresie od 0,01 do 0,16. Schemat kotwienia A został uznany za bezpieczny dla wszystkich odcinków tunelu, dlatego wartość 0,16 bloków/100 m można uznać za wartość bezpieczną w danych warunkach, również dla schematu kotwienia B. Przyjęto, że dla schematu kotwienia B (z rozstawem 2,13 m) progową wartością dopuszczalną jest wartość 0,16 bloków/100 m tunelu. Dla 11 z 14 odcinków tunelu kryterium to jest spełnione.

Kryterium 3. Średnia liczba niestatecznych bloków średniej objętości (tj. bloków o objętości w przedziale $0,22 \text{ m}^3$ do 6 m^3) na 100m tunelu dla schematu kotwienia A mieści się w zakresie od 9,0 do 19,9. Schemat kotwienia A został uznany za bezpieczny dla wszystkich odcinków tunelu, dlatego wartość 19,9 bloku/100 m można uznać za wartość bezpieczną w danych warunkach, również dla schematu kotwienia B. Przyjęto, że dla schematu kotwienia B (z rozstawem 2,13 m) progową wartością dopuszczalną jest wartość 19,9 bloku/100 m tunelu. Dla 11 z 14 odcinków tunelu kryterium to jest spełnione.

Przyjęto, że na danym odcinku tunelu można zaakceptować zmianę schematu kotwienia, jeżeli wszystkie trzy kryteria cząstkowe są spełnione. Dla tak przyjętych kryteriów, na podstawie wyników symulacji, zmianę schematu kotwienia można uznać za bezpieczną dla 10 z 14 odcinków tunelu.

6. Podsumowanie

W skałach mocnych z silnie rozwiniętymi sieciami nieciągłości wyodrebniającymi duże w stosunku do wymiarów wyrobiska bloki skalne, gdy stateczność wyrobiska zależy głównie od przemieszczeń tych bloków, inżynierskie klasyfikacje masywu skalnego są nieadekwatne.

Stateczność wyrobiska należy w takich warunkach badać poprzez analizę przemieszczeń bloków a obudowę i zabezpieczenia projektować tak, aby im przeciwdziałały. Mechaniczną naturę masywu skalnego o strukturze blokowej dobrze odwzorowuje teoria bloków oparta na analizie przemieszczalności i stateczności układu sztywnych bloków skalnych i prostym modelu fizycznym oraz zastosowane tutaj uogólnienie teorii bloków. Stochastyzacja tego modelu pozwala na naturalne uwzględnienie w modelach geomechanicznych silnie losowego charakteru rzeczywistych sieci nieciągłości i jego wpływu na mechaniczne zachowanie się nieciągłego masywu skalnego. Wpływ ten jest bardzo istotny dla warunków masywu o strukturze blokowej i stateczności wyrobisk w takich warunkach. Wydaje się, że metoda stochastycznej symulacji stateczności bloków (MSB) ma istotne zalety zarówno w stosunku do deterministycznych metod klasycznej teorii bloków jak i do jej innych probabilistycznych uogólnień.

Podziękowania

Dziękuję dr. Jackowi Stypułkowskiemu z firmy Hatch Mott MacDonald (obecnie MRCE) za jego udział w realizacji projektu.

LITERATURA

- [1] *Bieniawski Z.T.*: Design Methodology in Rock Engineering. Balkema, Rotterdam, 1992
- [2] *Chan L.J.*: Application of block theory and simulation techniques to optimum design of rock excavations. PhD. Univ. of California, Berkeley, 1987
- [3] *Goodman R.E., Shi G.H.*: Block Theory and Its Application to Rock Engineering. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985
- [4] *Hatzor Y.H.*: The Block Failure Likelihood: A Contribution to Rock Engineering in Blocky Rock Masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 30(7), 1993, pp. 1591–1597
- [5] *Hoek E.*: Practical Rock Engineering. Rockscience, 2007
- [6] *Hoek E., Brown E.T.*: Underground Excavations in Rock. Institution of Mining & Metal. London, 1980
- [7] *Hoerger S.F.*: Probabilistic and Deterministic Key Block Analyses for Excavation Design. Praca doktorska. Michigan Technological University, Houghton, MI, 1988
- [8] *Jakubowski J.*: Określanie obciążenia obudowy wyrobisk w górotworze o strukturze blokowej z zastosowaniem metod statystycznych. Rozprawa doktorska, Wydział Górniczy, AGH, Kraków, 1995
- [9] *Jakubowski J.*: Statistical Simulation of 3D Blocky Structure — a Guide for Tunnel Design in Jointed Rock. Rock Mechanics a Challenge for Society, A.A. Balkema Publ, 2001
- [10] *Jakubowski J.*: 3DEC Modeling Results Generalized by Stochastic Approach. Numerical Modeling of Discrete Materials in Geotechnical Engineering. Civil Engineering & Earth Sciences. Proceedings 1st International UDEC/3DEC Symposium, Itasca. Bochum, 2004
- [11] *Jakubowski J.*: Stochastyczna symulacja stateczności wyrobisk w nieciągłym masywie skalnym. Seria Rozprawy, Monografie, Wydawnictwa AGH, Kraków, 2010
- [12] *Jakubowski J., Stypulkowski J.*: Atlanta West Area CSO, Geomechanical Design Report. Atlanta, 2005, (niepublikowane)
- [13] *Jing L., Hudson J.A.*: Numerical Methods in Rock Mechanics. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 39, 2002, pp. 409–427

- [14] *Jing L., Stephansson O.*: Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering. Theory and applications. Elsevier, 2007
- [15] *Kidybiński A.*: Podstawy geotechniki kopalnianej. Wydawnictwo „Śląsk” Katowice, 1982
- [16] *Liszkowski J., Stochlak J.*: Szczelinowatość masywów skalnych. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 1977
- [17] *Mauldon M.*: Relative Probabilities on Joint Intersections. Proceedings of 33rd US Rock Mechanics Symposium, Balkema, 1992
- [18] *McCullagh P., Lang P.*: Stochastic Models for Rock Instability in Tunnels. The Journal of the Royal Statistical Society, Series B. 46(2), 1984, pp. 344–352
- [19] *Pinińska J.*: Metodologia projektowania w geoinżynierii skalnej — rozważania na tle poglądów Z.T. Bieniawskiego. Geotechnika w Budownictwie i Górnictwie, OWPW, Wrocław, 2003
- [20] *Song J.J., Lee C.I., Seto M.*: Stability Analysis of Rock Blocks Around a Tunnel Using a Statistical Joint Modeling Technique. Tunnelling and Underground Space Technology 16, 2001, pp. 341–351
- [21] *Warburton P.M.*: Vector Stability Analysis of an Arbitrary Polyhedral Block with any Number of Free Faces. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 18, 1981