

Ruch górotworu w kopalniach soli na przykładzie kopalni w Bochni

AGNIESZKA MAJ

Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

Streszczenie

Ruch górotworu obserwowany jest we wszystkich kopalniach soli. Monitoring tego ruchu obejmuje pomiary przemieszczeń pionowych na powierzchni terenu i we wnętrzu kopalni oraz pomiary konwergencji liniowej wyrobisk i odkształceń calizn. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów prowadzonych w kopalni soli Bochnia. Wskazano ogólne tendencje ruchu górotworu, jego zależność od czasu i głębokości. Na podstawie wyników pomiarów przemieszczeń pionowych obserwowanych poziomów kopalnianych obliczono odkształcenia calizn międzypoziomowych.

Słowa kluczowe: ruch górotworu, kopalnie soli, monitoring przemieszczeń, osiadania, konwergencja

1. Wstęp

W kopalniach soli główne niebezpieczeństwo wynika z zagrożenia wodnego i zawałowego, które są powiązane z ruchem górotworu. Ruch ten obserwowany jest przede wszystkim metodami geodezyjnymi, polegającymi na pomiarach przemieszczeń w różnych skalach obserwowanych obiektów we wszystkich kopalniach soli w Polsce. Obligatoryjnie mierzone są przemieszczenia pionowe na powierzchni terenu i konwergencje liniowe w wyrobiskach [Kortas, 2004]. Dodatkowo przy określaniu ruchu górotworu wykorzystywane są wyniki pomiarów przemieszczeń poszczególnych poziomów kopalni oraz pomiary odkształceń w sąsiedztwie wyrobisk, a także inne dostępne dane.

Pomiary obniżen na powierzchni mają charakter globalny – informują o oddziaływaniu całej kopalni, pomiary konwergencji i odkształceń mają charakter lokalny i dostarczają danych o ruchu górotworu w otoczeniu wyrobiska. Analiza wyników prowadzonych obserwacji pozwala na identyfikację zmian prędkości przemieszczeń i określenia długotrwałej tendencji zaciskania kopalni.

2. Ruch górotworu wywołany działalnością górniczą

Wydrążenie wyrobiska podziemnego powoduje naruszenie pierwotnej równowagi statycznej górotworu w jego sąsiedztwie [Florkowska i in., 2016]. Dążenie do nowego stanu równowagi powoduje ruch górotworu. Czynnikiem go wywołującym są nierównoważone siły ciężkości, stąd generalnie ruch odbywa się w kierunku środka wyrobiska. Zjawisko to nazywa się zaciskaniem wyrobiska [Maj, 2012].

W zabytkowych kopalniach soli ma on głównie charakter powolny, z malejącą prędkością w długim okresie. Z prowadzonych badań wynika, że okres zaciskania wyrobisk może trwać od kilkudziesięciu do nawet tysięcy lat [Kortas, 2008]. Efektem ruchu górotworu są deformacje wokół wyrobiska, które ujawniają się w szerokim otoczeniu i sięgają powierzchni terenu. Deformacje wokół wyrobisk mają zwykle charakter ciągły, chociaż w wielowiekowych komorach kopalń historycznych, pozostawionych bez zabezpieczenia, obserwowane są spękania, odspojenia, obwały i zawały stropów.

Przejawem ruchu górotworu w rozmiarze lokalnym są odkształcenia calizn, w obrębie wyrobisk zaciskanie komór, a w skali poszczególnych poziomów kopalni ich przemieszczenia pionowe. W rozmiarze górotworu otaczającego kopalnię ruch górotworu powoduje narastanie osiadań powierzchni terenu.

3. Obserwacje ruchu górotworu

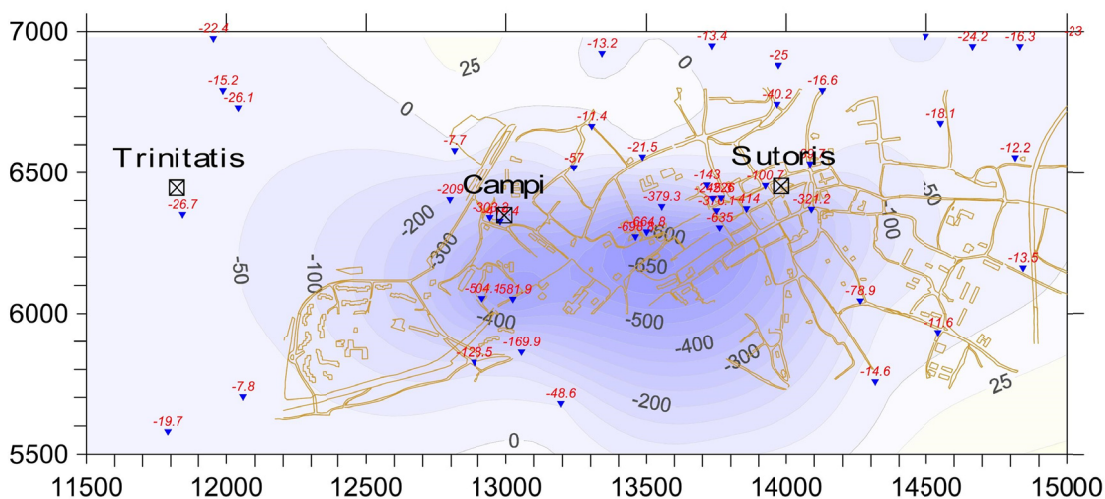
3.1. Pomiary przemieszczeń pionowych powierzchni terenu

Pomiary osiadań powierzchni terenu przeprowadzane są we wszystkich kopalniach soli w Polsce [Maj i Florkowska, 2013]. Wyniki pomiarów dostarczają informacji o ruchu górotworu w skali globalnej – określają wpływ wszystkich wyrobisk na powierzchnię terenu. W procesie deformacji górotworu wykształca się niecka osiadań. Pomimo zakończenia eksploatacji soli obecność wyrobisk stale oddziałuje na powierzchnię a niecka powiększać się będzie do całkowitego zaciśnięcia pustek w górotworze.

W Bochni wysokość reperów w strefie wpływów kopalni na powierzchnię terenu mierzona jest od 1972, obecnie z częstotliwością raz na cztery lata. Wartości obniżenia terenu obliczane są jako różnice wysokości poszczególnych reperów. Pomiary wysokościowe spełniają wymogi niwelacji precyzyjnej II klasy.

Niecka została wyznaczona na podstawie wyników obserwacji 110 reperów. Ma ona formę wydłużoną po rozciągłości złoża, zgodnie z kształtem pola górniczego. Północne zbocze jest bardziej strome a zasięg niecki jest krótszy niż na południu. Centrum niecki nie znajduje się nad wyrobiskami kopalni, ale jest przesunięte na południe, co jest spowodowane upadem złoża w tym kierunku i wynikającym z niego układem wyrobisk.

Maksymalne obserwowane obniżenia terenu od początku prowadzenia pomiarów wynoszą ponad -650 mm (Rys. 1), w okresie wieloletnim ponad -220 mm, a ostatnich kilku latach ok. -50 mm. Zaobserwowano niewielki spadek tempa osiadania terenu. Repery wyznaczające centrum niecki przemieszczają się średnio z prędkością do $-15,5$ mm/rok, a ostatnim okresie do $-12,5$ mm/rok.



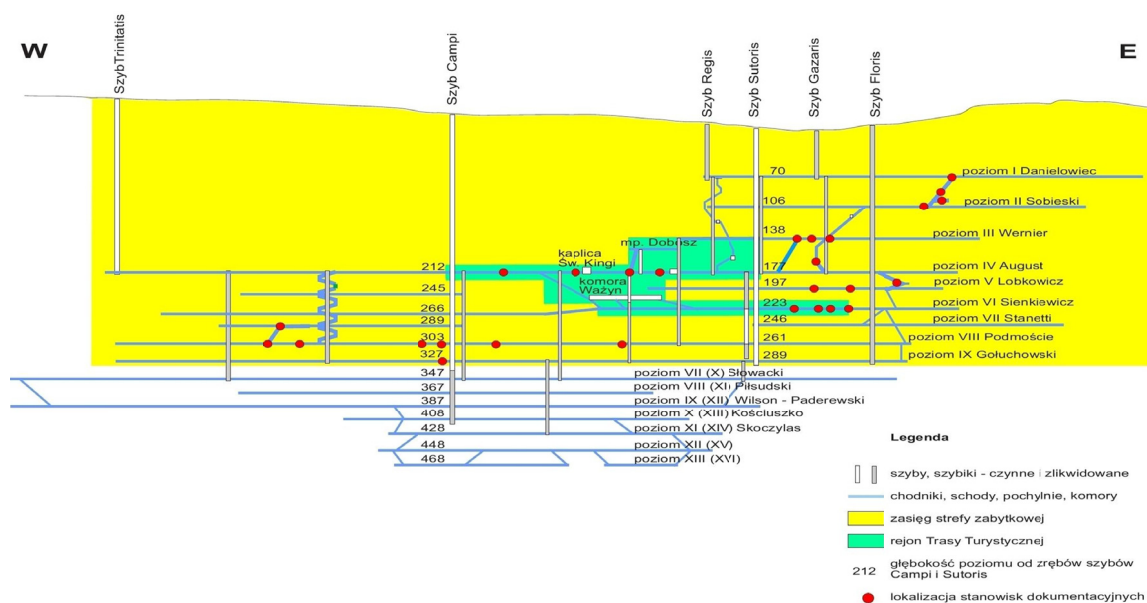
Rys. 1. Niecka osiadań w Bochni od 1972 roku

Repery nad kopalnią w Bochni osiadają z coraz mniejszą prędkością. Kopalnia prowadziła działalność wydobywczą do początku lat 90. XX wieku. Dolne poziomy zostały wypełnione piaskiem z solanką, a wyrobiska niezabytkowe na wyższych poziomach materiałem podsadzkowym.

3.2. Pomiary przemieszczeń pionowych w wyrobiskach podziemnych

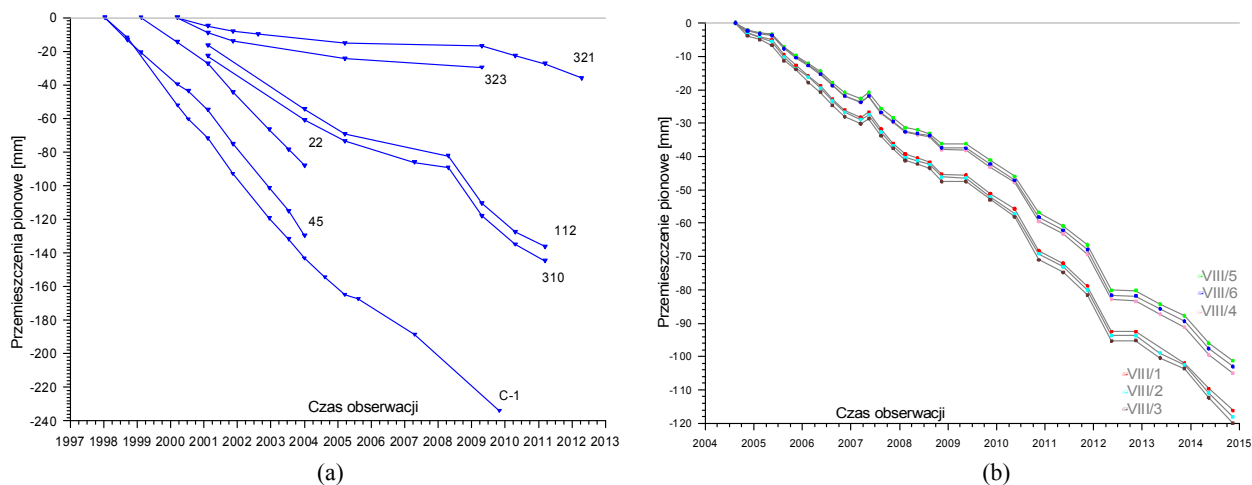
Okresowe pomiary wysokości reperów mierzone są wzdłuż głównych wyrobisk chodnikowych kopalnia w Bochni (Rys. 2), łączących szyby Trynitatis, Campi i Sutoris. Repery zastabilizowane są na trzech poziomach kopalni: Danielowiec – 8 reperów, August (Rys. 3a) – 53 repery i Podmoście – 17 reperów. Do pomiarów włączane są repery w wyrobiskach komorowych (Rys. 3b), znajdujących się na poziomach turystycznych. Pomiary prowadzone są metodą niwelacji precyzyjnej i dowiązywane są do punktów stałych na powierzchni terenu.

Największe przemieszczenia pionowe występują na poziomie Podmoście, a ich maksymalna prędkość w ciągu kilku ostatnich lat przekracza -35 mm/rok w rejonie szybu Campi, malejąc w kierunku szybu Trynitatis i Sutoris. Analiza obniżenia wykazuje prawie liniowy przyrost w czasie. Mniejsza prędkość pionowych przemieszczeń występują na poziomie August (Rys. 3a, 3b), maksymalna w ostatnich latach przekroczyła



Rys. 2. Schemat kopalni soli w Bochni [Charkot, 2016]

–16 mm/rok. Zaznacza się tu niewielkie spowalnianie ruchu. Znacznie mniejsze przemieszczenia zaobserwowano na poziomie Danielowiec, maksymalne ok. –7,5 mm/rok. Charakterystyczne są tu znaczne zmniejszania prędkości obniżenia w czasie. Zróżnicowanie w maksymalnych wartościach obniżenia spowodowane jest różną głębokością wyrobisk. Najniżej położony jest poziom Podmoście, a najwyżej Danielowiec.



Rys. 3. Przesunięcia pionowe na poziomie August (a) i w komórce Manna (b)

Znając wartości przemieszczeń na poszczególnych poziomach można oszacować deformacje górotworu między nimi. Generalnie obserwowane są deformacje rozciągające górotwór, przy czym prędkość rozciągania dochodzi do 0,3 ‰/rok. Oszacowana prędkość deformacji ściskających wynosi ok. –0,2 ‰/rok. Charakter i tempo deformacji są bardzo zróżnicowane. Pomiedzy szybami obserwowane są większe prędkości deformacji niż przy samych szybach.

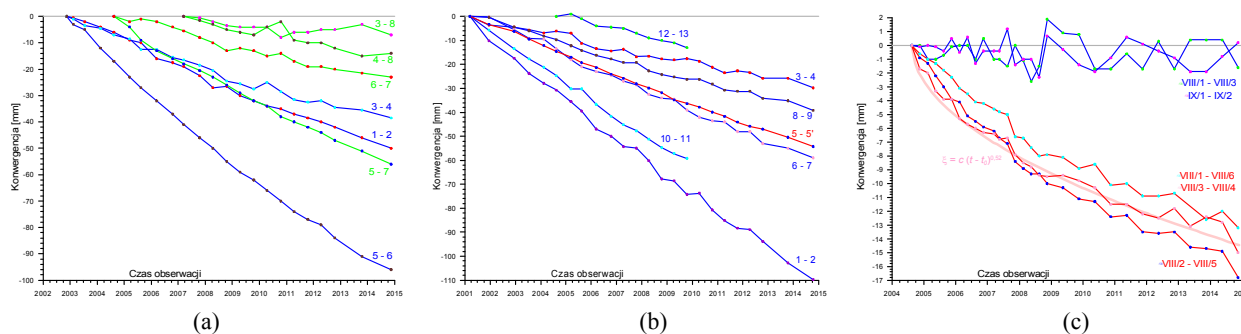
3.3. Pomiary konwergencji

Pomiar konwergencji polega na obserwacji zmiany odległości pomiędzy reperami zastabilizowanymi na przeciwległych ścianach wyrobiska. Rzadko mierzy się też konwergencję na bazach skośnych, między przylegającymi do siebie ścianami. Wyniki pomiarów dają informację o zaciskaniu wyrobiska, a tym samym o lokalnym ruchu górotworu w najbliższym otoczeniu pustki. Pomiary takie wykonywane są specjalnymi konwergometrami, o dokładności kilku setnych milimetra, niwelatorem z łątami precyzyjnymi lub z wyko-

rzystaniem dalmierzy laserowych (w tym przypadku dokładność pomiaru może wynosić kilka milimetrów). Częstotliwość pomiarów wynosi od 4 do 1 razu na rok.

Pomiary konwergencji mają charakter lokalny, zależą bowiem od wielu czynników, takich jak głębokość czy kształt pustki. Generalnie im większa głębokość wyrobiska tym większe zaciskanie. Również miejscowe warunki geologiczno-górnice wokół wyrobiska mają wpływ na wartość pomierzonej konwergencji. Istotne są właściwości mechaniczne skał, na które wpływ ma litologia, czy zawodnienie, obecność innych pustek w sąsiedztwie badanego wyrobiska. Większa wilgotność skał wzmacnia zaciskanie wyrobiska a obecność innych pustek może konwergencję zatrzymać. Oczywiście, ważnym czynnikiem jest też stosowanie obudów, kasztów czy innych zabezpieczeń spowalniających ruch górotworu.

W kopalni Bochnia konwergencja mierzona jest na kilkudziesięciu stacjach pomiarowych w kilkunastu wyrobiskach komorowych (Rys. 4a, 4b, 4c), chodnikowych i szybowych. Każda stacja składa się z kilku baz pomiarowych. W okresie wieloletnim średnia konwergencja w kopalni wynosiła ok. -9 mm/rok. Wpływ różnorodnych czynników na konwergencję, w tym zróżnicowanego usytuowania baz względem centralnej części wyrobiska, zaznaczył się dużą rozbieżnością jej wartości. Największe zaciskanie o wartości przekraczającej -25 mm/rok zarejestrowano na jednej z pionowych baz przy północnym ociosie komory Ważyn, natomiast w komorze Kołdrasa jedna z baz poziomych pomiędzy filarami rozciągała się z niewielką prędkością $0,5$ mm/rok. Z uwagi na duże zróżnicowanie długości baz pomiarowych bardziej miarodajnym wskaźnikiem jest prędkość względnej konwergencji, która wynosiła średnio ok. $-2,5$ ‰/rok, maksymalne zaciskanie wyniosło $-9,6$ ‰/rok.



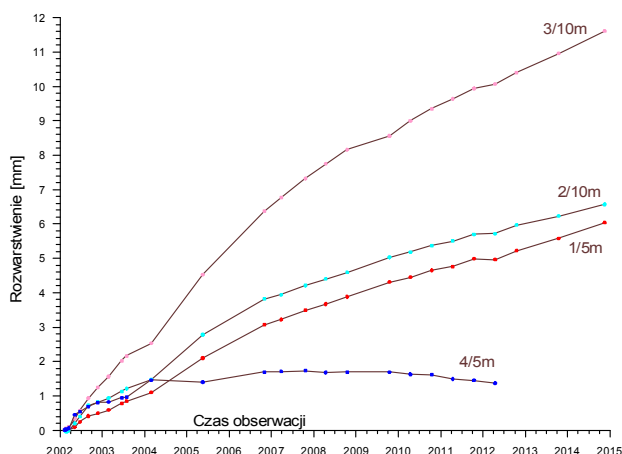
Rys. 4. Konwergencja w czasie w przykładowych komorach: Krystian (a), Stajnia (b) i Manna (c)

Szczególnymi wyrobiskami w kopalni w Bochni są Kaplica Św. Kingi o urozmaiconej bryle z prawie 30-oma bazami i komora Ważyn o cechach wyrobiska chodnikowego z 7 stacjami po 4 bazy pomiarowe. W Kaplicy średnia konwergencja wynosi prawie -6 mm/rok i prawie 2 ‰/rok. Maksymalne zaciskanie dochodzi do -15 mm/rok i $-5,5$ ‰/rok. W komorze Ważyn średnia konwergencja dochodzi do -17 mm/rok i ok. -4 ‰/rok, maksimum to ponad 25 mm/rok i prawie -10 ‰/rok. Widać znaczące różnice w wartościach zaciskania komory Ważyn i Kaplicy Św. Kingi. Głównym czynnikiem odpowiedzialnym za to zróżnicowanie jest głębokość wyrobisk – komora Ważyn położona jest ok. 30 m niżej niż Kaplica.

3.4. Pomiary odkształceń w caliznach

Odkształcenia w kopalni mierzone są ekstensometrami, złożonymi z kilku prętów lub drutów, których końce zastabilizowane są w różnych odległościach od konturu wyrobiska. Przy konturze wyrobiska mocowane jest urządzenie odczytowe. W kopalni Bochnia odczyty wyników pomiarów odkształceń prowadzone są równoległe z pomiarami konwergencji.

Obecnie wyniki pomiarów odkształceń rejestrowane są jedynie w komorze Kristian. Pręty zastabilizowano w środkowej części komory w odległości 5 m i 10 m od północnego i południowego ociosu. Jeden z czujników został prawdopodobnie uszkodzony podczas prac zabezpieczających i obecnie nie jest on dostępny do pomiarów. Z obserwacji wynika, że proces deformacji górotworu w tym miejscu kopalni wykazuje spadek prędkości z upływem czasu (Rys. 5). Mierzone odkształcenia mają mniejsze wartości w ociosie południowym ($1/5$ m i $2/10$ m). Niewielka różnica pomiędzy wynikami z tych dwóch czujników wskazuje na szybkie wygasanie w tym miejscu wpływu wyrobiska na górotwór lub obecność innych wyrobisk za południowym ociosem.



Rys. 5. Wyniki pomiarów odkształceń w komorze Kristian

Dużo bardziej zaawansowana technologia określania odkształceń stosowana jest w zabytkowej kopalni Wieliczka. Ekstensometry zainstalowane są w wielu wyrobiskach komorowych, a urządzenia odczytowe pozwalają na zwiększoną częstotliwość rejestracji ruchu górotworu.

4. Deformacje półek międzypoziomowych

Pomiary niwelacyjne prowadzone w kopalni pozwalają na oszacowanie deformacji górotworu między poziomami Danielowiec i August oraz August i Podmoście. Do analizy wybrano kilkanaście reperów usytuowanych na tych poziomach w rejonie: szybu Sutoris, między Sutoris a Campi, przy szybie Campi i między Campi a Trinitatis (Rys. 2). W tabeli 1 zestawiono dane przyjęte do obliczeń: rzędne wysokościowe reperów

Tab. 1. Obliczenie deformacji górotworu między poziomami kopalni

Rejon	Poziom	Reper	Z_{Rp}	$Z_{\dot{S}r}$	w_p	$w_k - w_p$	$^{poz}\Delta w$	$^{poz}\Delta Z$	$\varepsilon_{\dot{S}r} = \Delta w / \Delta Z$
					w_k				
Jednostki	—	—	[m]		[mm]	[mm]	[mm]	[m]	[‰]
Sutoris	Daniel.	101	143	143	-11,60	-29,00	219,53	108,10	2,03
					-40,60				
	August	321	34,9	34,9	-106,72	-248,53			
					-355,25				
Podm.	511	-48,8	-48,8	-140,00	-350,00	101,47	83,70	1,21	
				-490,00					
Sutoris-Campi	August	22/45	29,6	29,6	-94,00	-235,00	-186,00	82,90	-2,24
	Podm.	507a	-53,3	-53,3	-19,60				
Campi	August	301	35	34,65	-251,33	-219,91	90,72	91,00	1,00
					-485,54				
	C-1	34,3	-118,48	-324,09					
	Podm.	502	-56,3	-56,35	-246,73	-310,63			
Podm.	505	-56,4	-56,35	-517,99	-350,00		-700,00		
Campi - Trinitatis	August	112	30	30	-48,40	-115,32	234,68	83,30	2,82
					-163,72				
	Podm.	504	-53,3	-53,3	-140,00	-350,00			

Z_{Rp} i ich średnie Z_{sr} , przemieszczenia pionowe początkowe w_p i końcowe w_k (z okresu dziesięcioletniego), przyrosty przemieszczeń $w_k - w_p$, różnice przemieszczeń między górnym a dolnym poziomem $^{poz}\Delta w$, różnice rzędnych wysokościowych poziomów kopalnianych $^{poz}\Delta Z$ oraz deformacje $\varepsilon_{sr} = ^{poz}\Delta w / ^{poz}\Delta Z$ w okresie 10 lat.

Z analizy wynika, że nad poziomem August przy szybie Sutoris powstają deformacje rozciągające z prędkością +0,20 %/rok. Między poziomem August a Podmoście przy szybie Sutoris rozciągania osiągały wartość +0,12 %/rok, w środku między szybami Sutoris i Campi przechodzą w ściskania z prędkością -0,22 %/rok, przy szybie Campi pojawiają się znów rozciągania o wartości +0,10 %/rok, a 400 m za szybem Campi w kierunku szybu Trynitytis zwiększają się do +0,28 %/rok. Takie tempo deformacji nie jest równomierne w półkach międzypoziomowych, zatem w pewnych miejscach może być znacznie większe od oszacowanych tu wartości.

5. Podsumowanie

Wyniki monitoringu ruchu górotworu w Bochni odzwierciedlają procesy zachodzące w górotworze solnym i są zasadniczo zgodne z tymi, które obserwuje się w innych kopalniach soli:

- osiadania, przemieszczenia, konwergencje i odkształcenia zwiększają się z czasem;
- ruch górotworu ma charakter nieliniowy, obserwowany jest niewielki spadek prędkości ruchu;
- wskaźniki ruchu górotworu rosną z głębokością.

Wyniki monitoringu ruchu górotworu są niezbędne do określenia warunków bezpieczeństwa w kopalni. Jest to szczególnie ważne w historycznych kopalniach, gdzie liczba turystów stale rośnie – w 2017 roku wyniosła ponad 190 tys. osób.

Praca powstała w 2017 roku w ramach prac statutowych realizowanych w Instytucie Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Literatura

- Charkot J., 2016: *Uwarunkowania historyczne i prawno-organizacyjne górniczo-konserwatorskiego zabezpieczenia zabytkowych wyrobisk kopalni bocheńskiej*. [W:] Studia i materiały do dziejów żup solnych w Polsce. Tom XXXI. Muzeum Żup Krakowskich, Wieliczka.
- Florkowska L., Bryt-Nitarska I., Maj A., 2016: *Szkody górnicze w budynkach. Zarys problematyki*. Archives of Mining Sciences. Monografia. Nr 17.
- Kortas G., 2004: *Ruch górotworu i powierzchni w otoczeniu zabytkowych kopalń soli*. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- Kortas G., 2008: *Ruch górotworu w rejonie wysadów solnych*. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- Maj A., 2012: *Convergence of gallery workings in underground salt mines*. Archives of Mining Sciences. Monograph No. 14.
- Maj A., Florkowska L., 2013: *Obserwacja oddziaływania wyrobisk na powierzchnię terenu w warunkach kopalń soli*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Vol. 15, No. 3-4.

Rock-Mass Movement in Salt Mines, Using the Example of the Bochnia Salt Mine

Abstract

The rock-mass movement is observed in all salt mines. The monitoring of this movement includes measurements of vertical displacements on the surface and inside the mine as well as measurements of linear convergence of mine workings and deformations of pillars. The work presents the results of the measurements carried out in the Bochnia salt mine. The general tendencies of the rock mass movement, its dependence on time and depth were indicated. On the basis of the results of vertical displacement measurements of observed mine levels, deformations of the inter-level shelves were calculated.

Keywords: rock-mass movement, salt mines, displacement monitoring, subsidence, convergence