

## WARUNKI STATECZNOŚCI ŚCIAN W KAMIENIOŁOMIE GABRA „BRASZOWICE” NA TLE SZCZELINOWATOŚCI MASYWU

UKD 622.352.5'271.2:662.834:551.252'245:622.848(438 – 35 wałbrzyskie, kop. „Braszowice”)

W trakcie eksploatacji odkrywkowej skał zwięzłych może zachodzić zjawisko utraty stateczności przez ściany, zwłaszcza w następujących sytuacjach:

– ocios wyrobiska, przebiegający wzdłuż powierzchni określonego kierunku spękań, zostaje przecięty inną powierzchnią o mniejszym nachyleniu, zapadającą w kierunku wyrobiska,

– na ociosie występują strefy tektoniczne wyrażające się zbrekcowaniem skały lub silnym spękaniami,

– na ociosie ściany występują powierzchnie nieciągłości skierowane w stronę przeciwną, umożliwiające powstawanie stref przewieszonych.

Wskazuje to wyraźnie na ścisły związek stateczności ściany ze szczelinowatością oraz potrzebą dostosowania kierunku postępu robót do orientacji spękań (2, 5, 6). Ponadto, jak dowodzi praktyka górnicza, istnieje także zależność między szczelinowatością i usytuowaniem ściany eksploatacyjnej a udziałem brył ponadwymiarowych i prostoliniowym przebiegiem ściany (2, 3). Podstawowym problemem zmierzającym do wyboru orientacji ściany i kierunku postępu robót jest przyjęcie właściwego modelu masywu skalnego i przedstawienie go w postaci danych umożliwiających rozwiązanie zagadnienia stateczności ściany odkrywki i wyciągnięcie prawidłowych wniosków dotyczących technicznych parametrów eksploatacji.

W większości eksploatowanych surowców skalnych na Dolnym Śląsku, wyłączając eksploatację granitów (11), nie uwzględnia się nie tylko tektonicznego modelu masywu, ale nie sporządza się jakichkolwiek, nawet najprostszych, pomiarów tektonicznych. Pomiarów takich nie zawierają również odpowiednie dokumentacje geologiczne, nawet wówczas, gdy odsonięcie terenu pozwala na wykonanie badań. Sytuacja ta prowadzi do chaotycznej eksploatacji, często w kierunkach najmniej korzystnych, stwarzając niekiedy zagrożenie dla załóg górniczych. Problem ten sygnalizuje w swoich pracach S. Kozłowski (6, 7), podając przykłady zastosowania analizy spękań w górnictwie odkrywkowym.

W artykule podano przykład wykorzystania znajomości warunków geologicznych masywu skalnego oraz rozwiązań analitycznych w celu optymalizacji stateczności ścian i wyboru właściwego kierunku postępu robót górniczych. Jest on fragmentem szerszego opracowania, wykonanego na zlecenie Rejonu Eksploatacji Kamienia we Wrocławiu. Instytucja ta dostrzega wagę zagadnień bezpieczeństwa pracy skalników i podejmuje ją w działalności praktycznej.

### LOKALIZACJA I BUDOWA ZŁOŻA

Złoże gabra „Braszowice” występuje na przedpolu Sudetów środkowych w bezpośrednim sąsiedztwie głównego uskoku sudeckiego. Eksploatowana odkrywka znajduje się w rejonie gminy Ząbkowice Śląskie, w odległości 1 km na południe od miejscowości Braszowice na zachodnim zboczu wzgórza Bukowczyk.

Gabro jest fragmentem większej intruzji głębinowej, uważanej powszechnie za staropaleozoiczną lub – jak sądzi J. Oberc (8) – późnoprekambryjską. Gabro jest reprezentowane w odkrywce przez odmiany masywne, grubokrystaliczne. Tektonicznie masyw gabrowy jest silnie zaangażowany, co wyraża się w złożonym systemie różnokierunkowych spękań. Kontakt ze skałami ościennymi, głównie serpentynitami ma charakter dynamiczny, prowadzi do lokalnych przeobrażeń gabra w łupki amfibolowe. Stopień zwietrzenia masywu jest zmienny, intensywny w strefach tektonicznych oraz w części stropowej.

### SYSTEMY SPĘKAŃ MASYWU

W skałach gabrowych kamieniołomu „Braszowice” zarejestrowano bardzo zróżnicowany system spękań (tab., ryc. 1), zmienny jest także ich zasięg przestrzenny oraz gęstość występowania. Wynika to z obecności dużych i rozległych powierzchni nieciągłości, jak również sieci lokalnych, drobnych spękań. Nie rozstrzygając zagadnień genetycznych wydzielono tu trzy główne ich rodzaje.



Ryc. 1. Mapa spękań gabra w kamieniołomie „Braszowice”

1 – granica obszaru górniczego; 2 – kierunek eksploatacji bezpiecznej, 3 – ściany w kamieniołomie, 4 – izoliny wysokości

Najbardziej widoczne są pionowe lub bardzo stromo nachylone szczeliny o długości do kilkudziesięciu metrów, przecinające ściany odkrywki na całej wysokości. Są to pojedyncze szczeliny lub niekiedy strefy tektoniczne o szerokości od 5 do 60 cm. Wypełnienie szczelin stanowi zwietrzelina oraz inne składniki mineralne, jak kwarc, magnezyt, chloryt. System ten ma orientację WNN–ESE lub NW–SE i stanowi główny typ spękań w kamieniołomie. Rozstęp między poszczególnymi spękaniami lub strefami wynosi od 3 do 36 m.

Drugi charakterystyczny typ spękań odznacza się orientacją NE–SW oraz płaskimi kątami upadu w granicach 30–60° skierowanymi ku wschodowi, czyli w kierunku wyrobiska. Tego typu powierzchnie nieciągłości występują pojedynczo i zarejestrowano je na ścianach zachodnich kamieniołomu, gdzie zaznaczają się obecnością półek skalnych. Spękania tej grupy spełniają jeden z najważniejszych warunków utraty stateczności przez ścianę, a tworzące się półki stwarzają dodatkowe zagrożenie wywołane saltacją pojedynczych bloków skalnych.

Trzeci typ spękań stanowią różnokierunkowe powierzchnie nieciągłości o niewielkim i zmiennym zasięgu powodujące drobnoblokową podzielną gabra. Długość tych spękań dochodzi do 2–3 m i reprezentują one wszystkie kierunki, jakie zarejestrowano na diagramie w kamieniołomie (ryc. 1, 2).

Z punktu widzenia stateczności ściany szczególną uwagę zwraca fakt krzyżowania się pewnych zespołów spękań związanych z głównymi kierunkami. Dotyczy to głównie nieciągłości o orientacji WNW–ESE, NW–SE oraz NNE–SSW i NE–SW. Wymienione pary spękań krzyżują się pod kątem wynoszącym w przybliżeniu 20°, co

Fig. 1. Map of fractures in gabbro in the Braszowice quarry

1 – boundary of mining area, 2 – direction of safe exploitation, 3 – walls in the quarry, 4 – isolines of height

powoduje formowanie się charakterystycznych klinów skalnych i wypadanie ich z masywu.

Ilościowe ujęcie gęstości spękań jest w kamieniołomie „Braszowice” znacznie utrudnione, ze względu na zróżnicowanie kierunków oraz lokalne, bardzo istotne różnice w poszczególnych ścianach. Rozstaw spękań  $d$ , jak i szczelinowatość właściwa  $k$  wykazują wartości, które można określić przedziałem gęstości od niskiej do wysokiej według klasyfikacji jakościowej przyjętej powszechnie w górnictwie odkrywkowym.

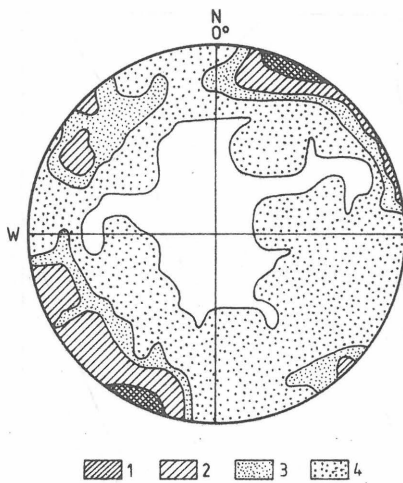
W poszczególnych ścianach rozstaw spękań wynosi od 0,226 do 0,75 m, natomiast w strefach tektonicznych może się obniżyć do wartości 0,07 m. Szczelinowatość właściwa waha się odpowiednio od 1,4 m<sup>-1</sup> do 4,5 m<sup>-1</sup> z przesunięciem w kierunku wartości 3 m<sup>-1</sup>, co odpowiada szczelinowatości średniej.

Wskaźniki te nie stanowią wartości stałych, zmieniają się one zarówno w poszczególnych ścianach, jak też w miarę postępu robót górniczych, podobnie jak się to obserwuje w masywach granitowych (11).

## STREFY ZRUSZENIA

Prowadzenie robót górniczych w skałach zwięzłych z zastosowaniem materiałów wybuchowych powoduje naruszenie ustalonego w procesach geologicznych stanu równowagi w masywie. Wyraża się to w przemieszczeniach i odkształceniach masywu, a także w tworzeniu stref zruszeń w zewnętrznych partiach ścian odkrywki (ryc. 3).

Pierwsza – to strefa intensywnego zruszenia z otwartymi pęknięciami i szczelinami, druga – to strefa niestabilizowana z rozwiniętymi mikroszczelinami o zmiennej



Ryc. 2. Diagram konturowy spekań

1 - ilość spekań > 3%, 2 - 1-3%, 3 - 0,5-1%, 4 - poniżej 0,5%

Fig. 2. Contour diagram of fractures

1 - number of fractures > 3%, 2 - 1-3%, 3 - 0.5-1%, 4 - below 0.5%

intensywności. Szczególną rolę w zachowaniu stateczności ściany zbudowanej ze skał zwięzłych odgrywa strefa pierwsza. Zasięg jej liczony od ostatniego rzędu otworów strzałowych wynosi (10):

$$r_z = k_c \sqrt[3]{Q}, \text{ m}$$

gdzie:  $k_c$  - współczynnik charakteryzujący ośrodek skalny,

$Q$  - masa ładunku MW, kg.

Współczynnik  $k_c$  można określić z zależności:

$$k_c = \left( \frac{0,36}{p_c} \right)^{\frac{2}{3}} \sqrt[3]{\frac{U_1 E_1^5}{\gamma}}$$

gdzie:  $p_c$  - maksymalne ciśnienie w ośrodku, kG/cm<sup>2</sup>,

$U_1$  - energia właściwa MW, kG/kg,

$E_1$  - moduł sprężystości ośrodka skalnego, kG/cm<sup>2</sup>,

$\gamma$  - gęstość ośrodka, kg/m<sup>3</sup>

Ze względu na duże trudności z wyznaczaniem parametrów  $p_c$  i  $E_1$  wartość współczynnika  $k_c$  określa się najczęściej doświadczalnie. Według badań W.W. Rzewskiego (10) dla skał zwięzłych wynosi on w granicach 1,0-1,2 dla otworu o średnicy 245 mm i 0,6-0,7 dla otworu o średnicy 155 mm.

W praktyce podaje się szerokość strefy intensywnego zruszenia i łączną szerokość obu stref. W świetle badań doświadczalnych (10) łączna szerokość stref zruszenia przed czołem ściany, wywołana przez roboty strzałowe, wynosi około stu średnic otworu strzałowego. Przyjmując techniczne warunki robót strzałowych w kamieniołomie „Braszowice” określono, że szerokość strefy intensywnego zruszenia wynosi 3,2 m, łączna szerokość obu stref wynosi około 10 m, czyli strefa niestabilizowana ma szerokość około 7 m. Poza tymi strefami istnieje w masywie skalnym obszar o strukturze z pierwotnym układem spekań i bloków skalnych.

#### ANALIZA WARUNKÓW STATECZNOŚCI ŚCIANY

Wykonane w masywie gabrowym „Braszowice” badania i obserwacje pozwalają określić model tego masywu jako blokowy. Składa się na to zarówno udział tektoniki, której intensywny rozwój wytworzył naturalne powierzch-

| Kierunek spekań        | WNW - ESE | NE - SW | NNW - SSE | NNE - SSW | W - E |
|------------------------|-----------|---------|-----------|-----------|-------|
| Położenie maksimum w ° | 295       | 45      | 345       | 25        | 85    |
| Udział spekań w %      | 57        | 13      | 12        | 10        | 8     |

nie osłabienia, jak i wpływ robót strzałowych. W rezultacie wzajemnego oddziaływania tych czynników oraz lokalnie znaczącym wpływie zwietrzienia i zawilgocenia stateczność niektórych ścian w kamieniołomie jest niewielka. Stwarza to poważne zagrożenie, głównie w ścianach zachodnich.

Do dalszych rozważań przyjęto średnią wysokość ściany dla kamieniołomu „Braszowice” około 30 m o nachyleniu 80°. Ścianę tę przecina dodatkowa powierzchnia nieciągłości o nachyleniu  $\alpha_1$ , biegnąca od spągu wyrobiska i zapadająca w kierunku wyrobiska (ryc. 3). Wytrzymałość na ścinanie na kontakcie szczeliny osłabiającej określa spójność  $c = 0$  oraz tarcie wyrażone współczynnikiem  $\text{tg } \rho_1 = \mu_1 = 0,6$ . Ponadto przyjęto, że wytrzymałość na ścinanie między poszczególnymi blokami wynosi odpowiednio  $c_2 = 0$  i  $\text{tg } \rho_2 = \mu_2 = 0,4$ . Oznacza to, że w przyjętym blokowym modelu masywu wytrzymałość na ścinanie między poszczególnymi blokami w niewralgicznej dla stateczności ściany strefie intensywnego zruszenia zapewniają tylko siły tarcia.

W dalszych rozważaniach nad statecznością takiego układu posłużono się metodą analizy stateczności pojedynczego, standardowego bloku skalnego usytuowanego na dwóch powierzchniach poślizgu  $\alpha_1$  oraz  $\alpha_2$  (ryc. 4). Rozpatrzono warunki równowagi dla bloku skalnego, które w stanie granicznym przyjmuje następującą postać:

$$\Sigma X = 0; \mu_2 V_B + V_A (\sin \theta + \mu_1 \cos \theta) - G \sin(\alpha_1 + \theta) - S = 0$$

$$\Sigma Y = 0; V_B + V_A (\cos \theta - \mu_1 \sin \theta) - G \cos(\alpha_1 + \theta) = 0$$

$$\Sigma M_A = 0; \frac{1}{2} G [b \cos(\alpha_1 + \theta) - a \sin(\alpha_1 + \theta)] -$$

$$- V_B \cdot b - S \cdot a = 0$$

gdzie:  $G$  - ciężar bloku

$S$  - siła działająca na blok wywołana ciężarem wyżej położonych bloków w rozpatrywanym paśmie  $S = mG(\sin \alpha_2 - \mu_2 \cos \alpha_2)$

$m$  - liczba bloków w danym paśmie

$a, b$  - wymiary bloku.

Na podstawie podanego zestawu równań można obliczyć reakcje  $V_A, V_B$  oraz minimalne nachylenie potencjalnej płaszczyzny poślizgu  $\alpha_1$ . Równania te pozwalają również wyznaczyć współczynnik stateczności bloku skalnego lub pasma bloków w odniesieniu do parametru ścinania  $\mu_{gr}/\mu_{ob1}$ . Według E.G. Gazijewa (4) współczynnik stateczności i tego pasma skalnego przyjmuje postać:

$$k_i = \frac{B_i}{A_i}$$

gdzie:

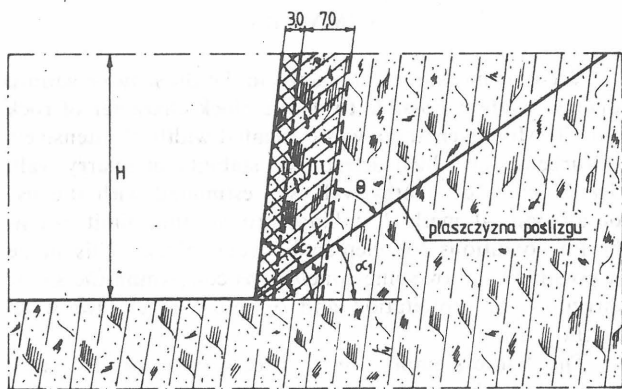
$$A_i = \sin \alpha_1 + 0,5 \sin \theta (\cos \alpha_2 - \lambda \sin \alpha_2) +$$

$$+ \frac{S_i}{G} (\cos \theta - \lambda \sin \theta)$$

$$B_i = \mu_1 \sin \alpha_1 - 0,5(\mu_1 - \mu_2) \cos \theta (\cos \alpha_2 - \lambda \sin \alpha_2) \cdot$$

$$\cdot \frac{S_i}{G} [\mu_1 \sin \theta + \lambda(\mu_1 - \mu_2) \cos \theta]$$

$$\frac{S_i}{G} = m_i (\sin \alpha_2 - \mu_2 \cos \alpha_2)$$



Ryc. 3. Strefy zruszenia w kamieniołomie gabra „Braszwice”

I – strefa intensywnego zruszenia, II – strefa niestabilizowana

Fig. 3. Disturbed zones in the Braszwice gabbo quarry

I – intensely disturbed zone, II – unstabilized zone

$$\lambda = \frac{a}{b}$$

$m_i$  – liczba bloków w paśmie nad dowolnym blokiem.

Na podstawie powyższych zależności można obliczyć stateczność zewnętrznej partii bloków skalnych w ścianie kamieniołomu dla poszczególnych wartości nachylenia ( $\alpha_1$ ) powierzchni poślizgu. Wykonano obliczenie dla dwóch wartości nachylenia powierzchni poślizgu  $\alpha_1 = 30^\circ$  oraz  $\alpha_1 = 45^\circ$ , dla których współczynnik stateczności wynosi odpowiednio  $k_{i30} = 1,95$  oraz  $k_{i45} = 0,80$ .

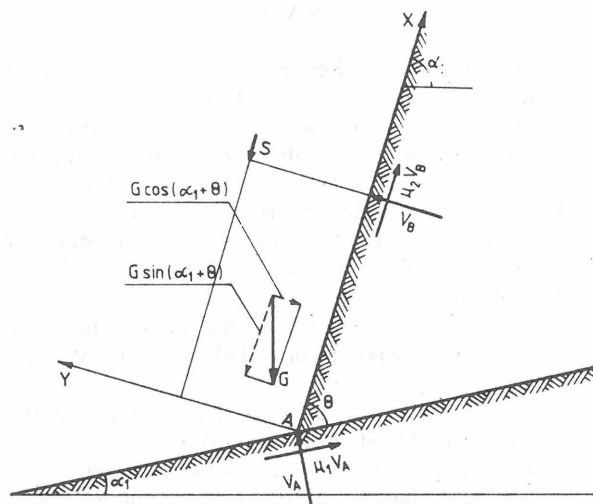
Oznacza to, że krytyczne nachylenie potencjalnej płaszczyny poślizgu wynosi około  $42^\circ$  dla ściany o wysokości około 30 metrów i nachyleniu  $80^\circ$ . Z rozwiązania tego wynikają wnioski praktyczne odnośnie do kierunku eksploatacji oraz innych technicznych parametrów górniczych.

## WNIOSKI

W odkrywkowych kopalniach skał zwięzłych warunki stateczności ścian oraz ich parametry eksploatacji są uzależnione od naturalnej szczelinowatości masywu i jego własności geomechanicznych. Dodatkowym czynnikiem obniżającym stateczność są roboty strzałowe powodujące zwiększenie bloczności, głównie w strefie intensywnego zruszenia.

Pomiary tektoniczne wykonane w kamieniołomie gabra „Braszwice” pozwoliły na określenie modelu ściany zbudowanej z bloków związanych siłami tarcia. W niekorzystnym wariantcie zachodzącym w ścianie zachodniej jest ona przecięta powierzchnią nieciągłości, zapadającą w kierunku wyrobiska. Dla takiej sytuacji dokonano rozwiązania analitycznego, wychodząc z warunków granicznej równowagi elementarnego bloku skalnego.

Warunki równowagi są spełnione wówczas, jeżeli ściana o wysokości 30 m i nachyleniu  $80^\circ$  zostanie przecięta powierzchnią nieciągłości o nachyleniu mniejszym niż  $42^\circ$  lub gdy w ścianie brak dodatkowej płaszczyny osłabienia. W praktyce oznacza to, że stateczność ściany gwarantująca bezpieczeństwo pracy będzie zachowana przy prowadzeniu robót górniczych z postępem w kierunku NE z azymutem w granicach  $15-45^\circ$ . Pozwoli to na odchylenie biegu ściany od głównego kierunku spękań w zależności od sytuacji górniczej, minimalizację brył nadwymiarowych



Ryc. 4. Schemat do obliczenia stateczności elementarnego bloku skalnego

Fig. 4. Scheme for calculations of stability of elementary rock block

w urobku oraz wyeliminowanie negatywnego wpływu powierzchni osłabienia o kierunku NE-SW i zapadających w kierunku wschodnim.

Niekorzystne warunki prowadzenia robót górniczych panują w zachodnich ścianach kamieniołomu ze względu na obecność pojedynczych powierzchni nieciągłości zapadających w kierunku wyrobiska. Ściany te, zwłaszcza w okresach jesiennym i wiosennym są zawilgocone, co również wydatnie wpływa na obniżenie stateczności.

W kamieniołomie gabra „Braszwice” w sytuacji gdy konieczne jest uruchomienie nowego frontu wybierania, należy bezwzględnie przestrzegać zasady bezpiecznego kierunku eksploatacji. Natomiast prace udostępniające front wybierania można prowadzić w innych, niekorzystnych kierunkach, ale przy założeniu znacznego obniżenia wysokości ściany i ograniczeniu zakresu robót do niezbędnego minimum.

Przeprowadzona analiza oraz liczne doświadczenie górnictwa odkrywkowego w wielu innych krajach wskazują na podstawowe znaczenie badań tektonicznych w opracowaniu modelu masywu skalnego. Dopiero na podstawie prostego i odpowiadającego rzeczywistości modelu masywu można stosować inne metody, w tym także analityczne, w celu określenia warunków stateczności ścian wyrobisk odkrywkowych.

Wskazane jest także zmodyfikowanie badań laboratoryjnych określających parametry mechaniczne skał. Podstawowe parametry ścinania – kohezja i kąt tarcia wewnętrzznego należałoby określać na dużych, naturalnych blokach zawierających odpowiednio zorientowane powierzchnie nieciągłości, albowiem jakość tych powierzchni warunkuje odpowiednie parametry mechaniczne (1, 5, 9). W obliczeniach zwłaszcza dla skał zwięzłych o znacznym stopniu spękania należy posługiwać się skorygowanymi parametrami mechanicznymi uwzględniającymi niejednorodność spękanego górotworu. Rozwiązując problemy związane z odkrywkową eksploatacją surowców skalnych należy sięgać także do niekonwencjonalnych rozwiązań z wykorzystaniem metod analitycznych i numerycznych, uwzględniając w szerszym niż dotychczas stopniu statystykę i analizę danych geologicznych. Rozwiązania te, zweryfikowane w praktyce, mogą stanowić istotny wkład w poprawę bezpieczeństwa pracy skalników oraz techniczną sprawność eksploatacji.

## LITERATURA

1. Barton N.R. — Review of a new shear strength criteria joints. Eng. Geol. 1973 vol. 7.
2. Gliński J. — Wpływ podzielności naturalnej złoża na usytuowanie frontu robót. Gór. Odkrywkowe 1969 nr 3.
3. Gliński J. — Metoda prognozowania efektów urabiania skał techniką strzałową w górnictwie odkrywkowym. Pr. Nauk. Inst. Górn. Politechn. Wrocław. 1974 Monografie 4.
4. Gazijew E.G. — Ustojczwość skalnych masiwów i metody ich zakreplenija. Izd. Strojzdat Moskwa 1977.
5. Hoek E., Pray J. — Rock slope engineering. Inst. of Min. and Metal. London 1981.
6. Kozłowski S. — Projektowanie eksploatacji kamienia budowlanego na podstawie znajomości spękań skał. Pr. Górn., 1959 nr 1–2.
7. Kozłowski S. — Metodyka badań surowców skalnych. Wyd. Geol. 1979.
8. Oberc J. — Podział geologiczny Sudetów. Pr. Inst. Geol. 1960 t. 30 cz. 2.
9. Patton F.D. — Multiple modes of shear failure in rock. Proc. 1 Congr. Int. Soc. Rock. Mech. Lisboa 1966 no. 1.
10. Rzewski W.W., Anistratow J.I., Jlin S.A. — Odkrytyje gornyje raboty w słożnych usłowijach. Izdat. Niedra Moskwa 1964.
11. Wójcik L. — Układ spękań w granitach strzelińskich i ich wpływ na właściwości ciosowe lub naruszenie stateczności ociosu kamieniołomu. Pr. Nauk. Inst. Geot. Pol. Wrocław. 1971 konferencje nr 11, 2.

## SUMMARY

Tectonic measurements, taken in the Braszowice gabbro quarry, made it possible to define block character of rock massif. Moreover, there was estimated width of intensively disturbed zone which determined stability of quarry wall. The stability of quarry wall was estimated with the use of analytical method, taking into account limit equilibrium conditions for elementary rock block. This made it possible to draw some conclusions concerning the safest directions of exploitation and optimum height for walls in the quarry.

The Authors emphasize the necessity to introduce new methods of laboratory studies and the need to use analytical and numerical methods for solving current problems in open-strip mining.

## РЕЗЮМЕ

В каменном карьере габбро „Брашовице” были проведены тектонические измерения; на их основании был определён блочный характер массива, а также ширина зоны интенсивного перемещения, решающей об устойчивости стены карьера. Аналитическим методом сделана оценка устойчивости стены, основанная на условиях предельного равновесия элементарного скального блока. Приведено практическое равновесие элементарного скального блока. Приведено практическое решение касающееся направления безопасной эксплуатации и высоты стены.

Авторы обращают внимание на необходимость применения новых методов лабораторных исследований, а также аналитических и численных методов в проблематике карьерного горного дела.