



Koncepcja wdrożenia sieci wielofunkcyjnej do oceny deformacji górotworu solnego w Kopalni Soli „Kłodawa” S.A.

A conceptual framework for implementing a multifunctional monitoring network to assess deformation of the salt rock mass in the “Kłodawa” Salt Mine S.A.

Damian KURDEK

Kopalnia Soli „Kłodawa” S.A., Aleja 1000-lecia 2, 62-650 Kłodawa

STRESZCZENIE

Do monitorowania deformacji górotworu w Kopalni Soli „Kłodawa” S.A. zaprojektowano wielofunkcyjną sieć pomiarową, która integruje różnorodne techniki geodezyjne: pomiary niwelacyjne, odległościowe, konwergencji oraz skanowanie 3D. Celem tego podejścia jest stworzenie jednolitego układu umożliwiającego analizę procesów deformacyjnych na podstawie zintegrowanych danych pochodzących z różnych metod. Dotychczas stosowane w kopalni klasyczne metody pomiarowe funkcjonują niezależnie, co ogranicza możliwość uzyskania pełnego obrazu zmian zachodzących w górotworze. Integracja tych technik umożliwi bardziej kompleksowe podejście do analizy oraz oceny stanu górotworu. Projektowana sieć opiera się na starannie rozmieszczonych punktach pomiarowych, uwzględniających specyfikę kopalni oraz charakterystykę rejonów o największym zagrożeniu deformacji. Szczególną rolę w tej sieci odegra skanowanie 3D, które zapewni wizualizację zmian w przestrzeni. Dzięki tej technologii możliwe będzie stworzenie szczegółowych modeli 3D, które ukażą nie tylko obecny stan górotworu, ale również umożliwią śledzenie zmian w czasie. Dane te zostaną uzupełnione pomiarami niwelacyjnymi i odległościowymi, co pozwoli na dokładne określenie zmian pionowych oraz poziomych. Pomiary konwergencji dostarczą natomiast informacji o bieżącym zaciskaniu wyrobisk. Zaproponowana sieć ma kluczowe znaczenie w kontekście systematycznego monitorowania powolnych procesów zaciskania wyrobisk w kopalni soli.

OVERVIEW

To monitor deformation of the rock mass in the “Kłodawa” Salt Mine S.A., a multifunctional measurement network has been designed that integrates several geodetic techniques, including levelling, distance measurements, convergence measurements, and 3D laser scanning. The aim of this approach is to establish a unified system that enables analysis of deformation processes based on integrated data from these various methods. Currently, the classical measurement techniques used in the mine operate independently, which limits the ability to obtain a comprehensive picture of changes occurring within the rock mass. Integrating these techniques provides a more holistic approach to analysing and assessing the condition of the rock mass.

The proposed network relies on a carefully distributed system of measurement points, taking into account the mine’s specific characteristics and areas at the highest risk of deformation. 3D laser scanning plays a key role in this system, enabling spatial visualization of deformation processes. This technology allows the creation of detailed three-dimensional models that not only represent the current state of the rock mass but also track changes over time. These data are complemented by levelling and distance measurements, which allow for precise determination of vertical and horizontal displacements, while convergence measurements provide information on the current degree of excavation closure.

The proposed network is therefore crucial for the systematic monitoring of slow excavation convergence processes within the salt mine.

Słowa kluczowe: deformacje górotworu, skaning laserowy 3D, konwergencja, monitoring geodezyjny

1. WSTĘP

Górotwór solny, ze względu na swoje specyficzne właściwości reologiczne, podlega ciągłym procesom deformacji. Zjawisko pełzania soli kamiennej prowadzi do powolnego, lecz nieuniknionego zaciskania się wyrobisk górniczych, co stanowi kluczowe wyzwanie dla utrzymania stateczności i bezpieczeństwa ruchu zakładu górniczego. W Kopalni Soli „Kłodawa” S.A. monitoring tych zmian jest prowadzony od lat, pomiary te mają wieloletnią tradycję, sięgającą lat 80. XX wieku, kiedy to w Polu nr 1 i 2 zainstalowano pierwsze stacjonarne bazy pomiarowe w wyrobiskach komorowych. Obecny system monitoringu geodezyjnego, oparty jest w dużej mierze na pomiarach konwergencji (przemieszczenia względne), dostarcza wiarygodnych danych o zaciskaniu w konkretnych przekrojach, lecz nie daje pełnego obrazu deformacji przestrzennych. Jak wykazują historyczne analizy konwergencji, prędkość konwergencji wzrasta wraz z głębokością w rejonach centralnych Pola nr 1 i 2. Celem niniejszego artykułu jest pokazanie koncepcji sieci wielofunkcyjnej, która poprzez integrację skaningu laserowego 3D z klasycznymi metodami pomiaru, pozwoli na kompleksową ocenę procesu deformacji górotworu.

2. UWARUNKOWANIA GEOLOGICZNO-GÓRNICZE POLA NR 2

Pole nr 2 stanowi obecnie największy i najbardziej skoncentrowany rejon eksploatacji w kłodawskim wysadzie solnym. Zlokalizowane jest wzdłuż rozciągłości wysadu na kierunku NW-SE, przy jego północno-wschodniej granicy. Długość pola wynosi około 1,5 km, a jego szerokość jest zmienna – od kilkudziesięciu metrów w partiach skrzydłowych do około 0,5 km w części centralnej. Przedmiotem eksploatacji w tym rejonie jest sól kamienna biała starsza (Na₂). Od strony wnętrza wysadu (SW) sole te przechodzą w utwory potasonośne, natomiast od strony granicy wysadu (NE) ograniczone są filarem bezpieczeństwa.

Eksploatację w Polu nr 2 rozpoczęto w 1964 roku. Prowadzona jest ona systemem komorowo-filarowym na poziomach od 500 m do 750 m, z obecnym udostępnianiem poziomów 780 m i 810 m. Ze względu na ochronę przed zagrożeniami naturalnymi, wyrobiska oddzielone są od granic wysadu systemem filarów ochronnych:

- Od strony NE (granica wysadu) pozostawiono filar o szerokości 50 m (do poziomu 600 m) i 75 m (poniżej poziomu 600 m).
- Od strony SW pole ograniczone jest grubą warstwą anhydrytu („mur anhydrytowy” o miąższości 40–50 m), przy

Keywords: rock mass deformation, 3D laser scanning, convergence, geodetic monitoring

1. INTRODUCTION

The salt rock mass, due to its specific rheological properties, is subject to continuous deformation. The phenomenon of rock salt creep leads to the slow but inevitable convergence of mine workings, posing a key challenge to maintaining the stability and operational safety of a mining facility. At the “Kłodawa” Salt Mine S.A., monitoring of these changes has been conducted for many years, with a long-standing tradition dating back to the 1980s, when the first permanent measurement bases were installed in chamber excavations within Fields No. 1 and 2.

The current geodetic monitoring system is largely based on convergence measurements (relative displacements). While it provides reliable data on excavation closure in specific cross-sections, it does not offer a complete picture of spatial deformation. Historical analyses of convergence have shown that the convergence rate increases with depth in the central areas of Fields No. 1 and 2.

The aim of this paper is to present a concept for a multifunctional monitoring network which, through the integration of 3D laser scanning with classical measurement methods, enables a comprehensive assessment of deformation processes in the salt rock mass.

2. GEOLOGICAL AND MINING CONDITIONS OF FIELD NO. 2

Field No. 2 currently represents the largest and most intensively developed exploitation area within the Kłodawa salt dome. It is located along the strike of the dome in the NW–SE direction, at its north-eastern boundary. The field is approximately 1.5 km long, while its width varies from several tens of metres in the marginal (wing) zones to about 0.5 km in the central part.

The exploited deposit in this area is older white rock salt (Na₂). Toward the interior of the dome (SW), these salts transition into potash-bearing formations, whereas toward the dome boundary (NE), they are limited by a safety pillar.

Mining operations in Field No. 2 began in 1964. Exploitation is carried out using the room-and-pillar system at levels ranging from 500 m to 750 m, with current development at the 780 m and 810 m levels. To protect against natural hazards, the workings are separated from the boundaries of the salt dome by a system of protective pillars:

- On the NE side (salt dome boundary), a pillar with a width of 50 m (down to the 600 m level) and 75 m (below 600 m) has been left.

czym zachowano dodatkowy filar bezpieczeństwa o szerokości 30 m.

- Od góry wyrobiska chroni stropowa półka bezpieczeństwa o grubości 150 m.

W strukturze wyrobisk Pola nr 2 wyróżnia się komory płaskie (prostokątne), dominujące w większości pola, oraz pojedyncze komory cylindryczne w centralnej części (poziomy 500–600 m) o średnicy ok. 24 m i wysokości do 100 m. Sumaryczna objętość pustek poeksploatacyjnych w tym rejonie wynosi ok. 10,5 mln m³, co stanowi blisko 48% wszystkich pustek w kopalni.

3. KONCEPCJA SIECI WIELOFUNKCYJNEJ

Obecna sieć obserwacyjna (najstarsza w kopalni) koncentruje się na wyższych poziomach, pozostawiając najniższe partie złoża bez kompleksowego systemu obserwacji zachodzących zmian. Tym samym dotychczasowy system monitoringu w tym rejonie, oparty na pomiarach niwelacyjnych (do poziomu 630) oraz lokalnych bazach konwergencji, m.in. w pionach KS-11 i KS-21 oraz w rejonie tzw. „komór literowych” dostarcza niepełnych informacji o zachodzących procesach deformacyjnych (Bieniasz i in., 2018; Wojnar i in., 2012). Pomiar konwergencji wykazują, że największa prędkość zaciskania występuje na najniższych poziomach (Bieniasz i in., 2021; Kurdek, 2019). Co istotne, dotychczasowe metody dostarczają informacji punktowych. Jak zauważono w literaturze, w Polu nr 2 występuje wyraźna zmienność wartości zaciskania w stosunkowo niewielkiej przestrzeni górotworu, co często umyka przy tradycyjnym, rzadkim rozmieszczeniu baz pomiarowych (Bieniasz i in., 2021).

W odpowiedzi na ograniczenia obecnego systemu, opracowano projekt sieci wielofunkcyjnej, która integruje różnorodne techniki geodezyjne: pomiary niwelacyjne, odległościowe, konwergencji oraz skanowanie 3D. Celem tego podejścia jest stworzenie jednolitego układu umożliwiającego analizę procesów deformacyjnych na podstawie zintegrowanych danych pochodzących z różnych metod. Dotychczas stosowane w kopalni klasyczne metody pomiarowe funkcjonują niezależnie, co ogranicza możliwość uzyskania pełnego obrazu zmian zachodzących w górotworze. Sieć ta ma objąć swoim zasięgiem poziomy od 500 m aż do poziomu 810 m, z szczególnym naciskiem na najniższe rejony eksploatacji. Struktura pomiarowa na poszczególnych poziomach została zróżnicowana (Tabela 1), przy czym pełna integracja wszystkich metod (niwelacja, pomiar odległości, konwergencja, skanowanie 3D) przewidziana jest dla poziomów kluczowych, w tym nowego najniższego poziomu 810 m.

- On the SW side, the field is bounded by a thick anhydrite layer (the “anhydrite wall,” 40–50 m thick), with an additional safety pillar 30 m wide.
- From above, the workings are protected by an overhead safety shelf 150 m thick.

Within the structure of the workings in Field No. 2, flat (rectangular) chambers predominate over most of the area, while individual cylindrical chambers occur in the central part (levels 500–600 m), with diameters of approximately 24 m and heights of up to 100 m. The total volume of post-mining voids in this area is approximately 10.5 million m³, accounting for nearly 48% of all voids in the mine.

3. CONCEPT OF THE MULTIFUNCTIONAL NETWORK

The existing observation network – the oldest in the mine – is concentrated at the higher levels, leaving the lowest parts of the deposit without a comprehensive system for monitoring ongoing changes. Consequently, the monitoring system used to date in this area – based on levelling measurements (down to the 630 m level) and local convergence bases, including those in the KS-11 and KS-21 shafts and in the area of the so-called “letter chambers” – provides incomplete information on the deformation processes (Bieniasz et al., 2018; Wojnar et al., 2012).

Convergence measurements indicate that the highest rates of excavation closure occur at the lowest levels (Bieniasz et al., 2021; Kurdek, 2019). Importantly, the methods applied so far provide point-based information only. As noted in the literature, Field No. 2 exhibits pronounced variability in convergence values within relatively small volumes of the rock mass, which is often overlooked when traditional measurement bases are sparsely distributed (Bieniasz et al., 2021).

In response to the limitations of the existing system, a multifunctional network has been designed that integrates various geodetic techniques, including levelling, distance measurements, convergence measurements, and 3D laser scanning. The objective of this approach is to create a unified framework for analysing deformation processes based on integrated data from these different methods. The classical measurement techniques used in the mine to date operate independently, which limits the ability to obtain a complete picture of changes occurring within the rock mass.

The proposed network is intended to cover levels from 500 m down to 810 m, with particular emphasis on the lowest areas of exploitation. The measurement structure at individual levels has been differentiated (Table 1), while full integration of all methods (levelling, distance measurements, convergence, and 3D laser scanning) is planned for key levels, including the newly developed lowest level at 810 m.

Tabela 1. Planowany zakres metod pomiarowych w nowej sieci wielofunkcyjnej

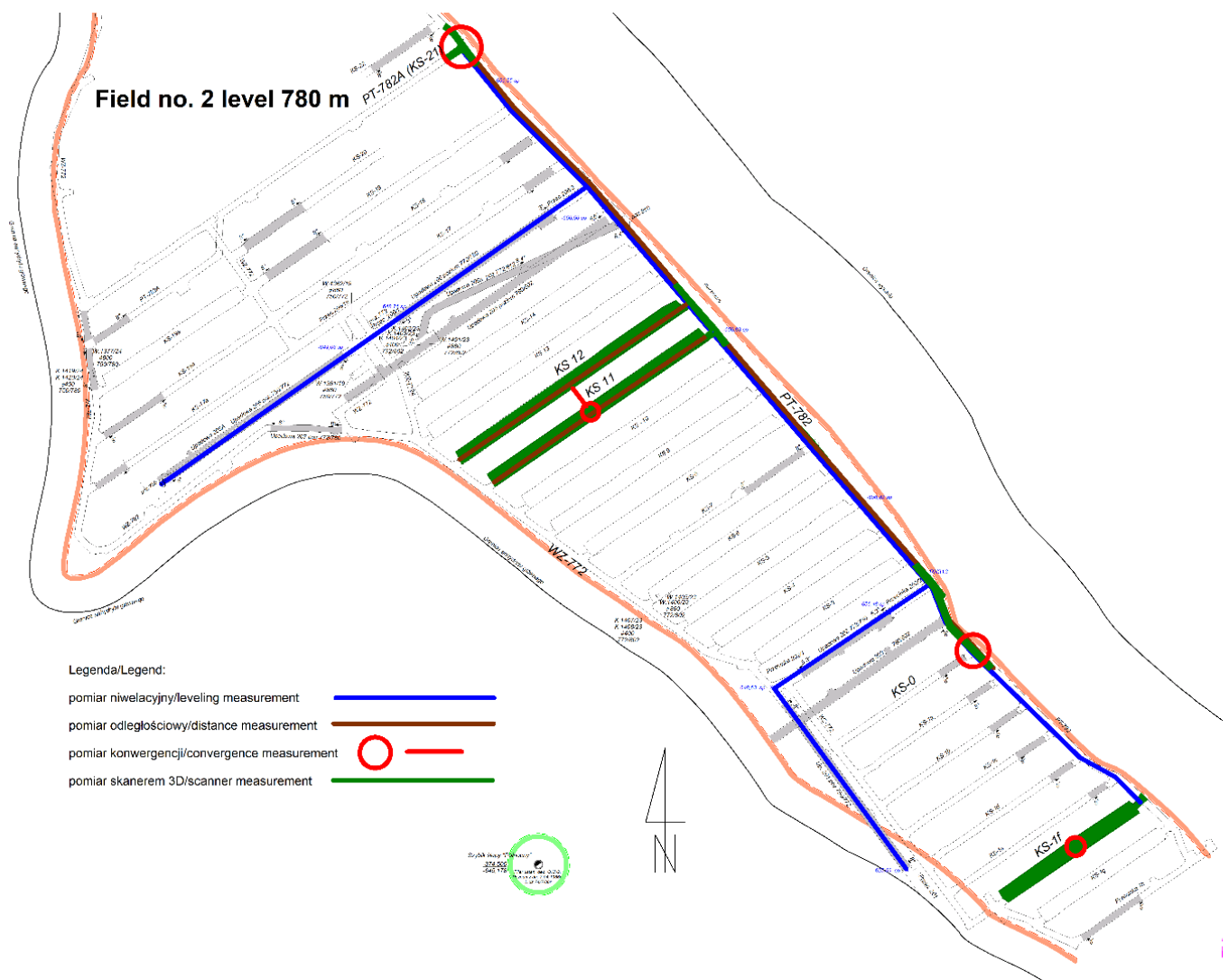
Poziom eksploatacyjny	Pomiar niwelacji	Pomiar odległości	Konwergencja	Skanowanie 3D
500 m	Tak	-	Tak	Planowany
525 m	Tak	Tak	Tak	Planowany
660 m	-	-	Tak	-
690 m	-	-	Tak	-
720 m	-	-	Tak	-
750 m	Planowany	Planowany	Tak	Planowany
780 m	Planowany	Planowany	Tak	Planowany
810 m	Planowany	Planowany	Planowany	Planowany

Przykładowy projekt sieci wielofunkcyjnej na poziomie 780 m (Ryc. 1) zakłada utworzenie sieci pomiarowej obejmującej główne wyrobiska udostępniające oraz wybrane komory w Polu nr 2. Zaprojektowany przebieg linii obserwacyjnej (oznaczony linią niebieską i brązową) obejmuje główne wyrobiska udostępniające oraz wybrane komory

Table 1. Planned scope of measurement methods in the new multifunctional network

Exploitation level	Levelling measurements	Distance measurements	Convergence measurements	3D laser scanning
500 m	Yes	–	Yes	Planned
525 m	Yes	Yes	Yes	Planned
660 m	–	–	Yes	–
690 m	–	–	Yes	–
720 m	–	–	Yes	–
750 m	Planned	Planned	Yes	Planned
780 m	Planned	Planned	Yes	Planned
810 m	Planned	Planned	Planned	Planned

An example design of the multifunctional network at the 780 m level (Fig. 1) envisions the establishment of a measurement network covering the main access workings and selected chambers in Field No. 2. The planned course of the observation lines (marked in blue and brown) includes both the main access workings and selected exploitation chambers.



Ryc. 1. Projekt sieci wielofunkcyjnej na poziomie 780 m w Polu nr 2
Fig. 1. Design of the multifunctional network at level 780 m in Field no. 2

eksploatacyjne. Pomiar niwelacyjny będą tworzyć ciągi niwelacyjne zamknięte nawiązane do punktów stałych, które znajdują się przy szybach. W istniejących bazach pomiarowych konwergencyjnych (kolor czerwony) zostaną, założone specjalne tarcze celownicze, które są dostosowane do technologii skanowania 3D (kolor zielony). Rozmieszczenie punktów obejmie całe wyrobisko górnicze (Ryc. 2).

Kluczowym elementem koncepcji jest rezygnacja z niezależnych układów lokalnych na rzecz jednolitego układu wysokościowego nawiązanego do zewnętrznego układu odniesienia. Pozwoli to na obserwacje przemieszczeń pionowych bezwzględnych.

4. METODYKA I TECHNOLOGIA POMIAROWA

Istotnym elementem w projektowanej sieci jest wdrożenie na szeroką skalę naziemnego skaningu laserowego (TLS). Do pomiarów wytypowano skaner Leica RTC360. Instrument ten, wyposażony w system VIS (Visual Inertial System), znacząco usprawnia proces rejestracji stanowisk w trudnych warunkach podziemnych, umożliwiając wstępne łączenie skanów w czasie rzeczywistym. Kluczowym aspektem technicznym jest sposób stabilizacji punktów. Zaprojektowano system hybrydowy, wykorzystujący tarcze celownicze montowane trwale w ociosach i ewentualnie w stropie wyrobiska (Ryc. 3). Umożliwiają one jednoznaczny identyfikację punktu zarówno przez tachimetr, jak i skaner. Testy terenowe wykazały, że błąd dopasowania chmur punktów (Bundle Error) przy takiej konfiguracji wynosi średnio 0,008 – 0,011 m, przy pokryciu (overlap) rzędu 67%, co mieści się w założonych granicach tolerancji.

Instalacja punktów na najniższych poziomach (750–810 m) przewidziana jest na I kwartał 2026 r., a pierwszy pomiar stanowiący bazę odniesienia („stan zero”) na II kwartał 2026 r. W ramach jednej kampanii realizowane będą:

- **Niwelacja** – dla wyznaczenia przemieszczeń pionowych ($m_H = \pm 1,5$ mm/km).
- **Pomiary odległościowe** – zmiana odległościowa ($m_d = \pm 2$ mm).

Levelling measurements will be carried out as closed loops tied to fixed reference points located near the shafts. Within the existing convergence measurement bases (marked in red), dedicated target plates adapted for 3D laser scanning (marked in green) will be installed. The distribution of measurement points will cover the entire mining area (Fig. 2).

A key feature of the proposed concept is the replacement of independent local systems with a unified height system referenced to an external framework. This approach will enable the observation of absolute vertical displacements.

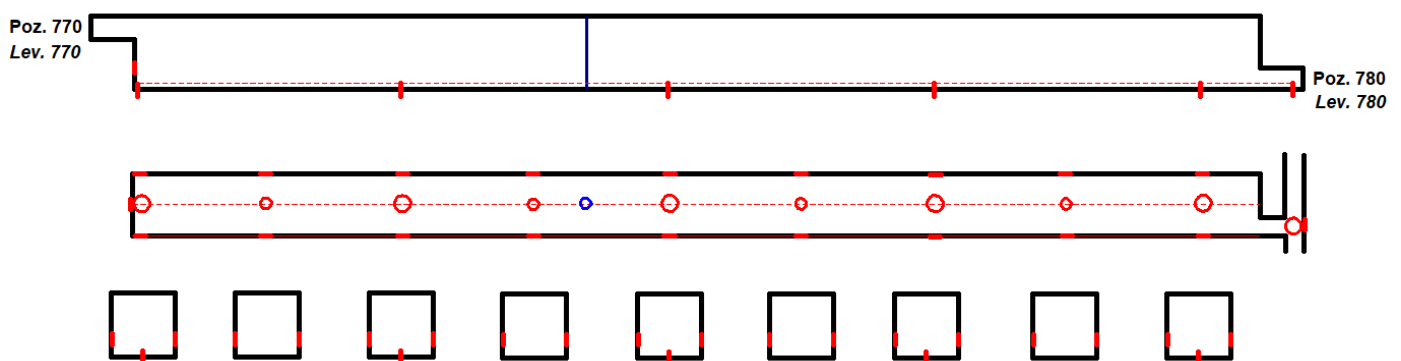
4. METHODOLOGY AND MEASUREMENT TECHNOLOGY

A key element of the proposed network is the large-scale implementation of terrestrial laser scanning (TLS). For this purpose, a Leica RTC360 scanner was selected. This instrument, equipped with a Visual Inertial System (VIS), significantly facilitates station registration under challenging underground conditions by enabling preliminary scan alignment in real time.

A critical technical aspect concerns the stabilization of measurement points. A hybrid system has been designed, employing target plates permanently mounted in the sidewalls and, where necessary, in the roof of the workings (Fig. 3). These targets allow unambiguous identification of points by both a total station and the laser scanner. Field tests have shown that the point cloud alignment error (bundle error) for this configuration averages 0.008–0.011 m, with an overlap of approximately 67%, which falls within the assumed tolerance limits.

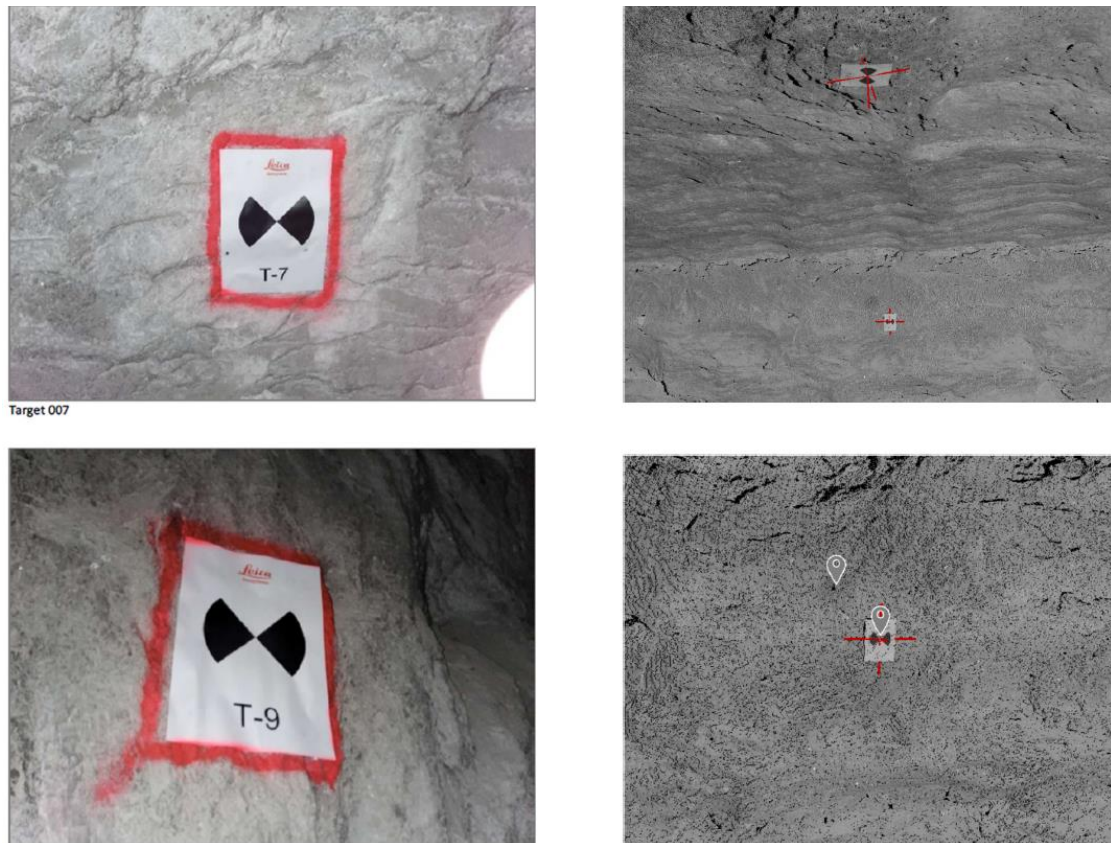
The installation of measurement points at the lowest levels (750–810 m) is scheduled for the first quarter of 2026, with the first measurement serving as the reference baseline (“zero state”) planned for the second quarter of 2026. Within a single measurement campaign, the following activities will be carried out:

- **Levelling** – determination of vertical displacements ($m_H = \pm 1.5$ mm/km)



Ryc. 2. Schemat stabilizacji punktów pomiarowych w przekroju wyrobiska dla sieci wielofunkcyjnej

Fig. 2. Scheme of measurement points stabilization in the excavation cross-section for the multifunctional network



Ryc. 3. Tarcze celownicze do skanowania 3D
Fig. 3. 3D scanning targets

- **Konwergencja** – tempo zaciskania wyrobisk ($m_k = \pm 3$ mm).
- **Skaning 3D** – rejestracja pełnej geometrii wyrobiska ($m_p = \pm 10$ mm).

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Integracja skaningu 3D z tradycyjnymi metodami pozwoli na przejście z analizy punktowej na analizę powierzchniową. Dotychczasowe badania w Kopalni Soli „Kłodawa” S.A. wykazały, że szybkość konwergencji w peryferyjnych częściach pola jest kilkukrotnie mniejsza niż w centrum. Nowa sieć pozwoli na wyznaczenie granic stref o wzmożonej aktywności deformacyjnej.

Wykorzystanie modeli 3D umożliwi nie tylko obliczanie zmian przekroju (konwergencji), ale także szacowanie objętościowego ubytku pustek poeksploatacyjnych. Pozwoli również na wykrywanie lokalnych odspojen i deformacji, które mogą wystąpić pomiędzy punktami tradycyjnej sieci konwergencji.

Wnioski:

1. Długoletnia eksploatacja Pola nr 2 i schodzenie z robotami górniczymi na głębokość ponad 750 m wymusza zmianę systemu kontroli górotworu. Dotychczasowe metody pomiaru, choć skuteczne, nie zapewniają pełnej informacji o deformacjach przestrzennych.

- **Distance measurements** – detection of distance changes ($m_d = \pm 2$ mm)
- **Convergence measurements** – assessment of excavation closure rates ($m_k = \pm 3$ mm)
- **3D laser scanning** – registration of the complete geometry of the workings ($m_p = \pm 10$ mm)

5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Integration of 3D laser scanning with traditional measurement methods enables a shift from point-based to surface-based analysis. Previous studies at the “Kłodawa” Salt Mine S.A. have shown that the rate of convergence in the peripheral parts of the field is several times lower than in the central areas. The new network will allow the delineation of zones with increased deformation activity.

The use of 3D models will allow not only the calculation of cross-sectional changes (convergence) but also the estimation of volumetric loss of post-mining voids. It will also facilitate the detection of local detachments and deformations that may occur between the points of the traditional convergence network.

Conclusions:

1. The long-term exploitation of Field No. 2 and the advancement of mining operations to depths exceeding 750 m necessitate a change in the rock mass monitoring system.

2. Zaprojektowana sieć wielofunkcyjna integruje cztery metody pomiarowe, co pozwoli na korelacje wyników obniżenia (niwelacja) z zaciskaniem wyrobisk (konwergencja i skaning).
3. Zastosowanie skanera laserowego 3D znacząco rozszerza możliwości interpretacyjne, umożliwiając wizualizację deformacji całych powierzchni ociosów i stropów, a nie tylko wybranych baz pomiarowych.
4. Wdrożenie sieci wielofunkcyjnej dostarczy istotnych danych do weryfikacji modeli geomechanicznych i prognozowania zachowania się górotworu w całej głębokości pola eksploatacyjnego.

Although the existing measurement methods are effective, they do not provide complete information on spatial deformations.

2. The designed multifunctional network integrates four measurement methods, allowing correlation of subsidence results (levelling) with excavation closure (convergence and 3D scanning).
3. The use of a 3D laser scanner significantly expands interpretative capabilities, enabling visualization of deformations across entire sidewall and roof surfaces, rather than only at selected measurement bases.
4. Implementation of the multifunctional network will provide essential data for verifying geomechanical models and for forecasting the behaviour of the rock mass throughout the full depth of the exploitation field.

LITERATURA / REFERENCES

1. BIENIASZ J., PIETRAS J., 2018. *Deformacje górotworu wywołane eksploatacją pola nr 2 w Kopalni Soli „Kłodawa” S.A.* [Rock mass deformations caused by exploitation of Field No. 2 in the “Kłodawa” Salt Mine S.A.]. *Przegląd Solny*, 14: 15–20.
2. BIENIASZ J., PIETRAS J., MARCOLA-SADOWSKAJ., KURDEK D., 2021. *Zmienność zjawiska zaciskania wyrobisk komorowych w przestrzeni pola nr 2 w Kopalni Soli „Kłodawa”* [Variability of the convergence phenomenon in the post-exploitation voids of the mining areas in Field 2 of the “Kłodawa” Salt Mine]. *Przegląd Solny*, 16: 20–28.
3. KURDEK D., 2019. *Pomiary konwergencji wyrobisk chodnikowych w Kopalni Soli „Kłodawa” S.A.* [Convergence measurements of drift excavation in Salt Mine „Kłodawa” S.A.]. *Przegląd Solny*, 15: 56–61.
4. WOJNAR W., BIENIASZ J., MARCOLA-SADOWSKAJ., 2012. *Pomiary deformacji rejonu stropowej półki ochronnej nad polem nr 1 w Kopalni Soli Kłodawa* [Deformation measurements of the overhead safety shelf above Field No. 1 in the “Kłodawa” Salt Mine]. *Geology, Geophysics & Environment*, 38 (1): 83–92.