

Kinematyka konwergencji górotworu solnego oraz przemieszczeń punktów w rejonie szybu Kinga KS „Wieliczka” S.A.

**Kinematics of convergence of the rock mass and displacements of benchmarks
in the area of the shaft St. Kinga at the salt mine “Wieliczka” S.A.**



Dr hab. inż. Ryszard Hejmanowski, Dr inż. Agnieszka Malinowska)
Prof AGH*)*



*Dr hab. inż.
Kajetan d'Obyrn ***)*

Treść: Pomiary konwergencji stosowane są w górotworze celem badania i lokalizacji miejsc szczególnie zagrożonych naprężeniami występującymi wskutek koncentracji eksploatacji w danym rejonie lub szczególnych właściwości geologicznych górotworu. Wyniki takich pomiarów mają zatem kluczowe znaczenie dla oceny zagrożeń geomechanicznych w kopalniach głębinowych. Stanowią również podstawę dla budowy i estymacji parametrów modeli teoretycznych. Analiza wyników pomiarów konwergencji w odniesieniu do całego masywu naruszonego górotworu jest niezwykle złożona i może być obciążona znacznymi błędami. Zebrano i przeanalizowano wyniki wieloletnich wysokościowych pomiarów geodezyjnych. Zgromadzono także wyniki dostępnych pomiarów konwergencji z kilku komór solnych. W artykule podjęto próbę prowadzenia analizy łącznie z oceną ruchów punktów wysokościowych w wyrobiskach kopalnianych i rurze szybowej. Analiza przestrzenna zestawiająca całość wyników z sytuacją górniczo-geologiczną pozwala na łatwiejsze i obciążone mniejszą niepewnością wnioskowanie. Tego typu analizy pozwalają na lokalizację związków przyczynowo-skutkowych pomiędzy konwergencją komór a przemieszczeniami punktów, a tym samym na lokalizację zagrożonych rejonów kopalni. Wdrożenie geograficznych systemów informacyjnych (GIS) pozwoliło na wykazanie celowości tego typu analiz.

Abstract: One of the main goals of convergence measurements in underground mining is assessing the risks related to caves deformations. Those deformations might be caused by the concentration of mining activities in a given region or by specific geological conditions. The results of such measurements are crucial for assessing the stability of caves in underground mines. The results of measurements are also used for improving the parameters and accuracy of theoretical models. The analysis of the convergence measurements and underground leveling is an extremely complex process, burdened with significant error. The results of the leveling and convergence measurements were gathered in the database. The presented research was focused on the analysis of the movements in mine chambers and in the shaft. The spatial analysis based on mining and geological factors can be used for defining the cause-and-effect relationships between the convergence of the chambers and the displacements of the measurement point. In this way the endangered areas could be established. Implementing of the geographical information systems (GIS) in the research enabled to work out complex analysis.

Słowa kluczowe:

konwergencja wyrobisk, pomiary geodezyjne, deformacje górotworu, górotwór solny

Key words:

convergence of the salt chambers, surveying, deformation of the rock mass, salt rock mass

1. Wprowadzenie

Jednym z podstawowych problemów w kopalniach głębinowych są ruchy górotworu spowodowane jego naruszeniem

przez roboty górnicze. Przemieszczenia i deformacje oraz ich rozkład w masywie górotworu mają zasadnicze znaczenie dla bezpieczeństwa ludzi pracujących pod ziemią, czy jak w przypadku kopalni Wieliczka – zwiedzających historyczne, unikalne w skali światowej wyrobiska. Ruchy górotworu przenoszą się aż do powierzchni, powodując przekształcenia rzeźby terenu w postaci powstających niecek obniżeniowych,

*) AGH w Krakowie **) Kopalnia Soli „Wieliczka” S.A., Wieliczka***) Politechnika Krakowska

zapadlisk, bądź innych zjawisk zagrażających użytkownikom powierzchni. Przemieszczenia i deformacje górotworu są efektem naprężeń i mogą być mierzone poprzez pomiar konwergencji, czyli zmiany odległości bazy pomiarowej np. między ociosami wyrobiska. Analiza tych ruchów jest niezwykle złożona i często mało wiarygodna ze względu na brak, lub zbyt małą liczbę danych pomiarowych pozyskanych bezpośrednio w górotworze i co za tym idzie, trudność opisu zjawisk zachodzących w górotworze [8]. Wiedza na temat faktycznego przebiegu ruchów górotworu powinna być budowana w oparciu o monitoring *in situ*. Wyniki takiego monitoringu mogą stanowić następnie podstawę do budowy modeli matematycznych służących do predykcji przemieszczeń i deformacji górotworu [7]. W kopalniach, w których występują znaczne zagrożenia zjawiskami dynamicznymi, pomiary konwergencji wyrobisk i chodników wykonywane są rutynowo, nawet w interwale dobowym [4]. W kopalniach soli, ze względu na znacznie mniejszą prędkość konwergencji, pomiary wykonywane są w odstępach kilkuletnich [1, 5, 6]. Do monitoringu górotworu należą również inne pomiary wykonywane przez kopalnianą służbę mierniczą. Są to głównie pomiary wysokościowe reperów zlokalizowanych w poszczególnych wyrobiskach kopalni oraz pomiary sytuacyjno-wysokościowe wykonywane celem inwentaryzacji wyrobisk. Obraz pola przemieszczeń w rejonie kopalni dopełniają powierzchniowe pomiary wysokościowe i sytuacyjno-wysokościowe prowadzone zazwyczaj w osnowach geodezyjnych również zakładanych i mierzonych przez kopalnianą służbę mierniczą [5].

Interpretacja wyników pomiarów prowadzonych w podziemnych wyrobiskach górniczych wymaga dużego doświadczenia oraz umiejętności analitycznych. Celem jest poszukiwanie związków przyczynowo-skutkowych zachodzących między aktywnością górniczą (wykonywaniem nowych wyrobisk, przebudową starych, kotwieniem, podsadzaniem i likwidacją wyrobisk zagrożonych) a ruchem górotworu. Umiejętność uogólnienia wyników interpretacji pozwala na eliminację zagrożeń, a także na właściwe projektowanie przyszłych robót górniczych i profilaktycznych [9]. W tym sensie zadania wykonywane przez służbę mierniczą należy zaliczać do podstawowych działań z zakresu bezpieczeństwa kopalni.

W niniejszym artykule podjęto próbę pokazania, w jaki sposób możliwe jest budowanie uogólnionej wiedzy o ruchach górotworu w oparciu o wyniki pomiarów poprzez

równoczesną analizę konwergencji i przemieszczeń rejestrowanych w górotworze, w rejonie jednego z szybów kopalni soli „Wieliczka” S.A. Analiza dotyczyła szczególnie bezpieczeństwa samego szybu.

2. Charakterystyka warunków geologiczno-górnich w rejonie szybu św. Kingi

Szyb św. Kingi zlokalizowany jest w centralnej części dawnego obszaru górniczego kopalni soli „Wieliczka” S.A. Został wydrążony w połowie XIX w.

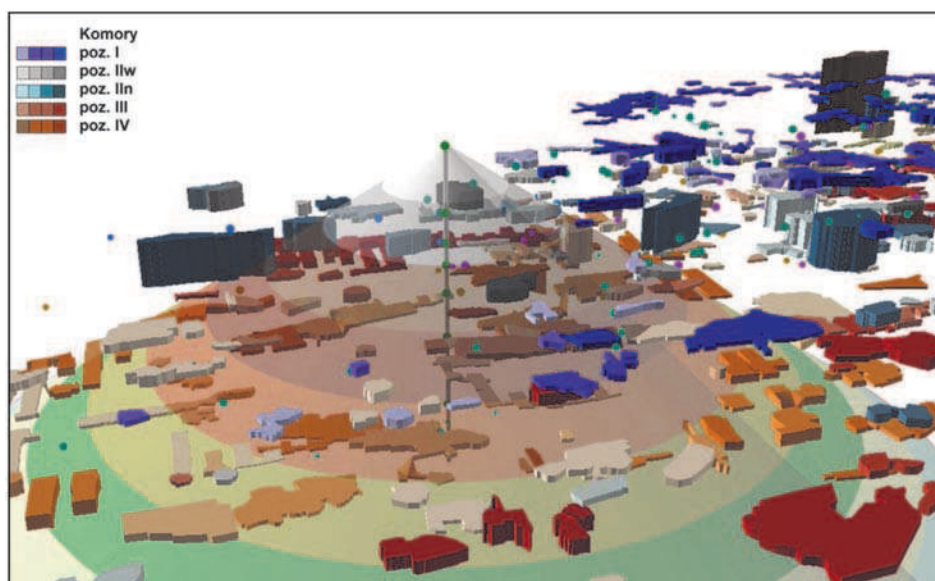
2.1. Warunki geologiczne

W rejonie szybu miąższość czwartorzędu waha się od 5,5 m do 6,6 m. W samym szybie utwory te występują do głębokości 13,5 m. Nad złożem brylowym występuje praktycznie nieprzepuszczalna czapa gipsowa z łałami marglistymi. Mioceńskie złoża soli posiada dwudzielną budowę. Górna, bryłowa część złoża zbudowana jest ze skał płonnych występujących w postaci kryształów halitu, tkwiących w łałach i łałomarglach i określana jest jako zuber solny. W bezstrukturalnej masie skał płonnych znajdują się bryły soli o objętości od 1 do ponad 100 000 m³, które były przedmiotem eksploatacji. Dolna pokładowa część złoża zbudowana jest z naprzemianległych warstw soli oraz łałów i anhydrytów. Złoże pokładowe jest bardzo silnie sfaldowane przez przesuwające się w kierunku północnym Karpaty i tworzy trzy łuski tektoniczne.

W rejonie szybu nie występują istotne zagrożenia hydrogeologiczne, nie rejestrowano istotnych wycieków wody w rurze szybowej. Nieliczne, słabe wycieki kroplowe w głębszej partii szybu związane są z wodami technologicznymi.

2.2. Eksploatacja górnicza w rejonie szybu

Analiza dokonanej eksploatacji górniczej w rejonie szybu św. Kingi prowadzona była głównie dla wyrobisk zlokalizowanych w części górotworu objętej tzw. głównymi wpływami (rys. 1). Nie oznacza to jednak odcięcia pozostałych wyrobisk. Na rysunku 1. gradacja barw oznacza stopień podsadzania poszczególnych komór.



Rys. 1. Rozmieszczenie komór w rejonie szybu św. Kingi w poziomach I-IV
Fig. 1. Salt chambers in the area of the shaft St. Kinga at levels I-IV

Poziom I

W sąsiedztwie rury szybowej brak jest wyrobisk eksploatacyjnych na poziomie I.

Poziom II wyższy

Na poziomie IIw eksploatacja realizowana była głównie na północ od rury szybu Kinga (rys. 1).

Poziom II niższy

Komory znajdujące się na poziomie II n mogą mieć wpływ na rurę szybową. Biorąc pod uwagę głębokość, na której zalegają te wyrobiska ustalono, że w odległości do 170 m od rury szybowej komory mogą generować deformacje mające wpływ na szyb Kinga. W tej strefie znajduje się 17 komór. Część komór znajdująca się na północny-wschód od szybu eksploatowana była metodą filarowo-komorową. Wyrobiska te znajdują się na zmiennej głębokości.

Poziom III

Wydobycie na poziomie III realizowane było częściowo metodą komorowo-filarową i częściowo metodą komorową. Większość wyrobisk znajduje się na stałej głębokości. Najintensywniejsza eksploatacja była prowadzona na północ od rury szybowej. W strefie buforowej wokół rury szybowej znajdują się 63 komory mogące mieć wpływ na deformacje w rejonie szybu Kinga.

Poziom IV

Sytuacja górnicza na poziomie IV jest bardzo złożona. Intensywna eksploatacja prowadzona była na wielu głębokościach. Ponadto, gabaryty wyrobisk znajdujących się na tym poziomie są znaczne.

Poziomy poniżej poziomu IV

Eksploatacja złoża pokładowego prowadzona była aż do poziomu VIII. Z uwagi na brak wyników pomiarów konwergencji oraz pomiarów wysokościowych nie prezentowano poziomów poniżej IV.

Wyrobiska w tych poziomach zostały praktycznie w całości podsadzone i zabezpieczone. Stąd dostęp do nich jest obecnie ograniczony bądź w ogóle niemożliwy.

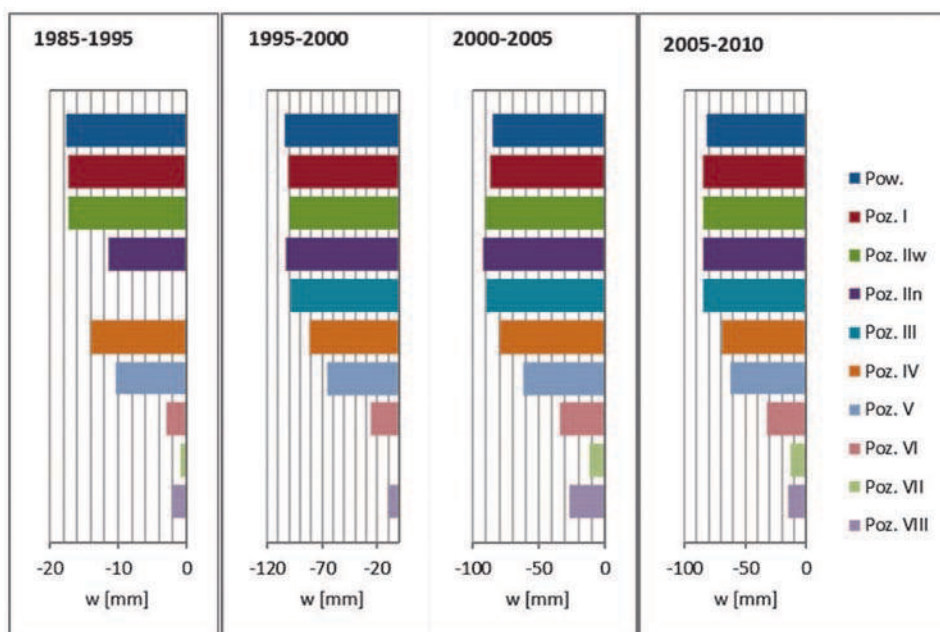
3. Charakterystyka pomiarów geodezyjnych

Regularne pomiary w rurze szybowej prowadzono od 1986 roku [9]. Natomiast pomiary historyczne wykonywane w rejonie lokalizacji szybu za okres 1926-1984 wykazały całkowite obniżenia przekraczające 0,9 m. Świadczyłyby to o średniej prędkości osiadania w granicach 15,5 mm/rok. O współczesnych przemieszczeniach pionowych zrębu szybu świadczą osiadania reperu zlokalizowanego na budynku nadszycia szybu św. Kingi. Analiza wykonana w artykule obejmuje przemieszczenia udokumentowane od 1985 r. W okresie 1985-2010 punkt ten obniżył się o 0,48 m (19,2 mm/rok). Prędkość obniżeń tego punktu nie była jednak stała, w latach 1990-2000 dochodziła do 23 mm/rok. Po roku 2005 nastąpiło wyraźne spowolnienie przemieszczeń pionowych.

Osiadania punktów w górotworze wzdłuż rury szybowej wykazywały podobne tendencje jak punkt powierzchniowy. Punkt 1-1 zlokalizowany na poziomie I obniżył się od 1985 r. do 2010 r. o 0,48 m (19,2 mm/r), a punkt 2w-1 na poziomie IIw o 0,49 m. Punkt 2n-2s na poziomie II n w tym samym okresie obniżył się o 0,504 m (20,2 mm/rok). Interesujące jest zmniejszanie się obniżeń w miarę wzrostu głębokości. Punkty obserwowane na poziomach niższych wykazywały znacznie mniejsze prędkości obniżeń i mniejsze wartości maksymalnych przemieszczeń pionowych. Przykładowo, na poziomie V punkt 5-1 obniżył się w latach 1985-2010 o 0,351 m (14 mm/rok). Generalnie tendencja ruchów pionowych w szybie Kinga wskazuje na malejącą prędkość osiadań począwszy od poziomu IV do VI. Poziomy VII i VIII praktycznie nie wykazują przemieszczeń pionowych. Na rysunku 2 przedstawiono przyrosty przemieszczeń pionowych w szybie w okresach 1985-2010.

Jak widać, przyrosty osiadań wyraźnie zmalały po 2005 r. I ustabilizowały się w granicach ok. 80 mm/5 lat. Ponadto z wykresów na rysunku 2 można wnioskować, że największe przyrosty przemieszczeń pionowych mają miejsce w strefie do poziomu V.

Pomiary wysokościowe poza reperami zlokalizowanymi w rurze szybowej prowadzone są w osnowie kopalnianej o gęstości zróżnicowanej na różnych poziomach w górotworze



Rys. 2. Przyrosty przemieszczeń pionowych w szybie św. Kingi
Fig. 2. Increments of subsidence in the shaft of St. Kinga

(Rys. 3, 4). Kolory poszczególnych punktów oznaczają odpowiedni poziom kopalni, a ich średnice obrazują dynamikę zmian przemieszczeń pionowych.

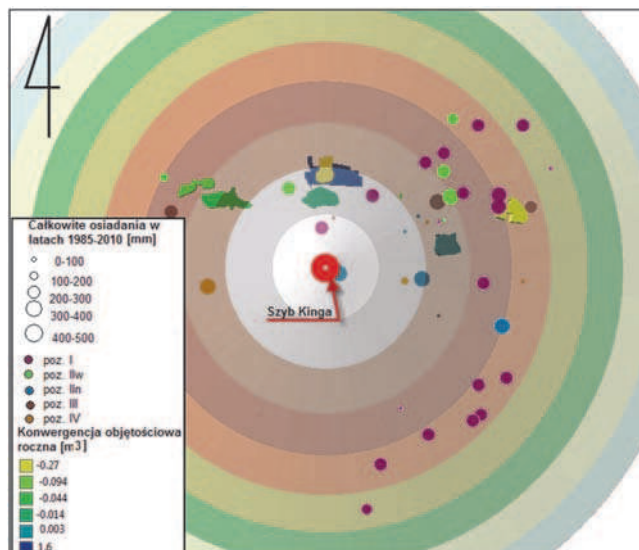
Na poziomie I pomiary wysokościowe obejmują 96 punktów. W zasięgu oddziaływania górotworu na rurę szybową znajduje się mała liczba punktów pomiarowych. Wynika to z faktu, że w rejonie rury szybu św. Kingi na tym poziomie znajduje się mało komór. Na poziomie IIw znajduje się 29 punktów niwelacyjnych. W strefie przy szybowej zlokalizowanych jest również niewiele punktów. Dopiero na poziomie IIIn w rejonie szybu prowadzona była intensywniejsza eksploatacja. Na poziomie IIIn. znajduje się 48 punktów pomiarowych. W rejonie strefy wpływów zlokalizowanych jest kilka punktów pomiarowych. Na poziomie III prowadzono pomiary niwelacyjne obejmujące 74 punkty pomiarowe. Na tym poziomie w rejonie szybu prowadzona była intensywna eksploatacja. Na poziomie IV prowadzono niwelację na 53 punktach. Generalnie w rejonie rury szybowej znajduje się stosunkowo niewiele punktów niwelacyjnych.

4. Pomiary konwergencji wyrobisk komorowych

Pomiary konwergencji w rejonie szybu Kinga realizowane są od 1997 roku. Należy jednak podkreślić, że w niektórych komorach pomiary te prowadzone były od 2000 roku. Celem pomiarów jest monitoring ruchów górotworu w zabytkowej, centralnej części kopalni. Na rysunku 3 zaprezentowano lokalizację wyrobisk objętych pomiarami konwergencji w rejonie szybu św. Kingi w rzucie pionowym.

To samo przedstawia w rzucie aksonometrycznym rysunek 4. Pozwala to lepiej analizować wzajemne zależności między lokalizacją komór, ich konwergencją a ruchami pionowymi górotworu i samego szybu.

Z analizy wynika, że spośród znacznej ilości komór zlokalizowanych w pobliżu szybu św. Kingi (por. rys. 1) jedynie niewielka ilość objęta została pomiarami konwergencji. Komory objęte pomiarami zlokalizowane są głównie na poziomie IIw i III (por. rys. 3, 4). Z uwagi na rozmieszczenie baz konwergometrów, które często jest warunkowane lokalnymi ograniczeniami, istnieją problemy z przeliczaniem konwergencji liniowej na konwergencję względną, objętościową. Chodzi tu głównie o konieczność uogólnienia kształtu komory dla celów obliczeń objętości. Próba przeliczenia w oparciu o pewne założenia uogólniające pozwala na porównywanie



Rys. 3. Lokalizacja komór objętych pomiarem konwergencji w rejonie szybu św. Kingi

Fig. 3. Location of the salt chambers covered by the measurement of convergence in the area of the shaft St. Kinga

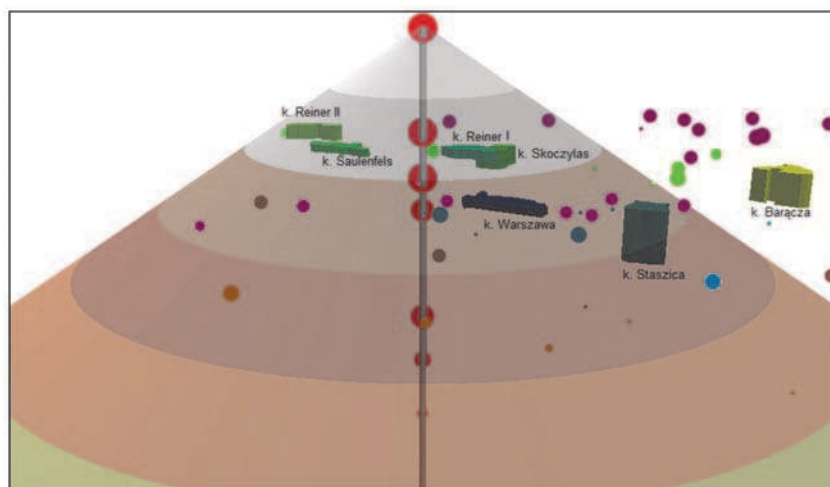
wzajemne konwergencji objętościowej – rocznej wielu komór, co zaprezentowano w tabeli (tab. 1).

Tablica 1. Konwergencja objętościowa, roczna, m³/rok w rejonie szybu św. Kingi

Table 1. Annual volumetric convergence [in m³/y] in the area of the shaft St. Kinga

Poz.	Nr Inw.	Nazwa	97_98	98_00	00_05	05_10
2w	IIw/1	k.Rainer I dolna			-0.12	-0.02
2w	IIw/3	k.Skoczylas				-0.22
2w	IIw/6	k.Saulenfles				-0.47
2w	IIw/7	k.Rainer	-0.02	0	-0.06	-0.05
2n	IIIn/209	k.Barącza			-1.38	-1.34
3	III/71	k.Staszica		0.01	-0.01	0.04
3	III/117	k.Warszawa				8.34

Według danych pomiarowych zawartych w tabeli 1. można mieć pewne wątpliwości co do konwergencji komory



Rys. 4. Lokalizacja komór objętych pomiarem konwergencji w rejonie szybu św. Kingi – widok przestrzenny

Fig. 4. Location of the salt chambers covered by the measurement of convergence in the area of the shaft St. Kinga – 3D view

Warszawa. Wartość dodatnia świadczy o dywergencji, zatem rozszerzaniu się komory. Przykład ten pokazuje, że oparcie się na zbyt małej liczbie baz pomiarowych może prowadzić do błędnych wniosków.

Z przedstawionych wyników pomiarów konwergencji wysnuć można także ogólne spostrzeżenia co do kinematyki procesu ruchów górotworu. Największe wartości konwergencji występowały w komorze Barączka (1,38 m³/rok w latach 2000-2005). Wyraźnie można zauważyć, że średnice punktów zlokalizowanych na poz. I i IIw, w rejonie tej komory (por. rys. 3 i 4) są większe niż punktów w innych rejonach. Czyli obniżenia tych punktów były większe niż pozostałych. Widać zatem jakościową i ilościową korelację konwergencji komory i przemieszczeń punktów w jej rejonie.

5. Podsumowanie

Zaprezentowany sposób podejścia do analizy ruchów górotworu wskazuje na możliwość stosowania z powodzeniem badań opierających się na następujących zasadach:

- lokalizacja baz konwergometrów w komorach, których monitoring jest uzasadniony istnieniem czynników potencjalnie zagrażających stabilności komory, obiektu istotnego dla kopalni lub powierzchni terenu,
- stosowanie pomiarów konwergencji w sposób umożliwiający również wyznaczanie konwergencji objętościowej, gdyż daje to możliwość porównywania zmian konwergencji różnych komór,
- lokalizacja punktów wysokościowych w rejonach ww. typów komór,
- pomiary geodezyjne w osnowach powierzchniowych i kopalnianych w okresach pozwalających na prowadzenie analiz przemieszczeń w pełnym zakresie czasowo-przestrzennym,
- integracja wyników pomiarów w systemach geoinformacyjnych, w sposób zaprezentowany w artykule.

Pomiary konwergencji w kopalni soli „Wieliczka” S.A. wykonywane są od wielu lat, jednak technologie pomiarowe, a co za tym idzie dokładności stale są doskonalone. Zastosowanie technologii skaningu laserowego daje pewne możliwości w aspekcie dokumentacji chwilowej objętości komory, nie zastąpi jednak pomiarów konwergencji z uwagi na istniejące wymagania dokładnościowe. Niewątpliwym wyzwaniem jest włączanie w monitoring konwergencji coraz większej liczby wyrobisk komorowych. Dzięki temu pozyskiwano by informacje o zachowaniu się górotworu, np. w rejonach intensywnych prac zabezpieczających, czy nowych tras turystycznych.

Podkreślić należy, że kompleksowe podejście do analiz ruchów górotworu (tj. konwergencja, przemieszczenia punktów osnow geodezyjnych), zaprezentowane w niniejszej pracy daje:

- możliwość wdrożenia w informatycznych systemach ostrzegania o możliwości wystąpienia potencjalnych zagrożeń wynikających ze zmian prędkości konwergencji i przemieszczeń punktów,
- pozwala na lepsze rozpoznanie dynamiki górotworu w fazie projektowania prac zabezpieczających,
- więcej informacji przydatnych w prognozowaniu przemieszczeń i deformacji górotworu i powierzchni terenu.

Literatura

1. *Bieniasz, J., Wojnar, W.*: Zarys historii pomiarów i wybrane wyniki obserwacji zjawiska konwergencji wyrobisk w pokładowych złożach soli. „Gospodarka Surowcami Mineralnymi” 2007, t. 23, z.spec., s.133-142.
2. *D’Obyrn, K.*: Likwidacja pustek poeksploatacyjnych w otworowej kopalni soli, jako metoda ochrony powierzchni terenu. *Przeгляд Górnicy*, z.10, ISSN 0033-216X, 2010. str. 67-72
3. *d’Obyrn K., Hydzik-Wiśniewska J.*: Ocena ruchów górotworu na podstawie konwergencji w wybranych komorach Trasy Turystycznej Kopalni Soli „Wieliczka”, „Budownictwo Górnicze i Tunelowe” 2014, nr 1, rok XX, str. 1-7.
4. *Hejmanowski R.*: Kinematyka deformacji górotworu i powierzchni terenu. Wydawnictwa Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej. Kraków, s.118.
5. *Hejmanowski R., Malinowska A., Kwinta, A., Ulmaniec P.*: Rock-mass stability in salt mines – risk factors. 12 Geokinematischer Tag. Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg. Wissenschaftliche Hefte. 2011, s. 296–302.
6. *Kortas G.* (red.): Ruch górotworu i powierzchni w otoczeniu zabytkowych kopalń soli. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, t. 7, nr 3-4, Kraków 2004.
7. *Moreira N., Miranda T., Pinheiro M., Fernandes P., Dias D., Costa L., Sena-Cruz J.*: Back analysis of geomechanical parameters in underground works using an Evolution Strategy algorithm. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 33, January 2013, 2013. Pages 143-158.
8. *Pytel W., Świtoń J.*: Assessment of the impact of Geomechanical parameters variability on underground excavations stability using response surface method. *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. XXXV, No. 1, 2013, pp. 183-194. Wrocław 2013.
9. Wyniki obserwacji geodezyjnych w rejonie szybu Św. Kingi. Archiwum Działu Mierniczego Kopalni Soli Wieliczka (dokumenty niepublikowane kopalni).