

Optimalizacja grubości łąty węglowej pozostawionej w stropie wyrobiska ścianowego z uwagi na zawodnienie skał stropowych

Optimization of roof coal thickness in the roof of longwall face as a result of water inflow into roof rocks



*Dr hab. inż. Piotr Małkowski**



*Mgr inż. Artur Ułaszek**



*Mgr inż. Łukasz Ostrowski**

Treść: W artykule przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych stanu naprężenia i odkształcenia wokół wyrobiska ścianowego znajdującego się w otoczeniu słabych skał karbońskich. Pokazano efekt pozostawiania w stropie łąty węgla dla ograniczania deformacji skał stropowych. Analizę wykonano dla skał suchych oraz zawodnionych. W celu ilościowej oceny zmian właściwości mechanicznych skał karbońskich na skutek działania wody dla piaskowca i iłowca przeprowadzono badania laboratoryjne. Wykonano je dla warstw łaziskich pochodzących ze wschodniego rejonu Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Badania objęły wyznaczenie wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, modułu sprężystości podłużnej oraz rozmakalności. Stwierdzono ok. 30-procentowy spadek wytrzymałości piaskowców oraz 80-procentowy spadek wytrzymałości iłowców oraz rozpad iłowców już po trzech godzinach kontaktu z wodą. Obniżenie parametrów wytrzymałościowo-odkształceniowych skał w obliczeniach numerycznych pokazało, że technologia pozostawiania w stropie łąty węgla podczas prowadzenia eksploatacji ścianowej jest zasadna dla utrzymania stateczności wyrobiska. Przeprowadzona analiza udowodniła, że obliczenia numeryczne mogą być podstawą doboru grubości łąty. Niezbędnym warunkiem skuteczności takich obliczeń jest dobre rozpoznanie właściwości skał, które stanowią otoczenie wyrobiska oraz precyzyjna dyskretyzacja modelu numerycznego.

Abstract: This paper presents the results of numerical calculations relating to the state of stress and strain around the longwall face surrounded by weak carboniferous rocks. The efficiency of a coal roof for decreasing roof rock deformation has been shown. The analysis was carried out for both wet and dry rocks. Laboratory investigations were carried out in order to assess the quantitative change of mechanical rock properties treated with water. The Laziskie strata from the eastern part of the Silesian Coal Basin was tested. Compressive strength, Young modulus and slakeability tests were used for this investigations. 30% decrease in compressive strength of sandstones and 80% decrease in strength of claystones was observed. Claystones decayed in water after three hours. Lowering the strength-and-strain properties of rocks in numerical models showed that the roof coal technology in longwall exploitation system is essential to ensure longwall face stability. The results of the numerical analysis can be used as a basis for the selection of roof coal thickness in longwall mining. A factor necessary to obtain the effectiveness of such calculations is a good recognition of the properties of rocks which surround the excavation, and the distinct numerical model discretization.

Słowa kluczowe:

eksploatacja z łątą węgla, obliczenia MES, badania laboratoryjne, wpływ wody na wytrzymałość skał.

Key words:

exploitation with a roof coal, FEM calculations, laboratory investigations, the water influence on the rock strength

1. Wprowadzenie

Prowadzenie eksploatacji pokładów węgla w słabych skałach karbońskich jest dużym wyzwaniem inżynierskim

dla górników. Wiąże się ono nie tylko z niejednorodnością i anizotropią ośrodka skalnego, ale także z jego niskimi parametrami wytrzymałościowo-odkształceniowymi ośrodka skalnego. Efektem tego są duże problemy z utrzymaniem wyrobisk chodnikowych oraz wyrobisk ścianowych. Jednym ze sposobów zapobiegania opadaniu słabych skał stropowych do

*) AGH w Krakowie

wyrobiska jest pozostawianie w stropie łąty węgla. Praktyka taka została wypracowana przez wiele lat doświadczeń, w różnych kopalniach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, prowadzących eksploatację w pokładach libiąskich i łaziskich oraz lokalnie rudzkich. W literaturze trudno jest jednak znaleźć wyjaśnienie zjawisk zachodzących w rejonie pokładów, które tłumaczyłyby skuteczność takiego rozwiązania technologicznego.

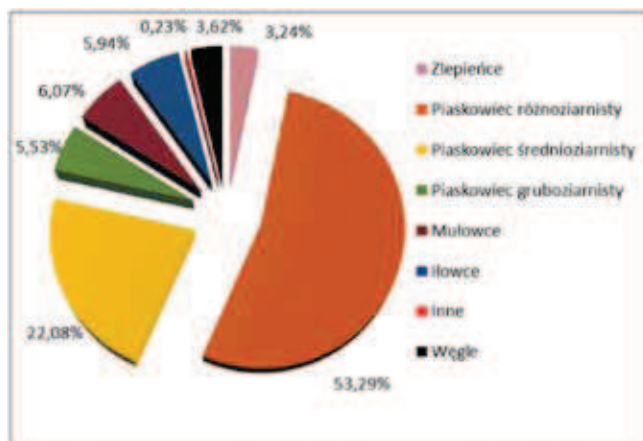
Wyjaśnienie procesów geomechanicznych zachodzących w czasie prowadzonej eksploatacji w specyficznych warunkach ww. grup pokładów jest praktycznie niemożliwe bez dokładnej znajomości właściwości ośrodka skalnego. Tylko ona gwarantuje właściwe i skuteczne prowadzenie prac na każdym etapie działalności górniczej [10]. W przypadku górotworu występującego w obrębie warstw libiąskich i łaziskich masyw skalny charakteryzuje się dużą zmiennością, związaną z różnym składem mineralnym i uwarstwieniem. Jednocześnie czynnikiem istotnie zmieniającym właściwości skał jest woda [6, 7, 9, 12, 18]. Wpływa ona przede wszystkim na wytrzymałość skał na ściskanie i ich parametry odkształceniowe. Ze względu na fakt, że największe zmiany właściwości mechanicznych wykazują skały osadowe, one najczęściej są przedmiotem badań [8, 17, 18].

W artykule przedstawiono analizę numeryczną wyrobiska ścianowego z pozostawioną łątą węgla w stropie. Obliczenia wykonano dla dwóch przypadków: występowania w stropie warstw łupkowych i piaskowcowych w wariantach górotworu suchego i zawodnionego. W celu pokazania różnic w zachowaniu się skał pokładów łaziskich w stanie suchym i zawodnionym przeprowadzono badania laboratoryjne gęstości objętościowej, rozmakalności, wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie i modułu sprężystości podłużnej dla próbek ilowca i piaskowca różnoziarnistego.

2. Charakterystyka górotworu w rejonie pokładów łaziskich

Warstwy łaziskie (pokłady grupy 200) należą litostratygraficznie do Krakowskiej Serii Piaskowcowej. Eksploatowane są we wschodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Ze względu na silne zuskokowanie obszaru GZW głębokość zalegania przedmiotowej serii warstw jest zmienna i najczęściej zawiera się w przedziale od 100 m do 560 m, ale lokalnie nawet do 960 m. Nadkład stanowią utwory czwartorzędowe i trzeciorzędowe. Nachylenie warstw jest niewielkie i wynosi zwykle 2° do 8°, maksymalnie do 10° [1]. W otoczeniu pokładów łaziskich występują najczęściej piaskowce. Ich udział w skałach płonnych sięga nawet 98%, a miąższość warstw piaskowca waha się od 2,0 m do 99,3 m [1]. Nie są one jednak jednorodne. Zbudowane są z różnej wielkości ziaren, przechodząc od piaskowców drobnoziarnistych, przez średnioziarniste do gruboziarnistych, a nawet zlepieńców. Średni łączny udział skał piaskowcowych w Krakowskiej Serii Piaskowcowej wynosi 84,1% (rys. 1). Pokłady węgla otaczają jednak najczęściej łupki ilaste (iłowce), rzadziej łupki piaszczyste (mułowce), które mają 12,2% udziału w serii warstw skalnych otaczających pokłady grupy 200. Wśród eksploatowanych i przewidzianych do eksploatacji pokładów łaziskich, tj. 201, 203, 203/3, 203/4, 205/1-2, 206/1(1-2), 207, 208, 209, 212, 214, 215 łupki ilaste mają przeważnie miąższość 0,15÷2,1 m, nie większą niż 5 m. Lokalnie w stropie bezpośrednim występuje sam piaskowiec.

Jedną z głównych cech charakterystycznych utworów łaziskich jest fakt, że najmocniejszą wśród nich warstwą jest



Rys. 1. Krakowska Seria Piaskowcowa – udział typów skał [1]
Fig. 1. Krakow Sandstone Series – types of rocks [1]

zwykle węgiel. Wytrzymałość na ściskanie R_c węgla grupy 200 według badań Bukowskiej i Sanetry [2, 13] waha się od 4,9 MPa do 57,3 MPa (przede wszystkim w zakresie 20÷40 MPa), przyjmując średnio wartość 30,1 MPa. Badania węgla pokładu 207 wykonane przez autorów artykułu wskazują, że jego wytrzymałość R_c wynosi 16,8÷42,7 MPa, przy średniej 27,3 MPa.

Wieloletnie badania właściwości geomechanicznych różnych grup stratygraficznych GZW prowadzone przez GIG [2] pokazują, że dla skał płonnych otaczających pokłady łaziskie ich zakresy wytrzymałości na ściskanie są następujące:

- piaskowce gruboziarniste – przedział zmienności: 4,2÷40,6 MPa, średnio 13,1 MPa;
- piaskowce średnioziarniste – przedział zmienności: 3,5÷39,3 MPa, średnio 18,1 MPa;
- piaskowce drobnoziarniste – przedział zmienności: 6,6÷72,1 MPa, średnio 33,4 MPa;
- mułowce – przedział zmienności: 14,1÷62,6 MPa, średnio 31,5 MPa;
- ilowce – przedział zmienności: 2,5÷53,2 MPa, średnio 25,7 MPa.

Uwagę zwracają bardzo szerokie zakresy wytrzymałości, która w przypadku piaskowców może się zmieniać 10÷12-krotnie, a w przypadku ilowców nawet 21-krotnie. Doświadczenia pokazują, że w bardzo szerokim zakresie mogą się także zmieniać moduły sprężystości podłużnej analizowanych skał.

W przypadku prowadzonej eksploatacji ścianowej wysoka wytrzymałość węgla i niska wytrzymałość skał otaczających powoduje problemy z utrzymaniem wyrobisk, objawiające się opadaniem stropu oraz wypiętrzaniem spągu. Dodatkowym niesprzyjającym czynnikiem towarzyszącym pracom górniczym jest zawodnienie górotworu. Stosunkowo nieduża głębokość zalegania pokładów powoduje dopływ wód trzeciorzędowych, a piaskowcowa budowa górotworu sprzyja dobrej filtracji tych wód w głąb masywu skalnego. Skały stropowe i spągowe bardzo często znajdują się więc w stanie zawodnionym, co dodatkowo osłabia ich parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe, a wielkość tego spadku zależy od tempa przyrostu deformacji [12]. W przypadku skał osadowych obniżenie wytrzymałości i sztywności może wynosić nawet kilkadziesiąt procent [6, 9]. Wszystko zależy od rodzaju lepszycza wypełniającego przestrzeń międzyziarnową. Lepiszczce węglanowe lub ilaste powodują duże spadki wytrzymałości, wzrost odkształcalności i rozpad skały [8].

3. Wpływ wody na właściwości skał pochodzących z rejonu pokładów łaziskich

Dla wyznaczenia wpływu wody na własności wytrzymałościowe i odkształceniowe skał otaczających pokłady łaziskie, przeprowadzono badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie oraz modułu sprężystości podłużnej, a także test rozmakalności wg GIG. W badaniach wykorzystano 16 próbek łożca i 14 próbek piaskowca różnoziarnistego. Wykonano dwie serie badań, dla próbek suchych i próbek zawodnionych. W każdej serii przebadano 7 próbek piaskowca i 8 próbek łożca. Otrzymane wyniki zamieszczone zostały w tabeli nr 1. Tak zwane próbki w stanie zawodnionym bezpośrednio przed badaniami laboratoryjnymi zostały zanurzone w wodzie na okres trzech godzin. Taki czas kontaktu z wodą wymusiło rozmakanie i rozpad łożca, co uniemożliwiało jego badanie na prasie hydraulicznej.

Szczegółowe wyniki wytrzymałości na ściskanie próbek piaskowców i łożców dla stanu powietrzno-suchego i zawodnionego pokazano na rysunkach 2 i 3.

Analizując wyniki badań laboratoryjnych, można zauważyć, że średnia wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie piaskowca różnoziarnistego w stanie suchym wynosi 16,47 MPa. Wytrzymałość ta dla poszczególnych próbek waha się od 10,68 MPa do 25,63 MPa (rys. 2).

Średnia wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie tej samej skały w stanie nasycenia wodą osiąga wartość 11,49 MPa, przy wynikach dla poszczególnych prób pomiędzy 6,85 a 15,2 MPa. Zatem średnia obliczona wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w stanie zawodnionym odpowiada 0,74 wartości wytrzymałości w stanie suchym. Otrzymany wynik jest zbliżony do wyników badań piaskowców prowadzonych przez Väsärhleyi i Vána [18], którzy otrzymali $R_{cw} = 0,759 R_{cs}$.

Tabela 1. Geomechaniczne parametry próbek piaskowca i łożca w stanie powietrzno-suchym i zawodnionym. (Źródło: Opracowanie własne)

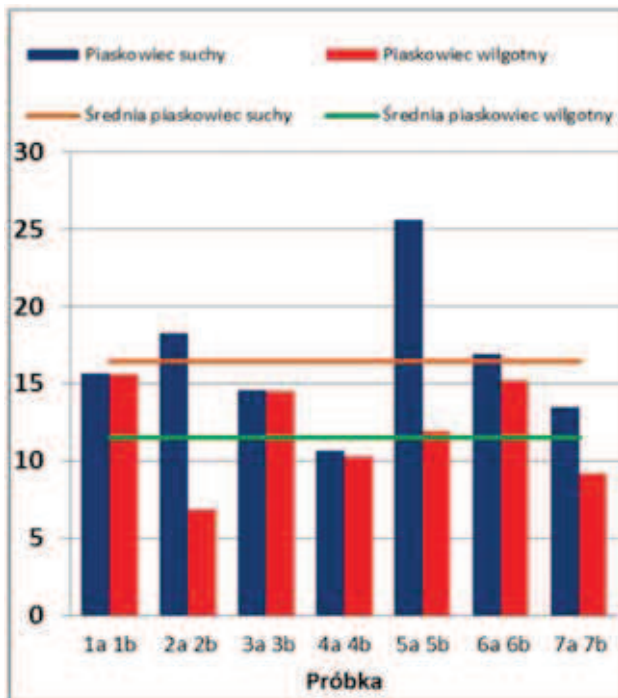
Table 1. Geomechanical parameters of sandstone and claystone samples in the air-dry and wet state (Source: own elaboration)

Piaskowiec w stanie powietrzno-suchym				Łowiec w stanie powietrzno-suchym					
Próbka	γ kN/m ³	R_{Cs} MPa	E MPa	Próbka	γ kN/m ³	R_{Cs} MPa	E MPa		
1a	20,28	15,69	3192,6	1a	24,52	29,24	4161,6		
2a	21,21	18,29	2594,7	2a	23,83	21,25	2719,6		
3a	19,86	14,56	2207,5	3a	24,45	28,81	3598,3		
4a	20,27	10,68	1195,2	4a	24,16	17,09	668,8		
5a	20,99	25,63	2911,8	5a	16,61	17,86	1809,2		
6a	21,40	16,9	3710,1	6a	24,08	19,26	1607,0		
7a	17,86	13,5	3483,1	7a	24,05	33,60	3527,6		
				8a	23,84	27,06	3053,5		
Średnia	20,27	16,47	2756,4	Średnia	23,19	24,27	2643,2		
Piaskowiec w stanie zawodnionym				Łowiec w stanie zawodnionym					
Próbka	γ kN/m ³	R_{Cw} MPa	r	E MPa	Próbka	γ kN/m ³	R_{Cw} MPa	r	E MPa
1b	19,76	12,57	1,0	2415,5	1b	24,32	4,98	0,2	187,56
2b	21,38	6,86	1,0	699,1	2b	23,55	10,96	0,2	572,42
3b	19,91	14,48	1,0	3509,7	3b	23,99	3,86	0,4*	125,01
4b	21,55	10,24	1,0	1455,7	4b	24,23	9,79	0,8	602,16
5b	20,71	11,93	0,8	1831,9	5b	23,61	0,10	0,8	16,51
6b	20,39	15,20	1,0	2745,5	6b	22,65	1,56	0,2*	17,69
7b	19,88	9,19	1,0	1335,7	7b	23,23	0,33	0,2*	5,25
					8b	23,66	4,65	0,2*	251,67
Średnia	20,51	11,49	1,0	1999,2	Średnia	23,65	4,53	0,4	222,3

* rozpad próbek po trzech godzinach od zanurzenia w wodzie

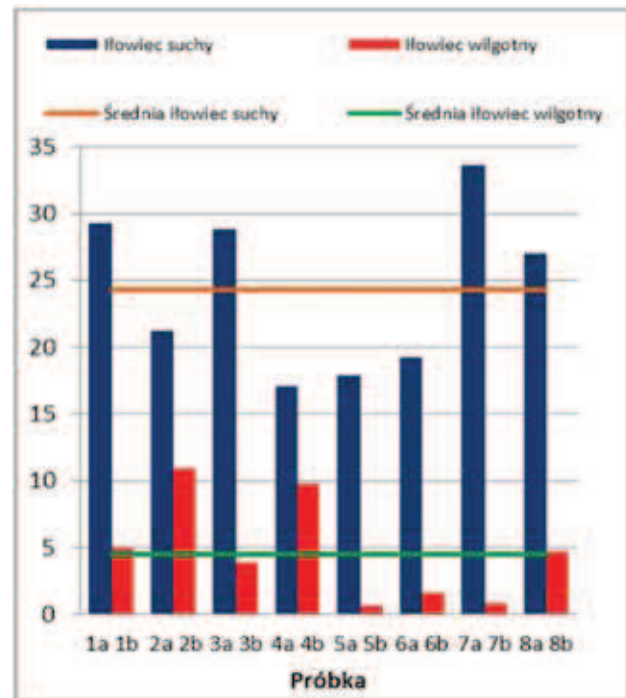
gdzie:

- γ – ciężar objętościowy próbki, kN/m³;
- R_{Cs} – wytrzymałość próbki na jednoosiowe ściskanie próbki suchej, MPa;
- R_{Cw} – wytrzymałość próbki na jednoosiowe ściskanie próbki wilgotnej, MPa;
- r – wskaźnik rozmakalności próbki, -;
- E – moduł Younga próbki, MPa.



Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie piaskowców
(Źródło: opracowanie własne)

Fig. 2. Compressive strength of sandstones
(Source: own elaboration)



Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie iłowców
(Źródło: opracowanie własne)

Fig. 3. Compressive strength of claytones
(Source: own elaboration)

Średnie wartości modułów Younga E dla piaskowca różnoziarnistego, odpowiednio dla suchego i nasyconego wodą przyjmują wartości 2756 MPa i 1999 MPa. Spadek wartości modułu E wynosi zatem 27,5%.

Średnia wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie suchego iłowca wynosi 24,27 MPa, zawierając się w przedziale 17,1÷33,6 MPa (rys. 3). Średnia wytrzymałość iłowca nasyconego wodą wynosi 4,5 MPa, zatem jest 5-krotnie niższa. W przypadku iłowca nasyconego wodą średni moduł Young'a, podobnie jak wytrzymałość na ściskanie, gwałtownie spada z 2643 MPa do 222 MPa, a więc prawie 12-krotnie. Należy zauważyć, że odkształcalność niektórych próbek iłowca po nasyceniu go wodą jest typowa raczej dla gruntów spoistych, niż dla skał związanych. Jednocześnie wartości otrzymanego modułu Younga są zbliżone z wynikami badań prowadzonymi dla górotworu wschodniej części obszaru GZW w pracach [2] i [16].

Korzystając ze współczynnika rozmiękalności K_r , definiowanego jako stosunek doraźnej wytrzymałości na ściskanie próbki skały po nasyceniu wodą R_{cw} do wytrzymałości w stanie suchym R_{cs} , można stwierdzić, że w przypadku badanych skał warstw łazickich współczynnik ten wynosi odpowiednio:

$$\text{dla piaskowca } K_r = \frac{R_{cw-p}}{R_{cs-p}} = \frac{11,494}{16,466} = 0,698 \quad (1)$$

$$\text{dla iłowca } K_r = \frac{R_{cw-i}}{R_{cs-i}} = \frac{4,529}{24,271} = 0,187 \quad (2)$$

Należy zauważyć, że pomimo dużego spadku wytrzymałości i sztywności skały średni ciężar objętościowy piaskowców nasyconych wodą jest niewiele większy od skały suchej, zwiększając się o 1,17%, co jest zgodne z badaniami zmian gęstości piaskowców i mułowców prowadzonych przez zespół Li [9] oraz prowadzonymi przez Ergulera i Ulusaya [6]. Podobnie wygląda analiza zmian ciężaru objętościowego

iłowca. Dla skał suchych wynosi on 23,19 kN/m³, a dla zawodnionych 23,65 kN/m³. Wzrost parametru sięga więc 1,74%. Ciekawe obserwacje w tym względzie, dotyczące zmian gęstości objętościowej osadowych trawertynów dokonali Török i Väsárhelyi [17]. Stwierdzili oni, że zmiana gęstości skały zależy od uwarstwienia. Dla masywnych próbek zwiększenie gęstości objętościowej na skutek nasycenia wodą nie przekraczało zwykle 1,5%, wynosząc średnio 1,08%, podczas gdy dla skał z wyraźnym uwarstwieniem zmiana ta wynosiła nawet 5,1%, wynosząc średnio 3,11%, a więc trzykrotnie więcej niż w pierwszym przypadku.

W przypadku badanych skał stwierdzono, że uwarstwienie wykazywał iłowiec, co było powodem nie tylko większej zmiany gęstości objętościowej i masy skały, ale także jego rozpadu, począwszy od płaszczyzn uławicenia. Według przeprowadzonych badań rozmiękkości według procedury testu trzydobowego wg GIG próbki iłowca na skutek działania wody rozpadały się na rumosz skalny ($r = 0,2$ lub $0,4$), tylko w dwóch przypadkach pękając wzdłuż płaszczyzn uławicenia ($r = 0,8$ – tab. 1). W przypadku czterech próbek stan całkowitego rozpadu odnotowano już po kilku godzinach (oznaczenia z gwiazdką – tab. 1). Spójność iłowca zatem istotnie malała, a co za tym idzie zdolność do przenoszenia obciążeń, co skutkowało znikomą wytrzymałością na ściskanie. Rozmiękłość węgla pobranego z rejonu badanych warstw wynosiła 1,0. Próbki piaskowca po trzydobowym teście także nie zmieniły formy ani konsystencji ($r = 1,0$), co sugerowałoby, że jego spójność oraz nośność powinna zostać zachowana. Jak wykazały pomiary na maszynie wytrzymałościowej, badane własności mechaniczne uległy obniżeniu.

Stwierdzając zatem, że spadek średniej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie na skutek działania wody w stosunku do jej wartości w stanie powietrzno-suchym dla piaskowca wynosi ok. 30%, a iłowca ok. 80%, czynnik ten będzie miał decydujący wpływ na zachowanie się skał łazickich wokół

wyrobisk górniczych. Goszcz [7] twierdzi, że nie uwzględnianie wpływu wody przy rozwiązywaniu problemów z geomechaniki jest niedopuszczalne i może prowadzić do zupełnie błędnych wniosków. Należy wspomnieć, że zjawisko obniżania się oporu tarcia na kontakcie skał spękanych potęguje dodatkowo zanieczyszczenie wód kopalnianych (chlorki, siarczki itp.). Kwaśna woda bardzo szybko wygładza powierzchnie powstałych nieciągłości, doprowadzając do obniżenia wytrzymałości na ścinanie [5, 7].

Jednym z możliwych sposobów weryfikacji wpływu działania wody na zachowanie się górotworu w otoczeniu wyrobiska są obliczenia numeryczne stanu naprężenia i odkształcenia. Obliczenia takie przeprowadzono na przykładzie oceny stateczności wyrobiska ścianowego z technologią pozostawiania łąty węgla w stropie.

4. Obliczenia numeryczne stateczności wyrobiska ścianowego

W celu ukazania zasadności pozostawienia łąty węgla w stropie wyrobiska ścianowego, gdy pokład otaczają zawodnione skały o słabych parametrach wytrzymałościowych, wykonano obliczenia numeryczne za pomocą programu Phase², posługującym się metodą elementów skończonych. Obliczenia wykonano dla dwuosiowego stanu odkształcenia.

Do obliczeń przyjęto model obejmujący wyrobisko ścianowe o długości 180 m i wysokości 2,5 m, ograniczone dwoma wyrobiskami przyścianowymi. W wyrobiskach tych zastosowano obudowę ŁP-9/V32. W wyrobisku ścianowym zamodelowano obudowę zmechanizowaną kompleksu ścianowego, jako obciążenie równomiernie rozłożone tzw. *distribution load* o wartości 1,1 MPa, zgodne z możliwą podpornością roboczą takiej obudowy w zakresie pracy 1,5÷3,0 m. Obliczenia przeprowadzono lokalizując wyrobisko na głębokości 350 m, typowej dla warstw łaziskich. Tarcza modelu miała wymiary 200 na 70 metrów i składała się z ok. 30 000 elementów, których podział w stropie wyrobiska wykonano ręcznie, w celu porównania otrzymanych wyników w tych samych węzłach.

W modelu posłużono się dwoma odmiennymi układami warstw geologicznych. W wariantcie pierwszym, w bezpośrednim otoczeniu wyrobiska zamodelowano warstwę iłowca. Jego miąższość zarówno w stropie i w spągu wyrobiska

wynosiła 2,0 m. W drugim przypadku, otoczenie wyrobiska stanowił piaskowiec różnoziarnisty.

Łącznie przeanalizowano 16 modeli ścianowych wyrobisk eksploatacyjnych, dla których w stropie pozostawiano łątę węgla o zmiennej miąższości od 0,1 do 0,7 m. Założono, że warstwy zachowują się sprężysto-plastycznie ze wzmocnieniem, a w obliczeniach zastosowano kryterium wytrzymałościowe Hoeka-Browna. Wskaźnik *RMR* potrzebny do obliczenia parametrów m_b i s został dobrany na podstawie badań Małkowskiego [11]. Parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe skał otaczających pokład węgla zostały określone na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych. Potrzebne do obliczeń właściwości samego węgla wyznaczono na podstawie prac GIG [1, 8, 13]. Parametry modelu zostały pokazane w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry modelu numerycznego
(Źródło: opracowanie własne)

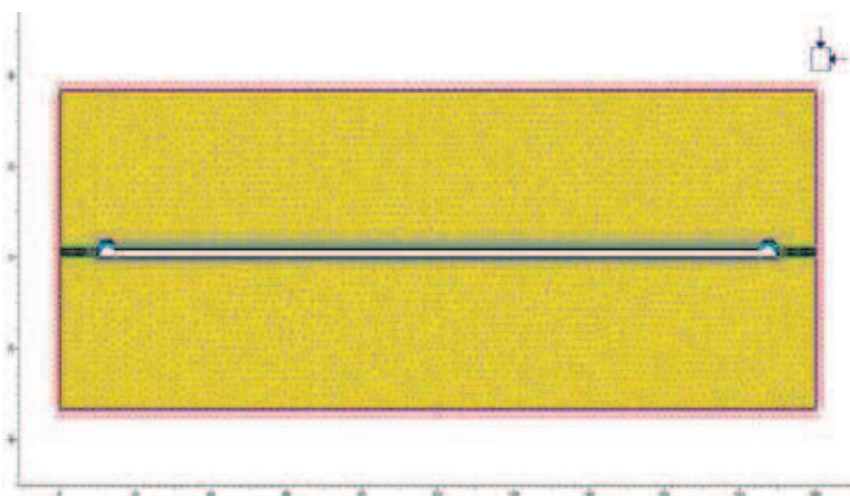
Table 2. Parameters of the numerical model
(source: own elaboration)

Stan	Warstwa	γ kN/m ³	E MPa	ν	R_c MPa	m_b	s
Zawodniony	węgiel	14,10	2860	0,30	30,92	1,627	0,0008
	piaskowiec	20,51	2215	0,28	11,49	1,374	0,0007
	iłowiec	23,65	602	0,30	6,85	0,535	0,0003
Powietrzno-suchy	węgiel	13,91	2860	0,30	30,92	1,729	0,0008
	piaskowiec	20,27	2756	0,27	16,47	1,472	0,0007
	iłowiec	23,19	2925	0,26	24,27	0,611	0,0003

4.1. Wyniki obliczeń - wyrobisko w otoczeniu piaskowca

Przykładowa tarcza modelu wyrobiska znajdującego się w otoczeniu piaskowca różnoziarnistego została pokazana na rysunku 4. Tarcza ta ukazuje wariant eksploatacji systemem ścianowym z pozostawieniem w stropie łąty węgla o grubości 0,4 m.

Dla wizualizacji wyników obliczeń w niniejszym artykule posłużono się mapami średnich naprężeń normalnych σ_m (*mean stress*) i odkształceń objętościowych ϵ_v (*volumetric strain*). Przedstawiono wycinek mapy znajdujący się w centralnej części wyrobiska ścianowego, gdzie dochodzi do największych przemieszczeń górotworu. Przykładowe mapy



Rys. 4. Przykładowy model wyrobiska ścianowego w otoczeniu piaskowca
(Źródło: opracowanie własne)

Fig. 4. Exemplary model of the longwall face surrounded by sandstone
(Source: own elaboration)

dla eksploatacji z pozostawieniem łąy węgla o grubości 0,4 m pokazano na rysunkach 5 i 6. Na ich podstawie można zauważyć, że łąa węgla pozostawiona w stropie przejmuje większą część naprężeń pochodzących od nadkładu, przy jednocześnie mniejszej zmianie objętości.

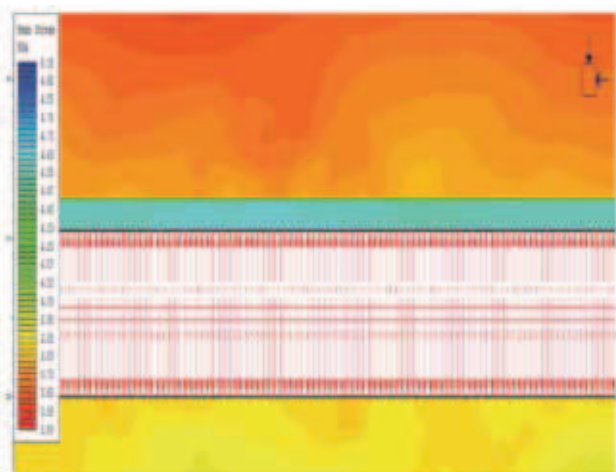
Rysunki 7 i 8 przedstawiają zależności średnich naprężeń normalnych i odkształceń objętościowych dla serii obliczeń ze zmienną grubością łąy węgla, gdy bezpośrednie otoczenie wyrobiska tworzy piaskowiec gruboziarnisty. Rysunki *a* dotyczą skał w stanie powietrzno-suchym, a *b* skał zawodnionych.

Analiza wyników obliczeń pokazuje, że zmiany analizowanych parametrów dla skał suchych są niewielkie, natomiast dla skał zawodnionych istotnie się od siebie różnią. Naprężenia średnie w łącie węgla dla modelu warstw suchych rosną od wartości 4,25 MPa dla łąy o grubości 0,1 m do prawie 4,45 MPa dla łąy o grubości 0,4 m, po czym się obniżają do 4,30 MPa dla grubości łąy 0,7 m (rys. 7a). Średnie naprężenia w piaskowcu nieznacznie maleją w przypadku grubości łąy od 0,1 do 0,2 m, następnie rosną i ponownie maleją przy grubości analizowanej łąy równej 0,7 m. Generalnie zatem, wraz ze wzrostem miąższości łąy węgla do 0,7 m zakres naprężeń przenoszonych przez warstwę węgla jest coraz większy. Taki

sposób zachowania się górotworu zauważyli autorzy pracy [4], którzy stwierdzili, że proporcja pomiędzy naprężeniami powstającymi w stropie wyrobiska w warstwie mocnej i słabej zależy od ich wzajemnej miąższości i sztywności.

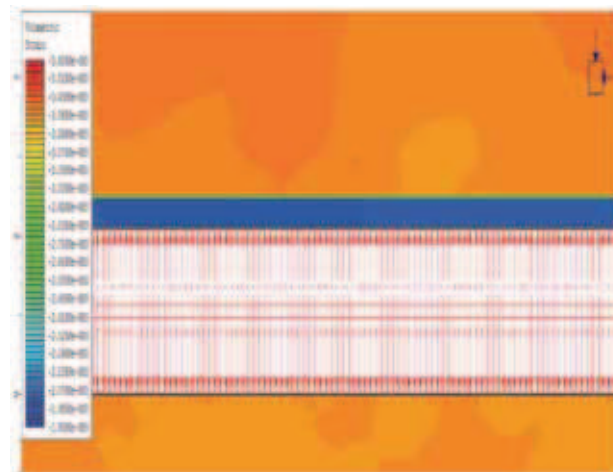
Wykresy przedstawiające odkształcenie objętościowe dla modelu z warstwami suchymi pokazują, że najmniejsze ϵ_v zachodzi wówczas, gdy miąższość łąy węglowej ma grubość 0,2÷0,4 m (rys. 8a). Ponieważ przy grubości łąy 0,2 m ograniczenie zmiany objętości piaskowca jest większe niż węgla, można sugerować, że taka grubość łąy jest optymalna dla ograniczenia odkształceń piaskowca. Pod względem ilościowym są one jednak bardzo małe i wynoszą ok. 0,19÷0,21%. Wartości odkształceń objętościowych wraz ze zwiększaniem się grubości łąy rosną wraz ze wzrostem ciężaru i objętości „podwieszanej” pod piaskowcem warstwy węgla.

Analizując model górotworu znajdującego się w stanie zawodnionym, można zauważyć, że węgiel przenosi średnio o ok. 0,8 MPa wyższe naprężenia w porównaniu z warstwami piaskowca. Są one najwyższe przy grubości łąy 0,3 m (4,65 MPa), natomiast w piaskowcu przy grubości 0,4 m lub powyżej 0,6 m (rys. 7b). Odkształcenie objętościowe piaskowca jest ponad 55% większe w niż węgla (rys. 8b), niemniej



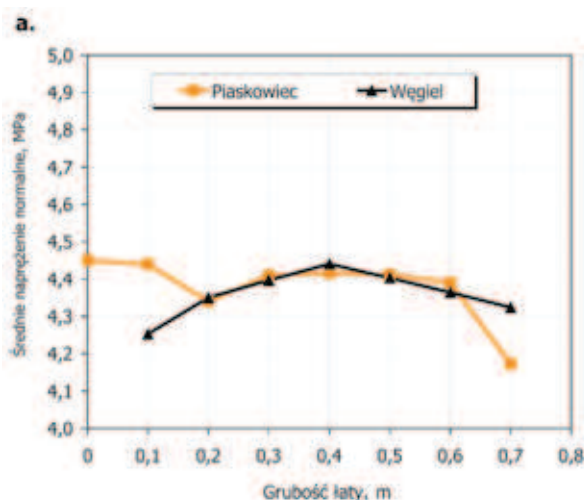
Rys. 5. Mapa średnich naprężeń normalnych – łąa węgla o grubości 0,4 m (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 5. Map of mean stress – roof coal with the thickness of 0.4 m (source: own elaboration)



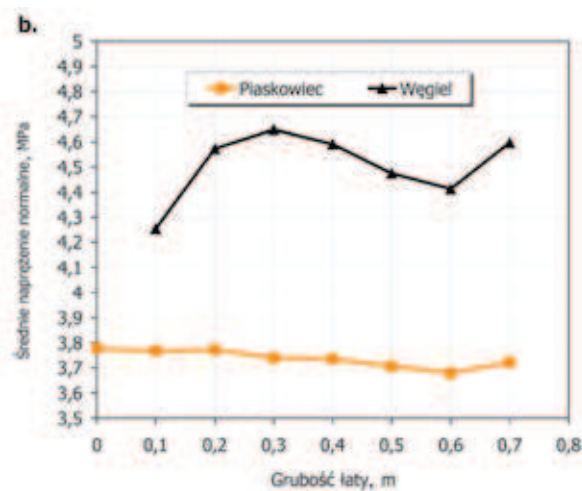
Rys. 6. Mapa odkształceń objętościowych – łąa węgla o grubości 0,4 m (Źródło: opracowanie własne)

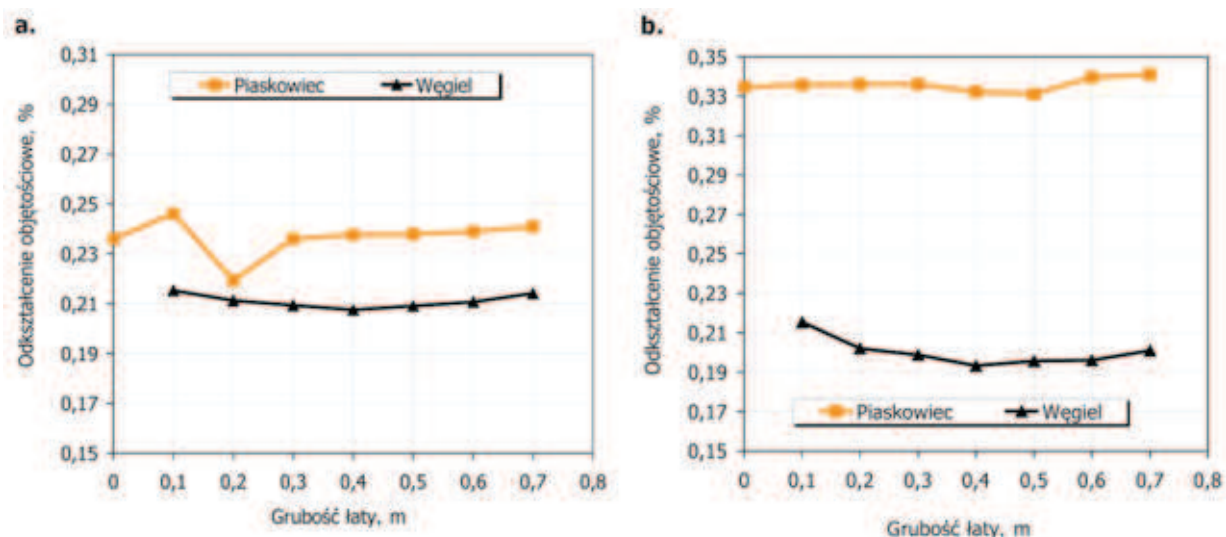
Fig. 6. Map of volumetric strain – roof coal with the thickness of 0.4 m (source: own elaboration)



Rys. 7a i 7b. Zależność średniego naprężenia normalnego od grubości pozostawionej łąy węgla w stropie wyrobiska, dla skał znajdujących się w stanie powietrzno-suchym i zawodnionym (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 7a. and 7b. Mean stress vs. thickness of the roof coal in the longwall face for dry and wet rocks (Source: own elaboration)





Rys. 8a. i 8b. Zależność maksymalnego odkształcenia objętościowego od grubości pozostawionej łaty węgla w stropie wyrobiska, a - dla skał znajdujących się w stanie powietrzno-suchym b - zawodnionym (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 8a. and 8b. Maximum volumetric strain vs. thickness of the roof coal for dry and wet rocks (Source: own elaboration)

w obu warstwach najmniejsze, gdy grubość łaty wynosi 0,4 m. Biorąc pod uwagę otrzymane wyniki, można sugerować, że 40-centymetrowa grubość łaty w stropie może ograniczyć napór zawodnionego piaskowca na strop wyrobiska.

Autorzy mają świadomość, że różnice w wartościach bezwzględnych analizowanych parametrów są małe i mogą wynikać z przybliżeń iteracji obliczeń modelu, niemniej wyniki należy uznać za interesujące.

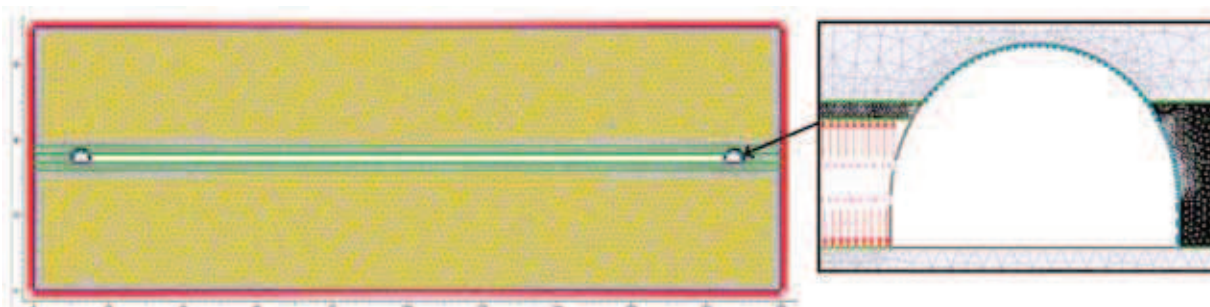
4.2. Wyniki obliczeń - wyrobisko w otoczeniu iłowca

Przykładowa tarcza modelu wyrobiska, gdy pokład węgla znajduje się pomiędzy warstwami iłowca pokazano na rysunku 9. Tarcza ta pokazuje wariant eksploatacji systemem ścianowym z pozostawieniem łaty węgla w stropie o grubości 0,3 m.

Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono wycinek mapy średnich naprężeń normalnych i odkształceń objętościowych dla eksploatacji z pozostawieniem łaty węgla o grubości 0,3 m. Na ich podstawie można zauważyć bardzo dużą różnicę w przenoszeniu naprężeń przez węgiel i iłowiec (rys. 10), co skutkuje dużą różnicą w zmianie objętości (rys. 11).

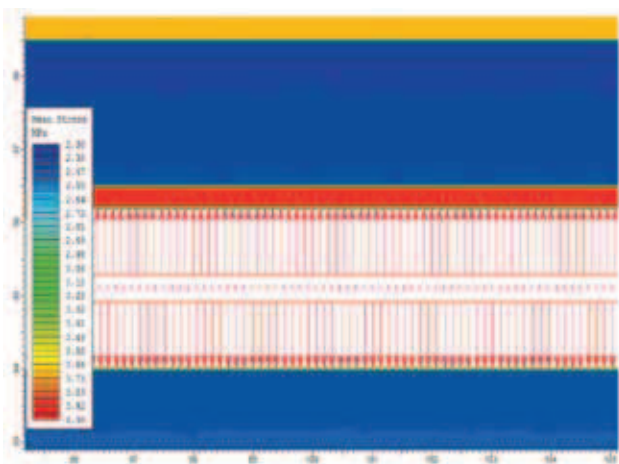
Analiza ośmiu kolejnych przypadków eksploatacji z pozostawieniem łaty węgla w stropie pokładu o grubości od 0,0 m do 0,7 m pokazuje, że w przypadku zalegania wokół pokładu iłowca zmiany naprężeń i odkształceń są znacznie większe. Średnie naprężenia normalne występujące w suchym iłowcu przy eksploatacji na całą miąższość złoża (bez pozostawienia łaty węgla) wynoszą 3,79 MPa i wolno maleją do wartości 3,75 MPa dla łaty o grubości 0,7 m (rys. 12). Naprężenia średnie w pozostawionym węglu są prawie takie same dla grubości łaty 0,1÷0,3 m, po czym maleją. Spadek zakresu naprężeń przenoszonych przez tę warstwę jest bardzo mały od 3,89 MPa do 3,86 MPa, ale wyraźny (rys. 13).

Najmniejsze odkształcenie objętościowe dla węgla odnotowano przy grubości łaty 0,2 m, co skutkuje także minimalnym spadkiem odkształcenia w iłowcu (rys. 13). Pozostawiając coraz grubszą warstwę węgla, odkształcenia w obu skałach bardzo wolno wzrastają. Zmiana objętości iłowca wynosi ok. 0,26%, a węgla ok. 0,19%. Analiza wyników pokazuje zatem, że dla dobranych parametrów obu modelowanych warstw łata o grubości 0,2 m może ograniczyć przemieszczanie się skał iłowcowych do wyrobiska.



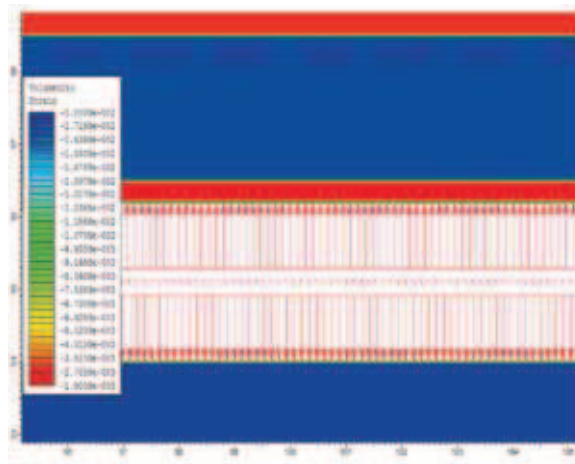
Rys. 9. Przykładowa tarcza modelu – pokład w otulinie iłowca z pozostawioną 0,3-metrową łatą węgla w stropie (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 9. Example of a shield of the numerical model – the seam surrounded by the claystone with 0,3 m roof coal (Source: own elaboration)



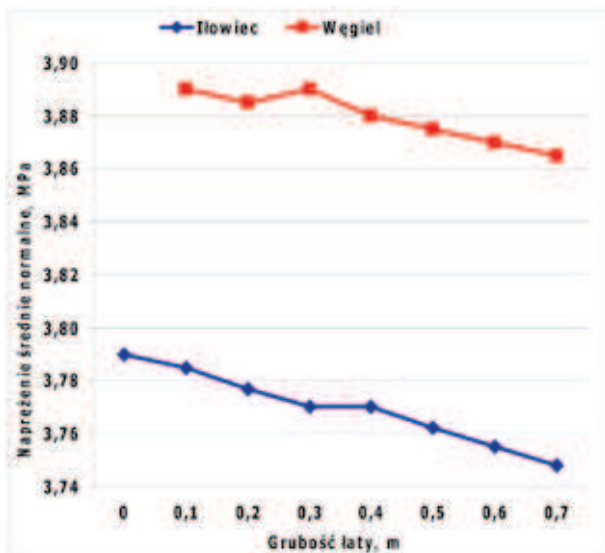
Rys. 10. Średnie naprężenia normalne dla eksploatacji z pozostawioną łatą węgla o grubości 0,3 m (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 10. Mean stress for the exploitation with 0,3 m roof coal (Source: own elaboration)



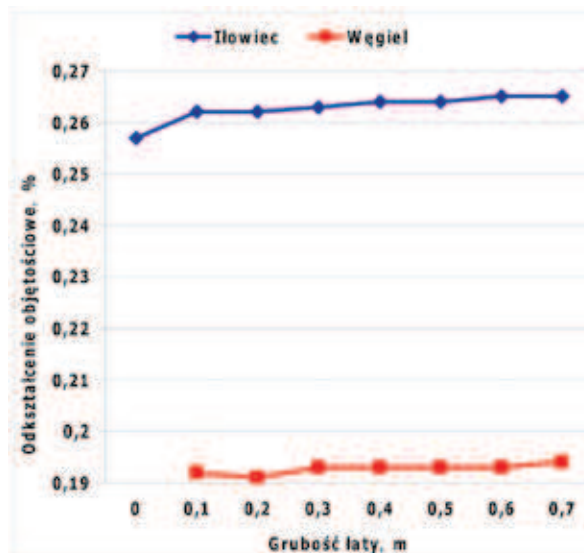
Rys. 11. Odkształcenie objętościowe dla eksploatacji z pozostawioną łatą węgla o grubości 0,3 m (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 11. Volumetric strain for exploitation with 0,3 m roof coal (Source: own elaboration)



Rys. 12. Naprężenia średnie w skałach suchych (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 12. Mean stress in dry rocks (Source: own elaboration)



Rys. 13. Odkształcenie objętościowe w skałach suchych (Źródło: opracowanie własne)

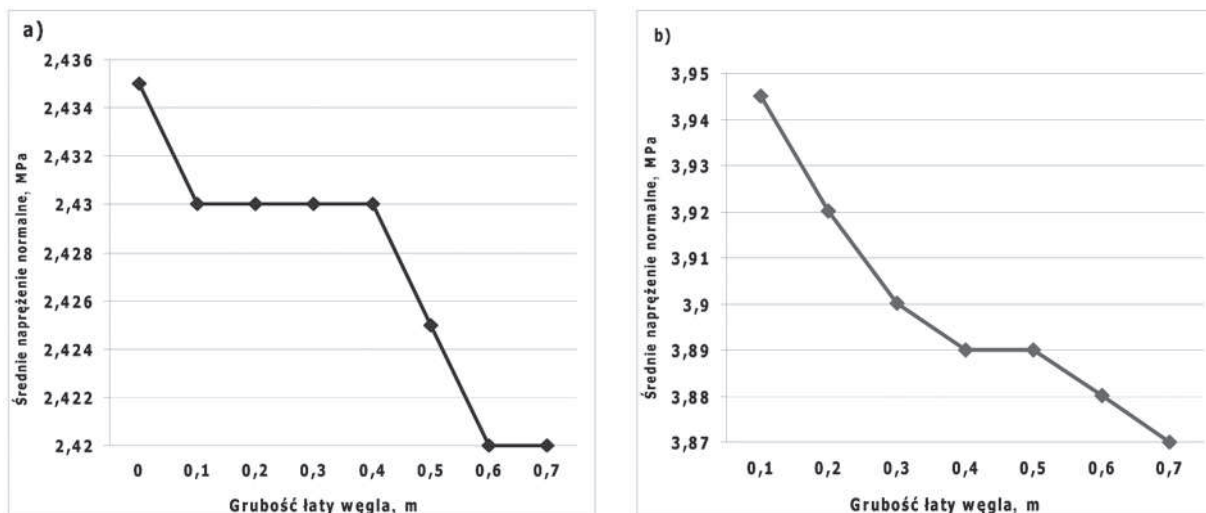
Fig. 13. Volumetric strain in dry rocks (Source: own elaboration)

W modelu, w którym przyjęto warstwy zawodnione ogólnie obserwuje się podobne tendencje zmiany średnich naprężeń normalnych oraz odkształceń objętościowych w zależności od pozostawionej łaty węgla, ale występują znacznie większe różnice ilościowe. Naprężenia średnie występujące w zawodnionym iłowcu są mniejsze o około 1,5 MPa niż naprężenia w tej samej skale w stanie suchym (rys. 14a). Dla eksploatacji bez pozostawienia łaty węgla w stropie średnie naprężenia normalne w zawodnionym stropie wynoszą 2,435 MPa. Wraz ze wzrostem grubości pozostawianej łaty naprężenia te maleją do wartości 2,42 MPa dla łaty o grubości 0,7 m. Zakres naprężeń normalnych przenoszonych przez warstwę węgla maleje prawie liniowo wraz ze wzrostem grubości pozostawionej warstwy w stropie (rys. 14b) od ok. 3,94 MPa do 3,87 MPa. Analizując naprężenia w obu typach skał, można jednak stwierdzić, że przy grubości łaty 0,4÷0,5 m naprężenia

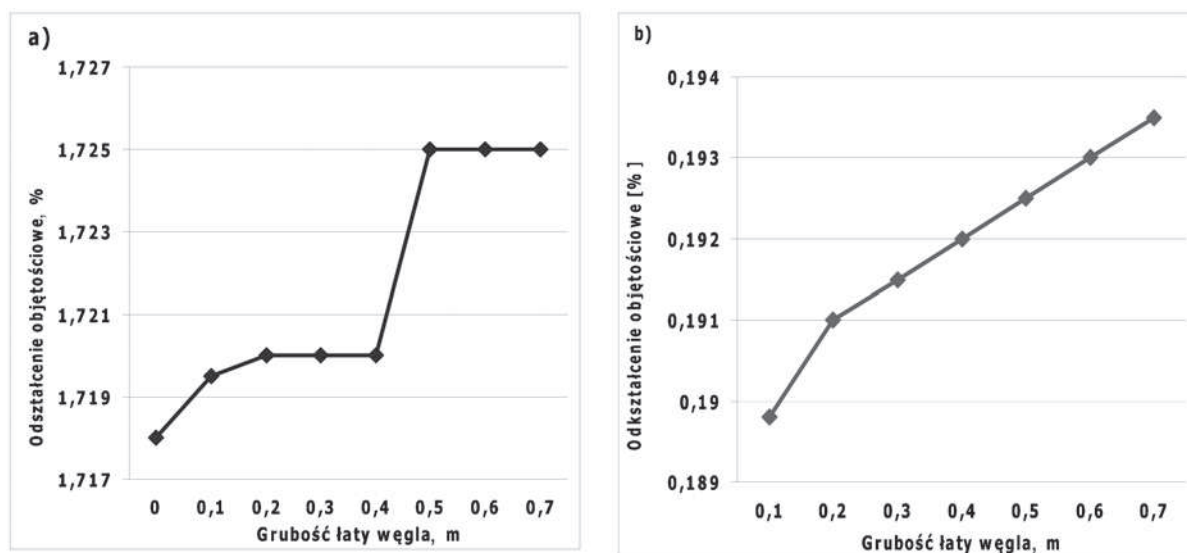
w węglu nie maleją i jest to w tym przypadku właśnie ta grubość łaty, która ograniczy deformację łupku.

Wniosek ten potwierdza wykres odkształceń objętościowych (rys. 15a i b). Odkształcenie warstwy stropowej iłowca gwałtownie wzrasta dla grubości łaty 0,5 m (rys. 15a). Wraz ze zwiększaniem się grubości łaty odkształcenia objętościowe rosną także w węglu (rys. 15b), a napierający na niego zawodniony iłowiec powoduje, że ϵ_v osiąga wartości 0,190÷0,193%. Odkształcenie objętościowe zawodnionego iłowca wzrasta prawie o rząd wielkości w porównaniu do tej samej skały w stanie suchym (rys. 15a).

Wykonane obliczenia numeryczne pokazują, że analizowane przypadki przedstawiają typowe zachowanie deformacyjne górotworu zbudowanego z warstw o różnej odkształcalności [4]. Pod wpływem narastającego obciążenia zewnętrznego w pierwszej kolejności odkształcają się warstwy najsłabsze,



Rys. 14. Średnie naprężenia normalne w warstwach zawodnionych: a) iłowiec, b) węgiel (Źródło: opracowanie własne)
 Fig. 14. Mean stress in the flooded layers: a) claystone, b) coal (source: own elaboration)



Rys. 15. Odształcenie objętościowe w warstwach zawodnionych: a) iłowiec, b) węgiel (Źródło: opracowanie własne)
 Fig. 15. Volumetric strain in the flooded layers: a) claystone, b) coal (source: own elaboration)

przenosząc mniejsze naprężenia, podczas gdy mocniejsze do pewnej wartości naprężeń zachowują się bardziej sprężysto. Na kontakcie warstw, ze względu na ich różną odkształcalność, pojawiają się naprężenia powodujące oddzielenie się ich od siebie [7]. Należy także zauważyć, że zmiany ilościowe zakresów naprężeń i odkształceń są bardzo małe, a otrzymane wartości ściśle zależą od proporcji własności odkształceniowych i geometrii analizowanych skał i mogą wynikać również z przybliżeń wykonywanych przez komputer obliczeń. Zdecydowanie pokazują one jednak pewną tendencję zmian stanu naprężenia i odkształcenia wokół wyrobiska.

W wyniku analizy nie otrzymano także pełnych charakterystyk zmian naprężeń i odkształceń dla większych grubości łaty węgla, jak to pokazano w pracy [4]. Z praktycznego punktu widzenia już 50-centymetrowa grubość łaty jest właściwie nieakceptowalna.

Choć zaobserwowane różnice odkształceń objętościowych przy zastosowaniu technologii eksploatacji z pozostawieniem łaty węgla w stropie są bardzo małe i wynoszą $0,004 \div 0,012\%$,

to w praktyce oznaczać będą kilkumilimetrowe mniejsze lub większe przemieszczenie skał stropowych w kierunku przestrzeni wyrobiska i większy nacisk skał na obudowę. Nie pozostanie to bez znaczenia dla prowadzenia eksploatacji i utrzymania stropu. Dlatego w górotworze zawodnionym, dzięki zastosowaniu łaty węglowej, wykazującej lepsze właściwości mechaniczne niż iłowiec i niereagującej na działanie wody, można ograniczyć przemieszczanie się skał stropowych do wyrobiska eksploatacyjnego i zapewnić lepszą stateczność stropu w czasie urabiania calizny.

5. Podsumowanie

Wpływ wody na właściwości mechaniczne skał osadowych może być bardzo duży. W przypadku skał iłowcowych i piaskowcowych zalegających wokół pokładów łożyskich w rejonie GZW zmiany wytrzymałości na ściskanie wynoszą 30÷80%, a zmiany modułu sprężystości podłużnej mogą być

20-krotne. Tak duże zmiany odkształcalności skał wpływają istotnie na deformacje skał wokół wyrobiska górniczego. Należy zauważyć, że w przypadku działania wody najtrudniej jest przewidzieć zmiany parametrów mechanicznych piaskowców. Mają one bowiem różne uziarnienie i mogą mieć różny rodzaj lepiszcza. W przypadku Krakowskiej Serii Piaskowcowej spoiwo to jest najczęściej ilasto-wapniste, które najłatwiej ulega osłabieniu i wymyciu na skutek działania wody [15].

Wykonane obliczenia numeryczne stanu naprężenia i odkształcenia wokół wyrobiska ścianowego pokazują, że niskie parametry mechaniczne skał otaczających pokłady grupy 200 powodują nadmierne ugięcie warstw stropu bezpośredniego, co w efekcie prowadzi do ich odspajania się i przemieszczania do przestrzeni wyrobiska. Jest to jeden z typowych przypadków niszczenia się stropu uwarstwionego [3]. Odkształcenia objętościowe warstw zawodnionych są jeszcze większe i dotyczy to przede wszystkim bardzo mocno reagującego na działanie wody ilowca. Sytuacja nieco się zmienia, jeżeli w stropie pozostawiony zostaje węgiel. Ze względu na brak istotnych zmian wytrzymałości i odkształcalności węgla pokładów łaziskich na skutek działania wody, a jednocześnie ich dużą wytrzymałość, zwykle większą niż otaczających je skał, pozostawienie w stropie cienkiej warstwy węgla o wyższym module sprężystości skutkuje zmniejszeniem zmiany objętości i przejściem przez niego części naprężeń pochodzących od stropu bezpośredniego. Dotyczy to zarówno przypadku, gdy w stropie bezpośrednim występuje ilowiec, jak i piaskowiec. Wykonana analiza numeryczna dla wybranego przypadku pokładu otoczonego skałami zawodnionymi wykazała, że optymalną grubością pozostawionej łąty węgla w stropie może być 0,2÷0,5 m. Z punktu widzenia geomechaniki, pozostawianie łąty węgla w stropie ma zatem uzasadnienie. Takie rozwiązanie technologiczne będzie wskazane również w innych pokładach węgla o dużej wytrzymałości i otaczających je słabych skałach stropowych i spągowych. Ze względu na różne wartości liczbowe parametrów mechanicznych skał, w szczególności osadowych oraz na różną ich reakcję z wodą, optymalna miąższość warstwy łąty węgla w stropie może być inna i zależy ściśle od modułu Younga analizowanych warstw, ich współczynnika Poissona oraz stanu naprężenia wynikającego z głębokości. Interesujący jest fakt, że podobne minimalne miąższości warstw stropowych, które zapewniają stateczność, zalecają w swoich wyrobiskach Australijczycy [14]. Dla odspajającej się warstwy stropu równej 2 m i wytrzymałości skał na ściskanie równej 10 MPa warstwa taka powinna mieć miąższość 0,52 m, a dla skał o wytrzymałości 25 MPa – 0,33 m.

Reasumując, wykonane badania laboratoryjne pokazały ilościowo, jak duże różnice w wytrzymałości na ściskanie i module sprężystości podłużnej mogą wystąpić w wyniku nasączenia skał łaziskich wodą, a przeprowadzona analiza numeryczna dała obiecujące wyniki dla oceny doboru grubości pozostawionej łąty węgla w stropie pokładu podczas eksploatacji ścianowej. Niezbędnym warunkiem skuteczności takich obliczeń jest jednak właściwe rozpoznanie właściwości skał otaczających wyrobisko oraz precyzyjna dyskretyzacja modelu numerycznego.

Literatura

1. *Bukowska M. i inni*: Kompleksowa metoda oceny skłonności do tąpnięć górotworu w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. Główny Instytut Górnictwa. Katowice 2009.
2. *Bukowska M.*: Skłonność górotworu do tąpnięć – geologiczne i geomechaniczne metody badań. Główny Instytut Górnictwa. Katowice 2012.
3. *Butra J.*: Eksploatacja złoża rud miedzi w warunkach zagrożenia tąpnięciami i zawałami. Wydawnictwo KGHM Cuprum, Wrocław 2010.
4. *Cala M., Flisiak J., Tajduś A.*: Mechanizm współpracy kotwi z górotworem o zróżnicowanej budowie. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Seria z Lampką Górnictw nr 8, Kraków 2001.
5. *Dochez S., Laouafa F., Franck C., Guedon S., Martineau F., Bost M., D'Amato J.*: Influence of water on rock discontinuities and stability of rock mass. *Procedia Earth and Planetary Science*, no 7, 2013, s. 219-222.
6. *Erguler Z.A., Ulusay R.*: Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, no 46, 2009 s. 355-370.
7. *Goszczyński A.*: Elementy mechaniki skał oraz tąpnięcia w polskich kopalniach węgla i miedzi. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, seria z Lampką Górnictw nr 2, IGSMiE PAN, Kraków 1999.
8. *Kabiesz J.*: Zmiana własności wytrzymałościowych skał karbońskich pod wpływem ich nawilgocenia. „Bezpieczeństwo Pracy” 1988, nr 4, s. 23-25.
9. *Li D., Yuen Wong L.N., Liu G., Zhang X.*: Influence of water content and anisotropy on the strength and deformability of low porosity meta-sedimentary rocks under triaxial compression. *Engineering Geology* nr 126, 2012, s. 46-66.
10. *Majcherczyk T., Cala M.*: Badania procesów geomechanicznych wywołanych podziemną działalnością górnictw. „Przeгляд Górnictw” 2009, nr 5-6, s. 34-37.
11. *Malkowski P.*: Wykorzystanie badań laboratoryjnych i kopalnianych do określenia stałych warunków Hoeka – Browna. „Przeгляд Górnictw” 2010, nr 11, str. 46-52.
12. *Masuda K.*: Effects of water on rock strength in a brittle regime. *Journal of Structural Geology* nr 23, 2001, s. 1653-1657.
13. *Sanetra U., Szedel D.*: Wskaźnik zwięzłości f różnych grup i typów petrograficznych węgla kamiennych GZW. „Przeгляд Górnictw” 2006, nr 3, s. 33-38.
14. *Seedsman R.W.*: The development and application of a logical framework for specifying roof and rib support/reinforcement in Australian underground mines. Seventh International Symposium: Rockbolting and Rock Mechanics, AIMS 2012, 30-31.05.2012, Aachen 2012, s. 153-162.
15. *Siedlecka A., Krysowska M.*: Badania nad genezą i rozprzestrzenianiem piaskowców karniowickich w północnym obrzeżeniu Rowu Krzeszowickiego. *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego*, t. XXXII, z. 3, Kraków 1962.
16. *Tajduś K., Tajduś A.*: Określenie wartości parametrów odkształceniowych górotworu poddanego wpływom eksploatacji górnictw na przykładzie KWK „Ziemowit”. „Przeгляд Górnictw” 2010, nr 7-8, s. 1-6.
17. *Török Á., Vársárhelyi B.*: The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary. *Engineering Geology* no 115, 2010, s. 237-245.
18. *Vársárhelyi B., Ván P.*: Influence of water content on the strength of rock. *Engineering Geology* no 84, 2006, s. 70-74.