



Deformacje górotworu wywołane eksploatacją pola nr 2 w Kopalni Soli „Kłodawa” S.A.

Rock mass deformation caused by the exploitation of field No. 2 in the „Kłodawa” Salt Mine S.A.

Józef BIENIASZ¹, Jakub PIETRAS¹

Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych „CHEMKOP” Sp z o.o.
ul. Józefa Wybickiego 7, 31-261 Kraków; e-mail: jozef.bieniasz@chemkop.pl

STRESZCZENIE

Pole nr 2 jest największym polem eksploatacyjnym w Kopalni Soli „Kłodawa”. Od kilkadziesiąt lat prowadzone są w nim specjalistyczne pomiary deformacji. W ostatnich latach oprócz zaciskania wyrobisk komorowych mierzone są także przemieszczenia pionowe i względne przemieszczenia poziome. Znajomość i kontrola tych zjawisk podnosi bezpieczeństwo eksploatacji.

Słowa kluczowe: eksploatacja soli, zaciskanie wyrobisk, pomiary deformacji, górotwór

ABSTRACT

Field No. 2 is the largest exploitation field in the “Kłodawa” Salt Mine. Specialized deformation measurements have been carried out for several decades. In recent years, in addition to convergence excavation, vertical displacements and relative horizontal displacements are also measured. Knowledge and control of these phenomena increases the safety of exploitation.

Key words: salt exploitation, convergence of excavations, deformation measurements, rock mass

WSTĘP

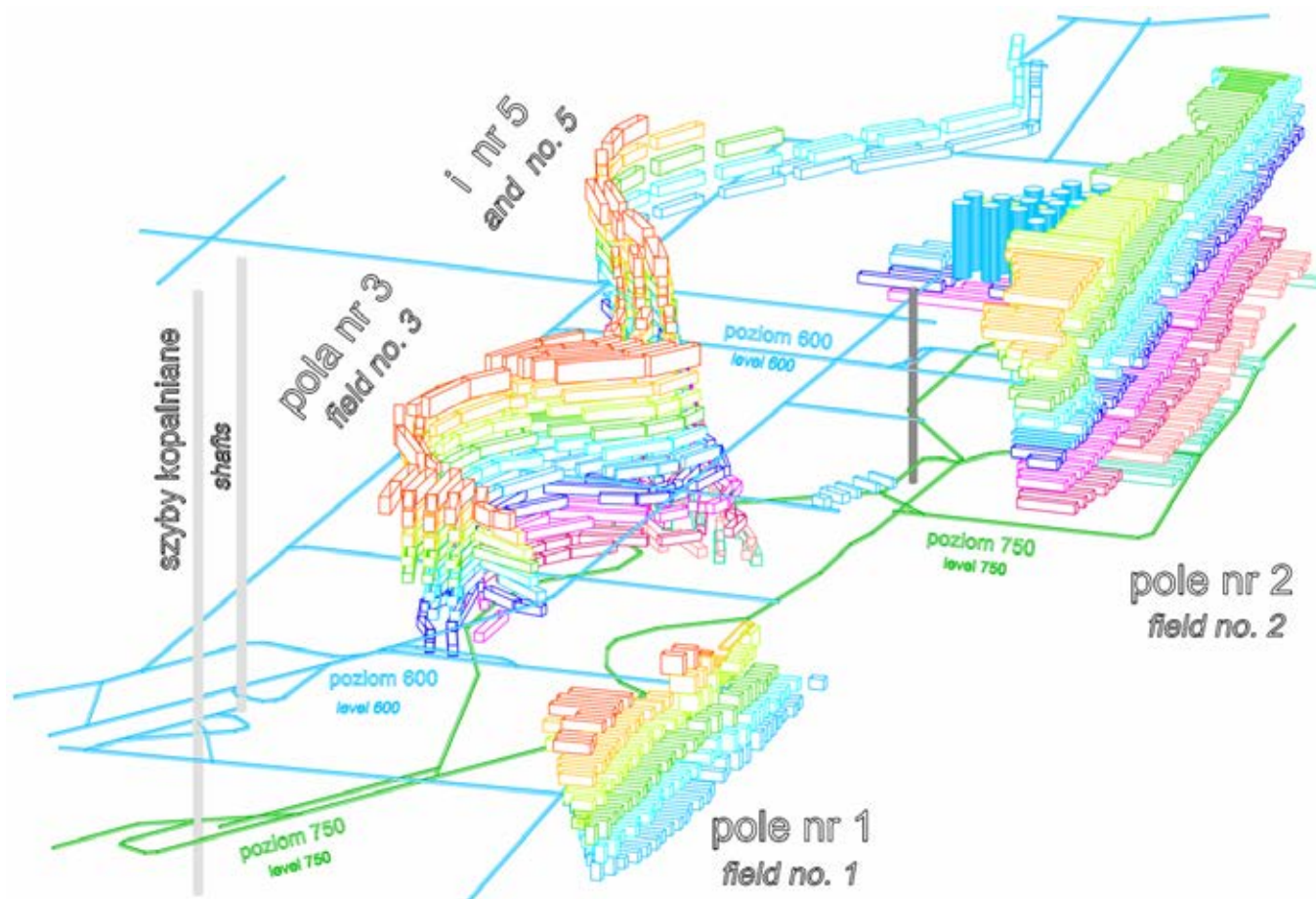
Kopalnia Soli „Kłodawa” od ponad 60 lat eksploatuje złożę będące centralną częścią cechsztyńskiego wysadu solnego Łęczycza-Izbica Kujawska. Stosowany jest tradycyjny sposób wybierania kopaliny systemem komorowo-filarowym z zastosowaniem materiałów wybuchowych. Eksploatacja prowadzona jest w układzie kilku oddzielnych pól rozmieszczonych

w przestrzeni wysadu solnego, w dostosowaniu do jego budowy geologicznej.

Pole nr 2, w którym wybierana jest starsza sól kamienna biała Na₂, jest polem o największej koncentracji eksploatacji w wysadzie. Świadczy o tym sumaryczna objętość pustek poeksploatacyjnych i jego najbardziej znaczące oddziaływanie deformacyjne na otaczający górotwór i powierzchnię terenu. Od kilkadziesiąt lat OBR Chemkop we współpracy ze służbą mierniczą Kopalni prowadzi specjalistyczne, cykliczne pomiary zjawisk deformacyjnych ujawniających się w polu nr 2 i całej kopalni. W ostatnich latach znacząco rozbudowano sieci pomiaru deformacji lokalnych wewnątrz pola nr 2 i globalnych przemieszczeń przestrzennych w jego otoczeniu. Uzyskano dzięki temu wiele istotnych danych pomiarowych. Pozwala to na pełniejszą kontrolę zjawisk deformacyjnych zachodzących w polu nr 2 i górotworze otaczającym, w tym w stropowej półce ochronnej nad polem.

CHARAKTERYSTYKA POLA NR 2

Eksploatację soli białej w polu nr 2 rozpoczęto w 1964 roku i trwa ona do chwili obecnej. Złożę wybierane jest w większości w regularnym układzie komorowo-filarowym przy stałym rozstawie osi komór, prostopadłych do rozciągłości złoża, wynoszącym 30 m. Długość pola po rozciągłości wynosi ok. 1,5 km, a największa szerokość w części środkowej osiąga ok. 0,5 km i maleje do kilkadziesiąt metrów w zakończeniach (skrzydłach) SE i NW. W centralnej, rozszerzonej części pola zastosowano odmienny schemat eksploatacyjny w postaci regularnego układu kilkunastu komór cylindrycznych mających spąg na poziomie 600, o wysokościach do 103 m i średnicach ok. 24 m. Eksploatację pola prowadzo-



Ryc. 1. Główne pola eksploatacji w KS Kłodawa – schemat.

Fig. 1. Main fields of exploitation in KS Kłodawa - scheme.

no w kilku etapach. Początkowo na 5 poziomach w przedziale głębokości od 500 do 600 z interwałem międzypoziomowym wynoszącym 25 metrów i stałą szerokością komór wynoszącą 15 m. Obecnie kończy się wybierane partie złoża pomiędzy poziomami 600 a 750, w interwale międzypoziomów co 30 m i szerokościach komór malejących wraz z głębokością od 13,4 m na poziomie 630 do 12 m na poziomie 750.

Na każdym z 10 istniejących międzypoziomów w polu wybrano ok. 50 komór prostopadłościennych o długościach od kilkudziesięciu do ponad 200 m. W chwili obecnej, gdy eksploatacja zesła w polu nr 2 do głębokości 750 m, wybranych zostało łącznie ponad 400 komór a sumaryczna objętość pustek wynosi ponad 8,8 mln m³, co stanowi ok. 47% objętości pustek w kopalni. Trwają także prace przy udostępnieniu nowych poziomów 780 i 810. Schematyczny widok pola nr 2 i jego położenia w strukturze kopalni pokazuje - Ryc.1.

DEFORMACJE LOKALNE PUSTEK POEKSPLOATACYJNYCH I CALIZN WEWNĄTRZ POLA

Systematyczne, cykliczne pomiary deformacji w polu nr 2 rozpoczęto pod koniec roku 1980 w pionie Ks11 zlokalizowanym w centralnej części pola. Zainstalowano wówczas, wg projektu OBR Chemkop, stacjonarne urządzenia pomiarowe

mierzące zaciskanie komór, deformacje filarów międzykomorowych oraz pólk międzypoziomowych na poziomach od 525 do 600. Ten tradycyjny system pomiarowy oparty o tzw. bazy rurowe wymagał zgromadzenia odpowiedniej ilości materiałów instalacyjnych i pracochłonnych robót montażowych w wyrobiskach. Zastosowano go także przed kilkunastu laty powiększając strefę objętą pomiarami konwergencji w tym pionie do poziomu 750, w ślad za postępującą coraz głębiej eksploatacją.

W latach 90-tych ubiegłego wieku OBR Chemkop opracował nową metodę pomiaru deformacji poeksploatacyjnych wyrobisk (przemieszczeń) wykorzystującą dalmierz laserowy jako urządzenie odczytowe zmian długości baz (Bieniasz, Ciągło, Wojnar, 2003). Wdrożenie tej znacznie tańszej techniki pomiarowej pozwoliło na wzbogacenie zakresu obserwacji w pionie Ks11 o dodatkowe bazy na poziomach od 600 do 750. Zalety i skuteczność nowej metody obserwacji przemieszczeń zostały także wykorzystane przy pomiarowym monitoringu rejonu zjawiska wodnego 30/619 w SE skrzydle pola nr 2 i nietypowej eksploatacji komory Ks20/600. W przypadku zjawiska wodnego 30/619 pomiarem zaciskania pionowego objęto komory na poziomach od 500 do 690, w których oprócz soli białej występują tzw. polihality.

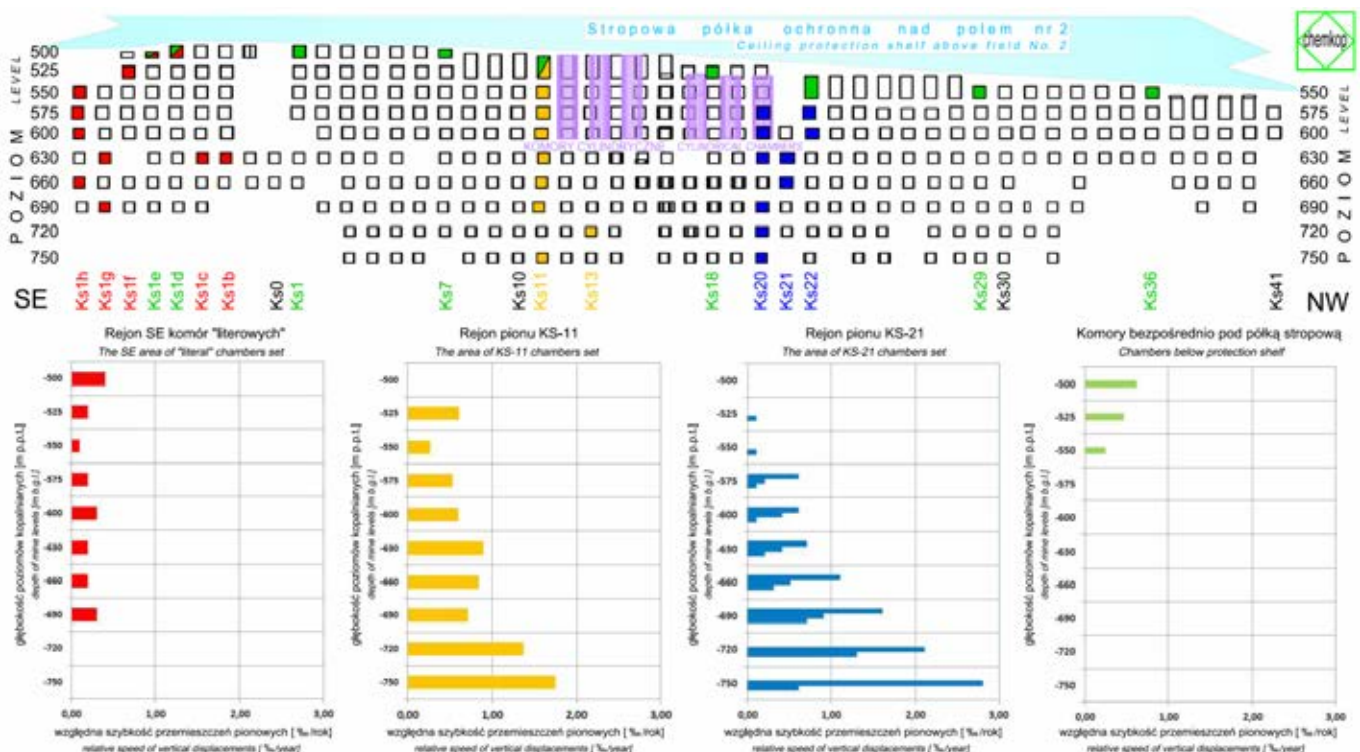
Pierwotnym celem tych pomiarów było uchwycenie ewentualnych różnic w deformacjach dwóch w/w typów górotworu solnego i wpływu zawilgocenia na szybkość zaciskania pustek. Pomiary rozpoczęto w 2010 r.

Wspomniana komora Ks20/600 była eksploatowana na zasadzie odstępstwa od generalnego kierunku wybierania - od góry do dołu. Z tego względu jej wybieranie było monitorowane przez lokalną sieć obserwacji deformacji założoną w komorach i caliznach wyrobisk sąsiednich na poziomach od 575 do 630. Pomiary rozpoczęto w 2010 r. Po zakończeniu eksploatacji komory Ks20/600 lokalną sieć rozbudowano instalując w 2016 r. bazy pomiarowe w komorach rejonu pionu Ks20 na poziomach 660 do 750. System pomiarowy w tym rejonie uzupełniono o bazy zainstalowane w 2014 r. na poziomach 525 i 550 jako element kontroli półki ochronnej nad polem nr 2. Dzięki temu utworzono drugi, po pionie Ks11, ciąg obserwacji zjawisk deformacyjnych w całym profilu głębokościowym centralnej części pola nr 2.

W chwili obecnej monitoring zjawisk deformacyjnych wewnątrz górotworu w polu nr 2 obejmuje wspomniane 2 ciągi w centralnej części pola tj. piony Ks11 i Ks20, rejon tzw. „komór literowych” w SE części pola oraz 9 komór najwyższych poziomów eksploatacyjnych pod półką ochronną – Ryc. 2. Zgromadzony w efekcie corocznych, systematycznych obserwacji bardzo obszerny materiał pomiarowy pozwala na jakościową charakterystykę zjawisk deformacyjnych zachodzących w polu nr 2 oraz uchwycenie ich długoczasowych tendencji (Bieniasz, Pietras, 2017).

Obecną charakterystykę typowego zjawiska deformacyjnego tj. zaciskania pionowego, na podstawie wyników ostatnich kilku lat pomiarów w polu nr 2, prezentują 4 syntetyczne diagramy rozkładu względnej szybkości konwergencji pionowej komór w funkcji głębokości eksploatacji – Ryc.2. Dla najdłużej obserwowanego pionu Ks11 z centralnej części pola widoczny jest wyraźny wzrost szybkości zaciskania pionowego wraz z głębokością od kilku dziesiątych promila/rok na poziomach wyższych, przystopowych, do niemal 2 promil/rok na poziomie 750. W górnej strefie eksploatacji, gdzie wiek komór wynosi ponad 40 lat, dominują szybkości zaciskania od 0,3 do 0,6 promila/rok. Na poziomach 630 do 690 (wiek komór ponad 20 lat) szybkości zaciskania pionowego są nieco większe i wynoszą od 0,7 do 0,9 promila/rok. Natomiast na poziomach 720 i spągowym 750, gdzie wyrobiska są najmłodsze (kilkanaście lat), szybkość zaciskania jest wyraźnie większa i wynosi od 1,3 do 1,7 promila/rok. Analizując cały, niemal 40-letni, okres lokalnych pomiarów deformacji wewnątrz górotworu w pionie Ks11 wyraźnie widoczna jest długoczasowa tendencja do zmniejszania się szybkości ruchu lub do jej stabilizacji na określonym poziomie charakterystycznym dla wieku wyrobiska i jego głębokości. Spostrzeżenia te znalazły potwierdzenie także w opracowaniach innych autorów zajmujących się problemami deformacji poeksploatacyjnych górotworu solnego (Dec i in., 1981; Hejmanowski, 2001).

Dla obserwowanego znacznie krócej (od 1 roku do 7 lat) pionu Ks20, także w centralnej części pola nr 2, widoczny



Ryc. 2. Szybkości przemieszczeń pionowych w funkcji głębokości w polu nr 2.

Fig. 2. Post-exploitation deformations inside field No. 2.

jest wyraźny wzrost szybkości zaciskania pionowego wraz z głębokością od ok. 0,1 promila/rok na poziomach najwyższych 525 i 550 (komory ponad 40-letnie) do ok. 2,8 promila/rok na poziomie 750, gdzie wiek komór wynosi jedynie kilka lat. Cechą charakterystyczną sieci pomiarowej w pionie Ks20 jest umieszczenie kilku stanowisk na danym poziomie, często w tej samej, długiej komorze. Pozwoliło to na wychwycenie znacznych, nawet kilkukrotnych, różnic w wartościach szybkości zaciskania rejestrowanego w niezbyt odległych miejscach poziomu, co pokazano na jednym z diagramów Ryc.2. Wyjaśnienie tego zjawiska wymaga zgromadzenia danych z dłuższego okresu obserwacji.

Na tle przytoczonych wyników z centralnych rejonów pola nr 2 zdecydowanie odróżniają się wykresy szybkości zaciskania pionowego w funkcji czasu dla peryferyjnych tzw. „komór literowych”. W całym przedziale głębokości od 500 do 690 wartości te wynoszą od 0,1 do 0,4 promila/rok, czyli są kilkukrotnie mniejsze niż w centralnej części pola. Nie widać także wpływu typowego czynnika zwiększającej się głębokości eksploatacji na wzrost szybkości zaciskania.

W trakcie trwających jedynie ok. 3 lat obserwacji zaciskania 9 (z ok. 50) komór pod stropową półką ochronną w polu nr 2 stwierdzono niewielkie wartości i zanotowano znaczny przedział zmienności szybkości przemieszczeń pionowych od +0,2 promil/rok do -0,9 promil/rok. Wynika to prawdopodobnie z odmiennej lokalizacji poszczególnych komór w strukturze pola oraz z ich zróżnicowanej wysokości. Krótki czas obserwacji nie pozwala obecnie na pełniejszą analizę zjawiska.

DEFORMACJE GÓROTWORU O CHARAKTERZE GLOBALNYM W OTOCZENIU POLA

Od 2014 r. funkcjonuje w Kopalni dołowa sieć pomiarowa dla kontroli przemieszczeń poeksploatacyjnych w spągu półki ochronnej nad kopalnią założona w wyrobiskach przystropowych przez OBR Chemkop, wg własnego projektu. Przy jej stabilizacji i pomiarze wykorzystano przetestowane wcześniej nowe rozwiązania pomiarowe dotyczących sposobu stabilizacji znaków i techniki obserwacji (Bieniasz, Kurdek, Marcola-Sadowska, 2016). Sieć obserwacyjna ma charakter kompleksowy pozwalający uchwycić deformacje o charakterze globalnym w sąsiedztwie głównych pól eksploatacji, a szczególnie stropowej półki ochronnej nad polami. Przedmiotem pomiarów są:

- przemieszczenia pionowe wnętrza górotworu w rejonie spągu półki ochronnej mierzone metodami niwelacji geometrycznej i trygonometrycznej,
- względne przemieszczenia poziome na wydzielonych liniach pomiarowych prostopadłych do rozciągłości pól eksploatacyjnych mierzone metodą pomiaru zmian odległości punktów bazowych tworzących odcinki o długościach od 102 m do 214 m. Długości odcinków wynikają z lokalnego układu wyrobisk,

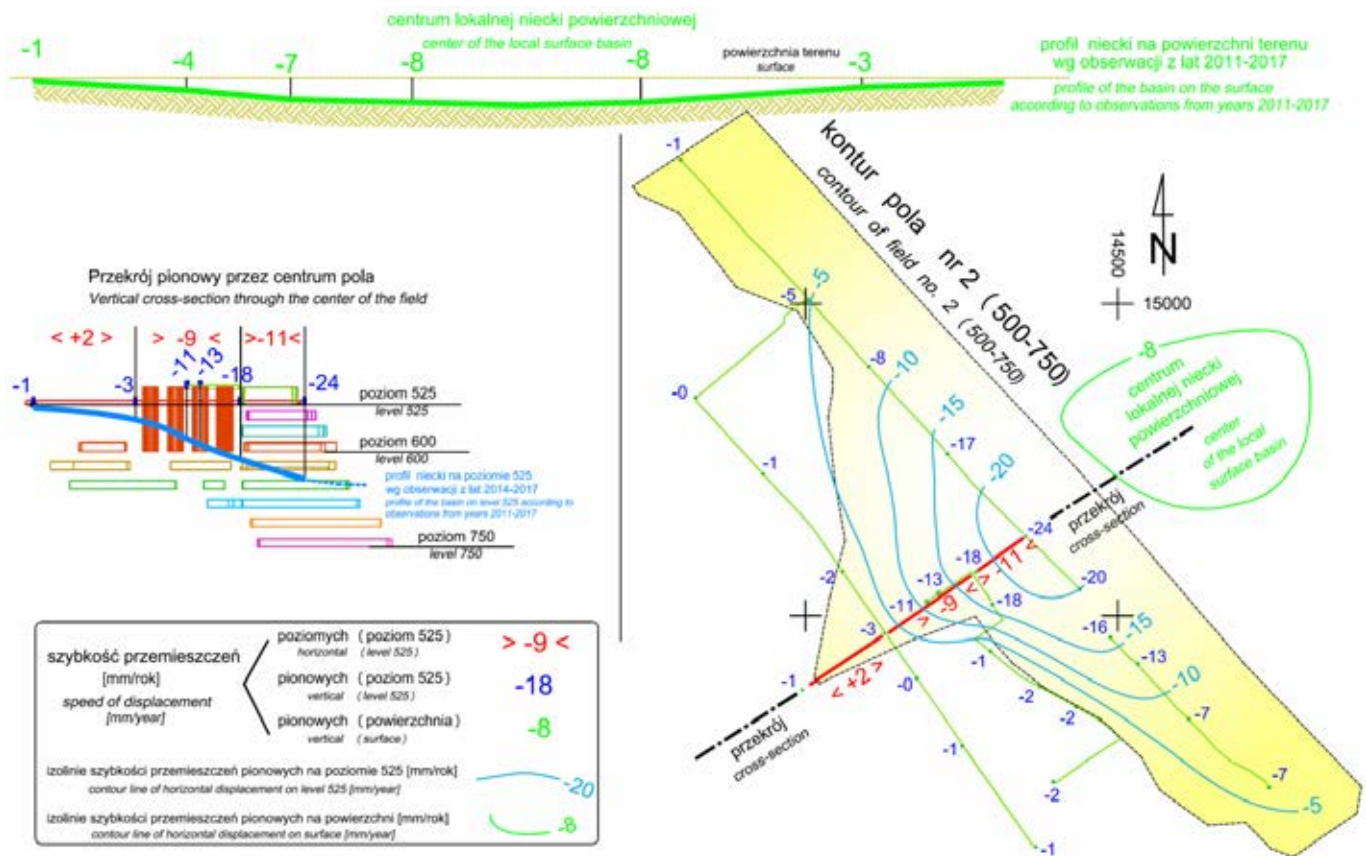
- konwergencja wyrobisk komorowych i chodnikowych w strefie przystropowej eksploatacji mierzona metodą pomiaru zmian długości baz konwergencyjnych techniką wykorzystującą dalmierz laserowy jako urządzenie odczytowe i pomocniczo metodą niwelacyjną.

W 2017 r. wykonano drugi pomiar pełnej sieci, po pomiarze postabilizacyjnym z 2014 r. (Bieniasz, Pietras, 2017). Pozwoliło to na obliczenie wielkości i pierwsze analizy rozkładu przemieszczeń pionowych, poziomych i zaciskania wyrobisk w przystropowej strefie eksploatacji pod ochronną półką stropową za okres 2014-2017 – Ryc.3. Obszar największych szybkości przemieszczeń pionowych (osiadań) stwierdzono w centralnej części pola, gdzie tworzy się lokalne centrum osiadań. Charakteryzują go szybkości przemieszczeń pionowych od ok. -13 mm/rok nad rejonem komór cylindrycznych do niemal -25 mm/rok w sąsiedztwie filara brzeżnego. Znaczna część lokalnej niecki osiadań wewnątrz górotworu formuje się w przestrzeni nieobjętej wyrobiskami i niedostępnej do pomiaru tj. w filarze brzeżnym i poza nim. Wynika to z pochylego ułożenia strefy eksploatacji w polu nr 2.

Wspomniany pomiar sieci pozwolił po raz pierwszy uzyskać wielkości przemieszczeń poziomych wnętrza górotworu. Mierzalne wartości przemieszczeń poziomych zanotowano na linii obserwacyjnej w przekopie przecinającym centralną część pola nr 2 na poziomie 525 i biegnącym od warstwy anhydrytu głównego (rejon wnętrza wysadu) do chodnika przyfilarowego. Odcinek leżący w nieeksploatowanym „cyplu” pola wykazał niewielkie rozciąganie poziome z szybkością +2 mm/rok. Na kolejnym odcinku obejmującym rejon komór cylindrycznych zanotowano poziome zaciskanie o szybkości -9 mm/rok. Trzeci bok segmentu obejmujący strefę komór prostopadłościennych wykazał także zaciskanie poziome z szybkością -11 mm/rok – Ryc. 3.

Czas obserwacji przemieszczeń pionowych i poziomych wynosi jedynie nieco ponad 3 lata, dlatego uzyskane wartości należy traktować jako przybliżone i wymagające potwierdzenia w kolejnych cyklach pomiarowych. Jednocześnie są to niezwykle cenne wyniki pomiarowe dokumentujące ruch przestrzenny górotworu w rejonie koncentracji eksploatacji w polu nr 2 pod ochronną półką stropową.

Uzyskane wartości przemieszczeń pionowych wnętrza górotworu na horyzoncie stropu eksploatacji w polu nr 2 skonfrontowano z wynikami pomiaru sieci powierzchniowej z ostatniego cyklu 2011-2017. Na powierzchni terenu nad rejonem pola nr 2 tworzy się lokalne centrum osiadań, którego lokalizację i zanotowaną szybkość ruchu pokazano na Ryc. 3. Lokalne centrum niecki powierzchniowej powiązane z eksploatacją w polu nr 2 jest przesunięte w stosunku do centrum na poziomie 525 o ok. 200 m w kierunku NE poza granicę wysadu. Wynika to z pochylego ułożenia strefy eksploatacji w polu nr 2 przy NE brzegu wysadu. Rejestrowane obecnie w centrum powierzchniowym szybkości przemieszczeń



Ryc. 3. Szybkość przemieszczeń przestrzennych nad polem nr 2.

Fig. 3. The speed of spatial displacement above field No. 2.

pionowych są około trzykrotnie mniejsze niż na poziomie stropu eksploatacji. Zamieszczone na Ryc.3. profile niecek powierzchniowej i dołowej w centralnym przekroju pola nr 2 pokazują specyfikę strefy deformacji poeksploatacyjnych pochodzących od tego pola. Stosunkowo krótki profil niecki dołowej z poziomu 525 wynika z typowych ograniczeń w obserwacjach zjawisk deformacyjnych wnętrza górotworu pochodzących od układu wyrobisk. Kontrastuje z nim profil niecki powierzchniowej pokazujący jej znaczną rozległość przestrzenną w kierunku NE.

WNIOSKI

W dominującym pod względem wielkości pustek poeksploatacyjnych polu nr 2, trwa ostatnia faza eksploatacji na głębokościach do 750 m ppt. W centralnej części pola systematyczne obserwacje lokalnych deformacji poeksploatacyjnych pustek i calizn trwają od niemal 40 lat. W ostatnich latach znacznie rozszerzono możliwość monitorowania zjawisk deformacyjnych w całym profilu głębokościowym pola w jego częściach; centralnej, przystropowej i skrzydle SE. Generalnie widoczne jest powolne narastanie wartości podstawowych wskaźników deformacyjnych dotyczących zaciskania komór, rozgniatania filarów i rozwarstwiania półek międzypoziomowych, z szybkościami charakterystycznymi dla głębokości położenia w złożu i wieku wyrobisk. W centralnej części pola nr 2 obecna szybkość pionowego zaciska-

nia pustek poeksploatacyjnych zmienia się od dziesiątych części promila/rok na poziomach najwyższych (wyrobiska kilkudziesięcioletnie) do niemal 3 promil/rok na poziomie 750 (wyrobiska kilkuletnie). W peryferyjnych częściach pola nr 2 szybkości konwergencji są kilkukrotnie mniejsze. W długich okresach czasu widoczna jest tendencja do łagodnego spowalniania tempa naturalnych procesów deformacyjnych, lub ich stabilizacji na ustalonym poziomie. Jest to okoliczność korzystna z punktu widzenia statyki calizn nośnych w polu nr 2.

Pomiar wielopoziomowej sieci obserwacji przemieszczeń przestrzennych wnętrza górotworu pozwolił stwierdzić tworzenie się na horyzoncie stropu eksploatacji lokalnej niecki osiadań nad polem nr 2. Charakteryzuje ją szybkość przemieszczeń pionowych w rejonie centrum wynosząca ok. - 25 mm/rok uzyskana z pomiarów w latach 2014-2017. W odpowiadającym mu centrum na powierzchni terenu szybkość osiadań jest trzykrotnie mniejsza i wynosi ok. -8 mm/rok, wg pomiarów z cyklu 2011-2017.

Wchodząca w skład sieci dołowej linia obserwacji przemieszczeń poziomych prostopadła do rozciągłości pola nr 2 pozwoliła uchwycić wielkości przemieszczeń poziomych w centralnej części pola obejmującej strefę komór prostopadłościennych i cylindrycznych. Zanotowano szybkość poziomego zaciskania strefy eksploatacji na poziomie 525 wynoszącą ok. -20 mm/rok.

Analiza danych z pomiarów konwergencji wewnątrz pola uzupełniona wynikami obserwacji przemieszczeń przestrzennych w górotworze na horyzoncie stropu eksploatacji i wynikami niwelacji sieci powierzchniowej pozwala na obiektywną ocenę stanu deformacji pochodzących od eksploatacji w polu nr 2.

Dotychczasowe wyniki pomiarów deformacji w polu nr 2 są zgodne z teoretycznymi rozwiązaniami modelowymi opisującymi przebieg zjawisk poeksploatacyjnych w funkcji czasu oraz z porównywalnymi obserwacjami z innych kopalń soli.

SUMMARY

In a field no. 2, which has the most significant post-mining voids, the last phase of exploitation takes place at depths up to 750 m b.g.l. In the central part of the field, systematic observations of local deformations of post-mining voids and frameworks have been going on for almost 40 years. In recent years, the opportunity to monitor deformation phenomena in the whole depth profile of the field in its parts has been significantly extended. In general the values of basic deformation indicators concerning chamber clamping, crushing of pillars and delamination of inter-level shelves are slowly increasing, with rates characteristic for the depth of location in the deposit and the age of excavations. In the central part of field No. 2, the current speed of vertical closure of post-mining voids varies from tenths of a %/year at the highest levels (several decades) to almost 3 %/ year at 750 (several years). In the peripheral parts of field 2, convergence rates are several times smaller. In long periods of time, there is a tendency to smoothly slow down the rate of natural deformation processes or stabilize them at a set level. This is a favorable circumstance from the point of view of statics of load-bearing cores in the field No. 2

Measurement of the multilevel observation network of spatial displacements of the rock mass allowed to establish the formation of a local subsidence basin over field No. 2 on the ceiling horizon. It is characterized by the speed of vertical displacements in the area of the center, amounting to approx. -25 mm/year obtained from measurements in the years 2014-

2017. In the corresponding surface center, the subsidence rate is three times smaller and approx. -8 mm/year, according to measurements from the 2011-2017.

The horizontal displacement observation line included in the underground network, perpendicular to the length of field No. 2, allowed to capture horizontal displacements in the central part of the field, including the zone of cuboidal and cylindrical chambers. The speed of horizontal crimping of the exploitation level 525 of approx. -20 mm/year was noted.

The analysis of data from convergence measurements within the field, complemented by the results of observations of spatial displacements in the rock mass on the horizon of the exploitation ceiling and the results of the leveling of the surface network, allows for an objective assessment of the deformation intensity from exploitation in field No. 2.

LITERATURA

- BIENIASZ J., CIĄGŁO W., WOJNAR W., 2003. Nowa metoda pomiarów deformacji solnej struktury filarowo-komorowej wykorzystująca dalmierz laserowy. *Geodezja półrocznik AGH*. 9 (2/1): 187-193.
- BIENIASZ J., KURDEK D., MARCOLA-SADOWSKA J., 2016. System kontroli deformacji poeksploatacyjnych górotworu nad polami eksploatacji w KS Kłodawa. *Przegląd solny 2016. Rocznik Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego*. 12: 28-35.
- BIENIASZ J., PIETRAS J., 2017. Wykonanie pomiarów sieci do oceny deformacji stropowej półki ochronnej nad filarowo-komorowym górotworem pola nr 1, 2, 3 z wykorzystaniem pomiarów konwergencyjnych, długościowych i niwelacyjnych. *Archiwum OBR GSChem CHEMKOP Sp. z o.o.* 1145.
- BIENIASZ J., PIETRAS J., 2017. Wykonanie pomiarów konwergencji komór, filarów i półek międzykomorowych w polach eksploatacyjnych nr 1, 2, 3 i 5 Kopalni. *Archiwum OBR GSChem CHEMKOP Sp. z o.o.* 1149.
- DEC T., KOTARSKI E., KOPCZYŃSKI Cz., LENIAK K., 1981. Określenie odkształceń górotworu solnego wysadu kłodawskiego. Wydawnictwo WAT im. Jarosława Dąbrowskiego, Warszawa.
- HEJMANOWSKI R., 2001. Prognozowanie deformacji górotworu i powierzchni terenu na bazie uogólnionej teorii Knothe'go dla złóż surowców stałych, ciekłych i gazowych. Wydawnictwo IG-SMiE PAN.