



Technologiczne i środowiskowe skutki likwidacji kopalni soli z zastosowaniem podsadzki hydraulicznej (kopalnia Kałusz, Ukraina)

Technological and environmental consequences of the liquidation of a salt mine using liquid backfill (Kalush mine, Ukraine)

Yuryij V. SADOVYI¹, Anatoliy R. GALAMAY², Krzysztof BUKOWSKI³

¹State Institution State Scientific Research and Design Institute of Basic Chemistry (NIOCHIM), Kharkiv, Ukraine, e-mail: ysadovyi@gmail.com

²Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals, NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine, e-mail: galamaytolik@ukr.net

³Faculty of Geology, Geophysics and Environmental Protection, AGH University of Science and Technology, 30059 Kraków, Poland e-mail: buk@agh.edu.pl

STRESZCZENIE

Złoża soli potasowo-magnezowych w Kałuszu na Ukrainie charakteryzują się złożonym składem polimineralem i wysoką zawartością składnika terygenicznego, głównie w frakcji ilastej. Skąły te są podatne na absorpcję wilgoci z powietrza górniczego oraz pęcznienie, co prowadzi do zmniejszenia wytrzymałości solnych skał i powstawania osuwisk i obrywów w kopalniach podziemnych. Przeprowadzone obserwacje w kopalniach oraz dane z licznych eksperymentów laboratoryjnych dotyczących różnych typów skał występujących na złożu wykazały, że wytrzymałość tych skał znacznie spada wraz ze wzrostem ich wilgotności. Może to być spowodowane zarówno dopływem cieplejszego wilgotnego powietrza latem, które jest zatłaczane do kopalni w celu wentylacji, przez infiltrację wód gruntowych o różnym pochodzeniu i mineralizacji, jak również wysoki udział składnika ilastego.

W wyniku prowadzenia hydraulicznego podsadzania wyrobisk kopalni Kałusz specjalnie przygotowanym szlamem składającym się z odpadów osadów produkcyjnych oraz nasyconych wysoko stężonych solanek nie zlikwidowano podstawy dopływu wód podziemnych, a tym samym nie za-

ABSTRACT

The potassium-magnesium salt deposits in Kalush, Ukraine, are characterized by a complex polymetallic composition and a high content of terrigenous components, mainly in the clay fraction. These rocks are susceptible to moisture absorption from the underground air and swelling, leading to a decrease in the strength of salt rocks and the formation of landslides and collapse in underground mines. Observations conducted in the mines and data from numerous laboratory experiments on various types of rocks found in the deposit have shown that the strength of these rocks significantly decreases with increasing moisture content. This can be caused by the supply of warmer moist air pumped into the mine for ventilation in the summer, the infiltration of groundwater with different origins and mineralization.

As a result of the hydraulic backfilling of workings in the mines of Kalush, using specially prepared slurry consisting of waste sediment and highly concentrated brines, groundwater inflow was not eliminated. Thus, the development of karst phenomena was not halted. Consequently, over 30 years after the closure of the mine, the rock mass continues to deteriorate.

hamowano rozwoju zjawisk krasowych. W wyniku tego, po ponad 30 latach od likwidacji kopalni, górotwór ulega ciąglemu niszczeniu. W kontekście przyszłej eksploatacji złoża soli na Podkarpaciu Ukraińskim, istotne jest podjęcie skutecznych działań w celu lokalizacji dawnych wyrobisk. Ponadto, aby uniknąć dalszych procesów zapadania terenu i zagrożeń dla otoczenia, likwidacja wyrobisk podziemnych poprzez zatapanie wymaga dokładnej analizy warunków geologicznych i szczelnej izolacji hydrogeologicznej głównej części kopalni.

Słowa kluczowe: eksploatacja soli potasowo-magnezowych, wpływ na środowisko, Kałusz, Ukraina

1. WSTĘP

Przemysł związany z wydobywaniem i przeróbką soli potasowych na Ukraińskim Podkarpaciu rozwijał się dynamicznie w XIX - XX wieku w rejonie miejscowości Stebnik i Kałusz w zachodniej części Ukrainy (Bukowski, Czapowski 2008), gdzie wydobyto kilkadziesiąt milionów ton soli potasowo-magnezowych (Ryc. 1). Pomimo wielu lat eksploatacji znaczne zasoby soli potasowo-magnezowych, których brakuje na światowym rynku, nadal koncentrują się na Podkarpaciu (Rudko, Petryshyn, 2017; Sadovyi i in., 2018).

W pracy przedstawiono wyniki badań przyczyn negatywnych zjawisk wpływających na środowisko spowodowanych zastosowaniem podsadzki hydraulicznej dla podsadzania wyrobisk podziemnych kopalni soli potasowo-magnezowej w Kałuszu. Analizy wytrzymałości i stateczności górotworu

In the context of future salt deposit exploitation in the Ukrainian Subcarpathian region, it is essential to take effective measures to locate the former excavations. Furthermore, to prevent further ground subsidence and environmental threats, the closure of underground workings through flooding requires a thorough analysis of the geological conditions and watertight hydrogeological isolation of the main part of the mine.

Keywords: exploitation of potassium-magnesium salts, impact on the environment, Kalush, Ukraine

1. INTRODUCTION

The industry related to the extraction and processing of potash salts in the Ukrainian Subcarpathians experienced significant growth in the 19th and 20th centuries in the region of Stebnik and Kalush in western Ukraine (Bukowski, Czapowski 2008), where several million tons of potash magnesium salts were extracted (Fig.1). Despite many years of exploitation, substantial reserves of potash-magnesium salts, which are in demand on the global market, remain concentrated in the Subcarpathian region (Rudko, Petryshyn, 2017; Sadovyi et al., 2018).

This study presents the research results on the negative environmental effects caused by using liquid backfilling to support underground workings in the potash-magnesium salt mine in Kalush. The analysis of rock strength and stability of rock mass associated with previous mining operations is



Ryc. 1. Lokalizacja kopalni Kałusz
Fig. 1. Location of the Kalush mine

związane z wcześniejszą eksploatacją są istotne z punktu widzenia planowania przyszłych przedsięwzięć górniczo-wydobywczych na Ukrainie Podkarpaciu.

2. ZARYS HISTORII EKSPLOATACJI SOLI POTASOWO-MAGNEZOWYCH W KAŁUSZU

Duże złoża soli potasowo-magnezowych Kałusz-Hołyń było eksploatowane trzema kopalniami podziemnymi. Eksploatację prowadzono z przerwami od 1867 do 1978 roku. W tym rejonie w latach 1967-2005 prowadzono również wydobywanie soli K-Mg metodą odkrywkową w kamieniołomie Karier Dombrowski (Żurek i in., 2018; Sadovyi i in., 2022).

Kopalnia podziemna w Kałuszu składała się z czterech pól górniczych, na których koncentrowały się prace poszukiwawczo-eksploatacyjne: północnego sylwinitowego, północnego kainitowego, centralnego i hotyńskiego (Ryc. 2). W wyniku działalności kopalni powstało setki komór, wydrążono setki kilometrów wyrobisk górniczych o różnym przeznaczeniu (poziomych, pochyłych, pionowych), które przecinają górotwór i rozciągają się ponad 7 kilometrów na obszarze miasta Kałusz. Całkowita kubatura przestrzeni kopalni wynosiła ponad 6 mln m³ (Tab. 1).

Główna część pokładów była eksploatowana systemem komorowym w wielu wariantach, z rozcięciem na piętra i poziomy (Czapowski et al., 2009). Parametry komór eksploatacyjnych nie były jednakowe. Ich wysokość wahała się od 2 m do 30 m, a w niektórych przypadkach nawet do ponad 40 m. Szerokość komór zmieniała się od 5 do 11 m. W niektórych częściach kopalni prowadzono eksploatację płaskimi komorami z pozostawieniem małych filarów w postaci kolumn. Przy tym sposobie eksploatacji pierwotne komory były łączone i szerokość przestrzeni wydobywczej obejmowała dziesiątki metrów (maksymalnie do prawie 300 m długości). Pozostawiano filary międzykomorowe o różnych kształtach, rozmiarach i współczynnikach wytrzymałości.

W pierwszym okresie działalności kopalni (okres polski, do 1939 r.) roboty górnicze prowadzono z zastosowaniem podsadzania wyrobisk suchym urobkiem (tzw. podsadzka

crucial for planning future mining projects in the Ukrainian Subcarpathians.

2. OUTLINE OF THE HISTORY OF POTASH-MAGNESIUM SALT EXPLOITATION IN KALUSH

Three underground mines exploited the large deposit of potash-magnesium salts in Kalush-Holyn. Mining operations were conducted intermittently in these mines from 1867 to 1978. From 1967 to 2005, K-Mg salt extraction in Kalush also took place through open-pit mining in the Dombrowski Quarry (Sadovyi et al., 2022).

The Kalush underground mine consisted of four mining areas: the central field, the northern kainite field, the northern sylvinite field, and the Hotyn field (Fig. 2). As a result of the mine's activity, hundreds of chambers were created, and hundreds of kilometres of mining workings with various purposes (horizontal, inclined, vertical) were excavated, crossing the rock mass, and extending over 7 kilometres within the city of Kalush. The total volume of the mining space was over 6 million m³ (Table 1).

The main deposits were mined using a chamber system in various configurations, with division into floors and levels (Czapowski et al., 2009). However, the parameters of the mining chambers were not uniform. Their height ranged from 2 to 30 meters and, in some cases, even over 40 meters. The width of the chambers varied from 5 to 11 meters. In some parts of the mine, mining was carried out using flat chambers with small remaining pillars in the form of columns. With this extraction method, the original chambers were connected, and the width of the mining space reached tens of meters (up to nearly 300 meters in length). Inter-chamber pillars of different shapes, sizes, and strength coefficients were left.

In the initial period of the mine's operation (the Polish period until 1939), mining work was carried out using dry backfilling of workings (dry backfill). During the occupation, under the guidance of German engineers, backfilling was also carried out in parallel with mining operations. After World War II (during the Soviet period), there was a fundamental

Tab. 1. Zagospodarowanie i podsadzanie przestrzeni podziemnej kopalni Kałusz (na podstawie danych kopalni).

Table 1. Development and backfilling of the underground space of the Kalush mine (based on mine data).

Pole	Lata eksploatacji	Wyeksploatowane pustki [tys. m ³]	Wypelnione pustki, [tys. m ³]	Pozostale pustki, [tys. m ³]*
Północne sylwinitowe	1943–1962	1890	1860	30
Północne kainitowe	1956–1975	1325,5	8,5	1317,0
Centralne	1867–1979	2116,1	1015,4	1100,7
Hotyńskie	1961–1975	948	125	823

* - stan na 1985 r.

sucha). Również w czasie okupacji pod kierownictwem niemieckich inżynierów podsadzanie prowadzono równoległe z pracami wydobywczymi. Po II wojnie światowej (w okresie ZSRR), zasadniczo zmieniło się podejście do planowania prac górniczych, poszerzono obszary eksploatacyjne i zrezygnowano ze stosowania podsadzki suchej jako zbyt kosztownej i pracochłonnej. Rozpoczęto też stosowanie podsadzania wyrobisk podsadzką hydrauliczną. W 1985 r (przed ostateczną likwidacją kopalni Kałusz) niezagospodarowana objętość poeksploatacyjnych pustek w kopalni wynosiła ponad 3 mln m³ (patrz tabela 1).

W ramach likwidacji kopalni do podziemnych wyrobisk zatłoczono około 2,6 mln m³ solanek w tym ługów odpadowych z procesów technologicznych zakładu potasowo-magnezowego, oraz solanek z odkrywki Karier Dombrowski. Podsadzkę hydrauliczną stanowiły odpady pochodzące z zakładu przerobczego wytwarzającego koncentrat chlorku potasu z sylwinitu. Odpady składały się z części stałych i ługów, których proporcja w podsadźce wynosiła 1:2. Materiałem stałym w podsadźce były: halit, nierozpuszczony sylwin, anhydryt, kizeryt, polihalit oraz duża ilość ilów dochodząca do 35% pozostałości stałej. Ługi transportujące były roztworami zawierającymi głównie NaCl, KCl i MgCl₂. Podsadzka do komór wprowadzana była rurociągiem.

3. ZAPADLIŚKA POEKSPLOATACYJNE ZWIĄZANE Z DZIAŁALNOŚCIĄ KOPALNI PODZIEMNEJ W KAŁUSZU

Zapadliśka i osiadania powierzchni ziemi nad wyrobiskiem kopalni w Kałuszu zaczęły pojawiać się w połowie lat 70. XX wieku. Pierwsze zapadliśko o objętości 25 m³ powstało w marcu 1975 roku na centralnym polu górniczym. Kolejne duże zapadliśko o objętości (117 m³) powstało w tym rejonie w marcu 1980 roku. Później, od 1984 roku, na północnym polu kainitowym również zaczęły tworzyć się kolejne osuwiska i zapadliśka (Ryc. 2).

Na ryc. 3 przedstawiono zapadliśko nr 7 na polu górniczym o objętości około 1800 m³ i wymiarach 18,8 × 17,5 × 8,5 m, które powstało podczas najbardziej rozległego zniszczenia powierzchni nad podziemnymi wyrobiskami i które miało miejsce w 1987 roku. Wtedy też ponad 10 lat badano różne metody likwidacji wszystkich podziemnych przestrzeni kopalni w Kałuszu.

Wraz z nasileniem się negatywnych zjawisk związanych z powstawaniem zapadliśk i osiadaniami powierzchni ziemi, a także ze wzrostem dopływu wody do kopalni Kałusz i nagromadzeniem nadmiaru fazy ciekłej z procesów technologicznych zakładu potasowo-magnezowego, w ostatnim okresie funkcjonowania kopalni podjęto decyzję o przeprowadzeniu likwidacji wyrobisk podziemnych. Likwidację wyrobisk przeprowadzono poprzez podsadzanie ich specjalnie przygotowanym szlamem składającym się z odpadów osadów produkcyjnych oraz nasyconych solanek pochodzących kopalni

change in the approach to planning mining operations. The mining areas were expanded, and the use of dry backfill was abandoned as it was deemed too costly and labour-intensive. The practice of using liquid backfilling for excavations was introduced. In 1985 (before the final closure of the underground mine), the unutilized volume of post-mining voids in the mine amounted to over 3 million m³ (see Table 1).

As part of the mine closure process, approximately 2.6 million m³ of brine were injected into the underground workings. These brines included waste liquors from the technological processes of the potash-magnesium plant and brines from the Dombrowski Quarry open pit. The liquid backfills consisted of waste materials from the processing plant that produced potassium chloride concentrate from sylvinite. The waste materials consisted of solid particles and liquors in a proportion of 1:2 within the backfill. The solid materials in the backfill included halite, undissolved sylvite, anhydrite, kieserite, polyhalite, and a significant amount of clay, reaching up to 35% of the solid residue. The transporting liquors were solutions primarily containing NaCl, KCl, and MgCl₂. The backfill was introduced into the chambers through a pipeline.

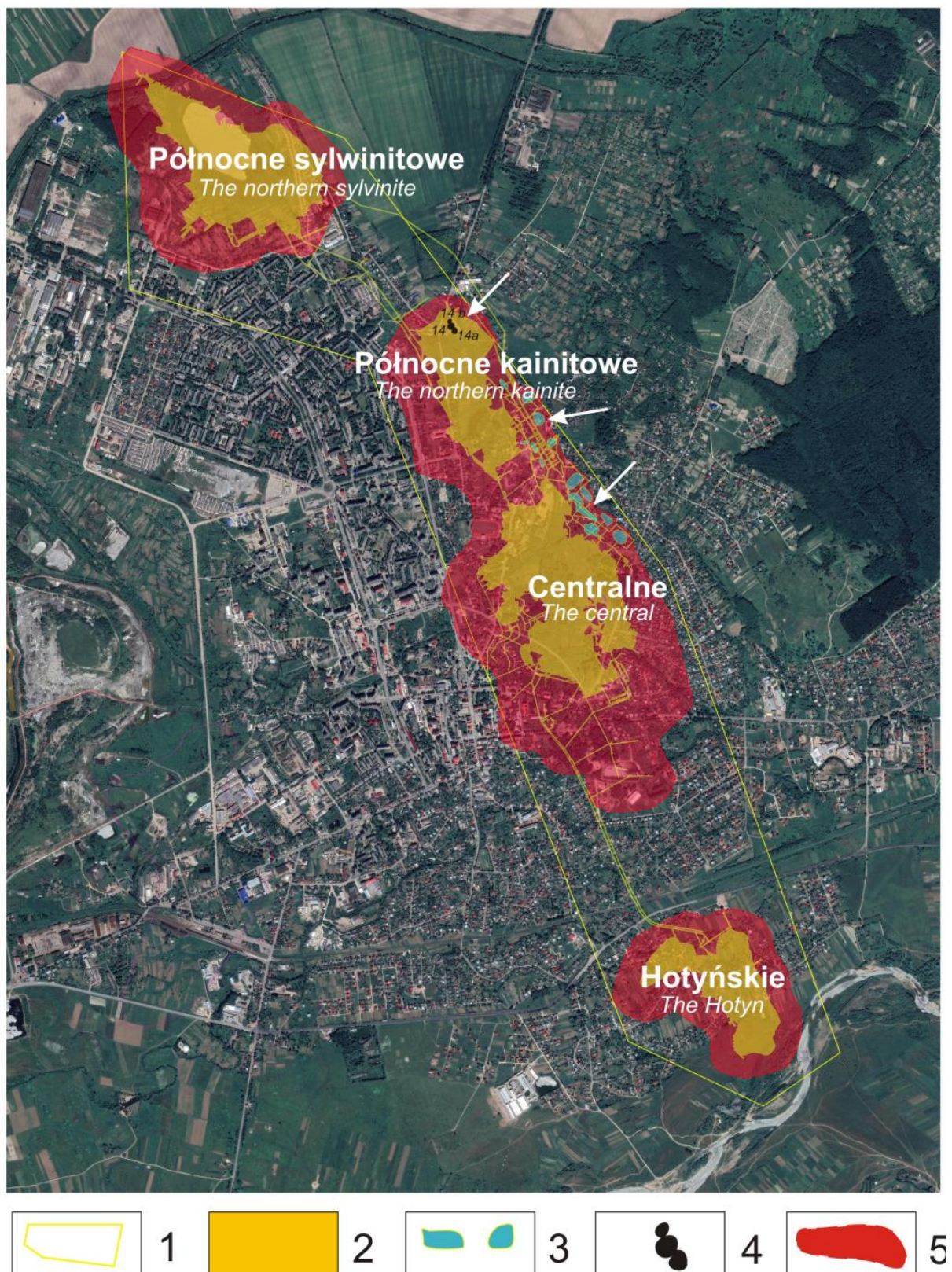
3. POST-MINING SUBSIDENCE ASSOCIATED WITH THE UNDERGROUND MINE ACTIVITY IN KALUSH

Subsidence and surface settling above the mine workings in Kalush began in the mid-1970s. The first subsidence with a volume of 25 m³ occurred in March 1975 in the central mining area. Another significant subsidence with a volume of 117 m³ occurred in the same area in March 1980. Subsequently, from 1984 onwards, additional landslides and subsidence started to form in the northern kainite field as well (Fig. 2).

Figure 3 shows subsidence number 7 in that mining area with a volume of approximately 1800 m³ and dimensions of 18.8 × 17.5 × 8.5 m, which occurred during the most extensive surface destruction above the underground workings in 1987. It was also during this time, over more than 10 years, that various methods for the reclamation of all underground spaces in the Kalush mine were investigated.

With the intensification of negative phenomena related to subsidence and surface ground settling, as well as an increase in water influx into the Kalush mine, and importantly, due to the accumulation of excess liquid phase from the technological processes of the potash-magnesium production plant, a decision was made during the final period of the mine's operation to undertake the closure of the underground workings by filling them with a specially prepared slurry consisting of waste sediment and highly concentrated brines saturated with brines from the K-Mg open-pit mine (Dombrowski Quarry).

The composition of the liquid backfill was developed based on experiments conducted on salt models. Such studies were carried out between 1988 and 1990. It was believed that



Ryc. 2. Położenie pól górniczych kopalni na terenie miasta Kalusz oraz wybrane zjawiska technologiczno-ekologiczne występujące na powierzchni. Objasnienia: 1. Kontur koncesji wydobywczej kopalni; 2. Pola górnicze i kontury wyrobisk; 3. Kontury ługowni – zaznaczone strzałkami; 4. Położenie zapadlisk 14, 14a, 14b – zaznaczone strzałką; 5. Prognozowane obszary obniżenia powierzchni ziemi nad wyrobiskami podziemnymi.

Fig. 2. Location of the mining fields in the city of Kalush and selected technological-ecological phenomena occurring on the surface. Explanations: 1. Outline of the mining concession; 2. Mining fields and outline of the workings; 3. Outline of brine ponds - marked with arrows; 4. Location of subsidence 14, 14a, 14b – marked with arrow; 5. Projected contours of ground depression above the underground workings.



Ryc. 3. Obszar nagłego zapadliska powierzchni ziemi (tzw. „uderzenie górnicze”) na obszarze północnego pola kainitowego kopalni w Kałuszu: A - 07.06.1987; B - 18.06.1987. Zapadlisko stanowi największe obniżenie na tle obszernego obszaru osiadania o rozmiarach około 150×200 m.

Fig. 3. Area of sudden ground subsidence (known as “mining shock”) in the northern kainite field of the Kalush mine: A - June 7, 1987; B - June 18, 1987. The subsidence represents the largest depression within the extensive settlement area measuring approximately 150×200 m.

odkrywkowej K-Mg (Dombrowski Karier). Skład podsadzki hydraulicznej opracowano na podstawie eksperymentów na modelach solnych. Uważano, że dzięki zastosowaniu solanek o określonym składzie, zbilansowanym z otaczającym masywem solnym i „nieagresywnym” w stosunku do skał solnych, można będzie zapewnić stateczność wyrobisk podziemnych i filarów międzykomorowych, a także zapobiec rozwojowi procesów krasowych (Semchuk, 1995). Prace takie prowadzono w latach 1988 – 1990.

4. WYNIKI BADAŃ, ANALIZA PRZYCZYN NEGATYWNYCH ZJAWISK EKOLOGICZNYCH

Złoża soli potasowo-magnezowych Podkarpacia charakteryzują się złożonym składem polimineralem i wysoką (10–40%) zawartością składnika terygenicznego, występującym głównie we frakcji ilastej. Ze względu na szczególną predyspozycję ilów solnych do absorpcji wilgoci z powietrza kopalnianego oraz pęcznienia, w wyrobiskach podziemnych kopalni miały miejsce zmiany wytrzymałości skał solnych powodujące powstawanie licznych osuwisk ociosów i obrywów stropów podziemnych komór.

Wpływ na te procesy ma przede wszystkim skład petrograficzny skał występujących w złożu. Powszechnie występującą skałą płoną są solne brekcje (zubry), które stanowią chaotyczną mieszaninę łupków, mułowców i ilów o spoiwie solnym (Ryc. 4). Poliminerale sole K-Mg występują w postaci warstw oraz cienkich warstewek (często z elementami tekstury brekcejowanej) zawierających sylwin (KCl) i kainit ($\text{KCl}\cdot\text{MgSO}_4\cdot 3\text{H}_2\text{O}$), a także karnalit ($\text{KCl}\cdot\text{MgCl}_2\cdot 6(\text{H}_2\text{O})$), polihalit ($\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, langbeinit ($\text{K}_2\text{Mg}_2[\text{SO}_4]_3$) i którym (oprócz halitu) towarzyszą skały terygeniczne, przeważnie warstwy ilaste.

Ponadto cały kompleks tych warstw chlorkowo-teryogenicznych podlegał wpływowi intensywnej tektoniki, która objawia się nie tylko zbrekcowaniem skał solnych, ale tak-

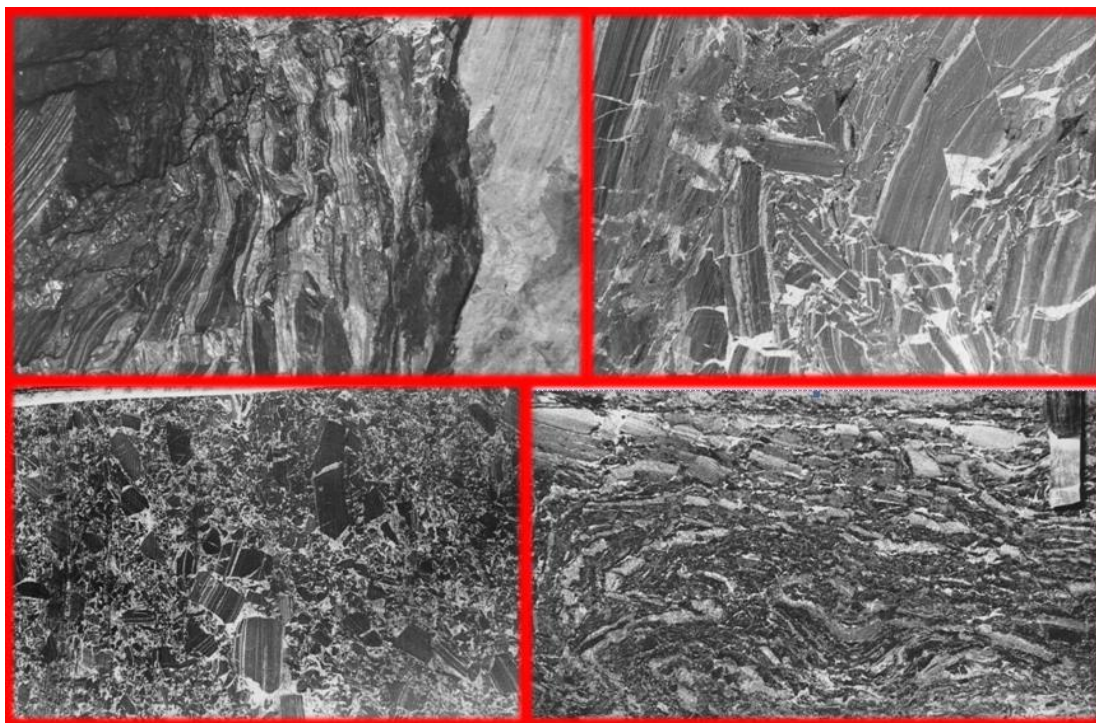
by using brines with a specific composition, balanced with the surrounding salt mass, and considered “non-aggressive” towards salt rocks, it would be possible to ensure the stability of the underground workings and inter-chamber pillars while preventing the development of karst processes (Semchuk, 1995).

4. THE RESEARCH RESULTS, ANALYSIS OF THE CAUSES OF NEGATIVE ECOLOGICAL PHENOMENA

The potassium-magnesium salt deposits in the Subcarpathian region are characterized by a complex polymictic composition and a high (10–40%) content of terrigenous components, mainly in the clay fraction. The clayey salt rocks have a particular propensity for moisture absorption from the mining atmosphere and swelling, which has led to changes in the strength of these salt rocks in underground excavations. Consequently, numerous wall collapses and roof failures in the underground chambers have occurred.

The petrographic composition of the rock formations in the deposit primarily influences these processes. Salt breccias (known as “zubers”) are commonly found and consist of a chaotic mixture of shales, siltstones, and clays with salt cement (Fig. 4). The economically valuable rock layers (K-Mg salts) occur as beds and thin layers (often with brecciated textures) containing sylvite (KCl), kainite ($\text{KCl}\cdot\text{MgSO}_4\cdot 3\text{H}_2\text{O}$), carnallite ($\text{KCl}\cdot\text{MgCl}_2\cdot 6(\text{H}_2\text{O})$), polyhalite ($\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), langbeinite ($\text{K}_2\text{Mg}_2[\text{SO}_4]_3$), and are accompanied by halite and terrigenous rocks, predominantly clay layers.

Moreover, the entire complex of these chloride-terrigenous layers is subjected to intense tectonic forces, which result not only in the brecciation of the salt rocks but also in their shaly nature and the formation of so-called “soap-like” structures (commonly known in mining terms) occurring both in the floor and cover of the deposit. These “soap-like” structures, also found in the Polish part of the Carpathian



Ryc. 4. Brekcja solna, chaotyczna mieszanina mułowców, łupków i ilów.
Fig. 4. Salt breccia, a chaotic mixture of siltstones, shales, and clays.

że złupkowaceniowi i powstawaniem tzw. „mydlarek” (tradycyjna nazwa górnicza), występujących zarówno w podłożu jak i w nakładzie złoża. „Mydlarki” znane także z polskiej części Podkarpacia (Poborski 1952; Gaweł 1962) charakteryzują się występowaniem drobnego, chaotycznego systemu powierzchni poślizgu, które makroskopowo przypominają mydło i są niezwykle niestabilne podczas eksploatacji złoża.

Przeprowadzone obserwacje w kopalniach oraz dane z licznych eksperymentów laboratoryjnych dotyczących różnych typów skał występujących w złożu wykazały, że wytrzymałość tych skał znacznie spada wraz ze wzrostem ich wilgotności. Może to być spowodowane zarówno dopływem cieplejszego, wilgotnego powietrza latem, które jest zatłaczane do kopalni w celu wentylacji, jak i przez infiltrację wód gruntowych o różnym pochodzeniu i mineralizacji. Zauważono, że parametry fizyko-mechaniczne skał zmniejszały się szczególnie wraz ze wzrostem zawartości części ilastych w badanych próbkach.

Na podstawie badań dużej liczby próbek wszystkich głównych typów skał złoża stwierdzono, że ich wytrzymałość podczas próby ściskania zmienia się w następującym zakresie: sylwinity - od 300 do 40 kg/cm² wraz ze wzrostem wilgotności od 0,5 do 4,5%; skała kainitowa - od 400 do 70 kg/cm² wraz ze wzrostem wilgotności od 0,5 do 4,5%; wytrzymałość ilów solnych spadała od 340 do 30 kg/cm² przy wzroście wilgotności badanych próbek od 0,5 do 9%. Podobne badania przeprowadzono również poprzez wiercenie rdzeni z całego masywu górniczego w okolicy dawnych podziemnych komór ługowniczych, gdzie prowadzono eksploatację z zastosowa-

Foredeep (Poborski 1952; Gaweł 1962), are characterized by the presence of fine chaotic surfaces resembling soap and are extremely unstable during the exploitation of underground excavations.

Observations made in the mines and data from numerous laboratory experiments on various types of rocks in the deposit have shown that the strength of these rocks significantly decreases with increasing moisture content. This can be attributed to the delivery of warmer humid air during summer ventilation and groundwater infiltration with varying origins and mineralization. It was observed that the physicomchanical parameters of the rocks particularly decreased with an increase in the clay content of the tested samples.

Based on the examination of a large number of samples representing all major rock types in the deposit, it was found that their compressive strength changes within the following ranges: sylwinites - from 300 to 40 kg/cm² with an increase in moisture content from 0.5 to 4.5%; kainite rock - from 400 to 70 kg/cm² with an increase in moisture content from 0.5 to 4.5%; the strength of salt shales decreased from 340 to 30 kg/cm² as the moisture content of the tested samples increased from 0.5 to 9%. Similar studies were conducted by core drilling throughout the mining massif around former leaching chambers, where wet mining techniques were employed. The average values of rock moisture and their strength within the respective ranges determined during press tests are presented in Table 2.

niem wody, tzw. „eksploatację na mokro”. Średnie wartości wilgotności skał i ich wytrzymałości w odpowiednich zakresach określonych podczas prób w prasach przedstawiono w tabeli 2.

Jak wynika z przedstawionych danych, w miarę wzrostu wilgotności skał solnych w zakresie od 0,5% (naturalnej wartości) do 5-10%, wytrzymałość tych skał zmniejszała się nawet dziesięciokrotnie. Przy wilgotności powyżej 10%, pobieranie monolitycznych rdzeni do dalszych badań w prasach stało się niemożliwe ze względu na rozpad skał w procesie wiercenia. Podobna sytuacja występowała przy próbie testowania specjalnie wyciętych z jednorodnej skały próbek o kształcie sześcianu, które po zalewaniu nasyconą solanką i osiągnięciu wilgotności powyżej 10% rozpadały się na fragmenty.

Teoretycznie, podczas zatapiania podziemnych wyrobisk i komór utworzonych w warstwach solnych, można osiągnąć pełne nasycenie solanki i dalsze ługowanie górotworu solnego praktycznie się zatrzymuje. Badania jednak wykazały, że w wyniku oddziaływania solanki ze skałami solno-ilastymi proces rozpadu masywu górniczego trwa nadal. Głównym czynnikiem w tym procesie jest osłabienie połączeń między minerałami w brekcji solnej lub w polimineralnych warstwach produktywnych w wyniku hydratacji minerałów soli potasowo-magnezowych.

Od zakończenia kontrolowanego zatapiania trzech z czterech pól górniczych kopalni Kalusz minęło ponad 30 lat. Dlatego też, można wyciągnąć pewne wnioski dotyczące wykonania prac związanych z niewłaściwą, naszym zdaniem, likwidacją podziemnych wyrobisk solnych z przewidywaniem skutków wpływających na środowisko.

W rzeczywistości w okresie po likwidacji kopalni Kalusz powstawanie zapadlisk nie ustało, pojawiały się one nadal, a ich wymiary stały się znacznie większe niż tych pierwszych zapadlisk, po których pojawieniu się, podjęto decyzję o możliwości zalania wyrobisk kopalnianych. Obecnie na środkowym i północnym polu kainitowym powstało około 30 zapadlisk. Rozwiązanie polegające na zatłaczaniu „solanek pozostających w równowadze z górotworem solnym” okazało się nie wystarczające. Przejawiało się to kontynuacją procesu zapadania się górotworu wraz z rozwojem niecki osiadania na powierzchni ziemi.

Początkowo (w 2008 r.) obniżenia powierzchni terenu utworzyły się ponad komorami nr 35 i 36, ale po pewnym czasie zaczęły się również rozszerzać na teren powyżej sąsiednich komór. Zapadlisko to otrzymało numer inwentaryzacyjny 14.

Jako jedno z ostatnich powstały trzy zapadliska nr 14 i 14a i 14b o łącznej objętości ponad 2500 m³, w trakcie których zaobserwowano spływ solanek o mineralizacji powyżej 200 g/l do kamienisto-żwirowego poziomu wodonośnego i bezpośrednio do koryta rzeki Sivka (Rys. 5). W połowie listopada

Tab. 2. Spadek wytrzymałości skał solnych w zależności od wzrostu wilgotności w strefie zawilgoconej filaru międzykomorowego.

Table 2. Decrease in the strength of salt rocks in relation to the increase in moisture content in the wet zone of the pillar between chambers.

	Odległość od komory eksploatacyjnej, m									
	0,1	0,5	0,9	1,3	1,7	2,1	2,5	2,9	3,3	3,7
Wilgotność [%]	10,5	4,5	4,4	3,5	2,7	2,2	1,73	1,43	1,03	0,55
Wytrzymałość [kg/m ²]	30	60	70	130	180	215	250	270	295	330

As indicated by the presented data, as the moisture content of salt rocks increases from 0.5% (the natural value) to 5-10%, their strength decreases even tenfold. At moisture levels above 10%, obtaining monolithic cores for further testing on presses became impossible due to the rocks disintegrating during the drilling process. A similar situation occurred when attempting to test specially cut cube-shaped samples from homogeneous rock, which crumbled into fragments when saturated with a solution and reached moisture levels above 10%.

Theoretically, during the submergence of underground excavations and chambers formed in salt layers, complete saturation can be achieved, and further dissolution of the salt rock mass practically ceases. However, studies have shown that the interaction of the solution with the salt-clay rocks continues to cause the deterioration of the mining mass. The main factor in this process is the weakening of connections between minerals in the salt breccia or polymictic productive layers because of the hydration of potash-magnesium salt minerals.

More than 30 years have passed since the controlled submergence of three out of four mining fields in the Kalush mine. Therefore, certain conclusions can be drawn regarding the execution of activities related to what we believe was the improper closure of underground salt excavations, considering the environmental effects.

After the closure of the Kalush mine, the formation of sinkholes did not cease; they continued to appear, and their parameters became significantly more extensive than those of the initial sinkholes, which led to the decision of the possibility of flooding the mining excavations. About 30 sinkholes have formed in the middle and northern kainite fields. The solution of the “residual equilibrium solution” injection proved to be insufficient. This was manifested by the continuation of



Ryc. 5. System zapadlisk w północnej części północnego pola kainitowego: a) Fragment północnego pola kainitowego (czarne liczby - numery komór, czerwone - numery zapadlisk); b) Zapadlisko nr 14, które powstało wśród zabudowy mieszkalnej miasta Kałusz, kwiecień 2008 roku; c) Połączenie zapadlisk 14 i 14a w jeden system, styczeń 2016 roku.

Fig. 5. Sinkhole system in the northern part of the northern kainite field: a) Fragment of the northern kainite field (black numbers - chamber numbers, red - sinkhole numbers); b) Sinkhole No. 14, which formed among residential buildings in the city of Kalush, April 2008; c) Connection of sinkholes 14 and 14a into one system, January 2016.

2015 r. kilka metrów na południe od niego nad komorą nr 34 powstało nowe zapadlisko, które połączyło się z zapadliskiem nr 14. W 2020 r. pojawiło się kolejne zapadlisko na północ od zapadliska nr 14.

Ponieważ podobna metoda likwidacji podziemnych wyrobisk została później zastosowana również podczas zatapiania kopalni „Nowy Hołyń”, na podstawie obserwacji procesów zachodzących w kopalni Kałusz można prognozować, że będą zachodzić podobne procesy. Można się spodziewać nagłego zapadania powierzchni ziemi i wypierania silnie zmineralizowanych roztworów w jedyny w regionie poziom wodonośny, który jest wykorzystywany przez ludność do zaopatrzenia w wodę pitną. Ponadto złożony system zatopionych wyrobisk górniczych kopalni „Nowy Hołyń” znajduje się pod obszarem wsi Kropywnyk i Sivka-Kaluska, gdzie obecnie istnieje 589

the subsidence process and the development of surface subsidence and depressions.

Initially (in 2008), the surface depression in this area occurred above chambers No. 35 and 36 but eventually started expanding to neighbouring chambers as well. This sinkhole was assigned serial number 14. Three sinkholes numbered 14, 14a, and 14b, with a total volume of over 2500 m³, formed recently, during which the flow of brines with mineralization above 200 g/l was observed into the gravelly aquifer level and directly into the Sivka Riverbed (Fig. 5). In mid-November 2015, a few meters south of it, a new sinkhole formed above chamber No. 34, which connected to sinkhole No. 14. In 2020, another sinkhole appeared north of sinkhole No. 14.

Since a similar method of closure of underground excavations was later applied during the submergence of the “Nowy

domów mieszkalnych oraz inne budynki, a także infrastruktura techniczna. Obiekty te znajdują się w strefie wpływu istniejących i przyszłych deformacji, co bezpośrednio zagraża bezpieczeństwu życia ludzi.

5. WNIOSKI

Biorąc pod uwagę skomplikowaną budowę geologiczną złóż soli K-Mg na Podkarpaciu Ukraińskim, a także występujące typy litologiczne skał o wysokiej zawartości składnika ilastego i znacznym zróżnicowaniu minerałów solnych (ponad 20), nasycone solanki mają negatywny wpływ na stateczność masywu górniczego. Główny negatywny wpływ wilgotności na stateczność górotworu wiąże się nie tyle z rozpuszczaniem minerałów solnych, ale przede wszystkim ze zmianą ich właściwości fizyko-mechanicznych, która prowadzi do znacznego zmniejszenia wytrzymałości skał. Skoncentrowane roztwory solne nie są obojętne dla pokładów solnych o wysokiej zawartości materiału ilastego, a tym bardziej dla kompleksu chlorkowo-terygenicznego, który podlegał intensywnemu wpływowi tektonicznemu.

W wyniku prowadzenia hydraulicznego podsadzania wyrobisk kopalni Kałusz zawiesiną opartą na nasyconych solankach nie zlikwidowano podstawy dopływu wód podziemnych, a tym samym nie zahamowano rozwoju zjawisk krasowych. W wyniku tego, po ponad 30 latach od realizacji projektu likwidacji, masyw skalny ulega ciągłemu niszczeniu. Obniżanie terenu trwa nadal i tworzą się niecki osiadania na powierzchni. Silnie zmineralizowane roztwory, którymi zostały wypełnione podziemne wyrobiska górnicze są wciskane w warstwę wodonośną i sieć rzeczną. Tak więc, podczas przyszłej eksploatacji polimineralnych soli na Ukraińskim Podkarpaciu konieczne jest podejmowanie skuteczniejszych działań w zakresie lokalizacji dawnych wyrobisk i szczelnej izolacji głównej części kopalni. Likwidacja wyrobisk podziemnych poprzez zatapanie w istniejących warunkach geologicznych wydaje się nieuzasadniona.

Holyn” mine, based on observations of the processes occurring in the Kalush mine, similar sudden subsidence processes and displacement of highly mineralized solutions into the only regional aquifer used by the population for drinking water supply can be predicted. Furthermore, the complex system of submerged mining excavations in the “Novy Holyn” mine is located under the area of the villages Kropyvnyk and Sivka-Kaluska, where there are currently 589 residential houses and other buildings, as well as engineering infrastructure. These objects are within the influence zone of existing and future deformations, directly threatening human safety.

5. CONCLUSIONS

Considering the complex geological structure of the K-Mg salt deposits in the Ukrainian Subcarpathian, as well as the occurring lithological types of rocks with high clay content and significant variation in salt minerals (over 20), solutions of any concentration have a negative impact on the stability of the mining mass. The main negative influence of moisture on rock mass stability is related not so much to the dissolution of salt minerals but primarily to the change in their physical and mechanical properties, which leads to a loss of rock strength. Concentrated salt solutions are not indifferent to salt deposits with high clay material content, let alone the chloride-terrygenic complex, which has been subjected to intense tectonic influence.

As a result of the hydraulic backfilling of the Kalush mine workings with a suspension based on a highly concentrated brine, the inflow of groundwater was not eliminated. Therefore, the development of karst phenomena was not halted. Consequently, over 30 years since the implementation of this closure project, the mining massif continues to undergo continuous deterioration. Land subsidence persists, and periodic sinkholes form on the surface. The highly mineralized solutions that filled the underground mine workings are being injected into the aquifer and river network. Therefore, during future exploitation of polymineral salts in the Ukrainian Subcarpathians, it is necessary to take effective measures to locate the former workings and provide tight isolation for the main part of the mine. The closure of the underground workings through inundation in the existing geological conditions seems unjustified.

LITERATURA / REFERENCES

- BUKOWSKI K., CZAPOWSKI G. 2008. Salt geology and mining traditions: Kalush and Stebnyk mines (Fore-Carpathian region, Ukraine). *Geoturystyka* 3 (18): 27-34.
- CZAPOWSKI, G., BUKOWSKI, K. & POBORSKA-MŁYNARSKA, K., 2009. Miocene rock and potash salts of West Ukraine. Field geological-mining seminar of the Polish Salt Mining Society. *Geologia (Przegląd Solny 2009)*, Wyd. AGH, Kraków, 35, 3: 479-490. (In Polish, English summary).
- GAWĘŁ A. 1962. Budowa geologiczna złoża solnego Wieliczki. *Prace Instytutu Geologicznego*, 30, 3: 305-331.
- POBORSKI J. 1952. Złoże solne w Bochni na tle geologicznym okolicy. *Biuletyn Instytutu Geologicznego*, 78: 1- 160.
- SADOVYI Y.V., GALAMAY A.R., BUKOWSKI K. 2022. Environmental and socio-economic problems caused by the activities of the Dombrovsky quarry in the Kalush Potash-Magnesium Plant and ways to solve them in the context of the revival of the potash

- industry in the Ukrainian Forecarpathian. *Przegląd Solny / Salt Review*, 2021/2022, 16: 171–175.
- ŽUREK R., DIAKOV V., SZAREK-GWIAZDA E., KOSIBA J., WOJTAL A. 2018. Unique Pit Lake Created in an Opencast Potassium Salt Mine (Dombrovska Pit Lake in Kalush, Ukraine). *Mine Water and the Environment*, 37:456–469.
- РУДЬКО Г. І., ПЕТРИШИН В. Ю. 2017. Соляні ресурси Передкарпаття та перспективи їх використання. – Київ–Чернівці: Букрек. – 472.
- САДОВИЙ Ю. В., ГАЛАМАЙ А. Р., СИДОР Д. В. 2019. Перспективи розвитку калійної промисловості Передкарпаття // Матеріали VIII науково-практичної конференції «Мінерально-сировинні багатства України: шляхи оптимального використання». – Хорошів, Україна. – 4 жовтня 2019. – С. 215–221.
- СЕМЧУК Я. М. 1995. Наукові та методичні основи охорони геологічного середовища в районах розробки калійних родовищ (на прикладі Передкарпаття): авторф. дис...д-ра техн. наук: 11.00.11 / Семчук Ярослав Михайлович; Івано-Франківський технічний ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 1995. – 46 с.