

*Jacek Jakubowski**, *Jacek Stypulkowski***

ANALIZA WARUNKÓW STATECZNOŚCI TUNELU W MASYWIE SKALNYM O STRUKTURZE BLOKOWEJ DLA SYTUACJI TUNELU METRA W NOWYM JORKU (REJON MANHATTAN)

1. Wprowadzenie

Własności mechaniczne nieciągłego masywu skalnego o strukturze blokowej zależą od geometrycznych cech nieciągłości, takich jak orientacja, zasięg, odstępy, przestrzenna lokalizacja. Te cechy mają wysoce stochastyczny charakter i mają kluczowe znaczenie dla stateczności wyrobiska podziemnego w masywie skalnym o strukturze blokowej. Opis statystyczny, uwzględniający czynnik niepewności, jest w praktyce jedynym możliwym ilościowym opisem tych własności. Wyniki modelowania deterministycznego blokowego masywu skalnego dotyczą tylko dokładnie określonego w danych wejściowych, niepowtarzalnego układu powierzchni nieciągłości, nie mogą być zatem uogólniane. Uwzględniając powyższe uwagi, wydaje się, że metodami odpowiednimi do modelowania masywu skalnego o strukturze blokowej są metody oparte na symulacji stochastycznej nieciągłości i struktury bloków skalnych, wykorzystujące dane wejściowe w postaci statystycznego opisu systemu nieciągłości. Taką metodą jest Metoda Symulacji Bloków (MSB) [6].

2. Metoda Symulacji Bloków (MSB)

Algorytm metody MSB opiera się na ogólnym schemacie prób statystycznych Monte-Carlo i składa się z kilku etapów wielokrotnie powtarzanych.

Etap pierwszy, wstępny, to etap zbierania i opracowywania kartowań i innych pomiarów geologicznych.

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Mueser Rutledge Consulting Engineers, New York

Drugi etap to określenie na tej podstawie wartości parametrów statystycznego modelu systemu nieciągłości [1, 5, 9, 10, 11].

Trzecim etapem ogólnego algorytmu jest generacja systemu nieciągłości wokół modelowanego odcinka wyrobiska. Nieciągłości są generowane tak, aby statystycznie odwzorowywały rzeczywistą sytuację wokół rozpatrywanego wyrobiska, czyli zgodnie z rozkładami prawdopodobieństwa określonymi na podstawie obserwacji geologicznych. Wygenerowane płaszczyzny nieciągłości tworzą wokół modelowanego odcinka tunelu bloki.

W czwartym etapie dla wygenerowanej struktury nieciągłości i bloków przeprowadzana jest analiza stateczności oparta na koncepcji bloków kluczowych i analizie stanów granicznych [4, 6, 12].

Piąty etap to zbieranie wyników analizy deterministycznej, opracowywanie ich pod kątem dalszej analizy statystycznej.

Etapy drugi, trzeci, czwarty i piąty są powtarzane wielokrotnie, zgodnie z ogólnym schematem metody Monte-Carlo.

Szósty etap polega na zebraniu, uporządkowaniu i opracowaniu statystycznym informacji uzyskanych we wszystkich pojedynczych cyklach symulacyjnych. Zebrane wartości tworzą próbę i podstawę analizy statystycznej.

W kolejnym etapie wyniki wielokrotnej symulacji opracowywane są do postaci użytecznej dla określania stateczności wyrobisk, dla projektowania i doboru obudowy. Podczas symulacji kontrolowany jest jej przebieg. Badane są kryteria wskazujące, czy liczba przeprowadzonych symulacji jest wystarczająca. Podstawowe kryterium oparte jest na dokładności estymacji. Sprawdzane są wyniki pośrednie, np. poprawność generacji zmiennych losowych.

3. Warunki geologiczne w rejonie stacji Manhattan i przyjęty statystyczny model systemu nieciągłości

W rejonie Manhattan występują mocne skały metamorficzne (kwarcyty, miki, łupki) z foliacją i dobrze rozwiniętą siecią spękań o powierzchniach planarnych lub nieco falistych, zgrupowaną w 3 lub 4 głównych zespołach nieciągłości o podobnej orientacji, budowie i pochodzeniu. Występują też dwa zespoły stref ścinania tworzących powierzchnie osłabienia, jeden zespół o orientacji zgodnej z foliacją, drugi o orientacji poprzecznej.

W tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry przyjętego statystycznego modelu nieciągłości dla tunelu w rejonie Manhattan. Ze względu na brak wskazówek co do rozkładu prawdopodobieństwa orientacji nieciągłości, przyjęto rozkład Bingham.

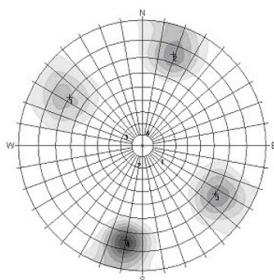
Na rysunku 1 pokazano orientacje zespołów nieciągłości dla rejonu Manhattan na siatce Schmidta. Orientacja dwóch zespołów powierzchni osłabienia (stref ścinania) pokrywa się z orientacją zespołów spękań. Mają one poza tym małą licznosc — dlatego na rysunku 1 widać tylko cztery skupienia, a nie sześć.

Na rysunku 2 przedstawiono blok skalny podobny do tych obserwowanych najczęściej w stropie tunelu w rejonie Manhattan.

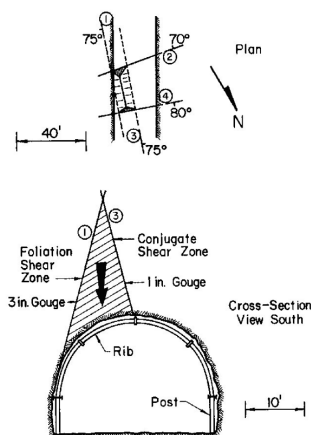
TABELA 1

Parametry przyjętego statystycznego modelu nieciągłości dla warunków w rejonie stacji Manhattan

	Zespoły nieciągłości (6 zespołów)	Średni odstęp m	Średni zasięg m	Kąt tarcia deg	Orientacja zespołu nieciągłości	
					Kierunek średni zespołu deg/deg	Parametry rozproszenia r. Bingham $\zeta_1 = \zeta_2$
(1)	Foliacja	0,6	15,3	35	123,5/70	-14,0
(2)	Spękania	0,9	6,1	35	199/75	-20,0
(3)	Spękania poprzeczne do foliacji	1,5	4,6	35	303,5/70	-20,0
(4)	Spękania	1,5	4,6	35	10/75	-35,0
(5)	Powierzchnie osłabienia (strefy ścinania) zgodne z orientacją foliacji	61,0	91,5	5	123,5/70	-14,0
(6)	Powierzchnie osłabienia (strefy ścinania) poprzeczne do foliacji	152,4	91,5	5	303,5/70	-20,0



Rys. 1. Statystyczny model nieciągłości dla warunków rejonu Manhattan. Zespoły nieciągłości na siatce Schmidta

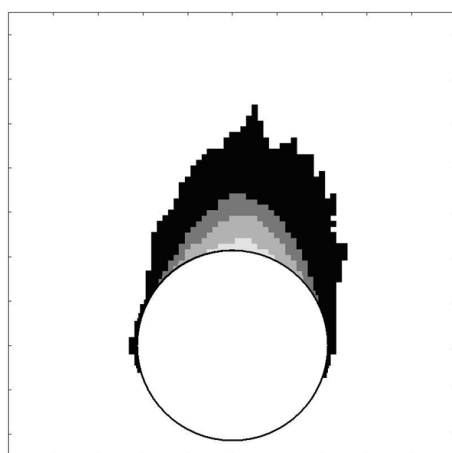


Rys. 2. Typowy blok niestateczny obserwowany w stropie w rejonie Manhattan [1]

4. Obliczenia numeryczne

Przeprowadzono trzy serie symulacji z zastosowaniem programu MSB dla danych, odpowiadające warunkom geologicznym tunelu metra w rejonie stacji Manhattan i odpowiadającego tym danym przyjętego statystycznego modelu systemu nieciągłości.

Seria podstawowa A. Kierunek osi tunelu (N30°E) zgodny z rzeczywistym kierunkiem, tunel niepodparty o przekroju kołowym i średnicy 8,5 m. Seria obejmowała 112 pojedynczych cykli. W każdym cyklu modelowano 100-metrowy odcinek tunelu (rys. 3, tab. 2).



Rys. 3. Mapa prawdopodobieństwa niestateczności [6, 7]. Seria A

TABELA 2

Statystyki bloków niestatecznych. Seria A

Kategoria objętości, m ³	Średnia objętość bloków, m ³	Liczba bloków na 1000 m
< 0,22	0,03	965,6
0,22÷6	1,47	379
> 6	26,27	100
wszystkie	2,23	1444,6

Seria B. Kierunek osi tunelu (N15°W) obrócony o 45° w stosunku do kierunku modelowanego w serii A, tunel niepodparty o przekroju kołowym i średnicy 8,5 m. Seria symulacji składała się ze 150 pojedynczych cykli, w każdym cyklu modelowano 100 metrowy odcinek nieobudowanego tunelu dla warunków geologicznych rejonu Manhattan.

Seria C. Kierunek osi tunelu (N30°E) zgodny z kierunkiem w serii A. Tunel w obudowie kotwowej: rozstaw kotew 1,5 m, długość kotew 4,0 m, nośność kotew 200 kN.

Wyniki przedstawiono w postaci map prawdopodobieństwa niestateczności [6, 7] oraz statystyki bloków niestatecznych, które sporządzono z podziałem na w cztery kategorie: bloki duże o objętości powyżej 6 m^3 (216 ft^3), średnie $0,22$ do 6 m^3 i małe poniżej $0,22 \text{ m}^3$ (8 ft^3). Przedstawione statystyki obejmują średnią objętość i liczbę bloków niestatecznych na 1000 m tunelu w każdej kategorii.

5. Wyniki analizy warunków stateczności tunelu nieobudowanego (seria A)

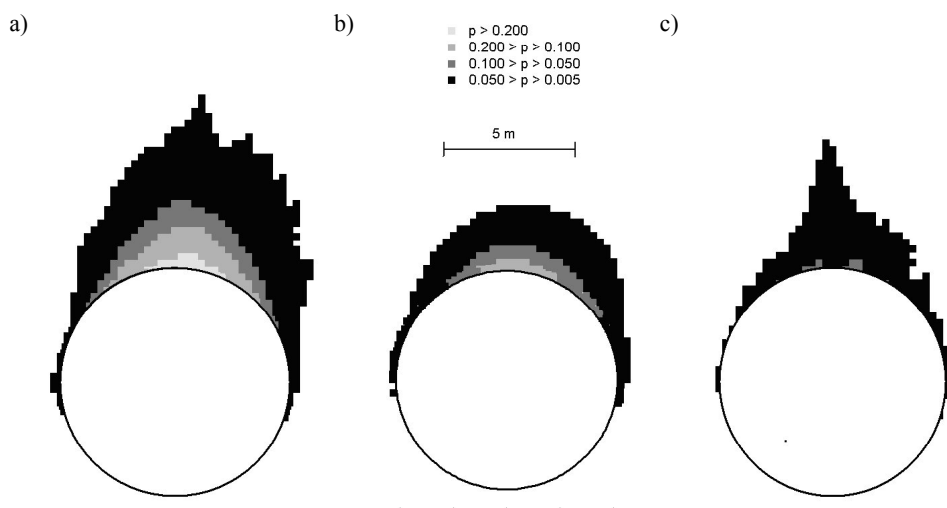
W wynikach symulacji wyraźnie widać duży wpływ powierzchni osłabienia (stref ścinania) na występowanie dużych bloków. Bardzo duże bloki w znacznej liczbie są tworzone z udziałem powierzchni osłabienia. Liczba powierzchni osłabienia w modelu (zespoły nieciągłości 5 i 6) jest bardzo mała. Stanowią one zaledwie około $0,3\%$ liczby wszystkich nieciągłości, ale mają duży zasięg i niskie parametry wytrzymałościowe i zapewne dlatego znaczny procent dużych bloków jest tworzonych z udziałem powierzchni osłabienia. Dla porównania, wpływ zespołu spękań 3 jest zupełnie inny. Jego płaszczyzny stanowią około 5% wszystkich płaszczyzn, z ich udziałem powstaje bardzo mało dużych bloków i bardzo dużo małych bloków.

Obserwacje Cordinga i Mahara [1] wskazują, że powierzchnie osłabienia (strefy ścinania) mają duży wpływ na zachowanie masywu skalnego w rejonie Manhattan i wiele najgroźniejszych bloków i klinów skalnych jest tworzonych albo przez same powierzchnie osłabienia, albo przez powierzchnie osłabienia razem ze spękaniami innych zespołów, przy czym przemieszczenie do wewnątrz wyrobiska następuje najczęściej po płaszczyźnie stref ścinania, natomiast odspojenie wzdłuż spękań. To zrozumiałe, bo powierzchnie osłabienia charakteryzują się małymi oporami stycznymi, znacznie mniejszymi niż spękania. Takie rzeczywiste zachowanie bloków skalnych wokół tunelu obserwowane i udokumentowane przez Cordinga i Mahara jest wiernie oddane przez wyniki modelowania.

6. Wyniki analizy warunków stateczności tunelu nieobudowanego przy innej orientacji osi tunelu (seria B)

Zarówno z obserwacji Cordinga i Mahara [1], jak i z wyników poprzedniej serii obliczeń wynika, że dla danych z rejonu Manhattan szczególnie wiele dużych bloków tworzy się wzdłuż osi wyrobiska, ponieważ dwa zespoły spękań i dwa zespoły powierzchni osłabienia mają rozciągłość w przybliżeniu równoległą do osi wyrobiska. Interesująca jest odpowiedź na pytanie, jak w takim wypadku przedstawiałaby się liczba bloków i zasięg stref niestatecznych, gdyby oś wyrobiska miała inny kierunek. W tym celu przeprowadzono serię symulacji dla danych geologicznych dokładnie takich samych jak w serii A, ale dla osi tunelu obróconej o 45° w stosunku do orientacji pierwotnej.

Na rysunku 4a i b zestawiono obok siebie mapy prawdopodobieństwa niestateczności odpowiednio dla kierunku pierwotnego N30°E (seria A) i obróconego N15°W (seria B).



Rys. 4. Mapy prawdopodobieństwa niestateczności [6, 7]: a) tunel nieobudowany, pierwotny kierunek osi tunelu; b) tunel nieobudowany, oś tunelu obrócona o 45°; c) tunel w obudowie kotwowej, pierwotny kierunek osi tunelu

W tabeli 3 zestawiono średnią objętość i liczbę bloków niestatecznych na 1000 m tunelu w każdej kategorii objętości.

TABELA 3

Statystyk bloków niestatecznych dla trzech serii symulacji

Tunel nieobudowany, pierwotny kierunek osi tunelu			Tunel nieobudowany, oś tunelu obrócona o 45°			Tunel w obudowie kotwowej, pierwotny kierunek osi tunelu		
Kategoria objętości m ³	Średnia objętość bloków m ³	Liczba bloków na 1000 m	Kategoria objętości m ³	Średnia objętość bloków m ³	Liczba bloków na 1000 m	Kategoria objętości m ³	Średnia objętość bloków m ³	Liczba bloków na 1000 m
< 0,22	0,03	966	< 0,22	0,03	1531	< 0,22	0,03	950
0,22÷6,0	1,47	379	0,22÷6,0	1,47	378	0,22÷6,0	0,84	168
> 6,0	26,27	100	> 6,0	26,27	33,0	> 6,0	60,4	4,3
wszystkie	2,23	1445	wszystkie	2,23	1942	wszystkie	0,38	1122

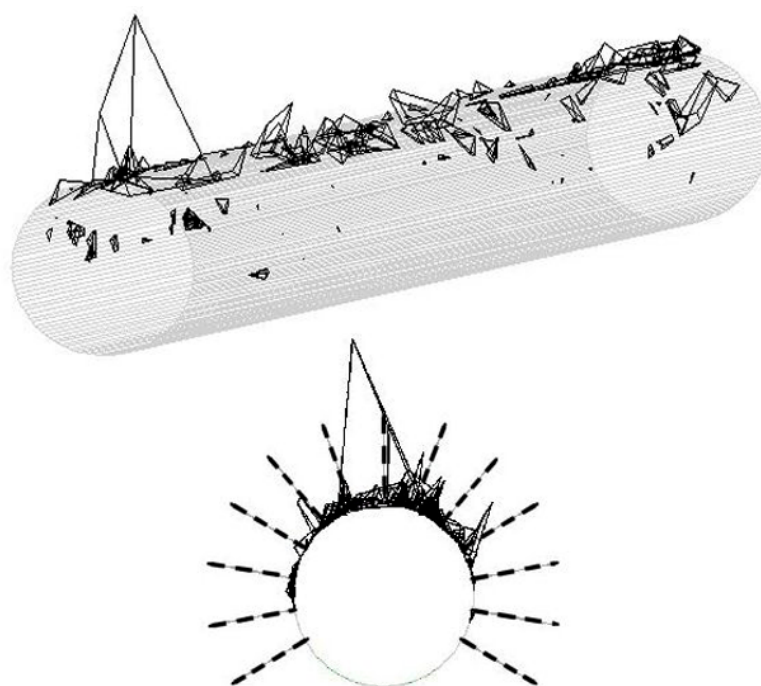
Wyniki dla kierunku prowadzenia tunelu, obróconego o 45° , są zupełnie inne niż dla kierunku pierwotnego. Sama zmiana kierunku prowadzenia tunelu przy niezmiennych wszystkich innych parametrach modelu, w tym konkretnym przypadku, diametralnie zmienia liczbę i objętości niestatecznych bloków skalnych, warunki stateczności tunelu i potencjalne obciążenie obudowy. Zasięg każdej strefy niestatecznej jest mniejszy 2–3-krotnie (rysunek 4A i 4B). Nie ma strefy o największym prawdopodobieństwie niestateczności. Okazuje się, że liczba wszystkich bloków niestatecznych jest dla tunelu obróconego większa (!), ale przeciętnie są one mniejsze. Jak widać w tabeli 3, bloków bardzo dużych jest znacznie mniej niż dla pierwotnej orientacji tunelu. W sumie zarówno z mapy niestateczności, jak i ze statystyk bloków niestatecznych wynika, że dla tunelu o zmienionym kierunku osi warunki stateczności są korzystniejsze i wymagania co do obudowy znacznie mniejsze. Powodem tych różnic jest z pewnością specyficzny, niekorzystny w przypadku pierwotnego kierunku osi tunelu układ orientacji zespołów nieciągłości. W modelu podstawowym (A) występuje bardzo wiele nieciągłości o rozciągłości mniej więcej równoległej do osi tunelu. Dodatkową niekorzystną okolicznością jest to, że są one przecięte nieciągłościami „rozciągniętymi” mniej więcej prostopadle do osi tunelu. Taki układ powoduje częste występowanie dużych, podłużnych niestatecznych bloków w stropie tunelu, wzdłuż jego osi (obserwowane w rzeczywistości i potwierdzone obliczeniami). Po obróceniu osi tunelu o 45° okazuje się, że sytuacja jest zupełnie inna i mimo wzrostu liczby wszystkich bloków skalnych warunki stateczności tunelu są znacznie lepsze.

7. Wyniki analizy warunków stateczności tunelu w obudowie kotwowej (seria C)

Dla warunków tunelu metra w rejonie Manhattan, przy tych samych parametrach statystycznego modelu systemu nieciągłości jak dla serii A, przeprowadzono symulację z uwzględnieniem obudowy kotwowej. Wykorzystano zaimplementowane w MSB elementy kotwowe z ograniczoną nośnością 200 kN. Dla sprawdzenia efektów kotwienia całej powierzchni ociosów i stropu zastosowano regularny schemat rozmieszczenia kotew z rozstawem kotew 1,5 m i długością kotew 4 m.

Na rysunku 4 zestawiono mapę prawdopodobieństwa dla tunelu bez obudowy (rys. 4a) i tunelu w obudowie kotwowej (rys. 4c). W tabeli 3 zestawiono statystyki objętości bloków dla obu serii obliczeń. Widać, że kotwienie nie spowodowało znacznego spadku liczby wszystkich bloków niestatecznych. Liczba bloków małych jest nieznacznie mniejsza, liczba bloków średnich jest zdecydowanie mniejsza. Kotwienie spowodowało bardzo znaczną redukcję liczby bloków dużych, bo o ponad 95%. Dlaczego liczba bloków dużych nie spadła do zera, wyjaśnia rysunek 5, na którym pokazano przekrój poprzeczny tunelu z zaznaczonym schematem kotwienia i blokami niestatecznymi wokół jednego, przykładowego 100 m modelowanego odcinka tunelu. Jest to przykład odcinka z dużym, niestatecznym blokiem. Widać, że cała jedna linia kotew mieści się w tym dużym bloku. Pozostałe kotwy działające na ten duży blok nie zabezpieczają wystarczająco jego stateczności.

Z porównania map prawdopodobieństwa niestateczności widać, że zastosowanie kotew spowodowało znaczną poprawę warunków stateczności. Występowanie dużych bloków jest bardzo mało prawdopodobne, a przypadek pokazany na rysunku 5 sugeruje, że wydłużenie kotew, zastosowanie kotew o większej nośności lub zmiana schematu kotwienia (przesunięcie co drugiej linii kotew) spowoduje zapewne dalszą poprawę warunków stateczności i obniży prawdopodobieństwo występowania dużych niestatecznych bloków wokół przekroju tunelu. Wyniki modelowania tunelu w obudowie kotwowej zgadzają się z obserwacjami efektu kotwienia dla warunków tunelu metra w Nowym Jorku.



Rys. 5. Tunel w obudowie kotwowej. Po lewej przykład dużego, niestatecznego bloku. Po prawej odcinek 100 m tunelu w obudowie kotwowej, widok bez kotew, z widocznymi blokami niestatecznymi

8. Podsumowanie

Wyniki symulacji statystycznej z zastosowaniem metody MSB dla warunków tunelu metra w Nowym Jorku dobrze jakościowo zgadzają się z obserwacjami Cordinga i Mahara oraz z innymi obserwacjami i relacjami geologów i inżynierów. Metoda MSB jest narzędziem wspomagającym projektowanie tuneli w masywie skalnym o strukturze blokowej. Zarówno wyniki jakościowe, jak i ilościowe mogą być wykorzystane do celów projektowa-

nia tuneli prowadzonych w takich warunkach. Wyniki analiz o charakterze probabilistycznym mogą być transponowane na tradycyjne współczynniki bezpieczeństwa i na odwrót, współczynniki bezpieczeństwa mogą wyznaczać odpowiadające im kryteria prawdopodobieństwa.

LITERATURA

- [1] *Cording E.J., Mahar J.W.*: The Effect of Natural Geologic Discontinuities on Behavior of Rock in Tunnels. Rapid Excavation and Tunneling Conference, Las Vegas, Nevada 1974
- [2] EM 1110-2-2901, Engineer Manual. Engineering and Design, Tunnels and Shafts in Rock. US Army Corps of Engineers 1978
- [3] EM 1110-1-2907, Engineer Manual. Engineering and Design. Rock Reinforcement. US Army Corps of Engineers 1980
- [4] *Goodman R.E. Shi G.H.*: Block Theory and its application to Rock Engineering. Prentice Hall, Englewood Cliffs 1985
- [5] *Hudson J.A., Priest S.D.*: Discontinuities and Rock Mass Geometry. Int. J. Rock Mech. Min Sci & Geomech. Abstr., 16, 1979
- [6] *Jakubowski J.*: Prediction of the load of tunnel support in the rock mass of blocky structure by statistical methods, Praca doktorska, Kraków, AGH 1994
- [7] *Jakubowski J.*: Statistical simulation of 3D blocky structure — a guide for tunnel design in jointed rock. Rock Mechanics, A Challenge for Society, Proceedings of the ISRM Regional Symposium EUROCK 2001, Espoo, Finland, A.A.Balkema Publishers 2001
- [8] *Jakubowski J., Stypulkowski J.*: The effect of natural geologic discontinuities on behavior of rock in tunnels, revised W: Mining and tunnelling innovation and opportunity, pod red. R. Hammah, proceedings of the 17th Tunneling Association of Canada Conference and 5th North American Rock Mechanics Symposium, University of Toronto Press 2002
- [9] *Kulatilake P.H.S.W.*: Fracture characterization and network modelling. EUROCK 2001 Pre-Symposium Course, Espoo, Helsinki University of Technology 2001
- [10] *Lin D., Fairhurst C.*: Static analysis of the stability of three-dimensional blocky systems around excavations in Rock. Int. J. Rock Mech. Min Sci & Geomech. Abstr. 25, 1988
- [11] *Shanley R.J., Mahtab M.A.*: Delineation and analysis of clusters in orientation data. Mathematical Geology, 8, 1976
- [12] *Warburton P.M.*: Vector stability analysis of an arbitrary polyhedral block with any number of free faces. Int. J. Rock Mech. Min Sci & Geomech. Abstr., 18, 1981