

*Piotr Małkowski\**, *Zbigniew Niedbalski\**, *Tadeusz Majcherczyk\**

## KONWERGENCJA WYROBISK CHODNIKOWYCH NA PODSTAWIE WYNIKÓW OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH I ICH WERYFIKACJA POMIARAMI *IN SITU*\*\*

---

### 1. Wstęp

Wstępną ocenę stateczności wyrobisk korytarzowych na etapie ich projektowania wykonuje się obecnie najczęściej za pomocą metod numerycznych (MES, MEB, MRS itp.). Dają one możliwość uwzględnienia znacznie większej ilości czynników technicznych i naturalnych w porównaniu ze ścisłymi metodami analitycznymi [1]. Ocena stanów naprężeniowo-deformacyjnych jest kluczowa z punktu widzenia możliwości utrzymania i użytkowania każdego wyrobiska o dowolnym przekroju i przeznaczeniu [2, 8]. Na ich podstawie można projektować wielkość wyrobisk oraz sposób i rodzaj ich zabezpieczenia, a także przewidywać intensywność ruchów górotworu w ich otoczeniu, w czasie użytkowania wyrobisk oraz po ich likwidacji [3, 4, 6, 12].

Pomimo możliwości oceny przemieszczeń za pomocą metod numerycznych, tylko weryfikacja w warunkach naturalnych może pokazać dokładność i słuszność założeń modelowych. Jedną z najprostszych, a zarazem skutecznych metod pomiarowych jest pomiar konwergencji wyrobiska [5, 10]. Intensywność zaciskania wyrobisk często staje się podstawą oceny możliwości utrzymania wyrobiska lub też horyzontu czasowego, w jakim może ono być użytkowane [6, 11, 13].

W niniejszym artykule przedstawiono dwa wyrobiska korytarzowe wykonane w górotworze uwarstwionym w dwóch kopalniach węglowych GZW, których projekty oparto o obliczenia numeryczne MES. Wyrobiska te były następnie obserwowane przez okres prawie dwóch lat [7]. Otrzymane wyniki badań konwergencji zweryfikowano następnie wykonując czternaście modeli numerycznych zarówno dla górotworu sprężystego, jak i sprężysto-plastycznego. Obliczenia te pozwoliły na wybranie najbardziej trafnego sposobu modelowania dla obu wybranych wyrobisk.

---

\* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

\*\* Praca wykonana w ramach grantu MNiSW nr projektu 4T12A 002 29, nr umowy w AGH 342/18.25.100.94

## 2. Numeryczna analiza stateczności wybranych wyrobisk korytarzowych

### 2.1. Pochylnia B-1 w pokładzie 404/1

Do obliczenia przemieszczeń i wyężenia skał wokół pochylni B-1 przyjęto, że w ociosach zalega 2,3-metrowa warstwa węgla, powyżej której występuje 4,2 m łupku ilastego. W stropie bezpośrednim zamodelowano kolejno 1,5 m łupku piaszczystego, 0,5 m piaskowca, ponownie 0,8 m łupku ilastego i 0,2 m piaskowca. Strop zasadniczy stanowiła gruba 14-metrowa warstwa łupku ilastego, a ponad nią 1,0 m pokładu węgla. W spągu bezpośrednim pokładu przyjęto 1-metrową warstwę łupku węglowego, a pod nią grubą warstwę łupku ilastego. Parametry geomechaniczne wszystkich warstw skalnych wyznaczone zostały przez autorów artykułu, a parametry przyjęte do obliczeń numerycznych w pochylni B-1 zamieszczono w tabeli 1.

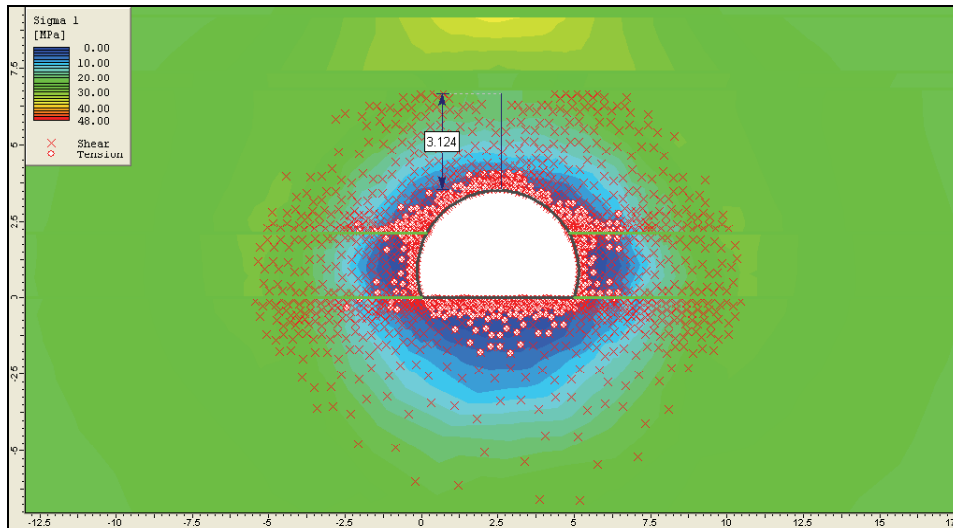
Ponieważ w obrębie drążonego wyrobiska nie występowały krawędzie eksploatacyjne, a górotwór nie był skłonny do tapani, nie zwiększono naprężeń i przyjęto tylko te wynikające z głębokości, która wynosiła 830 m.

TABELA 1

Własności warstw skalnych przyjęte do obliczeń numerycznych — pochylnia B-1

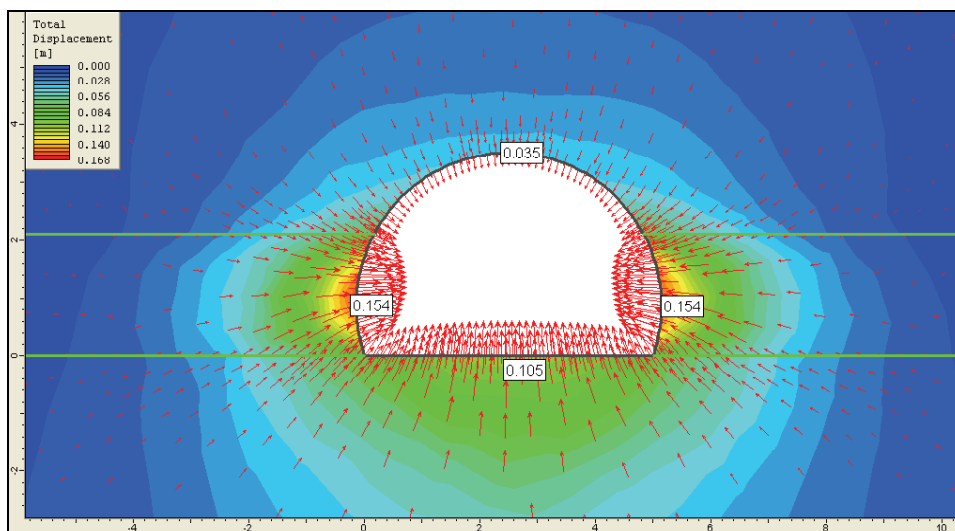
Rodzaj skały	Ciężar objętościowy, $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Moduł Younga próbkowy, $E$ [MPa]	Moduł Younga górotworu, $E$ [MPa]	Współczynnik Poissona, $\nu$	Wytrzymałość na ściskanie, $R_c$ [MPa]	Stała kryterium Hoek'a-Browna $m_b$	Stała kryterium Hoek'a-Browna $s$
węgiel	12,50	1800	204,1	0,35	8,50	0,589	0,0007
łupek węglowy	21,40	5000	914,8	0,28	28,78	0,756	0,0016
łupek ilasty — strop	26,15	11523	3984,2	0,25	47,67	1,441	0,0048
łupek ilasty — spąg	26,39	10500	3033,9	0,25	41,12	1,133	0,0035
łupek piaszczysty	25,99	18747	7544,2	0,23	54,50	1,604	0,0067
piaskowiec	26,21	27005	18747,0	0,20	105,31	3,189	0,0286

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników obliczeń stwierdzono, że wokół pochylni B-1 powstanie równomiernie rozłożona strefa zniszczenia. W stropie sięgać może ona na głębokość nieco ponad 3,0 m, podobnie jak w przypadku spągu (rys. 1). Większego zasięgu strefy zniszczenia spodziewać się można w ociosach i spągu, bowiem przekracza ona 5 m.



Rys. 1. Mapa naprężeń głównych  $\sigma_1$  wraz z potencjalną strefą zniszczenia wokół pochylni B-1

Z oceny wartości przemieszczeń wokół pochylni B-1 przedstawionej na rysunku 2 wynika, że największe wartości przemieszczeń występują w ociosach i wynoszą 0,15 m, w spągu 0,10 m, a w stopie przemieszczenie wynosi około 0,035 m.



Rys. 2. Mapa przemieszczeń wokół pochylni B-1

Na podstawie powyższych obliczeń zdecydowano, że wyrobisko zostanie wykonane w obudowie LP-V29/9 z rozstawem drzwi 1,0 m.

## 2.2. Pochylnia taśmowa C-3 w pokładzie 502/1

Do obliczenia przemieszczenia i wyężenia w pochylni taśmowej C-3 przyjęto, że w ociosach zalega 0,5 m łupku ilastego, a następnie 2-metrowa warstwa węgla, powyżej której występuje 4,5 m piaskowca. W stropie bezpośrednim zamodelowano kolejno 2,5 m łupku ilastego, ponownie 3,5 m piaskowca, następnie 3,8 m łupku ilastego, 0,8 m węgla, jeszcze raz 5,1 m łupku ilastego oraz piaskowiec. W spągu bezpośrednim pokładu przyjęto warstwę łupku ilastego o miąższości 1,0 m oraz grubą ławę piaskowca.

Parametry przyjęte do obliczeń numerycznych w pochylni taśmowej C-3 zamieszczono w tabeli 2. Przedstawione wartości przyjęto w oparciu o własne badania laboratoryjne.

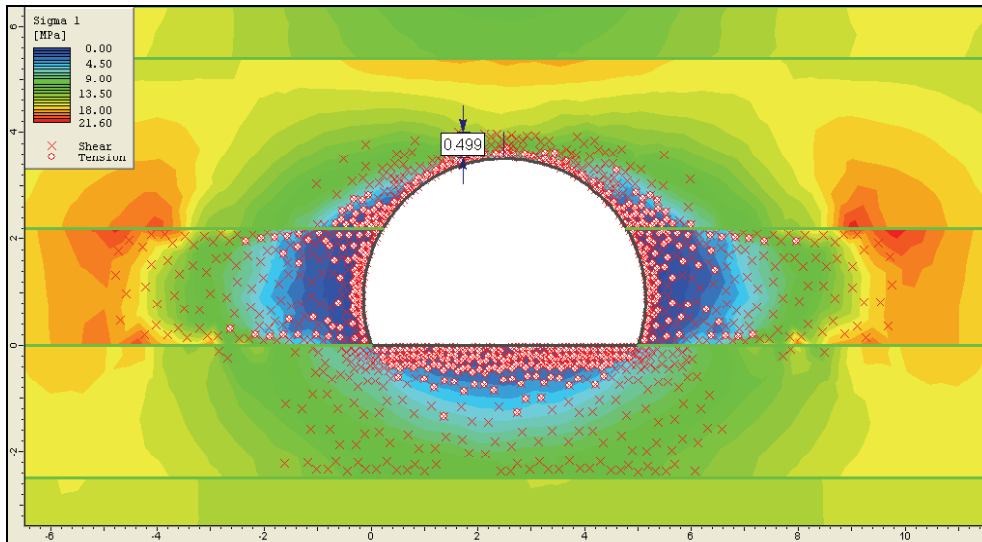
TABELA 2

Własności warstw skalnych przyjęte do obliczeń numerycznych — pochylnia taśmowa C-3

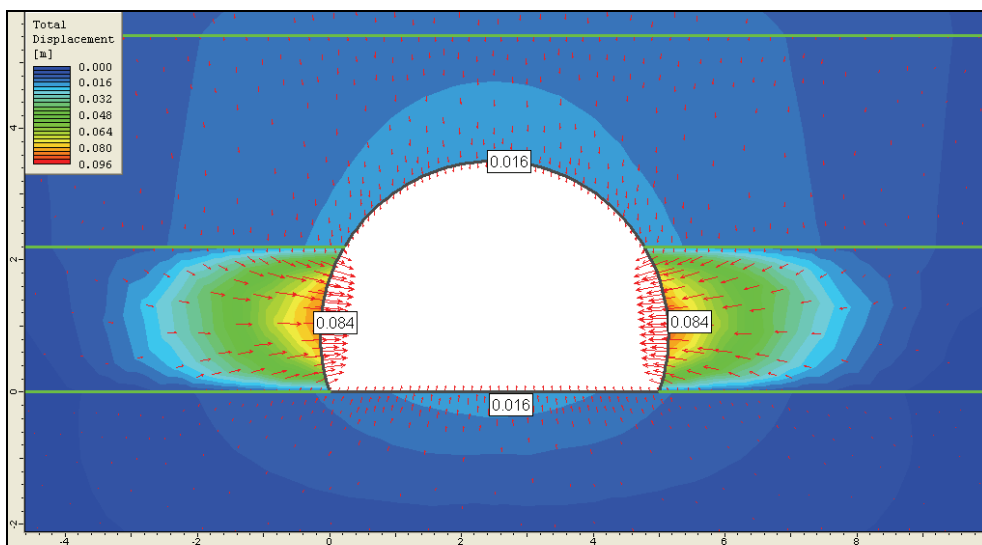
Rodzaj skały	Ciężar objętościowy $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Moduł Younga próbkowy, $E$ , [MPa]	Moduł Younga górotworu, $E$ , [MPa]	Współczynnik Poissona, $\nu$	Wytrzymałość na ściskanie, $R_c$ [MPa]	Stała kryterium Hoek'a-Browna $m_b$	Stała kryterium Hoek'a-Browna $s$
węgiel	12,50	1800	204,1	0,30	13,44	1,178	0,0007
łupek ilasty — strop	24,83	9117	2474,3	0,25	47,51	1,249	0,0031
łupek ilasty — spąg	25,41	12788	4422,1	0,24	65,46	1,441	0,0048
piaskowiec — strop	24,02	11347	6413,8	0,22	51,97	3,861	0,0147
piaskowiec — spąg	25,27	13986	9425,4	0,20	66,81	4,616	0,0256

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników stwierdzono, że wokół pochylni taśmowej C-3 w pokładzie 502/1 powstanie nierównomiernie rozłożona strefa zniszczenia. W stropie sięgać może ona na wysokość około 0,50 m (rys. 3). Znacznie większe zniszczenie wystąpić może w ociosach (ponad 4 m) oraz w spągu, tj. do około 2,5 m. Niewielka strefa zniszczeń w stropie jest wynikiem zamodelowania warstwy piaskowca o wysokich parametrach wytrzymałościowo-odkształceniowych.

Ocena wartości przemieszczeń wokół pochylni taśmowej C-3 (rys. 4) wskazuje, że największe przemieszczenia występują w ociosach i są równe 0,084 m. Niewielkiego przemieszczenia spodziewać się można w stropie i spągu, które nie powinno przekroczyć 0,018 m w spągu wyrobiska i ok. 0,020 m bezpośrednio w jego stropie.



Rys. 3. Mapa naprężeń głównych  $\sigma_1$  wraz z potencjalną strefą zniszczenia wokół pochylni taśmowej C-3



Rys. 4. Mapa przemieszczeń wokół pochylni taśmowej C-3

Na podstawie powyższych obliczeń stwierdzono, że wyrobisko wykonane zostanie w obudowie LP-V29/9 z rozstawem odrzwi 1,0 m.

### 3. Badania kopalniane

Wyniki pomiarów kopalnianych z badań konwergencji przedstawiono tylko jako zmianę wysokości i szerokości wyrobiska oraz wielkość zsuwu zamków obudowy. Zsuw zamków obudowy pokazuje, czy obudowa pracowała cały czas jako obudowa podatna, czy też ze względu na zbyt małe działające na nią naprężenia pracowała praktycznie jako obudowa sztywna. Pełne zestawienie wyników badań kopalnianych zamieszczono w pracy [7].

#### 3.1. Pochylnia B-1

Pomiary konwergencji w pochylni B-1 w pokładzie 401/1 prowadzone były na 7 stanowiskach pomiarowych, zlokalizowanych kolejno na 500 m, 513 m, 528 m, 542 m, 560 m, 570 m i 586 m. Odczyty prowadzone były co 1 miesiąc. Pomiary prowadzono przez okres 655 dni, lecz ponieważ po 580 dniach pomiaru zaczął się ujawniać wpływ eksploatacji ściany B-2 w pokładzie 403/1, jako ostateczne wyniki ustalenia się wtórnego stanu naprężenia wzięto pod uwagę 580-dniowy okres badań.

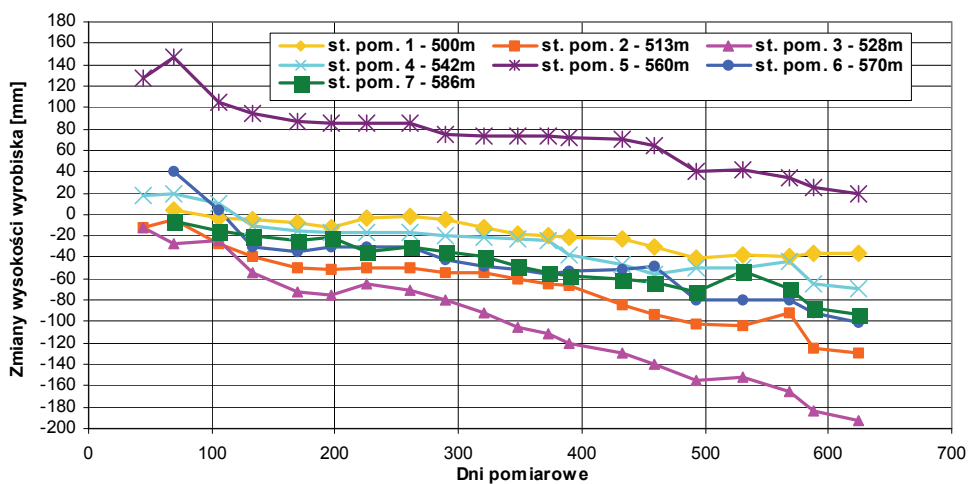
Otrzymane rezultaty w postaci zmian szerokości, wysokości oraz zsuwu zamków obudowy przedstawiono w tabeli 3. Wynika z niej, że na wszystkich bazach pomiarowych nastąpiło zmniejszenie wymiarów pierwotnych. Średnie zmniejszenie wysokości wyrobiska wyniosło 86,3 mm, natomiast średnie zmniejszenie szerokości pochylni B-1 wyniosło 134,7 mm. Zsuwy na zamkach na wszystkich bazach pomiarowych wynosiły średnio ok. 21÷28 mm, zatem można stwierdzić, że było to ok. 1,1÷1,3 mm/miesiąc. Obudowa podatna pracowała więc w tym przypadku przede wszystkim jako sztywna rama.

TABELA 3

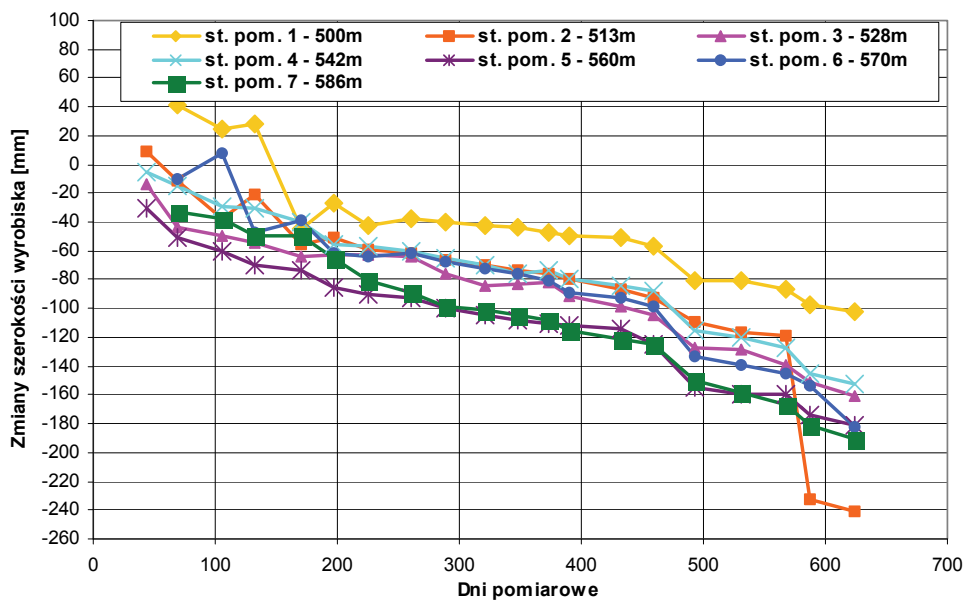
Wyniki pomiarów końcowych konwergencji w pochylni B-1

Baza pomiarowa	Wys. pocz. $H_p$ [m]	Wys. końc. $H_k$ [m]	Zmiana wys. $\Delta H$ [mm]	Szer. pocz. $S_p$ [m]	Szer. końc. $S_k$ [m]	Zmiana szer. $\Delta S$ [mm]	Zsuw $Z_1$ [mm]	Zsuw $Z_2$ [mm]
500 m	3,343	3,303	-40	4,537	4,451	-86	-48	11
513 m	3,270	3,178	-92	4,391	4,272	-119	9	9
528 m	3,080	2,915	-165	4,579	4,440	-139	4	6
542 m	3,300	3,236	-64	4,460	4,333	-127	3	-93
560 m	3,368	3,275	-93	4,690	4,530	-160	-132	11
570 m	3,280	3,200	-80	4,542	4,397	-145	74	-93
586 m	3,385	3,315	-70	4,540	4,373	-167	-111	-1
<b>średnio</b>			<b>-86,3</b>			<b>-134,7</b>	<b>-28,7</b>	<b>-21,4</b>

Na rysunku 5 i 6 przedstawiono przebieg zmian wysokości i szerokości wyrobiska przez cały okres prowadzonego monitoringu.



Rys. 5. Zmiany wysokości pochylni B-1 na badanym odcinku



Rys. 6. Zmiany szerokości pochylni B-1 na badanym odcinku

### 3.2. Pochylnia taśmowa C-3

Pomiary konwergencji w pochylni taśmowej C-3 w pokładzie 502/1 prowadzone były na 10 stanowiskach pomiarowych, zlokalizowanych kolejno na 105 m, 133 m, 148 m, 163 m, 176 m, 196 m, 213 m, 230 m, 248 m i 268 m. Odczyty prowadzone były 2 razy w miesiącu. Pomiary prowadzono przez okres 809 dni od czasu zabudowy I stacji pomiarowej. Ponieważ po 722 dniach pomiaru zaczął się ujawniać wpływ eksploatacji ściany w wyżej leżącym pokładzie 407/1-2, jako ostateczne wyniki ustalenia się wtórnego stanu naprężenia wzięto pod uwagę 722-dniowy okres badań.

Wyniki pomiarów końcowych zmian szerokości, wysokości oraz zsuwu zamków obudowy przedstawiono w tabeli 4. Wynika z niej, że na większości baz pomiarowych nastąpiło zmniejszenie wymiarów pierwotnych. Średnie zmniejszenie wysokości wyrobiska wyniosło zaledwie 19,0 mm, natomiast średnie zmniejszenie szerokości pochylni B-1 wyniosło 41,7 mm.

Zsuwy na zamkach były minimalne i średnio dla 722 dni pomiaru wyniosły 0,3 mm i -2,1 mm. Z praktycznego punktu widzenia, biorąc pod uwagę dokładność pomiaru, są to wartości w granicach błędu pomiarowego. I w tym przypadku można zatem przyjąć, że obudowa wyrobiska pracowała jako obudowa sztywne.

TABELA 4

Wyniki końcowe pomiaru konwergencji w pochylni taśmowej C-3 pokład 502/1

Baza pomiarowa	Wys. pocz. $H_p$ [m]	Wys. końc. $H_k$ [m]	Zmiana wys. $\Delta H$ [mm]	Szer. pocz. $S_p$ [m]	Szer. końc. $S_k$ [m]	Zmiana szer. $\Delta S$ [mm]	Zsuw $Z_1$ [mm]	Zsuw $Z_2$ [mm]
105 m	3,461	3,462	1	4,592	4,575	-17	-1	-6
133 m	-	-	-	4,866	4,813	-53	7	-2
148 m	3,657	3,650	-7	5,062	4,993	-69	-3	26
163 m	3,430	3,412	-18	4,836	4,829	-7	-8	-79
176 m	3,764	3,730	-34	5,180	5,160	-20	24	20
196 m	3,297	3,280	-17	4,650	4,650	0	5	-11
213 m	3,401	3,375	-26	4,870	4,839	-31	-1	-4
230 m	3,159	3,145	-14	4,810	4,734	-76	-1	-11
248 m	3,334	3,310	-24	5,233	5,121	-112	-16	44
268 m*	3,330	3,298	-32	4,951	4,919	-32	-3	-2
<b>średnio</b>			<b>-19,0</b>			<b>-41,7</b>	<b>0,3</b>	<b>-2,1</b>

\* pomiar zakończono po 519 dniach z powodu uszkodzenia stanowiska.



#### 4. Obliczenia numeryczne

Obliczenia numeryczne stateczności wybranych wyrobisk korytarzowych wykonywano w programie Phase2 v.6.026 dla dwóch typów modeli: sprężystych i sprężysto-plastycznych. Zastosowany program pozwala na wybór kilku kryteriów wytrzymałościowych, a także pozwala zamodelować obudowę sztywną i podatną [9]. Dla wszystkich modeli obliczeniowych wybrano kryterium zniszczenia Hoeka-Browna i przyjęto odpowiednie parametry geomechaniczne warstw skalnych wg tabel 1 i 2.

Przyjęto następujący sposób postępowania: najpierw wykonano prosty model sprężysty, który następnie wzbogacano o elementy obudowy oraz zmienne własności skał (anizotropię), a następnie podobną procedurę przeprowadzono dla modeli sprężysto-plastycznych.

Wykonano łącznie 8 modeli sprężystych i 6 sprężysto-plastycznych. Pierwszym modelem był model sprężysty (model 1) o modułach sprężystości zgodnych z wartościami próbkowymi. W drugim dodatkowo zamodelowano obudowę stalową o parametrach obudowy ŁP9 (model 2) bez możliwości zsuwu. Na taki wariant obliczeń zdecydowano się ze względu na wyniki badań kopalnianych, gdzie wielkość zsuwu złącz obudowy podatnej była tak mała, że obudowa ŁP pracowała przez kilkunastomiesięczny okres czasu praktycznie jako sztywna [7].

Ze względu na ewidentne płaszczyzny anizotropii w górotworze karbońskim, wykonano trzy modele dla górotworu transwersalnie izotropowego, których rozwiązania dla obszaru GZW dają w wielu przypadkach zadowalające rezultaty [14]. Występuje tu pięć niezależnych stałych  $E_1 = E_2, E_3, \nu_{12} = \nu_{21}, \nu_{31}, G_{12}$ , a różnice w wartościach modułów kierunkowych zależą od stopnia spękania górotworu. W modelach przyjęto takie same wartości współczynnika Poissona we wszystkich kierunkach, a moduły sprężystości zgodne z wartościami próbkowymi dla trzech wariantów  $E_1 = E_2 = 0,1 \cdot E_3$  (model 3),  $E_1 = E_2 = 0,2 \cdot E_3$  (model 4),  $E_1 = E_2 = 0,5 \cdot E_3$  (model 5). We wszystkich trzech modelach uwzględniono obudowę stalową o parametrach obudowy ŁP9 bez możliwości zsuwu.

W kolejnych modelach przyjęto moduły sprężystości warstw skalnych o wartościach odpowiadających masywowi skalnemu, obliczonych na podstawie teorii Hoeka-Browna [2]: w pierwszym wariantcie bez obudowy (model 6), w drugim z obudową ŁP bez możliwości zsuwu (model 7), w trzecim — z obudową ŁP z możliwością zsuwu 2% w stosunku do obodu odrzwi (model 8) [9].

Dla górotworu o własnościach sprężysto-plastycznych wykonano najpierw obliczenia dla modelu bez obudowy, o wartościach modułów sprężystości odpowiadających badanym próbkom skalnym i wartościach pozniszczeniowych równych modułom przed zniszczeniem (model 9). Następnie w wyrobisku zamodelowano obudowę ŁP bez możliwości zsuwu (model 10) oraz 10-krotnie obniżono wartości pozniszczeniowe warstw skalnych (model 11).

Ponieważ często uważa się, że kontakt pomiędzy warstwami jest najsłabszą częścią masywu, gdzie najłatwiej dochodzi do separacji skał, obliczenia przeprowadzono także zakładając w modelu sprężysto-plastycznym połączenie typu *joint*. Przyjęto najprostszy model górotworu spękanego — górtwór z siecią poziomych nieciągłości, o stałej jednostko-

wej sztywności normalnej do spękania  $k_n$  i jednostkowej sztywności stycznej do spękania  $k_s$ . Wartość parametru  $k_n$  zależy głównie od szorstkości powierzchni spękania, rozkładu i odległości prostopadłych szczelin oraz właściwości materiału wypełniającego. Wartość parametru  $k_s$  zależy głównie od szorstkości ścianek spękania oraz właściwości materiału wypełniającego [2, 15]. W modelu przyjęto  $k_n = 1\ 000\ 000$  MPa/m i  $k_s = 100\ 000$  MPa/m [9] dla kontaktu łupku piaszczystego i łupku ilastego oraz dwa razy mniejsze wartości dla kontaktu węgla z łupkiem (model 12).

W kolejnych modelach przyjęto moduły Younga dla masywu skalnego obliczone według teorii Hoeka-Browna i wartości pozniszczeniowe równe własnościom skał przed zniszczeniem. W modelu 13 przyjęto wyrobisko bez obudowy, a w modelu 14 — model z obudową ŁP bez możliwości zsuwu.

#### 4.1. Wyniki obliczeń numerycznych

Wyniki obliczeń numerycznych dla obu wybranych wyrobisk przedstawiono w tabelach 5 i 6. Ze względu na dużą liczbę obliczeń w tabelach pokazano tylko zmiany wysokości i szerokości wyrobiska oraz naprężenia główne  $\sigma_1$  i  $\sigma_3$  na jego konturze. Dodatkowo na rysunkach 7 i 8 pokazano rozkład przemieszczeń warstw skalnych w otoczeniu wyrobiska dla modeli, których wyniki były najbardziej zbliżone do otrzymanych wyników pomiarów konwergencji w obu wyrobiskach.

##### Pochylnia B-1

W przypadku pochylni B-1 model sprężysty o próbkowych własnościach odkształceniowych wykazał zmianę szerokości wyrobiska ( $\Delta s$ ) o wartość zaledwie 0,034 m i zmianę wysokości ( $\Delta h$ ) o wartość 0,020 m (model 1). Założenie obudowy nieznacznie zmniejszyło jeszcze te wartości (model 2). Interesujące wyniki otrzymano dla modeli transwersalnie izotropowych. Obniżenie o 50% własności odkształceniowych wykazało konwergencję poziomą równą 0,065 m i pionową — 0,027 m (model 3). Pięciokrotne obniżenie własności odkształceniowych na kierunku równoległym do układu warstw powoduje, że zmiany konwergencji wynoszą:  $\Delta s = 0,168$  m i  $\Delta h = 0,033$  m (model 4), a 10-krotne obniżenie parametrów odkształceniowych powoduje, że  $\Delta s = 0,334$  m i  $\Delta h = 0,039$  m (model 5). Przyjmując moduły sprężystości odpowiadające masywowi skalnemu zmiany wymiarów wyrobiska znacznie wzrosły. Wynoszą one  $\Delta s = 0,268$  m i  $\Delta h = 0,095$  m (model 6), po zamodelowaniu obudowy wartości te spadły do  $\Delta s = 0,192$  m i  $\Delta h = 0,033$  m (model 7), a po uwzględnieniu zsuwu obudowy ponownie wzrosły do  $\Delta s = 0,264$  m i  $\Delta h = 0,091$  m (model 8).

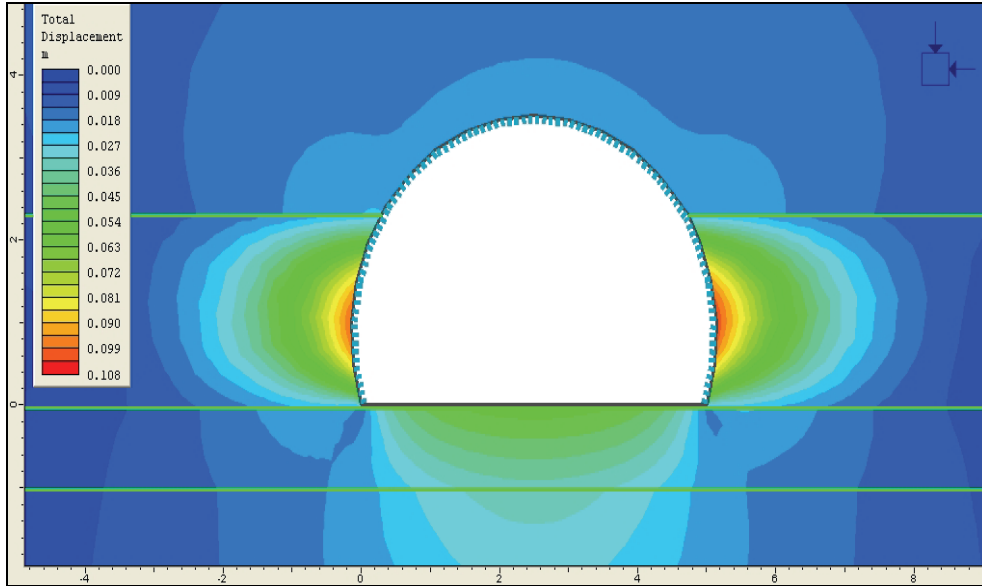
Przyjmując moduły próbkowe dla modeli sprężysto-plastycznych konwergencja pozioma, w zależności od odporu obudowy, wyniosła kolejno (modele 9 i 10) 0,336 m i 0,224 m, a pionowa — 0,057 m i 0,052 m. 10-krotne obniżenie wartości pozniszczeniowych, pomimo zamodelowanej obudowy (model 11), skutkuje zwiększeniem konwergencji do  $\Delta s = 1,115$  m i  $\Delta h = 0,285$  m, a uwzględnienie spękań na kontakcie warstw nieznacznie zmniejszyła o konwergencję do  $\Delta s = 1,080$  m i  $\Delta h = 0,279$  m (model 12).

TABELA 5

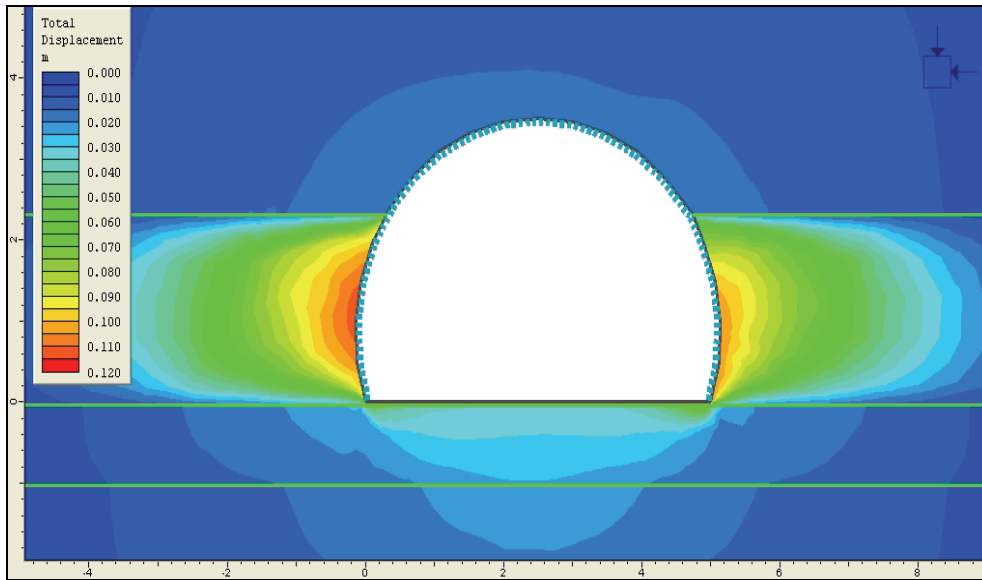
## Wyniki obliczeń numerycznych dla pochylni B-1, pokład 404/1

Numer modelu	Zmiany wymiarów wyrobiska		Naprężenia główne $\sigma_1$ i $\sigma_3$ na konturze			
	szerokości $\Delta s$ [m]	wysokości $\Delta h$ [m]		stropu [MPa]	spągu [MPa]	ociosów [MPa]
modele sprężyste						
1	-0,034	-0,020	$\sigma_1$	39,8	9,0	22,7
			$\sigma_3$	1,1	-0,2	0,9
2	-0,032	-0,019	$\sigma_1$	35,6	13,8	22,9
			$\sigma_3$	3,2	3,0	0,4
3	-0,065	-0,027	$\sigma_1$	44,2	14,5	22,8
			$\sigma_3$	1,8	0,8	1,2
4	<b>-0,168</b>	<b>-0,033</b>	$\sigma_1$	47,3	20,6	22,4
			$\sigma_3$	-1,3	0	-1,5
5	-0,334	-0,039	$\sigma_1$	49,5	23	21,7
			$\sigma_3$	-1,5	-0,3	1,1
6	-0,268	-0,095	$\sigma_1$	37,8	9,8	14,5
			$\sigma_3$	1,3	-0,2	0
7	<b>-0,192</b>	<b>-0,075</b>	$\sigma_1$	38,3	13,1	17,4
			$\sigma_3$	2,3	-1,6	6,7
8	-0,264	-0,091	$\sigma_1$	36,3	14,1	15,9
			$\sigma_3$	1,5	-0,1	-0,1
modele sprężysto-plastyczne						
9	-0,336	-0,057	$\sigma_1$	6,2	1,8	1
			$\sigma_3$	0,2	0	0,2
10	-0,224	-0,052	$\sigma_1$	9,5	1,1	1,9
			$\sigma_3$	1,1	0	0,4
11	-1,115	-0,285	$\sigma_1$	0,8	0	0,2
			$\sigma_3$	0,1	0,1	-0,4
12	-1,680	-0,221	$\sigma_1$	3,7	0,8	0
			$\sigma_3$	0,2	0	0
13	-1,218	-0,199	$\sigma_1$	11,4	1,2	0,8
			$\sigma_3$	1,7	0	0,3
14	-1,080	-0,279	$\sigma_1$	1,2	0,4	0
			$\sigma_3$	0,1	0,2	0,1

a)



b)



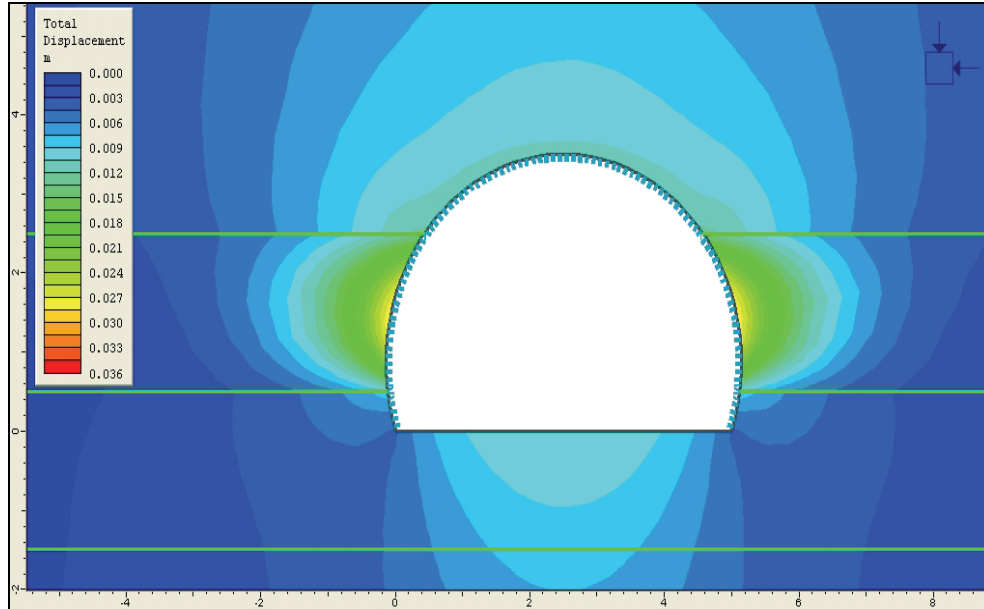
Rys. 7. Przemieszczenia dla najlepiej dobranych modeli numerycznych dla pochylni B-1:  
a) model nr 7, b) model nr 8

TABELA 6

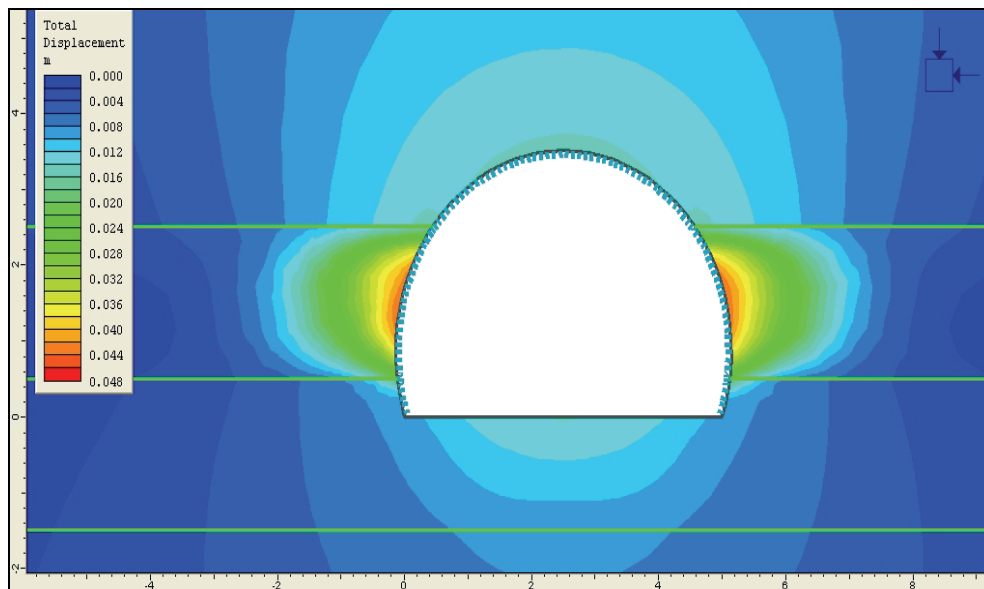
Wyniki obliczeń numerycznych dla pochylni taśmowej C-3, pokład 502/1

Numer modelu	Zmiany wymiarów wyrobiska		Naprężenia główne $\sigma_1$ i $\sigma_3$ na konturze			
	szerokości $\Delta s$ [m]	wysokości $\Delta h$ [m]		stropu [MPa]	spągu [MPa]	ociosów [MPa]
modele sprężyste						
1	-0,032	-0,019	$\sigma_1$	36	11	20
			$\sigma_3$	2	0	2,5
2	-0,030	-0,016	$\sigma_1$	36	12	24
			$\sigma_3$	4	0	4
3	<b>-0,052</b>	<b>-0,022</b>	$\sigma_1$	40	18	27
			$\sigma_3$	4	0	4
4	-0,126	-0,030	$\sigma_1$	40	25	28
			$\sigma_3$	4	0	4
5	-0,264	-0,034	$\sigma_1$	38	25	28
			$\sigma_3$	4,5	0	4,5
6	-0,230	-0,055	$\sigma_1$	31	15	15
			$\sigma_3$	2,5	0	0
7	-0,158	-0,041	$\sigma_1$	36,3	15,2	19,6
			$\sigma_3$	4	-0,4	7,8
8	-0,218	-0,053	$\sigma_1$	30,2	14,8	18,8
			$\sigma_3$	0,8	-0,7	-0,3
modele sprężysto-plastyczne						
9	-0,126	-0,033	$\sigma_1$	18	16,5	4,5
			$\sigma_3$	1,5	0	0
10	<b>-0,088</b>	<b>-0,028</b>	$\sigma_1$	12	4,5	4,5
			$\sigma_3$	1	0	1
11	-0,254	-0,067	$\sigma_1$	6	2	4
			$\sigma_3$	1,5	0	1,5
12	-0,690	-0,090	$\sigma_1$	10,5	4,5	0
			$\sigma_3$	0	0	0
13	-0,308	-0,063	$\sigma_1$	20	4	10
			$\sigma_3$	2	0	2,5
14	-0,544	-0,168	$\sigma_1$	2,9	1,2	0
			$\sigma_3$	0,2	0	0

a)



b)



**Rys. 8.** Przemieszczenia dla najlepiej dobranych modeli numerycznych dla pochylni taśmowej C-3:  
a) model nr 3, b) model nr 10

Przyjęcie wartości modułów sprężystości odpowiadających masywowi skalnemu spowodowało, że zmiana wymiarów wyrobiska była największa w modelu 13 i wyniosła  $\Delta s = 1,680$  m i  $\Delta h = 0,221$  m. Zamodelowanie obudowy zmniejszyło konwergencję do  $\Delta s = 1,218$  m i  $\Delta h = 0,199$  m (model 14).

Porównując powyższe wyniki obliczeń z pomierzonymi wartościami konwergencji w pochylni B-1 równymi  $\Delta s_k = 0,135$  m i  $\Delta h_k = 0,086$  m można stwierdzić, że najlepsze rezultaty ilościowe dają modele sprężyste transwersalnie izotropowe o modułach sprężystości dla górotworu nienaruszonego (próbek) i  $E_1 = E_2 = 0,2 \cdot E_3$  (model 4) lub też modułach sprężystości dla masywu skalnego z uwzględnieniem obudowy ŁP (model 7). Modele sprężysto-plastyczne wykazują duże wartości przemieszczeń, szczególnie przy przyjmowaniu własności odkształceniowych dla górotworu. Konwergencja pozioma powyżej 1 m i pionowa ok. 0,3 m, dla przyjętych warunków górnictwo-geologicznych, jest w praktyce rzadko spotykana. Spośród drugiej grupy modeli najlepiej wypada model nr 10 — o modułach dla górotworu nienaruszonego (próbkowych) z uwzględnieniem obudowy ŁP. Rozkład przemieszczeń dla najlepiej dobranych analizowanych modeli numerycznych — modelu sprężystego (7) i sprężysto-plastycznego (10) — pokazano na rysunku 7.

### Pochylnia taśmowa C-3

Podobne wyniki do tych, jakie otrzymano dla pochylni B-1, uzyskano dla pochylni taśmowej C-3 (tabela 6). Dla pierwszych wykonanych modeli sprężystych 1 i 2 zmiana szerokości wyniosła  $0,030 \div 0,032$  m, a wysokości —  $0,016 \div 0,019$  m. Dla modeli transwersalnie izotropowych (modele 3, 4 i 5) zmiana szerokości wzrastała od  $0,052$  m do  $0,264$  m, a wysokości od  $0,022$  m do  $0,034$  m. Przyjmując moduły sprężystości dla masywu skalnego, konwergencja pozioma była zbliżona do modelu transwersalnie izotropowego nr 5 ( $\Delta s = 0,230$  m), ale pionowa wzrosła do  $\Delta h = 0,055$  m (model 6). Zamodelowanie obudowy zmniejszyło zmiany wymiarów wyrobiska do  $\Delta s = 0,158$  m i  $\Delta h = 0,041$  m (model 7), lecz z kolei uwzględnienie zsuwu ponownie zmniejszyło gabaryty pochylni do  $\Delta s = 0,218$  m i  $\Delta h = 0,053$  m (model 8).

W przypadku modeli sprężysto-plastycznych dla modułów sprężystości odpowiadających górotworowi nienaruszonemu konwergencja wynosi  $\Delta s = 0,126$  m i  $\Delta h = 0,033$  m (model 9), która po uwzględnieniu odporu obudowy maleje odpowiednio do 88 mm i 28 mm (model 10). Dziesięciokrotne obniżenie wartości pozniszczeniowych takiego wariantu obliczeń zwiększa ponownie zmiany wymiarów pochylni do  $\Delta s = 0,254$  m i  $\Delta h = 0,067$  m (model 11). W przypadku uwzględnienia własności odkształceniowych odpowiadających masywowi skalnemu uzyskano zmianę szerokości wyrobiska równą 690 mm i wysokości 90 mm (model 12), a wstawienie do wyrobiska obudowy obniżyło ww. wartości do kolejno 308 mm i 63 mm. Przyjmując, że pomiędzy warstwami skalnymi tworzą się szczeliny, to wartości konwergencji wynoszą  $\Delta s = 0,544$  m i  $\Delta h = 0,168$  m (model 14).

Porównując powyższe wyniki obliczeń z pomierzonymi wartościami konwergencji w pochylni taśmowej C-3 równymi  $\Delta s_k = 0,042$  m i  $\Delta h_k = 0,019$  m można stwierdzić, że najlepsze rezultaty ilościowe dają modele sprężyste transwersalnie izotropowe o modułach

sprężystości dla górotworu nienaruszonego (próbek) i  $E_1 = E_2 = 0,5 \cdot E_3$  (model 3) lub też najprostszy model sprężysty o modułach sprężystości dla górotworu nienaruszonego (model 1). Modele sprężysto-plastyczne i w tym przypadku wykazują zdecydowanie zbyt duże wartości przemieszczeń, szczególnie przy przyjmowaniu własności odkształceniowych dla górotworu. Spośród drugiej grupy modeli najlepiej wypada model nr 10 — o modułach dla górotworu nienaruszonego z uwzględnieniem obudowy ŁP. Rozkład przemieszczeń dla najlepiej dobranych analizowanych modeli numerycznych — modelu sprężystego (3) i sprężysto-plastycznego (10) — pokazano na rysunku 8.

## 5. Podsumowanie

- 1) Przeprowadzone obliczenia wskazują, że modelowanie numeryczne w miarę wiernie oddaje zachowanie się górotworu w naturze. Pod względem ilościowym nie są to jednak wartości dokładne. Powodem tego są zmienne wartości parametrów fizycznych skał oraz niejednorodność górotworu.
- 2) Wyniki uzyskane dla modeli sprężystych wskazują na znacznie mniejsze wartości przemieszczeń konturu wyrobiska niż wyniki z modeli sprężysto-plastycznych, a zasięg strefy intensywnych przemieszczeń wokół wyrobiska jest dla nich mniejszy. Badania kopalniane wskazują, że i jedno i drugie modele górotworu mogą być podstawą do oceny stateczności wyrobiska. Dokładny wybór mógłby zostać wykonany w przypadku pomiaru wartości naprężeń w otoczeniu wyrobiska.
- 3) Różnorodność modeli numerycznych sprawia, że dla danych warunków górnictwo-geologicznych można dobrać taki model, który będzie dość dokładnie opisywał stan odkształcenia w otoczeniu wyrobiska korytarzowego. O sposobie wyboru modelu może decydować sztywność warstw skalnych. Cienkie naprzemianległe warstwy zalegające w otoczeniu wyrobiska mogą zostać z większym powodzeniem opisane przez modele sprężysto-plastyczne niż w przypadku występowania w stropie i spągu grubej sztywnej warstw skalnej. Wówczas lepiej się sprawdzają modele sprężyste.
- 4) Dla analizowanych dwóch wyrobisk korytarzowych najlepsze rezultaty ilościowe otrzymano dla modeli sprężystych transwersalnie izotropowych o modułach sprężystości dla górotworu nienaruszonego, gdzie  $E_1 = E_2 = 0,2 \div 0,5 \cdot E_3$  oraz dla modeli sprężysto-plastycznych o modułach dla górotworu nienaruszonego z uwzględnieniem obudowy ŁP bez możliwości zsuwu.

## LITERATURA

- [1] *Filcek H., Walaszczyk J., Tajduś A.*: Metody komputerowe w geomechanice górniczej. Katowice, Śląskie Wydawnictwa Techniczne 1994
- [2] *Hoek E.*: Practical Rock Engineering, Rocscience Inc. , 2000 ([www.rocscience.com](http://www.rocscience.com))
- [3] *Hrubešova E., Kaláb Z., Kořínek R., Žůrek P.*: Geotechnical Monitoring and Mathematical Modelling in Medieval Mine Jeronym (Czech Republic). Kwartalnik UWND AGH, Górnictwo i Geoinżynieria, z. 3, 2007



- [4] *Kosugi M., Tamai A.*: Characterization and behavior evaluation of jointed rock masses in tunneling. *Wiadomości Górnicze*, nr 2, 2002
- [5] *Majcherczyk T., Malkowski P.*: Obudowa wyrobisk korytarzowych — możliwości Dalszego Rozwoju — Miocen, 2005
- [6] *Majcherczyk T., Malkowski, Niedbalski Z.*: Badania szybkości rozwarstwień skał stropowych w wybranych wyrobiskach przygotowawczych. *Materiały Zimowej Szkoły Górotworu i Geoinżynierii*, Krynica, 2006, 509–517
- [7] *Majcherczyk T., Malkowski P., Niedbalski Z.*: Ruchy górotworu i reakcje obudowy w procesie niszczenia skał wokół wyrobisk korytarzowych na podstawie badań *in situ*. Kraków, Akademia Górniczo-Hutnicza 2006
- [8] *Majcherczyk T., Szaszenko A.N., Sdwiżkowa A.A.*: Podstawy geomechaniki. Kraków, UWND AGH 2006
- [9] Phase2 Tutorials, Rocscience Inc. 1990–2007
- [10] *Piechota S.*: Wpływ niektórych czynników na dobór obudowy wyrobisk korytarzowych w kopalni węgla kamiennego „Bogdanka”. *Przegląd Górniczy*, nr 12, 2001
- [11] *Prusek S.*: Wielkość deformacji chodnika przyścianowego, utrzymywanego za pomocą pasa ochronnego. *Przegląd Górniczy*, nr 7–8, 2003
- [12] *Smolnik G.*: Modelowanie numeryczne i komputerowa symulacja eksploatacji pokładu 510 w KWK Mysłowice. *Materiały konferencyjne XXVI Zimowej Szkoły Mechaniki Górotworu*, Łądek Zdrój, 2003
- [13] *Stachowicz S., Kosonowski J., Kozek B.*: Charakterystyka zaciskania wyrobisk korytarzowych kamiennych w kopalni „Bogdanka”. *Wiadomości Górnicze*, nr 4, 1995
- [14] *Tajduś A., Tajduś K.*: Próba wykorzystania sprężystego uwarstwionego modelu górotworu dla oszacowania wpływu eksploatacji na powierzchnię. *Geotechnika w budownictwie i górnictwie: Materiały XXVIII Zimowej Szkoły Mechaniki Górotworu i Geoinżynierii*, Szklarska Poręba, 2005
- [15] *Thiel K.*: *Mechanika skał w inżynierii wodnej*. Warszawa, Wydawnictwo PWN 1980