

Grzegorz STROZIK

Politechnika Śląska w Gliwicach; e-mail: grzegorz.strozik@polsl.pl

WYSTĘPOWANIE I OCENA ODDZIAŁYWANIA WYROBISK KOMOROWYCH I KORYTARZOWYCH NA POWIERZCHNIĘ TERENÓW GÓRNICZYCH

STRESZCZENIE

s. 151-168

Na terenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego istnieją liczne obszary występowania pozostałości płytkiej podziemnej eksploatacji złóż. Należą do nich zarówno wyrobiska historyczne, często o dużej wartości zabytkowej, jak i podziemne komory i chodniki lub ich fragmenty pozostałe po „rabunkowej” eksploatacji, prowadzonej bez uwzględnienia zasad ochrony środowiska. Prowadzenie eksploatacji górniczej pod zurbanizowanymi obszarami GZW wpłynęło na rozwój metod prognozowania deformacji powierzchni terenu, w szczególności dla bieżącej, wielkopowierzchniowej eksploatacji ścianowej. Obliczanie deformacji powierzchni terenu dla pojedynczych niewielkich wyrobisk może opierać się między innymi na geometryczno-całkowej metodzie Budryka-Knothe’go. W artykule przedstawiono zależności pozwalające na wyznaczanie parametrów deformacji powierzchni terenu dla wyrobisk na głębokościach, dla których możliwe jest stosowanie równań teoretycznych – w strefie występowania deformacji ciągłych. Następnie omówiono istniejące metody określania wpływu podziemnych wyrobisk górniczych leżących w pobliżu powierzchni ziemi, w strefie, w której ich zawał prowadzić może do występowania deformacji nieciągłych, w formie zapadlisk i innych poważnych zaburzeń powierzchni terenu, stwarzających w skrajnej sytuacji, nawet katastrofalne zagrożenie dla obiektów budowlanych i bezpieczeństwa ludności. Na przykładzie przykładowego wyrobiska przedstawiono szereg wyników obliczeń związanych z wpływem głębokości wyrobiska na rodzaj i skalę deformacji powstających na powierzchni ziemi w wyniku ich zawału.

SŁOWA KLUCZOWE

ochrona powierzchni, tereny górnicze, deformacje nieciągłe, zapadliska, płytkie wyrobiska górnicze

WPROWADZENIE

Znaczący rozwój górnictwa węglowego na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) nastąpił z końcem XVIII w. wraz z początkiem rewolucji przemysłowej. Większość współczesnych miast na terenie GZW zawdzięcza swoje istnienie i rozwój bogatym złożom węgla kamiennego stanowiącego podstawę szybko rozwijającego się przemysłu ciężkiego. Najstarsze kopalnie były lokalizowane w miejscach, gdzie głębokość zalegania złóż była najmniejsza (w pobliżu wychodni pokładów). Czynniki te spowodowały, że obszar konurbacji śląskiej w dużej mierze pokrywa się ze strefą występowania nieciągłych deformacji powierzchni terenu wywołanych płytką eksploatacją węgla kamiennego. W zależności od przyjętego sposobu definiowania konurbacji, jej obszar na Śląsku zamieszkuje od 2,2 do 3,5 mln osób, z czego 80% stanowi ludność miast, gdzie gęstość zaludnienia jest rzędu 2000 os./km². Pod względem powierzchni GZW, aktualnie eksploatowane złoża węgla kamiennego obejmują obszar około 1100 km² (20% powierzchni GZW), zaś złoża wyeksploatowane i zaniechane w wyniku likwidacji

kopalń stanowią kolejne 840 km² (15%) jego powierzchni. Lokalizację czynnych i zlikwidowanych obszarów górniczych przedstawiono na mapie zakresu dokonanej eksploatacji w GZW, rys. 1. Jak przedstawiono na rys. 2., cały obszar konurbacji śląskiej znajduje się na terenach górniczych i pogórniczych, co wywołuje znaczące oddziaływania ze strony górnictwa na warunki utrzymania substancji mieszkaniowej, przemysłowej, infrastrukturalnej oraz bezpieczeństwa ponad dwumilionowej społeczności na terenie konurbacji śląskiej.

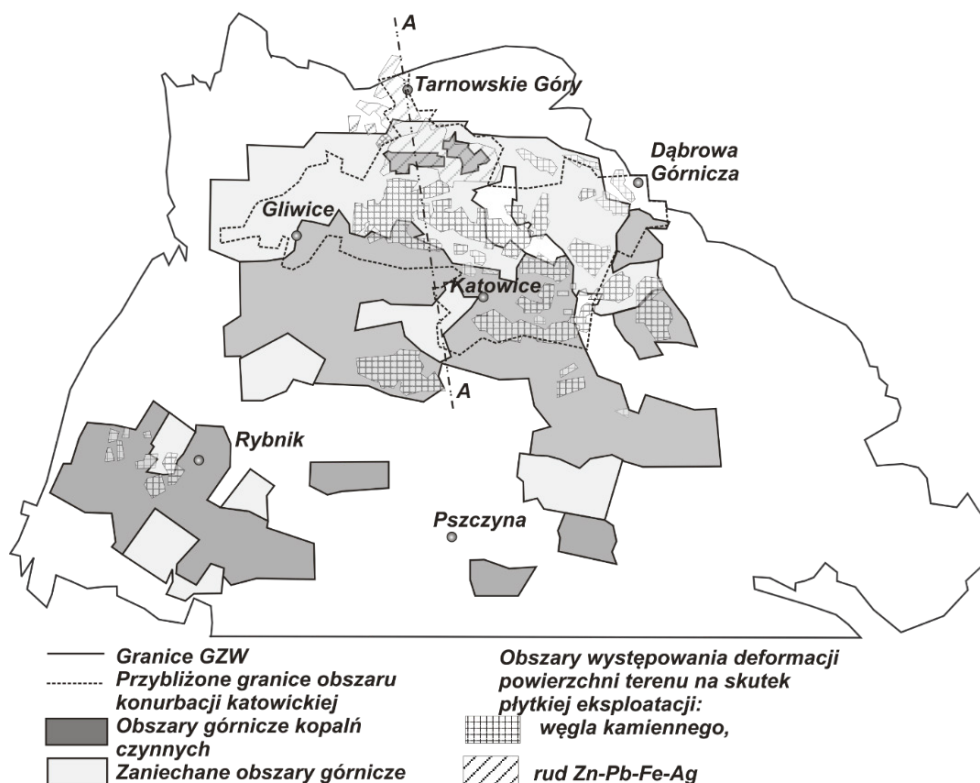
Obszary wczesnej eksploatacji górniczej znajdują się głównie w północnej części GZW, tworząc rozległy trójkąt wyznaczony w przybliżeniu przez Zabrze po stronie zachodniej, Piekary Śląskie po stronie północnej oraz Jaworzno po stronie południowo-wschodniej. Powierzchnia obszaru, na którym występują pozostałości płytkiego kopalnictwa węgla kamiennego wynosi nieco ponad 200 km² obejmując obszary w większości zabudowane, w tym w znacznej części objęte gęstą, wysoką zabudową typu wielkomiejskiego. Charakterystyczne dla tego obszaru jest zaleganie pokładów węgla blisko stropu karbonu, bezpośrednio przykrytego czwartorzędowym nadkładem tworzonym przez utwory sypkie i mało zwięzłe.

W północnej części GZW występują także pozostałości złóż rud cynku, ołowiu, srebra oraz żelaza, również zalegających na małej głębokości, od kilku do około 100 m, będących przedmiotem intensywnej eksploatacji górniczej zakończonej na początku XX wieku, w rejonie Tarnowskich Gór i w latach 90-tych XX wieku w Bytomiu. Szczególne warunki w zakresie wpływu płytkiej eksploatacji złóż na powierzchnię ziemi występują w rejonie Bytomia i Piekar Śląskich, gdzie płytkie wyrobiska porudne w trzeciorzędowych warstwach węglanowych zostały poddane wpływom eksploatacji węgla kamiennego prowadzonej na większej głębokości [1].

Spośród licznych oddziaływań działalności górniczej na środowisko najdotkliwiej i najszerzej odczuwalne są deformacje powierzchni terenu górniczego, które mogą być związane zarówno z bieżącą jak i zakończoną, czy wręcz historyczną podziemną eksploatacją złóż.

Współcześnie prowadzona eksploatacja pokładów węgla kamiennego charakteryzuje się znaczną głębokością, rozległymi powierzchniami wybrania oraz nieznacznym udziałem różnego rodzaju wyrobisk przygotowawczych, udostępniających i pomocniczych w całkowitej objętości pustek powstających w górotworze. W efekcie jej prowadzenia na powierzchni powstają rozległe niecki obniżeniowe o przeważnie łagodnie przebiegających profilach, których rozmiary i przebieg mają przewidywalny przebieg i zasięg. Ruchy deformacyjne zanikają po upływie w przybliżeniu od 3 do 10 lat po zakończeniu eksploatacji, w zależności od jej głębokości [2, 3]. Przebieg deformacji ciągłych wywołanych eksploatacją pokładów węgla kamiennego jest dobrze rozpoznany zarówno teoretycznie, jak i na podstawie praktyki. Pozwala to na podejmowanie działań skutecznie zapobiegających powstawaniu szkód w obiektach i infrastrukturze terenowej lub przynajmniej ograniczania ich skali, do czego służy między innymi kategoryzacja terenów górniczych ze względu na wielkości wybranych parametrów stwierdzonych bądź prognozowanych niecek osiadania, która obligatoryjnie musi być uwzględniona przy projektowaniu budynków, szlaków komunikacyjnych i innych rodzajów obiektów [4].

Drugim istotnym rodzajem oddziaływań robót górniczych na powierzchnię terenów górniczych są deformacje nieciągłe, związane z płytką eksploatacją podziemną oraz występowaniem pojedynczych wyrobisk górniczych. Zagadnienie wpływu pojedynczych, płytkich wyrobisk górniczych zostanie omówione w dalszej części artykułu.



Rys. 1. Obszar Górnośląskiego Zagłębia Węglowego wraz z obszarami zakończonej i aktualnej eksploatacji górniczej oraz granicami konurbacji katowickiej
 Fig. 1. Upper Silesia Coal Basin region with areas of current and idled mining operations and Katowice's conurbation borders

Geneza i rodzaje pustek podziemnych na terenie GZW

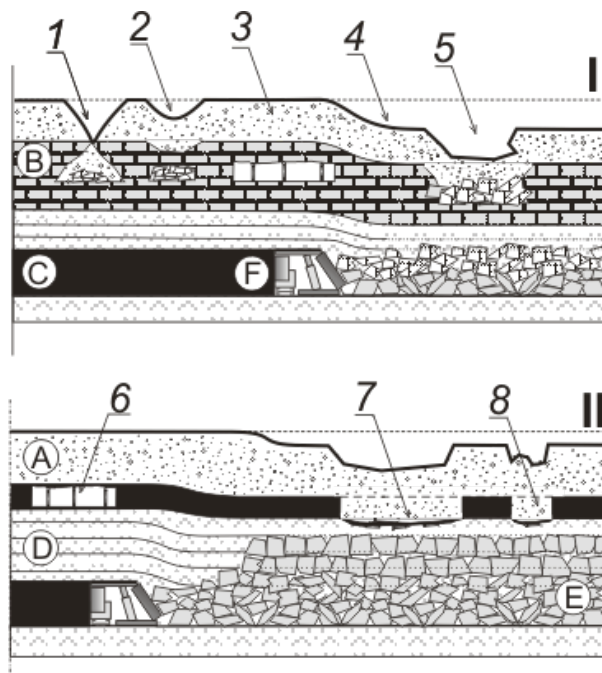
Płytkie pustki poeksploatacyjne zarówno wytworzone w warstwach węglanowych (eksploatacja rud metali), jak i w płytkich warstwach karbonu (płytko zalegające pokłady węgla kamiennego) charakteryzują się stwarzaniem zagrożenia dla powierzchni terenu w praktycznie nieograniczonym czasie po zakończeniu eksploatacji.

Z uwagi na budowę geologiczną i zakres dokonanej eksploatacji złóż na obszarze GZW, można na jego obszarze wyznaczyć pięć stref przebiegających w przybliżeniu wzdłuż linii A-A na rys. 1.

- I – strefy płytkiej eksploatacji rud metali,
- II – strefy płytkiej eksploatacji rud metali podebrane głębszą eksploatacją węgla kamiennego,
- III – strefy płytkiej eksploatacji węgla kamiennego,
- IV – strefy płytkiej eksploatacji węgla kamiennego podebrana eksploatacją głębiej zalegających pokładów,
- V – strefy głębokiej eksploatacji węgla kamiennego.

Z uwagi na zależność charakteru deformacji powierzchni terenu od głębokości prowadzonych robót górniczych można stwierdzić, że skutki eksploatacji górniczej dla powierzchni terenu górniczego zdeterminowane są przez [4]:

- nieciągłe deformacje powierzchni dominują w strefach I i III,
- deformacje zarówno nieciągłe, jak i ciągłe, a także występują lokalne zakłócenia typowych niecek osiadania przez nieciągłości występujące w płytkich warstwach górotworu w strefach II i IV,
- ciągłe deformacje powierzchni terenu w strefie V (mogą im towarzyszyć deformacje nieciągłe, związane z występowaniem uskoku, krawędzi eksploatacji i innych czynników sprzyjających nierównomiernemu osiadaniu warstw).



A – nadkład (luźne utwory czwartorzędowe), B – węglanowe utwory trzeciorzędowe zawierające złoża rud metali, C – pokład węgla kamiennego, D – stropowe skały karbońskie, E – gruzowiska zawałowe, F – ściana wydobywcza 1 – głębokie zapadlisko utworzone w wyniku zawału stropu i wypełnienia luźnymi skałami porudnej komory eksploatacyjnej; 2 – płytkie zapadlisko utworzone w rezultacie zawału kawerny lub niewielkiego wyrobiska górniczego; 3 – zbocze ciągłej niecki osiadania powstałej w wyniku przejścia frontu ścianowego na głębokości powyżej 100 m (w warunkach GZW); 4 – zapadlisko wytworzone na skutek zawału płytkiego wyrobiska porudnego, wyindukowane przez eksploatację węgla kamiennego; 5 – zachowane wyrobisko górnicze w płytko leżącej partii pokładu węgla kamiennego; 6 – deformacja nieciągła powierzchniowa powstała w obrębie niecki osiadania na skutek zawału płytkiego wyrobiska w pokładzie węgla kamiennego wyindukowana przez eksploatację głębiej zalegającego pokładu; 7 – deformacje nieciągłe typu liniowego wykształcone w wyniku prowadzenia eksploatacji ścianowej

A – overburden (loose quaternary deposits), B – carbonate tertiary formations with ore bodies, C – coal seam, D – roof carboniferous rocks, E – goaf voids area, F – mine longwall 1 – deep subsidence created by roof fall and filling of the mine room with loose rocks; 2 – shallow sinkhole created as a result of roof collapse in a cavern or small mine working; 3 – slope of subsidence trough resulted from movement of mining front on the depth below 100 m (in conditions of USCB); 4 – sinkhole generated by roof fall of shallow ore mine working induced by coal mining; 5 – preserved mine working in shallow part of a coal seam; 6 – discontinuous plain deformation created within a subsidence trough induced by extraction of deeply bedded coal seam; 7 – discontinuous deformations of linear type resulted from longwall mining

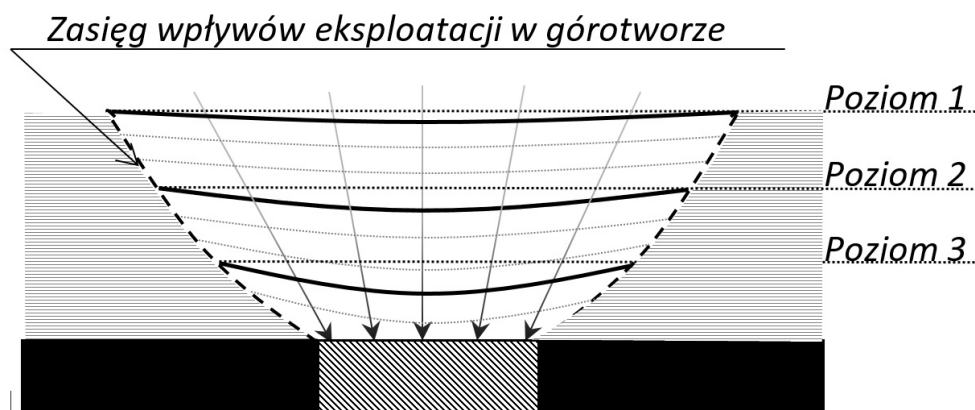
Rys. 2. Ilustracja wpływu podziemnych robót górniczych na powstawanie nieciągłych deformacji terenu typu powierzchniowego w warunkach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego [5]

Fig.2. Illustration of underground mining works on creation of sinkholes in the conditions of Upper Silesian Colas Basin [5]

Mechanizm powstawania deformacji

Przebieg przemieszczeń skał górotworu i jego deformacji dokonujący się w wyniku prowadzenia podziemnej eksploatacji górniczej jest zagadnieniem złożonym, którego szczegółowy opis wykracza dalece poza zakres niniejszej publikacji. Problematyka deformacji górotworu wywołanych robotami górniczymi stanowi jedno z najistotniejszych zagadnień górnictwa podziemnego i jest ona tematem licznych szczegółowych badań i opracowań naukowych z zakresu mechaniki górotworu i ochrony powierzchni.

Proces przemieszczania skał górotworu nad wybraną częścią złoża (wyrobiska, komory) przedstawiono schematycznie na rys. 3. Na skutek opadania warstw stropowych do wybranej przestrzeni, początkowo płaska powierzchnia terenu lub dowolnie wybrana płaszczyzna pozioma w górotworze formuje nieckę obniżeniową. Im większa jest odległość pionowa między powierzchnią terenu a wybieranym pokładem, tym maksymalne obniżenie powierzchni terenu jest mniejsze, zaś horyzontalny zasięg niecki obniżeniowej większy. Jednocześnie, wraz ze wzrostem głębokości prowadzonej eksploatacji górniczej zmniejszają się deformacje na krawędziach niecki obniżeniowej, stanowiące źródło największego zagrożenia dla obiektów na powierzchni terenu [5].



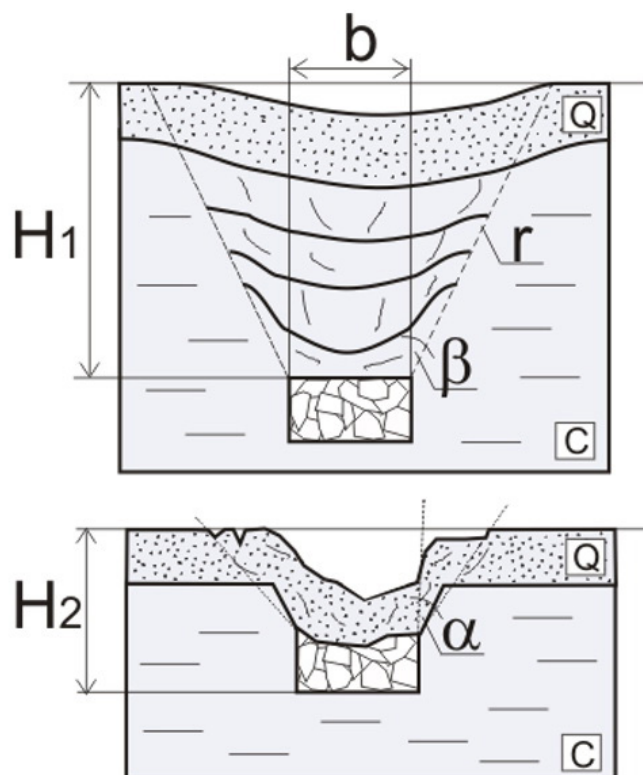
Rys. 3. Schemat przemieszczania się skał nadkładu nad wybraną pustką w górotworze [5]
Fig. 3. Displacement of overburden rocks over an underground void [5]

W odniesieniu do typowych szkód górniczych, rozumianych jako uszkodzenia budynków i elementów infrastruktury, obniżenie powierzchni terenu, jako końcowy efekt eksploatacji górniczej na powierzchni terenu samo w sobie nie stanowi bezpośredniego zagrożenia. Obniżenie powierzchni terenu może natomiast mieć wpływ na zmianę stosunków wodnych na obszarze poddanym wpływom podziemnej eksploatacji górniczej, zwłaszcza w hydrogeologicznie zakrytych częściach GZW. Kluczowe dla oddziaływania eksploatacji podziemnej na obiekty powierzchniowe są wskaźniki deformacji powierzchni terenu, opisujące krawędzie niecki osiadania, na których wielkość istotny wpływ ma między innymi obniżenie powierzchni terenu [6, 7].

Podstawową formą deformacji powierzchni na terenie GZW są niecki osiadania. Pełne niecki osiadania wykształcają się przy eksploatacji ścianowej na głębokości w przybliżeniu wynoszącej powyżej 200 m. Są to niecki, w których osiągnięte jest maksymalne obniżenie powierzchni dla danych parametrów geometrycznych eksploatowanego pokładu, sposobu kierowania stropem i mechanicznych własności górotworu. W strefie głębokości eksploatacji wynoszącej od około

100 do 200 m, powstające deformacje powierzchniowe nadal mają charakter niecek, jednak ich głębokość jest mniejsza od wartości maksymalnej wynikającej z parametrów dokonanej eksploatacji (dno niecki w części centralnej nie stanowi powierzchni poziomej), co przedstawiono schematycznie w górnej części rys. 4. Z kolei w przypadku eksploatacji prowadzonej na głębokości mniejszej niż 100 m, w zależności od konkretnych miejscowych warunków, mogą powstawać deformacje ciągłe o parametrach odpowiadających najwyższej, piątej kategorii terenu górniczego, przechodzące w deformacje nieciągłe [8]. Sytuację taką ilustruje schemat na dolnej części rys. 4.

Przy małych głębokościach eksploatacji może dochodzić do sytuacji, w których wytworzone pustki nie ulegają zawałowi i wypełnieniu skałą macierzystą bezpośrednio po dokonaniu eksploatacji z powodu zbyt niskiego ciśnienia skał nadległych na strop wyrobiska. Ich ewentualna samolikwidacja następuje poprzez zawał skał cienkiego stropu skały macierzystej z towarzyszącym mu zapelnieniem części pustek luźnymi utworami z warstw leżących przy powierzchni ziemi. W innym, często spotykanym przebiegu samolikwidacji starego wyrobiska, nie dochodzi do zawału jego stropu, a jedynie do rozwoju strefy spękań, które mogą stać się drogą transportu luźnych skał ziarnistych z warstw przypowierzchniowych, w wyniku czego następuje podsadzenie pustki i wystąpienia zapadliska na powierzchni. Wyżej wymienionych przypadków nie można opisać za pomocą metod wyznaczania parametrów ciągłych niecek osiadania.



Rys. 4. Schemat przebiegu deformacji górotworu i powierzchni terenu przy lokalizacji wyrobiska ulegającemu zawałowi na głębokości poniżej umownej granicy 100 m ($H_1 > 100$ m) oraz powyżej tej granicy ($H_2 < 100$ m). β - kąt zasięgu wpływów głównych, α - zmienny i nieregularny kąt zbocza niecki zapadliskowej
 Fig. 4. Schematic diagram of rockmass deformation and ground subsidence and its area, by location of collapsed working below stipulated depth of 100 m ($H_1 > 100$ m) and above his depth ($H_2 < 100$ m). β - angle of main influences, α - variable and irregular angle of sinkhole slope

Przy określaniu parametrów deformacji dla eksploatacji głębokiej zakłada się, że górotwór jest jednorodny i anizotropowy, a także że obecność sypkich utworów przypowierzchniowych nie ma wpływu na kształt tworzących się deformacji (deformacje powierzchni warstwy sypkiej są takie same jak dla warstwy zwartej).

W miarę zmniejszania się głębokości eksploatacji, założenia te przestają być zasadne. Istotną zaczyna być wysokość warstwy skały macierzystej od stropu wyrobiska do stropu skał zwężonych (karbonu lub triasu, jeśli występuje), a także miąższość utworów czwartorzędowych, własności fizyczne i chemiczne poszczególnych rodzajów występujących w górotworze skał, warunki wodne i inne zmienne czynniki lokalne.

Dla opisu deformacji powierzchniowych generowanych przez wyrobiska o małych (w porównaniu ze ścianami wydobywczymi) wymiarach, położonych na głębokościach powyżej 100 m. można wykorzystać te same metody prognozowania deformacji powierzchni jak w przypadku wyrobisk eksploatacyjnych, uwzględniając przy tym wymienione powyżej ograniczenia oraz dokonując odpowiednich założeń dotyczących kierunku i granic prowadzenia eksploatacji złoża.

Charakterystyka wpływu wyrobisk górniczych na powierzchnię terenu

Jak już stwierdzono wyżej, przebieg deformacji a zarazem sposób zachowania się powierzchni terenu nad ulegającym zawaleniu lub samozasypaniu wyrobiskiem górniczym zależy od sposobu rozpatrywania górotworu – jako jednorodny ośrodek anizotropowy przy stosunkowo dużej głębokości zalegania rozpatrywanego wyrobiska, bądź jako struktura warstw skalnych w podłożu gruntu o zróżnicowanej budowie i własnościach fizycznych – przy małej głębokości zalegania.

Charakterystyka deformacji ciągłych powierzchni terenu powstających w wyniku zawału wąskiego wyrobiska górniczego

W ramach teorii Budryka-Knothe [2, 9], reprezentującej popularne i szeroko stosowane ujęcie zagadnienia opisu niecek deformacyjnych, przebieg końcowego stanu deformacji wywołanej przez wyeksploatowanie nieskończonej półpłaszczyzny pokładu można opisać za pomocą funkcji opartej na normalnym (gaussowskim) rozkładzie wpływów.

Podstawową zależnością opisującą przebieg osiadania powierzchni w oparciu o funkcję wpływu jest równanie:

$$w(x) = \frac{w_{\max}}{r} \int_0^{\infty} e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} dx \quad (1)$$

odnoszące się do profilu brzeżnej części niecki obniżeniowej (jej przekroju poprzecznego), gdzie:

$w(x)$ – obniżenie powierzchni terenu w punkcie x , przy czym $x=0$ dla krawędzi eksploatacji,

w_{\max} – maksymalne obniżenie powierzchni terenu,

r – promień zasięgu (rozproszenia) wpływów głównych eksploatacji.

Maksymalne obniżenie powierzchni w_{max} odnosi się do obniżenia powierzchni, które by wystąpiło w przypadku wyeksploatowania hipotetycznej półpłaszczyzny pokładu o miąższości g , który uległby zawałowi lub zostałby podsadzony ze współczynnikiem osiadania α .

$$w_{max} = \alpha g \quad (2)$$

Promień zasięgu wpływów głównych eksploatacji r jest związany z kątem zasięgu wpływów głównych β poprzez relację

$$r = \frac{H}{\operatorname{tg}\beta} \quad (3)$$

w której H jest głębokością eksploatacji.

Kąt β odzwierciedla własności górotworu, przy czym im górotwór ma większą sztywność i wytrzymałość, tym wielkość tego kąta maleje. Dla warunków GZW wartość $\operatorname{tg}\beta$ zmienia się w przedziale od 1,5 do 2,5 przy czym w rozważaniach mniej szczegółowych, o ile brak jest dokładnych danych na temat jego wartości dla rozpatrywanej lokalizacji przyjmuje się $\operatorname{tg}\beta = 2,0$ [6, 10].

Profil niecki osiadania dla wąskiego wyeksploatowanego pasa pokładu (tj. gdy odległość między krawędziami eksploatacji jest zbyt mała by obniżenie powierzchni między nimi osiągnęło wartość zbliżoną do w_{max}) można uzyskać dokonując superpozycji hipotetycznych profili niecek powstających w wyniku eksploatacji dwóch nieskończonych półpłaszczyzn przebiegających w przeciwnych kierunkach do krawędzi położonej w punkcie $x = 0$ w jednym przypadku i w punkcie $x = b$ w drugim [2]. Sytuacja taka odpowiada eksploatacji wyrobiska o nieskończonej długości i szerokości b , przy czym usytuowanie osi x względem ociosów wyrobiska może być inne, co wymaga jedynie dokonania odpowiednich zmian w przedstawionych dalej równaniach i wykresach.

I tak funkcję osiadania dla eksploatacji do krawędzi $x = 0$ można przedstawić w postaci:

$$w(x)_a = \frac{w_{max}}{2} \left[\operatorname{ERF}\left(\frac{x\sqrt{\pi}}{r}\right) + \operatorname{ERF}(x_\infty\sqrt{\pi}) \right] + w_{max} \quad (4)$$

Zaś funkcję osiadania dla eksploatacji do krawędzi $x = b$ w postaci:

$$w(x)_b = -\frac{w_{max}}{2} \left[\operatorname{ERF}\left(\frac{(x-b)\sqrt{\pi}}{r}\right) + \operatorname{ERF}(x_\infty\sqrt{\pi}) \right] - w_{max} \quad (5)$$

Zatem funkcja opisująca profil niecki deformacyjnej wywołanej wyeksploatowaniem (i zawałem) wyrobiska o szerokości b przyjmie postać:

$$w(x) = w(x)_b - w(x)_a = -\frac{w_{max}}{2} \left[\operatorname{ERF}\left(\frac{(x-b)\sqrt{\pi}}{r}\right) + \operatorname{ERF}\left(\frac{x\sqrt{\pi}}{r}\right) \right] \quad (6)$$

gdzie funkcja $w(x)_a$ oznacza przebieg zależności dla prawej krawędzi komory położonej w punkcie $x = 0$ a funkcja $w(x)_b$ dotyczy zależności wyznaczonej dla lewej krawędzi komory położonej w punkcie $x = b$.

W podobny sposób można określić przebieg:

- nachylenia profilu niecki, stanowiącej pierwszą pochodną funkcji osiadania:

$$T(x) = \frac{dw}{dx} = -\frac{w_{\max}}{r} e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} \quad (7)$$

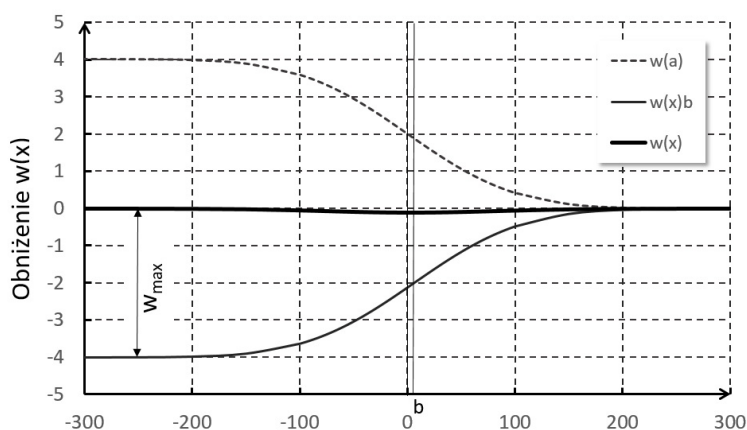
- krzywizny profilu niecki, (drugiej pochodnej funkcji osiadania):

$$K(x) = \frac{d^2w}{dx^2} = \frac{2\pi w_{\max}}{r^3} x e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} \quad (8)$$

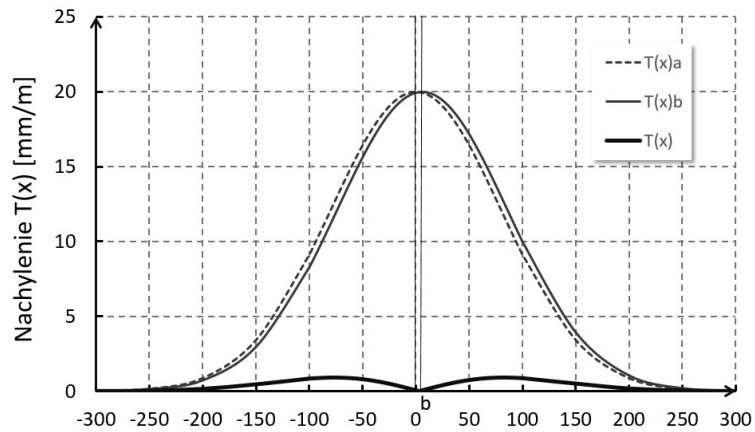
- odkształcenia poziomego stanowiącego funkcję przemieszczenia poziomego:

$$\varepsilon(x) = \frac{d^2u}{dx^2} = \frac{-\sqrt{2\pi} w_{\max}}{r^2} x e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} \quad (9)$$

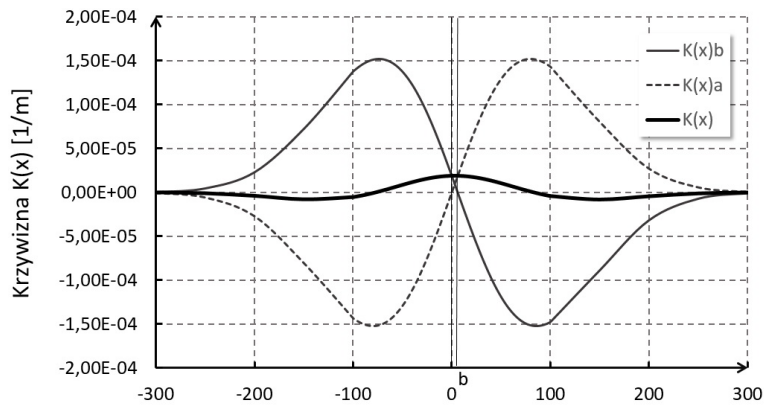
Na wykresach na rys. 5 - 8 przedstawiono przykładowe przebiegi funkcji osiadania $w(x)$, nachylenia $T(x)$, krzywizny $K(x)$ i odkształcenia poziomego $\varepsilon(x)$ dla wyrobiska (komory) o szerokości 10 m i wysokości 3 m, zalegającego na głębokości 100 m, przy założeniu, że współczynnik osiadania wynosi 0,8. Wyznaczone wartości parametrów deformacyjnych niecki osiadania odpowiadają w przybliżeniu wartościom maksymalnym, jakie mogą wystąpić przy lokalizacji wyrobiska na najmniejszej głębokości, przy której deformacje zachowują charakter ciągły.



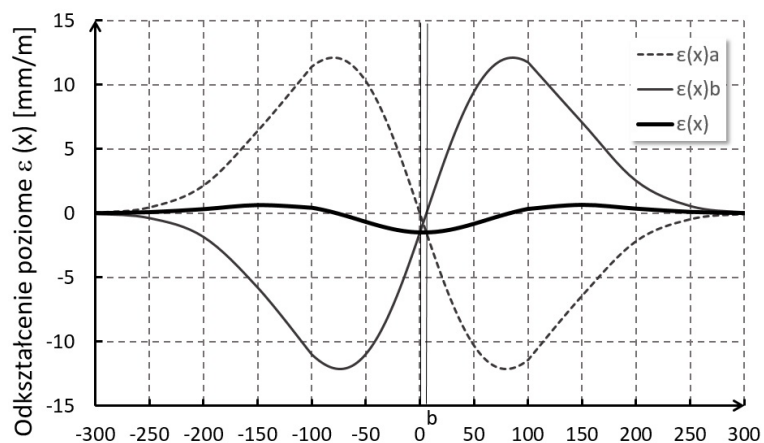
Rys. 5. Profil niecki osiadania powierzchni terenu dla komory o przekroju 10 x 3 m na głębokości 100 m po zawale stropu
 Fig. 5. Subsidence profile of a ground surface for a room of dimensions 10 x 3 m on the depth of 100 m after roof collapse



Rys. 6. Krzywa nachylenia powierzchni terenu dla komory o przekroju 10 x 3 m na głębokości 100 m po zawale stropu
 Fig. 6. Tilt curve of ground surface for a room of dimensions 10 x 3 m on the depth of 100 m after roof collapse

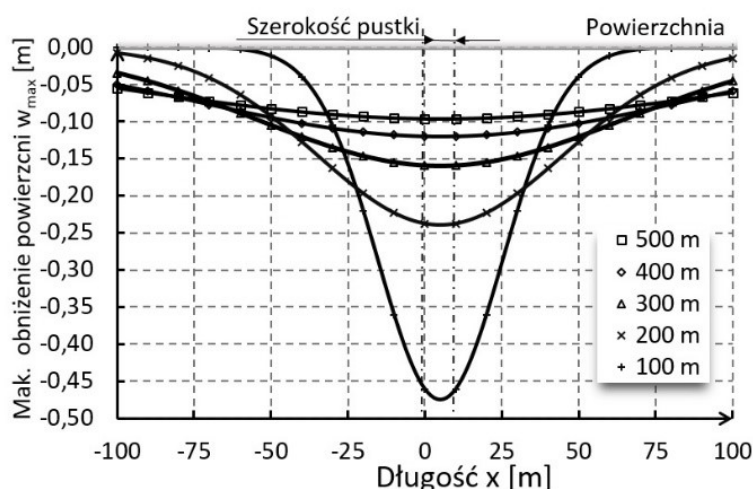


Rys. 7. Przebieg krzywizny niecki osiadania powierzchni terenu dla komory o przekroju 10 x 3 m na głębokości 100 m po zawale stropu
 Fig. 7. Curvature of subsidence trough on a ground surface for a room of dimensions 10 x 3 m on the depth of 100 m after roof collapse



Rys. 8. Przebieg odkształcenia poziomego niecki osiadania powierzchni terenu dla komory o przekroju 10 x 3 m na głębokości 100 m po zawale stropu
 Fig. 8. Horizontal displacement movement in a subsidence trough for a room of dimensions 10 x 3 m on the depth of 100 m after roof collapse

Parametry niecki deformacyjnej powstałej w wyniku zawału stropu nad pojedynczym wyrobiskiem podziemnym zależą ściśle od głębokości, na której wyrobisko jest zlokalizowane oraz jego wymiarów. Na rys. 9 przedstawiono przebieg niecki osiadania dla różnych głębokości zalegania wyrobiska o rozmiarach 3 x 10 m, które uległo zawałowi, przy założeniu stałej wartości współczynnika osiadania $a = 0,8$. Jak wynika z przedstawionego wykresu, maksymalne obniżenie powierzchni terenu, a co za tym idzie pozostałe parametry niecki osiadania gwałtownie wzrastają, gdy głębokość zalegania wyrobiska (komory) jest mniejsza od około 200 m. Przy głębokości mniejszej od około 100 m parametry niecki osiadania osiągają zbyt duże wartości by powierzchnia gruntu poddana odkształceniom zachowała ciągłość.



Rys. 9. Przebieg niecki osiadania powstałej w wyniku zawału stropu komory o przekroju 10 x 3 m w zależności od głębokości, na której się znajduje
Fig. 9. Subsidence profile of ground surface resulted from the roof collapse of a room of dimensions 10 x 3 m in relation to depth of its location

Warunki powstawania deformacji nieciągłych powierzchni terenu powstających w wyniku zawału lub samozasypania płytkiego wyrobiska podziemnego

W przypadku małej głębokości zalegania wyrobisk, które mogą stanowić zagrożenie dla powierzchni terenu, kwestią zasadniczą nie jest kształt wytworzonej w wyniku ich zawału lub samozasypania pustki – ten bowiem będzie nieregularny, uzależniony od własności utworów przypowierzchniowych, ale dokonanie oceny, czy w danych warunkach nastąpi przemieszczenie luźnych przypowierzchniowych utworów skalnych do takiego wyrobiska.

W przypadku głębokiego zalegania wyrobisk, o procesie deformacji górotworu (a w konsekwencji powierzchni terenu) decyduje pionowe ciśnienie górotworu, które wywołuje w warstwach nad stropem wyrobisk naprężenia znacznie przekraczające wytrzymałość tworzących je skał. Natomiast w płytkich wyrobiskach górniczych ciężar skał nadległych jest stosunkowo niewielki i w korzystnych warunkach pozostawione po eksploatacji płytkich złóż komory i chodniki podziemne mogą utrzymywać się przez wiele lat. Dopiero stopniowo postępująca erozja obudowy i powierzchni stropu oraz ociosów wyrobiska prowadzi z czasem do zakłócenia stanu równowagi sił w otoczeniu wyrobiska. Istnieje jedynie możliwość teoretycznego ustalenia czy konkretna pustka podziemna (wyrobisko) o znanych rozmiarach i zlokalizowana w znanych warunkach

geologicznych może ulec zawałowi i doprowadzić do powstania deformacji nieciągłej na powierzchni terenu.

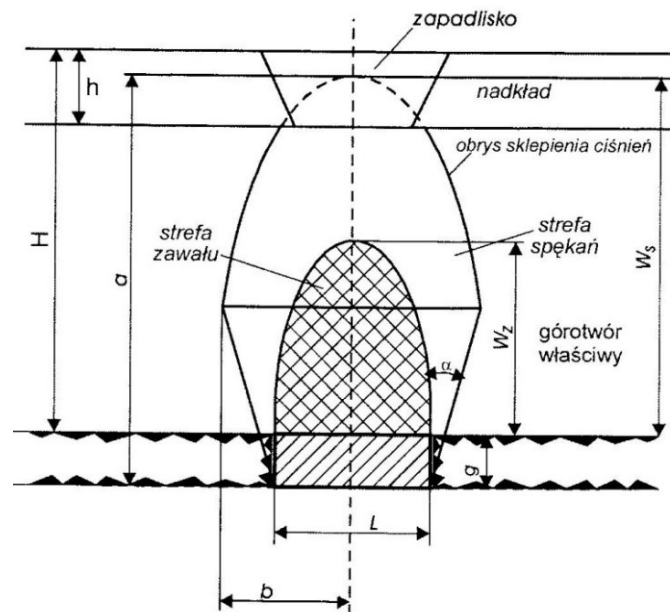
Istnieje kilka metod prognozowania wystąpienia zapadliska na skutek zawału płytko zlokalizowanego, podziemnego wyrobiska górniczego [3, 10], które generalnie sprowadzają się do:

- wyznaczenia wysokości strefy spękań nad wyrobiskiem powstającej w wyniku zawału jego stropu,

- sprawdzenia położenia szczytu strefy spękań względem stropu skały macierzystej.

Zakłada się, że górotwór karboński, w którym zlokalizowane jest rozpatrywane wyrobisko jest jednorodny (charakteryzuje się stałą wartością ciężaru objętościowego i współczynnika Poissona), zbudowany jest ze skał o małej wytrzymałości na rozrywanie, zaś powyżej stropu karbonu występuje jednorodny nadkład, zbudowany z utworów luźnych o stałej wartości kąta tarcia wewnętrznego.

W wyniku zawału wytworzonej w górotworze pustki, bezpośrednio w obrębie zawałonego wyrobiska oraz do pewnej wysokości ponad nim powstaje strefa zawału. Strefa zawału jest zmienna tym, że tworzą ją odspojone i przemieszczone bloki skalne. Nad strefą zawału, gdzie naprężenia są mniejsze i bardziej rozproszone, tworzy się strefa spękań. W strefie spękań pierwotnie lita skała podzielona jest na bloki, między którymi występują horyzontalne i lateralne szczeliny. Położenie strefy zawału i spękań względem zawałonego wyrobiska oraz stropu karbonu i powierzchni ziemi przedstawia schematycznie rys. 10.



Rys. 10. Schemat górotworu do oceny możliwości powstania zapadliska nad płytko zalegającym wyrobiskiem górniczym [6]

Fig. 10. Model of the rockmass for assessment of sinkhole appearance above a shallow mine working [6]

W metodzie Chudka i Olszowskiego [10] opartej na teorii sklepienia ciśnię, obie strefy mają kształt eliptyczny, przy czym strefa spękań sięga znacznie poza obrys wyrobiska. Aby mogło powstać zapadlisko, strefa spękań musi dotrzeć przynajmniej do spągu luźnego nadkładu. Rozwój strefy zawałowej zatrzymuje się w momencie, w którym skały zawału wypełniają całkowicie zwalone wyrobisko i pustkę nad nim, tworząc oparcie dla tak utworzonego sklepienia, uniemożliwiające obrywanie kolejnych warstw skał.

Innymi słowy, rozwój strefy zawału trwa do momentu, kiedy łączna objętość pustek między bryłami zawału staje się równa objętości pierwotnie istniejącego wyrobiska. Warunek ten można opisać zależnością:

$$F_z k = F_z + F_w \quad (10)$$

gdzie:

F_z – powierzchnia przekroju strefy zawału,

F_w – powierzchnia przekroju wyrobiska,

k – współczynnik rozluźnienia skał w zawałe.

Po przeliczeniach uzyskuje się wzór na maksymalną wysokość strefy zawału w postaci:

$$w_z = g \frac{4(k+1) - \pi(k-1)}{2\pi(k-1)} \quad (11)$$

gdzie g – wysokość pustki pierwotnej (wyrobiska).

Jak wynika z formy równania (11), wysokość strefy zawału jest liniową funkcją wysokości wyrobiska, przy czym dla danej wysokości wyrobiska jest ona stała w obrębie partii górotworu charakteryzującego się określoną wartością współczynnika rozluźnienia skał w zawałe k . W warunkach GZW wielkość współczynnika k zmienia się w zakresie od 1,02 do 1,60, co oznacza, że wysokość strefy zawału może wahać się od 2,25g do 25,5g. Wystąpienie zapadliska jest zatem pewne, jeśli wysokość strefy zawału sięgnie stropu górotworu zwięzłego, czyli:

$$w_z \geq H - h \quad (12)$$

gdzie:

H – głębokość wyrobiska,

h – grubość nadkładu (warstwy utworów sypkich).

Zapadlisko na powierzchni terenu może również wystąpić, jeśli granica między utworami zwięzłymi a sypkimi znajdzie się w obrębie oddziaływania stref spękań, której rozległość jest znacznie większa niż strefy zawału.

Zakładając, że proces powstawania spękań związany jest z występowaniem w ociosach wyrobiska płaszczyzn poślizgowych, w których skały podlegają ścinaniu pod kątem α , zaś obrys powierzchni przekroju strefy spękań jest eliptyczny, równanie na maksymalną wysokość strefy spękań może przyjąć postać:

$$w_s = \pm M \sqrt{\frac{(L + g \operatorname{tg} \alpha)^2 (M^2 \operatorname{tg}^2 \alpha + 1)}{4(1 - M^2 \operatorname{tg}^2 \alpha)^2}} - \frac{g}{2} \quad (13)$$

gdzie:

L – szerokość pustki (wyrobiska),

α – kąt tarcia wewnętrznego skał górotworu zwięzłego,

$M = a/b$, gdzie: a – oś pionowa, b – oś pozioma elipsy sklepienia ciśnień.

Przeciętne wartości parametrów górotworu występujących w równaniu (13) dla typowych skał karbońskich w GZW zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Przeciętne parametry górotworu do wyznaczania wysokości strefy spękań [6]

| Rodzaj skały | Kąt α | $\text{tg } \alpha$ | $\text{tg}^2 \alpha$ | M |
|---------------------------|--------------|---------------------|----------------------|---|
| Węgiel | 16° | 0,2867 | 0,082 | 2 |
| Łupek miękki | 13° | 0,2309 | 0,053 | 4 |
| Łupek | 9° | 0,1584 | 0,025 | 5 |
| Piaskowiec miękki, wapień | 7° | 0,1228 | 0,015 | 6 |
| Łupek piaszczysty | 6° | 0,1051 | 0,011 | 7 |
| Piaskowiec | 5° | 0,0875 | 0,008 | 9 |

W przypadku gdy bezpośrednią przyczyną wystąpienia zapadliska jest wystąpienie pęknięć w stropie górotworu zwięzłego, można jedynie mówić o prawdopodobieństwie wystąpienia deformacji nieciągłych nad rozpatrywanym wyrobiskiem, zależnym od wielkości, położenia i ilości szczelin w przystropowej warstwie górotworu zwięzłego i stanu zruszenia górotworu w niżej leżących warstwach nad zawalonym wyrobiskiem. Wyznaczanie wysokości strefy zawału i strefy spękań w oparciu o rozwiązania analityczne z zakresu mechaniki górotworu obciążone jest znacznymi błędami, dlatego też w zastosowaniach inżynierskich można z powodzeniem stosować do nich przybliżone zależności [6], według których:

$$w_{zmax} \approx 10g \quad (14)$$

$$w_s \approx (10 \div 50)g \quad (15)$$

Przyjęcie wysokości strefy w_z jako dziesięciokrotnej wysokości pierwotnej wyrobiska jest uzasadnione licznymi obserwacjami na obszarze GZW. Stosunkowo nieliczne zaobserwowane w warunkach rzeczywistych wysokości strefy spękań wykazują znaczną zmienność w zależności między innymi od stopnia nasilenia naturalnych spękań w skałach tworzących nadkład nad zawalonym wyrobiskiem czy stopnia ich zerodowania (np. skrasowienie skał węglanowych). Wobec braku możliwości dokonania dokładniejszej oceny wysokości strefy spękań, dla oceny ryzyka wystąpienia deformacji na powierzchni terenu należy przyjmować maksymalną jej wysokość [11].

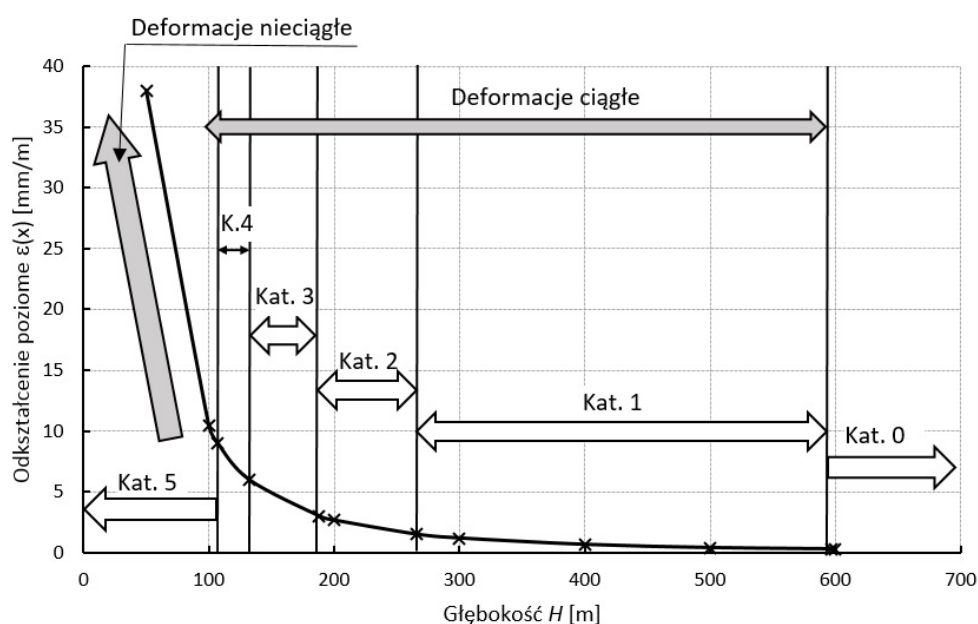
Na podstawie doświadczeń z wystąpień zapadlisk po zawale płytkich wyrobisk górniczych przyjęto, że prawdopodobieństwo wystąpienia deformacji nieciągłej na powierzchni terenu zależne jest od wartości wskaźnika Z , określającego stosunek głębokości zawalonego wyrobiska względem stropu górotworu zwięzłego do wysokości tego wyrobiska (rys. 10):

$$Z = \frac{H-h}{g} \quad (16)$$

Prawdopodobieństwo wystąpienia deformacji nieciągłej nad rozpatrywanym wyrobiskiem zmienia się od 1 gdy $Z \leq 10$ i wysokość strefy zawałowej sięga do warstw luźnego nadkładu, do 0 dla $Z \geq 50$, gdy wierzchołek strefy spękań znajduje się poniżej stropu skały macierzystej. Przyjęcie takiej zakresu prawdopodobieństwa wystąpienia deformacji nieciągłej na powierzchni terenu wynika bezpośrednio z zależności (14) i (15).

Ocena wpływu głębokości wyrobisk na kształtowanie się zagrożenia deformacyjnego

Jak wiadomo parametrami geometrycznymi niecek osiadania przy wyznaczaniu kategorii terenu górniczego są: wcześniej omówione odkształcenie poziome, nachylenie i promień krzywizny. Przyjmując, że kategoria ochrony powierzchni terenu definiowana jest przez maksymalną wartość poziomego odkształcenia powierzchni poziomego ϵ_{max} , to na przykładzie wcześniej rozpatrywanego wyrobiska, można przedstawić zależność między głębokością, na której znajduje się wyrobisko a kategorią ochrony powierzchni ze względu na skalę deformacji terenu, jakie wystąpią w przypadku jego zawалу, rys. 11.



Rys. 11. Zależność wielkości maksymalnego odkształcenia poziomego ϵ_{max} oraz kategorii i typu deformacji powierzchni od głębokości lokalizacji komory podziemnej o przekroju 3 x 10 m
 Fig. 11. Relation between maximal horizontal displacement ϵ_{max} , category, type of ground deformation and depth of a mine room of dimensions 3 x 10 m

W rozważanym przypadku, minimalne głębokości rozpatrywanego wyrobiska o przekroju prostokątnym o wymiarach 3 x 10 m, przy których na powierzchni ujawniają się deformacje powierzchni mieszczące się w poszczególnych kategoriach wynoszą:

- 597 m dla I kategorii deformacji,
- 266 m dla II kategorii deformacji,
- 188 m dla III kategorii deformacji,
- 132 m dla IV kategorii deformacji,
- 107 m dla V kategorii deformacji.

Jak wynika z przebiegu krzywej maksymalnego odkształcenia poziomego ϵ_{max} , jego wielkości gwałtownie rosną wraz ze zmniejszającą się głębokością wyrobiska, które uległo zawalowi, zwłaszcza poniżej 100 m. W strefie tej przestają obowiązywać zależności geometryczne opisane równaniami (1) - (9), natomiast ocenie zaczyna podlegać prawdopodobieństwo wystąpienia deformacji nieciągłych.

W warunkach rzeczywistych nie istnieje ścisłe rozgraniczenie głębokości ulegającego zawalowi wyrobiska na strefy występowania deformacji ciągłych (niecek) i nieciągłych (zapadlisk). W konkretnych warunkach może dochodzić zarówno do wystąpienia

utrąty ciągłości powierzchni i wystąpienia poważnych deformacji terenu przy zawale wyrobiska leżącego w pobliżu dolnej granicy głębokości dla V kategorii deformacji powierzchni (lub nawet górnej granicy głębokości dla kategorii IV), bądź też, nawet przy niewielkiej głębokości rozpatrywanego wyrobiska, ujawniona deformacja może mieć przebieg łagodny i stwarzający mniejsze od oczekiwanego zagrożenie dla obiektów powierzchniowych.

W przypadku zapadlisk stożkowych, ich średnica na powierzchni terenu zależna jest od rozmiaru pustki w pokładzie, grubości warstwy nadkładu i kąta tarcia wewnętrznego luźnych utworów nadkładu:

$$d = 2hctg\alpha + 2r \quad (17)$$

gdzie:

α – kąt tarcia wewnętrznego skał nadkładu,

h – grubość warstwy nadkładu,

r – promień pustki w pokładzie (promień zastępczy, reprezentatywny dla kształtu powierzchni stropu zawalonego wyrobiska)

W warunkach rzeczywistych przypowierzchniową warstwę górotworu stanowią utwory czwartorzędowe o różnym stopniu zwięzłości i zróżnicowanej zmienności parametrów fizycznych ze względu na oddziaływanie wód gruntowych. Kształt zapadliska jest uzależniony od kątów tarcia i kohezji poszczególnych warstw podłoża i warunków wodnych. Zapadliska mogą mieć kształt zbliżony do osiowo symetrycznych stożków, stożków odwróconych, niecek, walców itp. lub niesymetryczny – np., wydłużony w kierunku, z którego spływ wód gruntowych zmył w stronę zapadliska większą ilość luźnych osadów.

Wnioski

Deformacje powierzchni ziemi i zagrożenie dla obiektów powierzchniowych są skutkiem nie tylko zawalu wyrobisk eksploatacyjnych (w warunkach GZW przede wszystkim ścian), które wywołują deformacje o charakterze wielkopowierzchniowym. W wielu przypadkach, między innymi dotyczących historycznej eksploatacji złóż, źródłem zagrożenia deformacyjnego są wyrobiska o niewielkich przekrojach poprzecznych, dla których deformacje powierzchni przebiegają odmiennie niż w przypadku rozległych wyrobisk eksploatacyjnych.

Przedstawiona metoda postępowania pozwala na określenie ekstremalnych wartości parametrów deformacji ciągłych dla konkretnego przypadku pustki podziemnej tworzącej zagrożenie deformacyjne dla powierzchni, a także pozwala na ocenę wielkości tych parametrów w konkretnym punkcie terenu w obrębie niecki osiadania.

W przypadku głębokiej lokalizacji wyrobisk podziemnych założenie monolitycznej budowy górotworu i ciągłego charakteru deformacji powierzchni zapewniają wystarczającą dla praktyki inżynierskiej dokładność.

W przypadku niewielkich głębokości wyrobisk górniczych, złożoność budowy geologicznej górotworu, zmienność własności fizykomechanicznych skał, warunki hydrogeologiczne, sejsmiczne, uwarunkowania górnicze (przebieg, zakres, sposób dokonanej eksploatacji) i inne czynniki sprawiają, że procesy deformacyjne nadal należą do najtrudniejszych do przewidzenia. Czynniki te decydują o niewielkiej praktycznej przydatności prób sformalizowania opisu zjawiska deformacji nieciągłych i prognozowania ich występowania. Tym niemniej względy praktyczne wymagają

dysponowania narzędziami umożliwiającymi przynajmniej zgrubne oszacowywanie prawdopodobieństwa występowania i rozmiarów deformacji nieciągłych powstających w wyniku zawалу płytkich podziemnych wyrobisk górniczych.

Przedstawione metody analizy prognozowania występowania ciągłych i nieciągłych deformacji powierzchni terenu umożliwiają oszacowywanie potencjalnych zagrożeń ze strony istniejących wyrobisk górniczych, np. w sytuacji powstania wyrobisk, które powinny zostać podsadzone dla eliminacji możliwości wystąpienia deformacji powierzchni terenu, projektowania wyrobisk na małych głębokościach, czy oceny zagrożenia dla powierzchni terenu ze strony wyrobisk przeznaczonych do zachowania, np. zabytkowych. Z uwagi na powszechne występowanie dawnych płytkich wyrobisk górniczych, obecność cennych obiektów podziemnych o charakterze zabytkowym, dokonana i przewidywana likwidację licznych zakładów górniczych, problemy bezpieczeństwa użytkowania obiektów na terenach górniczych i pogórniczych będą występowały na terenie GZW jeszcze przez co najmniej wiele dziesięcioleci. Wypracowane dotychczas skuteczne metody prognozowania deformacji powierzchni terenu ukierunkowane są głównie na kwestie związane z bieżącą eksploatacją górniczą, natomiast zagadnienia wpływu odosobnionych wyrobisk, często zlokalizowanych blisko powierzchni ziemi wymagają dalszych badań i rozwoju zaprezentowanych w artykule metod badania zagrożenia deformacyjnego.

Bibliografia

- [1] Pszonka J.: Charakterystyka zagrożenia zapadliskowego w niecce bytomskiej na terenach historycznej eksploatacji rud metali w świetle warunków geologicznych i górniczych. W: Mat. Symp. Warsztaty 2007 z cyklu Zagrożenia naturalne w górnictwie. Kraków: Wydawnictwo IGSMiE PAN 2007, s. 117-136.
- [2] Borecki M. (red.): Ochrona powierzchni przed szkodami górniczymi. Katowice: Wydawnictwo Śląsk 1982. ISBN 83-216-002`-2.
- [3] Strzałkowski P.: Zarys ochrony terenów górniczych. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2010. ISBN 83-7335-789-9.
- [4] Kawulok M.: Górnicze i geotechniczne problemy budownictwa na terenach górniczych. W: Mat. Konf. XXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji 2009, s. 147-168.
- [5] Stozik G.: Wypełnianie pustek podziemnych w górotworze naruszonym eksploatacją górniczą. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2015. ISBN 978-83-7880-308-9.
- [6] Chudek M.: Mechanika górotworu z podstawami zarządzania ochroną środowiska w obszarach górniczych i pogórniczych. Gliwice: Wydawnictwo Pol. Śl. 2010. ISBN 978-83-7335-647-4.
- [7] Popiołek E.: Ochrona terenów górniczych. Kraków: Wydawnictwo AGH, 2009. ISBN 3-7464-229-7.
- [8] Goszcz A.: Powstawanie zapadlisk i innych deformacji nieciągłych powierzchni na obszarach płytkiej eksploatacji górniczej. W: Mat. Konf. Szkoła Eksploatacji Podziemnej '96. CPPGSMiE 1996, s. 119-137.
- [9] Knothe S.: Prognozowanie wpływów eksploatacji górniczej. Katowice: Wydawnictwo Śląsk, 1984. ISBN 83-216-0450-1
- [10] Chudek M., Olaszowski W.: Określenie rodzaju i wielkości deformacji nieciągłych na powierzchni. W: Ochrona Terenów Górniczych 2011 nr 38. ISSN 0208-6905.
- [11] Chudek M., Janusz W., Zych J.: Studium dotyczące rozpoznania tworzenia się i prognozowania deformacji nieciągłych pod wpływem podziemnej eksploatacji złóż. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskie 1988, s. Górnictwo, z. 141. ISSN 0372-9508

OCCURRENCE AND INFLUENCE ASSESSMENT OF MINE ROOMS AND GALLERIES ON GROUND SURFACE

SUMMARY

On the Area of Upper Silesia Coal Basin exist numerous areas of shallow underground mining remnants. There are both historical workings, often of high monumental value and underground rooms, gates or their parts, remained after "predatory" mining operations, which was conducted unregard environmental protection measure. Mining works under urbanised areas of USCB induced development of ground subsidence modelling for current, longwall mining operations. Geometrical – integral methods developed by Budryk and Knothe can be used for calculating of ground deformations parameters for small workings.

The paper presents relations, which allow determination of subsidence parameters for workings located on depths, for which theoretical equations can be used – it means area of continuous subsidence. Next, for underground workings located close to the ground, where their collapse may result in sinkholes and other significant ground disturbances occurrence connected with hazards for building structures and public safety, methods for their prediction have been discussed. On an example of an underground working, a range of calculations results have been presented to show influence of its depth on a type and range of ground deformations resulted from its collapsing.

KEYWORDS

surface protection, mining areas, sinkholes, shallow mine workings