

Roman Łanocha

WPŁYW GŁĘBOKOŚCI POSADOWIENIA WYROBISKA NA KSZTAŁT ORAZ WIELKOŚĆ STREF ODSPOJONYCH

1. Wstęp

Górotwór nienaruszony robotami górnictwymi znajduje się w stanie równowagi pierwotnej. Skały od góry są obciążone ciężarem warstw nadległych, a możliwość ich odkształcenia bocznego jest ograniczona przez wzajemnie na siebie wywierane oddziaływania. Skały w tym stanie charakteryzują się dużą wytrzymałością. Z chwilą wykonania wyłomu z przestrzeni prowadzonego wyrobiska zostaje usunięta skała, będąca naturalnym elementem utrzymującym tę równowagę. Wokół wykonanego wyłomu powstaje nowy układ naprężeń. Wielkość dotychczasowego obciążenia ulega zmianie, wskutek czego skały odkształcają się.

Skały kruche, charakteryzujące się dużo większą wytrzymałością na ściskanie od wytrzymałości na rozciąganie, już przy stosunkowo niewielkim odkształceniu ulegają rozpadowi na drobne elementy, a znajdujące się pod wpływem wysokich ciśnień — tapaniu. Natomiast skały plastyczne, które w przeciwieństwie do skał kruchych, wykazują się większą od nich wytrzymałością na rozciąganie, a niższą na ściskanie, pod wpływem obciążeń odkształcają się trwale w kierunku płaszczyzny odsłonięcia, starając się zacisnąć wyrobisko. Zdecydowana jednak większość skał nie charakteryzuje się nadmierną kruchością ani plastycznością, a ulega destrukcji po przekroczeniu ich wytrzymałości przez naprężenie krytyczne, najczęściej przez poślizg wzdłuż płaszczyzny zniszczenia. Zniszczenie to może nastąpić natychmiast po wykonaniu wyłomu lub z opóźnieniem, gdyż skały posiadają właściwości lepkie i pod wpływem obciążenia z czasem tracą swoją pierwotną wytrzymałość.

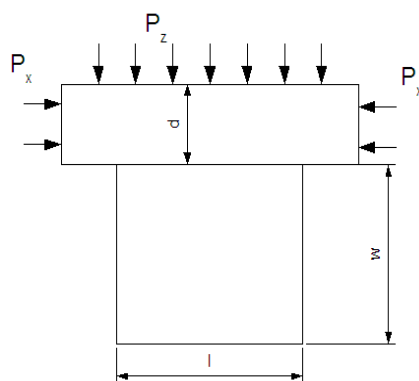
2. Krytyczna rozpiętość stropu

Skały poza szeregiem specyficznych cech charakteryzują się występowaniem w nich płaszczyzn podzielności pierwotnej, które zazwyczaj są utajone. Stają się widoczne gołym okiem dopiero po ich zniszczeniu. Cechą tą wyróżniają się specjalnie skały osadowe, w których najczęściej w naszym kraju są prowadzone roboty. Powierzchnie te tworzą się jako

naturalne granice kolejnych procesów sedymentacyjnych związanych ze zmianami klimatycznymi w przeszłości. Na podzielność specjalnie narażone są warstwy, między którymi występują cienkie warstewki o minimalnym oporze na ścinanie oraz niskim współczynniku tarcia wewnętrznego.

Po wykonaniu wyłomu, o płaskim stropie w warstwach zalegających poziomo, pod wpływem deformacji może dojść do ich wzajemnego odspojenia. Odspojona pojedyncza warstwa lub pakiet cienkich warstw narażona jest na zniszczenie na skutek działania na nią obciążenia pionowego ciężarem własnym i ciężarem warstw nadległych oraz obciążenia poziomego od nacisków bocznych.

W miarę poszerzenia wyrobiska odspojona warstwa zaczyna się zachowywać jak płyta sprężysta, dwustronnie utwierdzona i obciążona ciężarem równomiernie rozłożonym (rys. 1). Uwzględniając fakt, że moment zginający osiąga swoją maksymalną wartość nad podpórami, którymi są ociosy, należy się spodziewać pęknięcia płyty w tych miejscach. Pęknięcia te są niewidoczne od dołu, ponieważ powstają w jej górnej niewidocznej płaszczyźnie.



Rys. 1. Wyrobisko ze statycznym płaskim stropem

Można założyć, że płyta po pęknięciu zachowuje się jak belka swobodnie podparta, w której występują następujące maksymalne naprężenia rozciągające:

$$\sigma_0 = 0,75 \frac{pl^2}{d^2} - p_x,$$

gdzie:

- σ_0 — maksymalne naprężenie rozciągające,
- d — grubość odspojonej warstwy,
- l — rozpiętość odspojonej warstwy,
- p — ciśnienie pionowe,
- p_x — ciśnienie boczne.

Krytyczna rozpiętość stropu zależy od grubości i wytrzymałości odspojonej warstwy oraz głębokości posadowienia wyrobiska. Wytrzymałość skał nie jest stała, lecz rośnie z głębokością w różnym stopniu, w zależności od ich rodzaju. Wzrost wytrzymałości piaskowców jest znaczny, łupków natomiast niewielki. Wiele typów węgla natomiast charakteryzuje się spadkiem wytrzymałości z głębokością zalegania.

Co do ciśnienia bocznego, to rośnie ono z głębokością od zera, by na dużych głębokościach osiągnąć wielkość litostatyczną. Ciśnienie to na małych głębokościach spełnia bardzo korzystną rolę, utrzymując warstwę i przeciwdziałając pękaniu jej w dolnej płaszczyźnie. Jednak z głębokością wzrasta jego wielkość, powodując wzrost naprężeń ściskających w górnej płaszczyźnie warstwy. Szczególnie szkodliwy jest jego wpływ na dużych głębokościach w warstwie o dużej rozpiętości i małej grubości. W przypadku natomiast warstw o małej rozpiętości i znacznej grubości może dochodzić nie do ich pękania w dolnej płaszczyźnie, a do zniszczenia ich w górnej płaszczyźnie na skutek przekroczenia naprężeń ściskających.

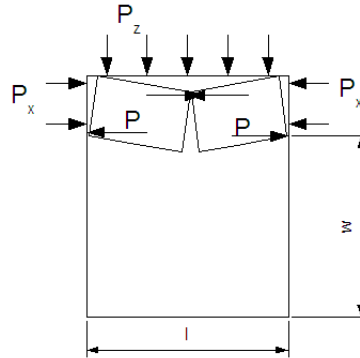
3. Zawałowa rozpiętość krytyczna

Charakterystyczną cechą większości skał jest ich wielokrotnie wyższa wytrzymałość na ściskanie od ich wytrzymałości na rozciąganie. Biorąc pod uwagę fakt, że wytrzymałość na ściskanie z prób jednoosiowego prostego ściskania bywa z wielu powodów mocno zawyżona, to i tak faktyczna wytrzymałość jest kilkakrotnie wyższa od wytrzymałości na rozciąganie. Oczywiście należy wziąć również pod uwagę to, że wytrzymałość z prób jednoosiowego prostego rozciągania jest dla odmiany zaniżona, o czym świadczą próby wykonane metodą brazylijską.

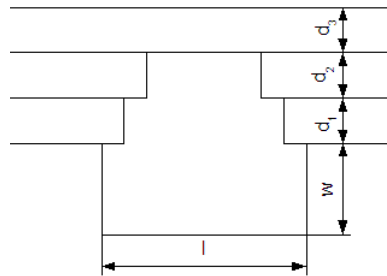
Warstwa stropowa po spekaniu nad ociosami, a także w środku, utrzymuje się dzięki siłom poziomego rozpierania. Powstaje układ łuku trójprzegubowego (rys. 2), z przegubami w środku ciężkości poziomych trójkątów naprężeń ściskających. Pęknięta warstwa nadal posiada znaczną nośność, tym większą, im większy jest stosunek grubości do jej rozpiętości, a wytrzymałość jej jest wyższa. W miarę postępującej deformacji warstwa się ugina. Skutkiem nadmiernego ugięcia się warstwy dochodzi do kruszenia naroży i zaniku sił bocznego docisku. Proces ten przebiega tym szybciej, im cieńsza jest warstwa o niższej wytrzymałości i o większej odkształcalności.

Proces zawału warstw stropowych może być potęgowany przez zalegające powyżej warstwy skał kruchych znajdujących się pod wpływem dużych ciśnień, materiałów luźnych, jak piaski, żwiry, rumosze, a także materiałów upłynnionych lub upłynniających się po ich kontakcie z wodą, przedostającą się szczelinami powstałymi wskutek odprężenia się skał. Szczególnie silne oddziaływanie wywierają materiały pęczniejące. Przyczyną mogą być również zbyt cienkie warstwy lub zbyt niskie albo zbyt wysokie naciski boczne.

Po obвале pierwszej warstwy zostaje odsłonięta kolejna, jednak już o mniejszej rozpiętości, a po jej zniszczeniu następna. Proces ten zatrzymuje się dopiero na warstwie, w której wytrzymałość jest większa od sił niszczących. W wyniku obwału warstw wytwarza się charakterystyczne (rys. 3) trapezowe sklepienie.



Rys. 2. Wyrobisko z pękniętym płaskim stropem



Rys. 3. Wyrobisko z trapezowym sklepieniem

4. Teoria Protodiakonowa

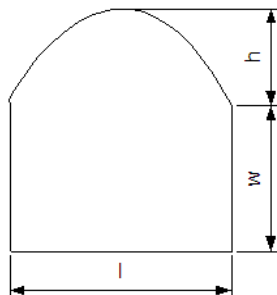
M.M. Protodiakonow założył w swojej teorii, że odspojenie skał stropowych w wyrobisku korytarzowym następuje wzdłuż powierzchni parabolicznej (rys. 4), w której maksymalne naprężenia zrównują się z wytrzymałością.

W myśl tej teorii strzałka sklepienia ciśnień [3] jest związana z szerokością wyrobiska następującą zależnością:

$$h = \frac{l}{2f},$$

gdzie:

- f — wskaźnik zwięzłości,
- l — szerokość odspojenia stropowego,
- h — strzałka sklepienia (wysokość odspojonego stropu).



Rys. 4. Wyrobisko z parabolicznym sklepieniem według M.M. Protodiakonowa

Wyznaczenie wskaźnika zwięzłości skał M.M. Protodiakonow oparł na prawie Rittingera, które zakłada, że istnieje dla materiałów kruchych zależność między mechaniczną energią włożoną w proces rozdrabniania a wielkością nowo powstałej powierzchni ziarn, której miarą jest objętość drobnych ziarn [2].

Oznaczenie przeprowadza się w przyrządzie Syskowa [2]. Do cylindra wsypuje się kolejno od trzech do pięciu porcji ziarn, o średnicy 15 do 22 mm, w ilości od 40 do 100 g. Opuszcza się pięciokrotnie bijak, a odsiane ziarna o średnicy poniżej 0,5 mm wsypuje się do okrągłego cylindra objętościowego. Po łącznym wsypaniu z kolejnych trzech tłuczonych porcji i wstrząśnięciu dla lepszego ułożenia się ziarn, dokonuje się odczytu zwięzłości.

Mimo że metoda wydaje się prosta i praktyczna, nasuwa się kilka uwag:

- 1) Wymaga ona dokonania dodatkowych laboratoryjnych prób celem określenia wskaźnika, mimo że dysponujemy wiele wygodniejszymi i znacznie dokładniejszymi oraz bardziej wiarygodnymi danymi wytrzymałościowymi uzyskiwanymi z przeprowadzonych badań próbek skalnych.
- 2) Wskaźnik zwięzłości oznacza się metodą rozbijania ziarn skały, która jest sposobem bardziej miarodajnym dla określenia procesu udarowego urabiania skał, a nie statycznych nacisków.
- 3) Wyniki pomiaru zależą od kruchości skał i dlatego dają zawyżone wskaźniki dla skał słabych charakteryzujących się plastycznością, a zaniżone dla skał wytrzymałych, ale kruchych.
- 4) Należy zwrócić również uwagę na subiektywność pobierania próbek, odsiewania utrząsania i sposobu odczytu wskaźnika.
- 5) Posługując się wskaźnikiem uzyskanym w podany sposób, otrzymujemy zbyt małą wysokość odspojonego sklepienia. Wystarczy w tym miejscu przytoczyć rezultat badań przeprowadzonych przez A.C. Musina i M.T. Bakajewa w kopalniach na głębokości od 50 do 150 m, na wielkość połowy kąta wierzchołkowego odspojenia, którego tangens jest pięciokrotnie niższy od podanego przez M.M. Protodiakonowa:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = 0,2f \quad (\text{por. [2]}),$$

gdzie:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \quad \text{— tangens połowy kąta wierzchołkowego,}$$

$$f \quad \text{— wskaźnik zwięzłości.}$$

Tak znaczna rozbieżność jest zastanawiająca nawet jak na warunki geologiczno-górnictwa.

- 6) M.M. Protodiakonow założył paraboliczny kształt odspojenia. Taki kształt wg P.M. Cymbarewicz jest charakterystyczny tylko dla skał rozdrobnionych. Dla skał litych wg niego odspojenie przybiera kształt trójkątny.
- 7) Teoria sklepienia M.M. Protodiakonowa nie uwzględnia wzrostu zasięgu strefy odspojenia w miarę wzrostu głębokości lokalizacji wyrobiska. W wyniku badań przeprowadzonych w Zagłębiu Donieckim W.W. Orłow stwierdził, że połowa kąta wierzchołkowego trójkątnej strefy rozluźnienia wynosi:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{f}{s\sqrt[3]{H}} \quad (\text{por. [2]}),$$

gdzie:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \quad \text{— tangens połowy kąta wierzchołkowego odspojenia,}$$

$$H \quad \text{— głębokość usytuowania wyrobiska,}$$

$$s \quad \text{— szczelinowatość,}$$

$$f \quad \text{— wskaźnik zwięzłości.}$$

Badania te dowodzą, że głębokość usytuowania wyrobiska wywiera znaczny wpływ na wysokość odspojenia.

- 8) Z braku uwzględnienia wpływu głębokości, na której zostało usytuowane wyrobisko, teoria M.M. Protodiakonowa nie podaje wielkości, przy której płaski strop ulega zniszczeniu i tworzy się sklepienie.
- 9) M.M. Protodiakonow przyjął dla swojej teorii pionowe ociosy, co jest słuszne tylko do głębokości krytycznej, kiedy to obciążenie nie przekracza wytrzymałości skał ociosowych. Poniżej tej głębokości, wraz ze jej wzrostem, tworzą się strefy odspojenia w ociosach, których płaszczyzny zasięgu odchylają się w stronę calizny.
- 10) Teoria ta, zresztą podobnie jak pozostałe, nie uwzględnia wpływu czasu na zwiększenie się zasięgu strefy odspojenia. Skały charakteryzują się lepkością, znajdując się pod obciążeniem, z upływem czasu odkształcają się, zaciskając wyrobisko. W górnictwie

twie poradzono sobie z tym problemem dzięki pozostawieniu na większych głębokościach warstwy upodatniającej poza obudowę. Na skutek odkształcenia się skał warstwa upodatniająca zmniejsza wpływ tego odkształcenia na obudowę. W budownictwie podziemnym niegórnym, którego obiekty są wykonywane na niewielkich głębokościach, obudowę wykonuje się szczelnie dolegającą do skał, w celu zniwelowania skutków osiadania terenu na obiekty powierzchniowe. Szczelne doleganie obudowy do skał ma także dodatkowe zalety: uniemożliwia migrację wód, co jest szczególnie ważne w obiektach hydrotechnicznych. Takie rozwiązanie jest możliwe z uwagi na umiarkowaną wielkość ciśnienia wywołanego przez skały nadkładowe z racji płytkiego posadowienia wyrobisk.

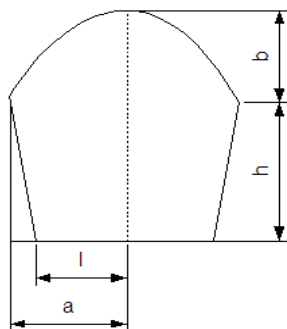
5. Teoria Cymbarewicza

P.M. Cymbarewicz wprowadził modyfikację teorii M.M. Protodiakonowa, zakładając, że paraboliczny kształt strefy odspojenia w stropie wyrobiska tworzy się tylko w skałach luźnych (rys. 5), natomiast w skałach zwięzłych powstaje strefa trójkątna (rys. 6) o kącie wierzchołkowym, który można wyznaczyć ze znanej zależności:

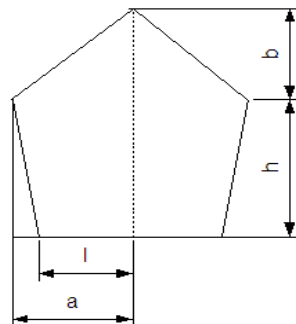
$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{a}{b} = f,$$

gdzie:

- $\frac{\alpha}{2}$ — połowa kąta wierzchołkowego,
- a — połowa szerokości strefy odspojonej,
- b — wysokość strefy odspojonej,
- f — wskaźnik zwięzłości skał stropowych.



Rys. 5. Wyrobisko w skałach luźnych według P.M. Cymbarewicza



Rys. 6. Wyrobisko w skałach zwięzłych z trójkątnym sklepieniem według P.M. Cymbarewicza

Wielkość strefy odspojonej uzależnił, podobnie jak M.M. Protodiakonow, jedynie od własności skał, nie uwzględniając wpływu głębokości lokalizacji wyrobiska. Za miarę własności skał przyjął również wskaźnik zwięzłości skał, dający mocno zaniżoną wysokość stropowej strefy odspojonej.

G.E. Łopatin natomiast uzależnił wysokość strefy od współczynnika tarcia wewnętrznych skał:

$$b = \frac{a}{\operatorname{tg}\phi} \quad (\text{por. [2]}),$$

gdzie:

- a — połowa szerokości strefy odspojonej,
- ϕ — kąt tarcia wewnętrznych skał stropowych.

Podany przez G.E. Łopatina kąt wierzchołkowy strefy odspojonej jest dla danej skały kątem granicznym.

Zasadniczą zmianą, która wpłynęła na zwiększenie zasięgu strefy odspojonej, była wprowadzona przez P.M. Cymbarewicza zależność na jej szerokość:

$$a = l + \frac{h}{\operatorname{tg}45^\circ + \frac{\phi}{2}} \quad (\text{por. [2]}),$$

gdzie:

- a — połowa szerokości strefy rozluźnienia,
- l — połowa szerokości chodnika przy spągu,
- h — wysokość chodnika,
- ϕ — kąt tarcia wewnętrznych skał ociosowych.

Należy zwrócić uwagę, że nachylenie ociosów przyjął jako wartość stałą dla danych skał, otrzymaną w wyniku jednoosiowego prostego ściskania. W wyrobiskach powstaje jed-

nak płaski stan naprężeń, a skała jest niszczona w płaszczyźnie odchylonej zależnie od wywieranego ciśnienia. Nie należy zapominać, że ocios zaczyna się odchylać od pionu dopiero po przekroczeniu głębokości krytycznej.

6. Teoria Sałustowicza

Strefa spękań w teorii A. Sałustowicza, zwanej teorią sklepienia ciśnień, sięga w stropie wyrobisk do powierzchni, w której naprężenia pochodzące od pionowego ciśnienia są równoważone przez naprężenia poziome i wytrzymałość skały na rozciąganie. A. Sałustowicz uzyskał eliptyczny kształt tej strefy. W miarę wykonywania wyrobisk w coraz mocniejszych skałach na tej samej głębokości elipsa ulega spłaszczeniu, z równoczesnym wybrzuszeniem się w ociosach. Spłaszczenie to jest korzystne z punktu widzenia techniczno-ekonomicznego do momentu, kiedy zmniejszenie się wyłomu stropowego jest większe od powiększających się wyłomów ociosowych.

Dalsze spłaszczenie elipsy w miarę wzrostu wytrzymałości skał, zgodnie z jej właściwościami, powoduje coraz rozleglejsze obszary fikcyjnych odspojeń ociosowych, co jest oczywistym paradoksem. Wzrost wytrzymałości skał powoduje faktyczne zmniejszenie się tych stref. Zmniejszanie się strzałki sklepienia w miarę wzrostu wytrzymałości powoduje równocześnie zmniejszenie strzałek odspojeń ociosowych, a naturalnie tworzący się wyłom dąży do przybierania kształtu prostokąta. Stąd wniosek, że krzywą eliptyczną nie da się opisać pełnego wachlarza wyrobisk, zatem teoria A. Sałustowicza ma ograniczony zakres i jest słuszna dla warunków nie odbiegających zbyt od warunków, jakie występują w Okręgu Górnośląskim, dla którego została opracowana.

W tych warunkach A. Sałustowicz w swej teorii założył stosunek boków elipsy równy 2. Przy tym stosunku zasięg eliptycznej strefy (rys. 7) jest zbliżony do zasięgu strefy trójkątnej, wyznaczonej z teorii P.M. Cymbarewicza, w piaskowcach o kącie tarcia wewnętrznego około 30° .

Jednak zaletą teorii A. Sałustowicza jest przyjęcie kształtu eliptycznego wyrobiska, który pozwala zabezpieczyć go obudową z materiałów o wysokiej wytrzymałości na ściskanie, mimo że posiadają niską wytrzymałość na ścinanie i rozciąganie. Pozwala to na stosowanie trwałych wytrzymałych materiałów ogólnie dostępnych jak beton i żelbet, co jest szczególnie ważne w budownictwie podziemnym.

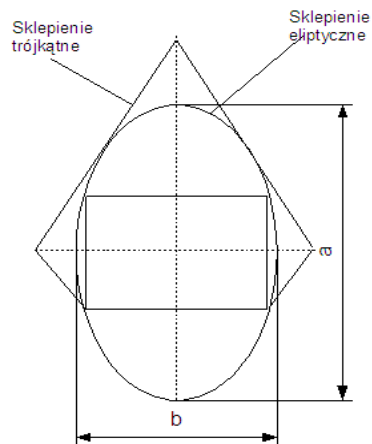
Ze względu na wzajemny stosunek wysokości wyrobisk do szerokości rozróżniamy następujące typy wyrobisk eliptycznych, gdy:

$$\text{— } \frac{a}{b} > 1,$$

$$\text{— } \frac{a}{b} = 1,$$

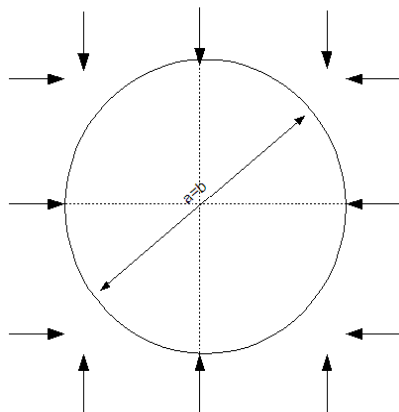
$$\text{— } 0 < \frac{a}{b} < 1.$$

Wyrobiska o stosunku $\frac{a}{b} > 1$ (rys. 7) stosowane są w tunelach kolejowych, wyrobiskach kanalizacyjnych i wyrobiskach komorowych.



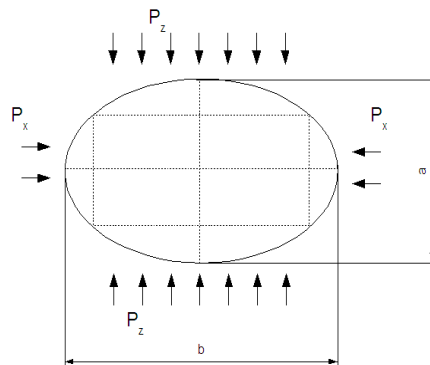
Rys. 7. Wyrobisko eliptyczne — wysokie według A. Sałustowicza [4] $\frac{a}{b} > 1$

Wyrobiska o stosunku $\frac{a}{b} = 1$ znalazły powszechne zastosowanie w budownictwie hydrotechnicznym (rys. 8) ze względu na korzystne parametry hydrauliczne i na korzystny rozkład obciążeń. Wyrobiska te są łatwe do mechanicznego drążenia metodą zwiercania skał.



Rys. 8. Wyrobisko o przekroju kołowym według Z. Kłęczka [3] $\frac{a}{b} = 1$

Wyrobiska o stosunku $0 < \frac{a}{b} < 1$ (rys. 9) świetnie nadają się do tuneli niskich a szerokich, jakich wymaga transport kołowy.



Rys. 9. Wyrobisko eliptyczne niskie według A. Sałustowicza [4] $0 < \frac{a}{b} < 1$

7. Wnioski

Na podstawie przedstawionych rozważań można sformułować następujące wnioski:

- 1) W wyrobiskach o szerokości mniejszej od krytycznej rozpiętości stropu nie powstaje strefa odspojona.
- 2) Pęknięty płaski strop, z grubą i mocną warstwą piaskowca, może przez długi czas zachować swoją stateczność.
- 3) W stropie wyrobiska, z odspojonymi warstwami, tworzą się charakterystyczne sklepienia trapezowe.
- 4) Tworzący się paraboliczny strop według P.M. Cymbarewicza jest charakterystyczny dla skał luźnych.
- 5) W skałach zwięzłych według P.M. Cymbarewicza powstaje w stropie trójkątna strefa rozluźniona. Faktycznie strefa ta przybiera kształt dysku.
- 6) Eliptyczny kształt wyrobisk jest wyjątkowo korzystny, przy zastosowaniu obudowy murej, betonowej lub żelbetowej.
- 7) Poniżej głębokości krytycznej wytwarzają się w wyrobiskach również odspojone strefy ociosowe.
- 8) Ze względu na lepki charakter skał ich wytrzymałość z upływem czasu obniża się, a deformacja wzrasta, dzięki czemu ulegają one zniszczeniu przy znacznie niższym obciążeniu.
- 9) Skały ilaste tracą swą wytrzymałość na skutek kontaktu z wodą lub wilgocią atmosferyczną.
- 10) Stateczność wyrobiska może być naruszona nie tylko na skutek wzrostu obciążenia, lecz również zmiany układu naprężeń i obniżania się wytrzymałości skał.

LITERATURA

- [1] *Chudek M.*: Mechanika górotworu. Gliwice 1976
- [2] *Kidybiński A.*: Podstawy geotechniki kopalnianej. Katowice, Wydawnictwo „Śląsk” 1982
- [3] *Kleczek Z.*: Geomechanika górnicza. Katowice, Śląskie Wydawnictwo Techniczne 1985
- [4] *Sałustowicz A.*: Mechanika górotworu. Katowice, Wydawnictwo Górniczno-Hutnicze 1955