

Jakub Mazurek*

PROGNOZY DEFORMACJI GÓROTWORU W POLU PAGORY KOPALNI BARYCZ PO PODSADZENIU KOMÓR POEKSPLOATACYJNYCH

1. Wstęp

Złoże soli kamiennej „Barycz” stanowi przedłużenie złoża soli „Wieliczka” eksploatowanego metodą podziemną. W likwidowanej kopalni „Barycz”, oddzielonej filarem od zabytkowej Kopalni Soli „Wieliczka”, przez 75 lat prowadzono eksploatację soli otworami z powierzchni metodą podziemnego ługowania, bez ochrony stropu. Pomimo dużej zmienności budowy geologicznej i złożonych warunków geologiczno — górniczych, w obrębie obszaru górniczego o powierzchni około 2,2 km², wydobyto łącznie ponad 10,5 miliona ton soli, a wykorzystanie zasobów geologicznych dla całego złoża wynosiło średnio 20%. Od stycznia 1999 roku kopalnia „Barycz” jest w stanie likwidacji — od 11 lat nie prowadzi się eksploatacji, ale deformacje górotworu przebiegać będą jeszcze przez kilkadziesiąt lat i nadal występuje zagrożenie zapadliskowe [2, 6].

W pracy pt.: *Projekt Likwidacji Kopalni Otworowej Barycz* [8] realizowanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. A. Tajdusia stwierdzono m.in., że w *południowo-wschodniej części pola Pagory (rozszerzony rejon Tomana) współczynnik bezpieczeństwa filarów międzykomorowych wskazuje na możliwość utraty ich nośności i powstanie zapadliska. W celu zapobieżenia zagrożeniu, komory tego rejonu powinny zostać podsadzone. W omawianym Projekcie...* zamieszczono wyniki prognozy efektów podsadzenia 16 komór stwierdzając, że *równomierne wypełnienie komór w rejonie Tomana w 70%, całkowicie wyeliminuje możliwość powstania zapadliska, zaś wypełnienie ich w 50% zmniejszy prawdopodobieństwo powstania zapadliska o charakterze gwałtownym.*

Gwałtowne zapadlisko o dużych rozmiarach powstało w polu Pagory 21 marca 1974 r. Objęło ono komory poeksploatacyjne 25 otworów. Na powierzchni terenu miało kształt koła

* Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

o średnicy około 150 m (powierzchnia około 2 ha). Procesowi o charakterze gwałtownym towarzyszyło wyrzucenie około 35 tys. m³ solanki i 10 tys. m³ utworów nadkładowych. Solanka lokalnymi ciekami spłynęła do Wisły [5]. Drugie zapadlisko w polu Pagory powstało w marcu 1981. Miało charakter mniej gwałtowny, obejmowało 11 komór, a na powierzchni miało średnicę około 52 m [1].

O tym, że zagrożenie zapadliskowe po upływie kilku lat od zakończenia eksploatacji jest realne, świadczy powstanie dużego zapadliska w zlikwidowanej kopalni otworowej Łęczkowice. W roku 2001, po dziewięciu latach od zakończenia eksploatacji powstało wielkie zapadlisko o średnicy 97 m i głębokości 68 m, w odległości zaledwie kilkudziesięciu metrów od zabudowy mieszkalnej [4].

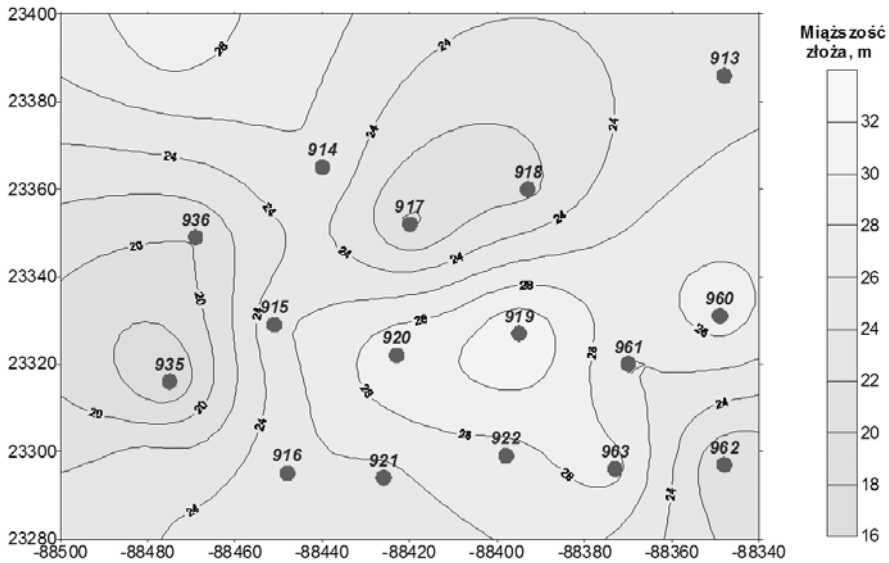
2. Warunki górniczo-geologiczne w rejonie Tomana

Złoże „Barycz” stanowi zachodnie przedłużenie złoża soli Wieliczka. W części północnej, czyli w polu Pagory złożo soli zalega prawie jako miocen niezaburzony. Wszystkie utwory występujące w profilu geologicznym tego rejonu należą do jednego z dużych zespołów warstw. Są to warstwy: skawińskie (podsolne, najstarsze), ewaporatowe (wielickie), chodenickie (nadsolne) oraz grabowieckie (nadkład przypowierzchniowy). Budowę geologiczną złoża szczegółowo omówiono w pracach [1, 8].

TABELA 1
Wydobycie z otworów eksploatacyjnych rejonu Tomana

Nr komory	Rok zakończenia eksploatacji	Wydobycie soli [tony]	Objętość komory [m ³]		Max. średnica komory, pomierzona lub $D_{0,6}$ [m]	Objętość podsadzki [m ³]
			obliczona	pomierzona		
E-913	1992	10981	6138	6842+812	27,2	6786
E-918	1996	10986	6141	4672+1151	28,8	2907
E-917	1996	6455	3608	2503	17,6	1411
E-914	1985	17368	9709	—	28,2	—
E-915	1982	21501	12019	—	31,5	—
E-916	1984	20687	11564	—	31,0	—
E-921	1995	11176	6247	—	22,9	—
E-935	1983	11900	6652	—	29,9	—
E-936	1984	12510	6993	—	27,2	—
E-919	1995	15558	8697	5687	28,5	7496
E-920	1996	11260	6294	2957	20,8	308
E-922	1995	11785	6588	1586	27,4	3292
E-960	1993	14551	8134	9857	36,5	40
E-961	1991	9115	5095	5835	29,5	6651
E-962	1994	12566	7024	3531	22,6	4679
E-963	1995	9777	5465	1640	13,3	2661

W rejonie Tomana zlokalizowanym w południowo-wschodniej części pola Pagory złoże zalegało na głębokości 247–264 m, średnio około 255 m p.p.t., a jego sumaryczna miąższość zawarta był w przedziale około 17–33 m. W kilku otworach występowały przerosty [8], a w stropie złoży występowała warstwa szarobrunatnego piaskowca o miąższości 1–4 m. W okresie od 1978 do 1988 wykonano tu 16 otworów eksploatacyjnych, za pomocą których wydobyto 115 378 m³ soli. Dane o wydobyciu, objętości komór i ich średnicy zamieszczono w tabeli 1 [2, 6]. Rozmieszczenie otworów w rejonie Tomana na tle miąższości złoży przedstawiono na rysunku 1.



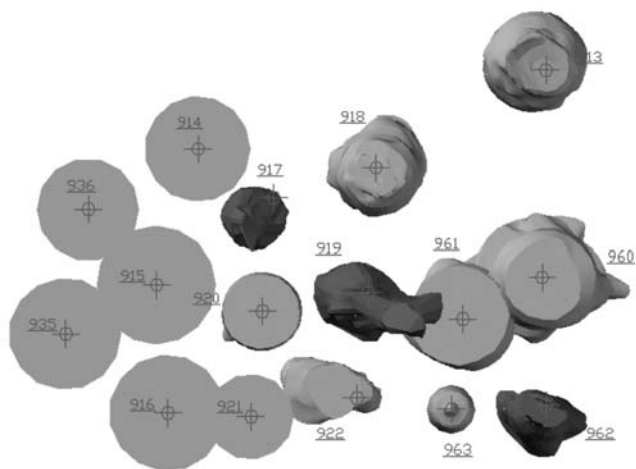
Rys. 1. Rozmieszczenie otworów w rejonie Tomana (na tle miąższości złoży)

Każda wyeksploatowana komora wypełniona była solanką, a większość komór miała połączenia hydrauliczne z innymi komorami [2]. W otworach (komorach) odosobnionych (E918, E913) solanka sięgała aż do powierzchni terenu. W innych otworach poziom solanki znajdował się na głębokości około 24–58 m p.p.t., a w trakcie podszadzenia znajdował się nawet 74 m p.p.t. Ciśnienie solanki w stropie komór poeksploatacyjnych było bardzo zróżnicowane i wynosiło około 2–3 MPa. Ciśnienie solanki wywierane na strop komór bardzo istotnie wpływa na niszczenie zalegających tam utworów nadkładowych [3, 5].

3. Deformacje w otoczeniu komór poeksploatacyjnych

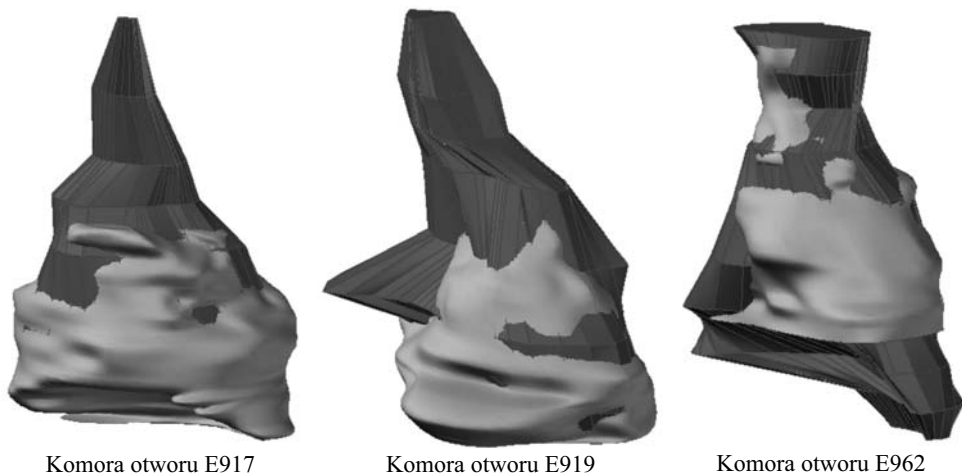
Do chwili opracowania i zastosowania w praktyce systemu pomiarów geofizycznych, kształt wyługowanych komór przyjmowano (przedstawiano) jako walec o średnicy

zastępczej $D_{0,6}$ obliczonej na podstawie wydobywania. W kopalni Barycz od roku 1980, a w polu Pagory od 1997 do określania wymiarów i kształtu wyługowanych komór wykorzystywano echosondy — początkowo z głowicą sztywną, a następnie z głowicą uchylną. Umożliwiało to precyzyjne pomiary, a wyniki wskazywały na olbrzymią złożoność kształtu komór. Na rysunku 2 zamieszczono zespół wszystkich 16 komór omawianego rejonu, przedstawiając w rzucie z góry kształt i wymiary 10 komór eksploatacyjnych pomierzonych echosondą, a jako walce o średnicy zastępczej $D_{0,6}$ te komór, których nie dało się pomierzyć. Na rysunku 3 przedstawiono bardzo złożony wygląd kształtu trzech komór poeksploatacyjnych pomierzonych dwukrotnie. Wizualizację wymiarów i kształtu wszystkich komór pomierzonych echosondą w okresie od marca 1997 do grudnia 2008 zamieszczono w pracy [6].



Rys. 2. Komory poeksploatacyjne w rejonie Tomana — rzut z góry.
Po lewej komórki w kształcie walców o średnicy $D_{0,6}$

Stan naprężenia i wyężenia górotworu w otoczeniu komór określono po zbudowaniu numerycznego modelu obliczeniowego uwzględniającego występujące warunki górniczo-geologiczne, wykonaniu obliczeń profesjonalnym programem COSMOS/M oraz przeprowadzeniu szczegółowej analizy uzyskanych wyników w przekrojach poziomych i pionowych. Wyniki analizy stanu naprężenia wskazywały na możliwość niszczenia nadkładowych utworów w stropie komór oraz utworów złożowych w filarach międzykomorowych. Z analizy stanu wyężenia wynikało, że filary pomiędzy niektórymi komorami mogły zostać zniszczone, a zasięg stref zniszczenia utworów stropowych w modelu sprężystym lokalnie był większy niż wysokość komór. Zasięg poziomy tych stref wskazywał na możliwość występowania połączeń kilku komór powyżej stropu złoża [3]. Podobne wyniki modelowania numerycznego uzyskał Kortas [4]. W pracy [6] zawarto wyniki analiz określających wymiary komór,



Komora otworu E917

Komora otworu E919

Komora otworu E962

Rys. 3. Kształt komór eksploatacyjnych uwzględniający dwa pomiary efektywne

przy których zniszczeniu ulega piaskowcowa płyta stropu zasadniczego na skutek zginania. Wykazano także, że w rejonie Tomana występowały warunki do powstania zapadliśka obejmującego około 10 sąsiednich komór i sięgającego do samej powierzchni.

Wnioski o niszczeniu górotworu w otoczeniu komór poeksploatacyjnych zostały potwierdzone wynikami pomiarów geofizycznych oraz wynikami wierceń otworów podsadzkowych. Szczegółowa analiza wyników pomiarów przeprowadzonych za pomocą echosondy w 10 komorach poeksploatacyjnych, zwłaszcza kilkakrotnie mierzonych z zastosowaniem sondy uchylnej, potwierdziła fakt niszczenia stropu zasadniczego i utworów nadkładowych powyżej. Echosonda wykazywała istnienie sklepienia komór około 8–40 m powyżej pierwotnego stropu złoża, czyli w obrębie ilów chodenickich zalegających nad pokładem soli (rys. 3). Analiza wyników wierceń otworów podsadzkowych w postaci zaniku obiegu oraz ucieczki płuczki, a także luźne przeloty świdra interpretowane jako pustki i rozwarstwienia górotworu potwierdzały występowanie procesów niszczenia i przemieszczania się stropu komór w górę. Wszystkie otwory podsadzkowe, którymi nawiercono komory wykazały lokalizację ich stropu o kilkanaście do kilkudziesięciu metrów powyżej stropu pokładu soli. We wszystkich otworach, w których nie nawiercono komory, spękania, pustki i rozwarstwienia utworów nadkładowych, skutkujące ucieczką płuczki podczas wiercenia, występowały już od głębokości około 125–145 m p.p.t., czyli około 80–100 m powyżej stropu złoża [2, 6]. Wyniki wierceń otworów, które nie natrafiły na komory wskazywały na występowanie uszkodzonych filarów międzykomorowych.

W celu likwidacji zagrożenia zapadliśkowego w rejonie Tomana, w roku 2007 rozpoczęto intensywne roboty zabezpieczające. Zrekonstruowano otwory poeksploatacyjne, odwiercono 13 otworów przeznaczonych do podawania podsadzki, a echosondą przeprowadzono, omówioną wyżej, inwentaryzację komór poeksploatacyjnych określając ich wymiary geometryczne, kształt i objętość oraz lokalizację w przestrzeni. Późną jesienią 2007 roku rozpoczęto

intensywne podsadzanie komór. Wyniki podsadzania poszczególnych komór do połowy 2009 roku zestawiono w ostatniej kolumnie tabeli 1.

4. Prognozy deformacji górotworu w rejonie Tomana uwzględniające stopień podsadzenia komór

Sposób prognozowania wskaźników deformacji końcowych powierzchni na skutek otworowej eksploatacji soli omówiono w pracach [7, 8]. Do prognozowania wpływów przeprowadzonej eksploatacji na powierzchnię terenu i ich zasięgu wykorzystano teorię Budryka-Knothego, stosowaną do prognozowania deformacji w kopalniach „Wieliczka” i „Barycz” od lat pięćdziesiątych.

Ponieważ objętość komór poeksploatacyjnych, których geometryzację wykonywano w różnych okresach nie była jednakowa, w przedstawionej prognozie uwzględniono objętość komór określoną na podstawie wielkości wydobycia zawartą w tabeli 1. Ta wielkość, jest najlepiej udokumentowana.

Całkowita objętość 16 komór określona na podstawie wydobycia z otworów eksploatacyjnych wynosiła 115 378 m³.

Sumaryczna objętość 10 komór zlokalizowanych w części wschodniej rejonu Tomana, pomierzonych echosondą, miała objętość:

- obliczoną na podstawie wydobycia — 62 196 m³ (~54% objętości wszystkich komór),
- pomierzoną echosondą — 47 097 m³.

Sumaryczna objętość podsadzki wprowadzonej do komór pomierzonych — 36 231 m³.

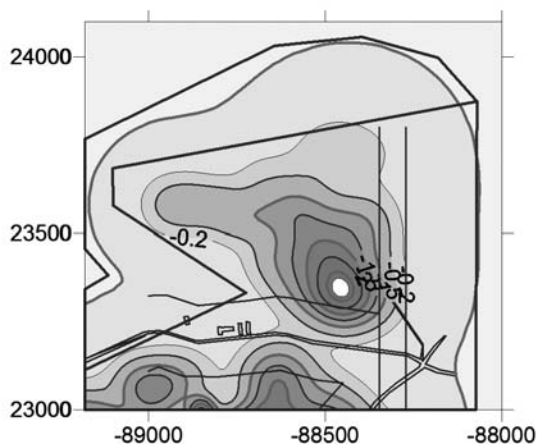
Stopień wypełnienia komór podsadzką nie był równomierny. Całkowicie wypełnione zostały komory otworów E913 i E961, a w 86% komora otworu E919. Komory otworów E922, E963 i E962, zlokalizowane najbliżej filara ulicy Krzemienieckiej oraz otworu E918, wypełnione zostały w około 50%. Komorę otworu E917 wypełniono podsadzką w 39%, a komory otworów E920 i E960 pozostały niepodsadzone. Pomimo wielokrotnych prób ulokowano w nich łącznie zaledwie 350 m³ podsadzki, gdy tymczasem łączna objętość tych dwóch komór obliczona na podstawie wydobycia wynosiła ponad 14 000 m³.

Do opracowania prognozy wielkości deformacji powierzchni terenu na skutek eksploatacji otworowej w rejonie Tomana wykorzystano teorię Budryka-Knothego. W obliczeniach przyjęto kąt rozproszenia wpływów głównych o wartości 610 oraz współczynnik osiadania 0,8–1,0 [1, 2, 8]. Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano program BKb opracowany przez dr inż. J. Flisiaka [7]. Stopień podsadzenia modelowano zmianą objętości komory. Do obliczeń przyjmowano największą pomierzoną średnicę komory, a przy braku pomiarów średnicę zastępczą $D_{0,6}$.

Wariant 1

Łączna objętość 16 wyeksploatowanych komór: $V = 115\,378\text{ m}^3$. Komory otworów E914, E915, E916, E921, E935 i E936 — brak podsadzki — średnica określona na podsta-

wie współczynnika kształtu $D_{0,6}$. Objętość pozostałych 10 komór określona na podstawie wydobywania $V_w = 62\,196\text{ m}^3$. Objętość podsadzki (piasku) w tych 10 komorach — $36\,231\text{ m}^3$, co stanowi około $\sim 31,4\%$ objętości soli wyeksploatowanej w rejonie Tomana. Podsadzkę modelowano jako zmniejszenie objętości wyeksploatowanych komór.



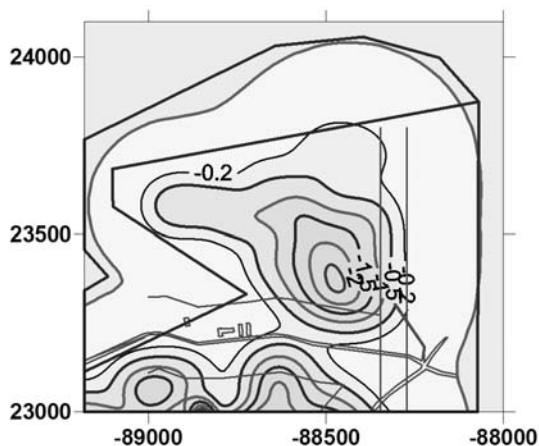
Rys. 4. Prognoza osiadań w polu Pagory, rejon Tomana. Podsadzka tylko w komorach pomierzonych echosondą (objętość wg tabeli 1)

Wyniki prognozy przedstawiono na rysunku 4. Z rysunku tego wynika, że w powstałej niecce o charakterze ciągłym osiadania maksymalne mogą osiągnąć wartość około 3,4 m, a lokalne ekstremum wystąpi w rejonie komór E935 i E915, w których nie ma podsadzki. Wyniki analizowanego wariantu nie wykluczają możliwości powstania zapadliska.

Wariant 2

W tym wariantcie założono, że oprócz ulokowanej już podsadzki, do trzech z sześciu komór części zachodniej rejonu Tomana, tzn. do komór po otworach E914, E915 i E916 oraz w powstałe tu kawerny, szczeliny i spękania możliwe będzie wprowadzenie podsadzki w ilości po 9000 m^3 . Założono również, że w górnej części komór otworów TP918, TP913 możliwe będzie ulokowanie 1570 m^3 piasku [6]. Całkowita objętość podsadzki w tym wariantcie wynosi $63\,161\text{ m}^3$, i stanowi 54 % objętości wyeksploatowanej soli. Wyniki prognozy w postaci niecki osiadania przedstawiono na rysunku 5. Z rysunku tego wynika, że powstała ciągła niecka osiadania, będzie łagodniejsza niż w wariantcie 1. Największe osiadania mogą osiągnąć około 2,4 m, a wystąpić mogą na północ od otworu E936, czyli tam, gdzie podsadzki nie będzie.

W założeniach tego wariantu występuje potrzeba wykonania trzech dodatkowych otworów podsadzkowych. Ulokowanie $27\,000\text{ m}^3$ podsadzki w linii otworów E914, E915, E916 powinno wykluczyć możliwość powstania zapadliska.



Rys. 5. Prognoza osiadań w polu Pagory, rejon Tomana.
 Podsadzka — 54% objętości wszystkich komór obliczonej z wydobycia.
 Podsadzenie komór otworów E914, E915 i E916 po 9000 m³

5. Wnioski

Pomimo upływu 11 lat od zakończenia eksploatacji w rejonie Tomana byłej kopalni Barycz, nadal występuje zagrożenie powstaniem zapadliska. W Kopalni Soli „Wieliczka” podjęto realizację szerokiego zakresu różnych działań zmierzających do skutecznego zabezpieczenia omawianego rejonu. Wykonano 13 otworów podsadzkowych, echosondą określono lokalizację, wymiary i kształt 10 komór poeksploatacyjnych, a jesienią 2007 roku rozpoczęto ich podsadzanie. Do połowy 2009 roku w dostępnych komorach ulokowano ponad 36 200 m³ piasku podsadzkowego, co stanowiło około 32% objętości komór obliczonej na podstawie wydobywania. Nierównomierne wypełnienie wszystkich komór podsadzka oraz małe ciśnienie wywierane na strop, przemieszczony w niektórych komorach w górę nawet o 40–100 m powyżej pierwotnego poziomu złoża wskazuje, że w zachodniej, nie podsadzonej grupie komór (otworów) rejonu Tomana, nadal występuje zagrożenie zapadliskowe. Ulokowanie 27 000 m³ podsadzki w linii otworów E914, E915, E916 powinno wykluczyć możliwość powstania zapadliska.

LITERATURA

- [1] Praca zbiorowa pod kier. prof. A. Tajdusia: Aktualizacja prognozy deformacji powierzchni od Kopalni Otworowej Barycz w likwidacji. Biblioteka Katedry Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH. Kraków, 2006 (praca niepublikowana)
- [2] Praca zbiorowa pod kier. dr J. Mazurka: Analiza stabilności górotworu w Polu Pagory — rejon Tomana na podstawie wierceń otworów podsadzkowych, rekonstrukcji otworów poeksploatacyjnych oraz pomiarów echosondą. Biblioteka Katedry Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH. Kraków, 2007 (praca niepublikowana)

- [3] *Cieślak J., Flisiak D., Flisiak J., Mazurek J.*: Przestrzenna analiza numeryczna wyężenia filarów komór solnych pola eksploatacyjnego „Pagory” w otworowej Kopalni Soli „Barycz”. Kwartalnik Górnictwo i Geoinżynieria. Zeszyt 1. Kraków 2008
- [4] *Kortas G.*: Zagrożenie zawałowe i mechanizm powstawania zapadlisk w otworowej kopalni soli. Przegląd Górniczy. T. 59, nr 1, 2003, s. 46 – 52
- [5] *Mazurek J.*: Deformacje powierzchni w otworowej Kopalni Soli Barycz w likwidacji. Czy mogą jeszcze powstać zapadliska? Kwartalnik Górnictwo i Geoinżynieria. Zeszyt 3/1. Kraków 2007
- [6] *Mazurek J., Cieślak J., Flisiak J.*: Analiza stabilności górotworu w Polu Pagory — rejon Tomana na podstawie wierceń otworów podsadzkowych, rekonstrukcji otworów poeksploatacyjnych oraz pomiarów echosondą. Aktualizacja — sierpień 2009. Biblioteka Katedry Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH. Kraków 2007, (praca niepublikowana)
- [7] *Mazurek J., Flisiak J., Flisiak D.*: Wyznaczenie filara ochronnego dla ulic Lipowej i Krzemienieckiej położonych nad złożem Barycz oraz określenie warunków eksploatacji w obrębie filara. Biblioteka Katedry Geomechaniki Górniczej i Geotechniki AGH. Kraków 1995, (praca niepublikowana)
- [8] Praca zbiorowa pod kier. prof. A. Tajdusia: Projekt likwidacji kopalni otworowej Barycz. Biblioteka Katedry Geomechaniki Górniczej i Geotechniki AGH, Kraków 1999, (praca niepublikowana)