

## 20

# WPŁYW POJEDYNCZEGO MAGISTRALNEGO PEKNIĘCIA W GÓROTWORZE NA STAN NAPRĘŻENIA I PRZEMIESZCZENIA W SĄSIEDZTWIE WYROBISKA KORYTARZOWEGO O PRZEKROJU KOŁOWYM

### 20.1 WSTĘP

W mechanice skał i górotworu formuły podane przez Kirscha w 1898 roku [7] pozwalające opisać stan napręzenia i przemieszczenia w otoczeniu wyrobiska o przekroju kołowym są prawdopodobnie najczęściej wykorzystywanym zestawem równań z teorii sprężystości (zob. np. [5, 6]). Wykorzystanie znajdują przy określaniu stateczności tuneli o przekroju kołowym czy też szybów, ale również w metodach pomiaru naprężeń w skałach oraz na przykład przy hydroszczelinowaniu używanemu do zintensyfikowania wydobycia gazu czy ropy naftowej ze źróź zarówno konwencjonalnych jak i niekonwencjonalnych (zob. np. [5, 6]). Równania te pozwalając na analizę stanu napręzenia w ośrodku poddanym działaniu naprężeń, jak na przykład pierwotnych w górotworze, są specjalnie przydatne w geoinżynierii lecz ich ważność obowiązuje tylko dla ośrodków ciągłych, izotropowych, zachowujących się idealnie liniowo-sprężysto.

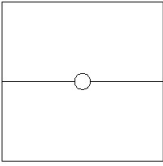
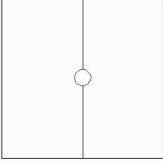
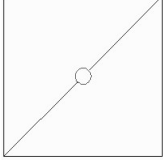
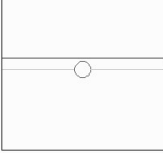
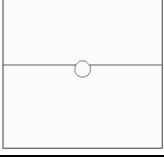
Wobec powyższych rodzi się pytanie: na ile wartość swą zachowują wnioski z ich zastosowania, gdy wyrobisko przecina lub w jego najbliższym sąsiedztwie przebiega płaszczyzna osłabienia?

W pracy podjęto się określenia, pod jakimi warunkami wnioski z klasycznej analizy wpływu wykonania wyrobiska o przekroju kołowym, w górotworze o cechach ośrodku idealnie liniowo-sprężystego na stan napręzenia w jego otoczeniu, zachowują swoją użyteczność, gdy wyrobisko to przecina lub w jego bliskim otoczeniu przebiega pojedyncza magistralna nieciągłość. Przeprowadzona analiza pozwala na ustalenie pewnych praktycznych wytycznych wskazujących warunki kiedy płaszczyzna osłabienia ma niewielki wpływ na stan napręzenia i przemieszczenia w otoczeniu wyrobiska. Pozwala ona także – przy pomocy stosunkowo prostych modeli konceptualnych – na inżynierską ocenę wpływu poszczególnych parametrów na stateczność wyrobiska, gdy wpływ nieciągłości jest istotny.

## 20.2 ANALIZA WPŁYWU PŁASZCZYZNY OSŁABIENIA NA STAN NAPRĘŻENIA I PRZEMIESZCZENIA W GÓROTWORZE W OTOCZENIU WYROBISKA O PRZEKROJU KOŁOWYM

Analizie poddano pięć, prawdopodobnie najbardziej typowych, przypadków wzajemnego zorientowania nieciągłości względem wyrobiska, zebranych i przedstawionych schematycznie w tabeli 20.1, przy czym nieciągłość określono zerową kohezją i wytrzymałością na rozciąganie. Przyjęto także, że nieciągłość posiada wysoką sztywność zarówno w kierunku normalnym jak i stycznym – tak że wpływ sprężystego odkształcania się samej nieciągłości na zmianę stanu naprężenia w górotworze jest pomijalnie mały – i że nie dochodzi do dylatacyjnego rozwierania się nieciągłości przy przemieszczaniu się jej ścianek względem siebie.

Tabela 20.1 Warianty usytuowania nieciągłości względem wyrobiska

	Wariant I – poziomo położona nieciągłość, przechodząca przez oś wyrobiska,
	Wariant II – pionowa nieciągłość przechodząca przez oś wyrobiska,
	Wariant III – nieciągłość ukośnie przechodząca przez oś wyrobiska,
	Wariant IV – nieciągłość zlokalizowana poziomo w stropie wyrobiska, w pewnej odległości powyżej wyrobiska,
	Wariant V – pozioma nieciągłość, przecinająca wyrobisko powyżej osi wyrobiska.

Wytrzymałość graniczna na ścinanie nieciągłości jest dana klasyczną zależnością:

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \phi \quad (20.1)$$

gdzie:

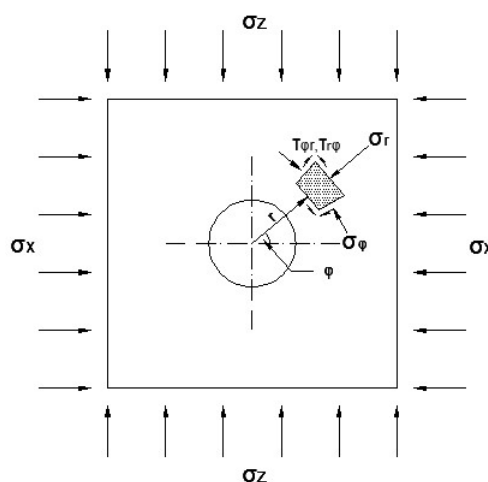
$\tau$  – wytrzymałość graniczna nieciągłości na ścinanie, MPa;

$\sigma_n$  – naprężenia normalne w płaszczyźnie nieciągłości, MPa;

$\phi$  – kąt tarcia zewnętrznej, °.

**a) Poziomo położona nieciągłość przechodząca przez oś wyrobiska**

Naprężenia styczne wzdłuż poziomej osi wyrobiska ( $\varphi = 0$ ) przyjmują wartości równe 0 dla dowolnego  $r$  (zob. wzory 20.2-20.7). Naprężenia styczne działające wzdłuż poziomo zorientowanej płaszczyzny osłabienia przechodzącej przez oś wyrobiska wobec tego także przyjmują wartość zero i nie występuje poślizg wzdłuż nieciągłości (rys. 20.1).



**Rys. 20.1 Stan naprężenia wokół wyrobiska o przekroju kołowym**

gdzie:

$\sigma_x = p_x$  i  $\sigma_z = p_z$  – składowe, odpowiednio pozioma i pionowa, stanu naprężenia działającego w górotworze w dużej odległości od wyrobiska;

$r$  i  $\varphi$  - współrzędne biegunowe;

$\sigma_r$  - naprężenie radialne;

$\sigma_\varphi$  - naprężenie obwodowe;

$\tau_{r\varphi} = \tau_{\varphi r}$  - naprężenie styczne

– naprężenie radialne  $\sigma_r$ :

$$\sigma_r = \frac{p_z}{2} \left[ 1 - \frac{a^2}{r^2} - \left( 1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\varphi \right] + \frac{p_x}{2} \left[ 1 - \frac{a^2}{r^2} + \left( 1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\varphi \right] \quad (20.2)$$

lub:

$$\sigma_r = \frac{p_z}{2} \left[ (1+k) \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) - (1-k) \left( 1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\varphi \right] \quad (20.3)$$

– naprężenie obwodowe  $\sigma_\varphi$ :

$$\sigma_\varphi = \frac{p_z}{2} \left[ 1 + \frac{a^2}{r^2} + \left( 1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\varphi \right] + \frac{p_x}{2} \left[ 1 + \frac{a^2}{r^2} - \left( 1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\varphi \right] \quad (20.4)$$

lub:

$$\sigma_\varphi = \frac{p_z}{2} \left[ (1+k) \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + (1-k) \left( 1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\varphi \right] \quad (20.5)$$

– naprężenia styczne  $\tau_{r\varphi} = \tau_{\varphi r}$ :

$$\tau_{r\varphi} = \tau_{\varphi r} = \frac{p_z - p_x}{2} \left( 1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \sin 2\varphi \quad (20.6)$$

lub:

$$\tau_{r\varphi} = \tau_{\varphi r} = \frac{p_z}{2} \left[ (1-k) \left( 1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \sin 2\varphi \right] \quad (20.7)$$

W tym przypadku lokalizacji wyrobiska wobec płaszczyzny osłabienia nie wpływa ona na stan naprężenia wokół wyrobiska i wnioski z klasycznej analizy opartej o rozwiązanie Kirscha zachowują swą ważność.

### b) Pionowa nieciągłość przechodząca przez oś wyrobiska

Dla kąta  $\varphi = \pi/2$  żadne naprężenia styczne wzdłuż nieciągłości nie zostaną wygenerowane – tak więc nie istnieje tendencja do wystąpienia poślizgu wzdłuż nieciągłości, a stan naprężenia wokół wyrobiska nie jest modyfikowany przez przemieszczenie styczne ścianek nieciągłości. Wiadomo jednakże, że wystąpić może rozwieranie się ścianek nieciągłości jeśli w stropie (i spągu) wystąpią naprężenia rozciągające. Z równań Kirscha wiadomo, że taki stan będzie miał miejsce gdy stosunek naprężeń pierwotnych poziomych do pionowych będzie mniejszy od  $1/3$  ( $k < 1/3$ ).

W takim przypadku otwieranie się nieciągłości w stropie (i spągu, co jednak ma mniejsze znaczenie z praktycznego punktu widzenia) prowadzi do powstania stref odprężonych. Wielkość strefy odprężonej może być oszacowana, w celach projektowych, dzięki założeniu, że można ją porównać do elipsy, której jedna oś tożsama jest z poziomo zorientowaną średnicą wyrobiska a długość drugiej półosi wyznaczona jest przez maksymalny zasięg występowania naprężeń rozciągających w stropie wyrobiska. Rozwieranie się ścianek nieciągłości nie następuje, gdy wielkość naprężeń normalnych równa jest zero więc w konsekwencji powstaje warunek, że wielkość naprężeń poziomych w wierzchołku elipsy jest równa zero:

$$\sigma_B = p_x \cdot \left(1 + 2 \frac{H}{W}\right) - p_z = 0 \quad (20.8)$$

oraz

$$H = 2a + 2\Delta h \quad (20.9)$$

i

$$W = 2a \quad (20.10)$$

co prowadzi do związku pozwalającego na wyznaczenie zasięgu strefy odprężonej w stropie:

$$\Delta h = a \left(\frac{1-3k}{2k}\right) \quad (20.11)$$

gdzie:

$\sigma_B$  – naprężenia obwodowe w wierzchołku elipsy, w stropie, MPa;

$\Delta h$  – zasięg strefy odprężonej w stropie wyrobiska, m;

$a$  – promień wyrobiska, m;

$k$  – współczynnik proporcjonalności pomiędzy wartościami naprężeń poziomych i pionowych;

$H$  – pionowa oś elipsy, m;

$W$  – pozioma oś elipsy, m;

**c) Nieciągłość ukośnie przechodząca przez oś wyrobiska**

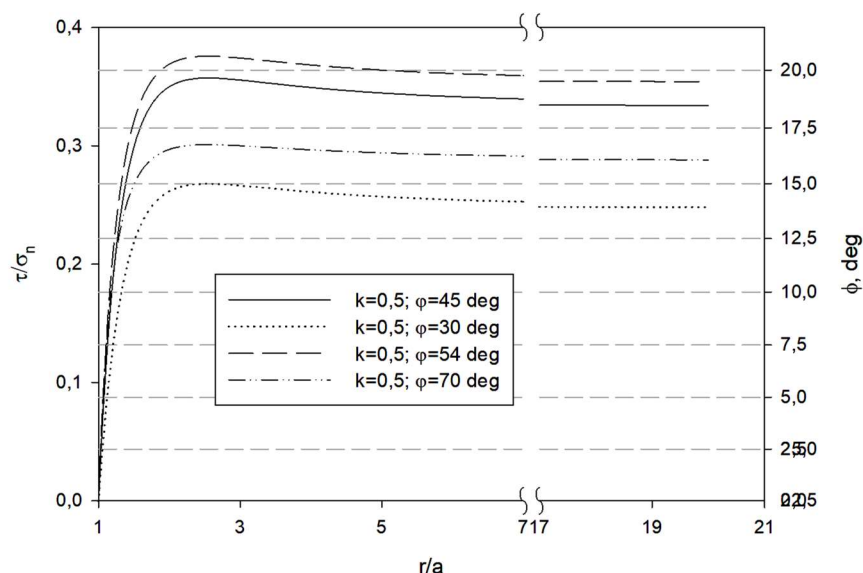
W przypadku gdy nieciągłość przechodzi przez oś wyrobiska, przecinając je pod kątem ostrym (symetria zagadnienia pozwala z łatwością rozszerzyć wnioski na przypadek, gdy kąt staje się rozwarty) naprężenia obwodowe są naprężeniami normalnymi do nieciągłości, a ścinanie usiłują wywołać naprężenia styczne wyrażone wzorami (20.6) lub (20.7). Stosunek naprężeń stycznych do normalnych, zgodnie z przyjętym warunkiem wytrzymałościowym (20.1) określającym wytrzymałość nieciągłości na ścinanie pozwala określić wartość kąta tarcia zewnętrznego dla której nastąpi poślizg wzdłuż pęknięcia.

Przykładowo dla stanu naprężenia (np. pierwotnego) w którym naprężenia poziome stanowią połowę naprężeń pionowych a kąt nachylenia nieciągłości wynosi 45° wzory (20.5) i (20.7) przyjmują postać:

$$\sigma_n = \sigma_\varphi = \frac{3p_z}{4} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \quad (20.12)$$

$$\tau = \tau_{r\varphi} = \tau_{\varphi r} = \frac{p_z}{4} \left(1 + 2\frac{a^2}{r^2} - 3\frac{a^4}{r^4}\right) \quad (20.13)$$

Na rysunku 20.2 pokazano zależność zmiany wartości stosunku  $\tau/\sigma_n$  wraz z odległością od konturu wyrobiska daną przez stosunek promienia wodzącego do promienia wyrobiska. Dodatkowa oś rzędnych dodana została, by wskazać wartości kąta tarcia odpowiadające danym wartościom stosunku naprężeń stycznych do normalnych.



**Rys. 20.2** Zależność wartości stosunku  $\tau/\sigma_n$  od znormalizowanej względem promienia odległości od konturu wyrobiska dla nieciągłości przecinających wyrobisko pod przykładowymi kątami ostrymi, gdy pierwotne naprężenia poziome stanowią połowę naprężeń pionowych, a promień wyrobiska jest równy 2,5 m.

Dla wyrobiska o promieniu równym 2,5 m wartość maksymalna  $\tau/\sigma_n$  równa około 0.357 występuje dla  $r/a$  nieco ponad 2,5 (2,54) i odpowiada kątowi tarcia

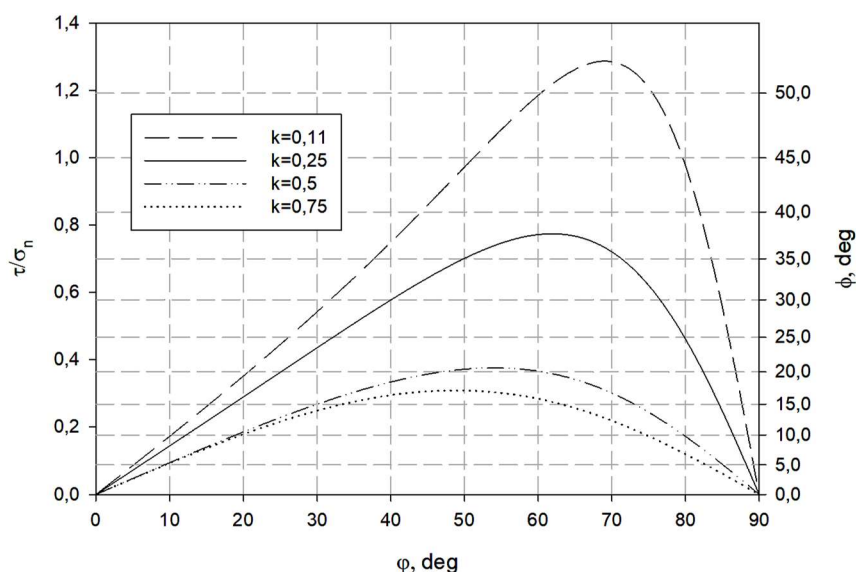
równemu około  $19,65^\circ$ . Wraz z oddalaniem się od wyrobiska wartość kąta  $\phi$  nieco maleje dążąc asymptotycznie do około  $18,43^\circ$  ( $\arctan(1/3)$ ).

Oznacza to, że jeśli masyw skalny znajduje się w stanie równowagi granicznej ( $\phi \approx 18,5^\circ$ ), roboty górnicze związane na przykład z drażeniem wyrobiska mogą wywołać przemieszczenie styczne rozległej partii górotworu na skutek poślizgu wzdłuż nieciągłości. Z drugiej strony jeśli wartość kąta tarcia nieciągłości przekracza  $19,6^\circ$  nie wystąpi poślizg wzdłuż żadnej jej części.

Przy innych kątach nachyleń nieciągłości przechodzącej przez wyrobisko zmienia się wartość kąta tarcia konieczna do tego by nie wystąpił poślizg. Przykładowo zmniejszenie kąta nachyleń nieciągłości powoduje, że nieciągłości o mniejszej wytrzymałości na ścianie nie doznają tak łatwo poślizgu, dla kąta nachyleń równego  $30^\circ$  do poślizgu w ogóle nie dojdzie jeśli kąt tarcia przyjmuje wartość około  $15^\circ$  a w większej odległości od wyrobiska około  $13,9^\circ$ .

Zwiększenie kąta nachyleń nieciągłości skutkuje zmianą wartości wymaganego kąta tarcia. Dla kąta równego  $54^\circ$  – który charakteryzuje najbardziej niekorzystne nachylenie, dla tego stanu naprężenia ( $k = 0,5$ ) – kąt tarcia gwarantujący brak poślizgu powinien wynieść co najmniej około  $20,6^\circ$ , a by poślizg nie wystąpił w większej odległości od wyrobiska wymagana wartość kąta  $\phi$  rośnie do około  $19,5^\circ$ .

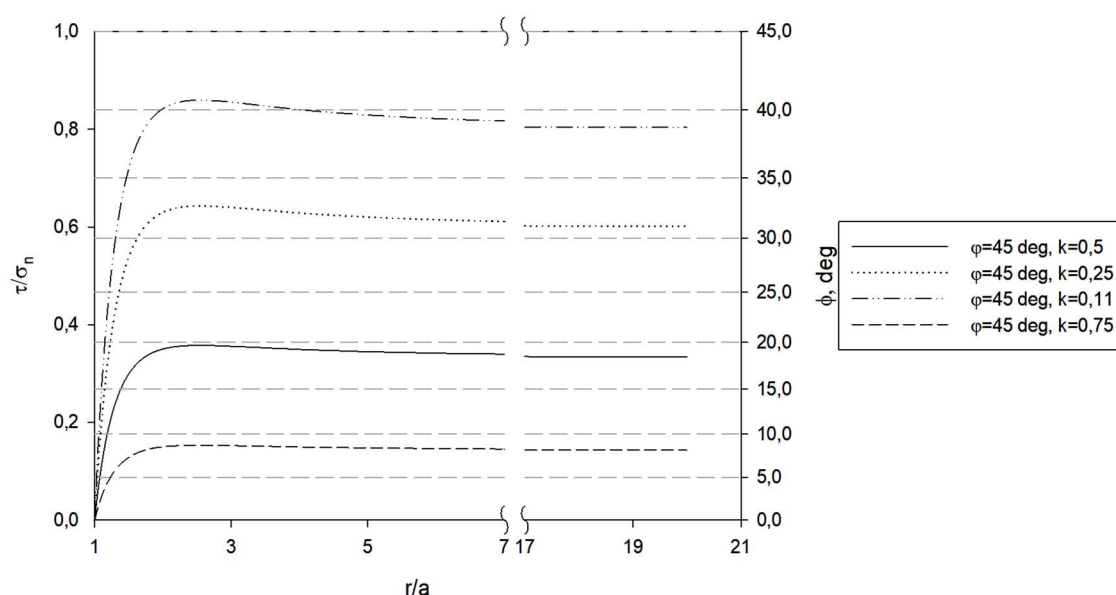
Generalnie zwiększenie nachyleń ponad  $45^\circ$  skutkuje zwiększeniem wartości wymaganego kąta tarcia koniecznego by nie wystąpiły znaczne przemieszczenia styczne wzdłuż pęknięcia. W zależności jednak od stanu naprężenia zależność  $\tau/\sigma_n = f(\phi)$  osiąga maksimum przy różnych wartościach kąta nachyleń nieciągłości (rys. 20.3). Przykładowo dla kąta nachyleń równego  $70^\circ$  do poślizgu w ogóle nie dojdzie jeśli kąt tarcia przyjmuje wartość tylko  $16,75^\circ$ , a w większej odległości od wyrobiska około  $16^\circ$  (zob. rys. 20.2).



Rys. 20.3 Zależność wartości stosunku  $\tau/\sigma_n$  i odpowiadającego mu kąta tarcia od kąta nachyleń nieciągłości przecinających wyrobisko, przy zmiennym stosunku pierwotnych naprężeń poziomych do pierwotnych naprężeń pionowych, dla  $r/a=2,5$

Wartości kąta nachylenia nieciągłości przy których do powstrzymania poślizgu niezbędna jest największa wytrzymałość na ścinanie (wyrażona przez kąt tarcia) rosną tym bardziej im bardziej asymetryczny jest stan naprężeń. W punkcie położonym wzdłuż nieciągłości, oddalonym od środka wyrobiska o dwuipółkrotność jego promienia, dla naprężeń poziomych stanowiących 75% wartości naprężeń pionowych maksimum występuje dla kąta nachylenia równego ok. 49°. Gdy naprężenia poziome maleją w relacji do pionowych wartości kąta nachylenia przy których wystąpią ekstremalne wartości stosunku  $\tau/\sigma_n$  rosną: dla  $k = 1/2$  wystąpią przy  $\phi = 54^\circ$ , gdy  $p_x = 1/4 p_z$  dla  $\phi = 62^\circ$ , a gdy  $k = 0,11$  nawet przy prawie  $70^\circ$  ( $69^\circ$ ) (zob. rys. 20.3).

Wpływ stan naprężenia w górotworze na wystąpienie poślizgu wzdłuż całej powierzchni nieciągłości obrazuje rysunek 20.4.



**Rys. 20.4 Zależność wartości stosunku  $\tau/\sigma_n$  od znormalizowanej względem promienia odległości od konturu wyrobiska dla nieciągłości przecinających wyrobisko pod kątami  $45^\circ$ , przy zmiennym stosunku pierwotnych naprężeń poziomych do pierwotnych naprężeń pionowych**

Przykładowo dla nieciągłości nachylonej pod kątem  $45^\circ$  bardziej asymetryczny stan naprężenia skutkuje tym, że wartość kąta tarcia konieczna do tego by nie wystąpił poślizg wzrasta. Dla  $p_x = 1/4 p_z$ , kąt tarcia gwarantujący brak poślizgu powinien wynieść co najmniej około  $32,75^\circ$ , a by poślizg nie wystąpił w większej odległości od wyrobiska wymagana wartość kąta  $\phi$  rośnie do około  $32^\circ$  ( $31,03^\circ$ ). Gdy naprężenia poziome stanowią około 11% naprężeń pionowych wartości obu kątów sięgają aż ponad  $40,5^\circ$  ( $40,675^\circ$ ) i  $38,79^\circ$ , odpowiednio. Bardziej jednorodny stan naprężenia z kolei oznacza, że aby nie doszło do poślizgu wzdłuż nieciągłości wymagana jest znacznie mniejsza jej wytrzymałość graniczna na ścinanie. Gdy  $p_x = 3/4 p_z$  kąt tarcia oznaczający brak poślizgu może wynosić nawet mniej niż  $9^\circ$  ( $8,6^\circ$ ). By poślizg nie wystąpił w większej odległości od wyrobiska trochę więcej niż  $8^\circ$  ( $8,15^\circ$ ).

**d) Poziomo zorientowana nieciągłość w stropie wyrobiska**

Korzystając z równań transformacyjnych dla stanu naprężenia oraz równań z rozwiązania Kirscha naprężenia normalne i styczne działające w płaszczyźnie nieciągłości mogą być z łatwością wyznaczone.

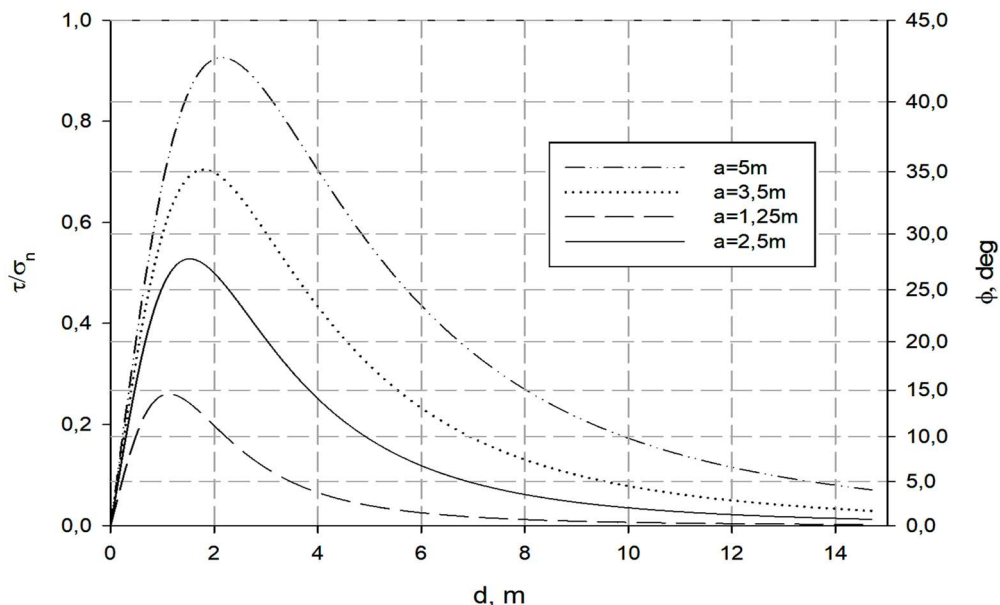
Przyjmując, przykładowo, że w górotworze panuje hydrostatyczny stan naprężenia ( $p_x = p_y = p_z$ ) równania te przyjmują następującą postać:

$$\sigma_n = p_z \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \cos 2\varphi \right) \quad (20.14)$$

$$\tau = p_z \frac{a^2}{r^2} \sin 2\varphi \quad (20.15)$$

Wartości stosunku  $\tau/\sigma_n$  wyznaczone z powyższych równań zostały pokazane dla punktów wzdłuż nieciągłości, dla kilku przykładowych promieni wyrobiska, przy założeniu, że odległość między poziomym pęknięciem w stropie a wyrobiskiem jest stała i wynosi  $c = 1$  m (rys. 20.5).

Dla wyrobiska o promieniu 1,25 m kąt tarcia o wartości  $15^\circ$  wystarczy, by nie doszło do poślizgu wzdłuż nieciągłości. Zwiększenie promienia do 2,5 m oznacza, że przy kącie tarcia równym  $15^\circ$  poślizg wystąpi na odcinku o długości ponad 3,5 m, od punktu położonego ok. 0,45 m nad środkiem wyrobiska do miejsca oddalonego o prawie 4 m (zob. rys 20.5). Wymagana wartość kąta tarcia powstrzymująca poślizg rośnie już do prawie  $28^\circ$  ( $27,83^\circ$ ). Zwiększanie średnicy wyrobiska skutkuje jeszcze większymi wartościami maksymalnymi stosunku  $\tau/\sigma_n$ . Dla promienia równego 3,5 m wartość ta wynosi już 0,704 ( $\varphi = 35,17^\circ$ ) a dla wyrobiska o promieniu 5 m nawet około 0,926 ( $\varphi = 42,79^\circ$ ).



**Rys. 20.5** Zależność wartości stosunku  $\tau/\sigma_n$  wzdłuż nieciągłości, począwszy od punktu leżącego nad środkiem wyrobiska, dla różnych wielkości (promieni wyrobiska -a) gdy pęknięcie zlokalizowane jest poziomo w odległości 1m nad wyrobiskiem

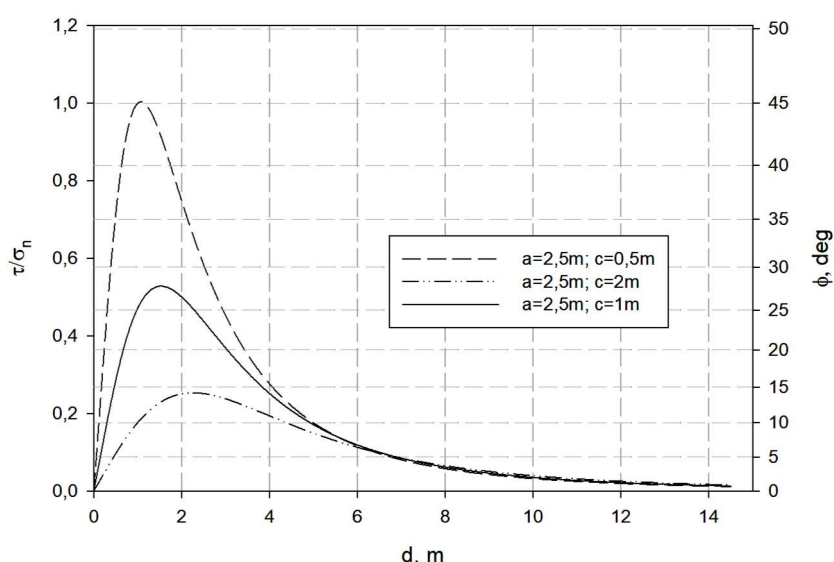


Występujący poślizg będzie miał miejsce także symetrycznie po drugiej stronie osi pionowej wyrobiska, dla obu tych stref charakter przemieszczenia stycznego będzie taki, że górna część nieciągłości przemieści się na zewnątrz od wyrobiska w stosunku do dolnej powierzchni. Spowoduje to koncentrację naprężeń w skałach położonych między wyrobiskiem a pęknięciem.

Przy danej wielkości wyrobiska bardzo istotny wpływ na możliwość wystąpienia poślizgu wzdłuż nieciągłości położonej w jego stropie ma odległość w jakiej od wyrobiska pęknięcie przebiega (rys. 20.6).

Dla przykładu, gdy promień wyrobiska wynosi 2,5 m nawet niewielka zmiana odległości między wyrobiskiem a pęknięciem skutkuje dramatyczną zmianą maksymalnych wartości stosunku  $\tau/\sigma_n$ . Gdy wyrobisko znajduje się w odległości 0,5 m od pęknięcia  $(\tau/\sigma_n)_{max}$  wynosi ponad 1, a odpowiadająca mu wartość kąta tarcia przekracza  $45^\circ$ .

Oddalenie wyrobiska od pęknięcia na odległość 2 m powoduje spadek wartości kąta tarcia wymaganego do niewystąpienia poślizgu do poniżej  $15^\circ$  ( $14,19^\circ$ ).



Rys. 20.6 Zależność wartości stosunku  $\tau/\sigma_n$  wzdłuż nieciągłości, począwszy od punktu leżącego nad środkiem wyrobiska o promieniu 2,5 m, gdy pęknięcie przebiega poziomo w różnych odległościach nad wyrobiskiem

**e) Poziomo zorientowana nieciągłość przechodząca przez wyrobisko na pewnej wysokości powyżej jego osi**

Składowe normalna i styczna naprężeń działających w płaszczyźnie nieciągłości wynoszą:

$$\sigma_n = \sigma_\varphi (\cos \varphi)^2 \quad (20.16)$$

$$\tau = \sigma_\varphi \sin \varphi \cos \varphi \quad (20.17)$$

Biorąc pod uwagę warunek wytrzymałościowy definiujący wytrzymałość graniczną nieciągłości na ścinanie dany wzorem (20.1) dostajemy:

$$\sigma_\varphi \sin \varphi \cos \varphi = \sigma_\varphi (\cos \varphi)^2 \operatorname{tg} \phi \quad (20.18)$$

a po przekształceniu:

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \phi \quad (20.19)$$

W przypadku poziomo zorientowanej nieciągłości o możliwości wystąpienia poślizgu decyduje wysokość jej położenia nad osią poziomą wyrobiska. Przy danej wytrzymałości nieciągłości na ścinanie, do poślizgu dojdzie gdy kąt nachylenia promienia wodzącego ( $\varphi$ ) łączącego środek wyrobiska i początek nieciągłości na obwodzie wyrobiska będzie większy od kąta tarcia nieciągłości ( $\phi$ ).

Charakter przemieszczenia stycznego będzie taki, że górna część nieciągłości przemieści się na zewnątrz od wyrobiska w stosunku do dolnej powierzchni. Spowoduje to zmniejszenie wartości naprężeń w stropie wyrobiska względem tych działających w górotworze ciągłym. Możliwe zatem staje się powstawanie quasi-pionowych szczelin w stropie, bezpośrednio nad wyrobiskiem [2].

W przypadku gdy wyrobisko jest zlokalizowane w górotworze uwarstwionym, tak że przebiega przez nie pojedyncza nieciągłość, ale zespół równoległych, poziomo położonych spękań – do poślizgu dojdzie wzdłuż każdej z nieciągłości dla której warunek ( $\varphi > \phi$ ) jest spełniony [1].

### 20.3 PODSUMOWANIE

W pracy podjęto się określenia, pod jakimi warunkami wnioski z klasycznej analizy wpływu wykonania wyrobiska o przekroju kołowym, w górotworze o cechach ośrodka idealnie liniowo-sprężystego na stan naprężenia w jego otoczeniu, zachowują swoją użyteczność, gdy wyrobisko to przecina lub w jego bliskim otoczeniu przebiega magistralna nieciągłość.

Analizie poddano pięć typowych przypadków wzajemnego położenia nieciągłości względem wyrobiska, przy czym nieciągłość scharakteryzowano zerową spójnością i wytrzymałością na rozciąganie.

Przedstawiony sposób analizy pozwala określić w jakich warunkach niesprężyste przemieszczenia styczne i/lub rozwarcia nieciągłości wystąpić mogą w otoczeniu wyrobiska i czy stanowią powinny przedmiot szczegółowego badania przez inżynierów projektujących wyrobiska. Jeśli z analizy wynika, że wielkość niesprężystych deformacji powodowanych przez nieciągłość jest nieznaczna, wpływ nieciągłości na stan naprężenia i przemieszczenia wokół wyrobiska może być pominięty i klasyczna analiza z wykorzystaniem rozwiązania Kirscha może zostać wykonana. W przypadku gdy niesprężyste efekty są znaczące, i ich wpływ nie jest pomijalnie mały analizy numeryczne są bardzo pożądane. W takim przypadku, wyniki prostych analiz przedstawionych w artykule, stanowią cenną informację. Pozwalają one na szybką i nie wymagającą nakładu wielu środków analizę wpływu wielu parametrów branych pod uwagę w procesie projektowania jak np.: lokalizacji wyrobiska, jego wielkości, orientacji względem stanu naprężenia w górotworze na jego stateczność i łatwość utrzymania. Zarówno twórcy najlepszych narzędzi do modelowania numerycznego jak i wybitni konsultanci czy badacze rekomendują

przeprowadzanie tego typu prostych analiz przed przystąpieniem do bardziej zaawansowanych studiów [2, 3, 4].

Autor artykułu po wykonaniu zaprezentowanych analiz zbudował modele numeryczne górotworu i wyrobiska o przekroju kołowym i innych kształtach, i przeprowadził symulacje numeryczne ich drążenia i badanie ich stateczności.

Przeprowadzone analizy numeryczne przy pomocy metody elementów odrębnych pozwoliły na potwierdzenie wniosków z prac analitycznych oraz umożliwiły pełniejszą analizę i opis stanu naprężenia, odkształcenia, przemieszczenia i wyteżenia wokół wyrobiska o przekroju kołowym w górotworze z pojedynczym magistralnym pęknięciem.

Sposób przeprowadzenia analiz numerycznych i ich wyniki zostaną pokazane w oddzielnym artykule.

## LITERATURA

1. F.G. Bell et al. *Engineering in Rock Masses*. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd., 1992.
2. B.H.G. Brady, E.T. Brown. *Rock Mechanics for Underground Mining*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004.
3. P.A. Cundall, R.D. Hart. „Numerical modeling of discontinua” in *Comprehensive Rock Engineering. Analysis and Design Methods*, vol. 2., C. Fairhurst, Ed. Oxford: Pergamon Press, 1993, pp. 231-243.
4. P.A. Cundall, O.D.L. Strack. „A discrete numerical model of granular assemblies.” *Geotechnique*, 29, pp. 47-65, 1987.
5. J.A. Hudson, J.P. Harrison. *Engineering Rock Mechanics*. Oxford: Pergamon – Elsevier Science Ltd., 1997.
6. J.C. Jaeger, N.G.W. Cook. *Fundamentals of Rock Mechanics*. London: Chapman & Hall, 1979.
7. G. Kirsch. „Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre.” *Veit. Ver. Deut. Ing.*, no. 42, 1898.

Data przesłania artykułu do Redakcji: 10.2016

Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 03.2017

### dr inż. Grzegorz Smolnik

Politechnika Śląska,  
Wydział Górnictwa i Geologii  
Katedra Geomechaniki,  
Budownictwa Podziemnego  
i Zarządzania Ochroną Powierzchni  
ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Polska  
e-mail: grzegorz.smolnik@polsl.pl

### WPLYW POJEDYNCZEGO MAGISTRALNEGO PĘKNIĘCIA W GÓROTWORZE NA STAN NAPRĘŻENIA I PRZEMIESZCZENIA W SĄSIĘDZTWIE WYROBISKA KORYTARZOWEGO O PRZEKROJU KOŁOWYM

**Streszczenie:** W pracy podjęto się określenia, pod jakimi warunkami wnioski z klasycznej analizy wpływu wykonania wyrobiska o przekroju kołowym, w górotworze o cechach ośrodka idealnie liniowo-sprężystego na stan naprężenia w jego otoczeniu, zachowują swoją użyteczność, gdy wyrobisko to przecina lub w jego bliskim otoczeniu przebiega magistralna nieciągłość. Analizie poddano pięć typowych przypadków wzajemnego położenia nieciągłości względem wyrobiska, przy czym samą nieciągłość scharakteryzowano zerową spójnością i wytrzymałością na rozciąganie – ma więc ona charakter pęknięcia. Stwierdzono, że wpływ nieciągłości na stateczność wyrobiska zależy przede wszystkim od jej zorientowania wobec wyrobiska, a w przypadkach niekorzystnego jej położenia również od wytrzymałości pęknięcia na ścinanie i/lub pierwotnego stanu naprężenia w górotworze.

**Słowa kluczowe:** rozwiązanie Kirscha, pęknięcie, stan naprężenia, wyrobisko o przekroju kołowym

### AN ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE SINGLE PRE-EXISTING CRACK ON THE STATE OF STRESS AND DISPLACEMENT IN THE VICINITY OF THE CIRCULAR HORIZONTAL OPENING

**Abstract:** An analysis has been conducted to address the fundamental question in rock and strata mechanics: how valid are the estimates obtained for the elastic stress distribution around a circular opening when the boundary of an opening is intersected by a plane of weakness? Five, the most frequently found orientations of the plane of weakness have been analyzed and it has been assumed that the discontinuity has zero value for tensile strength and cohesion, and is non-dilatant in shear so it is a crack in nature. As a result it has been concluded that, in some cases, planes of weakness may have little or no effect on the boundary stresses. In cases where the boundary stresses are affected by the rock structure, the most important factors contributing to alteration of the elastic stresses have been found to be the orientation of the joint, joint shear strength and/or far field stress state in a rock mass.

**Key words:** Kirsch solution, plane of weakness, elastic stress distribution, circular opening