

JERZY CIEŚLIK*, KRZYSZTOF PIETRUSZKA**

Analiza zachowania górotworu i powierzchni terenu w rejonie komory E 140 pola OKS „Łęzkowice” w trakcie likwidacji pustek poeksploatacyjnych z wykorzystaniem MES i pomiarów geodezyjnych

1. Eksploatacja otworowa soli w OKS Łęzkowice oraz proces likwidacji pustek poeksploatacyjnych

Eksploatację złoża solnego w Kopalni Łęzkowice prowadzono metodą podziemnego ługowania odwiertami z powierzchni. Działalność górniczą rozpoczęto w 1968 roku i prowadzono przez dwadzieścia lat do roku 1988, kiedy podjęto decyzję o likwidacji Kopalni. Praktycznie jednak produkcję zakończono dopiero w roku 1991. Projekt eksploatacji zakładał ługowanie soli poprzez otwory usytuowane w siatce trójkątów o bokach około 35 m na głębokości od 120 do 425 m, z pozostawieniem półki o grubości 120 m. Prowadzony w rzeczywistości system eksploatacji w ogólnym zarysie można podzielić na dwie metody (Ślizowski i in. 1993):

- metodę ciśnieniową (represyjną) polegającą na wymuszonym obiegu pod ciśnieniem cieczy ługującej, która ulegała nasyceniu solą,
- metodę tunelową (depresyjno-represyjną) której istotą był wymuszony przepływ cieczy ługującej od otworów tłocznych poprzez szczeliny między komorowe do otworów pompowych.

Metodę tunelową zastosowano w roku 1985 i ze względu na wytworzenie dużych komór połączonych ze sobą oraz wystąpienie naruszenia półki stropowej, po niedługim czasie stosowania ją przerwano. W wyniku prowadzonej wtedy eksploatacji stwierdzono

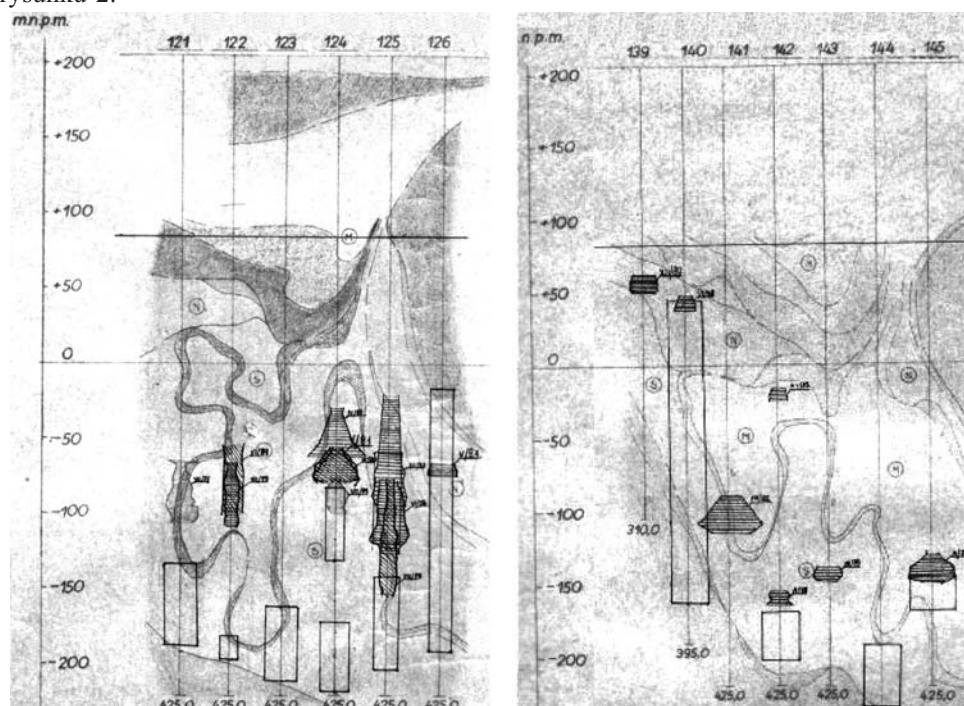
* Dr inż., Wydział Górniczo-Geodezyjny AGH, Kraków; e-mail: jertz@agh.edu.pl

** Dr inż., Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH, Kraków

naruszenie warstw iłowo-gipsowych i iłów dochodzących nawet do powierzchniowych utworów czwartorzędowych. W roku 1998, a więc po upływie 10 lat od zakończenia eksploatacji rozpoczęto intensywne podsadzanie komór poeksploatacyjnych. Począwszy od drugiej połowy 1999 roku, do wiosny 2001 do podsadzania wprowadzono żużle z hałdy HTS. Pomimo tych działań, między innymi w rejonie komór 127-134-140, doszło w 2001 do powstania zapadliska o znacznych rozmiarach. W referacie zaprezentowano wyniki analiz dwóch czynników mogących mieć istotny wpływ na powstanie nieciągłych deformacji powierzchni terenu w rejonie komór 127-134-140.

2. Budowa geologiczna górotworu w rejonie komory E140

Budowę geologiczną w rejonie komory E140 odwzorowano na podstawie oryginalnych kopalnianych map geologicznych (Przekroje... 1974). Najbardziej dokładnie mapy dokumentują złoża i utwory poniżej głębokości 120 m, gdzie projektowana była eksploatacja. Przykładowe mapy, w oparciu o które wykonano przekroje i odwzorowano warstwy geologiczne zaprezentowano na rysunku 1. Lokalizacja i orientacja przekrojów rozpoznana może być za pomocą numerów otworów wiertniczych i zaprezentowana jest na kolejnym rysunku 2.



Rys. 1. Przekroje geologiczne rejonu otworu E140 i 127

Fig. 1 Geological sections of the region E140 and 127

Z budowy geologicznej złoża wynika, że bezpośrednio nad stropem złoża soli kamiennej zalega warstwa iłowców i mułowców. Powyżej tej warstwy pojawia się warstwa soli o nieregularnej miąższości i kształcie z przerostami anhydrytu. Powyżej tej warstwy zalegają iłowce chodenickie, a jeszcze wyżej utwory czwartorzędowe. Parametry fizyczne, poszczególnych warstw geologicznych zebrano w tabeli 1.

TABELA 1

Parametry fizyczne wybranych utworów geologicznych (wg Przekroje... 1974; Tajduś i in. 1999)

TABLE 1

Physical parameters of selected geological formations (after Przekroje... 1974; Tajduś i in. 1999)

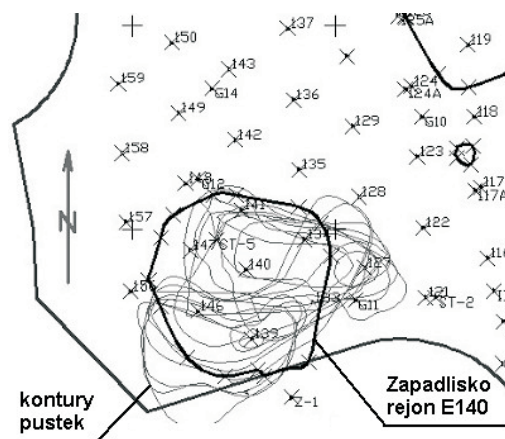
Nazwa skały	Ciężar objętościowy γ [kN/m ³]	Moduł odksz. podłużnej E [MPa]	Współ. Poissona ν [-]	Kąt tarcia wewn. φ [deg]	Spójność c [kPa]
Sól spiżowa	21,3	912,0	0,30	30,0	1 500
Iłołupki	22,0	60,0	0,35	13–26	60–100
Iły chodenickie	21,8	6,3	0,38	6,5	100
Utwory podsolne	25,0	1 000,0	0,20	–	–
Solanka	12,0	–	0,50	–	–

3. Przestrzenne odwzorowanie geometrii pustek poeksploatacyjnych w rejonie komory E140

Odwzorowanie pustek poeksploatacyjnych dotyczących komór solnych powstałych w eksploatacji otworowej jest zadaniem bardzo trudnym. Poza danymi dotyczącymi projektowanej i wyeksploatowanej geometrii komór, do tego celu niezbędne są jeszcze dane dotyczące historii migracji pustek w stropie po zakończeniu eksploatacji. W przypadku kopalni soli w Łęzkowicach, wiele z tych danych jest obecnie już niedostępnych. Dane takie jak geometria wyeksploatowanych komór, czy połączenia komór ze względu na sposób eksploatacji, tak naprawdę nigdy nie były kompletne i znane. Obecnie pustki poeksploatacyjne KS Łęzkowice nadal stanowią jeden, połączony ze sobą oraz z ciekami powierzchniowymi i podziemnymi, zespół kanałów i kawern.

Przestrzenny (bryłowy) model pustek poeksploatacyjnych wykonany dla rejonu komory E140 umożliwił zaprezentowanie położenia pustek w odniesieniu do budowy geologicznej górotworu odwzorowanej na podstawie kopalnianych map geologicznych. Model pustek wykonano na podstawie danych z pomiarów echosondą (Rałowicz i in. 1997–2001). Pomiarów echosondą pozwoliły stworzyć bazę danych o położeniu punktów obrzeży pustek w po-

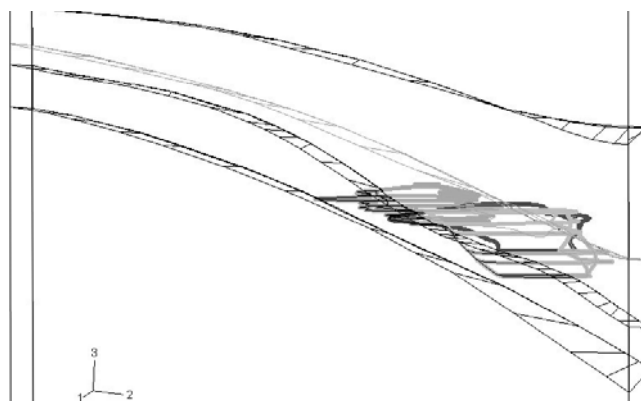
ziomych przekrojach, a następnie przy wykorzystaniu napisanych skryptów programu AutoCAD zbudowano bryłowe modele tych pustek. Na rysunku 2 przedstawiono widok pustek poeksploatacyjnych w odniesieniu do otworów eksploatacyjnych w rzucie z „góry”, zaś na rysunku 3 w ujęciu przestrzennym, patrząc od strony wschodniej, w odniesieniu do budowy geologicznej górotworu. Nieregularnymi liniami oznaczono układ poszczególnych warstw geologicznych, wyznaczone na podstawie danych z otworów eksploatacyjnych. Dane na podstawie których odwzorowano geometrię pustek pochodziły z trzech pomiarów w niewielkich (jak na intensywność zjawiska migracji) odstępach czasu. W czasie pomiędzy pomiarami w otworach tych prowadzono prace podsadzkowe. Pomimo, że ostatnim pomiarem echosondą (maj 2001 roku) nie wykryto części pustki najniżej leżącej, prawdopodobnie ze względu na częściowe wypełnienie materiałem podsadzkowym, w modelu geometrycznym uwzględniono wszystkie zinwentaryzowane w trzech pomiarach pustki i połączone je w jedną bryłę.



Rys. 2. Usytuowanie zinwentaryzowanych pustek poeksploatacyjnych w rejonie komory E140

Fig. 2. Localization of the of the post-exploitation chamber in region E140

Analizując zaprezentowane wyżej rysunki można zauważyć, iż kształt pustek jest mocno nieregularny. Są one szersze w części środkowej i węższe w części stropowej i spągowej, razem stanowią kawernę o dużej objętości (ok. 160 000 m³). Najbardziej jednak istotny ze względu na półkę stropową, jest ich zasięg w obrębie poszczególnych warstw geologicznych. Analiza rysunków 2 i 3 oraz wcześniejszych map (rys. 1 i 2) pozwoliła stwierdzić, że spąg pustek jest zlokalizowany w warstwie iłolupka, środkowa część w warstwie soli, zaś strop sięga warstw iłów chodenickich. Z analizy przestrzennej położenia pustek można ustalić, iż ich strop, na czas wykonywania pomiaru echosondą znajdował się na głębokości 93 m p.p.t. Położenie to dowodzi, że naruszona została w zasadniczy sposób półka stropowa (pierwotnie planowano, że półka miała mieć grubość 120 m), a migracja pustek w warstwach słabych iłów mogła odbywać się w sposób trudny do przewidzenia. Dodatkowo należy zauważyć, że migracja pustki z poziomu poniżej 120 m do 93 m odbyła się przez cienie



Rys. 3. Układ warstw geologicznych oraz przestrzenny widok pustek od strony wschodniej

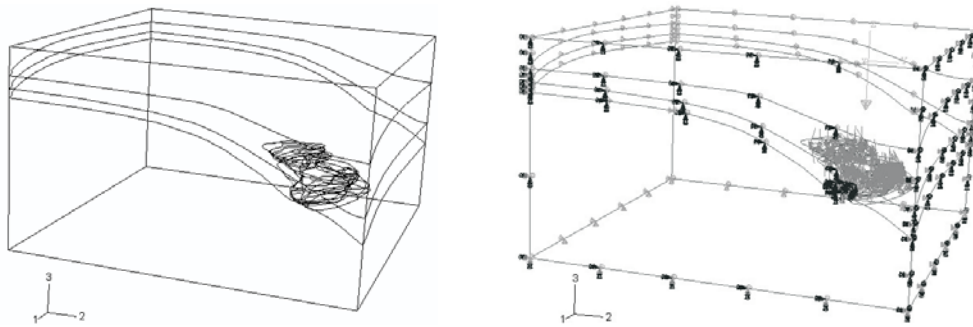
Fig. 3. Setup of the geologic layers and 3D view of the chamber from the east

i nieregularne warstwy soli, co mogło doprowadzić do wylugowania tej warstwy i powstania dodatkowych nie wykrytych przez echosondę przestrzeni, połączenia z innymi pustkami oraz warstwami wodonośnymi z powierzchni. Należy podkreślić, że geometria przyjęta w prezentowanym modelu ze względu na metodę badawczą pozyskiwania danych (pomiar echosondą), może znacznie odbiegać, od rzeczywistej geometrii pustek. Zarówno jednak na etapie ówczesnych badań i pomiarów, jak i obecnie nie istnieje lepsza i bardziej dokładna metoda zbierania informacji o tego typu obiektach podziemnych.

4. Budowa modelu numerycznego wycinka pola eksploatacyjnego w rejonie komory E140

Budując model numeryczny części pola OKS Łęzkowice w znacznej mierze oparto się na wynikach przestrzennego odwzorowania układu pustek zaprezentowanych wcześniej. Analizie poddano wycinek górotworu o kształcie prostopadłościanu i wymiarach $380 \times 380 \times 220$ m, wewnątrz którego odwzorowano komory poeksploatacyjne (rys. 4). Na rysunku osie układu współrzędnych oznaczone jako 2 i 1 odpowiadają odpowiednio kierunkowi północnemu i wschodniemu. W celu uwzględnienia w obliczeniach równolegle prowadzonej eksploatacji w tym rejonie, założono istnienie pionowych płaszczyzn symetrii modelu (na rys. 4 oznaczonych ciemniejszymi trójkącikami), po północnej i wschodniej stronie analizowanego pola, oddalonych o 5 m od krawędzi pustek w tych kierunkach.

Obciążenie modelu stanowiły: ciężar własny modelowanych skał oraz ciśnienie wewnątrz komór, wynikające z wysokości słupa solanki, sięgającej do powierzchni terenu. Obliczenia wykonano w jednym kroku obliczeniowym, na liniowo sprężystym modelu fizycznym górotworu, którego parametry zamieszczono w tabeli 1. Następnie przeprowadzono analizę wyteżenia skał w oparciu o liniowy warunek Coulomba (parametry modelu zestawiono w tab. 1) Obliczenia wykonano przy pomocy komercyjnego pakietu MES ABAQUS.



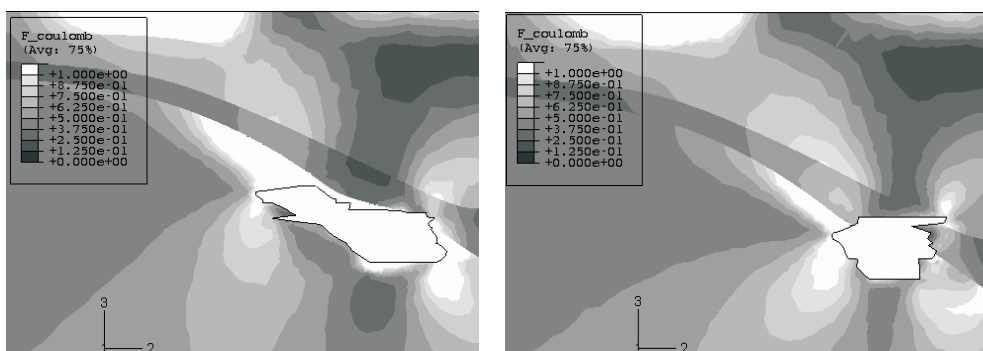
Rys. 4. Geometria modelu obliczeniowego (po lewej) wraz z warunkami brzegowymi (po prawej)

Fig. 4. Numerical model geometry (on the left) and the boundary conditions (on the right)

Zasadniczym celem obliczeń numerycznych było określenie stopnia wyężenia półki stropowej w otoczeniu pustek komory E140, po zakończonej eksploatacji i w trakcie robót podsadzkowych. W związku z tym, że istota tych robót polegała na wypełnianiu pustek materiałem podsadzkowym, z jednoczesnym wytworzeniem podciśnienia solanki w pustce obliczenia przeprowadzono w dwóch wariantach. W pierwszym założono, że ciśnienie solanki wypełniającej pustki równe jest ciśnieniu słupa solanki sięgającego na powierzchnię terenu (1,14 MPa), w drugim zaś wariantcie przyjęto, że na skutek robót podsadzkowych ciśnienie to mogło spaść do połowy wartości normalnego ciśnienia w komorze (0,57 MPa).

Przykładowe wyniki obliczeń wyężenia zaprezentowano w dwóch pionowych płaszczyznach przekroju skierowanych z południa na północ pola eksploatacyjnego (rys. 5).

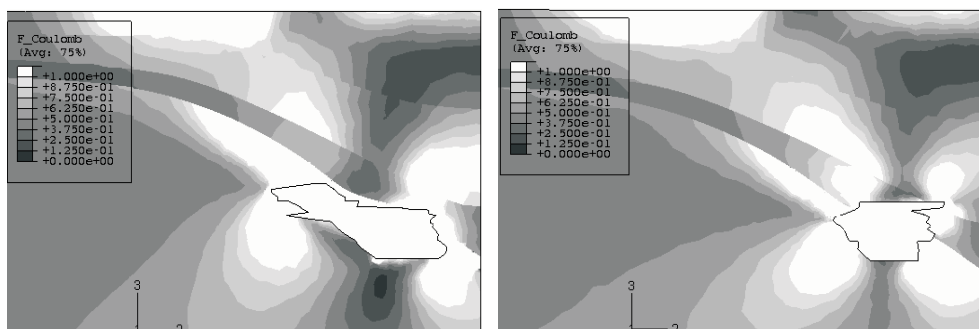
Analiza zaprezentowanych map wyężenia górotworu pozwala stwierdzić, że w obu wariantach obliczeniowych wyężenie górotworu półki stropowej jest wysokie, a zniszczenie, ze względu na ciśnienie solanki wewnątrz pustek, odbywa się głównie poprzez ścinanie.



Rys. 5. Wyężenie górotworu w obrębie pustek poeksploatacyjnych komory E140.

Wariant bez robót podsadzkowych

Fig. 5. Strength maps of the rock mass in post-exploitation chamber E140. Variant without filling



Rys. 6. Wytyżenie górotworu w obrębie pustek poeksploatacyjnych komory E140.
Wariant robót podsadzkowych

Fig. 6. Strength maps of the rock mass in post-exploitation chamber E140. Variant with filling

W przypadku, gdy ciśnienie solanki nie jest zaburzone robotami podsadzkowymi, bezpośrednio w otoczeniu pustek występuje obszar górotworu o przekroczonym wytyżeniu, jednak w półce stropowej stopień wytyżenia nie przekracza 0,7. Jedynie na samej powierzchni terenu na skutek odkształceń poziomych w niecce osiadania doszło do przekroczenia wytyżenia.

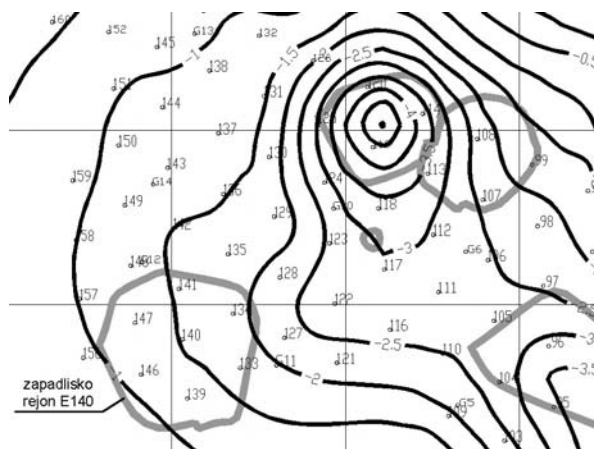
W drugim wariantcie na skutek obniżenia ciśnienia solanki obszar górotworu, w którym wytyżenie zostało przekroczone ma znacznie większy zasięg, zaś w półce stropowej wytyżenie przekracza nawet wartość 0,9, co oznacza stan bliski zniszczenia.

Na podstawie zaprezentowanych przykładowych wyników obliczeń można stwierdzić, że bezpośrednio nad pustkami poeksploatacyjnymi w trakcie robót podsadzkowych, (żużle z hałd HTS) prowadzonych w komorze E140, czy też w innych komorach pola eksploatacyjnego (wszystkie praktycznie komory pola mają połączenia hydrauliczne) istniało realne zagrożenie wystąpienia zapadliska. Efekt obniżenia ciśnienia solanki w pustkach poeksploatacyjnych powodował pogorszenie warunków stateczności stropu i możliwość jego zniszczenia.

5. Wyniki pomiarów geodezyjnych zachowania powierzchni terenu w rejonie komory E140

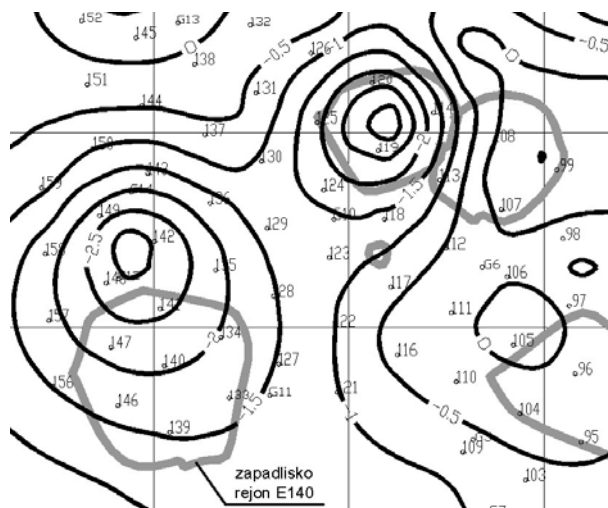
Na terenie obszaru górniczego Kopalni Łęzkowice prowadzone były okresowe pomiary geodezyjne, których celem była kontrola zmian na powierzchni będących skutkiem prowadzonej eksploatacji. Pomiary te wykonywano w czasie całego procesu eksploatacji złoża sukcesywnie mierząc zmiany położenia punktów osnowy geodezyjnej zaprojektowanej w celu kontroli wpływu eksploatacji na górotwór w strefie powierzchniowej (rys. 7). Ze względu na długotrwały proces reakcji górotworu obserwacje prowadzone są również mimo zakończenia eksploatacji. Do analiz w artykule wykorzystano wyniki pomiarów zmian przemieszczeń pionowych powierzchni wykonane w dwóch okresach: od listopada 2000 r.

do maja 2001 r. oraz od maja 2001 r. i do listopada 2001 r. Analizowano więc wyniki pomiarów wykonanych zarówno przed, jak i w okresie obejmującym wystąpienie zapadliska. Na podstawie tych wyników wykonano mapy izolinii prędkości obniżenia (rys. 7 i 8). Analiza tych map pozwala zauważyć zwiększone prędkości osiadań w rejonie analizowanego zapadliska w okresie obejmującym jego wystąpienie. Wielkość i prędkość tych obniżeń nie wskazywała jednak wyraźnie na możliwość wystąpienia deformacji nieciągłych bezpośrednio w rejonie otworu E140. Można przypuszczać, że zarejestrowane w tym okresie ruchy powierzchni terenu związane były głównie z pracami podszkawkowymi prowadzonymi w tym rejonie pola, w trakcie których ciśnienie solanki w pustkach uległo zmianie.



Rys. 7. Mapa prędkości osiadania powierzchni terenu w okresie 11.2000–05.2001

Fig. 7. Map of the vertical velocity on the terrain surface November 2000–May 2001



Rys. 8. Mapa prędkości osiadania powierzchni terenu w okresie 05.2001–11.2001

Fig. 8. Map of the vertical velocity on the terrain surface May 2001–November 2001

Podsumowanie i wnioski

Migracja i połączenie pustek poeksploatacyjnych z różnych otworów eksploatacyjnych w kierunku powierzchni terenu spowodowało poważne naruszenie półki stropowej i realne zagrożenie jej zniszczenia. Szczególnie istotnym czynnikiem wpływającym na degradację stropu mogło być występowanie w stropie cienkich warstw solnych, które na skutek migracji pustek i wdarcia się solanki mogły zostać wylugowane. Identyfikacja takich pustek za pomocą echosondy jest bardzo trudna, a często niemożliwa.

Jak wykazano w obliczeniach numerycznych technologia podsadzania pustek poeksploatacyjnych, któremu towarzyszą istotne wahania ciśnienia solanki, mogła przyczynić się do pogorszenia warunków stateczności półki stropowej, a w skrajnym przypadku spowodować jej zniszczenie. Oprócz złych warunków w stropie pustek, zaburzenie ciśnienia solanki wewnątrz komór mogło być istotnym czynnikiem wystąpienia nieciągłych deformacji na powierzchni.

Analiza górotworu prowadzona na podstawie pomiarów (identyfikacji) pustek poeksploatacyjnych, obliczeń numerycznych, oraz geodezyjnych pomiarów deformacji powierzchni daje możliwość oceny przyczyn i skutków działalności górniczej. Przedstawiony materiał może być źródłem dalszych szczegółowych analiz pozwalających na ocenę stanu górotworu i zapobieganie ujemnym skutkom działalności górniczej.

Praca została wykonana w ramach grantu badawczego KBN nr 4 T12E 031 29

LITERATURA

- Przekroje geologiczne złoża Otworowej Kopalni Soli Łęzkowice. Egzemplarz archiwalny działu wiertniczo-geologicznego, 1974 (praca niepublikowana).
- Rałowicz B., i in., 1997–2001 – Wyniki pomiaru echosondą komór 127, 139, 140. Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych w Krakowie. Zakład Geofizyki Górniczej (praca niepublikowana).
- Tajduś A., i in., 1999 – Projekt likwidacji Kopalni Otworowej Barycz. Praca zbiorowa pod kierunkiem prof. A. Tajdusia. Biblioteka Katedry Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH. Kraków (praca niepublikowana).
- Ślizoński K., i in., 1993 – Ocena stabilności górotworu w rejonie pola otworowego w Łęzkowicach wraz z prognozą zmian w czasie. Centrum Podstawowych Problemów Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN (praca niepublikowana).

Słowa kluczowe

Likwidacja pustek poeksploatacyjnych, obliczenia MES, pomiary geodezyjne

Streszczenie

Artykuł zawiera analizę różnych czynników, natury geologicznej, geomechanicznej oraz związanych z techniką podsadzania, które mogły mieć wpływ na powstanie deformacji nieciągłych w rejonie komory E140 OKS Łęzkowice. W rejonie tym pomimo prowadzonych prac podsadzkowych (m.in. lokowanie żużla z hałd HTS) w sierpniu 2001 roku doszło do powstania deformacji nieciągłych. W referacie przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych MES oraz analiz geodezyjnych deformacji powierzchni nad polem eksploatacyjnym, w rejonie komory E140.

W pierwszej części referatu na podstawie kopalnianych map geologicznych scharakteryzowano warunki geologiczne oraz krótko omówiono historię eksploatacji w analizowanym rejonie pola eksploatacyjnego OKS Łęzkowice. Na podstawie map kopalnianych oraz wyników geometryzacji pustek poeksploatacyjnych pomiarami echosondą, dokonano przestrzennego, bryłowego odwzorowania układu pustek w odniesieniu do budowy geologicznej górotworu w rejonie komory E140. Dane na podstawie których odwzorowano geometrię pustek pochodziły z trzech pomiarów w niewielkich (jak na intensywność zjawiska migracji) odstępach czasu. Analiza układu pustek wykazała, że ich spąg pustek był zlokalizowany w warstwie iłołupka, środkowa część w warstwie soli, zaś strop sięgał warstw iłów chodenickich.

Następnie na podstawie przestrzennego, modelu geometrycznego pustek zbudowano numeryczny model obliczeniowy, na którym przeprowadzono obliczenia i geomechaniczną analizę wyężenia półki stropowej w rejonie komory E140. W obliczeniach uwzględniono możliwość spadku ciśnienia solanki w pustkach w trakcie robót podsadzkowych. Przeprowadzona analiza wykazała, że bezpośrednio nad pustkami poeksploatacyjnymi szczególnie w trakcie robót podsadzkowych wyężenie półki stropowej było wysokie i istniało realne zagrożenie wystąpienia zapadliska. W drugiej części referatu, zaprezentowano wyniki pomiarów geodezyjnych dotyczących osiadania i prędkości osiadań powierzchni terenu w okresie poprzedzającym i obejmującym powstanie zapadliska w rejonie komory E140. Całościowa analiza zarówno geomechaniczna jak i geodezyjna jest próbą oceny czynników mogących mieć istotny wpływ na powstanie nieciągłych deformacji powierzchni terenu.

ANALYSIS OF THE ROCK MASS AND TERRAIN SURFACE BEHAVIOUR IN THE REGION OF THE E 140 CAVERN IN THE BOREHOLE SALT MINE „ŁĘŻKOWICE” FIELD, DURING THE POST-EXPLOITATION BACKFILL PROCESS, USING FEM AND GEODETIC MEASUREMENTS

Key words

Disposal of the post-exploitation caverns, numeric calculations FEM, geodesic measurements,

Abstract

This article contains the analysis of different factors of geological and geomechanical nature and factors related with the stowing technique, which could influence the process of discontinuous deformations in the region of the E140 cavern in the Borehole Salt Mine (OKS) Łęzkowice. In that region, despite stowing (among others putting slag from the Sendzimir Steelworks waste heaps), in August 2001 discontinuous deformations were formed. This paper presents the results of numerical calculations with FEM and geodetic analyses of the surface deformations over the exploitation field, in the region the E140 cavern.

In the first part of the paper, based on the mine's geologic maps, geologic conditions were characterized and the history of exploitation in the analysed region of the exploitation field in the OKS Łęzkowice was briefly

presented. Based on the mine's maps and the results of the geometrization of post-exploitation voids, using an echo-sonar, a 3D solid projection of the system of voids was made, referring to the geological structure of the rock mass in the region of the E140 cavern. The data that made a base for the projection of the geometry of voids came from three measurements in small (compared to the intensity of migration) time intervals. The analysis of the system of voids showed that their thill was located in the shale layer, the central part – in the salt layer and the roof reached the Chodenice loam.

Then, based on the 3D geometric model of voids, a numerical calculation model was made, on which calculations and geomechanical analysis of the roof shelf stress in the E140 cavern region were carried out. In the calculations the possibility of the decrease of the brine pressure in voids while stowing was taken into account. This analysis showed that directly over post-exploitation voids, especially while stowing, the stress of the roof shelf was high and there was a real threat of the formation of a vault. In the second part of the paper, the results of geodetic measurements referring to the subsidence and the speed of subsidence in the surface of the terrain were presented for the period before and during the formation of the subsidence in the E140 cavern region. The comprehensive analysis, both geomechanical and geodetic makes an attempt to assess factors that can significantly cause the formation of discontinuous deformations on the terrain surface.