

Zasięg strefy spękań w otoczeniu wyrobiska wykonanego w samodzielnej obudowie kotwowej

The range of the fractured rock mass zone around the excavation with rockbolt support



*Mgr inż. Zbigniew Czarnecki**



*Dr hab. inż. Zbigniew Niedbalski
prof. AGH**)*



*Mgr inż. Łukasz Nita**



*Mgr inż. Marcin Śpiechowicz**

Treść: W artykule przedstawiono wyniki badań dołowych zasięgu strefy spękań górotworu wokół wyrobiska w samodzielnej obudowie kotwowej wykonanych endoskopem otworowym. Pomiary zrealizowane były w chodniku Bw-1n badawczym w pokładzie 401, który drążony jest przy pomocy kombajnu Bolter Miner. Następnie wykonany został model numeryczny z wykorzystaniem opartego na metodzie elementów skończonych programu Phase2, w celu określenia możliwości prognozowania zasięgu stref spękań.. Na koniec wykonano analizę porównawczą wyników badań dołowych z wynikami z modelu numerycznego.

Abstract: This article presents the results of underground research on the extent of the rock mass fracture zone around excavation with rock bolts only. The measurements were conducted by borehole endoscope in the gallery Bw-1n in the 401 coal seam, which is being drilled by Bolter Miner entry driver. A numerical model was also built using the finite element-based program Phase2 to evaluate the fracture zone extent. Finally, the results of the underground research with the results of the numerical model were compared.

Słowa kluczowe:

górnictwo, obudowa kotwowa, strefa spękań, badania kopalniane, modelowanie numeryczne

Keywords:

mining, rockbolt support, fractured rock, mass zone, underground measurements, numerical modeling

*⁾ JSW S.A. KWK Budryk, **⁾ AGH w Krakowie

1. Wprowadzenie

Wieloletnia eksploatacja pokładów węgla kamiennego w górnictwie polskim powoduje konieczność sięgania do pokładów zalegających na coraz większych głębokościach. Zwiększona głębokość niesie za sobą wzrost kosztów spowodowanych nie tylko potrzebą pogłębiania szybów i utrzymaniem większej liczby wyrobisk korytarzowych, ale także generuje wzmożone zagrożenia naturalne, takie jak: zagrożenie metanowe, pożarowe, tąpnięciami, klimatyczne i inne. Duża głębokość polskich kopalń sprawia, że koniecznym jest stosowanie obudowy z coraz większego kształtownika, lepszej stali (Rotkegel 2013) oraz o mniejszym rozstawie. Rejony wydobywcze są coraz bardziej oddalone od szybów, co skutkuje wydłużonym transportem na miejsce pracy, a co za tym idzie skrócony zostaje efektywny czas pracy załogi.

Wszystkie przedstawione wyżej przyczyny sprawiają, że koszty wydobywania węgla rosną. Jednym ze sposobów ich obniżenia jest optymalizacja prac związanych z drążeniem wyrobisk korytarzowych podczas prowadzenia robót udostępniających i przygotowawczych. Głównym problemem, z jakimi borykają się kopalnie węgla kamiennego są małe postępy robót korytarzowych oraz duże koszty obecnie stosowanej obudowy stalowej.

Jednym ze sposobów optymalizacji procesów produkcyjnych w kopalniach JSW S.A. jest wprowadzenie samodzielnej obudowy kotwowej. Jest to kolejna próba wprowadzenia tego typu obudowy do polskiego górnictwa węgla kamiennego. Ostatnie takie działania zakrojone na szeroką skalę miały miejsce w polskim górnictwie około 20 lat temu (Nierobisz 1999; Stopyra i in. 2000; Szymiczek i in. 2001; Majcherczyk, Niedbalski 2003).

W przypadku stosowania samodzielnej obudowy kotwowej bardzo ważnym aspektem przy projektowaniu tego typu obudowy jest wyznaczenie strefy spękań górotworu wokół projektowanego wyrobiska w celu określenia parametrów obudowy kotwowej - m.in. rodzaj, typ i długość kotew, rozstaw zasadniczej siatki kotwienia, sposób oraz częstotliwość monitoringu. Układ spękań wokół wyrobiska, jego zasięg i rodzaj powierzchni zniszczenia są efektem wszystkich czynników geomechanicznych, geologicznych i górniczych, jakie wpływają na stan naprężenia i odkształcenia w rejonie działalności górniczej. Powiększająca się strefa spękań wokół chodnika wpływa na wzrost obciążenia obudowy, a przez to jest jednym z głównych czynników decydujących o stateczności wyrobisk (Majcherczyk i in. 2012; Walentek 2018). Większość zjawisk związanych z utratą stateczności wyrobisk spowodowana jest nadmiernym spękaniem górotworu w jego otoczeniu (Małkowski 2013). Powstające wokół wyrobiska strefy zniszczenia masywu skalnego tworzą się stopniowo przede wszystkim na skutek uginania warstw skalnych i ich sukcesywnego pęknięcia (Chudek 2002). W celu obliczenia zasięgu strefy spękań wokół wyrobisk korytarzowych stosowano głównie metody analityczne (Kłeczek 1994). Aktualnie do wyznaczenia zasięgu strefy spękań wokół wyrobiska częściej niż metody analityczne stosuje się metody numeryczne, ponieważ pozwalają one na uwzględnienie znacznie większej liczby czynników i parametrów wpływających na stateczność wyrobiska (Filcek i in. 1994). Jedynym sposobem weryfikacji poczynionych prognoz jest bezpośredni pomiar i obserwacje stref spękań w górotworze (Stopyra i in. 1998; Małkowski 2003; Majcherczyk i in. 2006).

W artykule przedstawione zostały wyniki badań zasięgu strefy spękań wykonane przy pomocy endoskopu otworowego w wyrobisku wykonanym w samodzielnej obudowie kotwowej za pomocą kombajnu Bolter Miner. Na podstawie dostępnych danych geologicznych i górniczych przeprowadzono

obliczenia numeryczne zasięgu strefy spękań i porównano je z wynikami obliczeń analitycznych oraz z wykonanymi pomiarami.

2. Miejsce pomiarów

Badania przeprowadzono w chodniku Bw-1n badawczym w pokładzie 401 wykonanym w samodzielnej obudowie kotwowej w JSW S.A. KWK „Budryk”. Miąższość pokładu 401 w analizowanym rejonie waha się w granicach 0,8 – 1,4 m, nachylenie pokładu 0 – 9°. Rozpatrywane wyrobisko korytarzowe zlokalizowane jest na głębokości około 880 m. Na jego wybiegu nieprzewidywane były uskoki oraz wpływ krawędzi eksploatacyjnych. Spodziewana wartość naprężenia pionowego wynosi 22,5 MPa. W artykule przeanalizowane zostały dwa stanowiska pomiarowe, zlokalizowane na pierwszym około 200 metrowym odcinku wykonanym w samodzielnej obudowie kotwowej.

Strop pokładu 401 zbudowany jest z warstw łupka ilastego zapiaszczonego w zróżnicowanym stopniu. Powyżej stropu bezpośredniego zalega warstwa piaskowca drobnoziarnistego o miąższości około 1,5 m, nad którą zalega warstwa łupka ilastego. W sągu pokładu również zalega łupek ilasty. Podstawowe właściwości skał w tym rejonie przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka warunków górniczo-geologicznych w rejonie prowadzonych badań (Masny i in. 2019a; 2020a)

Table 1. Characteristics of mining and geological conditions in the area of the research (Masny et al. 2019a; 2020a)

Identyfikacja otworu	Cecha wyrobiska m	RQD %	Wytrzymałość na ściskanie R_c MPa		
			strop	węgiel	spąg
Gp38(2019)1-3	80,8	50,9	38,47	7,21	12,23
Gp38(2019)4-6	165	58,9	40,76	7,29	9,01

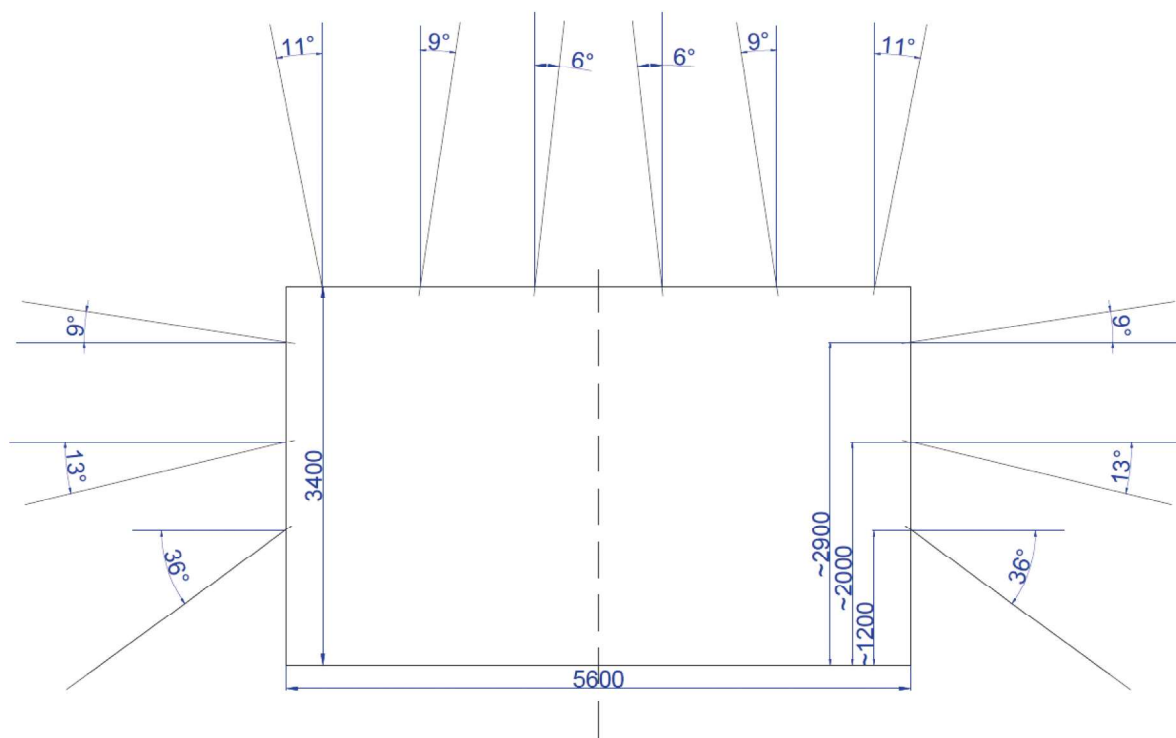
Wyrobisko drążone jest przy pomocy kombajnu typu Bolter Miner w przekroju prostokątnym. Zasadnicza siatka kotwienia składa się z 6 kotew stalowych długości 2,5 m (2,4 m w górotworze) w stropie oraz 6 kotew stalowych długości 2,5 m (2,4 m w górotworze) w ociosach – rysunek 1. Nośność każdej z kotwi wynosi 260 kN. Wklejane są one na ładunkach klejowych o sumarycznej długości 1250 mm z czasem żelowania 20 s (500 mm) i 180 s (750 mm) (Masny i in. 2018).

2.1. Metodyka pomiarów

Ocena zasięgu strefy spękań wykonana została przy pomocy kamery endoskopowej wprowadzanej do wcześniej wywierconego otworu wiertniczego. Przy pomocy badań endoskopowych wyznaczona została ilość spękań co pozwala określić podzielną warstw stropowych oraz ich stopień zniszczenia.

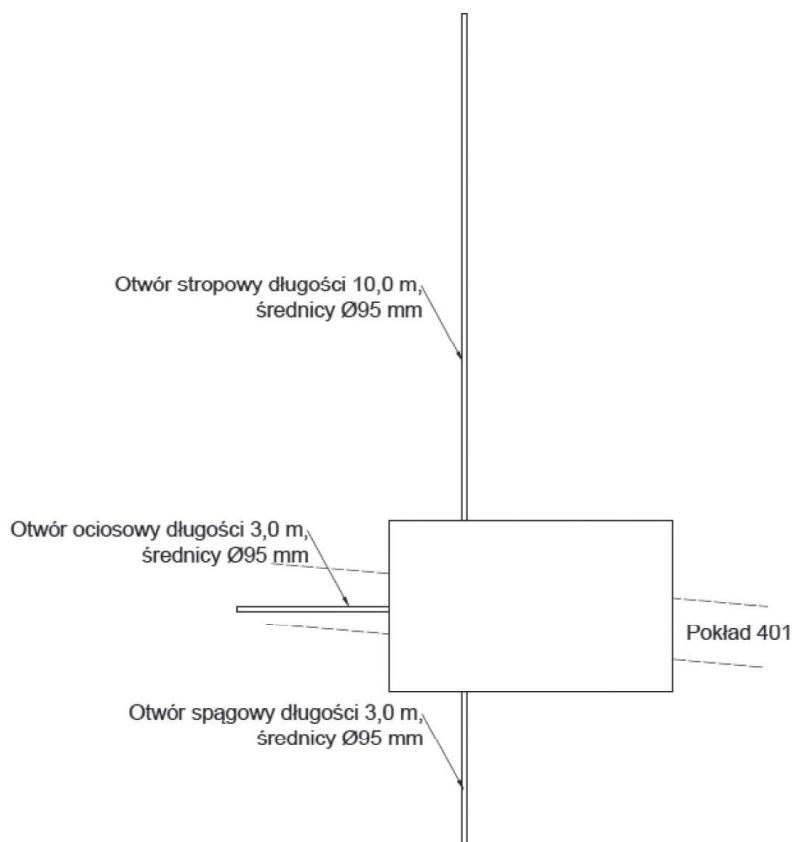
Pomiary prowadzone były w 2 bazach pomiarowych. Schemat bazy pomiarowej wraz rozmieszczeniem otworów przedstawiony został na rysunku 2. W pierwszej kolejności w otworach tych wykonywane były badania penetrometryczne, a następnie przy pomocy kamery endoskopowej z wizjerem umiejscowionym w bocznej ścianie głowicy przeprowadzono badania położenia spękań w profilu otworu.

Ponadto doraźnie wykonywano badania w otworach kotwowych o średnicy \varnothing 29 mm. Długość wierconych otworów



Rys. 1. Zasadnicza siatka kotwienia (Masny i in. 2018)

Fig. 1. Main rockbolting schema anchoring mesh (Masny et al. 2018)



Rys.2. Schemat stanowiska pomiarowego

Fig. 2. Scheme of measurement station

jest różna w zależności od potrzeb i waha się w przedziale 2,5 – 10 m. Kamera endoskopowa, którą wykonuje się badania w

otworach kotwowych, posiada wizjer umiejscowiony czołowo w korpusie kamery.

3. Wyniki i analiza pomiarów zasięgu strefy spękań metodą endoskopową

3.1. Badania przeprowadzone w otworach wiertniczych

Na stacji pomiarowej nr 1 (80,8 mb) w otworze stropowym zaobserwowano spękania w postaci 2 szczelin usytuowanych na metrażu 0,6 m oraz 0,9 m od wlotu. Niewielkie zniszczenia warstw stropowych potwierdzają badania podzielności rdzenia wiertniczego RQD , które wskazują, że dla pakietu skał stropowych o grubości 3,0 m RQD wynosi 52% (tabela 1). Przeprowadzone pomiary penetrometryczne wytrzymałości skał na ściskanie R_c dla całego badanego otworu wskazują na wartość 38,71 MPa (Masny i in. 2019a). Reasumując, można przyjąć, że skały stropowe, w miejscu wykonywanych badań są dość mocne i nie powinny ulegać nadmiernej degradacji.

W otworze ociosowym stwierdzono zaleganie węgla pokładu 401. Otwór ten był spękany na całej badanej długości (3 m), co świadczy o niskiej wytrzymałości na ściskanie węgla, którą określono na 7,21 MPa. Otwór wykonany w spągu przebadano do głębokości 2,1 m, gdzie stwierdzono zwierciadło wody. Spękanie skał zostało zaobserwowane w postaci 2 szczelin położonych na głębokości 1,7 m oraz 2,1 m (Masny i in. 2019b). Zasięg zbadanej strefy spękań na pierwszym stanowisku pomiarowym przedstawiono na rysunku 3a.

W otworze stropowym na drugiej stacji pomiarowej (165 mb) nie stwierdzono żadnych spękań. Świadczy to o zaleganiu w stropie pokładu mocnych skał (wg badań jest to łupek ilasty zapiaszczony). Potwierdzają to pomiary RQD , bowiem dla

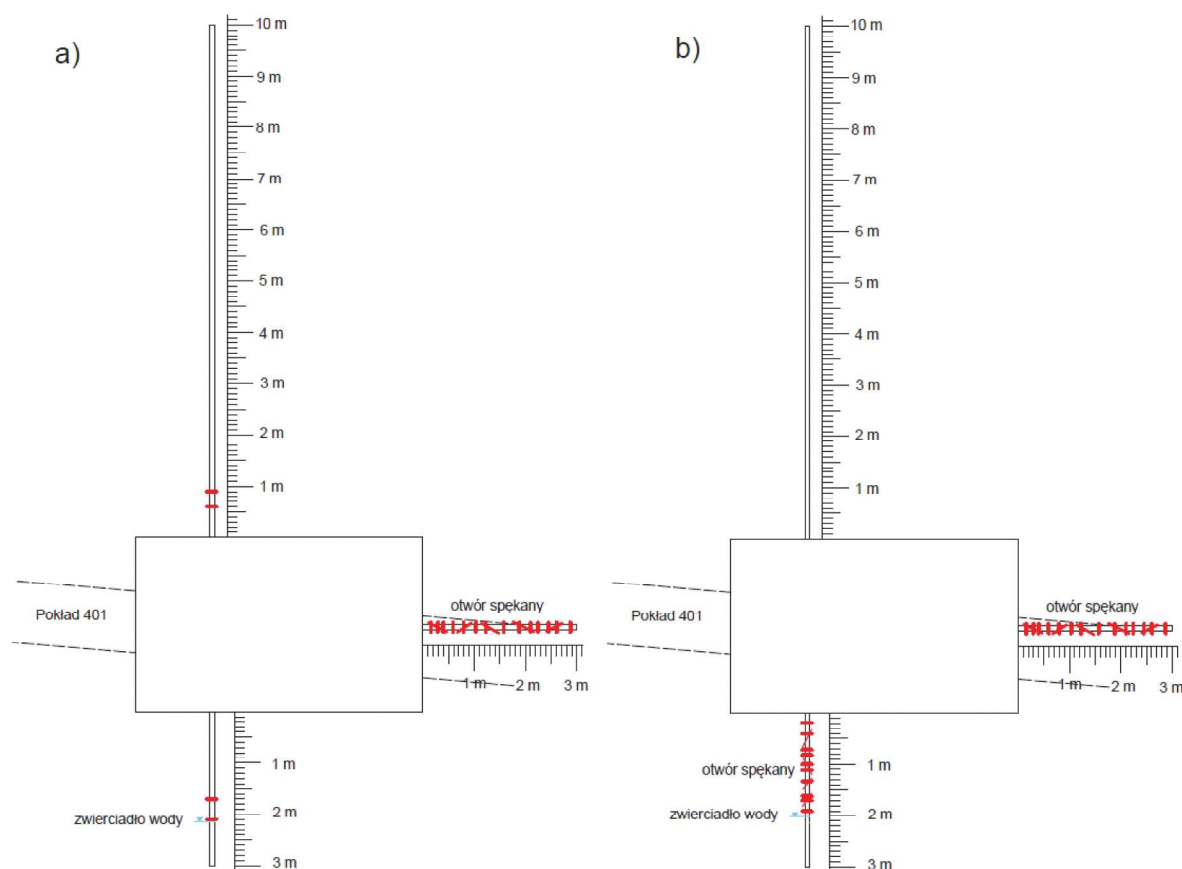
pakietu skał długości 3 m wartość parametru wynosi 66,8 %. Wytrzymałość skał na ściskanie R_c określona za pomocą penetrometru wykazuje dla pakietu skał z całej długości otworu wartość średnią 40,76 MPa.

Otwór ociosowy wywierony w pokładzie 401 wykazał znaczne spękania na całej długości. Podobny wynik uzyskano w otworze spągowym, gdzie stwierdzono liczne spękania od wlotu otworu do poziomu zwierciadła wody, które znajdowało się na głębokości 2,0 m (Masny i in. 2020b). Niską wytrzymałość na ściskanie skał ociosowych i spągowych potwierdzają pomiary penetrometryczne, wg których wartość średnia dla otworu ociosowego wynosi $R_c = 7,67$ MPa, a dla całego otworu spągowego $R_c = 9$ MPa (Masny i in. 2020a).

Zasięg strefy spękań w obrębie drugiej stacji pomiarowej przedstawia rysunek 3b. Odległość pomiędzy punktem pomiarowym pierwszym i drugim wynosi około 85 m. Analizując badania w obydwu bazach pomiarowych można stwierdzić, że warunki górniczo-geologiczne są podobne, a górotwór w miarę jednorodny, co przekłada się na brak zmian w siatce kotwienia (tabela 1).

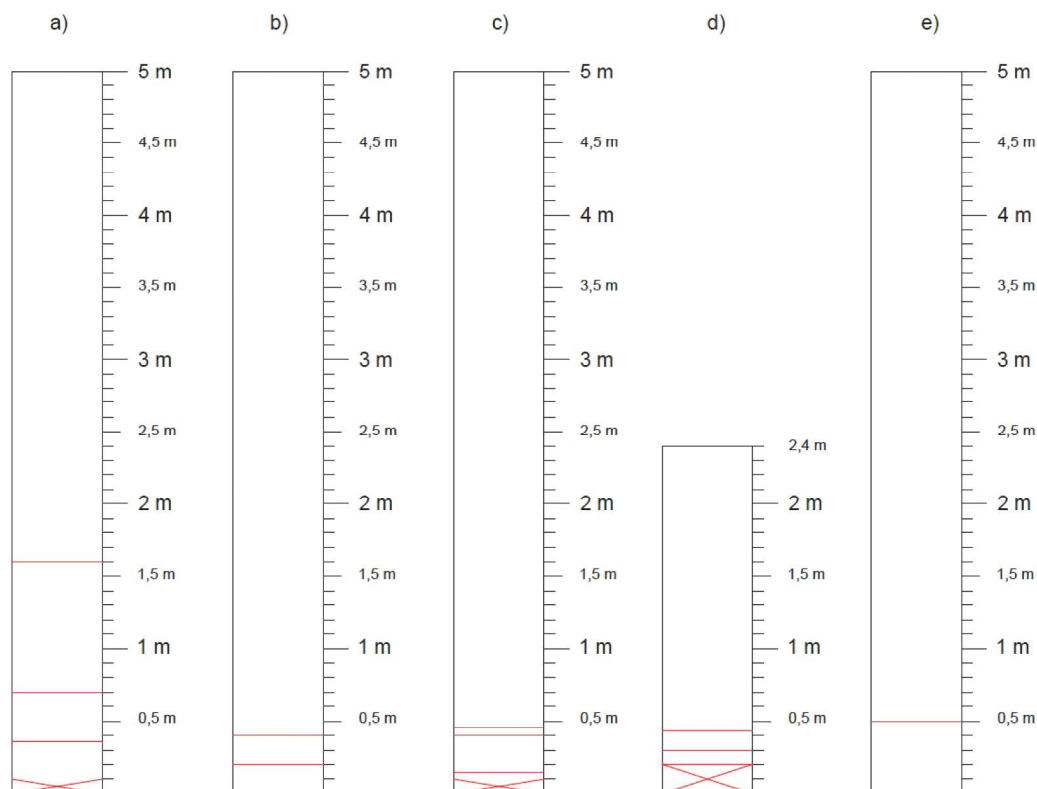
3.2. Badania przeprowadzone w otworach kotwowych

W odległości 36 m od pierwszej stacji pomiarowej (45 mb wyrobiska), w stropie wyrobiska wykonany został otwór badawczy o średnicy $\varnothing 29$ mm i długości 5,0 m. Badania zasięgu strefy spękań przeprowadzono w momencie, gdy czoło przodka znajdowało się w odległości 237 m od miejsca prowadzenia badań. W otworze tym odnotowano kilka spękań, największe na wlocie otworu, następnie na wysokości 0,35



Rys. 3. Zasięg strefy spękań na stanowiskach pomiarowych: a) cecha 80,8 mb (Masny i in. 2019b); b) cecha 165 mb (Masny i in. 2020b)

Fig. 3. The extent of the cracking zone at the measuring stations: a) measurement 80,8 m (Masny et al. 2019b); b) measurement 165 m (Masny et al. 2020b)



Rys. 4. Lokalizacja spękań w otworach badawczych \varnothing 29 mm: a) cecha 45 mb, b) 89 mb, c) 124 mb, d) 124 mb - kąt 75° , e) 192 mb.

Fig. 4. Location of cracks in boreholes \varnothing 29 mm: a) measurement 45 m, b) 89 m, c) 124 m, d) 124 m - angle 75° , e) 192 m.

m oraz 0,70 m (rysunek 4a). Ostatnie będące granicą strefy spękań w tym miejscu uzyskano na 1,60 m. W porównaniu do badań endoskopowych w stropie, pierwszej bazy pomiarowej (80,8 mb – rys. 3a) jest to wzrost zasięgu strefy zniszczenia o 0,70 m.

Na 89 mb wyrobiska (8 m od stacji pomiarowej nr 1) ponownie wykonane zostały w stropie badania przy pomocy kamery endoskopowej w otworze kotwowym o długości 5,0 m. Zostały one przeprowadzone w odległości 193 m od czoła przodka. Zaobserwowane zostały dwa pęknięcia, jedno w odległości 0,20 m, drugie 0,40 m (rysunek 4b). Zestawiając te wyniki z obserwacjami strefy zniszczenia na pierwszej stacji pomiarowej (pkt. 4.1) zauważa się, że ilość powstałych spękań jest identyczna, jedynie zasięg strefy spękań różni się o 0,50 m.

Na 124 mb wyrobiska, tj. pomiędzy stacjami pomiarowymi nr 1 i nr 2, przy pomocy kotwiarki wykonane zostały w stropie dwa otwory. Pierwszy prostopadle do stropu o długości 5,0 m, drugi pod kątem ok. 75° o długości 2,5 m. Badane otwory wiercone były w odległości około 74 m od czoła przodka. Badania w obydwu otworach wykazały spękania od wlotu otworu do max. 0,45 m (rysunki 4c, 4d, 5a). Kolejne pomiary w tych samych otworach przeprowadzone zostały w momencie, gdy przodek wyrobiska znajdował się w odległości 158 m od otworów. Badanie powtórne nie wykazało powstania nowych szczelin lub spękań, ale zaobserwowano nieznaczne zwiększenie rozwarcia istniejących szczelin. Maksymalny zasięg strefy spękań w otworze nadal wynosił 0,45 m (rysunek 5b). Kolejne badania zostały przeprowadzone, gdy odległość do czoła przodka wynosiła 402 m. Nie zaobserwowano żadnych zmian w stosunku do poprzednich badań (rysunek 5c), przez co należy założyć, że ustalił się wtórny stan naprężeń i nie

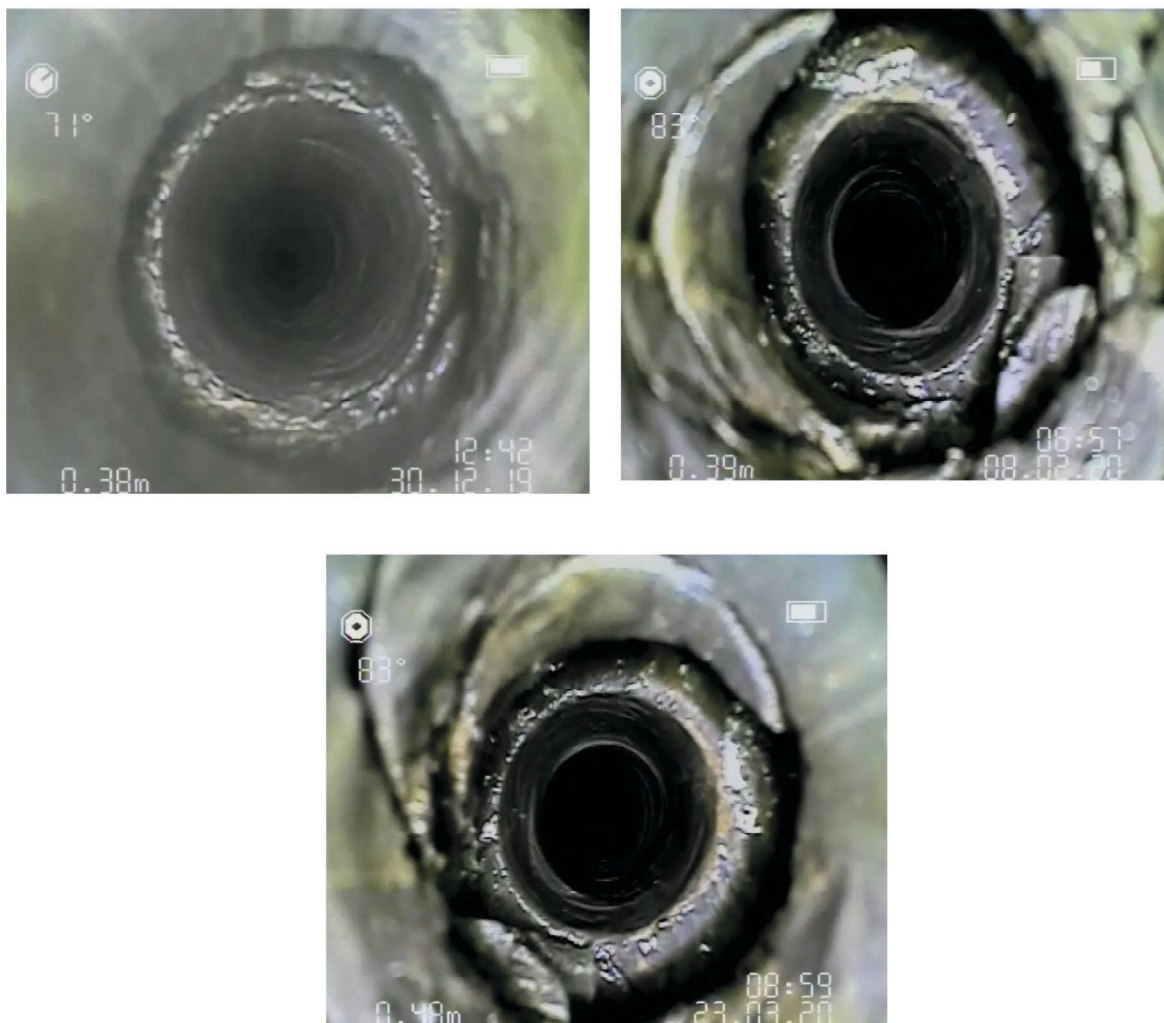
powinna następować propagacja nieciągłości. Porównując te pomiary z badaniami na pierwszej oraz drugiej stacji pomiarowej można stwierdzić, że warunki geomechaniczne są w miarę jednorodne, gdyż zasięg strefy spękań w stropie dla obydwu pomiarów jest niewielki i różni się o 0,45 m.

W odległości 27 m od stacji pomiarowej nr 2 (192 mb wyrobiska) wykonane zostały badania endoskopowe otworu stropowego \varnothing 29 mm o długości 5,0 m. Badania te zostały przeprowadzone w odległości około 90 m od czoła przodka. Wykazały one, że nie ma większych różnic w stosunku do pomiarów w otworach stropowych na 80,8 i 165 m. Zaobserwowano tylko jedno pęknięcie w odległości ok. 0,5 m od wlotu otworu (rysunek 4e).

4. Szacowanie zasięgu strefy spękań wokół wyrobiska w samodzielnej obudowie kotwowej metodą numeryczną

Do modelowania zasięgu strefy spękań w górotworze wokół wyrobiska w samodzielnej obudowie kotwowej wykorzystano program Phase2, oparty na metodzie elementów skończonych (MES). Obliczenia numeryczne wykonywane są na modelach płaskich i przestrzennych zależnie od własności, geometrii, obciążenia czy warunków brzegowych. W obliczeniach określa się korelację pomiędzy naprężeniem, przemieszczeniem i odkształceniem.

Jednym z podstawowych celów modelowania jest ustalenie wielkości zasięgu strefy zniszczenia wokół wyrobiska oraz przemieszczeń konturu wyrobiska (Cała i in. 2012). Bardzo ważne w modelowaniu numerycznym jest właściwe rozpoznanie warunków geologicznych, w tym rodzaj, miąższość,



Rys. 5. Zdjęcia z kamery endoskopowej przedstawiające spękania w otworze badawczym usytuowanym na 124 mb wyrobiska: a) 74 m od czoła przodka; b) 158 m od czoła przodka; c) 402 m od czoła przodka

Fig. 5. Introscope camera pictures displaying cracks in the borehole: a) 74 m from the forehead; b) 158 m from the forehead; c) 402 m from the forehead

ułożenie warstw skalnych, własności geomechaniczne skał, właściwy dobór modelu fizycznego, opisującego zachowanie górotworu, dobór właściwego kryterium wytrzymałościowego (Jing 2003).

W celu zbadania zasięgu strefy spękań wokół wyrobiska w samodzielnej obudowie kotwowej zbudowany został model numeryczny górotworu w postaci płaskiej tarczy o szerokości 75 m i wysokości 100 m. Rodzaj skał oraz ich układ przyjęto z badań rdzenia wiertniczego w rejonie 165 mb przedmiotowego wyrobiska oraz wg profilu geologicznego otworu Chudów 7. Fragment modelu numerycznego górotworu przedstawia rysunek 6. W obliczeniach przyjęto kryterium wytrzymałościowe Mohra-Coulomba. W analizie uwzględniono dwa modele, tj. w pierwszym założono, że warstwy stropowe i spągowe są jednorodne, w drugim zaś założono niejednorodność tych warstw, zgodnie z obserwacjami kopalnianymi.

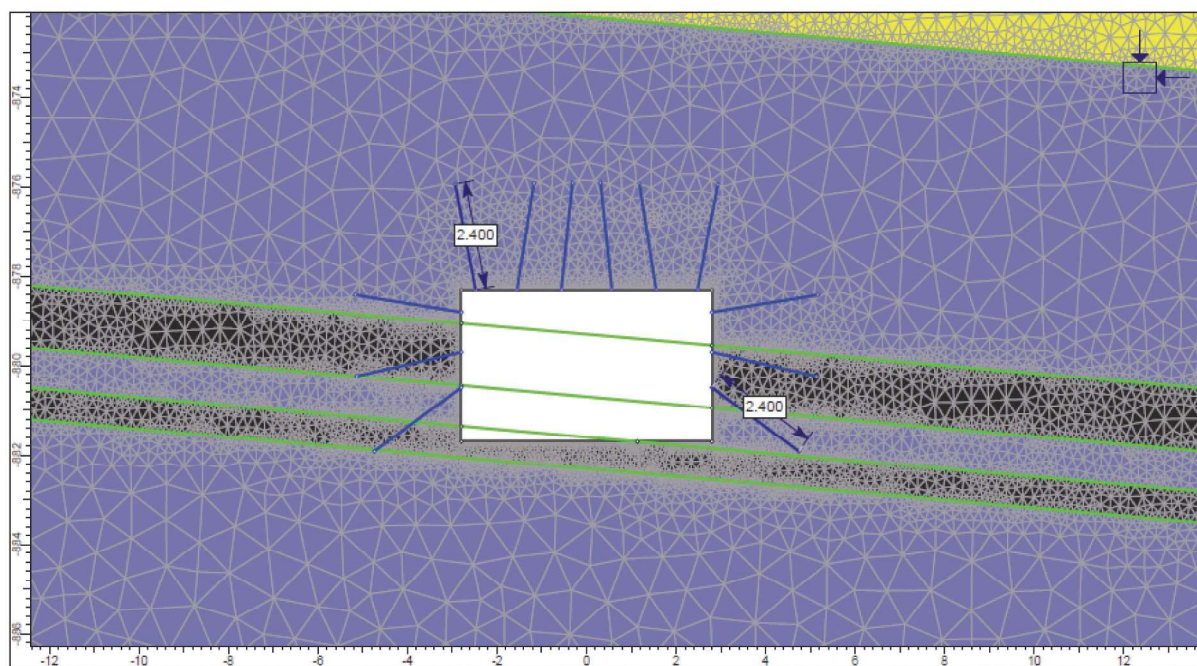
Wartości parametrów poszczególnych warstw skalnych, w tym moduł Younga E , współczynnik Poissona ν , wytrzymałość na rozciąganie R_t , kąt tarcia wewnętrznego ϕ , przyjęte zostały na podstawie badań penetrometrycznych i laboratoryjnych (tabela 2). Spójność c została wyliczona na podstawie zależności między wytrzymałością na ściskanie oraz wytrzymałością na rozciąganie (Majcherczyk i in. 2006):

$$c = 0,5\sqrt{R_c R_r} \quad (1)$$

gdzie:

R_c – wytrzymałość na ściskanie,
 R_r – wytrzymałość na rozciąganie.

W modelu numerycznym została odwzorowana obudowa w postaci kotew stalowych dla danego wyrobiska, przy czym przyjęte parametry odpowiadają materiałowi kotew. Na podstawie wyników badań stanu naprężenia w górotworze przeprowadzonych w rejonie projektowanego przez firmę Golder Associates (UK) Ltd (Golder ... 2018) przyjęto, że stosunek naprężenia poziomego do naprężenia pionowego, zwany współczynnikiem rozporu bocznego λ (Majcherczyk i in. 2006; Meng i in. 2011) wynosi $\frac{\sigma_x}{\sigma_z} = 103$. W modelu tym zasymulowano wpływ kierunku maksymalnego naprężenia poziomego na kierunek drążenia wyrobiska poprzez określenie stosunku naprężenia poziomego do pionowego „out of plane”, czyli naprężenia działającego prostopadle do tarczy modelu. Stosunek ten wynosi 0,75 (Golder ... 2018). Ponadto przyjęto, że modelowany górotwór jest ośrodkiem sprężysto-plastycznym i izotropowym oraz nie ma możliwości przemieszczeń poziomych na pionowych i poziomych krawędziach modelu. Model obliczeń obejmuje trzy etapy.



Rys. 6. Fragment modelu numerycznego górotworu

Fig. 6. Fragment of the numerical model of the rock mass

Tabela 2. Parametry warstw skalnych w rejonie Chodnika Bw-1n badawczego w pokł. 401 przyjęte do obliczeń numerycznych

Table 2. Parameters of rock layers in the area of the research adopted for numerical calculations

Rodzaj skały	Moduł Younga E [MPa]	Współczynnik Poissona ν	Wytrzymałość na rozciąganie R_r [MPa]	Kąt tarcia wewnętrzznego φ [°]	Spójność c [MPa]
węgiel	1900	0,3	0,33	30	1,33
Łupek ilasty 1 - strop	6940	0,18	3,34	32	5,36
Łupek ilasty 2 - strop	6780	0,18	2,88	32	4,94
Piaskowiec -strop	9250	0,15	5,5	35	11
Łupek ilasty 1 - spąg	6320	0,20	1,8	28	2,4
Łupek ilasty 2 - spąg	6640	0,18	3,24	32	5

W pierwszym etapie prezentowany jest model kalibracyjny przed wykonaniem projektowanego wyrobiska. Etap drugi, odzwierciedla stan naprężenia górotworu bezpośrednio po urobieniu, a przed wykonaniem obudowy kotwowej, co pozwala na częściowe odprężenie górotworu. Etap trzeci przedstawia rozkład naprężenia wokół wykonanego wyrobiska wraz z zastosowaniem samodzielnej obudowy kotwowej.

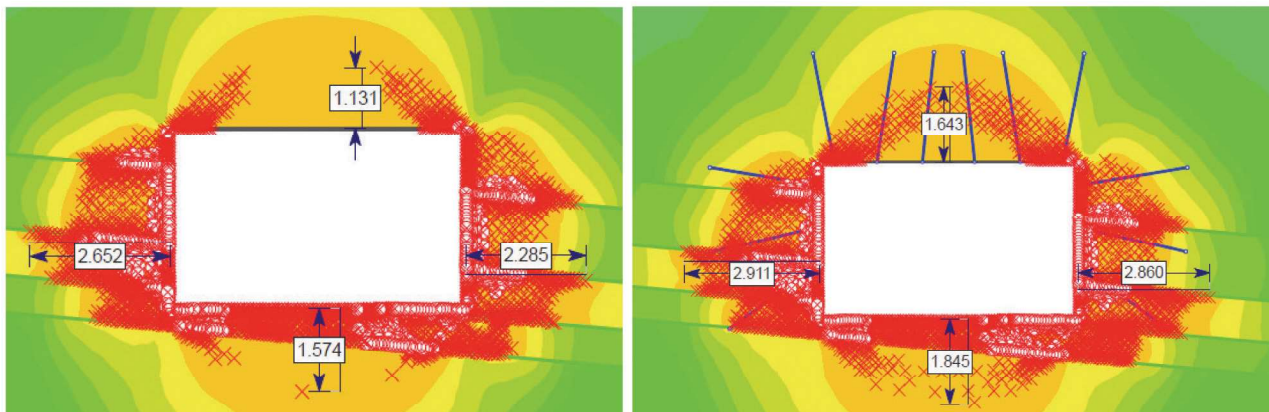
4.1. Analiza wyników obliczeń dla modelu I

W pierwszej kolejności przeanalizowano model, w którym warstwy stropowe i spągowe łupku ilastego (lokalnie zapiaszczonego) są jednorodne i posiadają zgodnie z danymi geologicznymi miąższość kilku metrów.

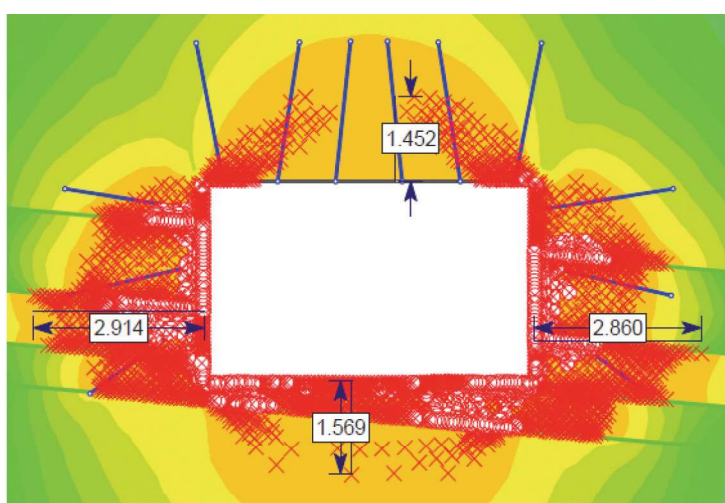
W pierwszym etapie obliczeń, czyli przed wykonaniem wyrobiska, model został zrównoważony i wyzerowane zostały wartości przemieszczeń. Strefa spękań wokół wyrobiska po bezpośrednim otwarciu stropu (etap 2) przedstawiona została na rysunku 7a. Analizując wartości prognozowanych stref spękań można zauważyć, że wartość zasięgu strefy spękań w stropie kształtuje się na poziomie 1,1 m, w spągu do 1,6 m, natomiast w ociosach do 2,7 m. Strefa spękań w etapie nr 3, czyli po zabudowie obudowy kotwowej, nieznacznie zwiększa się, tj. w stropie, prognozowany zasięg dochodzi do 1,65 m.

Podobnie sytuacja przedstawia się w ociosach oraz spągu, gdzie strefa spękań zwiększa swój zasięg do odpowiednio 2,9 m - ociosy oraz 1,85 m - spąg (rysunek 7b). W środkowej części stropu bezpośredniego wyrobiska można zauważyć brak strefy spękań. Dopiero w odległości około 0,7-0,8 m od stropu prognozowana jest strefa zniszczenia. Powyższe wynika z wartości poziomych naprężeń pionowych przyjętych zgodnie z posiadanymi badaniami.

Dla wykazania wagi rzeczywistych wartości naprężeń poziomych, przeanalizowany został zasięg strefy spękań dla modelu numerycznego, w którym przyjęty został hydrostatyczny stan naprężenia ($p_x = p_y = p_z = p$), który przyjmuje się dla głębokich wyrobisk w przypadku braku wystarczających informacji odnośnie pierwotnego stanu naprężenia. Porównując przedmiotowe modele można zauważyć, że w przypadku modelu uwzględniającego hydrostatyczny stan naprężeń, w środkowej części stropu wyrobiska uzyskano brak stref uplastycznienia masywu skalnego (rysunek 8). Przewidywany zasięg strefy spękań jest o około 0,2 m mniejszy niż w przypadku modelu uwzględniającego naprężenia poziome. Żeby zweryfikować to z warunkami rzeczywistymi niezbędne są dodatkowe badania kopalniane przy pomocy metod endoskopowych rozmieszczonych w różnych miejscach przekroju poprzecznego wyrobiska.



Rys. 7. Zasięg strefy spękań dla modelu numerycznego: a) etap 2; b) etap 3
 Fig. 7. The range of the fractured rock mass zone for numerical model: a) stage 2; b) stage 3



Rys. 8. Zasięg strefy spękań dla modelu numerycznego z przyjętym stanem hydrostatycznym
 Fig. 8. The range of the fractured rock mass zone for numerical model with hydrostatic state

Wartości zasięgu strefy spękań w stropie, ociosach i spągu są zbliżone dla obydwu modeli. Jedynie w spągu, biorąc pod uwagę model uwzględniający naprężenia poziome, prognozowany zasięg strefy spękań jest większy o około 0,3 m.

4.1. Analiza wyników obliczeń dla modelu I

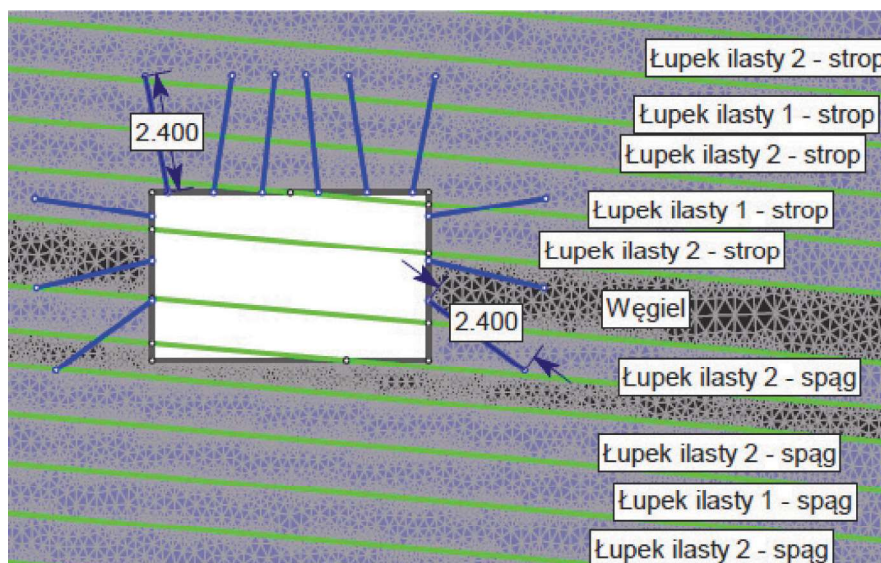
W celach porównawczych oraz przybliżenia modelu bardziej do rzeczywistego charakteru warstw łupkowych w stropie i spągu wyrobiska, skonstruowany został model numeryczny górotworu uwzględniający uwarstwienie tych warstw (łupek ilasty zapiaszczony). Zamodelowane zostały warstwy o miąższości 1 m o nieco odmiennych parametrach. Warstwy występują naprzemiennie zgodnie z rysunkiem 9 i posiadają własności przedstawione w tabeli 2.

Zasięg strefy spękań w stropie i spągu wyrobiska dla modelu z uwarstwieniem łupku ilastego jest zdecydowanie większy (rys. 10) niż dla jednolitego masywu skalnego (rys. 7). W przypadku stropu przewidywana strefa zniszczenia sięga 2,1 m, czyli jest większa o około 0,55 m, w spągu jej zasięg jest równy 3,7 m, to o około 1,9 m więcej niż w przypadku modelu bez zasymulowania uwarstwienia. W przypadku ociosów prognozowany zasięg strefy spękań jest mniejszy o około 0,4 m i wynosi 2,5 m. Powyższe wskazuje, że w przypadku

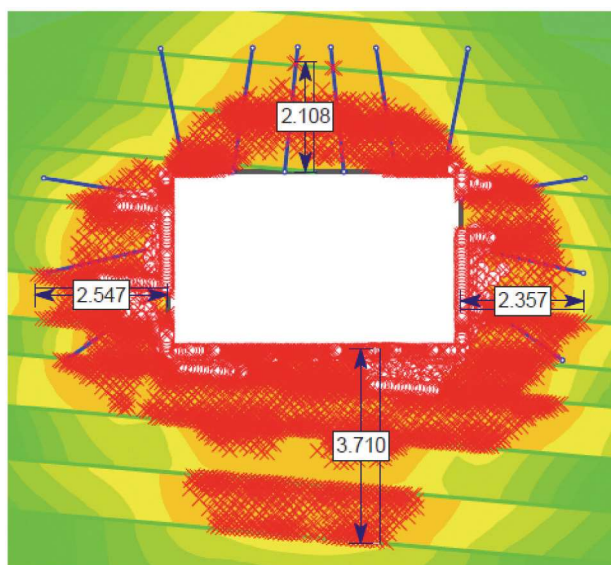
prognozy strefy spękań dla wyrobisk projektowanych należy modelować zjawiska wariantowo, wskazując na możliwy zakres zasięgu strefy spękań w zależności od charakteru skał otaczających.

5. Porównanie wyników zasięgu strefy spękań dla badań dołowych oraz modeli numerycznych

Przedstawione rezultaty badań dołowych oraz badania w oparciu o modelowanie numeryczne wskazują, że uzyskany w modelach numerycznych zasięg strefy spękań w stropie, ociosach i spągu wyrobiska jest porównywalny z wynikami badań dołowych (rys. 11). Do porównania przyjęty został model uwzględniający rzeczywiste pierwotne naprężenia poziome (rysunek 7b), gdyż jest on najbliższy wynikom badań rzeczywistych. Największe rozbieżności zauważalne są w stropie, gdzie zasięg strefy spękań wg badań dołowych zmienia się z całkowitego braku nieciągłości do maksymalnej wartości 1,6 m, natomiast dla modelu numerycznego prognozuje się go do 1,6 m. W przypadku spągu różnica w zasięgu strefy spękań dla pomiarów kopalnianych oraz modelu numerycznego wynosi 0,2 m. Jednak należy zauważyć, że dla badań dołowych w spągu na głębokości 2,1 m pojawiło się



Rys. 9. Model numeryczny górotworu uwzględniający uwarstwienie łupka
Fig. 9. Numerical model of the rock mass with layered shale



Rys. 10. Zasięg strefy spękań dla modelu numerycznego z uwarstwowym łupkiem
Fig. 10. The range of the fractured rock mass zone for numerical model with layered shale

zwierciadło wody, co mogło spowodować niedoszacowanie faktycznej granicy strefy zniszczenia. W przypadku ociosów istnieje prawdopodobieństwo, że długość otworu ociosowego jest niewystarczająca, co może utrudniać, w pełni określić rzeczywisty zasięg spękań w ociosie wyrobiska. Jednak należy zakładać, że jest on zbliżony do modelu.

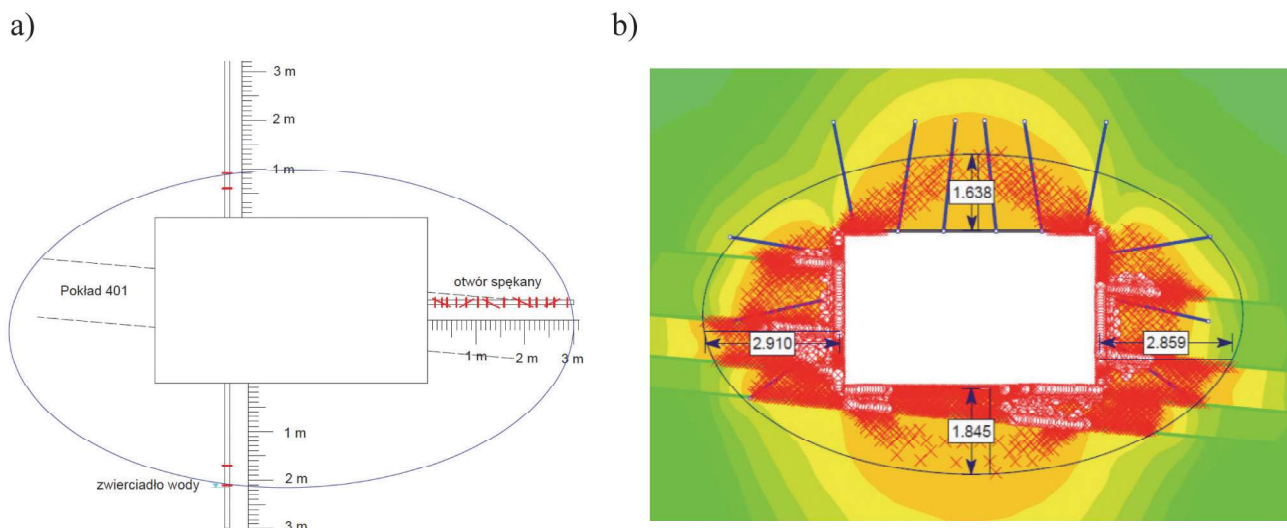
Z teoretycznych rozważań m.in. Protodiakonowa, Cymbariewicza, Sałustowicza (Kłeczek 1994) wynika, że strefa spękań masywu skalnego wokół wyrobisk korytarzowych może przyjmować kształt elipsy bądź wycinka paraboli. Opierając się na rezultatach badań dołowych, określony został przypuszczalny kształt strefy zniszczenia górotworu wokół wyrobiska w samodzielnej obudowie kotwowej. Kształt ten wyznaczono przy pomocy elipsy, której wierzchołki stanowią najdalej położone spękania w otworze: stropowym, spągowym i ociosowym, co przedstawia rysunek 11a. W przypadku

modelu numerycznego przypuszczalny kształt strefy spękań również przyjmuje kształty elipsy wg rysunku 11b.

6. Podsumowanie i wnioski

Analiza badań dołowych oraz szeregu obliczeń numerycznych pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

- Badany odcinek 200 m wyrobiska wykonanego w samodzielnej obudowie kotwowej wykazał się bardzo stabilnymi warunkami górniczo-geologicznymi. Zasięg strefy spękań określany po kilku miesiącach od wydrążenia osiągnął maksymalną wartość 1,60 m. Badania w otworach stropowych wykazały maksymalnie kilka spękań, a większość z nich miała miejsce do 0,4 m od stropu wyrobiska.



Rys. 11. Porównanie wyników dołowych badań strefy spękań z wynikami modelowania numerycznego: a) badania kopalniane (Masny i in. 2019b), b) modelowanie numeryczne

Fig. 11. Comparison of the results of underground fracture zone measurements with the results of numerical modeling: a) mine research (Masny et al. 2019b) b) numerical modeling

- Prawidłowe określenie zasięgu strefy spękań jest jednym z najważniejszych elementów przy projektowaniu parametrów samodzielnej obudowy kotwowej, w celu utrzymania stateczności i funkcjonalności wyrobiska przez cały okres użytkowania.
- Przeprowadzone analizy wyników badań oraz obliczeń wskazują, że modelowanie numeryczne dość dobrze oddaje zachowanie górotworu w naturze. Uzyskane zasięgi stref uplastycznienia są zbliżone do tych stwierdzonych badaniami endoskopowymi. Należy jednak zaznaczyć, że duży wpływ na uzyskiwane rezultaty ma rzeczywisty pierwotny stan naprężeń oraz uwarstwienie górotworu, nawet w obrębie jednej warstwy litologicznej.
- Przewidywany kształt strefy spękań jest zbliżony do elipsy, co pokazują badania kopalniane oraz obliczenia numeryczne.

Literatura

- CAŁA M., STOPKOWICZ A., KOWALSKI M., BETLEJ M. 2012 - Modelowanie numeryczne zasięgu strefy spękań i zawału w otoczeniu wyrobisk eksploatacyjnych. Zagrożenia i technologie, praca pod kierunkiem J. Kabieszka, Główny Instytut Górnictwa, Katowice, s. 65–76.
- CHUDEK M. 2002 - Geomechanika z podstawami ochrony środowiska i powierzchni terenu. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- FILCEK H., WALASZCZYK J., TAJDUŚ A. 1994 - Metody komputerowe w geomechanice górniczej. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice.
- Golder Associates UK Ltd: Initial Rockbolt Support Design. Rockbolting Trial, Budryk Colliery, Poland. Nottingham, 23 July 2018.
- JING L. 2003 - A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, no. 40 s. 283-353.
- KŁECZEK Z. 1994 - Geomechanika Górnicza. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice.
- MAJCHERCZYK T., NIEBALSKI Z. 2003 - Stateczność wyrobisk w obudowie kotwowej na dużej głębokości. Geotechnika w budownictwie i górnictwie, pod red. Włodzimierza Brząkały, Jana Butry, Stefana Galczyńskiego. Wrocław Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, s. 473–482.
- MAJCHERCZYK T., MAŁKOWSKI P., NIEBALSKI Z. 2006 - Ruchy górotworu i reakcje obudowy w procesie niszczenia skał wokół wyrobisk korytarzowych na podstawie badań „in situ”. Monografia, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii AGH, Kraków.
- MAJCHERCZYK T., MAŁKOWSKI P., NIEBALSKI Z. 2012 - Ocena schematów obudowy i skuteczności projektowania wyrobisk korytarzowych w kopalniach węgla kamiennego. Wydawnictwa AGH, Kraków.
- MAJCHERCZYK T., SZASZENKO A., SDŹWIŹKOWA E. 2006 - Podstawy geomechaniki. Wydawnictwo AGH, Kraków.
- MAŁKOWSKI P. 2003 - Badania endoskopowe dla określania jakości skał. Kwartalnik „Górnictwo i Geoinżynieria”. R. 27, z. 3–4, Kraków, s. 419–425.
- MAŁKOWSKI P. 2013 - Rola stref spękań w ocenie stateczności wyrobisk korytarzowych w kopalniach węgla. Wydawnictwo AGH, Kraków.
- MASNY W. i inni 2018 - Projekt Samodzielna Obudowa Kotwowa w KWK Budryk – projekt samodzielnej obudowy kotwowej wraz z monitoringiem – Faza I. Praca GIG nr 583 34498-150 Katowice (niepublikowana).
- MASNY W. i inni 2019a - Projekt Samodzielna Obudowa Kotwowa w KWK Budryk – Badania dołowe za pomocą hydraulicznego penetrometru otworowego - otwory Gp38(2019)/1, Gp38(2019)/2, Gp38(2019)/3. Praca GIG nr 583 34498-150 Katowice (niepublikowana).
- MASNY W. wraz z zespołem 2019b - Projekt Samodzielna Obudowa Kotwowa w KWK Budryk – Badania dołowe za pomocą kamery introskopowej - otwory Gp38(2019)/1, Gp38(2019)/2, Gp38(2019)/3. Praca GIG nr 583 34498-150 Katowice (niepublikowana).
- MASNY W. i inni 2020a - Projekt Samodzielna Obudowa Kotwowa w KWK Budryk – Badania dołowe za pomocą hydraulicznego penetrometru otworowego - otwory Gp38(2019)/4, Gp38(2019)/5, Gp38(2019)/6. Praca GIG nr 583 34498-150 Katowice (niepublikowana).
- MASNY W. i inni 2020b - Projekt Samodzielna Obudowa Kotwowa w KWK Budryk – Badania dołowe za pomocą kamery introskopowej - otwory Gp38(2019)/4, Gp38(2019)/5, Gp38(2019)/6. Praca GIG nr 583 34498-150 Katowice (niepublikowana).
- NIEROBISZ A. 1999 - Zastosowanie obudowy kotwowej w wybranych kopalniach węgla. „Przeгляд Górnicy” nr 5, s.23-30.
- MENG Z., ZHANG J., WANG R. 2011 - In-situ stress, pore pressure and stress-dependent permeability in the Southern Qinshui Basin. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol. 48, strony 122-131.
- ROTKEGEL M. 2013 - Odrzwia Obudowy ŁPw - Projektowanie i wyniki badań. Journal Sustainable Mining. Issue 1, vil. 12. Katowice, s. 34-40.

- STOPYRA M., STASICA J., RAK Z. 1998 - System monitoringu pracy obudowy kotwiowej. Materiały VII Szkoły Eksploatacji Podziemnej, 23-27.02.1998, Szczyrk, s.159-168.
- STOPYRA M., STASICA J., RAK Z. 2000 - Wpływ środowiska otworu wiertniczego na siłę utwardzenia kotwi wklejanej. Materiały Konferencyjne Szkoły Eksploatacji Podziemnej 2000, Kraków, s. 371-386.
- SZYMICZEK W., FICEK J., SOBIK M. 2001 - Nowoczesne metody monitoringu pracy obudowy kotwiowej. Nowoczesne technologie górnicze - Kotwienie, Gliwice-Ustroń, s. 453-468.
- TAJDUŚ A., CAŁA M. 1999 - Określanie parametrów obudowy wyrobisk korytarzowych w oparciu o obliczenia numeryczne. W: Geotechnika w górnictwie i budownictwie specjalnym. Konferencja naukowo-techniczna poświęcona 50-leciu pracy Prof. zw. dr. hab. inż. Henryka Filcka. Wydawnictwo „SCRIPTUM”, Kraków s. 253-265.
- WALENTEK A. 2018 - Empiryczna i numeryczna metoda prognozy zasięgu strefy spękań górotworu wokół chodnika przyścianowego przed frontem ściany. „Przeгляд Górnicy”. nr 2 s. 50-59.

Artykuł wpłynął do redakcji – luty 2021

Artykuł akceptowano do druku – 15.03.2021



Дорогие Дамы и Господа,

Хотим сообщить Вам, что журнал „Przeгляд Górnicy (ISSN: 0033-216X)” успешно прошел многомерный процесс оценки и индексируется в базе ICI Journals Master List 2019.

На основе проверки информации из оценочной анкеты и анализа выпусков за 2019 год, Эксперты Index Copernicus установили значение показателя *Index Copernicus Value*(ICV).

ICV 2019 = 70.34

Полученная оценка ICV за 2019 год отображается в списке **ICI Journals Master List 2019**

<https://journals.indexcopernicus.com/search/formjml>, а также в Паспорте Журнала

<https://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=28377&lang=pl>

С уважением,

Команда Оценки Научных Журналов

Index Copernicus International

www.indexcopernicus.com