



Empiryczna i numeryczna metoda prognozy zasięgu strefy spękań górotworu wokół chodnika przyścianowego przed frontem ściany

Empirical and numerical method of forecasting the range of the fractured rock mass zone around the gateroad in front of the longwall

Dr inż. Andrzej Walentek^{*)}

Treść: Przeprowadzone w ostatnich latach w Głównym Instytucie Górnictwa badania dołowe zasięgu strefy spękań górotworu wokół chodników przyścianowych z wykorzystaniem nowoczesnych przyrządów pomiarowych, takich jak endoskop otworowy, czy sonda SBS (*Slim Borehole Scanner*) pozwoliły na opracowanie dwóch odrębnych metod obliczania zasięgu strefy spękań wokół chodników przed frontem ściany. Pierwsza metoda bazuje na prostych zależnościach empirycznych, druga natomiast na modelowaniu numerycznym z wykorzystaniem oprogramowania Phase2, opartego na metodzie elementów skończonych. Opracowane metody mogą znaleźć zastosowanie w procesie projektowania obudowy podporowej wraz z jej wzmocnieniami, szczególnie w postaci kotwi, a także podczas oceny zagrożenia metanowego w polu eksploatacji ścianowej w przypadkach występowania w bliskiej odległości innych pokładów węgla.

Abstract: In recent years, the Central Mining Institute (GIG) has performed underground measurements of fractured rock mass zone around gateroads. The measurements were conducted by means of modern measuring devices, such as the endoscope borehole or SBS probe (*Slim Borehole Scanner*) and allowed to develop two separate methods for calculating the fracture zone around the gateroad in front of the longwall face. The first method is based on simple empirical relationships, the second method - on numerical modeling using Phase2 software, based on the finite element method. These methods can be applied in the process of designing the roadway roof support with its reinforcements, especially in the form of bolts, as well as during the assessment of methane hazard in longwall panels in the case of close proximity of other coal seams.

Słowa kluczowe:

górnictwo, badania dołowe, strefa spękań, zależności empiryczne, modelowanie numeryczne, prognoza

Keywords:

mining, underground measurements, fractured rock mass zone, empirical relationships, numerical modeling, forecasting

1. Wprowadzenie

Wielopokładowa eksploatacja pokładów węgla kamiennego w warunkach polskiego górnictwa jest prowadzona głównie systemem ścianowym, od pola, z zawałem skał stropowych. Prowadzenie eksploatacji takim systemem wiąże się z koniecznością wcześniejszego wykonania szeregu robót przygotowawczych, w tym drażenia chodników przyścianowych. Chodniki przyścianowe, w odróżnieniu od wyrobisk udostępniających, należą do wyrobisk krótkotrwałych, których istnienie jest na ogół związane z czasem, w jakim jest wybierane dane pole ścianowe. W tym okresie w chodnikach przyścianowych, na skutek bezpośredniego oddziaływania przemieszczającego się frontu eksploatacyjnego, można zaobserwować dużą dynamikę zmian obciążenia i deformacji ich obudowy. Ponadto, liczne badania i obserwacje wykazały, że strefa spękań górotworu, wytworzona wokół chodników przyścianowych, powiększa się wraz z postępującym frontem ściany.

Powiększająca się strefa spękań wokół chodnika wpływa na wzrost obciążenia obudowy, a przez to jest jednym z głównych czynników decydujących o stateczności wyrobisk. Dlatego też ważne jest, aby już na etapie projektowania chodników przyścianowych, możliwe było wyznaczenie zasięgu strefy spękań w celu doboru odpowiedniej obudowy zabezpieczającej te wyrobiska. Należy również zwrócić uwagę na fakt, że coraz częściej w chodnikach przyścianowych stosuje się

obudowę kotwową, jako dodatkowy element wzmacniający górotwór oraz odrzwia podatnej obudowy łukowej. Stosowane są różne rozwiązania tego rodzaju wzmocnień, takie jak: podciągi stalowe lub odcinki kształtowników przykotwiane do łuków stropnicowych obudowy ŁP z zastosowaniem kotwi strunowych, czy też kotwienie pomiędzy odrzwiami obudowy ŁP z zastosowaniem kotwi stalowych.

Obecnie do obliczania zasięgu strefy spękań wokół wyrobisk korytarzowych stosuje się metody analityczne nieuwzględniające wpływu eksploatacji, opracowane przez: Protodiakonowa, Cymbariewicza oraz Sałustowicza (Kłeczek 1994) lub też metody stosowane głównie dla chodników przyścianowych, pozwalające na uwzględnienie wpływu oddziaływania ciśnienia eksploatacyjnego (Biliński 2005, Kidybiński 1998). Odnosząc się do drugiej grupy metod obliczeniowych należy zauważyć, że bazują one na badaniach dołowych, prowadzonych z zastosowaniem prostych metod pomiarowych, w odmiennych warunkach geologiczno-górnicznych w porównaniu do stanu obecnego (głębokość eksploatacji, długość ścian, postęp dobowy). W ostatnich latach do oceny zasięgu strefy spękań wokół chodników przyścianowych coraz częściej wykorzystuje się różnego rodzaju metody numeryczne (Torano i in. 2002; Majcherczyk, Małkowski 2003, Estrehuitzen, Barczak 2006, Junker 2009, Walentek i in. 2009; Walentek 2009, 2010).

Z uwagi na konieczność dokładnej oceny zasięgu strefy spękań wokół chodników przyścianowych, uwzględniając przeprowadzone w szerokim zakresie własne badania dołowe

^{*)} Główny Instytut Górnictwa, Katowice

z wykorzystaniem metod endoskopowych, oraz analizę ich wyników z zastosowaniem nowoczesnych technik obliczeniowych, opracowano dwie odrębne metody obliczania zasięgu strefy spękań wokół chodników przyścianowych, bazujące na wzorach empirycznych oraz na modelowaniu numerycznym.

Pierwsza z opracowanych metod jest metodą uproszczoną, która na podstawie zależności empirycznych pomiędzy wartością ciśnienia, wytrzymałością węgla oraz skał stropowych, pozwala określić przyrost zasięgu strefy spękań w stropie wyrobiska w zależności od położenia frontu ściany. W drugiej z metod do obliczeń zasięgu strefy spękań wykorzystano program do modelowania numerycznego Phase2 oparty na metodzie elementów skończonych. W tym przypadku poprzez dobranie odpowiednich warunków brzegowych modelu jest możliwe wyznaczenie strefy spękań wokół całego wyrobiska (w stropie, spągu i ociosach), a także określenie wartości jego deformacji.

2. Badania zasięgu strefy spękań wokół chodników przyścianowych

2.1. Charakterystyka warunków geologiczno-górnich w rejonie prowadzenia badań dołowych

Autorskie metody prognozowania zasięgu strefy spękań górotworu wokół chodników przyścianowych opracowane

zostały w oparciu o wyniki dołowych badań endoskopowych (Walentek i in. 2008). Pomiar przeprowadzono w dziesięciu chodnikach przyścianowych, które były zlokalizowane w siedmiu kopalniach znajdujących się w obrębie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) oraz w Lubelskim Zagłębiu Węglowym (LZW).

Badane chodniki stanowiły wyrobiska przyścianowe ścian prowadzonych z zawałem stropu. W momencie uruchomienia każdej ze ścian, chodniki te znajdowały się w obustronnym otoczeniu calizną węglową. Następnie w zależności od potrzeb kopalni, wyrobiska były likwidowane bezpośrednio za przemieszczającym się frontem ściany lub utrzymywane dla celów wentylacyjnych bądź też dla powtórnego wykorzystania podczas prowadzenia kolejnej ściany.

Wszystkie wyrobiska znajdowały się w otoczeniu typowych dla rejonu GZW oraz LZW skał, takich jak: łupki ilaste, łupki piaszczyste oraz piaskowce, a ich podstawową obudowę stanowiły stalowe odrzwia obudowy łukowej podatnej (ŁP), wykonane z kształtowników typu V. Obudowa ŁP oraz górotwór otaczający wyrobiska w wielu przypadkach wzmocniane były za pomocą: podciągów stalowych, kotwi oraz stojaków stalowych.

Wybrane wielkości opisujące warunki geologiczno-górnice oraz rodzaj zastosowanej obudowy w rejonie prowadzonych badań przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wybrane wielkości charakteryzujące warunki geologiczno-górnice w rejonie prowadzonych badań dołowych wraz z podstawowymi parametrami obudowy chodnikowej

Table 1. Selected values characterizing the geological and mining conditions with basic parameters of the gateroad roof support

L.p.	Chodnik	Głębokość, m	Nachylenie pokładu, °	Grubość pokładu, m	Wytrzymałość na ściskanie R_c , MPa			Rodzaj odrzwia obudowy wraz ze sposobem ich wzmocnienia
					stropu	węgla	spągu	
1.	Chodnik podś. I/VI/385	900	4,0	1,7	30,2	5,2	12,6	– ŁPSC/V36/11 rozstaw 1,0 m, – brak wzmocnienia
2.	Chodnik D-32a	895	6,0	2,5	36,7	9,3	22,5	– ŁP10/V32 rozstaw 0,8 m, – podciąg stalowy z kształtownika V29 montowany na łuku ociosowym
3.	Chodnik B-3	565	4,0	2,7	50,1	12,8	40,8	– ŁP10/V29 rozstaw 0,75 m, – brak wzmocnienia
4.	Chodnik C-426	500	5,0	2,0	26,1	24,2	17,4	– ŁP8/V25 rozstaw 1,0 m, – łuk stropnicowy przykotwiony parą kotwi stalowych o długości 2,5 m
5.	Chodnik 6/615	525	5,0	2,1	21,8	14,5	24,3	– ŁP9/V25 rozstaw 1,0 m, – łuk stropnicowy przykotwiony parą kotwi stalowych o długości 2,2 m, – podciąg stalowy z kształtownika V25 budowany w osi wyrobiska
6.	Chodnik 533/2	345	5,0	3,0	31,8	12,6	12,6	– ŁP9/V25 rozstaw 1,0 m, – brak wzmocnienia
7.	Chodnik 76	750	12,0	4,3	42,1	16,9	27,1	– ŁPP9/V32 rozstaw 1,0 m, – brak wzmocnienia
8.	Chodnik 065	720	4,0	4,4	19,0	30,6	35,6	– ŁPP10/V29 rozstaw 0,75 m, – podciąg stalowy budowany na łuku stropnicowym, – kotew strunowa o długości 6,5 m budowana w osi wyrobiska między odrzwiami, co 0,75 m
9.	Chodnik podś. C-1	745	16,0	2,2	28,3	7,9	26,0	– ŁP9/V36 rozstaw 0,8 m, – podciągi stalowe z kształtownika V29 przykotwiane co drugie odrzwia na przemian kotwami strunowymi o długości 4,5 m i stalowymi o długości 2,5 m, – stojak stalowy budowany w osi chodnika
10.	Chodnik podś. E-4	790	16,0	2,5	41,3	4,8	32,0	– ŁP9/V32 rozstaw 0,8 m, – podciągi stalowe z kształtownika V29 przykotwiane co drugie odrzwia na przemian kotwami strunowymi o długości 4,5 m i stalowymi o długości 2,5 m, – stojak stalowy budowany w osi chodnika

2.2. Metodyka pomiarów zasięgu strefy spękań

Do oceny zasięgu strefy spękań górotworu wokół chodników przyścianowych narażonych na oddziaływanie frontu eksploatacji z zawałem stropu wykorzystano skonstruowany i wykonany w GIG endoskop otworowy oraz przyrząd do inspekcji otworów kotwowych - sondę SBS (*Slim Borehole Scanner*) produkowaną przez DMT w Niemczech (Pierszalik 2010).

Pomiary były prowadzone w specjalnie przygotowanych do tego celu bazach pomiarowych. W bazach pomiarowych, założonych w chodnikach przyścianowych, na obrysie wyrobiska wykonywano otwory wiertnicze w odległości około 100 m przed frontem ściany. Schemat lokalizacji baz pomiarowych w polu ściany oraz rozmieszczenie otworów badawczych w chodnikach przedstawiono na rysunku 1.

W pierwszej kolejności w każdym z chodników wykonywano trzy otwory wiertnicze w stropie, spągu i ociosie wyrobiska o średnicy $\varnothing 95$ mm i długościach 10 m oraz 5 m (rys. 1b – otwory nr 2, 4 i 5) w celu przeprowadzenia badań penetrometrycznych. Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów określono wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie skał występujących w otoczeniu wyrobisk przyścianowych będących przedmiotem badań.

Po zakończeniu pomiarów penetrometrycznych do otworów tych wprowadzano kamerę endoskopu otworowego w celu oceny spękań w górotworze otaczającym chodniki przyścianowe. Dla dokładnej oceny przebiegu (kształtu) tej strefy w stropie wyrobiska wykonano dodatkowe dwa otwory o średnicy $\varnothing 75$ mm i długości około 10 m, odchylone w stosunku do osi wyrobiska pod kątem 45° (rys. 1b – otwory 1, 3). Zakładano, że badania spękań górotworu będą prowadzone we wszystkich otworach wiertniczych, jednak z przyczyn ruchowych nie zawsze było to możliwe. Wynikało to między innymi z faktu zalania wodą niektórych otworów spągowych lub w przypadku otworów ociosowych, utraty ich drożności. Pierwsze pomiary były realizowane w odległości około 100 m przed frontem eksploatacji, następne zaś w miarę

zbliżania się frontu ściany. Starano się, aby kolejne pomiary były prowadzone w odległościach odpowiednio 75, 50 i 15 m przed frontem ściany. W większości przypadków pomiary realizowano zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 1, w którym do badań zasięgu strefy spękań wykorzystywano endoskop otworowy. Tym sposobem zrealizowano badania w chodnikach przyścianowych: D-32a, C-426, 6/615, B-3, 76, 065, podścianowym C-1 oraz podścianowym E-4. Nieco inaczej pomiary były prowadzone w chodnikach 533/2 oraz podścianowym 1/VI/385.

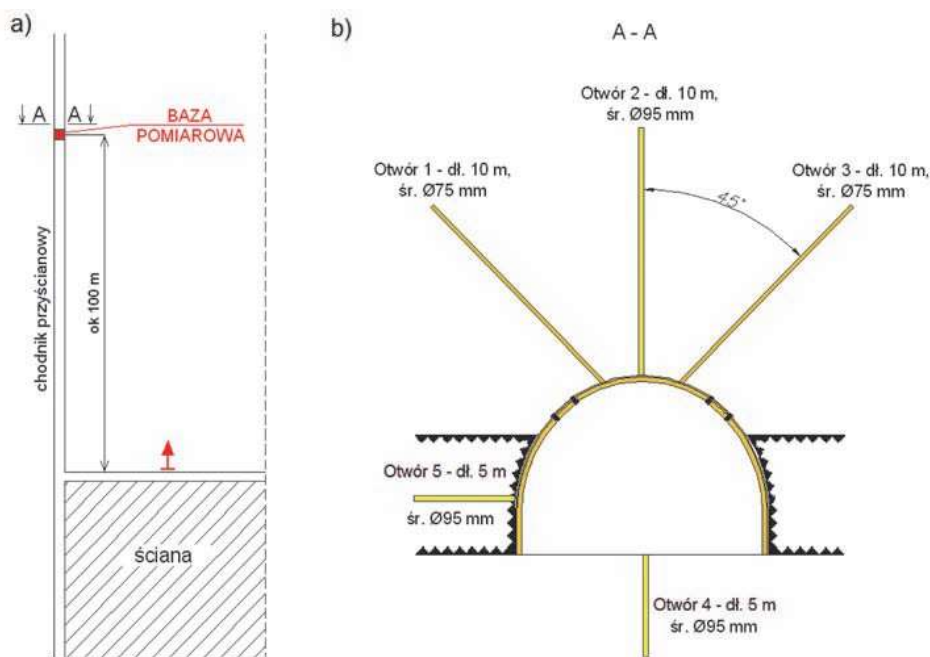
Zasięg strefy spękań górotworu w przypadku chodnika 533/2 i podścianowego 1/VI/385 określono przy użyciu sondy SBS. Schemat lokalizacji oraz rozmieszczenia otworów badawczych na przykładzie chodnika podścianowego 1/VI/385 przedstawiono na rysunku 2.

W bazie głównej zlokalizowanej 140 m przed frontem ściany wykonano w stropie chodnika trzy otwory: o długościach po 10 m, w ociosie o długości 5 m i w spągu o długości 3 m i średnicy $\varnothing 95$ mm każdy (rys. 2b). W tak przygotowanych otworach przeprowadzono badania wytrzymałości skał przy użyciu penetrometru otworowego oraz określono zasięg strefy spękań górotworu za pomocą endoskopu otworowego.

W kolejnych bazach oznaczonych numerami 2, 3 i 4 w odległościach odpowiednio: 110, 40 i 10 m od czoła ściany 1/VI/385 wykonano po trzy otwory o średnicy $\varnothing 32$ mm i długości około 8 m każdy (rys. 2c). W otworach tych przeprowadzono pomiar zasięgu strefy spękań przy użyciu sondy SBS.

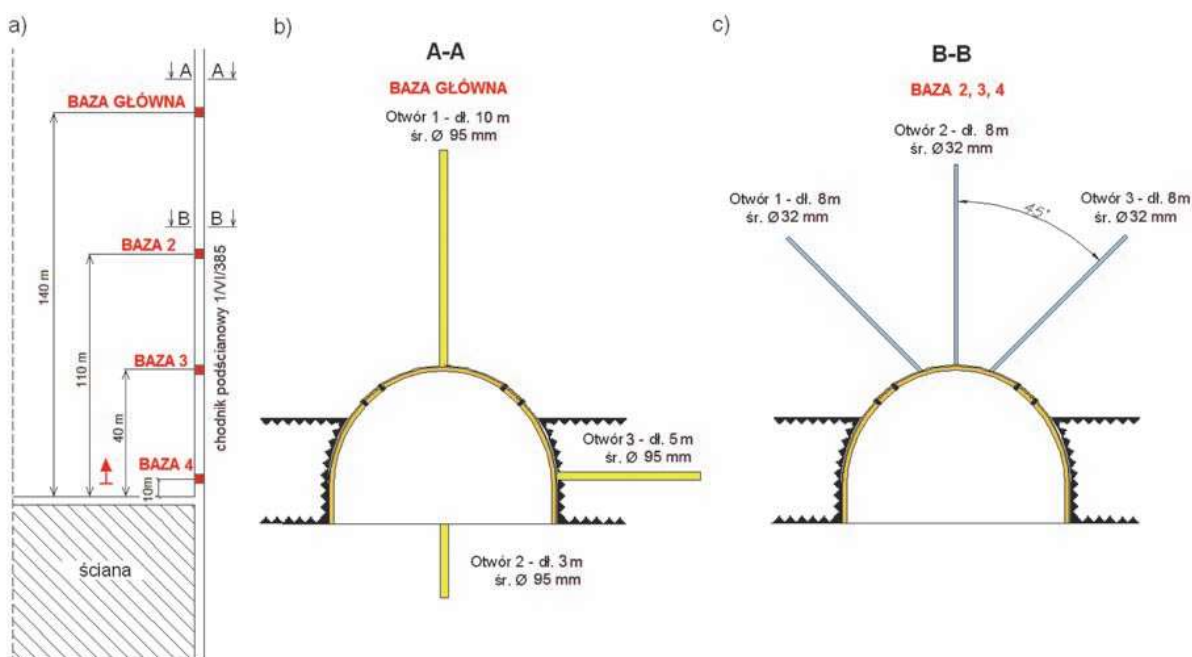
2.3. Wyniki i analiza pomiarów zasięgu strefy spękań

W ramach przeprowadzonych akcji pomiarowych we wszystkich dziesięciu chodnikach przyścianowych wykonano łącznie 40 otworów wiertniczych (badawczych), w tym 11 otworów małosrednicowych $\varnothing 32$ mm. Zgodnie z opisaną w punkcie 2.2 metodyką pomiarów zasięgu strefy spękań, badania endoskopowe prowadzono kilka razy w każdym chodniku przyścianowym, w określonych położeniach



Rys. 1. Schemat bazy pomiarowej w chodnikach przyścianowych: a) lokalizacja bazy względem frontu ściany; b) rozmieszczenie otworów w bazie pomiarowej

Fig. 1. Scheme of the measurement base in gateroads: a) location of the base in relation to the longwall face; b) location of boreholes in the measurement base



Rys. 2. Schemat stanowisk pomiarowych w chodniku podścianowym 1/VI/385: a) lokalizacja baz względem frontu ściany; b) baza do badań penetrometrycznych oraz spękań endoskopem otworowym; c) baza do badania spękań sondą SBS

Fig. 2. Scheme of measurement stations in the main gate 1/VI/385: a) location of the bases in relation to the long-wall face; b) base for penetrometric tests and fractures with an endoscopic probe; c) base for testing fractures with the use of the SBS probe

zbliżającego się frontu ściany. W ten sposób wykonano 96 pomiarów metodą endoskopową z kamerą podczerwieni oraz 17 pomiarów z wykorzystaniem sondy SBS.

Z uwagi na obszerność uzyskanych rezultatów badań dółowych oraz sposób ich zapisu, wyniki zestawiono w tabeli, w postaci wartości określających zasięg strefy spękań oraz liczbę spękań dla wszystkich przedmiotowych chodników przyścianowych.

Wyniki badań zestawione w tabeli 2 wskazują, że zarówno zasięg, jak i liczba spękań skał stropowych (otwory nr: 1, 2, 3) dla poszczególnych chodników przyścianowych są zróżnicowane. W otworze nr 2, wykonanym w strzałce każdego chodnika, zasięg strefy spękań podczas pierwszego pomiaru przeprowadzonego w odległości około 100 m przed frontem ściany wahał się w przedziale od 0,4 do 3,8 m, generalnie jednak nie przekraczał on wartości 2,1 m. W pomiarach przeprowadzonych możliwie jak najbliżej frontu ściany przedział maksymalnych wartości zasięgu strefy spękań skał stropowych dla poszczególnych wyrobisk wynosił od 2,0 do 9,1 m. Jedynie w przypadku chodnika podścianowego E-4 nie stwierdzono w czasie trwania całej akcji pomiarowej żadnych spękań w badanym obszarze górotworu. Na rysunku 3 dla każdego badanego chodnika, przedstawiono przebieg zmian wartości zasięgu strefy spękań w zależności od położenia frontu ściany.

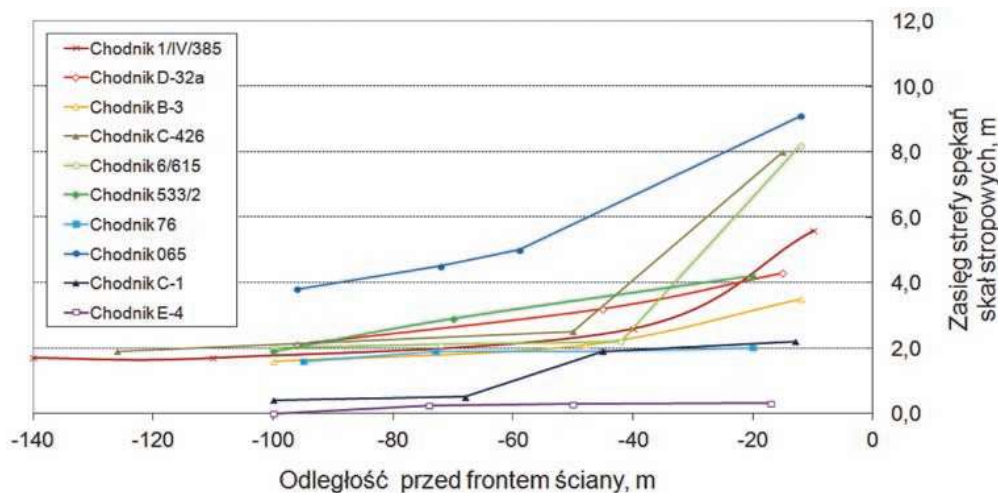
Analizując przedstawiony na rysunku 3 przebieg zmian zasięgu strefy spękań w stropie badanych chodników przyścianowych, można jednoznacznie stwierdzić, że wraz ze zbliżającym się frontem ściany powiększa się obszar górotworu spękanego. Różnice zasięgu strefy spękań w poszczególnych chodnikach (rys. 3) wynikają głównie z faktu, iż badane wyrobiska były zlokalizowane w różnych warunkach geologiczno-górnictwowych. Największy obszar spękań wytworzył się wokół chodnika 065 zarówno w odległości 96 m, jak i 12 m przed frontem ściany. Z analizy danych przedstawionych w tabeli

2 wynika, że skały stropowe nad chodnikiem 065 posiadały najmniejszą, spośród wszystkich badanych wyrobisk, wytrzymałość na ściskanie $R_c = 19,0$ MPa. Dla porównania, znacznie mniejszy zasięg strefy spękań (od 3 do 5 razy) zaobserwowano w stropie chodnika 76, w którym wytrzymałość na ściskanie skał stropowych R_c wynosiła 42,1 MPa, natomiast pozostałe warunki otoczenia, takie jak: głębokość, wysokość ściany, długość i postęp frontu eksploatacji, były porównywalne z warunkami lokalizacji chodnika 065. Fakt ten potwierdza pogląd, iż parametry wytrzymałościowe skał stropowych mają istotny wpływ na rozwój strefy spękań. Ponadto, analizując dane przedstawione na rysunku 3 można zauważyć, iż istotne przyrosty zasięgu strefy spękań rozpoczynały się w badanych chodnikach w odległości od około 40 do 70 m przed czołem ściany. Największy zaś przyrost zasięgu strefy spękań zaobserwowano w bliskiej odległości od czoła ściany. W rejonie tym zasięg strefy spękań nad wyrobiskiem zwiększył się pięciokrotnie w stosunku do obszaru nieobjętego wpływem eksploatacji. W jednym z wyrobisk (chodnik podścianowy E-4) nie stwierdzono wpływu ciśnienia eksploatacyjnego na zmiany zasięgu strefy spękań w skałach stropowych, co prawdopodobnie było spowodowane wysokimi wartościami parametrów wytrzymałościowymi tych skał oraz zastosowaniem dodatkowej obudowy kotwowej w postaci kotwi strunowych o długości 4,5 m oraz kotwi stalowych o długości 2,5 m. Uzyskane wyniki badań wskazują, że bardzo trudno jest jednoznacznie określić odległość przed frontem ściany, od której rozpoczyna się oddziaływanie ciśnienia eksploatacyjnych. Wpływ na to mają między innymi takie czynniki, jak: głębokość, wytrzymałość pokładu węgla oraz skał spągowych, które według „teorii fali ciśnienia” (Budryk 1948) decydują o wartości zasięgu ciśnienia eksploatacyjnego.

Rozwój stref spękań zaobserwowano również w otworach wykonanych w ociosie oraz spągu wyrobiska. Z uwagi jednak na małą liczbę przeprowadzonych pomiarów w tym obszarze

Tabela 2. Wyniki pomiarów zasięgu strefy spękań oraz liczby spękań wokół dziesięciu badanych chodników przyścianowych
Table 2. Results of the measurements of the fracture zone and the number of fractures around the ten tested gateroads

Lp.	Nazwa chodnika	Odległość przed czołem ściany, m	Zasięg strefy spękań, m					Liczba spękań				
			strop			spąg	ocios	strop			spąg	ocios
			otwór 1	otwór 2	otwór 3			otwór 1	otwór 2	otwór 3		
1.	Chodnik podśc. 1/VI/385	140	-	1,7	-	2,9	3,0	-	10	-	14	14
		110	3,0	1,7	2,4	-	-	5	9	15	-	-
		40	3,0	2,6	3,1	-	-	10	14	22	-	-
		10	-	5,6	4,2	-	-	-	17	24	-	-
2.	Chodnik D-32a	96	1,8	2,1	1,9	-	-	5	7	6	-	-
		45	2,5	3,2	2,7	-	-	9	12	10	-	-
		15	3,9	4,3	4,1	-	-	17	19	18	-	-
3.	Chodnik B-3	100	-	1,6	-	5,0	5,0	-	4	-	32	42
		48	-	2,1	-	5,0	4,5	-	11	-	35	36
		12	-	3,5	-	5,0	4,5	-	15	-	36	37
4.	Chodnik C-426	126	1,4	1,9	1,0	-	-	4	12	5	-	-
		50	2,5	2,5	4,4	-	-	5	16	8	-	-
		20	7,1	8,0	7,4	-	-	11	22	18	-	-
5.	Chodnik 6/615	100	1,6	2,0	1,6	2,0	1,6	2	10	3	5	4
		72	1,7	2,1	1,7	2,0	1,6	5	12	8	10	4
		42	1,7	2,2	1,7	2,4	1,7	5	15	8	14	6
		12	-	8,2	8,5	-	-	5	35	20	11	15
6.	Chodnik 533/2	100	2,2	1,9	2,5	-	-	18	13	8	-	-
		70	3,1	2,9	3,5	-	-	22	19	12	-	-
		20	4,6	4,2	4,0	-	-	27	28	18	-	-
7.	Chodnik 76	95	0,0	1,6	0,0	-	-	0	8	0	-	-
		73	0,8	1,9	2,0	-	-	1	11	7	-	-
		45	1,0	1,9	2,0	-	-	3	12	8	-	-
		20	2,0	2,0	2,1	-	-	5	13	8	-	-
8.	Chodnik 065	96	3,8	3,8	3,7	-	-	3	13	5	-	-
		72	4,4	4,5	4,5	-	-	3	18	7	-	-
		59	4,8	5,2	5,0	-	-	3	19	7	-	-
		12	8,6	9,1	8,9	-	-	6	27	11	-	-
9.	Chodnik podśc. C-1	100	0,3	0,4	0,9	-	-	1	2	5	-	-
		68	0,4	0,5	1,0	-	-	1	2	5	-	-
		45	1,7	1,9	2,0	-	-	2	6	6	-	-
		13	1,8	2,2	2,1	-	-	4	9	9	-	-
10.	Chodnik podśc. E-4	100	0,0	0,0	0,0	-	-	0	0	0	-	-
		74	0,0	0,0	0,0	-	-	0	0	0	-	-
		50	0,0	0,0	0,0	-	-	0	0	0	-	-
		17	0,0	0,0	0,0	-	-	0	0	0	-	-



Rys. 3. Przebieg zmiany zasięgu strefy spękań skał stropowych w zależności od położenia frontu ściany

Fig. 3. The change of the range of the fracture zone of roof rocks depending on the position of the longwall face

wyrobisk (trzy chodniki przyścianowe) trudno jest na tej podstawie formułować daleko idące wnioski. Można jedynie stwierdzić, że zasięg spękań również zwiększał się wraz z przemieszczaniem się frontem ściany. Wyniki badań spękań w ociosach i spągu wyrobisk wykorzystano do weryfikacji obliczeń numerycznych, co pozwoliło na dokładniejsze określenie kształtu i zasięgu strefy spękań wokół całego wyrobiska.

Istotnym parametrem charakteryzującym stopień zniszczenia górotworu jest liczba spękań. Pozwala ona na określenie z jaką intensywnością przebiega proces niszczenia struktury górotworu wokół danego wyrobiska górniczego (Małkowski 2003, 2009).

Przeprowadzone analizy w zakresie określenia lokalizacji poszczególnych spękań w górotworze wykazały jednak, że w przypadku wyodrębnienia w stropie wyrobiska trzech stref, które obejmują swym zasięgiem pakiety skał w odległościach od stropu wyrobiska: od 0 do 3,0 m (strefa I), od 3,0 do 6,0 m (strefa II), powyżej 6,0 m (strefa III), najwięcej spękań (w sumie około 140) występowało w strefie I (rys. 4). Stanowiło to 76% ogólnej liczby spękań równej 185, jaką zaobserwowano w otworach badawczych. Pozostałe spękania, które występowały w strefach II i III, stanowiły odpowiednio 19% i 5% łącznej liczby spękań skał stropowych. Można zatem stwierdzić, że ze zwiększaniem się zasięgu strefy spękań w stropie wyrobiska najintensywniej rośnie liczba spękań w pakiecie skał od 0 do 3,0 m od stropu wyrobiska, który w znacznym stopniu decyduje o wartości obciążenia obudowy i efektywności stosowania obudowy kotwowej.

3. Opracowanie metod prognozy zasięgu strefy spękań wokół chodników przed frontem ściany

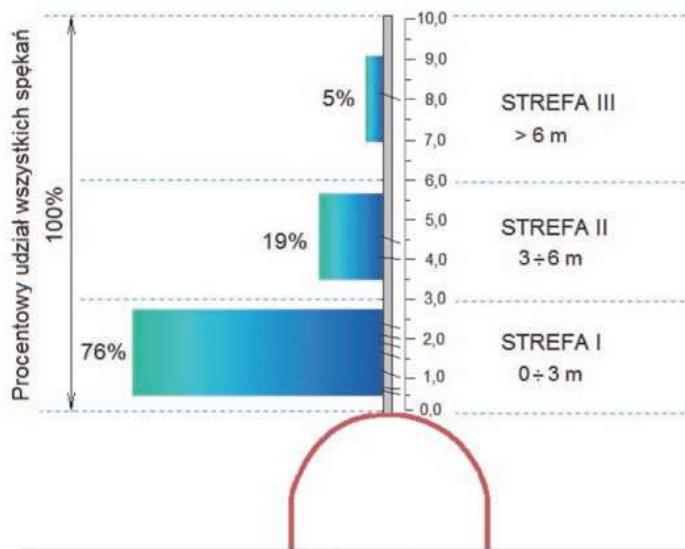
3.1. Metoda empiryczna dla wyznaczania zasięgu strefy spękań w skałach stropowych nad chodnikiem przed frontem ściany

W oparciu o zaprezentowane wyniki badań dołowych zostały opracowane dwie odrębne metody obliczania zasięgu strefy spękań wokół chodników przed frontem ściany, oparte na zależnościach empirycznych oraz na modelowaniu numerycznym.

Pierwsza z opracowanych metod jest oparta na zależnościach empirycznych, które opisują bezwzględny przyrost zasięgu strefy spękań w funkcji położenia frontu ściany oraz wybranych parametrów geologicznych.

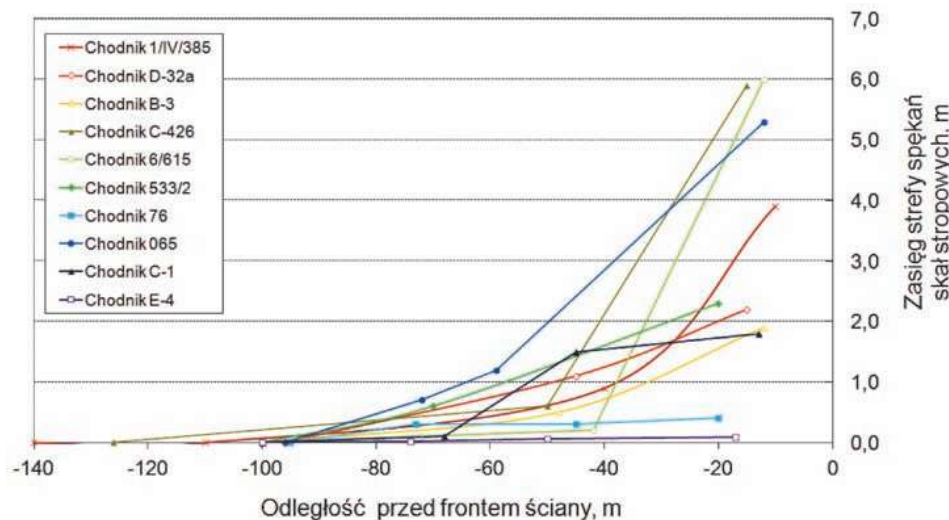
Przyrost bezwzględny dla każdego z chodników przyścianowych został obliczony w odniesieniu do pierwszych uzyskanych wyników pomiarów zasięgu strefy spękań, przeprowadzonych w odległości około 100 m przed frontem ściany, gdzie nie obserwuje się jeszcze na ogół wpływu eksploatacji zawałowej.

Wyniki obliczeń przyrostu bezwzględnego zasięgu strefy spękań w stropie badanych chodników przyścianowych przedstawiono na rysunku 5. Zarówno dla jednej, jak i drugiej metody obliczeń przyjęto, iż odległość przed czołem ściany będzie przyjmować zawsze wartości ujemne (znak „-”).



Rys. 4. Procentowy udział liczby spękań w przyjętych strefach górotworu nad chodnikiem przyścianowym

Fig. 4. Percentage share of the number of fractures in the analyzed rock mass above the gateroad



Rys. 5. Przebieg przyrostu bezwzględnego zasięgu strefy spękań w skałach stropowych nad chodnikami w zależności od położenia frontu ściany

Fig. 5. The course of the absolute increase of the fracture zone range in the roof rocks above the roadways depending on the position of the longwall face

Przedstawiony na rysunku 5 przyrost bezwzględny zasięgu strefy spękań w stropie badanych chodników przyścianowych pozwolił na ujednoczenie otrzymanych wyników pomiarowych, co było niezbędne dla przeprowadzenia dalszych analiz oraz wyznaczenia wzorów empirycznych. Opracowując wzory empiryczne w pierwszej kolejności wyodrębniono różne postaci funkcji, a następnie określono wartości liczbowe ich parametrów (współczynników), przy których przybliżenie danej funkcji było najlepsze. Dla otrzymanych wyników badań (rys. 5) przeanalizowano dopasowanie kilku postaci funkcji (tj. liniowej, wielomianowej, logarytmicznej, wykładniczej, potęgowej). Spośród analizowanych funkcji najlepsze dopasowanie do rzeczywistych wyników uzyskano dla funkcji eksponentyjnej w postaci ogólnego równania:

$$S_b = k \cdot e^{(m+n \cdot d)} \quad (1)$$

gdzie:

- S_b – przyrost bezwzględny strefy spękań, m,
- d – odległość od frontu ściany, m,
- k, m, n – współczynniki równania.

Dla tak przyjętego ogólnego równania, wykorzystując analizę regresji nieliniowej obliczono wartości współczynników: k, m, n , dla wszystkich rozpatrywanych chodników przyścianowych za pomocą programu STATISTICA 8.0 (Statistica 2008). Uzyskane przedziały wartości współczynników korelacji $R = 0,90-0,99$ oraz determinacji $R^2 = 0,81-1,00$ świadczą, że funkcja eksponentyjna dobrze odzwierciedla wyniki badań dołowych.

W kolejnym etapie, w oparciu o wstępne analizy, wytypowano kilka czynników mogących mieć wpływ na wartość przyrostu zasięgów strefy spękań w chodniku przyścianowym podczas prowadzenia eksploatacji. Biorąc pod uwagę przeanalizowany mechanizm powstawania spękań wokół chodników przyścianowych uznano, że istotnymi czynnikami wpływającymi na ich zasięg będą: ciśnienie górotworu q , wytrzymałość na ściskanie skał stropowych R_{cs} oraz wytrzymałość na ściskanie pokładu węgla R_{cw} .

W celu powiązania ze sobą wytypowanych czynników geologicznych z przyjętymi współczynnikami równania ogólnego (1), wykonano kolejne obliczenia statystyczne, na podstawie których określono zależności funkcyjne niezbędne dla prognozy zasięgu strefy spękań górotworu w chodnikach przyścianowych.

Współczynnik k został skorelowany ($R^2=0,61$) z wartością ciśnienia górotworu q obliczanym wg wzoru (Biliński i in. 1996):

$$k = 0,1911 \cdot q^{0,8548} \quad (2)$$

gdzie:

- $q = 0,02 \cdot m_c \cdot G \cdot \cos \alpha$, MPa, MPa
- m_c – współczynnik modyfikacji górotworu
- G – głębokość eksploatacji, m,
- α – kąt nachylenia pokładu, stopnie.

Współczynnik m został skorelowany ($R^2=0,61$) z wytrzymałością na ściskanie skał stropowych R_{cs} :

$$m = -0,0474 \cdot R_{cs} + 2,70567 \quad (3)$$

Współczynnik n został skorelowany ($R^2=0,61$) z wytrzymałością na ściskanie węgla R_{cw} :

$$n = 0,0088 \cdot R_{cw}^{0,6168} \quad (4)$$

Podstawiając do równania ogólnego (1) zależności (2), (3) i (4) można obliczyć bezwzględny przyrost wartości zasięgu

strefy spękań skał stropowych w chodniku przyścianowym w dowolnej odległości przed frontem ściany (5).

$$S_b = (0,1911 \cdot q^{0,8548}) \cdot k \cdot e^{((-0,0474 \cdot R_{cs} + 2,7056) + (0,0088 \cdot R_{cw}^{0,6168}) \cdot d)} \quad (5)$$

Dla obliczenia zasięgu strefy spękań skał stropowych występujących nad chodnikiem przyścianowym przed frontem ściany należy określić, za pomocą badań endoskopowych, zasięg strefy spękań górotworu będącego poza wpływem ciśnień eksploatacyjnych, a następnie zasięg ten powiększyć o wartość przyrostu bezwzględnego, uzyskaną na podstawie opracowanej zależności empirycznej. Tym sposobem metoda empiryczna może stanowić rozszerzenie badań dołowych prowadzonych metodą endoskopową, w przypadku gdy nie ma możliwości wykonania pomiarów bezpośrednio w strefie wpływu ciśnienia eksploatacyjnego, a jedynie poza tą strefą.

3.2. Metoda wyznaczania zasięgu strefy spękań wokół chodników przed frontem ściany oparta na modelowaniu numerycznym

Druga z opracowanych metod prognozy zasięgu strefy spękań w otoczeniu chodnika przyścianowego jest oparta na modelowaniu numerycznym. Do modelowania numerycznego zasięgu strefy spękań w górotworze wokół chodników przyścianowych wykorzystano program Phase2, oparty na metodzie elementów skończonych (MES) w płaskim stanie odkształcenia. Program ten był wykorzystywany do podobnych analiz przez ośrodki naukowe w kraju i za granicą (Torano i in. 2002, Majcherczyk, Małkowski 2003, Walentek 2009).

W obliczeniach zasięgu strefy spękań wokół chodników przed frontem ściany przyjęto, że modelowany górotwór jest ośrodkiem sprężysto-plastycznym i izotropowym. Przyjęto również, że warunek stanu granicznego będzie obliczany według kryterium Hoeka-Browna, który dla spękanego masywu skalnego definiuje się jako (Hoek 2006):

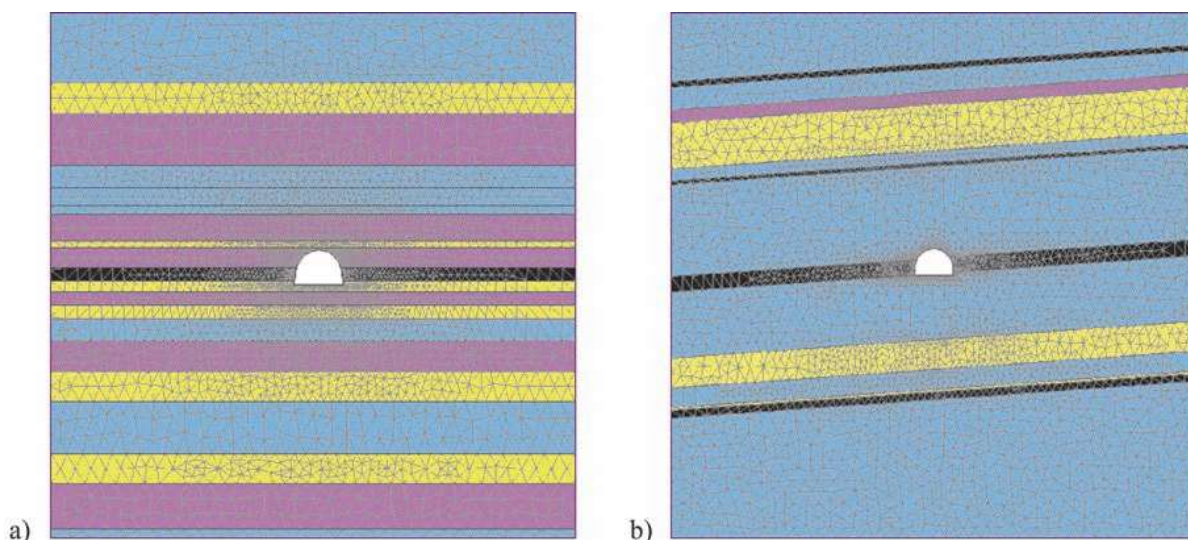
$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3 + s}{\sigma_{ci}} \right)^a \quad (6)$$

gdzie:

- σ'_1 i σ'_3 – efektywne naprężenia maksymalne i minimalne przy zniszczeniu, MPa;
- m_b – wartość stałej Hoeka-Browna dla masywu skalnego;
- s i a – stałe zależne od typu górotworu;
- σ_{ci} – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie dla nienaruszonej próbki skalnej, MPa.

Podstawą do przeprowadzania obliczeń numerycznych pozwalających na określenie wielkości strefy spękań, która wytwarza się wokół chodnika przyścianowego, jest prawidłowe odwzorowanie warunków geologicznych, istniejących w rejonie badanego górotworu. Ważne jest prawidłowe rozpoznanie rodzaju, grubości oraz układu warstw skalnych zalegających w otoczeniu wyrobiska. Mając powyższe na uwadze, dla każdego z badanych chodników przyścianowych zbudowano model numeryczny górotworu w postaci tarczy o szerokości 70 m i wysokości również 70 m. Rodzaj skał oraz ich układ przyjęto zgodnie z profilami geologicznymi sporządzonymi dla poszczególnych chodników przyścianowych. Przykładowe modele obliczeniowe dla dwóch z badanych chodników przyścianowych przedstawiono na rysunku 6.

Wartości podstawowe parametrów warstw skalnych (moduł Younga E , współczynnik Poissona ν , wytrzymałość na ściskanie R_c), w tym opisujące kryterium Hoeka-Browna (parametry m_b i s), przyjęto na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów wytrzymałościowych, wykonanych



Rys. 6. Model numeryczny górotworu wokół chodników przyścianowych: a) chodnik 1/VI/385; b) chodnik 6/615
 Fig. 6. Numerical model of the rock mass around the gateroad: a) roadway 1/VI/385; b) roadway 6/615

hydraulicznym penetrometrem otworowym w rejonie prowadzonych badań (tabela 1), oraz w oparciu o obliczenia wykonane za pomocą programu RocLab, będącego integralną częścią pakietu Phase2.

Dla każdego z modeli przyjęto identyczne warunki brzegowe w postaci zerowych przemieszczeń na wszystkich krawędziach zbudowanej tarczy w kierunku pionowym oraz poziomym. Wartość obciążenia wynika z głębokości położenia wyrobiska oraz ciężaru objętościowego skał, natomiast stosunek naprężeń poziomych do pionowych, wyrażony jako współczynnik $k = p_x/p_z$ jest równy 1, co odpowiada hydrostatycznemu stanowi naprężeń.

Istotnym czynnikiem wpływającym na poprawność uzyskiwanych wyników obliczeń numerycznych wykonanych dla chodników przyścianowych jest prawidłowe odwzorowanie obudowy zabezpieczającej wyrobisko. We wszystkich opracowanych modelach uwzględniano podstawowe elementy obudowy stosowane w tych wyrobiskach, takie jak odrzwia obudowy ŁP oraz kotwie stalowe lub strunowe (Majcherczyk i in. 2008, Walentek 2010, Masny, Walentek 2011, Mutke i in. 2016).

Przystępując do kalibracji modeli numerycznych dokładnie przeanalizowano wyniki dołowych badań endoskopowych przeprowadzonych w dziesięciu chodnikach przyścianowych między innymi pod kątem określenia prawdopodobnego kształtu strefy spękań górotworu. Z teoretycznych rozważań (Protodiakonowa, Cymbariewicza, Sałustowicza) wynika, iż obszar strefy spękań wokół wyrobisk korytarzowych może przyjmować kształt wycinka paraboli lub elipsy. Na rysunku 7 porównano rezultaty badań dołowych zasięgu strefy spękań wokół dwóch wyrobisk przyścianowych: 1/VI/385 oraz 6/615 w odległości około 100 m przed frontem ściany, z wynikami obliczeń numerycznych w celu sprawdzenia poprawności przyjętych założeń.

Przedstawione rezultaty wskazują, iż uzyskany w modelach numerycznych zasięg stref spękań w stropie, ociosach i spągu chodników jest porównywalny z wynikami badań dołowych (rys. 7). W przypadku modelu dla chodnika 1/VI/385 zasięg strefy spękań w ociosie był o ponad 1,0 m większy niż wykazały to badania dołowe. Przyczyną tej różnicy była prawdopodobnie niewystarczająca długość badawczego otworu ociosowego, co nie pozwoliło w pełni określić faktycznego zasięgu strefy spękań w ociosie wyrobiska.

W oparciu o rezultaty badań dołowych przeprowadzonych w analizowanych chodnikach, określono również teoretyczny

kształt strefy spękań wokół całego wyrobiska korytarzowego. Kształt ten wyznaczono za pomocą elipsy (rysunek 7 – niebieska przerywana linia), której wierzchołki poprowadzono przez najdalej zaobserwowane spękania znajdujące się w otworach: stropowym, ociosowym i spągowym. Porównując w dalszej kolejności hipotetyczny kształt strefy spękań do wyników obliczeń numerycznych można zauważyć, że uzyskane w obliczeniach strefy spękań niemal całkowicie wpisują się w obszary wyznaczone przez elipsy.

Zgodnie z przedstawionymi założeniami dotyczącymi warunków brzegowych modelu numerycznego, jakie należy przyjąć na etapie odwzorowywania wyników badań dołowych zasięgu strefy spękań, przeprowadzono obliczenia dla każdego z badanych chodników przyścianowych. Dodatkowo, w celu uzyskania odpowiedniej zmiany wielkości strefy spękań uzależnionej od położenia frontu ściany, zwiększano wartości obciążeń działających na tarczę modelu górotworu. Dobór odpowiednich wartości obciążeń był zgodny z charakterem przebiegu rozkładu ciśnienia eksploatacyjnego w rejonie chodnika przyścianowego, a więc im bliżej frontu ściany tym większa ich wartość. Łącznie dla dziesięciu chodników przyścianowych wykonano 36 modeli obliczeniowych, które w pełni odwzorowały wyniki badań dołowych.

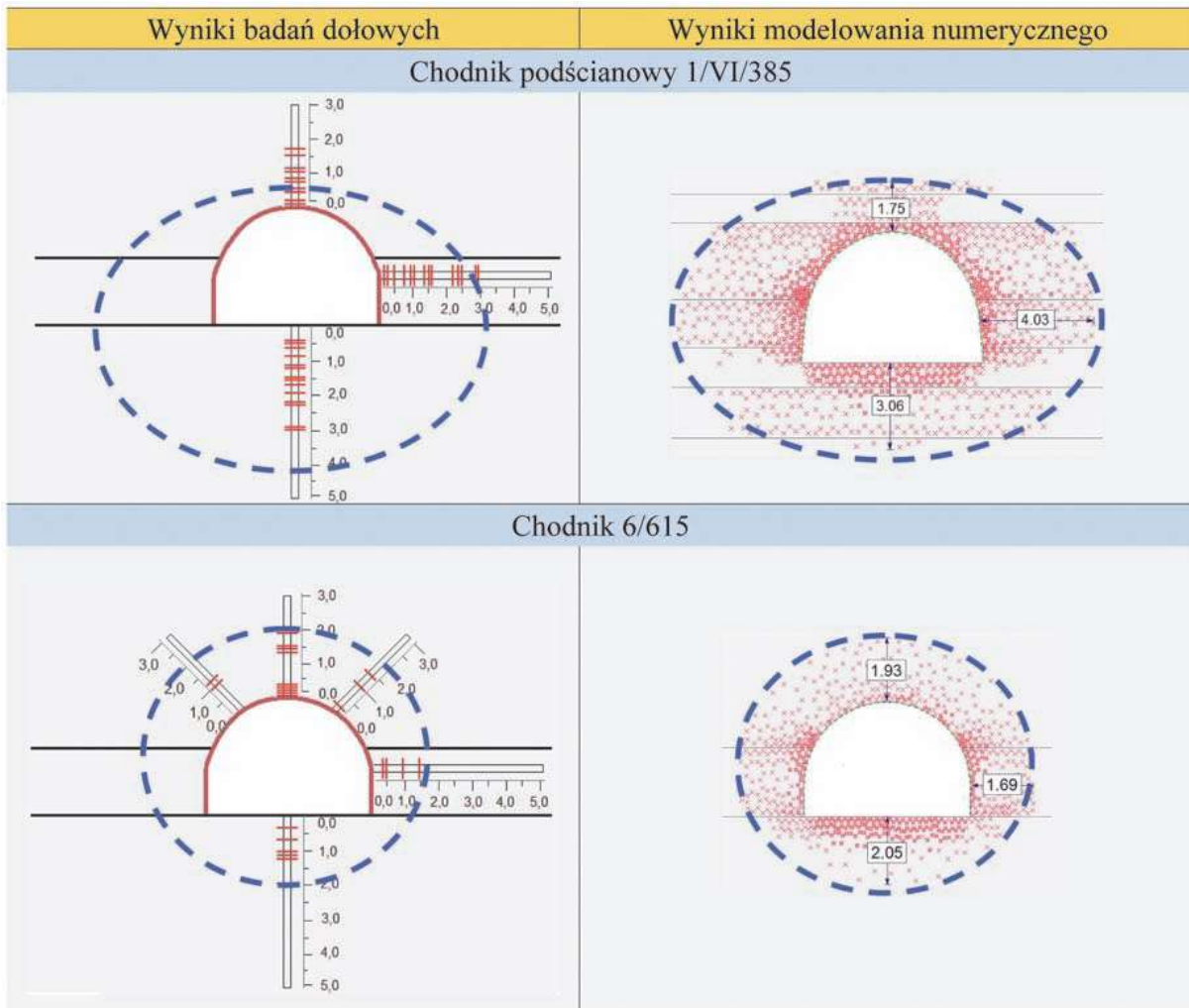
Odwzorowanie strefy spękań za pomocą modelowania numerycznego, według przedstawionej w niniejszym artykule metody postępowania, pozwoliło określić zależność pomiędzy ciśnieniem eksploatacyjnym a położeniem frontu ściany w rejonie chodnika przyścianowego. Dla otrzymanych wyników obliczeń numerycznych p'_z/p_z przeanalizowano dopasowanie kilku postaci funkcji (liniowej, wielomianowej, logarytmicznej, wykładniczej, potęgowej). Najlepsze dopasowanie do wyników obliczeń numerycznych uzyskano dla funkcji w postaci ogólnego równania (7):

$$y = 1 + a \cdot e^{b \cdot d} \quad (7)$$

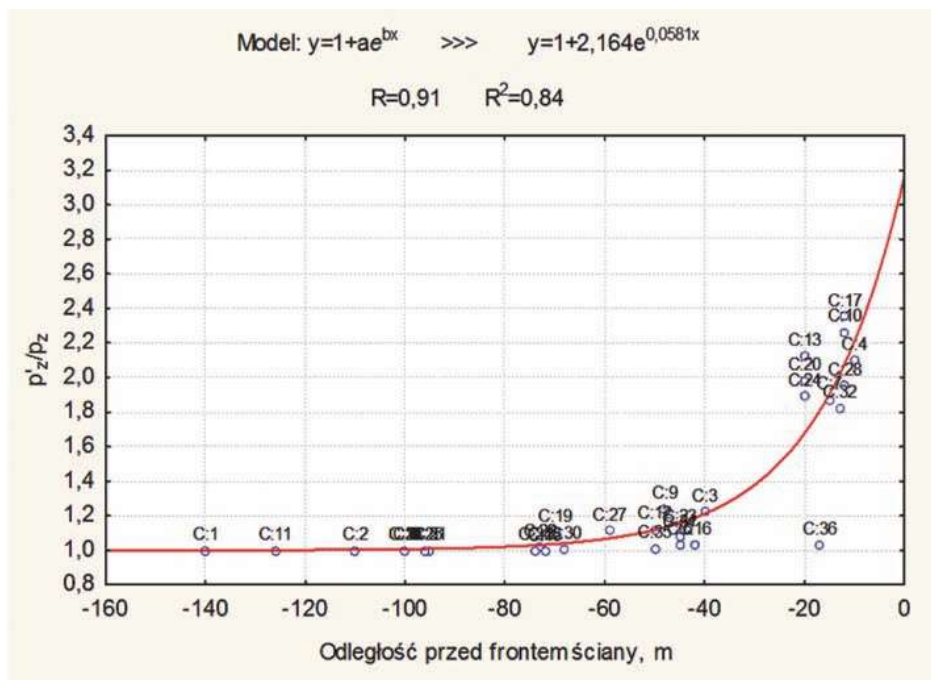
gdzie :

- y – stosunek ciśnienia eksploatacyjnego do ciśnienia pierwotnego p'_z/p_z
- a, b – współczynniki równania,
- d – odległość od frontu ściany, m.

Wyniki obliczeń statystycznych z wykorzystaniem metody regresji nieliniowej współczynników a i b przyjętej funkcji przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 7 Porównanie wyników dołowych badań strefy spękań z wynikami modelowania numerycznego
 Fig. 7. Comparison of the results of underground fracture zone measurements with the results of numerical modeling



Rys. 8. Zmienność stosunku wartości ciśnienia eksploatacyjnego (p') do ciśnienia pierwotnego (p_z) w zależności od położenia frontu ściany
 Fig. 8. Variability of the ratio of operating pressure (p') and primary pressure (p_z) depending on the position of the longwall front

Po wstawieniu wartości a i b do równania ogólnego (7) przyjęta postać funkcji przedstawia się następująco (8):

$$\frac{p'_z}{p_z} = 1 + 2,164 \cdot e^{0,0581d} \quad (8)$$

gdzie:

d – odległość od frontu ściany, m.

Z rysunku 8 wynika, iż wartości ciśnień w czole ściany mogą być ponadtrzykrotnie większe od ciśnień pierwotnych, co jest zgodne z badaniami innych naukowców (Junker i in. 2009).

4. Podsumowanie i wnioski

Chodniki przyścianowe odgrywają istotną rolę w procesie eksploatacji pokładu węgla kamiennego, prowadzonej na ogół, w warunkach polskiego górnictwa, systemem ścianowym z zawałem skał stropowych. Zadaniem chodników przyścianowych jest zapewnienie między innymi: prawidłowej wentylacji rejonu eksploatacji, bezpiecznych warunków pracy załogi, płynności transportu materiału oraz odstawy urobku. Aby spełnić te zadania, chodniki muszą zachować stateczność w całym okresie prowadzenia eksploatacji. Jednym z czynników wpływających na zachowanie stateczności jest zasięg strefy spękań górotworu, wytworzonej wokół chodnika, która decyduje między innymi o wartości obciążenia działającego na obudowę wyrobiska. Zasięg tej strefy zależy od wielu czynników geologiczno-górnictwowych, z których najbardziej istotnym dla chodników przyścianowych, jest wpływ oddziaływania przemieszczającego się frontu eksploatacyjnego, powodującego wzrost wartości naprężeń (ciśnienia eksploatacyjnego) przed czołem ściany.

Na podstawie zaprezentowanych w niniejszym artykule wyników badań dołowych, analiz oraz obliczeń, sformułowano następujące wnioski:

1. Wpływ „ciśnienia eksploatacyjnego” w wyniku przemieszczającego się frontu ściany powoduje zmiany w górotworze otaczającym chodniki przyścianowe, w postaci zwiększającego się obszaru spękań oraz liczby spękań.
2. Istotny wpływ czynnego frontu eksploatacji z zawałem stropu na liczbę i zasięg spękań w skałach stropowych nad chodnikami przyścianowymi zaobserwowano w odległości około 60 m przed czołem ściany. Maksymalnie zasięg strefy spękań nad tymi wyrobiskami powiększył się pięciokrotnie w stosunku do strefy nieobjętej wpływem eksploatacji.
3. Z punktu widzenia obciążenia obudowy chodników przyścianowych przed frontem ściany największe znaczenie mogą mieć spękania znajdujące się w pakiecie skał stropowych do wysokości 3,0 m, ponieważ w tym obszarze górotworu następuje największy przyrost liczby spękań.
4. Hipotetyczny kształt strefy spękań wokół wyrobiska korytarzowego może przybierać postać elipsy, której pozioma oś jest usytuowana równoległe do nachylenia pokładu i otaczających warstw skalnych.
5. Przedstawiona metoda empiryczna, służąca do wyznaczenia bezwzględnej przyrostu zasięgu strefy spękań skał stropowych nad chodnikiem przyścianowym, stanowić może uzupełnienie wyników badań endoskopowych dla przypadku, gdy nie ma możliwości wykonania pomiarów *in situ* w bliskim sąsiedztwie frontu ściany.
6. Opracowana metoda prognozy zasięgu strefy spękań z wykorzystaniem modelowania numerycznego polegająca na zwiększaniu wartości obciążeń modelu górotworu, z uwagi na wpływ frontu eksploatacyjnego, pozwala dodatkowo na przeprowadzenie symulacji: zmian zachodzących w

górotworze (naprężeń, odkształceń), pracy obudowy wyrobiska, czy też prognozy wartości deformacji chodników przyścianowych.

Literatura

- BILIŃSKA A. 2005 - Metoda doboru obudowy ścianowych wyrobisk wybierkowych i chodnikowych do warunków pola eksploatacyjnego. Prace naukowe – Monografie CMG KOMAG, Gliwice.
- BILIŃSKA A., DREINERT B., KOSTYK T. 1996 - Geomechaniczny monitoring zmechanizowanych ścian zlokalizowanych na dużych głębokościach. Prace Naukowe GIG Nr 812.
- BUDRYK W. i in. 1948 - Obudowa górnictwa. Biuro Wydawnictw Centralnego Zarządu Węglowego, Katowice.
- ESTERHUIZEN G.S., BARCZAK T.M. 2006 - Development of Ground Response Curves for Longwall Tailgate Support Design. Proceedings of the 1st U.S. Rock Mechanics Symposium, Golden, CO, Paper 06-935.
- HOEK E. 2006 - Practical Rock Engineering. Rocscience Inc, www.rocscience.com.
- JUNKER M. I IN. 2009 - Strata control in in-seam roadways. Essen, VGE Verlag GmbH.
- KIDYBIŃSKI A. 1998 - Obciążenie obudowy chodnika w strefie wpływu eksploatacji. „Przeгляд Górnictwa” nr 5.
- KŁECZEK Z. 1994 - Geomechanika górnictwa. Śląskie Wydaw. Techniczne, Katowice.
- MAJCHERCZYK T., MAŁKOWSKI P. 2003 - Wpływ frontu ściany na wielkość strefy spękań wokół wyrobiska przyścianowego. „Wiadomości Górnictwa” nr 1, s. 20–29
- MAJCHERCZYK T., MAŁKOWSKI P., NIEDBALSKI Z. 2008 - Badania nowych rozwiązań technologicznych w celu rozrzedzenia obudowy podporowej w wyrobiskach korytarzowych, wyd. AGH. Kraków.
- MAŁKOWSKI P. 2003 - Badania endoskopowe dla określania jakości skał. „Górnictwo i Geoinżynieria”. AGH. R. 27 z. 3-4, s. 419-425.
- MAŁKOWSKI P. 2009 - Porównanie zmodyfikowanego endoskopowego wskaźnika jakości górotworu z parametrami rdzenia wiertniczego. „Przeгляд Górnictwa” nr 7-8, s. 38-45.
- MASNY W., WALENTEK A. 2011 - Numerical Analysis of Dynamic Impact of Rock Mass Tremors on Mine Roadways Support. 30th International Conference on Ground Control in Mining. USA, Morgantown, July 2011, s. 192-200.
- MUTKE G., MASNY W., PRUSEK S. 2016 - Peak particle velocity as an indicator of the dynamic load exerted on the support of underground workings. Acta Geodynamica et Geomaterialia, Vol. 13, No. 4 (184), s. 367-378.
- PIERSZALIK R. 2010 - Badania introskopowe przy użyciu sondy ABS – możliwości badawcze oraz uwagi dotyczące użytkowania. „Przeгляд Górnictwa”. nr11, s. 74-77.
- TORANO J.T., DIEZ R.R., RIVAS CID J.M., BARCIELLA M.M.C. 2002 - FEM modeling of roadways driven in a fractured rock mass under a longwall influence. Elsevier. Computers and Geotechnics, Volume 29, Number 6, September 2002, s. 411-431.
- WALENTEK A. I IN. 2008 - Modernizacja systemów eksploatacji złóż węgla kamiennego. Etap na rok 2008: Model górotworu wokół wyrobiska przyścianowego w oparciu o analizę wsteczną wyników pomiarów zasięgu i kształtu strefy spękań skał. Praca statutowa GIG, 11010568-152, Katowice.
- WALENTEK A. 2009 - Model numeryczny strefy zniszczenia górotworu wokół chodnika przyścianowego. Kwartalnik GIG nr 1, s. 67-80.
- WALENTEK A., LUBOSIK Z., PRUSEK S., MASNY W. 2009 - Numerical Modelling of the Range of Rock Fracture Zone around Gateroads on the Basis of Underground Measurement Results. 28th International Conference on Ground Control in Mining. USA, Morgantown. s. 121-128.
- WALENTEK A. 2010 - Oddziaływanie frontu eksploatacji na zasięg strefy spękań wokół chodników przyścianowych. Prace Naukowe GIG, Kwartalnik nNr 2/1, s. 315-329.

Artykuł wpłynął do redakcji – styczeń - 2018
Artykuł akceptowano do druku 24.01.2018