



Problem stateczności płytkich pustek w górotworze, a możliwość powstania zapadliska na powierzchni

Problem of the shallow cavern stability and the possibility of sinkhole formation on the surface

Prof. dr hab. inż. Piotr Strzałkowski*

Treść: W pracy przedstawiono zagadnienie oceny stateczności płytkiej pustki pogórnicy – wyrobiska korytarzowego, w oparciu o teorię sklepienia ciśnień A. Sałustowicza na wybranym przykładzie. W dalszej kolejności dokonano obliczenia stanu odkształceń górotworu w stropie wyrobiska, który wywołała eksploatacja górnictwa prowadzona w pokładach zalegających poniżej. Otrzymane wyniki obliczeń porównano z wartościami odkształceń granicznych, wyciągając wnioski odnośnie możliwości utraty stateczności pustki. Przedstawiono również pod dyskusję możliwość prognozowania zapadliska przy zastosowaniu teorii W. Budryka-S. Knothego.

Abstract: This paper presents the problem of stability assessment of the shallow cavern – dog heading on the basis of the pressure arch theory by A. Sałustowicz. In the next stage calculations of the state of rock mass deformation in the ridge, caused by mining exploitation in coal seams deposited underneath were performed. The obtained results of the calculations were compared with the values of limit deflections which resulted in conclusions concerning the risk of the cavern stability loss. The possibility of forecasting the sinkhole by the use of W. Budryk-S. Knoth theory was presented.

Słowa kluczowe:

górnictwo węgla kamiennego, górotwór, eksploatacja

Key words:

mining industry, rock mass, exploitation

1. Wprowadzenie

Górny Śląsk, jak wiele innych zagłębi górniczych, charakteryzuje duża liczba płytkich podziemnych wyrobisk, stwarzających zagrożenie powstawaniem deformacji nieciągłych. Na problem ten i jego skalę zwrócono uwagę m.in. w pracy [2]. Jak to wynika z szeregu prac [1, 5, 6], szczególne zagrożenie związane jest z wyrobiskami zlokalizowanymi na głębokościach mniejszych od 80 m ÷ 100 m. Należy również dodać, że częstą przyczyną powstawania zapadlisk na powierzchni jest utrata stateczności płytkich wyrobisk korytarzowych, wykonywanych przed laty w obudowie drewnianej, która traciła podporność wskutek butwienia. Z tworzeniem się deformacji nieciągłych powierzchniowych – zapadlisk, spotyka się w dalszym ciągu pomimo odległego czasu wykonania wyrobisk. Analizując rozmieszczenie płytkich wyrobisk należy również zauważyć, że obejmują one wiele terenów zurbanizowanych, a liczba odnotowanych zapadlisk jest relatywnie bardzo niewielka w stosunku do dawnej, płytkiej eksploatacji. Przyczyn tego należy, zdaniem autora, upatrywać w dokonywaniu eksploatacji w kolejnych pokładach zalegających poniżej płytkich wyrobisk. Wywoływanie przez kolejne eksploatacje odkształceń górotworu powodować może osiągnięcie stanu granicznego deformacji dla poszczególnych rodzajów skał zalegających w stropie, a w dalszej konsekwencji utratę stateczności wyrobiska, tym łatwiejszą do

osiągnięcia, że jego obudowa bądź straciła swoją podporność, bądź uległa całkowitemu zniszczeniu. Ważnym zagadnieniem jest w tej sytuacji podanie sposobu oceny stopnia zagrożenia wystąpieniem zapadliska. Można oczywiście stosować metody numeryczne do oceny stateczności pustki w górotworze związanej z płytkim wyrobiskiem, jak to uczyniono w pracy [6]. Przygotowanie danych i wykonanie obliczeń wymaga jednak pewnego nakładu czasu, a także dysponowania licencjonowanym oprogramowaniem. Dlatego w ramach niniejszej pracy zaproponowano prosty, inżynierski sposób oceny stateczności pustki, wykorzystując teorię sklepienia ciśnień A. Sałustowicza [4].

Powszechnie znana teoria sklepienia ciśnień [4] oparta została na zagadnieniu płaskiej tarczy sprężystej z otworem eliptycznym. Strefa odprężona wokół wyrobiska obciążająca obudowę swym ciężarem ma kształt elipsy, której stosunek osi – n , wyraża równanie

$$n = \frac{a}{b} = \frac{R_r + p_z - p_x}{2p_x} \quad (1)$$

gdzie:

p_z, p_x – składowe pionowa i pozioma ciśnienia pierwotnego,
 R_r – wytrzymałość skał stropowych na jednoosiowe rozciąganie,
 $\sigma_{x \max}$ – składowa pozioma maksymalnego naprężenia w stropie i w spągu elipsy.

W przypadku, gdy $n < 0$ strefa spękań wokół wyrobiska nie powstaje, gdyż $\sigma_{x \max} < R_r$

* Politechnika Śląska, Gliwice.

A. Sałustowicz uprościł obliczenia i potraktował wycinek elipsy tak, jak byłby on wycinkiem paraboli. Interesującą analizę rozwiązania przeprowadzono w pracy [8], wskazując na przypadki, w których długość osi poziomej elipsy może być większa od pionowej. Rozwiązanie A. Sałustowicza posiada zatem tę zaletę, że pozwala w prosty sposób określić, czy pozostawiona bez obudowy w górotworze płytka pustka o małych gabarytach mogła przejść w stan zawalu. Stanowi to punkt wyjściowy do rozważań dotyczących powstania ewentualnego zapadliska na powierzchni. Oczywiście odrębnym problemem jest to, czy pustka pozostawiona w górotworze poddana była oddziaływaniu eksploatacji prowadzonej w kolejno wybieranych pokładach. W przypadku podbierania pustki można w łatwy sposób określić stan odkształceń górotworu w jej rejonie, stosując np. teorię W. Budryka-S. Knothego [3]. W dalszej kolejności można dokonać porównania obliczonych wartości odkształceń z wartościami granicznymi dla danej skały, zalegającej w stropie pustki, jak to zaproponowano w pracy [6]. Pozostaje także problem określenia ewentualnych wymiarów zapadliska. W pracy rozważono zastosowanie do tego celu teorii W. Budryka-S. Knothego, wychodząc z założenia, że wymiary (szerokość) pustki i głębokość jej lokalizacji pozostają do siebie w stosunku odpowiadającym stosunkowi długości pojedynczej ściany do głębokości rzędu około 1000 metrów.

2. Analiza warunków geologiczno – górniczych przypadku prowadzenia płytkiej eksploatacji

Teren w rejonie rozpatrywanych robót górniczych charakteryzują niewielkie różnice wysokości. Zabudowę tworzą bloki mieszkalne 5–kondygnacyjne, zabudowa mieszkalna w postaci domów jednorodzinnych szeregowych i wolnostojących oraz budynek kościoła.

Na podstawie otworu wiertniczego szybu B. można stwierdzić, że górotwór zbudowany został w analizowanym rejonie z warstw nadkładu czwartorzędowego oraz karbonu produktywnego. Nadkład zbudowany został z warstw gleby, piasku i margli. Karbon tworzą warstwy: rudzkie z pokładami grupy 400, siodłowe z pokładami grupy 500 oraz porębskie z pokładami grupy 600. Górotwór karboński tworzą naprzemianległe warstwy łupków i piaskowców, których udział wzrasta wraz z głębokością.

Profil litologiczny górotworu do głębokości 41.3 m charakteryzuje tabela 1, w której podano miąższości warstw – h oraz charakterystyczne dla poszczególnych skał wartości: ciężaru objętościowego – γ i wytrzymałości na rozciąganie – R_r .

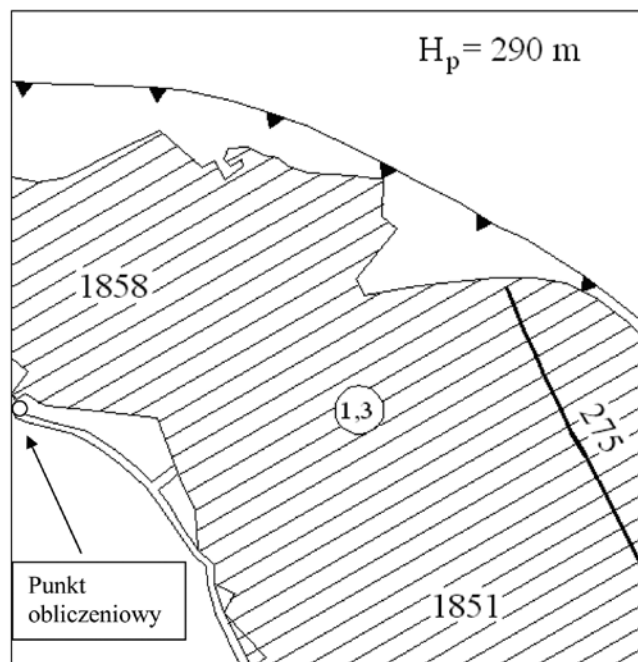
Tablica 1. Budowa górotworu i własności skał w rozpatrywanym rejonie wg [6].

Table 1. Structure of rock mass and the properties of rocks in the considered area acc. to [6]

Skała	γ MPa/m	h m	R_r MPa
grunt	0.021	0.3	0
piasek	0.021	5.4	0
margle	0.022	1.2	2.5
piaskowiec	0.023	13.1	3
węgiel	0.014	1.3	1.8
łupek miękki	0.023	20	2

Przedmiotem płytkiej eksploatacji w rozpatrywanym rejonie był pokład 349/1. Pokład ten wybierany był z zawalem stropu na wysokość 1,3 m w latach 1837÷1959, na głębokości

około 15 m ÷ 20 m. Eksploatację prowadzono systemem zabierkowym. Na rysunku 1 przedstawiono szkic rozmieszczenia robót górniczych w pokładzie 349/1. Podano na nim również kąt powierzchni H_p w odniesieniu do poziomu morza i zaznaczono położenie punktu obliczeniowego, który wybrano do dalszych analiz. Punkt ten związany jest z chodnikiem podstawowym, którego spąg na podstawie mapy przyjęto na głębokości 22 m. Założono przy tym, że wysokość chodnika wynosiła 2 m, a jego szerokość 3 m.



Rys. 1. Płytką eksploatacją w pokładzie 349/1
Fig. 1. Shallow exploitation in seam no. 349/1

Stosując dla podanych warunków lokalizacji chodnika podstawowego teorię sklepienia ciśnień A. Sałustowicza można otrzymać przy założeniu wartości liczby Poissona $m = 8$ dla stropu wyrobiska ($H=20$ m), następujące wyniki obliczeń:

- Składowa pionowa ciśnienia pierwotnego $p_z = -0,447$ MPa
- Składowa pozioma ciśnienia pierwotnego $p_x = -0,064$ MPa.

Dla powyższych warunków stosunek osi elipsy wynosi $n = -20,5$, co oznacza, że nie wytworzyła się strefa odprężona wokół wyrobiska. Występował zatem stan stateczności górotworu, a pustka związana z chodnikiem podstawowym w przypadku braku obudowy nie przeszłaby w stan zawalu.

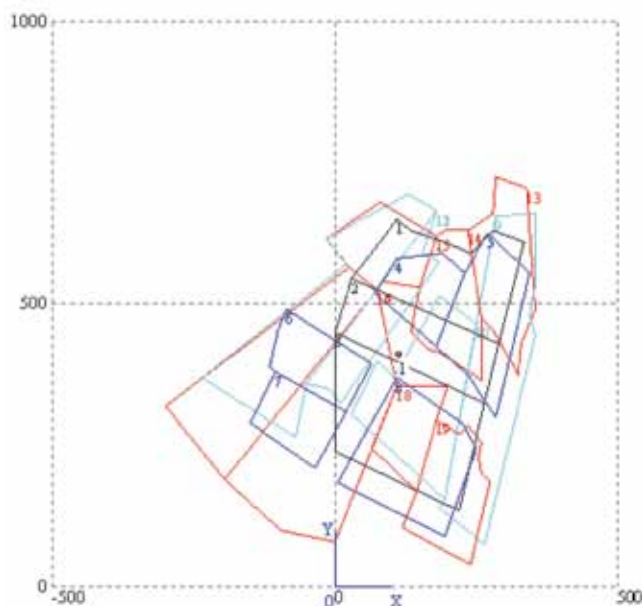
W następnych latach, od 1911 r. do 1956 r., prowadzono dalszą eksploatację górniczą w pokładach zalegających poniżej pokładu 349/1. Podstawowe dane na temat warunków geologiczno – górniczych prowadzonej eksploatacji zestawiono w tabeli 2, a na rysunku 2 pokazano schematycznie położenie punktu obliczeniowego względem wybranych pól.

Jak widać z tablicy 2, eksploatacja w całości prowadzona była z podsadzką hydrauliczną. Głębokość eksploatowanych pól wahała się od około 230 m do około 420 m, a miąższość wybieranych warstw lub pokładów wynosiła od 1.3 m do 6.0 m.

W dalszej kolejności przeprowadzono obliczenia wpływu dokonanej eksploatacji górniczej na punkt zlokalizowany w stropie wyrobiska. Do obliczeń zastosowano teorię W. Budryka-S. Knothego [3], wykorzystując program DEFK-Win [7]. Do obliczeń przyjęto następujące wartości parametrów:

Tablica 2. Podstawowe dane o eksploatacji górniczej prowadzonej w rozpatrywanym rejonie
Table 2. Basic data on the exploitation running in the considered area

Pokład	Ściana/ parcela	Początek ekspl.	Koniec ekspl.	Grub. pokł. m	Kąt up. deg	Głębokość m	Odległość km	Kierunek	Kąt odl. deg	a	System
5011	13	01-01-1914	31-12-1920	4.2	8	235	0.16	NE	56	0.25	ph
5011	14	01-01-1916	31-12-1928	4.2	8	240	0.04	NE	80	0.25	ph
5011	15	01-01-1916	31-12-1924	4.2	13	230	0.12	N	62	0.25	ph
5011	16	01-01-1918	31-12-1932	4.6	16	280	0.10	W	70	0.25	ph
5011	17	01-01-1924	31-12-1932	4	16	295	0.02	SW	87	0.25	ph
5011	18	01-01-1924	31-12-1932	5	14	285	0.06	S	79	0.25	ph
5011	19	01-01-1929	31-12-1931	5.2	10	295	0.13	S	66	0.25	ph
5101	10	01-01-1919	31-12-1933	5	8	279	0.01	SE	88	0.25	ph
5101	11	01-01-1916	31-12-1931	6	10	270	0.04	NW	82	0.25	ph
5101	12	01-01-1911	31-12-1933	6	10	271	0.10	NW	69	0.25	ph
5101	9	01-01-1912	31-12-1932	5	6	269	0.00	Bezp	90	0.25	ph
610	1	01-01-1954	31-12-1955	1.45	11	375	0.09	NE	77	0.25	ph
610	2	01-01-1954	31-12-1955	1.3	8	397	0.00	Bezp	90	0.25	ph
610	3	01-01-1956	31-12-1956	1.4	8	422	0.01	S	88	0.25	ph
620	4	01-01-1952	31-12-1952	1.5	9	329	0.05	N	81	0.25	ph
620	5	01-01-1952	31-12-1952	1.6	9	330	0.07	E	79	0.25	ph
620	6	01-01-1953	31-12-1953	1.7	9	356	0.05	W	82	0.25	ph
620	7	01-01-1954	31-12-1954	1.7	9	373	0.14	SW	70	0.25	ph
620	8	01-01-1954	31-12-1955	1.8	10	374	0.04	S	84	0.25	ph

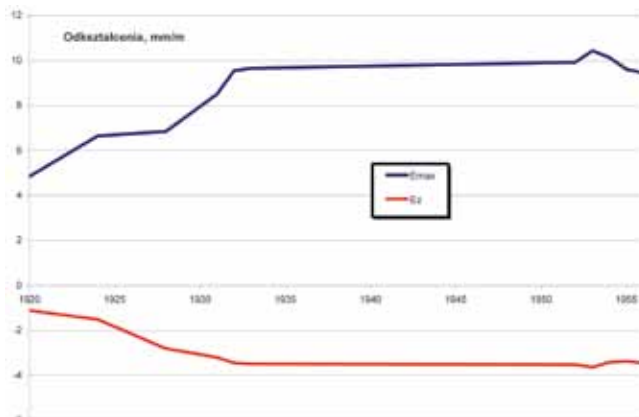


Rys. 2. Schemat rozmieszczenia wybranych w latach 1914÷1956 pól względem rozpatrywanego wyrobiska

Fig. 2. Layout of the selected fields in relation to the considered excavation between 1914 and 1956

- współczynnik kierowania stropem – $a = 0.25$
- tangens kąta zasięgu wpływów głównych – $\operatorname{tg}\beta = 2$, przy liniowej zmienności tego parametru w górotworze.

Wyniki obliczeń dla wybranych okresów prowadzenia eksploatacji, przy założeniu natychmiastowego ujawniania się jej wpływów na górotwór przedstawiono na rysunku 3. Pokazano na nim przebiegi odkształceń poziomych maksymalnych – E_{max} oraz pionowych – E_z .



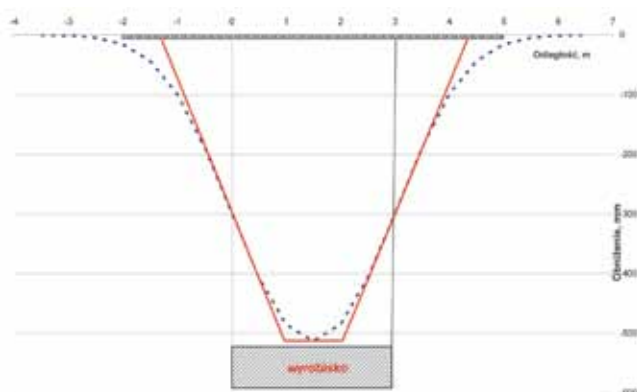
Rys. 3. Odształcenia poziome maksymalne – E_{max} oraz pionowych – E_z stropu wyrobiska dla kolejnych lat prowadzonej eksploatacji

Fig. 3. Maximum horizontal – E_{max} and vertical – E_z deformations of the ridge for the forthcoming years of exploitation

Jak widać z rysunku, odkształcenia pionowe (ściskające) przyjmowały wartości od -1,11 mm/m do -3,64 mm/m. Maksymalne wartości odkształceń poziomych przekraczały 10 mm/m. Należy zatem uznać, że do utraty stateczności pustki mogło dojść w pierwszym okresie prowadzenia eksploatacji górniczej, tj. około 1920 r., co z uwagi na bardzo małą głębokość lokalizacji pustki musiało skutkować powstaniem zapadliska na powierzchni.

W analizowanym przypadku stosunek szerokości chodnika do głębokości lokalizacji wynosi 0,14. Taki sam stosunek otrzymuje się w przypadku eksploatacji prowadzonej ścianą o długościach 150 m (typowa długość ściany podsadzkowej), na głębokości przeszło 1000 m. Analogia ta nasuwa skojarzenie o możliwości zastosowania teorii Budryka-Knothe'go do prognozy wielkości zapadliska, jakie utworzyć się winno na

powierzchni w wyniku utraty stateczności wyrobiska korytarzowego wskutek dokonywania eksploatacji w pokładach niżej leżących. Oczywiście oddzielną kwestią jest przyjmowanie odpowiednich wartości parametrów do obliczeń. Na przykład współczynnik kierowania stropem dla małego pola w stosunku do głębokości pola eksploatacji przyjmuje zdecydowanie mniejsze wartości niż w przypadku pól o dużych rozmiarach (zagadnienie płaskie). Spotyka się tu np. wartość na poziomie 0,3. Na rysunku 4 pokazano przykładowy przebieg obniżenia powierzchni w przypadku przejścia w stan zawalu rozpatrywanego chodnika na głębokości 22 m. Należy także pamiętać, że teoria ta opisuje z założenia deformacje ciągłe, których kształt odbiega od typowych zapadlisk. Można jednak z łatwością uzyskać typowy dla zapadliska kształt leja prowadząc styczne do niecki w punktach maksymalnych nachyleń, jak to pokazano na rysunku 4 linią w kolorze czerwonym. Propozycja ta ma z podanych wyżej względów charakter dyskusyjny, lecz można uznać, że warta jest przemyślenia i dlatego została w tym miejscu przedstawiona. Oczywiście rzeczą jest, że ewentualne możliwości jej stosowania uwarunkowane są prowadzeniem dalszych, szczegółowych obserwacji w terenie i stosownych analiz oraz określenia właściwych wartości parametrów do obliczeń.



Rys. 4. Prognozowany kształt i wielkość zapadliska
Fig. 4. Forecasted shape and size of the sinkhole

3. Podsumowanie

W XIX w. i w początkach XX w. na Górnym Śląsku prowadzono eksploatację pokładów węgla kamiennego na

małych głębokościach. Pozostałością po tej eksploatacji są płytkie pustki, związane najczęściej z nie zlikwidowanymi wyrobiskami korytarzowymi. Problem ten występuje na szeroką skalę z uwagi na rozmiary dokonanej eksploatacji, stanowiąc potencjalne zagrożenie dla terenów o wysokim stopniu zurbanizowania. Równocześnie należy zauważyć, że liczba powstających zapadlisk w stosunku do potencjalnych możliwości ich wystąpienia jest relatywnie mała. Ten stan rzeczy, zdaniem autora, spowodowany jest wcześniejszą likwidacją pustek wskutek dokonywania eksploatacji w pokładach niżej leżących. W ramach pracy przedstawiono możliwości wykorzystania teorii Sałustowicza dla celów oceny stateczności pustki. Zaproponowano również obliczanie stanu odkształceń górotworu wywołanego dalszą eksploatacją górnictwem w celu porównania wyników z wartościami odkształceń granicznych. Założono zatem, że osiągnięcie stanu odkształceń granicznych warstwy stropowej jest warunkiem utraty stateczności górotworu w rejonie pustki. Poddano także pod dyskusję możliwość stosowania teorii Budryka-Knothe'go dla celów prognoz geometrii zapadlisk.

Literatura

1. Chudek M., Janusz W., Zych J.: Studium dotyczące rozpoznania tworzenia się i prognozowania deformacji nieciągłych pod wpływem podziemnej eksploatacji złóż. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Górnictwo, zeszyt nr 141, Gliwice 1988.
2. Chudek M., Strzałkowski P., Ścigala R.: Charakterystyka wybranych obszarów zagrożonych występowaniem deformacji nieciągłych na Górnym Śląsku. Budownictwo Górnicze i Tunelowe. 1/2013 (str. 27-30)
3. Knothe S.: Prognozowanie wpływów eksploatacji górnictwem. Wydawnictwo "Śląsk". Katowice 1984.
4. Sałustowicz, A.: Zarys mechaniki górotworu. Wydawnictwo Śląsk. Katowice 1956.
5. Strzałkowski P.: Zarys ochrony terenów górniczych. Wyd. Pol. Śl. Gliwice 2010.
6. Strzałkowski P., Tomiczek K.: Proposal of a methodology assessing the risk of sink holes formation in mining areas. Artykuł złożony do druku.
7. Ścigala R.: Komputerowe wspomaganie prognozowania deformacji górotworu i powierzchni wywołanych podziemną eksploatacją górnictwem. Wyd. Pol. Śl. Gliwice 2008.
8. Tajduś A., Cala M., Tajduś K.: Geomechanika w budownictwie podziemnym. Projektowanie i budowa tuneli. Wydawnictwo AGH. Kraków 1912.
9. Tomiczek K.: O zachowaniu się skał w warunkach naprężeń rozciągających. Budownictwo Górnicze i Tunelowe, nr 1-4.2007, Wydawnictwo Górnicze, Katowice 2007