

Analiza możliwości powstania zapadliska według wybranych metod prognozowania

Analysis of possibilities of sinkhole occurrence according to selected methods of prognosis



Prof. dr hab. inż. Piotr Strzałkowski *)



Dr inż. Katarzyna Szafulera*)

Treść: Praca dotyczyła analiz możliwości wystąpienia zapadliska nad płytkim wyrobiskiem korytarzowym przy wykorzystaniu wybranych metod. Dokonano obliczeń przy zastosowaniu metod: M. Chudka – W. Ołaszowskiego, W. Janusza – A. Jarosza, opartej na teorii sklepienia ciśnień oraz MES. Wyniki obliczeń wskazały na pewność wystąpienia zapadliska w przypadku stosowania metod M. Chudka – W. Ołaszowskiego i opartej na teorii sklepienia ciśnień. Z uwagi na fakt, że zapadlisko istotnie powstało, uznać można, że metody te najlepiej sprawdziły się w rozpatrywanych warunkach.

Abstract: This paper presents the analyses of possibility of occurrence of sinkhole over a low mining excavatio. The calculations have been made using the following methods: M. Chudek – W. Ołaszowski, W. Janusz – A. Jarosz, the method's using theory of relaxation zone and MES. The results of calculations performed by use of M. Chudek – W. Ołaszowski method and the theory of relaxation zone indicated on certainty of sinkhole occurrence. Due to the fact, that the sinkhole has been created we can notice that the two methods are the most appropriate in the analyzed geological and mining conditions.

Słowa kluczowe:

eksploatacja górnicza, deformacje górotworu, zapadliska

Keywords:

mining exploitation, rock mass deformations, sinkholes

1. Wprowadzenie

Tworzenie się zapadlisk w różnych warunkach geologicznych spowodowane jest zarówno przyczynami naturalnymi, jak też antropogenicznymi. Często słyszy się o zapadliskach, które powstają w wyniku występowania zjawisk krasowych w amerykańskim stanie Floryda (Tihansky 2015). Kawerny przechodzą w stan zawału, w wyniku czego na powierzchni tworzą się zapadliska. Podobne przypadki rejestrowane są w Chinach, Kanadzie, w Rosji i innych krajach (Baryakh, Fedoseev 2011). W Polsce zapadliska powstają najczęściej w związku z dawną eksploatacją górnictwa, zlokalizowaną na małych głębokościach. Z licznych publikacji (Fajkiewicz i in. 2004, Kowalski 2015, Pilecki i in. 2014, Popiołek, Pilecki i in. 2005, Pilecki. 2012) wiadomo, że deformacje nieciągłe powierzchniowe stanowią w dalszym ciągu problem na terenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Sytuacja taka ma miejsce pomimo tego, że do problematyki deformacji ciągłych (Dżegniuk i in. 1995, Chudek 2010) przywiązuje się większą wagę niż do proble-

matyki deformacji nieciągłych. Istotne zagrożenie dla terenów o wysokim stopniu urbanizacji stwarzają zapadliska, których rozmiary wynoszą niejednokrotnie kilka, a nawet kilkadziesiąt metrów. Trudno w takich przypadkach o zapewnienie bezpieczeństwa nawet najlepiej wykonanym i przystosowanym do warunków budynkom. Z obserwacji przedstawionych w pracach (Strzałkowski 2015, 2017) wiadomo, że wiele zapadlisk powstaje nad przechodzącymi w stan zawału wyrobiskami korytarzowymi. Wynika to głównie z faktu nielikwidowania tych wyrobisk po zakończeniu wydobywania. W wyrobiskach eksploatacyjnych (zabierkach) wywoływało zawał, rabując obudowę lub je podszadzano. Najczęściej pozostawały zatem pustki o niewielkich gabarytach. Inaczej rzecz miała się w przypadku wyrobisk korytarzowych, których wymiary przekroju poprzecznego wynosiły po kilka metrów. Pozostawiona obudowa drewniana po latach traciła podporność wskutek butwienia i gnicia, w wyniku czego wyrobisko traciło stateczność, przechodząc w stan zawału. Jeśli głębokość lokalizacji wyrobiska nie przekraczała 100 m, na powierzchni mogło powstać zapadlisko. W przypadku oceny stopnia zagrożenia powstaniem zapadliska, w wyniku przejścia w stan zawału wyrobiska korytarzowego, często dysponuje się informacjami, które

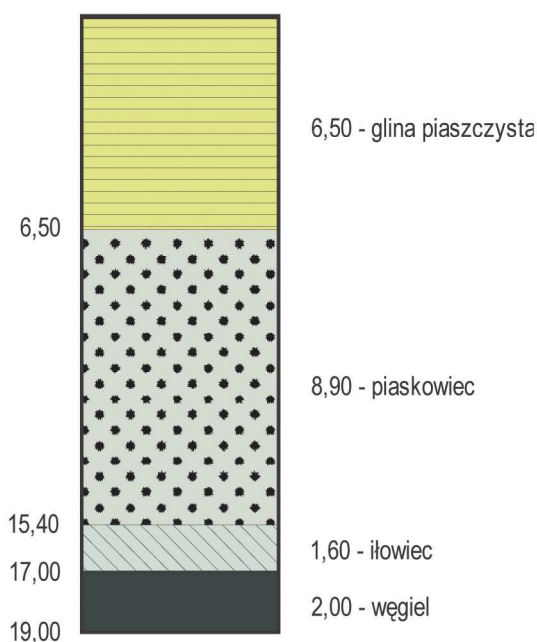
*) Politechnika Śląska, WGiG, Gliwice

umożliwiają wykonanie prognoz ich wystąpienia. Znając budowę górotworu, głębokość lokalizacji i wymiary wyrobiska, wykonanie stosownych obliczeń nie stanowi problemu. Inaczej rzecz ma się w przypadku, gdy pustki znajdują się w zrobach zawałowych, gdyż dane do obliczeń trudniej ustalić. Dlatego w ramach niniejszej pracy postanowiono wykonać stosowne obliczenia, których wyniki wskazywałyby, bądź nie, na możliwość wystąpienia zapadliska w przypadku przejścia w stan zawału wyrobiska korytarzowego. Wykonano prognozy „ex post” dla przypadku, kiedy zapadlisko powstało na powierzchni.

2. Analiza warunków geologiczno-górnich w rejonie wystąpienia zapadliska

2.1. Litologia i stratygrafia, właściwości skał oraz tektonika

W rozpatrywanym rejonie górotwór zbudowany został ze skał czwartorzędowego nadkładu i węglonośnej serii karbonu. Nadkład tworzy warstwa gliny piaszczystej o miąższości 6,5 m. Pod tą warstwą zalegają utwory karbońskie, wykształcone w postaci warstw: piaskowca o miąższości 8,9 m, łupka ilastego, szarego o miąższości 1,6 m oraz pokładu węgla kamiennego o miąższości 2,0 m. W spągu pokładu zalega łupka ilasta. Profil litologiczny górotworu pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Profil litologiczny górotworu
Fig. 1. Geological profile of rock mass

Stałe materiałowe skał budujących górotwór przyjęto na podstawie prac (Kidybiński 1982, Wiłun 2005, Praca zbiorowa 2011, 2014). W pracy zbiorowej (2011) podano wartości wytrzymałości na rozciąganie skał w sąsiednim rejonie w stosunku do rozpatrywanego w niniejszym artykule. Wytrzymałość na rozciąganie piaskowca zmieniała się w zakresie od 0,06 MPa do 1,31 MPa, a iłowców od 0,07 MPa do 0,08 MPa. Biorąc pod uwagę małą głębokość zalegania skał, wartości te są prawdopodobne. Mając powyższe na uwadze, do dalszych szczegółowych analiz przyjęto wartości wytrzymałości na rozciąganie podane w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości ciężaru objętościowego i wytrzymałości skał na rozciąganie

Table 1. Values of bulk density and tensile strength of rocks

Rodzaj skały	γ , MN/m ³	R_r , MPa
głina piaszczysta	0,027	0,01
piaskowiec	0,025	0,12
iłowiec	0,025	0,10

gdzie:

γ , MN/m³ – ciężar objętościowy,

R_r , MPa – wytrzymałość na rozciąganie.

Na podstawie analizy mapy stropu karbonu wynika, że w rozpatrywanym rejonie nie występują zaburzenia tektoniczne.

2.2. Charakterystyka robót górniczych

W sąsiedztwie chodnika, nad którym powstało zapadlisko, prowadzona była eksploatacja górnicza w 1957 r. z zawałem skał stropowych, na wysokość 2,0 m. Wybieranie prowadzono systemem zabierkowym. W obliczeniach założono, że chodniki wykonano na wysokości pokładu oraz przyjęto szerokość wyrobiska wynoszącą 3,0 m. Głębokość spągu chodnika wynosiła 19 m. W sierpniu 1990 r. powstał nad wyrobiskiem korytarzowym lej o średnicy 1,2 m i głębokości 1,5 m. Zapadlisko wystąpiło na terenie ogrodu przydomowego, nie powodując szkód w znajdujących się w sąsiedztwie budynkach. Fragment mapy pokładowej przedstawiono na rysunku 2. Należy sądzić, że zapadlisko powstało w wyniku utraty stateczności wyrobiska spowodowanej zniszczeniem obudowy drewnianej.

3. Reproгноza możliwości powstania zapadliska

3.1. Metoda M. Chudka – W. Olszowskiego

Warunkiem wystarczającym wystąpienia zapadliska wg tej metody jest dotarcie strefy zawału wytworzonego nad pustką do partii górotworu zbudowanego ze skał luźnych. Metoda (Chudek i in. 1988), ta jest powszechnie znana i stosowana, dlatego informacje na jej temat przytoczono w niniejszej pracy w niezbędnym tylko zakresie.

Maksymalna wysokość strefy zawału wyrażona jest wzorem:

$$w_z = w \frac{4(k_r + 1) - \pi(k_r - 1)}{2\pi(k_r - 1)} \quad (1)$$

gdzie:

k_r – współczynnik rozluźnienia skał,

w – wysokość pustki pierwotnej (wyrobiska), m.

W rozpatrywanym przypadku, gdy wysokość wyrobiska przyjęto $w = 2$ m, wysokość strefy zawału wyniosła wg wzoru (1) $w_z = 13$ m. Biorąc pod uwagę budowę górotworu opisaną wyżej, należy zauważyć, że strefa zawału osiągnęła utwory nadkładu. Zatem spełniony został warunek wystarczający wystąpienia zapadliska.

Wartość wskaźnika Z określona jest wzorem:

$$Z = \frac{H - h}{w} \quad (2)$$

gdzie:

H – głębokość stropu wyrobiska, m

h – miąższość nadkładu, m

w – wysokość wyrobiska, m



Rys. 2. Fragment mapy pokładowej z zaznaczonym miejscem powstania zapadliska
Fig. 2. Part of coal seam map's with marked area of sinkhole

Zgodnie ze wzorem (2) wartość wskaźnika wyniosła $Z = 5,45$, co odpowiada wartości prawdopodobieństwa powstania zapadliska $P = 1$ (zdarzenie pewne).

3.2. Metoda W. Janusza – A. Jarosza

Metoda ta jest również powszechnie znana i stosowana do prognoz wystąpienia zapadlisk (Chudek i in. 1988). Opiera się ona na podobnym założeniu, co metoda M. Chudka – W. Olszowskiego. Mianowicie, jeśli strefa zawału osiągnie spąg luźnych utworów nadkładu, na powierzchni wystąpi zapadlisko.

Maksymalną wysokość strefy zawału określa wzór:

$$h_{z,max} = w \cdot \left[\frac{6}{\pi \cdot (k_r - 1)} + \frac{1}{4} \right] \quad (3)$$

We wzorze przyjęto oznaczenia jak dla wzoru (1).

Podstawiając dane do wzoru (3), otrzymano $h_{z,max} = 19,6$ m. Jest to wartość, która może być osiągnięta przy odpowiednio dużej szerokości pustki.

W świetle poprzednio poczynionych stwierdzeń warunkiem wystarczającym wystąpienia zapadliska jest spełnienie równania:

$$\frac{c}{2} \geq g_g + \frac{w}{2}, \quad (4)$$

gdzie:

- c – długość pionowej osi sklepienia ciśnień, m
- w – wysokość wyrobiska, m
- g_g – miąższość górotworu związłego zalegającego nad pustką.

Stosunek osi elipsy strefy spękań n wyraża wzór:

$$n = 0,5 \cdot (m - 2) \quad (5)$$

gdzie:

- m – odwrotność współczynnika Poissona.

Długość osi pionowej można z łatwością obliczyć zakładając, że oś pozioma ma identyczną długość jak szerokość wyrobiska. Zakładając, że z uwagi na małą głębokość lokalizacji

wyrobiska $m = 8$, otrzymuje się $n = 3$. Tym samym oś pionowa posiada długość $c = 9$ m. Zatem nie jest spełnione równanie (4) dla przyjętych założeń, gdyż połowa osi pionowej elipsy wynosi $0,5c = 4,5$, natomiast prawa strona nierówności (4) przyjmuje wartość $11,5$ m.

Aby warunek (4) był spełniony, szerokość pustki pierwotnej – l nie może być mniejsza od szerokości granicznej wyrażonej wzorem:

$$l_{gr} = \left(g_g + \frac{w}{2} \right) \frac{2}{n}. \quad (6)$$

Wartość szerokości granicznej wynosi $l_{gr} = 7,67$ m i jest mniejsza od szerokości wyrobiska wynoszącej 3,0 m. Wartość stosunku $K = l/l_{gr}$, wynosi $K = 0,597$, co odpowiada wartości prawdopodobieństwa powstania zapadliska $P = 0,39$.

3.3. Metoda oparta o teorię sklepienia ciśnień A. Sałustowicza

Wg teorii A. Sałustowicza (1956) sklepienie ciśnień tworzy się w przypadku, gdy zachodzi warunek: $\sigma_{x,max} \geq R_p$, czyli gdy maksymalne naprężenia w kierunku osi x (poziome), w stropie wyrobiska ($\sigma_{x,max}$), są nie mniejsze od wytrzymałości skał na rozciąganie (R_p). W przeciwnym przypadku sklepienie ciśnień nie powstaje i pustka (wyrobisko) znajduje się w stanie statecznym bez konieczności stosowania obudowy. W pracy (Strzałkowski 2015) podano wzór określający pole powierzchni strefy odprężonej powstającej wokół wyrobiska bez uproszczeń polegających na traktowaniu strefy jako wycinka paraboli. Pole części strefy odprężonej P_e (zakreskowanej na rys. 3) wynosi:

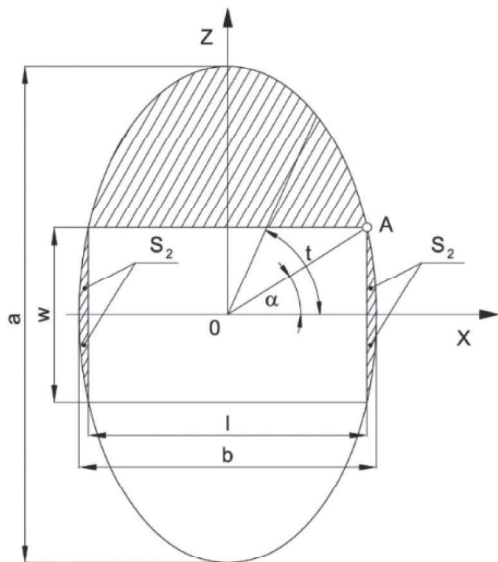
$$P_e = \frac{ab(\pi + 2k) - 6wl}{8} \quad (7)$$

gdzie:

- w, l – wysokość i szerokość wyrobiska,
- k – miara łukowa kąta α , zawartego pomiędzy prostą łączącą początek układu współrzędnych z punktem A (punkt wspólny wyrobiska i elipsy w prawej górnej ćwiartce układu współrzędnych) i osią x – rys. 3), zatem:

$$k = \frac{\pi}{180^\circ} \cdot \arctan \frac{w}{l} \quad (8)$$

Wyprowadzenie wzoru (7) przedstawiono w pracy (Strzałkowski 2015), natomiast program komputerowy w języku C++ przedstawiono w pracy (Strzałkowski 2017), podając jego schemat blokowy.



Rys. 3. Strefa odprężona wokół pustki (wyrobiska) w górotworze (Strzałkowski P., 2015)

Fig. 3. Relaxation zone around void (drift) inside rock mass (Strzałkowski P., 2015)

Utrata stateczności pustki polega na przemieszczeniu się skał zawartych w strefie odprężonej do wyrobiska.

Skały zawarte w strefie odprężonej po rozkruszeniu zwiększają swoją objętość, co możemy uwzględnić wprowadzając oznaczenie P_1 . Oznaczmy przez P_2 sumę pól strefy odprężonej i przekroju wyrobiska.

$$P_1 = P_e \cdot k_r \quad (9)$$

$$P_2 = P_e + w \cdot l$$

gdzie:

k_r – współczynnik rozluźnienia skał w strefie zawалу.

Rozróżnić można dwa przypadki:

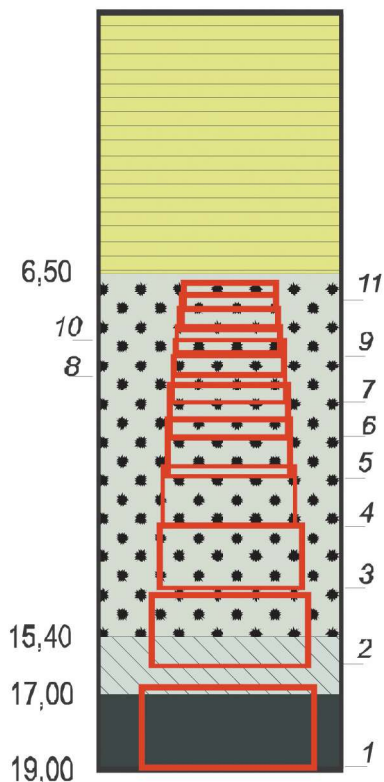
- Gdy $P_1 = P_2$, nastąpi samopodsadzenie się pustki, a skały zawarte w strefie odprężonej zapełnią ją szczelnie.
- Gdy $P_1 < P_2$, w rejonie górnego wierzchołka strefy odprężonej powstanie pustka wtórna o objętości wynikającej z różnicy pól $P_2 - P_1$. W przypadku, gdy strefa odprężona związana z pustką pierwotną lub wtórną osiągnie nadkład na powierzchni, powstanie zapadlisko.

Program komputerowy realizuje obliczenia iteracyjnie.

Wyniki działania programu w analizowanym przypadku przedstawiono graficznie na rysunku 4. Pokazano na nim tworzenie się kolejnych pustek w górotworze, włącznie z najpłycej położoną pustką wtórną, wokół której wytworzona strefa odprężona osiągnęła skały luźnego nadkładu. Zatem wyniki obliczeń wskazują, że na powierzchni powstaje zapadlisko.

3.4. Metoda numeryczna (MES)

Do obliczeń numerycznych wykorzystano program Phase 2 oparty na MES. Model numeryczny stanowi płaską tarczę górotworu, zbudowaną z 4 warstw,



Rys. 4. Graficzna ilustracja rozwiązania zaproponowanego przez P. Strzałkowskiego (2015)

Fig. 4. Graphic illustration of the solution proposed by P. Strzałkowski (2015)

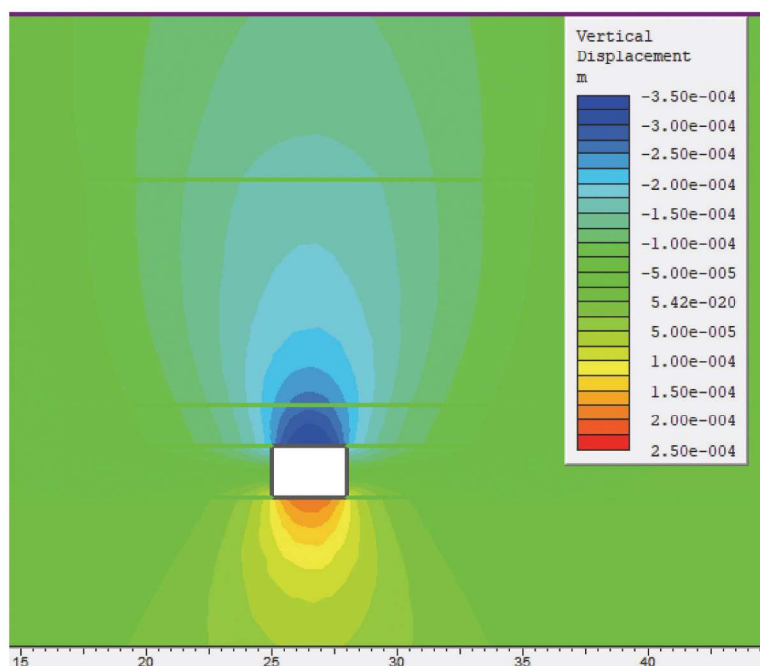
których rodzaj oraz miąższość ustalono na podstawie profilu litologicznego – rys. 1. Na głębokości 19 m, w warstwie węgla znajduje się prostokątna pustka o szerokości 3 m i wysokości 2 m. Model został zdyskretyzowany, dzięki czemu wygenerowana została siatka obliczeniowa o liczbie 4588 węzłów. Na pionowych oraz dolnej krawędzi modelu przyjęto przemieszczeniowe warunki brzegowe. W modelu numerycznym zastosowano warunek wytrzymałościowy Coulomba – Mohra, przyjmując stałe materiałowe przedstawione w tab. 1.

Wynik działania programu prezentuje rys. 5 pokazujący przemieszczenia pionowe górotworu. Jak można zauważyć, punkty na powierzchni wg wyników obliczeń uległy przemieszczeniom wynoszącym dziesiąte części mm, co świadczy o braku możliwości powstania zapadliska.

4. Podsumowanie

W ramach niniejszej pracy przedstawione zostały wyniki obliczeń prognozy „ex post” powstania zapadliska nad płytkim wyrobiskiem korytarzowym. Zastosowano metody: M. Chudka – W. Ołazowskiego, W. Janusza – A. Jarosza, metodę opartą o teorię sklepienia ciśnień A. Sałustowicza oraz metodę numeryczną (MES). Wyniki przeprowadzonych obliczeń pozwoliły uzyskać następujące rezultaty:

- Wg metody M. Chudka – W. Ołazowskiego zarówno w ujęciu deterministycznym, jak i probabilistycznym, na powierzchni powstać winno z całą pewnością zapadlisko, co jest zgodne ze stanem faktycznym.
- Wg metody W. Janusza – A. Jarosza zachodzi jedynie prawdopodobieństwo o wartości ok. 0,4 powstania za-



Rys. 5. Przemieszczenia pionowe górotworu w rejonie pustki wg obliczeń programem Phase 2

Fig. 5. Vertical displacements of rock mass in the area of the void according to the results of calculations performed by use of Phase 2 program

padliska. Zatem bardziej prawdopodobne jest zdarzenie, że zapadlisko nie wystąpi. Być może otrzymany wynik spowodowany jest tym, że metoda została opracowana głównie na podstawie danych uzyskanych z rejonu olkusko – głogowskiego, a w niewielkim tylko zakresie z GZW.

- Wg metody opartej na teorii sklepienia ciśnień, na powierzchni powstaje zapadlisko w wyniku przemieszczania się kolejnych pustek i stref odprężonych aż do utworów nadkładu.
- Wg metody numerycznej pustka w górotworze utrzymać się będzie w stanie stałym, zatem nie dojdzie do jej przejścia w stan zawalu i na powierzchni nie dojdzie do wystąpienia zapadliska.
- Otrzymane rezultaty wskazują na przydatność metody M. Chudka – W. Ołaszowskiego, przy czym podkreślenia wymaga prostota jej stosowania. Oczekiwane wyniki uzyskano również stosując metodę opartą na teorii sklepienia ciśnień, która cechuje się jednak większym stopniem skomplikowania i koniecznością korzystania z odpowiedniego oprogramowania.
- Otrzymane rezultaty obliczeń wg metody M. Chudka – W. Ołaszowskiego, wskazują, że w tych samych warunkach geologiczno-górnictwowych, w bezpośrednim sąsiedztwie analizowanego rejonu, powierzchnia może być zagrożona występowaniem zapadlisk. Sytuacja taka może zaistnieć wskutek utraty podporności obudowy starych wyrobisk.

Literatura

- BARYAKHA A.A., FEDOSEEV A.K. 2011 - Sinkhole formation mechanism. *Journal of Mining Science*, Vol. 47, nr 4.
- CHUDEK M., JANUSZ W., ZYCH J. 1988 - Studium dotyczące rozpoznania tworzenia się i prognozowania deformacji nieciągłych pod wpływem podziemnej eksploatacji złóż. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo*, z. nr 141.
- CHUDEK M. 2010 - *Mechanika górotworu z podstawami zarządzania ochroną środowiska w obszarach górniczych i pogórnictwowych*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- DŻEGNIUK B., PIWOWARSKI W., NIEDOJADŁO Z. 1995 - *Współczesne teorie ruchów górotworu i ich zastosowania*. Wyd. AGH, Kraków.
- FAJKLEWICZ Z., PIWOWARSKI W., RADOMIŃSKI J., STEWARSKI E., TAJDUŚ A. 2004 - *Badanie deformacji w górotworze w celu odtwarzania wartości budowlanej terenów pogórnictwowych*. Wyd. AGH, Kraków.
- KIDYBIŃSKI A. 1982 - *Podstawy geotechniki kopalnianej*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice
- KOWALSKI A. 2015 - *Deformacje powierzchni w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym*. Wydawnictwo GIG, Katowice.
- PILECKI Z. (red.) 2012 - *Zagrożenie deformacjami nieciągłymi na obszarze górniczym Jaworzno III*. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- Praca zbiorowa** (red. Pilecki Z.) 2014 - *Uzdatnianie podłoża Autostrady A-1 na terenach pogórnictwowych płytkiej eksploatacji rud metali*, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN. *Studia, rozprawy monografie*. 184. Kraków.
- Praca zbiorowa** (red.: Popiołek E., Pilecki Z.) 2005 - *Ocena przydatności do zabudowy terenów zagrożonych deformacjami nieciągłymi za pomocą metod geofizycznych*. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN. *Studia, rozprawy monografie*. 184. Kraków.
- Praca zbiorowa** 2014 - *Raport oddziaływania na środowisko dla przedsięwzięcia polegającego na wydobywaniu kopaliny ze złoża węgla kamiennego „B” – etap uzyskania koncesji na eksploatację złoża*. Praca niepublikowana, GIG, Katowice.
- SALUSTOWICZ A. 1956 - *Zarys mechaniki górotworu*. Wyd. Śląsk, Katowice.
- STRZAŁKOWSKI P. 2015 - *Mathematical model of forecasting the formation of sinkhole using Salustowicz's theory*. *Archives of Mining Science*, nr 1.
- STRZAŁKOWSKI P. 2017 - *The proposal of predicting formation of sinkholes with an exemplary application*. *Journal of Mining Science*, nr 1.
- TIHANSKY A.B. 2015 - *Sinkholes, West-Central Florida. A link between surface water and ground water*. <https://pubs.usgs.gov/circ/circ1182/pdf/15WCFFlorida.pdf>
- WIŁUN Z. 2005 - *Zarys geotechniki*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. Wyd. 7. Warszawa.

Artykuł wpłynął do redakcji – kwiecień 2018
Artykuł akceptowano do druku 15.06.2018