

Przestrzenna analiza międzypoziomowej migracji pustki poeksploatacyjnej w ujęciu probabilistycznym

Spatial analysis of cross-level void migration – a probabilistic approach



*Dr hab. inż. Agnieszka Malinowska**



*Inż. Artur Guzy**



*Mgr inż. Paweł Ulmaniec**)*



*Prof. dr hab. inż. Ryszard Hejmanowski**

Treść: W przypadku kopalń soli problem zachowania bezpieczeństwa w rejonie wyrobisk komorowych i na powierzchni terenu jest niezwykle złożony. Na przebieg procesu deformacji w górotworze solnym mają wpływ zarówno własności geomechaniczne różnych typów soli, jak i cały szereg czynników górniczych, geologicznych i hydrogeologicznych wpływających na potencjalne ryzyko wywołania zapadlisk czy deformacji ciągłych na powierzchni terenu. Przy tak złożonym zagadnieniu zasadnym i optymalnym rozwiązaniem wydaje się być wykorzystanie Systemów Informacji Geograficznej (GIS), które umożliwiają integrację wielu czynników i pozwalają na wyłonienie stref o szczególnym zagrożeniu zapadliskowym. Analizy przestrzenne zrealizowane w GIS pozwoliły na wyłonienie rejonów, w których wzajemny układ komór jest niekorzystny i w których wyłączenia górotworu solnego mogłyby prowadzić do znacznego zaciskania się wyrobisk komorowych. W rejonach tych istnieje prawdopodobieństwo międzypoziomowej migracji pustki z poziomów niższych do wyższych. W badaniach opracowano koncepcję zintegrowanego systemu oceny zagrożenia złoża solnego opartego o funkcjonalność analityczną GIS w ujęciu estymacji prawdopodobieństwa międzypoziomowej migracji pustki poeksploatacyjnej.

Abstract: The problem of safety in historic salt mines is an extremely complex issue. The process of deformation in rock masses related not only to geomechanical properties of different types of salt, but also a whole range of mining, geological and hydrogeological factors affecting the potential risk of causing sinkholes or continuous deformation on the surface. With such a complex issue a reasonable and optimal solution seems to be the application of Geographic Information Systems (GIS), which support the integration of multiple factors. Spatial analysis carried out in GIS enables detection of the areas with unfavorable chambers distribution that could lead to increase strains in rock mass and significant tightening of the excavation chamber. In those areas there is a likelihood of cross-level void migration from low to high levels. A new concept of an integrated system of risk assessment salt deposits based on the analytical functionality of GIS in terms of the probability of cross-level void migration has been presented.

*) AGH w Krakowie **) Kopalnia Soli Wieliczka S.A., Wieliczka

Słowa kluczowe:

złoża soli, deformacje nieciągłe, zarządzanie ryzykiem zapadliskowym, GIS, propagacja pustki poeksploatacyjnej, konwergencja górotworu

Keywords:

salt deposits, discontinuous deformations, sinkhole risk management, GIS, upward void migration after mine closure, convergence of rock mass

1. Wprowadzenie

W 1960 r. w mieście Wieliczka zlokalizowanym nad historyczną kopalnią soli wystąpiło zapadlisko spowodowane zawalem komory solnej Schmidt. Średnica zapadliska, które utworzyło się w ciągu 15 minut wyniosła ponad 100 m, a w wyniku jego powstania dwa domy zostały całkowicie zniszczone. W 1992 oraz 1994 r. w tej samej kopalni nastąpił znaczący wyciek wody do poprzeczni Mina. Na skutek procesów sufozyjnych zainicjowanych przez ten wyciek, na powierzchni terenu - w przeciągu 6 miesięcy - powstała rozległa, ciągła niecka osiadań, w której zarejestrowano osiadanie maksymalne wynoszące 1,6 m. W wyniku deformacji powierzchni zdegradowany został odcinek linii kolejowej oraz znaczących uszkodzeń doznały budynki mieszkalne, jak i obiekt zabytkowego klasztoru. Kopalnia Soli w Wieliczce od 1978 r. zaliczana jest do obiektów światowego dziedzictwa UNESCO i każdego roku odwiedzana jest przez ponad milion turystów. Ochrona dóbr tego typu oraz dbanie o zachowanie podziemnej substancji kopalnianej dla następnych pokoleń należy do priorytetowych zadań służb górniczych, hydrogeologicznych, geologicznych, a także mierniczych. Dlatego też konieczne było opracowanie planu zabezpieczenia bardzo złożonego układu przestrzennego wszystkich, spośród ok. 2,5 tys., wyrobisk komorowych oraz stworzenie metody, która pozwoliłaby na określenie priorytetów w podszadaniu i zabezpieczeniu pozostałej pustki o objętości 1 787 000 m³. Zabezpieczeniu podlegają nie tylko zabytkowe wyrobiska podziemne, ale również budynki mieszkalne i infrastruktura znajdująca się na powierzchni terenu. Centrum, 22-tysięczne miasto zlokalizowane jest nad najstarszą częścią kopalni.

W przypadku kopalń soli problem zachowania bezpieczeństwa w rejonie wyrobisk komorowych i na powierzchni terenu jest niezwykle złożony. Na przebieg procesu deformacji w górotworze solnym mają wpływ zarówno własności geomechaniczne różnych typów soli, jak i cały szereg czynników górniczych, geologicznych i hydrogeologicznych wpływających na potencjalne ryzyko wywołania zapadlisk czy deformacji ciągłych. Kopalnia Soli Wieliczka prowadzi niezwykle szeroki program badań *in situ*, polegający na obserwacjach rozwarości szczelini, pomiarów wycieków, pomiarów konwergencji, pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych oraz specjalistycznych badań geomechanicznych i geotechnicznych w przypadku pojedynczych komór i chodników (Cała i in. 2009, d'Obryn i in. 2013, Tajduś 2009). Wszystkie te działania mają jeden cel – przewidywanie przyszłego zachowania się górotworu oraz planowanie profilaktyki. Stąd niezbędne jest stosowanie metod obliczeniowych, które pozwalałyby na ocenę przewidywanych naprężeń i ruchów górotworu. Dotychczasowe badania stanu naprężeń prowadzone były najczęściej w oparciu o analizy geomechaniczne (realizowane dla wybranych komór lub ich grup) oraz wzory empiryczne oparte na zależnościach funkcyjnych dla poszczególnych poziomów (Cała i in. 2009, Tajduś 2009). Wyniki tych analiz pozwalają na strefowe ujęcie problemu zagrożenia zapadliskowego. Ich wiarygodność generalnie maleje wraz z poszerzaniem zakresu badań. Ze względu na walory historyczne opisywanego obiektu konieczne byłoby jednak opracowanie metody, która pozwoli na zapewnienie stabilności całego górotworu w odległym horyzoncie czasowym. Wśród różnych idei po-

dejścia do zarysowanych problemów testować należy takie, które dają obiecujące wyniki, weryfikowalne poprzez prowadzone pomiary (Kowalski 2016, Strzałkowski 2001). Analizy i badania zawarte w niniejszym artykule należy traktować jako przyczynek do prac badawczych nad bezpieczeństwem kopalni. Jest to próba zastosowania metodyki kilkustopniowej, integrującej metodę empiryczną, probabilistyczną oraz elementy analityki przestrzennej. Proponowana metodyka odbiega zatem nieco od klasycznego, dotychczasowego podejścia, może być interesująca i dostarczyć nowych spostrzeżeń. Być może wyniki tych badań przyczynią się do wzbogacenia wiedzy na temat zagrożeń i będą wykorzystane w procesie zabezpieczeń wyrobisk.

W prezentowanych badaniach skoncentrowano się na stworzeniu metodyki wykorzystującej Systemy Informacji Geograficznej (GIS). Przy tak złożonym zagadnieniu optymalnym rozwiązaniem wydaje się być wykorzystanie analityki przestrzennej, która umożliwi integrację wielu czynników i pozwala na wyłonienie stref o szczególnym zagrożeniu, w których wzajemny układ komór jest niekorzystny i w których naprężenia w górotworze solnym mogą prowadzić do znacznego zaciskania się wyrobisk komorowych. W rejonach tych istnieje prawdopodobieństwo migracji pustki z poziomów niższych do wyższych. Opracowana metodyka pozwala na określenie prawdopodobieństwa między poziomowej migracji pustki w górotworze solnym.

2. Obszar badań**2.1. Topografia**

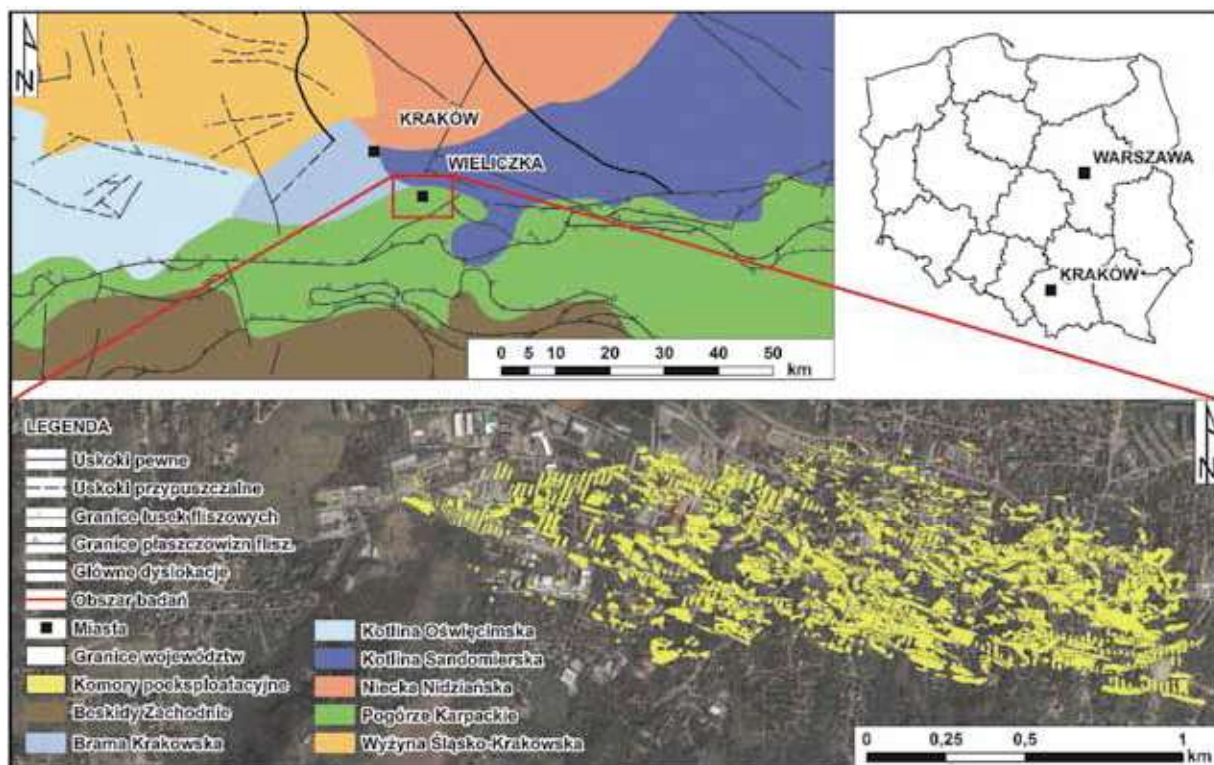
Przedstawiona w niniejszym opracowaniu kopalnia soli położona jest w południowej Polsce, w centralnej części województwa małopolskiego, bezpośrednio pod miastem Wieliczka. Obszar powierzchni terenu zlokalizowany ponad komorami eksploatacyjnymi obejmuje powierzchnię ok. 1,8 km². Znajduje się on w niewielkiej kotlinie położonej na wysokości ok. 350-380 m n.p.m. i ograniczonej od północy szeroką doliną rzeki Wisła, a od południa falistym Pogórzem Karpackim (rys. 1). W bezpośrednim sąsiedztwie obszaru dokonanej eksploatacji nie występują znaczące ciekły wodne.

2.2. Warunki geologiczne

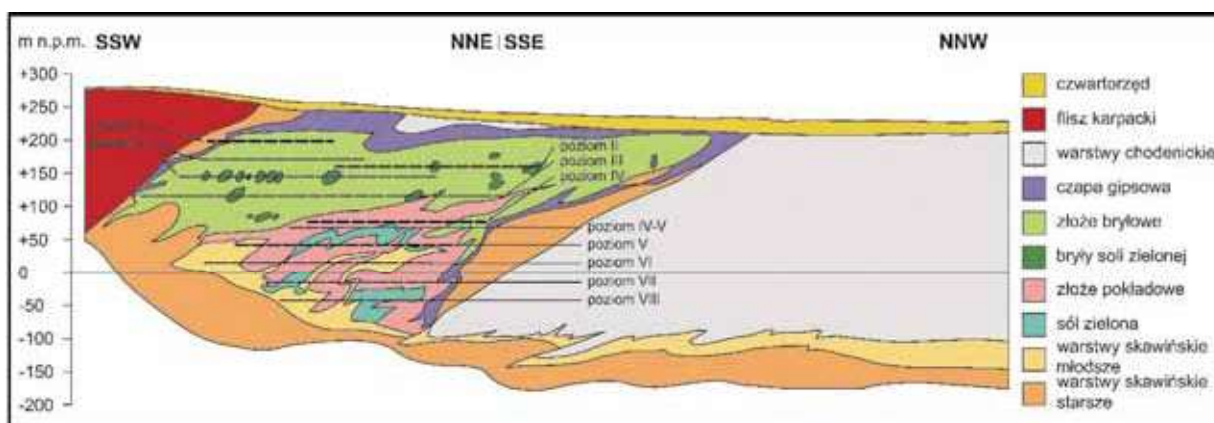
Złoże wielickie powstało ok. 13,6 mln lat temu, w okresie mioceniście, w wyniku zamknięcia jednego z mórz Oceanu Tetydy i sedimentacji osadów, która trwała około 15-20 tys. lat (Gaweł 1992). Charakteryzuje się ono przebiegiem zbliżonym do równoleżnikowego, ma długość ok. 10 km, szerokość do 1,5 km i zalega na głębokości od kilkudziesięciu do ok. 350 m p.p.t. Jego nadkład budują głównie materiały zwietrzelinowe, które osadziły się w wyniku procesów fluwio-glacialnych towarzyszącym plejstoceniście zlodowaceniom południowopolskiemu.

W południowej części obszaru sedimentacji uformowało się złożo typu bryłowego, w północnej i środkowej typu pokładowego (rys. 2).

Złożo bryłowe zalega najpłycej i składa się z brył soli kamiennej, które zanurzone są w bezstrukturalnej masie skał



Rys. 1. Rejon badań
Fig. 1. The study area



Rys. 2. Profil geologiczny przez złożę soli w mieście Wieliczka, (Garlicki, Szybist 1995)
Fig. 2. Geological settings along the profile of salt deposits in Wieliczka city, (Garlicki, Szybist 1995)

plonnych – głównie w iłowcach marglistych. Często spotykane są również piaskowce fliszowe, iłowce pstrze fliszowe, brunatno-szare iłolupki i niewielkie okruchy skał magmowych. W zależności od stopnia zanieczyszczenia iłem wyróżnić można bryły soli zielonej (niski stopień zanieczyszczenia) i bryły soli witrażowej (wysoki stopień zanieczyszczenia). Sól zielona i witrażowa były podstawowym surowcem wydobywanym na początku istnienia Kopalni w Wieliczce. Złoże pokładowe wykształciło się jako pokłady soli kamiennej rozcięte przerostami skał plonnych o zmiennej miąższości i zalega na większych głębokościach – od 2 do 50 m. Budują go silnie zdeformowane warstwy o grubości od 2 do 50 m. Oprócz soli zielonej występują tu także: sól szybikowa, która charakteryzuje się dużą czystością i bardzo wysoką zawartością halitu (ok. 99%) oraz sól spizowa – najbardziej rozpowszechniony rodzaj soli kamiennej w złożu pokładowym, która cechuje się zróżnicowanym poziomem zanieczyszczenia piaskiem, mułem i iłem.

2.3. Warunki hydrogeologiczne

W otoczeniu złoża wielickiego wyróżnia się cztery piętra wodonośne (Wilk, Kulma 2004). Najpłycej zalega piętro czwartorzędowe. Zbudowane jest ono z wodonośnych piasków, żwirów, glin oraz rumoszu. W warstwie tej występują wody zawieszane i gruntowe o zwierciadle swobodnym na głębokości kilku metrów pod powierzchnią terenu. Drugi, neogeński poziom wodonośny zbudowany jest z warstw grabowieckich, chodenickich, ewaporatowych i skawińskich. Dominującą skałą mającą wysoką porowatość efektywną są warstwy chodenickie, z których pochodzi aż 85% dopływu wody do kopalni. Cechują się one dużą miąższością wodonośnych piasków i skomplikowanym tektonicznie obrazem przestrzennym, który – poprzez sieć spękań i połączeń hydraulicznych z innymi warstwami wodonośnymi – stwarza sprzyjające warunki do migracji wody. Warstwy fliszowe

w rejonie przedmiotowego złoża soli charakteryzują się niską przepuszczalnością i nie posiadają piętra wodonośnego. Ostatnie, jurajskie piętro wodonośne jest oddzielone od spągu złoża kopaliny nieprzepuszczalnymi ilowcami warstw skawieńskich, z tego względu nie stwarza zagrożenia dla warunków hydrogeologicznych kopalni.

W Kopalni Soli w Wieliczce prowadzony jest bieżący monitoring wycieków wody w dostępnych wyrobiskach podziemnych i komorach (rys. 3). Aktualnie obserwowanych jest łącznie ok. 160 wycieków, przy czym – na podstawie analiz przeprowadzonych w przeciągu ostatnich kilkunastu lat – można stwierdzić, iż ich liczba stale maleje, podobnie jak sumaryczna wydajność i średnie nasycenie NaCl (g/dm^3) (Brudnik i in. 2006). Liczba wycieków na poszczególnych poziomach waha się pomiędzy 1 a 30, spośród których największe zagrożenie stanowią te, które monitorowane są w rejonie północnej granicy złoża (bliskość chodenickich warstw wodonośnych). Charakteryzują się one średnim nasyceniem NaCl mniejszym niż $300\text{g}/\text{dm}^3$.

2.4. Warunki górnicze

Podziemną eksploatację soli w kopalni w Wieliczce prowadzono nieprzerwanie od przełomu XIII i XIV w. do końca 1996 r. Wydobyte objęło łącznie 11 poziomów. W tym celu wydrążono ponad 20 szybów, prawie 246 km korytarzy i przynajmniej 2391 komór. Sumaryczna objętość wyeksploatowanej skały (bez objętości szybów, szybków i chodników) określana jest na ok. 8,1 mln m^3 . Komory drążono początkowo poprzez ręczne odbijanie bloków górotworu, w kolejnych latach stosowano różnorodne technologie strzałowe, a nawet ługowanie.

Wyrobiska komorowe dzielą się na wyeksploatowane w złożu bryłowym, w bryłach soli zielonej oraz w złożu pokładowym – w pokładach soli o niejednorodnej miąższości. Zmienność budowy geologicznej złoża oraz wielowiekowa eksploatacja prowadzona różnymi metodami jest przyczyną zróżnicowania ukształtowania wyrobisk podziemnych (Wiewiórka 1988, Wojnar 1996). Komory złoża bryłowego

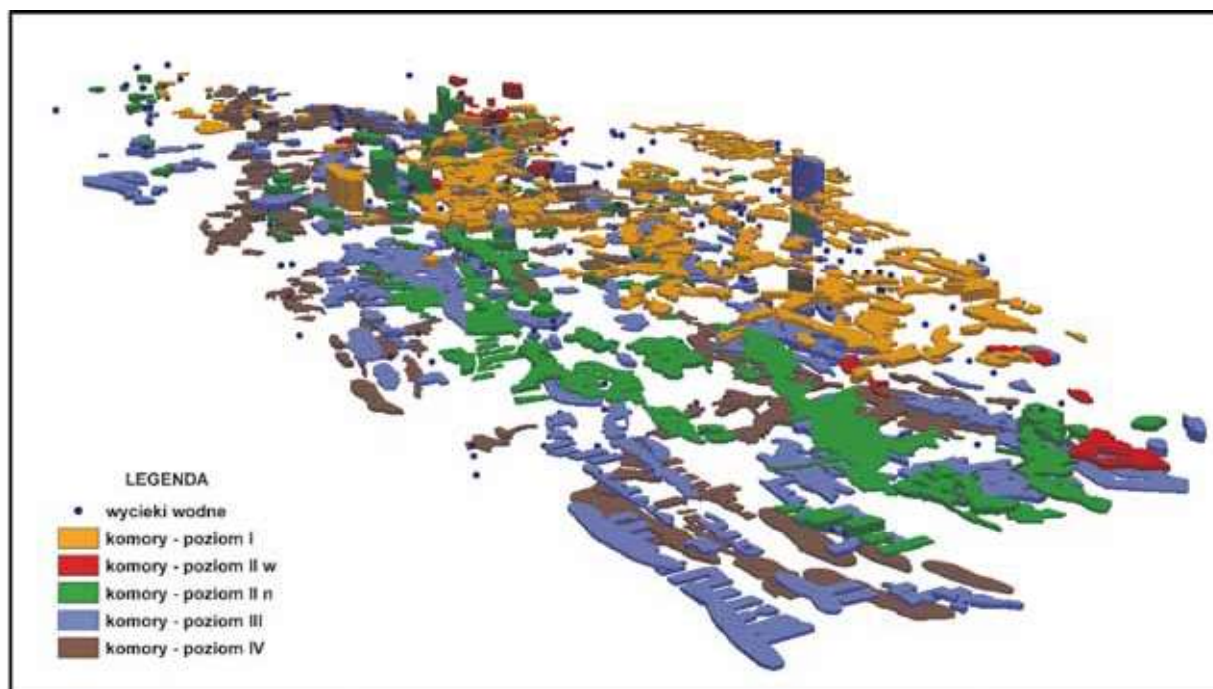
charakteryzują się w miarę regularnymi kształtami dostosowanymi do parametrów ich zalegania. Są to w większości wydłużone w formy elipsoidalne bloki solne. Spotykane są także bryły mające bardziej regularne, obłe kształty. Wiele z nich wykazuje pewien stopień uporządkowania w zaleganiu w utworach złoża – są pochylone w kierunku na północ. Komory w utworach złoża pokładowego charakteryzują się urozmaiconymi formami, zależnymi od ukształtowania złoża, jego tektoniki oraz rodzaju eksploatowanych komór. Kawerny, w których wydobywano pokłady soli spizowych są na ogół dość wysokie i rozbudowane przestrzennie. Komory wykonane w soli szybkowej charakteryzują się wysokością w przekroju prostopadłym do płaszczyzn stropu i spągu rzędu 2 m, natomiast wyrobiska wykonane w złożu pokładowym niejednokrotnie łączą ze sobą poszczególne poziomy lub między poziomy kopalni. W najniższej położonych obszarach kopalni eksploatację prowadzono metodą ługowania – z tego względu geometria wyrobisk tego typu pozostaje wyłącznie domniemana.

Przedstawiona charakterystyka warunków geologicznych, hydrogeologicznych i górniczych dowodzi jak bardzo złożonym problemem jest kompleksowa analiza czynników mogących mieć wpływ na zagrożenie migracją pustki do powierzchni terenu. Dlatego też można postawić tezę, że wsparcie klasycznych analiz Systemami Informacji Geograficznej może zdecydowanie przyczynić się do zwiększenia efektywności prowadzonych badań.

3. Zagrożenie zapadliskowe

W wyniku komorowej eksploatacji złóż soli w górotworze zmienia się rozkład sił i powstają obszary o osłabionej strukturze. Z upływem czasu, w wyniku samopodsadzania się pustki poeksploatacyjnej, dochodzi do wykształcenia i rozwoju stref zawału i spękania, które migrują w kierunku powierzchni terenu.

Geomechaniczne badania związane z rozwojem strefy zniszczenia ponad polem eksploatacji prowadzone są



Rys. 3. Obserwowane wycieki wodne (perspektywa 3D)
Fig. 3. The observed water leakage (3D perspective)

od początku XX w. Ich prekursorami byli m.in.: Chudek, Arkuszewski i Ołaszewski (Chudek i in. 1988, Fenk 1981, Liu 1981, Ryncarz 1992, Whittaker, Reddish 1989) dla złóż węgla kamiennego, a także (Janusz, Jarosz 1976) dla złóż cynku i ołowiu. W przypadku górotworu solnego wysokość strefy zawału ponad wyrobiskiem komorowym najczęściej określa się w oparciu o teorię Ryncarza, przy wykorzystaniu równania (1):

$$h_z = \left[\frac{2 \cdot f \cdot (1 - \varepsilon \cdot n)}{k - 1} - (1 - f) \right] \cdot h_k \quad (1)$$

gdzie:

- h_z – wysokość strefy zawału ponad pustką poeksploatacyjną [m];
- ε – współczynnik konsolidacji podsadzki wypełniającej pustkę poeksploatacyjną;
- f – współczynnik kształtu komory;
- k – współczynnik rozluźnienia skał;
- n – stopień wypełnienia pustki poeksploatacyjnej podsadzką [%];
- h_k – wysokość pustki poeksploatacyjnej [m].

Według metody Ryncarza czynnikami mającymi decydujący wpływ na wielkość potencjalnej strefy zawału są: wysokość wyrobiska oraz stopień jego podsadzenia. W analizie przyjmuje się uproszczenie polegające na opisanu strefy zawału poprzez paraboloidę, która oparta jest na polu przekroju poprzecznego umownego walca obejmującego komorę. Generalizacja dotyczy również współczynników biorących udział w procesie obliczeniowym. Współczynnik ε wyraża stosunek objętości podsadzki skonsolidowanej ciężarem skał spadających ze stropu do objętości podsadzki luźno nasypanej, a współczynnik k stopień rozluźnienia skał, które opadają na spąg wyrobiska w wyniku propagacji strefy zniszczenia. Ich wartości wyznaczane są w sposób empiryczny, często mają więc charakter subiektywny. W modelu nie uwzględnia się innych czynników jakościowych, w tym odporności skał na niszczenie i ich przestrzennego zróżnicowania, obecności wody oraz istnienia elementów geotechnicznych, które zabezpieczają wyrobisko. Ponadto, autor teorii nie podaje, w jaki sposób obliczyć wysokość strefy spękań, a jako warunek na powstanie zapadliska przedstawia nierówność (2):

$$h_z \geq h_n, \quad (2)$$

gdzie:

- h_n – miąższość skał między powierzchnią terenu a stropem pustki poeksploatacyjnej.

Wzajemne oddziaływanie komór jest zagadnieniem bardzo złożonym. Największe zagrożenie stanowią te kompleksy pustek poeksploatacyjnych, które znajdują się na sąsiadujących ze sobą poziomach, zwłaszcza gdy wymiary komór są znaczne. W przypadku dużej złożoności danych przestrzennych i niedostępności wielu obszarów w górotworze wiarygodne oddanie realnej geometrii jest trudne i bardzo czasochłonne, a często niemożliwe. Modelowe ujęcie rozwoju procesu zapadliskowego zaproponowane przez Ryncarza umożliwia przeprowadzenie prognozy wystąpienia deformacji nieciągłych na powierzchni terenu odrębnie dla poszczególnych komór zlokalizowanych na różnych poziomach wydobywania. W warunkach naturalnych może jednak wystąpić przypadek, gdy – w rzucie ortogonalnym na jedną płaszczyznę – kontury pustek poeksploatacyjnych zlokalizowanych na różnych poziomach kopalni będą się ze sobą pokrywały – w części lub całości. W przypadku zaistnienia odpowiednich czynników, strefa zniszczenia propagująca z poziomu niższego może osiągnąć spąg komory nadległej, w wyniku czego zachodzi

możliwość zniszczenia warstwy górotworu między komorami. Rozszerzona strefa osłabienia struktury skał może wpłynąć na intensyfikację niekorzystnych naprężeń, a tym samym zwiększyć możliwość wystąpienia na powierzchni terenu deformacji nieciągłych. Zjawisko może się kumulować i przebiegać wielopoziomowo. Estymacja zagrożenia zapadliskowego przeprowadzana wyłącznie w oparciu o model Ryncarza w wielu rejonach może nie wskazać na zagrożenie, podczas gdy – w przypadku wystąpienia zjawiska między-poziomowej migracji pustki poeksploatacyjnej – ryzyko to może być znaczenie większe.

4. Estymacja prawdopodobieństwa wystąpienia deformacji nieciągłych na powierzchni terenu

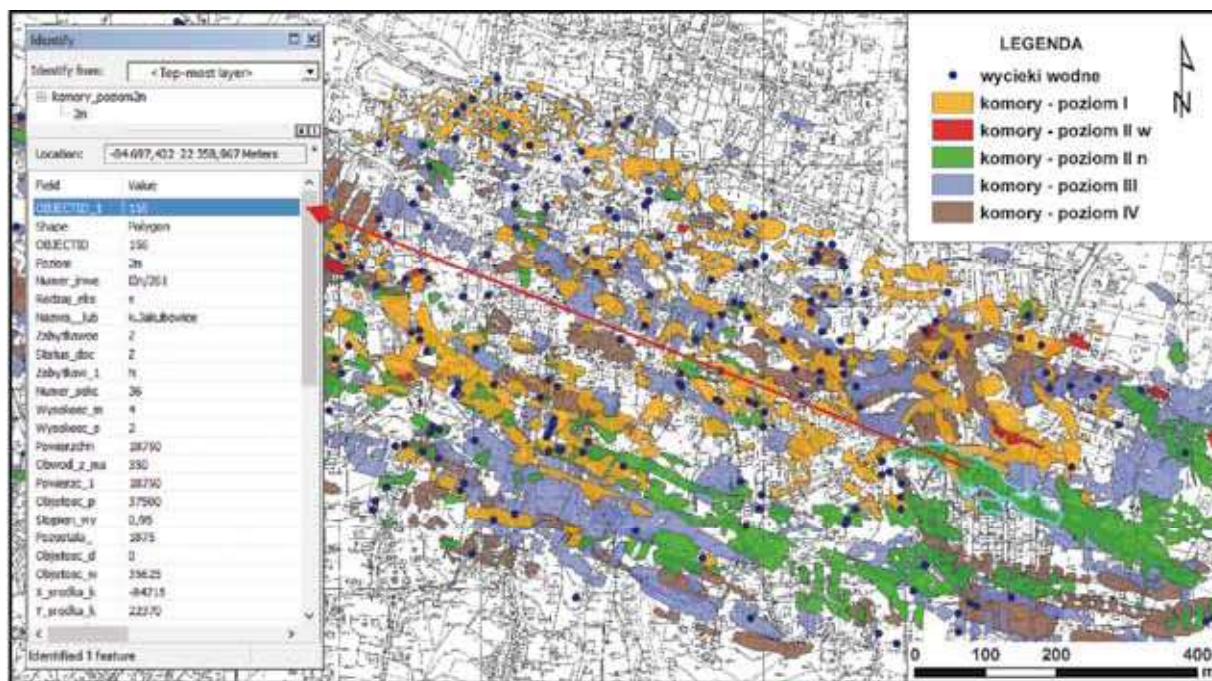
W niniejszych badaniach przedstawiono koncepcję zintegrowanego systemu oceny zagrożenia zapadliskowego w złożu solnym opartą o funkcjonalność analityczną GIS. W opracowaniu zaprojektowano trzystopniową strukturę selekcji komór zapadliskowych opartą o estymację prawdopodobieństwa między-poziomowej propagacji strefy zniszczenia poprzez implementację do modelu Ryncarza własności probabilistycznych opartych na rachunku prawdopodobieństwa całkowitego i teorii zdarzeń zależnych oraz weryfikację wyników tak przeprowadzonej analizy poprzez przegląd stanu technicznego i zabezpieczeń wyrobisk komorowych. Ponadto, wykonanie analizy przestrzennej umożliwiło wskazanie obszarów na powierzchni terenu, które – w wyniku niekorzystnego wzajemnego położenia komór solnych w górotworze – są szczególnie narażone na wystąpienie deformacji o charakterze nieciągłym.

4.1. Materiał badawczy, budowa bazy danych

Podstawowymi danymi przyjętymi do przeprowadzenia obliczeń były informacje zawarte w bazie danych działu mierniczego kopalni zestawionej przez Ulmaniec, Stawarczyk, które obejmowały wyniki inwentaryzacji komór eksploatacyjnych z 1975 r., zaktualizowane następnie w 1995, 2007 i 2012 r. Spośród wszystkich danych dotyczących eksploatacji wybrano te informacje górniczo-geologiczne, które można było wykorzystać do obliczeń teoretycznych. Należały do nich: poziom, numer inwentaryzacyjny, nazwa (lub rejon kopalni), wysokość średnia komory (m), powierzchnia (m^2), objętość pierwotna (m^3), stopień wypełnienia (%), zabezpieczenie, współrzędne X i Y środka komory (m) oraz współrzędne Z środka komory i powierzchni terenu ponad komorą (m). Materiał badawczy obejmował również mapy inwentaryzacyjne wyrobisk górniczych i chodnikowych oraz zjawisk hydrogeologicznych (kolejno opracowane na podstawie inwentaryzacji przeprowadzonej w 1975, 1976 i 1986 r.), mapy sytuacyjno-wysokościowe miasta Wieliczka założone w latach 1970-73 i mapy izolinii osiadań powierzchni w okresach: 1970-2005, 1984-2005 i 2000-2005 terenu położonego ponad polami eksploatacji.

Wydzielono 2391 komór poeksploatacyjnych, wszystkie, dla których istniały dane odnośnie ich geometrii. Ze względu na fakt, iż dla eksploatacji głębszych niż 150 m prawdopodobieństwo wystąpienia deformacji nieciągłych jest bardzo małe, w niniejszym opracowaniu zdecydowano o przeprowadzeniu analiz dla 967 komór, które zlokalizowane są na czterech najwyższych poziomach kopalni (poziomy: I, II w, II n, III i IV), tj. od 43 do 141 m pod powierzchnią terenu.

Z uwagi na różnorodny charakter materiałów źródłowych, w celu uporządkowania danych i stworzenia jednolitego opracowania niezbędne okazało się ich połączenie. Geometria



Rys. 4. Zintegrowana baza danych o dokonanej eksploatacji utworzona w programie ArcGIS
 Fig. 4. Integrated database of the completed mining exploitation made in the ArcGIS program

obiektów została zapisana na mapie w formie analogowej, a informacje opisowe znajdowały się w oddzielnym zestawieniu. Baza danych, ze względu na duże możliwości przeprowadzenia przestrzennych i atrybutowych analiz 2D i 3D (rys. 4) oraz wizualizacji wyników pracy, stworzona została w oparciu o pakiet oprogramowania ArcGIS v. 10.3.1. firmy Esri.

4.2. Metodyka selekcji obszarów o zagrożeniu zapadliskowym

Opracowany algorytm identyfikacji obszarów stwarzających ryzyko zapadliskowe zakłada trzystopniową selekcję przeprowadzaną na podstawie: analizy atrybutowej GIS,

analizy przestrzennej GIS oraz zmodyfikowanego modelu Ryncarza (rys. 5).

W pierwszym etapie badań przeprowadzona została analiza atrybutowa GIS, której celem było podjęcie decyzji o wytypowaniu komór mogących generować powstanie zapadliska ze względu na stan techniczny oraz zabezpieczenie wyrobiska. W Kopalni Soli w Wieliczce stosuje się 8 kategorii opisu stanu geotechnicznego komór (Wiewiórka 1988). Poprzez wykonywanie prac zabezpieczających, np. stosowanie kaszt, systemu kotwienia lub iniekcji górotworu, część pustek poeksploatacyjnych uznana została za względnie trwale i odporne na rozwój procesów zawałowych (komory zabezpieczone i komory pozostawione oraz zabezpieczone



Rys. 5. Schemat algorytmu identyfikacji obszarów stwarzających ryzyko zapadliskowe
 Fig. 5. Scheme of an algorithm to identify zones with a threat of sinkhole

Tabela 1. Zestawienie ilościowe wg stanu zabezpieczenia komór poeksploatacyjnych
Table 1. Number of protected mining chambers

Stan zabezpieczenia/ Poziom kopalni	I	IIw	II n	III	IV	Suma
Zabezpieczone	7	2	7	33	1	50
Pozostawione i zabezpieczone w wysokim standardzie	5	8	21	29	2	65
Pozostawione i zabezpieczone w normalnym standardzie	2	0	2	0	0	4
Pozostawione zabezpieczenia (skansen)	25	1	26	50	31	133
Podsadzone na mokro	0	0	0	6	187	193
Podsadzone na sucho	4	8	11	10	6	39
Zlikwidowane bez podsadzania	15	2	61	84	0	162
Zlikwidowane	123	4	29	70	95	321
Suma	181	25	157	282	322	967

w wysokim lub normalnym standardzie). Z tego względu do dalszych analiz wyselekcjonowano 848 wyrobisk, które pozostawiono bez zabezpieczenia, wypełniono podsadzką hydrauliczną lub pneumatyczną bądź zlikwidowano (tab. 1).

W drugim etapie badań wykonano analizę przestrzenną GIS, która umożliwiła wskazanie obszarów w górotworze o niekorzystnym wzajemnym położeniu pustek poeksploatacyjnych. Dla potrzeb niniejszej pracy, ze względu na przybliżony charakter danych dotyczących geometrii wyrobisk oraz złożoność zagadnienia, jakim jest próba oceny kształtu strefy zawału ponad polem eksploatacji, przyjęto uproszczenie, iż strefa ta ma formę graniastosłupa prostego o polu podstawy równym polu największego przekroju poziomego danej komory. W wyniku przeprowadzenia analizy przestrzennej możliwe było wytypowanie rejonów, które w przekroju pionowym stanowią części wspólne komór zlokalizowanych na różnych poziomach wydobywania. Są to obszary, gdzie – w wyniku możliwości kontaktu strefy zniszczenia propagującej z komory niżej położonej ze spągiem komory nadległej – może nastąpić kumulacja naprężeń zwiększających ryzyko zapadliskowe. Przykład takiego niekorzystnego wzajemnego rozmieszczenia komór zaprezentowano na rysunku (rys. 6). Przedstawione komory zlokalizowane są na poziomach od I do IV.

W ostatnim etapie badań dokonano estymacji prawdopodobieństwa wystąpienia deformacji nieciągłych na powierzchni terenu. W tym celu, na podstawie równania (1), obliczono potencjalne wysokości stref zawału dla wszystkich

komór, które wyselekcjonowane zostały w wyniku przeprowadzenia analizy atrybutowej GIS. Przy założeniu losowego rozproszenia parametrów teorii Ryncarza (tab. 2.), bazując na nierówności (2), prawdopodobieństwo wystąpienia wysokości strefy zawału dochodzącej do nadkładu lub spągu komory nadległej określono na podstawie wzoru (3):

$$P(Z) = P\left(x > \frac{h_{dop} - h_z}{\sigma_{h_z}}\right), \quad (3)$$

gdzie:

- x – wartość dystrybuanty rozkładu normalnego (Gausa);
- h_{dop} – dopuszczalna wysokość strefy zawału obliczona jako różnica między rzędnymi: terenu i stropu danej komory lub jako różnica między rzędnymi: spągu komory nadległej i stropu komory zalegającej poniżej [m];
- σ_{h_z} – odchylenie standardowe obliczonej, średniej wysokości strefy zawału [m].

Odchylenie standardowe obliczonej, przeciętnej wysokości strefy zawału przyjmuje w takim przypadku rozkład Gaussa. Z tego względu wartość odchylenia standardowego określono na podstawie tablic dystrybuanty rozkładu normalnego.

W rejonach, w których nie występuje niekorzystne wzajemne położenie konturów pustek poeksploatacyjnych obliczona na podstawie równania (3) wartość prawdopodo-



Rys. 6. Rozmieszczenie komór o niekorzystnym wzajemnym układzie wyrobisk w płaszczyźnie pionowej
Fig. 6. Mining chambers with unfavorable vertical distribution

Tabela 2. Wartości współczynników wykorzystane do obliczenia wysokości stref zawału na podstawie teorii Ryncarza
Table 2. The values of the coefficients used to calculate the collapse zone based on the Ryncarz theory

Współczynnik	Wartość
ε	$0,8 \pm 0,1\varepsilon$
f	$0,9 \pm 0,1f$
k	1,1 dla komór w stanie zawałowym; 1,2 dla pozostałych kawern
n	Przyjęty z obecnym stanem wiedzy opartym o wyniki inwentaryzacji komór zawartych w danych udostępnionych przez Dział Mierniczy Kopalni Soli w Wieliczce
h_k	Przyjęta jako średnia wysokość każdego wyrobiska zgodna z obecnym stanem wiedzy opartym o wyniki inwentaryzacji komór zawartych w danych udostępnionych przez Dział Mierniczy Kopalni Soli w Wieliczce

bieństwa określa możliwość wystąpienia deformacji nieciągłych na powierzchni terenu. W przypadku dwóch pustek poeksploatacyjnych, które znajdują się w jednej płaszczyźnie pionowej, obliczone prawdopodobieństwo określa możliwość osiągnięcia spągu komory nadległej przez strefę zniszczenia, która propaguje od komory położonej niżej. Przy zastosowaniu takiego założenia, otrzymana wartość prawdopodobieństwa określa możliwość powstania rozszerzonej strefy osłabienia górotworu. Dla tego typu stref, w oparciu o wzory (1) i (3), ponownie przeprowadzono prognozę wystąpienia deformacji nieciągłych, przy czym zastosowano następujące wartości parametrów h_k i n :

$$h_{kij} = h_{ki} + h_{kj}, \quad (4)$$

gdzie:

- h_{kij} – wysokość rozszerzonej strefy osłabienia górotworu;
- h_{ki} – wysokość komory położonej na niższym poziomie kopalni;
- h_{kj} – wysokość komory położonej na wyższym poziomie kopalni;

oraz

$$n_{ij} = \frac{n_{ki} \cdot h_{ki} + n_{kj} \cdot h_{kj}}{h_{ki} + h_{kj}}, \quad (5)$$

gdzie:

- n_{ij} – stopień wypełnienia rozszerzonej strefy osłabienia górotworu;
- n_i – stopień wypełnienia komory położonej na niższym poziomie kopalni;
- n_j – stopień wypełnienia komory położonej na wyższym poziomie kopalni.

W przypadkach, gdy występowała kombinacja trzech lub większej liczby pustek o niekorzystnym wzajemnym położeniu pionowym obliczenia przeprowadzono wieloetapowo, dla każdej kolejnej rozszerzonej strefy osłabienia górotworu, określając nowe wartości parametrów h_{kij} i n_{ij} , zgodnie ze wzorami (4) i (5). Wynikową wartość prawdopodobieństwa wystąpienia na powierzchni terenu deformacji nieciągłych obliczono poprzez implementację algorytmu opartego na prawdopodobieństwie całkowitym. Na podstawie teorii prawdopodobieństwa, kombinacje różnych wariantów rozwoju strefy zniszczenia w górotworze można utożsamiać ze zmiennymi losowymi i zdarzeniami zależnymi. Z tego względu, na mocy definicji (6):

$$P(A/B) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{P(A \cap B)}{P(B)}, \quad (6)$$

gdzie:

- $P(A/B)$ – prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia A pod warunkiem zajścia zdarzenia B;
- $P(A \cap B)$ – prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia A i B;
- $P(B)$ – prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia B;

stosując założenie wyrażone równością (7)

$$P(B_1) = p \text{ oraz } P(B_2) = q = 1-p, \quad (7)$$

gdzie:

- p – zdarzenie pewne;
- q – zdarzenie niemożliwe;

i rozwijając wzór (8):

$$P(A) = (P/B_1) \cdot P(B_1) + (P/B_2) \cdot P(B_2) + \dots + (P/B_n) \cdot P(B_n) \quad (8)$$

otrzymujemy zależność (9), na podstawie której obliczono wynikowe prawdopodobieństwo wystąpienia zagrożenia zapadliskowego w przypadku niekorzystnego wzajemnego położenia konturów pustek poeksploatacyjnych zlokalizowanych na różnych poziomach wydobycia:

$$P_C(Z) = P(A) = \sum_{i=1}^n P(A/B_i) \cdot P(B_i) \quad (9)$$

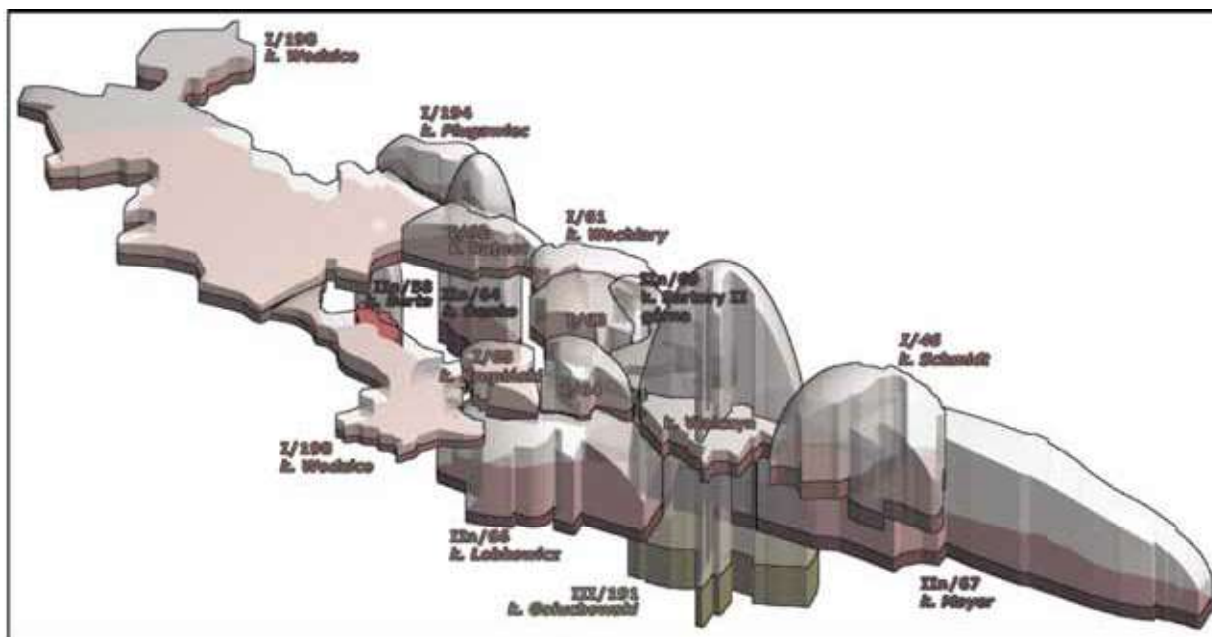
5. Interpretacja wyników

Uzyskane wyniki obliczeń pozwoliły na wyselekcjonowanie 13 pojedynczych komór mogących stwarzać ryzyko zapadliskowe. Wskazanych zostało również 5 rejonów na powierzchni terenu, które są szczególnie narażone na wystąpienie deformacji nieciągłych z tytułu niekorzystnego wzajemnego położenia pustek poeksploatacyjnych w płaszczyźnie pionowej. Warunek brzegowy określający możliwość wystąpienia ryzyka zapadliskowego na powierzchni terenu został przyjęty zgodnie ze wzorem (10):

$$P(Z) \square P_C(Z) \geq 0,75 \quad (10)$$

Wszystkie wyselekcjonowane w analizie komory należą do najstarszej eksploatacji i obecnie znajdują się w stanie zawałowym. Należy zauważyć, iż w wielu z nich występują obwały kopuł, które mogą być szczególnie niebezpieczne ze względu na płytkie położenie stropów wyrobisk pod powierzchnią terenu. Te komory stanowią już obecnie priorytet w przypadku prowadzenia monitoringu i zabezpieczenia wyrobisk górniczych. Potwierdza to poprawność przeprowadzonych w trakcie badań analiz.

Uzyskane wyniki obliczeń wskazują, iż stosunkowo duża liczba komór może być poddana niekorzystnemu oddziaływaniu deformacyjnemu wywołanemu przez inne, głębiej zlokalizowane pustki poeksploatacyjne. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, iż lokalizacja tych obszarów – w większości przypadków – nie pokrywa się z rozmieszczeniem pojedynczych komór, które uznane zostały za stwarzające ryzyko zawałowe. Oznacza to, iż estymacja prawdopodobieństwa wystąpienia deformacji nieciągłych na powierzchni terenu przeprowadzana wyłącznie w oparciu o model Ryncarza, tj. oddzielnie dla każdej z komór, może nie wskazać na wystąpienie ryzyka zawałowego, podczas gdy, w przypadku niekorzystnego wzajemnego położenia pustek poeksplo-



Rys. 7. Rozmieszczenie komór o niekorzystnym wzajemnym układzie wyrobisk w płaszczyźnie pionowej (perspektywa 3D)

Fig. 7. Mining chambers with unfavorable vertical distribution (3D perspective)

atacyjnych w płaszczyźnie pionowej, ryzyko to może być znaczne. Przeprowadzone analizy pozwoliły na wydzielenie stref, które wykazują szczególne tendencje zapadliskowe. W niniejszym opracowaniu, z uwagi na dużą ilość kombinacji tego typu, zdecydowano o przedstawieniu wyłącznie kilku z nich, które zlokalizowane są w jednym rejonie.

W wybranym obszarze zagrożenie zawałowe wynika z możliwości propagacji strefy zniszczenia od komór poeksploatacyjnych o numerach inwentaryzacyjnych: I/46, II n/67, III/226 oraz IV/279, które zlokalizowane są na czterech poziomach wydobywania (rys. 7). Zdecydowanie największe ryzyko zapadliskowe generowane jest w miejscach, gdzie występuje kumulacja stref zawału pochodzących od komór II n/67 i I/46.

Miąższość półki stropowej między tymi pustkami wynosi 33 m, między komorą I/46 a powierzchnią terenu 61 m, podczas gdy prognozowana wysokość strefy zawału dla komory II n/67 osiąga 83 m, a dla komory I/46 - 74 m. Z uwagi na fakt, iż komora III/226 została zabezpieczona w wysokim standardzie, nie stwarza ona zagrożenia zawałowego ani dla pustek, które zlokalizowane są bezpośrednio wyżej, ani dla powierzchni terenu. Prognozowana strefa zawału propagująca od komory IV/279 nie jest duża i osiągnie maksymalnie 7 m, z tego względu ten rejon kopalni również należy uznać za bezpieczny. Ostatecznie, największe prawdopodobieństwo zagrożenia zapadliskowego zostało określone w miejscach, w których występuje wzajemne, niekorzystne położenie komór o numerach inwentaryzacyjnych II n/226 i I/46. Wynosi ono 0,91.

6. Podsumowanie

Zaproponowana metodyka opiera się na trzystopniowym algorytmie umożliwiającym selekcję obszarów zagrożonych w oparciu o analizę atrybutową GIS, analizę przestrzenną GIS oraz model empiryczny Ryncarza. Opracowany schemat umożliwia wyłonienie pojedynczych komór mogących stanowić potencjalne ryzyko zawałowe oraz wskazuje strefy w górotworze o szczególnie niekorzystnym wzajemnym

położeniu pustek poeksploatacyjnych w płaszczyźnie pionowej. Wyniki analiz zostały zweryfikowane o informacje jakościowe o stanie technicznym i zabezpieczenia komór w celu wyeliminowania z rozważań tych wyrobisk górniczych, które znajdują się w dobrym stanie geotechnicznym i uznane zostały za niestwarzające zagrożenia zapadliskowego. Analizy zaprezentowane w niniejszej pracy stanowią pewne uzupełnienie badań nad ryzykiem pojawienia się deformacji nieciągłych na powierzchni terenu. W przypadku złożonego, przestrzennego układu wyrobisk przedstawiony algorytm pozwala na pełniejszą ocenę zagrożenia powierzchni terenu z tytułu międzypoziomowej propagacji pustki wewnątrz górotworu. Autorzy zdają sobie oczywiście sprawę z tego, że metody empiryczne, takie jak zastosowana tutaj metoda Ryncarza, obarczone są znaczną niepewnością. Nie można zatem wysnuwać zbyt daleko idących wniosków z uzyskanych rezultatów badań. Selekcja rejonu jako potencjalnie zapadliskowego nie oznacza, że wystąpi tam zapadlisko. Ważne natomiast, aby interpretacja tych wyników przyczyniła się do zwrócenia baczniejszej uwagi na wytypowane obszary. Przedstawione wyniki obliczeń mogą stanowić źródło dodatkowych informacji dla służb mierniczo-geologicznych kopalni soli w Wieliczce i być pomocne w przypadku ustalania priorytetów w zabezpieczaniu kolejnych komór poeksploatacyjnych oraz w obejmowaniu ich monitoringiem.

Na podstawie przyjętej metodologii w grupie wytypowanych ostatecznie wyrobisk znalazło się 13 pojedynczych komór oraz 5 rejonów, w których występuje szczególnie wysokie nagromadzenie obszarów o niekorzystnym wzajemnym położeniu konturów pustek poeksploatacyjnych w płaszczyźnie pionowej.

Rozwój strefy zniszczenia w górotworze jest zagadnieniem złożonym i trudnym do jednoznacznego opisu matematycznego. Z uwagi na wieloczynnikową parametryzację i losowość opisywanego zjawiska, prognozę wpływu pustki poeksploatacyjnej na powierzchnię terenu i opis jej transformacji należy zawsze rozpatrywać w ujęciu dużej niepewności uzyskanych wyników i wyłącznie w skali makro.

Podziękowania

Specjalne podziękowania należą się kadrze inżynierskiej kopalni soli „Wieliczka” S.A. – panom: Pawłowi Ulmańcowi, Zbigniewowi Stawarczykowi oraz Krzysztofowi Brudnikowi.

Niniejsze badania zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Badań, nr grantu No.UMO-2014/15/B/ST10/04892.

Literatura

- BRUDNIK K., PRZYBYŁO J., WINID B. 2006 - Zawodnienie złoża soli Wieliczka na podstawie stanu wycieków kopalnianych. „Wiertnictwo Nafta Gaz”, t. 23/1.
- CAŁA M., CZAJA P., FLISIAK D., KOWALSKI M. 2009 - Ocena zagrożenia zapadliskowego wybranych komór Kopalni Soli „Wieliczka” w oparciu o obliczenia numeryczne. „Górnictwo i Geoinżynieria”, R. 22, z. 3/1, UWND AGH, Kraków.
- CHUDEK M., JANUSZ W., ZYCH J. 1988 - Studium dotyczące stanu rozpoznania tworzenia się i prognozowania deformacji nieciągłych pod wpływem podziemnej eksploatacji złóż. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Górnictwo z. 141.
- D’OBRYN K., ULAMNIEC P., MALINOWSKA A., HEJMANOWSKI R. 2013 –Determining mining excavations pre disposed to the discontinuous deformation of land surface using a two-stage method. XV International Society for Mine Surveying Congress – Energie und Rohstoffe, Aachen.
- FENK J. 1981 – Eine Theorie zur Entstehung von Tagesbrüchen über Hohlräumen im Lockergebirge. Dt. Vlg. f. Grundstoffind, Leipzig.
- GARLICKI A., SZYBIST A. 1995 - Ogólne założenia dla zabezpieczenia Kopalni Soli Wieliczka oraz nowy obraz geologiczny złoża wielickiego. Likwidacja zagrożenia wodnego dla zabezpieczenia Kopalni Soli Wieliczka, III spotkania PSGS, Wieliczka.
- GAWEL A. 1992 - Budowa złoża solnego Wieliczki. Prace Instytutu Geologicznego, t. XXX, cz. III.
- JANUSZ W., JAROSZ A. 1976 - Nieciągłe deformacje powierzchni terenu wywołane płytką podziemną eksploatacją górnictwem. Polska Akademia Nauk, Katowice.
- KOWALSKI A. 2015 – Deformacja powierzchni w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. Wyd. GIG, Katowice.
- LIU T.Q. 1981 - Surface movements, overburden failure and its applications. Coal Industry Publishing, China.
- RYNCARZ T. 1992 - Ruchy górotworu wywołane wyrobiskami podziemnymi. UWND AGH, Kraków.
- STRZAŁKOWSKI P. 2001 - Zagrożenie deformacjami nieciągłymi obiektów budowlanych i wyrobisk górniczych. „Budownictwo Górnicze i Tunelowe”, nr 1, s. 20-22.
- TAJDUŚ A. (red.) 2009 - Oddziaływanie wytypowanych, niezlikwidowanych komór na poziomach I-III na wyrobiska trasy turystycznej i powierzchnię terenu. AGH, Kraków (praca niepublikowana).
- WHITTAKER B.N., REDDISH D.J. 1989 - Subsidence – occurrence, prediction and control. Developments in geotechnical engineering, no. 56, Elsevier Publishing Co., New York.
- WIEWIÓRKA J. 1988 - Warunki geologiczne eksploatacji soli w żupach krakowskich. Dzieje Żup Krakowskich, Warszawa.
- WILK Z., KULMA R. (red.) 2004 - Hydrogeologia polskich złóż kopalni i problemy wodne górnictwa 3. UWND AGH, Kraków.
- WOJNAR W. (red.) 1996 - Studium sposobów i warunków kotwienia mioceńskiego górotworu solnego, Chemkop Sp. z o.o, Kraków (praca niepublikowana).

Artykuł wpłynął do redakcji – październik 2016
Artykuł zaakceptowano do druku 15.12.2016