

# PRZEGLĄD SOLNY

SALT REVIEW



T O M 1 8 • 2 0 2 4



ROCZNIK POLSKIEGO STOWARZYSZENIA GÓRNICTWA SOLNEGO  
YEARBOOK OF POLISH SALT MINING ASSOCIATION



# PRZEGLĄD SOLNY

---

## SALT REVIEW

TOM XVIII

2024

ROCZNIK POLSKIEGO STOWARZYSZENIA GÓRNICTWA SOLNEGO

---

YEARBOOK OF POLISH SALT MINING ASSOCIATION



Kraków

---

**RADA NAUKOWA / EDITORIAL ADVISORY BOARD**

---

|                                      |                                        |
|--------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>Krzysztof Bukowski</b> (Kraków)   | <b>Maciej Pawlikowski</b> (Kraków)     |
| <b>Grzegorz Czapowski</b> (Warszawa) | <b>Tadeusz Marek Peryt</b> (Warszawa)  |
| <b>Aleksander Garlicki</b> (Kraków)  | <b>Andrej Poberezhskyy</b> (Lwów)      |
| <b>Stefano Lugli</b> (Modena)        | <b>Juan Jose Pueyo Mur</b> (Barcelona) |
| <b>Anatoliy Makhnach</b> (Mińsk)     | <b>Laura Rosell Orti</b> (Barcelona)   |
| <b>Jacek Motyka</b> (Kraków)         | <b>Michael Schramm</b> (Hanower)       |

---

**ZESPÓŁ REDAKCYJNY / EDITORIAL COMMITTEE**

---

**Jacek Wachowiak**, OBRGSCHEM „Chemkop” – Redaktor Naczelny / Editor-in-Chief (jacek.wachowiak@chemkop.pl)  
**Katarzyna Cyran**, AGH – Z-ca Redaktora Naczelnego / Assistant Editor-in-Chief (kcyran@agh.edu.pl)  
**Tomasz Toboła**, AGH – Sekretarz / Secretary (tob@geolog.geol.agh.edu.pl)  
**Agnieszka Maj**, IMG PAN – Redaktor / Co-editor (maj@img-pan.krakow.pl)

---

**WYDAWCA / PUBLISHER**

---

Polskie Stowarzyszenie Górnictwa Solnego / Polish Salt Mining Association

---

**ADRES REDAKCJI / EDITORIAL ADDRESS**

---

**Polskie Stowarzyszenie Górnictwa Solnego**  
Al. Mickiewicza 30/A-0/129, 30-059 Kraków  
tel. +48 608 685 946, e-mail: psgs@agh.edu.pl  
www.psgs.agh.edu.pl

© Copyright by Polskie Stowarzyszenie Górnictwa Solnego, 2024

**Projekt i opracowanie graficzne okładki / The design and graphic design cover**

Jacek Wachowiak / Artur Kozioł

**Fotografia na okładce / Cover photo**

Pustynne safari na Wadi Rum. Fot. H. Paszcza  
(podczas wyprawy Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego: Morze Martwe-Jordania 2023).  
Desert safari adventure at Wadi Rum.  
(during the Polish Salt Mining Association's expedition to Dead Sea and Jordan in 2023).

**Przygotowanie do druku i druk / DTP and print**

Agencja Reklamowa NOVUM, ul. Krowoderska 66/8, 31-158 Kraków

**ISSN 2300-9349**

**Nakład: 50 egz.**

**SPONSORZY:**



**KGHM** METRACO



## OD REDAKCJI / INTRODUCTION

### *Szanowni Czytelnicy!*

Oddajemy do Państwa rąk XVII tom *Przeglądu Solnego*. *Przegląd Solny* jest rocznikiem wydawanym przez Polskie Stowarzyszenie Górnictwa Solnego (PSGS). Zamieszczane w nim artykuły dotyczą polskiego i światowego solnictwa w szerokim jego pojęciu. Są to zagadnienia z zakresu górnictwa solnego, geologii, geodezji, przemysłu solnego oraz dyscyplin pokrewnych. Zamieszczone w *Przeglądzie solnym* artykuły recenzowane są przez dwóch recenzentów i publikowane w języku polskim i angielskim.

Większość zagadnień publikowanych w XVII tomie *Przeglądu Solnego* była tematem prezentacji na tegorocznym XXVIII Międzynarodowym Sympozjum Solnym Quo Vadis Sal 2024, które odbyło się Kopalni Soli „Wieliczka” S.A. w dniach 17–18 października 2024 r.

Recenzentami artykułów opublikowanych w *Przeglądzie Solnym 2024* byli: dr hab. inż. Wacław Andrusikiewicz, dr hab. inż. Krzysztof Bukowski, dr hab. inż. Stanisław Burliga, dr hab. Grzegorz Czapowski, dr hab. inż. Katarzyna Cyran, dr hab. inż. Kajetan D’Obyrn, dr inż. Mateusz Gil, dr Joanna Jaworska, dr inż. Michał Kowalski, dr inż. Piotr Kukiałka, dr hab. Leszek Lankof, dr hab. inż. Tomasz Toboła.

W imieniu Redakcji *Przeglądu Solnego* składam serdeczne podziękowania Autorom artykułów, Recenzentom i wszystkim osobom współpracującym za poświęcony czas i pracę włożoną w przygotowanie i wydanie tego tomu.

Serdecznie dziękuję naszym Partnerom i Sponsorom: **Kopalni Soli Wieliczka S.A., Kopalni Soli Kłodawa S.A., Kopalni Soli Bochnia Sp. z o.o., KGHM Polska Miedź S.A., KGHM Metraco S.A., GWE Pol-Bud Sp. z o.o., Sandvik Polska Sp. z o.o.** za wsparcie logistyczne, merytoryczne i finansowe podczas organizacji XXVIII Międzynarodowego Sympozjum Solnego Quo Vadis Sal 2024, którego elementem było opracowanie i wydanie XVII tomu *Przeglądu Solnego*.

Szczególne podziękowania składam Zarządowi i Pracownikom **Kopalni Soli „Wieliczka” S.A.** za podjęcie się roli Gospodarza i Współorganizatora tegorocznego Sympozjum.

Jestem głęboko przekonany, że tego typu serdeczna, merytoryczna i konstruktywna współpraca nauki z przemysłem przynosi realne korzyści górnictwu solnemu a potomnym pozostawia cenne informacje naukowo-techniczne.

### *Dear Readers,*

We have published Vol. XVII of our *Salt Review*. It is an annual journal issued by the Polish Salt Mining Association (PSGS). The papers contained in each volume concern Polish and international salt mining in all its aspects, including mining, geology, surveying, processing, and similar industries and businesses. The papers are presented in Polish and English, each preceded by two reviews.

The majority of papers included in Vol. XVII of the *Salt Review* were read during the XXVIII *Quo Vadis Sal* International Salt Symposium 2024 which took place at the “Wieliczka” Salt Mine in October, 17–18, 2024.

The following were the reviewers of the papers: Wacław Andrusikiewicz, Phd. Eng., Krzysztof Bukowski, Phd. Eng., Stanisław Burliga, Phd., Grzegorz Czapowski, Phd., Katarzyna Cyran Phd. Eng., Kajetan D’Obyrn, Phd. Eng., Mateusz Gil, Phd. Eng., Joanna Jaworska, Phd., Michał Kowalski, Phd. Eng., Piotr Kukiałka, Phd. Eng., Leszek Lankof, Phd., Tomasz Toboła, Phd. Eng.

On behalf of the *Salt Review* Editors, I would like to thank all our Authors, Reviewers, and other Associates for their valuable work and dedication.

I also appreciate sponsorship of the following Partners: **Salt Mine Wieliczka S.A., Salt Mine Kłodawa S.A., Salt Mine Bochnia Ltd., KGHM Polska Miedź S.A., KGHM Metraco S.A., GWE Pol-Bud Ltd., Sandvik Poland Ltd.** for their logistic, substantive, and financial support during the proceedings of the XXVIII *Quo Vadis Sal* International Salt Symposium 2024, accompanied by the present Volume of our *Salt Review*.

Special thanks go to the Management Board and Workers of the **Salt Mine “Wieliczka” S.A.** for their role as the Host and Joint Organiser of our Symposium. I am deeply convinced that cordial, substantive, and constructive co-operation between research and industry can generate immediate mutual benefits for salt mining research workers and business entrepreneurs, as well as valuable research and technical information for our future colleagues.



dr inż. Jacek Wachowiak

*Redaktor Naczelny Przeglądu Solnego / Salt Review, Editor-in-Chief*



## SPIS TREŚCI / CONTENTS

### I. ARTYKUŁY / PAPERS

- 6 I. BAGRIY, A. POBEREZHSKY, N. MASLUN, O. STUPKA, I. SUPRUN, O. ZUBAL, I. KRYL**

Naftowo-wodorowe i solonośne formacje fanerozoiku w basenach ryftogenicznych Ukrainy

*Petroleum-hydrogen and salt-bearing Phanerozoic formations in riftogenic basins of Ukraine*

- 13 Katarzyna CYRAN**

Rola solnych kavern magazynowych w strategii dekarbonizacji – obecny stan wiedzy

*The role of salt storage caverns in decarbonisation strategy – a review*

- 27 Joanna JAWORSKA**

Ślady po halicie – studium wybranych przykładów

*Halite casts – a case of selected examples*

- 31 Thomas KIEBLING, Andreas JOCKEL, Sebastiaan N. G. C. VAN DER KLAUW, Till POPP, Ralf-Michael GÜNTHER**

Zapobieganie szkodliwym skutkom wydobywania soli kamiennej i soli potasowych poprzez zastosowanie badań geologicznych i techniki modelowania złóż, wraz z wykorzystaniem analizy geomechanicznej i wyników modelowania do planowania działalności górniczej

*Prevention of Hazardous Impact from Rock Salt and Potash Mining by Application of Geological Exploration and Deposit Modelling Followed by Application of Geotechnical Analysis and Modelling Results for Mine Planning*

- 40 Sebastiaan N.G.C. VAN DER KLAUW, Christian FRITZE, Stephan PFEIFER, Andreas JOCKEL**

Eksploatacja otworowa jako potencjalna metoda wydobywania głęboko zalegających złóż soli potasowych w Polsce

*Solution Mining Technology – a Potential Mining Method for Deeply Buried Potash Deposits in Poland*

- 47 Piotr KUKIAŁKA**

Aspekty prawne składowania odpadów przemysłowych w kavernach solnych w Kanadzie

*Legal aspects of industrial waste storage in salt caverns in Canada*

- 57 Paul LECHMANN, Thomas RICHTER, Christian AßMUTH**

Praktyczne przykłady badań geofizycznych z zastosowaniem georadaru i radaru otworowego do oceny struktury i zasobów złóż kopalni soli

*Practical examples of geophysical GPR and borehole radar investigations for the structural and resource assessment of salt mine deposits*

- 64 Jriy V. SADOVYI, Anatoliy R. GALAMAY, Krzysztof BUKOWSKI**

Perspektywy rozpoczęcia eksploatacji złoża soli kamiennej Terebla w kontekście odbudowy górnictwa solnego na Zakarpaciu, Ukraina

*Perspectives on the commencement of exploitation of the Terebla rock salt deposit in the context of the revival of salt mining in Transcarpathia, Ukraine*

- 73 Tomasz TOBOŁA, Katarzyna CYRAN**

Geomorfologiczne zróżnicowanie Jordanii

*Geomorphological diversity of Jordan*

- 92 Agnieszka WOLAŃSKA**

Rola mecenatu Kopalni Soli „Wieliczka” w kultywowaniu górniczych tradycji i promocji dziedzictwa (na przykładzie twórczości muzycznej i rzeźbiarskiej)

*The Role of Patronage of the Wieliczka Salt Mine in Cultivating Mining Traditions and Promoting Heritage (Using the Example of Musical and Sculptural Creativity)*

### II. KOMUNIKATY /NOTICES



## I. ARTYKUŁY / PAPERS

# Naftowo-wodorowe i solonośne formacje fanerozoiku w basenach ryftogenicznych Ukrainy

## Petroleum-hydrogen and salt-bearing Phanerozoic formations in riftogenic basins of Ukraine

Ihor BAGRIY<sup>1</sup>, Andriy POBEREZHSKY<sup>2</sup>, Ninel MASLUN<sup>1</sup>, Oksana STUPKA<sup>2</sup>,  
Iryna SUPRUN<sup>1</sup>, Oleksandra ZUBAL<sup>1</sup>, Iaroslav KRYL<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geological Sciences (*Instytut Nauk Geologicznych*) of NAS of Ukraine, O. Honchara Sr., 55-b, Kyiv, Ukraine, 01054, e-mail: bagrid@ukr.net, ivanik\_m@ukr.net, suprun\_is@ukr.net, selenatrio@ukr.net

<sup>2</sup>Institute of Geology and Geochemistry Combustible Minerals (*Instytut Geologii i Geochemii Surowców Palnych*) of NAS of Ukraine, Naukova, Sr., 3-a, Lviv, Ukraine, 79060, e-mail: andriy.poberezhskyy@gmail.com, stupkaoksana@gmail.com

<sup>3</sup>HYDROGEN UKRAINE, LLC, Lavrska Sr., 20, Kyiv, Ukraine, 01015, e-mail: kryl@hydrogen.ua

### STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono uzasadnienie dotyczące powstania i rozmieszczenia formacji roponośnych, gazowo-wodorowych oraz solonośnych na Ukrainie. Szczególną uwagę poświęcono formacjom roponośnym i gazowo-solnym regionu karpackiego, które korelują z utworami mezozoicznymi i kenozoicznymi. Zaprezentowano dane dotyczące obecności struktur solnych wysadowych oraz ich rozmieszczenia w strefie połączenia platformy wschodnioeuropejskiej z trzeciorzędowym pasem ryftowym obejmującym regiony: zachodni (Karpaty), południowy (Przedgórze Dobrudży, region Morza Czarnego, Krym, basen Azowsko-Czarnomorski) i wschodni (Basen Dniepro-Doniecki). Regiony te są miejscami wydobywania ropy naftowej i gazu na Ukrainie. Omówiono również cykliczność formacji roponośnych, wodorowych i solnych oraz etapy ich ewolucji. Przeanalizowano także potencjalne możliwości magazynowania wodoru w formacjach solonośnych.

**Słowa kluczowe:** ropa naftowa, formacje gazowo-wodorowe, formacje solonośne, Karpaty, Ukraina

### ABSTRACT

This article presents justification of formation and distribution of petroleum as well as gas-hydrogen and salt-bearing formations in Ukraine. Special attention is given to the petroleum and gas-salt formations of the Carpathian region, where they are correlated to the Mesozoic and Cenozoic formations. Data is provided on the presence of salt dome structures and their spatiotemporal distribution in the junction zone between the East European Platform and the Tertiary rift belt: Western (Carpathians), Southern (Peredobrudzha, Black Sea region, Crimea, Azov-Black Sea basin) and Eastern (Dnipro-Donetsk Basin), which are the oil and gas producing regions of Ukraine. The cyclicity of petroleum-hydrogen and salt-bearing formations and the stages of their evolution are also considered. The potential of underground storages of hydrogen in salt-bearing formations has been analyzed.

**Keywords:** petroleum, gas-hydrogen, salt-bearing formations, Carpathians, Ukraine

### 1. INTRODUCTION

Ukraina jest częścią naftowo-solonośnych i metalogenicznych pasm skorupy ziemskiej w obrębie pasa alpejsko-himalajskiego. Dzięki temu posiada ogromny potencjał zasobów

Ukraine is part of the oil-salt-bearing and metallogenic belts of the Earth's crust within the Alpine-Himalayan belt and has great natural resource-producing potential. Three of the largest petroleum- and salt-producing regions are located

naturalnych. Znajdują się tu trzy największe regiony wydobywania ropy i soli – Karpaty, region Morza Czarnego-Krym oraz Prypieć-Dniepr-Donbas (największy region wydobywania gazu na kontynencie europejskim). Regiony te są zarówno wysoce produktywne, jak i obciążone ryzykiem (Rys. 1). Charakterystyczną cechą tych obszarów jest obecność solno-naftowych węzłów w basenach osadowych o ogromnym potencjale ropy, gazu i zasolenia. Ich struktura wyróżnia się podobnymi cechami strukturalno-tektonicznymi, litologiczno-facjalnymi, geochemicznymi oraz hydrodynamicznymi na odpowiednich poziomach stratygraficznych z okresu prekambryjskiego i fanerozoicznego. Powstanie tych największych basenów jest związane z okresami karbonu, dewonu, permu, triasu, paleogenu i neogenu (Rys. 2).

W wielu węzłach naftowo-solonośnych z aktywnym reżimem hydrodynamicznym (w różnych strefach morfostrukturalnych) typową cechą jest rozległe występowanie procesów wznoszącej migracji soli i węglowodorów, w szczególności wodoru. Prowadzi to do formowania się złóż ropy naftowej i gazu, które zazwyczaj mają charakter wielowarstwowy i rozciągają się na różnych poziomach stratygraficznych, obejmujących różne okresy geologiczne. W obrębie alpejsko-himalajskich stref ryftowych w rejonie Paratetydy wyróżnia się istotne węzły naftowo-solonośne: węzły zachodnio- i wschodnio-śródziemnomorskie, centralno-europejskie, kaspijskie, perskie oraz czarnomorskie. Na Ukrainie obejmują one węzły Prypecko-Dniepro-Doniecki (największy region gazowy) oraz Karpacki, które są zarówno wysokowydajne, jak i obciążone wysokim ryzykiem (Gozhyk et al., 2019).

Największe złoża metalogeniczne znajdują się w regionach naftowo-solonośnych Ukrainy. W tych regionach oraz basenach naftowych i gazowych występują liczne złoża flogopitu, apatytu, barytu, magnezytu, syderytu, grafitu, uranu, złota i innych minerałów. Znajdują się tam również duże złoża hydrotermalne miedzi i uranu, które powstały w okresach paleozoicznym i mezozoicznym w wyniku procesów metasomatycznych. Analiza różnych złóż w tych basenach pokazuje, że mogą się one różnić wiekiem i pochodzeniem. Niemniej jednak jest oczywiste, że proces formowania się złóż ropy naftowej, gazu, węgla, łupków naftowych, grafitu, różnych soli i rud w tych basenach zachodził i nadal zachodzi głównie w wyniku procesów metasomatycznych. Procesy te są spowodowane działaniem podziemnych płynów metalicznych i węglowodorowych o stosunkowo wysokiej temperaturze, które oddziałują z otaczającymi formacjami skalnymi. Dodatkowo, migracja ropy i gazu przez formacje skalne oraz obecność wód mineralizowanych mają istotny wpływ na procesy tworzenia złóż.

## 2. METODY BADAWCZE

Bogate doświadczenie w badaniach kwestii związanych z formowaniem i rozwojem złóż węglowodorów, określaniem

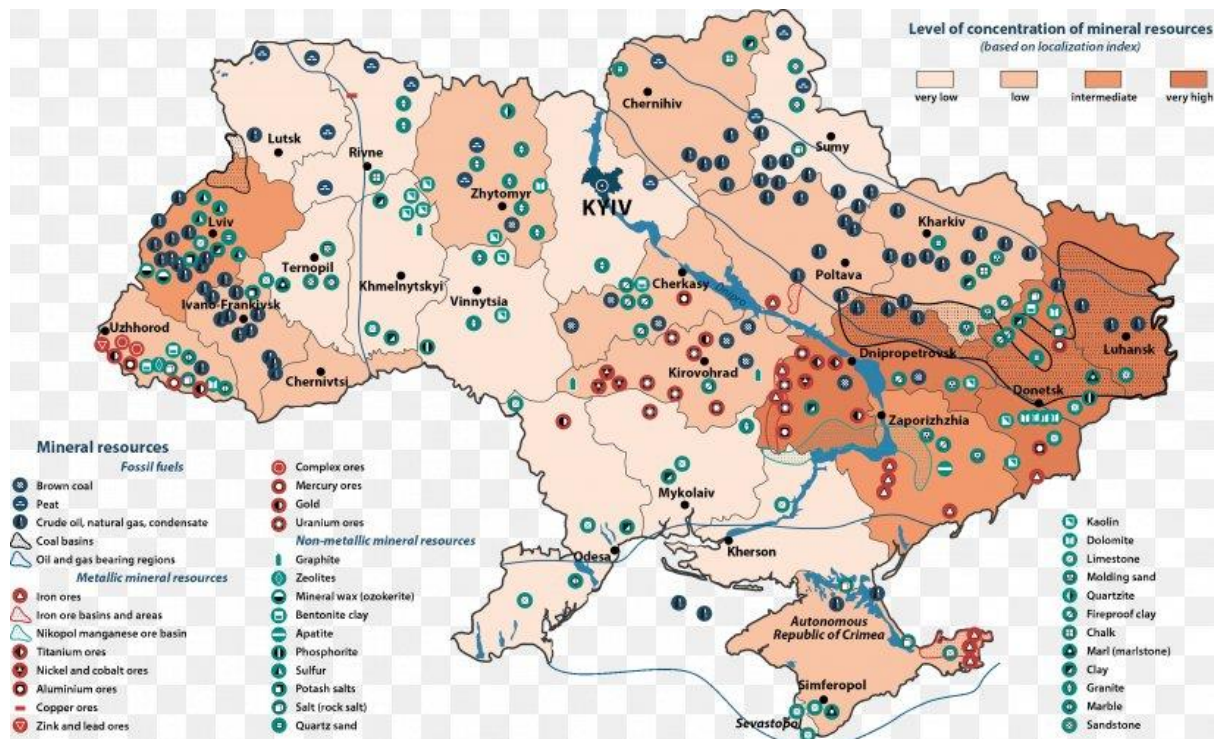
here – Carpathians, Black Sea-Crimean, and Pripyat-Dnipro-Donetsk (the largest gas-producing region on the European continent), these regions are both highly productive and high risk-prone (Fig.1). A characteristic feature of oil-salt bearing regions is the presence of saline-petroleum nodes in sedimentary basins with immense oil, gas potential and salinity. Their structure is characterized by similar structural-tektonic, lithological-facial, geochemical, and fluid-dynamic properties at certain corresponding stratigraphic levels of Precambrian and Phanerozoic age. The formation of these largest basins is linked to the Carboniferous, Devonian, Permian, Triassic, Paleogene, and Neogene periods (Fig. 2).

In many oil-and-salt-bearing nodes with an active hydrodynamic regime (within various morphostructural zones), a wide-scale manifestation of the processes of upward migration of salts and hydrocarbons, in particular hydrogen, is a typical characteristic. This leads to the formation of petroleum and gas-bearing reservoirs, that are typically multi-layered at different age levels. Within the Alpine-Himalayan riftogenic zones in the Paratethys area, significant petroleum and salt-bearing nodes are distinguished: the Western and Eastern Mediterranean, Central European, Caspian, Persian, and Black Sea nodes. In Ukraine, these include the Pripyat-Dnipro-Donetsk node (the largest gas region) and Carpathian node, which are both high-yielding and high-risk areas (Gozhyk et al., 2019).

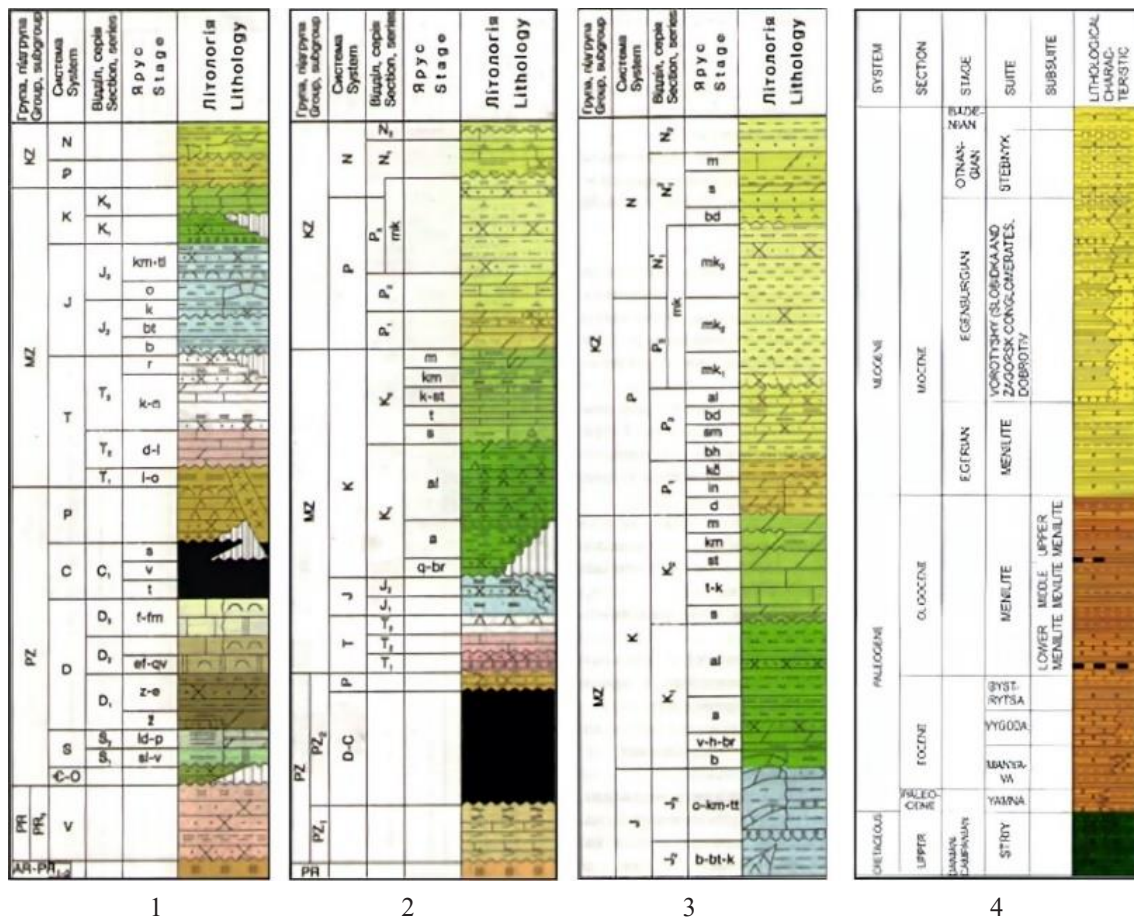
The largest metallogenic deposits are located in the oil-salt-bearing regions of Ukraine. The oil and gas regions and basins contain numerous deposits of phlogopite, apatite, barite, magnesite, siderite, graphite, uranium, gold, and other minerals. There are also large Paleozoic-Mesozoic hydrothermal metasomatic deposits of copper and uranium. Analysis of various deposits within these oil and gas basins shows that they can vary in age and origin, however there is no doubt that the formation of deposits of oil, gas, coal, oil shale, graphite, various salts, and ores in these basins has taken place and continuous to occur, mainly in a metasomatic way, caused by underground relatively high-temperature metal-bearing and hydrocarbon-bearing fluids interacting with a mixture of rock formation, and at the last stages during migration of oil and gas through rock formations, as well as mineralized waters associated with these processes.

## 2. RESEARCH METHODS

Extensive experience in researching issues of formation and development of hydrocarbon deposits, determining oil and gas content potential, as well as distribution of oil and salt-bearing formations within a geological section demonstrated the necessity of a comprehensive interpretation of analytical materials. The methodology of Geological Structural Thermoatmogeochemical Studies (GSTS) contains analytics



Ryc. 1. Mapa zasobów mineralnych Ukrainy  
Fig. 1. Mineral resources map of Ukraine



Ryc. 2. Rozmieszczenie złóż węglowodorów i soli w formacjach fanerozoicznych Ukrainy: przeddobrudzkiej (1), czarnomorsko-krymskiej (2), indolo-kubańskiej (3), karpackiej (4) (według Naftogazprospektyvni obiekty Ukrainy, 2010, [Perspektywiczne obiekty naftowe i Gazowe Ukrainy-tum własne] z uzupełnieniami autorów).

Fig. 2. Distribution of hydrocarbon and salt deposits in the Phanerozoic formations of Ukraine: Pre-Dobruddzka (1), Black Sea-Crimea (2), Indolo-Kuban (3), Carpathian (4) (according to the Oil and Gas Prospective Objects of Ukraine, 2010, with additions by the authors).

potencjału zawartości ropy naftowej i gazu oraz analizowaniem rozmieszczenia formacji naftowo-solonośnych w obrębie przekroju geologicznego wykazało konieczność kompleksowej interpretacji materiałów analitycznych. Metodologia Geologicznych Strukturalno-Termodynamicznych Badań Geochemicznych (GSTS) zawiera analizy i informacje do pogłębionego badania zagadnień związanych z węglowodorami i zasoleniem, stosując dwa podejścia naukowe: geologiczne i geochemiczne (Bagriy, 2017; Gozhik i in., 2012).

Logistyka obecnie stosowanej metodologii obejmuje kompleksowe podejście do uzasadnienia wzorców czasoprzestrzennego funkcjonowania systemów przewodzących płyny węglowodorowe, tworzenia modeli fluidodynamicznych oraz optymalizacji poszukiwań złóż ropy, gazu, wodoru, a także hydratów gazowych na małych i dużych głębokościach w obrębie basenu i pokrywy osadowej. (Bagriy i in., 2023; Behling i in., 2015; Green Hydrogen..., 2021). Koncepcja W.B. Porfiryeva dotycząca systematycznego i kompleksowego podejścia do zagadnień związanych z formowaniem złóż ropy została praktycznie wdrożona, gdyż ropa jest wynikiem reakcji chemicznych, na które wpływ mają czynniki geologiczne. Idee te zostały rozwinięte i zrealizowane w pracach wielu naukowców, w tym W.I. Wernadskiego (1943), P.F. Gozhika (2012, 2019), I.D. Bahriya (2017, 2023), V.K. Gavrisha (1989), M.M. Iwannya (1980), O.N. Lukina (2002, 2004), S.B. Shekhunovej (2020), V.I. Sozanskiego (1977) i innych.

**W jednostce geologicznej** przeanalizowano kompleksowy zestaw metod stosowanych w geologii naftowej oraz opracowano systematyczną metodologię tworzenia modeli i diagramów stratygraficznych. W stratygrafii wykorzystuje się niemal wszystkie dostępne metody, takie jak lito-biostratygrafia, sedimentologia, paleontologia, tektonika, analiza morfo-strukturalna, geodynamika, geofizyka, badania sejsmiczne, analiza klimatu i inne. Umożliwiają one pozyskiwanie szczegółowych informacji na temat struktury geologicznej regionów oraz różnych formacji geologicznych.

**W jednostce geochemicznej** rozkład czasowo-przestrzenny termo-atmo-geochemicznych anomalii jest określany na podstawie kompleksowej analizy danych geologicznych uzyskanych przy użyciu GSTS. W przeciwieństwie do wcześniej stosowanych na Ukrainie metod badań powierzchniowych, które skupiały się wyłącznie na wykrywaniu anomalii metanu jako bezpośrednich wskaźników złóż węglowodorów, ta metodologia przyjmuje bardziej systematyczne podejście. Uwzględnia strukturę geologiczną, modele uskoków w obszarach perspektywicznych oraz identyfikuje przepuszczalne strefy neotektonicznie aktywne o podwyższonej przepuszczalności. Strefy te są kluczowe w określaniu obecnych wpływów płynów i gazów na powierzchni oraz pomagają w śledzeniu najbardziej aktywnych ścieżek migracji węglowodorów, które stanowią bezpośrednie wskaźniki potencjalnych złóż.

and information for an in-depth study of the issues of hydrocarbons and salinity using two scientific approaches – geological and geochemical (Bagriy, 2017; Gozhik et al., 2012).

Logistics of the currently employed methodology involves comprehensive approach to substantiating patterns of spatiotemporal functioning of fluid-conducting hydrocarbon systems, creating fluid-dynamic models, and optimizing the exploration of oil, gas and hydrogen reserves, as well as gas hydrates at both shallow and significant depths of the basin and sedimentary cover (Bagriy et al., 2023; Behling et al., 2015; Green Hydrogen..., 2021). The idea of Academician V.B. Porfiryev regarding the systemic and complex nature of the issues related to the formation of oil deposits has been practically implemented, as oil is the product of chemical reactions influenced by geological factors. These ideas have been developed and realized in the works of many researchers, including Vernadsky V.I. (1943), Gozhik P.F. (2012, 2019), Bahriy I.D. (2017, 2023), Gavriish V.K. (1989), Ivanik M.M. (1980), Lukin O.N. (2002, 2004), Shekhunova S.B. (2020), Sozansky V.I. (1977) and others.

**In the geological unit**, a comprehensive set of geological methods in petroleum geology has been analyzed, and a systematic methodology for constructing stratigraphic models and diagrams has been developed. Practically all geological methods are utilized in stratigraphy, including litho-biostratigraphy, sedimentology, paleontology, tectonics, morpho-structural analysis, geodynamics, geophysics, seismic studies, climate analysis, and others, allowing for the acquisition of information on the geological structure of regions and various geological formations.

**In the geochemical unit**, the spatiotemporal distribution of thermo-atmo-geochemical anomalies is determined based on a thorough analysis of geological information derived using GSTS. Unlike the surface exploration methods previously used in Ukraine which focused on direct indicators of hydrocarbon deposits based on detected anomalies of methane components, this methodology focuses on a systematic analysis that takes into account geological structure, fault models of prospective areas, and detection of fluid-permeable neotectonically active zones of elevated permeability, which determine current surface unloading of fluid and gas flows, and identifies pathways of the most active migration of hydrocarbons – direct indicators of their deposits.

A combination of near-surface exploration is optimal for determining the thermo-geochemical criteria for predictive mapping of promising areas and assessing their hydrocarbon potential. This is achieved through integration of several geological-structural studies, near-surface exploration methods – gas for hydrocarbons, helium, hydrogen, and indirect (mediated) emissions, and thermometric surveys (Bagriy, 2019). Cartographic models are developed based on the distribution of bottom sediments temperature indicators, the sum

Kombinacja badań przy powierzchni jest optymalna do określenia kryteriów termogeochemicznych w prognozowaniu obszarów perspektywicznych oraz ocenie ich potencjału węglowodorowego. Osiąga się to poprzez integrację różnych badań geologiczno-strukturalnych. W tym celu stosuje się metody badań przy powierzchni, takie jak analiza gazów pod kątem węglowodorów, helu i wodoru, oraz badania emisji pośrednich. Dodatkowo przeprowadza się badania termometryczne (Bagryi, 2019). Modele kartograficzne są opracowywane na podstawie rozkładu wskaźników temperatury osadów dennych, sumy homologów metanu oraz współczynnika całkowitego, który odpowiada wskaźnikom aktywności geodynamicznej i przepuszczalności uskokuw geologicznych i tektonicznych. W rezultacie tworzone są mapy perspektywicznych obszarów do poszukiwania węglowodorów oraz ustalane są kryteria oceny produktywności złóż gazu lub ropy.

### 3. WYNIKI

Najbardziej przekonujące wyjaśnienie mechanizmu akumulacji węglowodorów i soli wynika z koncepcji pulsacji płynów. Systemy dynamiczne w litosferze, które transportują węglowodory, sole i inne złoża mineralne, działają jako systemy gazowo-hydrotermalne. W ekstremalnych warunkach termodynamicznych jedynie gazy i woda mogą pełnić rolę nośników cięższych składników, takich jak węglowodory i minerały w litosferze. Wspólny mechanizm geologiczny umożliwia lokalizację akumulacji ropy, gazu i soli, co ma zastosowanie we wszystkich tych strukturach i formacjach.

Teoretyczny model pulsacyjnego wnikania dużych, wysoko ciśnieniowych mas płynów do górnych warstw skorupy ziemskiej przewiduje istnienie płynnych zbiorników mas diapirycznych i stref zmienionych w skałach nadkładowych stref roponośnych. Te strefy są związane z okresowym wnikaniem płynów z głębszych warstw skorupy ziemskiej. Model ten pozwala oszacować rozprzestrzenienie anormalnie wysokich ciśnień zbiornikowych oraz określić wzorce rozmieszczenia złóż węglowodorów w nurze odgazowującej. Mechanizm migracji węglowodorów tłumaczony jest przez okresowe (cykliczne) przebiecia skał nadkładowych przez płyny. Pulsacje płynów przyczyniają się do formowania złóż węglowodorów, w tym złóż wodoru i soli, w wyniku odgazowywania Ziemi (Lukin, 2002, 2004).

W ramach paradygmatu biostratigraficznego wyjaśniono warunki formowania, pochodzenia i rozwoju złóż węglowodorów i soli. Analiza struktury stratygraficznej tych formacji ujawnia, że ich pochodzenie może być zarówno endogeniczne, jak i egzogeniczne. Innymi słowy, istnieje ciągła debata na temat dualistycznego pochodzenia złóż węglowodorów i soli. Baseny solne zazwyczaj wykazują strukturę blokową o charakterze strukturalno-tektonicznym, pękniętą przez gęstą sieć uskokuw, przez które młode wody solankowe wznosiły się z dużych głębokości. Procesowi temu często towarzyszyły erupcje wulkaniczne (Gozhyk i in., 2013; Prykhodko, Ponomareva, 2018).

of methane homologues, and an integral coefficient that correspond to the indicators of geodynamic activity and permeability of geological and tectonic faults. Consequently, maps of prospective areas for hydrocarbon exploration are charted and criteria for the productivity of gas or oil reservoirs are established.

### 3. RESULTS

The most compelling explanation for the mechanism of hydrocarbon and salt accumulation stems from the concept of fluid pulsation. Fluid-dynamic systems in the lithosphere that transport hydrocarbons, salts, and other mineral accumulations are gas-hydrothermal systems. Only gases and water under extreme thermodynamic conditions can serve as viable carriers for heavier than gas components such as hydrocarbons, and other minerals in the lithosphere. To facilitate these processes, there is a common geological mechanism for the localization of oil, gas, and salt accumulations that applies to all these structures and formations.

The theoretical model of pulsatory intrusion of large highly pressurized fluid masses into the upper levels of the Earth's crust predicts the existence of fluid reservoir-vein diapiric masses and "intrusion halos" within the cap rocks of hydrocarbon-bearing zones associated with periodic fluid penetration from the lower layers of the Earth's crust. The model allows for the estimation of the spread of abnormally high reservoir pressures and distribution patterns of hydrocarbon deposits within the degassing pipe. The mechanism of hydrocarbon flow migration is explained by the periodic (cyclic) breakthroughs of overlying rock formations by fluids. Fluid pulsation mechanisms lead to the formation of hydrocarbon deposits, including hydrogen and saline reservoirs due to Earth's degassing (Lukin, 2002, 2004).

Within the biostratigraphic paradigm, the conditions for the formation, origin, and development of hydrocarbon and salt deposits have been clarified. Through analysis of all factors related to the stratigraphic structure of hydrocarbon and salt formations, it has been demonstrated that they can have both endogenous and exogenous origins. In other words, dualistic origins of hydrocarbon and salt formations are still debated. Salt basins exhibit a structural-tectonic block structure, fractured by a dense network of faults through which juvenile brines were brought up from significant depths. In many cases, this process was accompanied by volcanic eruptions (Gozhyk et al, 2013; Prykhodko, Ponomareva, 2018). Sediments occurred as a result of the disruption of thermodynamic equilibrium of deep concentrated brines under pre-surface conditions (Ivanik, 1980). Saline basins are associated with sub-latitudinal zones that coincide with the position of the Tethys Sea. Similar significant salt accumulation occurred on the mar-

reva, 2018). Formowanie osadów było wynikiem zakłócenia równowagi termodynamicznej głębokich, skoncentrowanych solanek w warunkach bliskich powierzchni (Ivanik, 1980). Baseny solne są zazwyczaj związane ze strefami sub-latitudalnymi, które odpowiadają położeniu Morza Tetydy. Znaczące akumulacje soli zaobserwowano również wzdłuż brzegów Płyty Arabskiej, m.in. w Morzu Czerwonym, Dolinie Danakil oraz u stóp Gór Zagros. Większość głównych złóż halogenicznych jest produktem różnicowania materiału płaszczowego w strefach ryftowych. Tektonika soli jest również kluczowa dla przemysłu naftowego (Jackson, Hudec, 2017).

Analiza informacji geologicznych i geofizycznych uzyskanych z prac eksploracyjnych w basenach węglowodorowych i solonośnych wskazuje, że niemal każdy duży basen węglowodorowy zawiera formacje halogeniczne. Formacje te są związane z głębokimi depresjami o strukturze blokowej, licznymi wyniesieniami i siecią uskoków na różnych głębokościach, które często stanowią ich granice. Formacje terrigenne-wulkanogenne są typowe dla większości basenów solnych i roponośnych, dostarczając dowodów na synchroniczność akumulacji soli i wulkanizmu. Formacje roponośne i solonośne powstały w okresach intensywnej aktywności tektonicznej. W okresach akumulacji ropy i soli zachodziły ekstremalne transformacje w strukturach litofacjalnych, cyklicznych, morfostrukturalnych, strukturalno-tektonicznych i geodynamicznych basenów osadowych. Tempo akumulacji soli znacznie przewyższa tempo odkładania się skał osadowych i można je porównać jedynie z szybkością formowania się osadów wulkanicznych. Grubość formacji roponośnych i solonośnych jest zazwyczaj ekstremalnie duża, osiągając od 10 000 do 12 000 metrów w niektórych basenach, przy czym halit stanowi istotną część stratygrafii basenów osadowych.

#### 4. POTENCJALNE PODZIEMNE MAGAZYNOWODORU NA UKRAINIE

W związku z rosnącym popytem na wodór, produkcja tego gazu w istniejących rafineriach ropy może wymagać zwiększenia, co wiązać się będzie z potrzebą budowy podziemnych magazynów jako najbardziej ekonomicznej i ekologicznej opcji. Całkowity potencjał magazynowania w Europie szacuje się na 84,8 PWh  $H_2$ , z czego tylko 27% tej pojemności znajduje się w obiektach nadziemnych. Ponadto, ta pojemność spada do 7,3 PWh  $H_2$  w promieniu 50 km od linii brzegowej (Caglayan i in., 2020).

W Ukrainie znajdują się trzy rafinerie: Kremenczuk, Drohobycz i Nadwórna, które są usytuowane nad formacjami solnymi, tworząc korzystne warunki do budowy magazynów wodoru. W praktyce wybór miejsc budowy obiektów podziemnych do magazynowania opiera się na warunkach geologicznych i ekonomicznych. W Ukrainie znajdują się trzy duże obszary solne: depresja dnipro-doniecka (w tym północno-

gins of the Arabian Plate in the Red Sea, in the Danakil Salt Valley, and in the foothills of the Zagros Mountains the vast majority of major halogenic deposits are products of mantle material differentiation in riftogenic zones. Salt tectonics is also vitally important to the petroleum industry (Jackson, Hudec, 2017).

The analysis of geological and geophysical information derived from the results of exploration and appraisal works in hydrocarbon and salt-bearing basins indicates that almost every major hydrocarbon basin contains halogenic formations. These formations are associated with deep depressions of block structure, numerous uplifts, and a network of various-depth faults, which often serve as their boundaries. Terrigenous-volcanogenic formations are typical for most salt and oil-bearing basins, providing evidence of the synchronicity of salt accumulation and volcanism. Petroleum-bearing and salt-bearing formations were formed during periods of significant tectonic activity. During periods of oil and salt accumulation, there were extreme transformations occurring within litho-facial, cyclical, morphostructural, structural-tectonic, and geodynamic structures of sedimentary basins. The rate of salt accumulation greatly exceeds that of sedimentary rocks deposits and can only be compared to the speed of formation of volcanic deposits. The thickness of petroleum-bearing and salt-bearing formations is typically extremely high, reaching 10-12 thousand meters in some basins, with halite comprising a significant portion of the sedimentary basin stratigraphy.

#### 4. POTENTIAL UNDERGROUND STORAGE OF HYDROGEN IN UKRAINE

Given the high demand for hydrogen, its production at existing oil refineries may need to be increased, necessitating underground storage as the most economical and environmentally friendly option. The total potential storage capacity in Europe is estimated at 84.8 PWh  $H_2$ , with only 27% of this capacity being available at above-surface sites. In addition, this capacity decreases to 7.3 PWh  $H_2$  within a 50 km radius of a coastal line (Caglayan et al, 2020).

There are three refineries in Ukraine: Kremenchuk, Drohobych, and Nadvirna, which are located over salt formations, creating favorable conditions for developing hydrogen storage facilities. In practice, the selection of construction sites for underground storage facilities is carried out by considering both geological and economic conditions. Three large saline regions are located on Ukrainian territory: the Dnipro-Donetsk depression (including the northwestern Donbas), the Pre-Carpathian and Transcarpathian depressions, and two areas of limited distribution of salt deposits - Peredbruzhinska and Vystupitska. In the salt-bearing basins of Ukraine, the following salt dome structures have

-zachodni Donbas), depresje przedkarpacka i zakarpacka oraz dwa obszary o ograniczonym rozkładzie złóż soli – Peredbruzhinska i Vystupitska.

W basenach solnych Ukrainy zbadano i rozważono następujące struktury kopuł solnych jako potencjalne miejsca budowy zbiorników podziemnych: Romenska w Sumach; Kaplyntsiivska i Novosenzharska w Poltawie; Adamivsko-Buhaivska w Doniecku; oraz Verkhnostrutynska, Yasenivska i Rozhnyativska w rejonie Iwano-Frankiwska (Shekhunova, 2020). Niektóre złoża, pierwotnie badane w celu pozyskiwania surowców dla przedsiębiorstw rolniczych, mogą również zostać wykorzystane do budowy obiektów magazynowych. Należą do nich złoża Izmailskie w rejonie Odeskim; złoża Dolynskie w rejonie Iwano-Frankiwskim; oraz złoża Popiliskoye i Hubitske w rejonie Lwowskim. Masy solne (w większości zbudowane z halitu) posiadają istotne pozytywne właściwości: brak uskoków i systemów pęknięć, szybkie ich zamykanie, nieprzepuszczalność dla wody i innych cieczy (czyli skuteczną izolację od otoczenia), korzystne parametry przewodnictwa cieplnego oraz możliwość zastosowania efektywnych kosztowo metod. Ponadto, formacje solne znajdują się na szerokich obszarach, które w dużej mierze pokrywają się z przemysłowo rozwiniętymi i gęsto zaludnionymi regionami. Cechy te można połączyć z faktem, że te obszary pokrywają się również z regionami węglowodorowymi i ropośnymi. Tak więc, biorąc pod uwagę takie czynniki jak efektywność kosztowa, wykonalność technologiczna, przyjazność dla środowiska, bezpieczeństwo techniczne (w tym odporność sejsmiczna) oraz potencjał budowy magazynów o niezrównanej pojemności, formacje solne mają wyraźne zalety jako środowisko budowlane.

## 5. WNIOSKI

Artykuł przedstawia uzasadnienie wzorców rozmieszczenia formacji ropośnych, gazonośnych oraz solnych i omawia mechanizmy ich powstawania. Szczególna uwaga poświęcona jest regionowi karpackiemu, który jest jednym z najstarszych i największych złóż węglowodorów w pasie riftogenowym Ziemi. Przedstawiono informacje na temat obecności struktur kopuł solnych oraz rozkładu przestrzenno-czasowego w strefie styku Platformy Wschodnioeuropejskiej i riftogennego pasa Tetydy, obejmującego regiony ropośne i gazonośne Ukrainy: zachodni (Karpaty), południowy (Przed-Dobrudża, Morze Czarne, Krym, basen Azowsko-Czarnomorski) i wschodni (depresja dnipro-doniecka). Omówiono również cykliczny charakter formacji ropośnych i gazonośnych oraz etapy ich ewolucji.

been explored and considered for the construction of underground reservoirs: Romenska in Sumy; Kaplyntsiivska and Novosenzharska in Poltava; Adamivsko-Buhaivska in Donetsk; as well as Verkhnostrutynska, Yasenivska, and Rozhnyativska structures in the Ivano-Frankivsk region (Shekhunova, 2020). Some deposits, explored for the purpose of raw material extraction for agricultural enterprises, can also be used for the construction of underground storage facilities. These include the Izmailske deposit in the Odessa region; the Dolynske deposit in the Ivano-Frankivsk region; and the Popiliskoye and Hubitske deposits in the Lviv region. Salt masses (composed mostly of halite) possess important positive properties: absence of faults and fracture systems, rapid closure of cracks, water and other fluids impermeability (i.e., isolation from the surrounding environment), favorable thermal conductivity parameters of rock formation, and options for using cost-effective methods. Furthermore, salt-bearing formations are located within wide areas, which largely coincide with industrially developed and densely populated areas. These features can be combined with the fact that these areas also coincide with gas-bearing and oil-bearing regions. Thus, considering factors such as cost-effectiveness, technological feasibility, environmental friendliness, technical safety (including seismic resistance), as well as potential of constructing storage facilities of unmatched capacity, salt formations have clear advantages as a construction environment.

## 5. CONCLUSIONS

The article provides justification for the patterns of distribution of oil and gas-bearing as well as salt-bearing formations, and discusses the mechanism of their formation. Special attention is given to the formation of the Carpathian oil, gas and salt producing region - the oldest and one of the largest oil and gas-bearing hydrocarbon formations in the Earth's riftogenic belt. The information is provided about the presence of salt dome structures and the spatial-temporal distribution in the junction zone of the East European Platform and the Tethyan riftogenic belt of oil and gas-bearing regions of Ukraine: the Western (Carpathians), Southern (Pre-Dobrudzhia, Black Sea, Crimea, Azov-Black Sea basin), and Eastern (Dnipro-Donetsk depression). The cyclic nature of oil and gas-bearing formations and the stages of their evolution are also considered.

## LITERATURA/REFERENCES

- BAGRIY I. D., 2017. Fundamental developments are the foundation of new concepts and highly effective search technologies (groundwater, hydrocarbons). Kyiv, 562 p.
- BAGRIY D., 2019. Hydro-biogenic-mantle concept of hydrocarbon origin – the key to highly efficient search technology. Kyiv, 414 p. (In Ukrainian).
- BAGRIY I. D., 2023. H<sub>2</sub> Hydrogen. Environmental and energy challenges of the XXI century. Global projects' ways of implementation. Kyiv, 292 p.
- BEHLING, N., WILLIAMS, M., MANAGI, S., 2015. Fuel cells and the hydrogen revolution: Analysis of a strategic plan in Japan, *Economic Analysis and Policy* Vol. 48: 204–221.
- CAGLAYAN, D., WEBER, N., HEINRICHS HEIDI, U., LINßEN, J., ROBINIUS, M., KUKLA, P., STOLTEN, D. (2020) Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, Issue 11: 6793–6805.
- GAVRISH, V.K., ZABELLO G. D., RYABCHUN L. M., et al., 1989. Geology and the oil-gas-bearings of the Dnieper-Donets depression. The deep structure and geotectonic development *Naukova dumka*. Kyiv, 208 p.
- GOZHIK P. F., BAGRIY I. D., MASLUN N. V., AKSEM S. D., VOITSYTSKY Z. Ya., 2012. Experience in applying the methodology of geological-structural-thermo-atmo-geochemical studies to substantiate the oil and gas potential of deep-water areas of the Black Sea area. 1st International Conference “Hydrocarbon Potential of Great Depths: Energy Resources of the Future - Reality and Forecast”. Baku, Azerbaijan, 10–12 June 2012, Collection theses: P. 94–96. (In Russian).
- GOZHYK P., IVANIK O., MASLUN N., IVANIK M., ZHABINA N., KLIUSHYNA G., VOIZIKIY Z., SUPRUN I., 2019. Regulatory factors of geological processes and events in the Cenozoic basin of the Carpathian-Black Sea segment of Tethys. Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. Conference Proceedings of the XIII International Scientific Conference. Kyiv, Ukraine, 12-15 November 2019. Vol. 2019: P. 1-5. DOI:
- Green Hydrogen in Ukraine: Taking Stock and Outlining Pathways, 2021. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), [https://www.energypartnership-ukraine.org/fileadmin/user\\_upload/ukraine/media\\_elements/Green\\_Hydrogen\\_in\\_Ukraine.pdf](https://www.energypartnership-ukraine.org/fileadmin/user_upload/ukraine/media_elements/Green_Hydrogen_in_Ukraine.pdf).
- IVANIK, M.M., 1980. Certain Conditions of the Foraminifera Fauna of Salt Basins. Paleontological Research in Ukraine. Materials of the First Annual Session of the Ukrainian Paleontological Society. Kyiv, April 3-5, 1978). Kyiv, *Naukova Dumka*: P. 52–57.
- IVANYUTA M. M., FEDYSHYN V. O., DENEHA B. I., ARSIRIY Y. O., LAZARUK Y. G. (Eds.), 1998. Atlas of oil and gas fields of Ukraine: in 6 volumes. Vol. 6: Southern oil and gas bearing region. – Lviv, 222 p. (In Ukrainian).
- JACKSON M.P.A., HUDEC M.R., 2017. Salt Tectonics: Principles and Practice. Cambridge University Press.
- LUKIN, A.E., 2002. Hypogenic-allogenic decompaction is the leading factor in the formation of secondary oil and gas reservoirs. *Geological Journ*, 4: 15-32.
- LUKIN, A.E., 2004. Pass-through Fluid Conducting Systems in Oil and Gas Basins. *Geological Journal*, 3: 34-45.
- PRYKHODKO, M.G., PONOMAREVA L.D., 2018. Geological structure of Transcarpathian Depression. *UkrDGRI*. Kyiv, 84 p.
- SHEKHUNOVA S.B., 2020. Saline Formations: Patterns of Lithogenesis and Problems of Use. Kyiv, 336 p.
- SOZANSKY, V.I., 1977. Geological Structure of Saline Basins and Conditions of Salt Accumulation. *Dokl. Geol.-Min. Sci.* Kyiv. 43 p.



# Rola solnych kawern magazynowych w strategii dekarbonizacji – obecny stan wiedzy

## The role of salt storage caverns in decarbonisation strategy – a review

Katarzyna CYRAN

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami,  
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: kcyran@agh.edu.pl

### STRESZCZENIE

Artykuł opisuje rolę kawern solnych w strategii dekarbonizacji, koncentrując się na ich wykorzystaniu do magazynowania niskoemisyjnych i zeroemisyjnych źródeł energii, takich jak wodór i sprężone powietrze oraz do podziemnego magazynowania CO<sub>2</sub>. Od ponad 70-ciu lat kawerny solne były wykorzystywane do magazynowania gazu ziemnego, LPG i produktów naftowych, ale obecnie ich rola zmienia się wspierając przejście na energię odnawialną. W artykule analizowane są wyzwania inżynierskie związane z projektowaniem, budową i eksploatacją kawern solnych, szczególnie w odniesieniu do warunków geologicznych i geotechnicznych, które wpływają na ich stateczność i pojemność magazynową. Opisano także specyficzne wymagania dotyczące magazynowania wodoru, sprężonego powietrza i CO<sub>2</sub>. W artykule podkreślono rosnące znaczenie kawern solnych w magazynowaniu energii, kładąc nacisk na ich potencjał w zapewnieniu wielkoskalowych i efektywnych rozwiązań magazynowania. Rozwiązania te powinny być zgodne z globalnymi wysiłkami na rzecz redukcji emisji gazów cieplarnianych i osiągnięcia celów neutralności klimatycznej do 2050 roku. Przyszłe innowacje i badania naukowe są kluczowe dla pełnego wykorzystania roli kawern solnych we wspieraniu działań na rzecz dekarbonizacji.

**Słowa kluczowe:** solne kawerny magazynowe, strategia dekarbonizacji, źródła czystej energii, przyszły rozwój

### ABSTRACT

The paper explores the role of salt caverns in global decarbonization strategies, focusing on their use for storing low-carbon and zero-carbon energy sources, such as hydrogen and compressed air as well as to store CO<sub>2</sub>. Salt caverns have been used to store natural gas, LPG, and petroleum products for over 70 years, but their role is now being repurposed to support the transition to renewable energy. The paper examines the engineering challenges associated with the design, construction, and operation of these caverns, particularly concerning the geological and geotechnical conditions affecting their stability and capacity. The specific requirements for storing hydrogen, compressed air, and CO<sub>2</sub> are investigated. The paper highlights the growing importance of salt caverns in energy storage, emphasizing their potential to provide large-scale, efficient storage solutions that align with global efforts to reduce greenhouse gas emissions and achieve net-zero targets by 2050. Future innovations and research are critical to fully realizing their role in supporting decarbonization efforts.

**Keywords:** salt storage caverns, decarbonisation strategy, clean energy sources, future development

## 1. WSTĘP

Kawerny solne są wykorzystywane do magazynowania źródeł energii od ponad 70 lat. Tradycyjnie w kawernach solnych magazynowany jest gaz ziemny, LPG, ropa naftowa oraz produkty naftowe. W ostatnich latach kawerny solne zaczęły odgrywać istotną rolę w strategii dekarbonizacji jako potencjalne obiekty magazynowe dla wodoru, sprężonego powietrza oraz dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ).

Magazynowanie w kawernach solnych to stosowana od wielu lat technologia, po raz pierwszy opatentowana przez niemieckiego inżyniera w 1916 roku. Po raz pierwszy kawernę solną wykorzystano do magazynowania ciekłych węglowodorów w Kanadzie w 1940 roku. Następnie, podziemny magazyn LPG zbudowano w Teksasie (USA) w 1949 roku (Warren, 2006; Plaat, 2009). W 1956 roku w Anglii rozpoczęto magazynowanie ropy naftowej (Liu i inni, 2023). Na początku lat 50-tych XX wieku opracowano technologię magazynowania propanu w kawernie solnej, którą zlokalizowano w złożu soli kamiennej Hutchinson (Ratigan, 2001). W 1959 roku w kawernach solnych w Teesside (Anglia) magazynowano miejski gaz (Beutel & Black, 2005). Kilka lat później, w 1961 roku (Warren, 2006; Plaat, 2009), w Saskatchewan (Kanada) i Michigan (USA) zbudowano pierwsze kawernowe magazyny gazu ziemnego. W Europie większość kawern magazynowych na gaz ziemny zbudowano w latach 70-tych i 80-tych XX wieku, np. w Kiel (Niemcy) i Etzel (Francja). W latach 80-tych XX wieku w USA, strategiczne rezerwy ropy naftowej zlokalizowano w kawernach wylugowanych w wysadach solnych Zatoki Meksykańskiej (Plaat, 2009; Liu i inni, 2023). Pierwsza kawerna do magazynowania wodoru została zbudowana w Teesside (Wielka Brytania) w 1972 roku (Małachowska i inni, 2022). Sześć lat później uruchomiono dwie pierwsze kawerny do magazynowania energii w postaci sprężonego powietrza (CAES) w Huntorf (Niemcy). W latach 80-tych XX wieku wykonano kawernowy magazyn sprężonego powietrza w wysadzie solnym McIntosh (Alabama, USA) (Liu i inni, 2023). W XXI wieku, kawerny solne są wykorzystywane do magazynowania energii na całym świecie, a w ostatnim latach zwrócono uwagę na ich rolę w strategii dekarbonizacji. Potencjał do magazynowania niskoemisyjnych lub zeroemisyjnych źródeł energii, takich jak wodór, sprężone powietrze, a także możliwość magazynowania  $\text{CO}_2$ , sprawia, że kawerny solne są obiecującym rozwiązaniem problemu zmian klimatycznych.

Celem niniejszego artykułu jest zbadanie potencjału kawern magazynowych w złożach soli kamiennej do wspierania globalnych działań na rzecz dekarbonizacji. W artykule podkreślono historyczne wykorzystanie kawern solnych do magazynowania energii i omówiono ich potencjał związany z magazynowaniem niskoemisyjnych lub zeroemisyjnych źródeł energii, takich jak wodór i sprężone powietrze oraz wskazano na możliwość magazynowania  $\text{CO}_2$ . Artykuł analizuje złożoność

## 1. INTRODUCTION

Salt caverns have been used to store energy sources for over 70 years. Traditionally, large-scale storage in salt caverns has included natural gas, LPG (liquid petroleum gas), crude oil, and petroleum products. Recently, salt caverns have begun to play a significant role in decarbonization strategies as potential storage facilities for hydrogen, compressed air, and carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ).

Storage in salt caverns is a mature technology, first patented by a German engineer in 1916. The first reported storage of liquid hydrocarbons in a salt cavern in Canada dates back to 1940. Next, an underground storage facility for LPG was built in Texas (USA) in 1949 (Warren, 2006; Plaat, 2009). In 1956, the storage of crude oil began in England (Liu et al., 2023). In the early 1950s, propane storage in salt caverns was developed in the Hutchinson salt deposit (Ratigan, 2001). Artificial gas was stored in salt caverns in Teesside (England) in 1959 (Beutel & Black, 2005). A few years later, in 1961 (Warren, 2006; Plaat, 2009), the first natural gas storage in salt caverns was implemented in Saskatchewan (Canada) and Michigan (USA). Most salt caverns for gas storage in Europe were built in the 1970s and 1980s, for example, in Kiel (Germany) and Etzel (France). In the 1980s, the USA stored strategic petroleum reserves in salt caverns located in salt domes in the Gulf of Mexico (Plaat, 2009; Liu et al., 2023). The first hydrogen storage cavern was built in Teesside (UK) in 1972 (Małachowska, 2022). Six years later, the first two caverns for compressed air energy storage (CAES) were commissioned in Huntorf (Germany). In the 1980s, the compressed air cavern field was constructed in the McIntosh salt dome (Alabama, USA) (Liu et al., 2023). Moving into the 21st century, salt caverns have been extensively used around the world for large-scale energy storage, and recently their role in decarbonization strategies has been recognized. Today, salt caverns are a promising solution for addressing increasing concerns about climate change through their potential to store low-carbon or zero-carbon energy sources such as hydrogen, compressed air, and  $\text{CO}_2$ .

The purpose of this paper is to explore the potential of salt caverns in supporting global decarbonization efforts. The paper highlights the historical use of salt caverns for energy storage and delves into their emerging role in storing low-carbon or zero-carbon energy sources such as hydrogen and compressed air, as well as  $\text{CO}_2$ . This paper examines the complexities involved in the design, construction, and operation of salt caverns specifically for the storage of hydrogen, compressed air, and  $\text{CO}_2$ . The aim is to analyse how this established technology can be repurposed to store renewable energy and  $\text{CO}_2$ , addressing climate change concerns.

związaną z projektowaniem, budową i eksploatacją kavern solnych do magazynowania wodoru, sprężonego powietrza i CO<sub>2</sub>. Ponadto, celem przedstawionych analiz jest wyjaśnienie w jaki sposób ta ugruntowana technologia może zostać zaadaptowana do magazynowania energii odnawialnej i CO<sub>2</sub>, odpowiadając na obawy związane ze zmianami klimatycznymi.

## 2. OGÓLNE WARUNKI MAGAZYNOWANIA

Projektowanie, budowa i eksploatacja kavern magazynowych w złożach soli kamiennej to złożony problem inżynierski, który obejmuje rozpoznanie warunków geologicznych i geotechnicznych, wybór metody ługowania, zaprojektowanie kształtu i objętości poszczególnych kavern oraz schematu pracy (cykle zatłaczania i wytłaczania), a także ustalenie maksymalnego i minimalnego ciśnienia w kavernach (Lux, 2009; Plaat, 2019; Li i inni, 2019; Wang i inni, 2019; Cyran & Kowalski, 2021).

Warunki geologiczne i geotechniczne to szczególnie złożone zagadnienia, na które wpływa wiele czynników, takich jak typ złoża soli (wysadowe lub pokładowe), jego wewnętrzna struktura, głębokość zalegania warstw soli kamiennej oraz ich miąższość, litologia i mineralogia, występowanie stref zaburzeń tektonicznych, np. stref ścinania, a także parametry mechaniczne i reologiczne soli kamiennej (Looff i inni 2010; Looff, 2017; Cyran, 2021). Preferowaną lokalizacją dla podziemnych magazynów są wysady solne, które charakteryzują się homogenicznymi warstwami soli o znacznej miąższości. Pokładowe złoża soli kamiennej charakteryzują się występowaniem wkładek skał płonnych tj. anhydryt, dolomit, iłowiec lub karnalit (Warren, 2006). Od typu złoża soli kamiennej zależy kształt i objętość kavern. Istniejące kaverny zlokalizowane w wysadach solnych charakteryzują się kształtem cylindrycznym, wysokość kilkuset metrów, średnicę od 50 do 80 m i objętość od 300 000 m<sup>3</sup> do nawet 700 000 m<sup>3</sup> (Plaat, 2009). W złożach pokładowych kształt kavern jest zróżnicowany. Ze względu na występowanie wkładek skał płonnych, które przyczyniają się do powstawania nieregularności w kształcie kavern tj. zwisające bloki lub przewężenia (Li i inni, 2017). Nieregularności te wpływają także na zmniejszenie objętości i stateczność kavern (Cyran, 2021). Z wymienionych względów, objętość kavern w złożach pokładowych jest mniejsza niż w złożach wysadowych i mieści się w zakresie od 100 000 do 300 000 m<sup>3</sup> (Plaat, 2009). Głębokość lokalizacji kavern magazynowych ma istotne znaczenie dla ich stateczności, dlatego powinna być wzięta pod uwagę na etapie ich projektowania. Na świecie, większość kavern magazynowych znajduje się na głębokości od 200 do 1600 m (Lux, 2009). Poniżej głębokości 2000 m pękanie soli jest intensywniejsze, dlatego objętości kavern są zredukowane (Warren, 2006). Miąższość warstw soli w pokładowych złożach soli kamiennej wynosi od 100 do 300 m, natomiast w wysadach solnych osiąga nawet 800 m (Warren, 2006). Ponadto, w procesie projekto-

## 2. GENERAL STORAGE CONDITIONS

The design, construction, and operation of salt caverns is a complex engineering problem that involves identifying geological and geotechnical conditions, choosing the leaching method, designing cavern shape, volume, and operation scheme (injection and withdrawal cycles), as well as determining maximum and minimum cavern pressure (Lux, 2009; Plaat, 2009; Li et al., 2019; Wang et al., 2019; Cyran & Kowalski, 2021). Geological and geotechnical conditions are particularly complex issues, influenced by many factors such as the type of salt deposit (domal or bedded), the internal structure of the salt deposit, the depth of cavern location, the thickness of rock salt layers, the lithology and mineralogy of salt and non-salt rocks, tectonically disturbed zones (e.g., shear zones), and the mechanical properties of rock salt (Looff et al., 2010; Looff, 2017; Cyran, 2021). The preferred location for storage facilities is salt domes, characterized by thick and homogeneous salt beds. Bedded salt deposits are characterized by the occurrence of interlayers composed of anhydrite, dolomite, clays, or carnallite (Warren, 2006). Cavern shape and volume are also related to the type of salt deposit. In salt domes, caverns are shaped like cylinders, several hundred meters high, with a diameter of around 50–80 meters. Such caverns have a volume ranging from 300,000 m<sup>3</sup> to even 700,000 m<sup>3</sup> (Plaat, 2009). The shape of caverns in bedded salt deposits varies. Interlayers contribute to irregularities in cavern shape, such as overhanging blocks on the cavern wall or constrictions in the „waist” or „neck” (Li et al., 2017), which impact cavern volume and stability (Cyran, 2021). Caverns in bedded salt deposits usually have smaller volumes, ranging from 100,000 to 300,000 m<sup>3</sup> (Plaat, 2009).

The depth of the cavern location is an important factor in cavern design and operation. Most caverns are located at depths of 200 to 1600 m (Lux, 2009). Generally, cavern volume is reduced below depths of 2000 m due to ongoing salt creep (Warren, 2006). The thickness of salt beds ranges from 100 to 300 m in bedded salt deposits and up to 800 m in salt domes (Warren, 2006). Moreover, the substance intended to be stored in the salt cavern under given geological and mining conditions must be considered during the design and construction stages.

These complex conditions present many challenges in cavern construction and operation, such as the risk of wall and roof fracturing, hydraulic connections between caverns, and the generation of microcracks (Lux, 2009; Berest et al., 2019; Li et al., 2019; Wang et al., 2019; Cyran & Kowalski, 2021; Cyran, 2021). Additionally, the design, construction, and operation of salt caverns must comply with both short- and long-term safety and stability requirements. The stability of salt caverns under given geological conditions is assessed

wania i wykonania kawern uwzględnia się rodzaj substancji przeznaczonej do magazynowania w danych warunkach geologicznych i górniczych.

Opisane powyżej złożone warunki geologiczne i geotechniczne są przyczyną licznych trudności podczas wykonywania i eksploatacji kawern, np. ryzyko spękania lub powstanie odspojen w ścianach i stropie kawerny, możliwość utworzenia połączeń hydraulicznych między kawernami oraz ryzyko powstawania mikropęknięć (Lux, 2009; Bérest i inni, 2019; Li i inni, 2019; Wang i inni, 2019; Cyran & Kowalski, 2021; Cyran, 2021). Na etapie projektowania należy uwzględnić krótko- i długoterminowe wymagania dotyczące bezpieczeństwa i stateczności, które powinny spełniać kawerny magazynowe. Stateczność kawern w danych warunkach geologicznych jest analizowana przy użyciu metod modelowania numerycznego. Metody te pozwalają ocenić integralność i stateczność kawern magazynowych na podstawie określonych kryteriów stateczności i parametrów mechanicznych soli kamiennej (Chen i inni, 2016; Wang i inni, 2019; Yang i inni, 2016; Wang i inni, 2018; DeVries i inni, 2002; Lux, 2009).

### 3. UWARUNKOWANIA DO MAGAZYNOWANIA WODORU, SPRĘŻONEGO POWIETRZA I CO<sub>2</sub> W KAWERNACH SOLNYCH

W poprzednim rozdziale omówiono ogólne zagadnienia, które są brane pod uwagę przy projektowaniu, wykonywaniu i utrzymaniu długotrwałej stateczności kawern solnych służących do magazynowania gazu ziemnego, LPG i ropy naftowej. W poniższych podrozdziałach zostaną przedstawione specyficzne wymagania dotyczące magazynowania wodoru, sprężonego powietrza i CO<sub>2</sub> w kawernach solnych.

#### 3.1. Magazynowanie wodoru

Wodór charakteryzuje się najniższą masą atomową (1,00784 u) spośród wszystkich substancji, a jego gęstość jest około 8 razy mniejsza niż gęstość CH<sub>4</sub> oraz 22 razy mniejsza niż gęstość CO<sub>2</sub> (Miocic i inni, 2023). Własności te powodują, że wodór ulega dyfuzji i penetruje ciała stałe szybciej niż inne gazy, co może spowodować wyciek wodoru pod wpływem wysokiego ciśnienia nadkładu. Na podstawie maksymalnej wydajności (60%) obecnie stosowanych systemów ogniw paliwowych obliczono, że jeden kilogram wodoru może wygenerować 20,45 kWh energii elektrycznej. Przykładowo, w kawernie solnej o objętości 500 000 m<sup>3</sup> zlokalizowanej na głębokości 1500 m przy ciśnieniu od 12 do 29 MPa można zmagazynować do  $1,2 \cdot 10^4$  ton wodoru, co odpowiada 381 GWh energii. W pojedynczym cyklu zatłaczania i wytłaczania takiej kawerny można dostarczyć ponad  $6 \cdot 10^3$  ton wodoru. Taka ilość wodoru odpowiada 129 GWh energii (Liu i inni, 2023).

Zakłada się, że wodór powinien być magazynowany w warstwach soli kamiennej o czystości wynoszącej 95%. Lokalizacja kawern w warstwach soli kamiennej o wysokim

using numerical methods. Numerical simulations examine the integrity and stability of salt caverns based on stability criteria and the mechanical properties of rock salt (Chen et al., 2016; Wang et al., 2019; Yang et al., 2016; Wang et al., 2018; DeVries et al., 2002; Lux, 2009).

### 3. SPECIFIC CONDITIONS FOR STORAGE OF HYDROGEN, COMPRESSED AIR, AND CO<sub>2</sub> IN SALT CAVERNS

The conditions mentioned in the previous section were general engineering problems considered and studied for salt caverns used for the storage of natural gas, LPG, and crude oil. In this section, specific storage conditions and requirements related to the storage of hydrogen, compressed air, and CO<sub>2</sub> will be discussed.

#### 3.1. Hydrogen storage

Hydrogen has the lowest atomic mass (1.00784 u) of any substance and is about 8 times less dense than CH<sub>4</sub> and 22 times less dense than CO<sub>2</sub> (Miocic et al., 2023). Thus, hydrogen is highly penetrative and diffuses through solids faster than other gases. This can result in hydrogen leakage when subjected to high overburden pressure. One kilogram of hydrogen can generate 20.45 kWh of electricity based on the maximum efficiency (60%) of current fuel cell systems. For example, a salt cavern at a depth of 1500 m and with a volume of 500,000 m<sup>3</sup> operates at pressures between 12 and 29 MPa. In this cavern, up to  $1.2 \cdot 10^4$  t of hydrogen can be stored, corresponding to 381 GWh of energy. A single injection-production cycle of this cavern can supply more than  $6 \cdot 10^3$  t of hydrogen, which corresponds to 129 GWh of energy (Liu et al., 2023).

It is recommended that hydrogen be stored in rock salt with 95% purity. A salt cavern with a high degree of rock salt purity is characterized by a low risk of potential contamination (Muhammed et al., 2022). Additionally, the presence of non-salt beds and impurities in rock salt can affect permeability and influence cavern stability (Cała et al., 2018). The porosity and permeability of interlayers are key factors for the tightness of salt caverns used for hydrogen storage (Zhang et al., 2022; Liu et al., 2023). Hydrogen reactivity with interbeds requires further detailed studies. Some experiments with sulphurous interbeds, described by Fatah et al. (2024), which are common in rock salt, showed that the geochemical reactivity of hydrogen with anhydrite was estimated to be very weak, although gypsum was transformed into bassanite. The experiment was carried out over 90 days at a temperature of 75°C and pressure below 1450 psi (Fatah et al., 2024). Moreover, hydrogen can be adsorbed into porous layers such as shale and clay, which are composed of clay minerals (Zhu et al., 2023; Pan et al., 2021). Clay minerals, characterized by

stopniu czystości minimalizuje ryzyko potencjalnego zanieczyszczenia wodoru (Muhammed i inni, 2022). Stwierdzono, że obecność przerostów płonnych i domieszek innych minerałów w soli kamiennej może przyczyniać się do wzrostu przepuszczalności i obniżenia stateczności kawern (Cała i inni, 2018; Cymn, 2021; Liu i inni, 2020).

Charakterystyka porowatości i przepuszczalności przerostów płonnych jest kluczowa dla zapewnienia szczelności kawern magazynujących wodór (Zhang i inni, 2022; Liu i inni, 2023). Reaktywność wodoru z minerałami budującymi przerosty (wkładki) ponne oraz stanowiącymi domieszki w soli kamiennej wymaga dalszych szczegółowych badań. Problematykę tą badano (Fatah i inni, 2024) dla minerałów siarczanowych, które są najczęściej spotykane w soli kamiennej w formie wkładek lub domieszek. Przeprowadzone badania stwierdziły słabą geochemiczną reaktywność wodoru z anhydrytem, natomiast wysoką dla gipsu, który został przekształcony w bassanit. Trwający 90 dni eksperyment przeprowadzono w temperaturze 75°C i ciśnieniu 1450 psi (Fatah i inni, 2024). W innym badaniu przeprowadzonym w porowatych warstwach, takich jak łupki i iłowce, często występujących w soli kamiennej, stwierdzono że wodór może być adsorbowany przez te warstwy (Zhu i inni, 2023; Pan i inni, 2021). Minerały ilaste stanowiące główny składnik łupków i iłowców, charakteryzują się specyficzną strukturą pakietową (warstwową) i są doskonałymi adsorbentami wodoru. Gęstość adsorbowanego wodoru w takich warstwach może być nawet dwukrotnie większa niż gęstość wolnego wodoru w warunkach operacyjnych kawerny dotyczących określonego ciśnienia i temperatury (Ziemiański, Derkowski, 2022; Zhu i inni, 2023).

Ciśnienie wodoru w kawernach magazynowych powinno być utrzymywane na poziomie 0,35–0,85 ciśnienia nadkładu (Li i inni, 2023). W kawernach do magazynowania gazu ziemnego praktykowane są zwykle od 1–3 cykli zatłaczania–wytlaczania rocznie. Jednak w przypadku magazynowania wodoru wymagana jest znacznie wyższa częstotliwość pracy kawerny (Liu i inni, 2023). Cykliczne obciążenia wpływają na właściwości sprężyste soli kamiennej, jak również zmniejszają jej krótkoterminową wytrzymałość oraz modyfikują granicę dylatacji i zwiększają prędkość pełzania (Ma i inni, 2013; Liang i inni, 2012). Z tych względów stwierdzono, że (Li i inni, 2023) optymalne dla utrzymania długoterminowej stateczności kawern magazynujących wodór jest nieprzekraczanie 6-ciu cykli zatłaczania–wytlaczania rocznie. Dodatkowo, w przypadku magazynowania wodoru, zmiany temperatury wodoru podczas cykli zatłaczania i wytlaczania sprzyjają powstawaniu deformacji w kawernach. Związane z temperaturą naprężenia termiczne mogą generować spękania w ścianach kawerny, które stanowią potencjalne drogi migracji wodoru. Kwestia ta wymaga jednak dalszych badań (Ramesh Kumar i inni, 2023).

a special sheet structure, are excellent adsorbents for hydrogen. Adsorbed hydrogen densities can be up to twice as high as free hydrogen densities under operating temperature and pressure conditions (Ziemiański et al., 2022; Zhu et al., 2023).

The upper and lower limits of pressure in salt caverns for hydrogen storage are 0.35–0.85 times the vertical stress of the overlying strata (Li et al., 2023). Salt caverns for gas storage typically have 1 to 3 injection-withdrawal cycles per year. However, a much higher frequency is required for hydrogen storage in salt caverns (Liu et al., 2023). Cyclic loading affects the elastic properties of rock salt, reduces short-term strength, modifies dilation boundaries, and accelerates tertiary creep (Ma et al., 2013; Liang et al., 2012). It was found (Li et al., 2023) that the optimal frequency for long-term cavern stability is 6 injection-withdrawal cycles per year. Additionally, hydrogen temperature fluctuates during these cycles, impacting various deformation mechanisms. Thermal stresses can create fractures in cavern walls, which could serve as potential pathways for hydrogen leakage. However, the extent to which these thermal effects are significant remains unclear (Ramesh Kumar et al., 2023).

In the last few years, it was found that salt caverns are not sterile environments but harbour diverse microbial organisms (Dopffel et al., 2023). These microorganisms can survive in the caverns and pose several risks to hydrogen storage. Halophilic microbes can be present in the salt rock itself or in the brines. These microbes can consume significant volumes of H<sub>2</sub> over time, leading to hydrogen loss (Dopffel et al., 2023, 2024). Additionally, these microorganisms can alter the properties of minerals and brines or produce toxic compounds, such as H<sub>2</sub>S gas, which could contaminate stored hydrogen (Dopffel et al., 2021).

Experience with hydrogen storage is limited to several salt cavern facilities (Fig. 1). Three salt caverns have been used to store hydrogen in Teesside, England, since 1972 (Liu et al., 2023; Miocic et al., 2023). These caverns, located in bedded salt deposits at a depth of 365 m, each have a volume of 210,000 m<sup>3</sup> (Berest et al., 2019). Additional hydrogen storage facilities have been operating in salt domes near the Gulf of Mexico, USA. The oldest of these, established in 1986 in the Clemens salt dome, consists of two salt caverns for hydrogen storage at depths of 850–1000 m. Each cavern has a volume of 580,000 m<sup>3</sup> and operates at pressures ranging from 7.0 to 13.5 MPa. The Moss Bluff salt dome has housed a hydrogen storage cavern since 2007, located at a depth of 1200 m with a volume of 566,000 m<sup>3</sup> and operating pressures between 5.5 and 15.2 MPa. The largest cavern is located in the Spindletop salt dome at a depth of 1340 m. This cavern operates at pressures of 6.8–20.2 MPa and has a volume of 906,000 m<sup>3</sup> (Berest et al., 2019; Evans et al., 2021; Liu et al., 2023).

Prowadzone w ostatnich latach prace wykazały, że kawerny solne nie są tak sterylnym środowiskiem, jak dotychczas sądzono, ale stanowią siedlisko różnorodnych mikroorganizmów (Dopffel i inni, 2023). Mikroorganizmy, znalezione w kawernach są źródłem poważnych problemów podczas magazynowania wodoru. Mikroby halofilne mogą występować w samej skale solnej lub w solankach i z czasem konsumować znaczne ilości  $H_2$ , co prowadzi do poważnych strat tego surowca (Dopffel i inni, 2023, 2024). Ponadto mikroorganizmy mogą zmieniać właściwości minerałów i solanek lub produkować toksyczne związki, takie jak siarkowodór, który zanieczyszcza przechowywany wodór (Dopffel i inni, 2021).

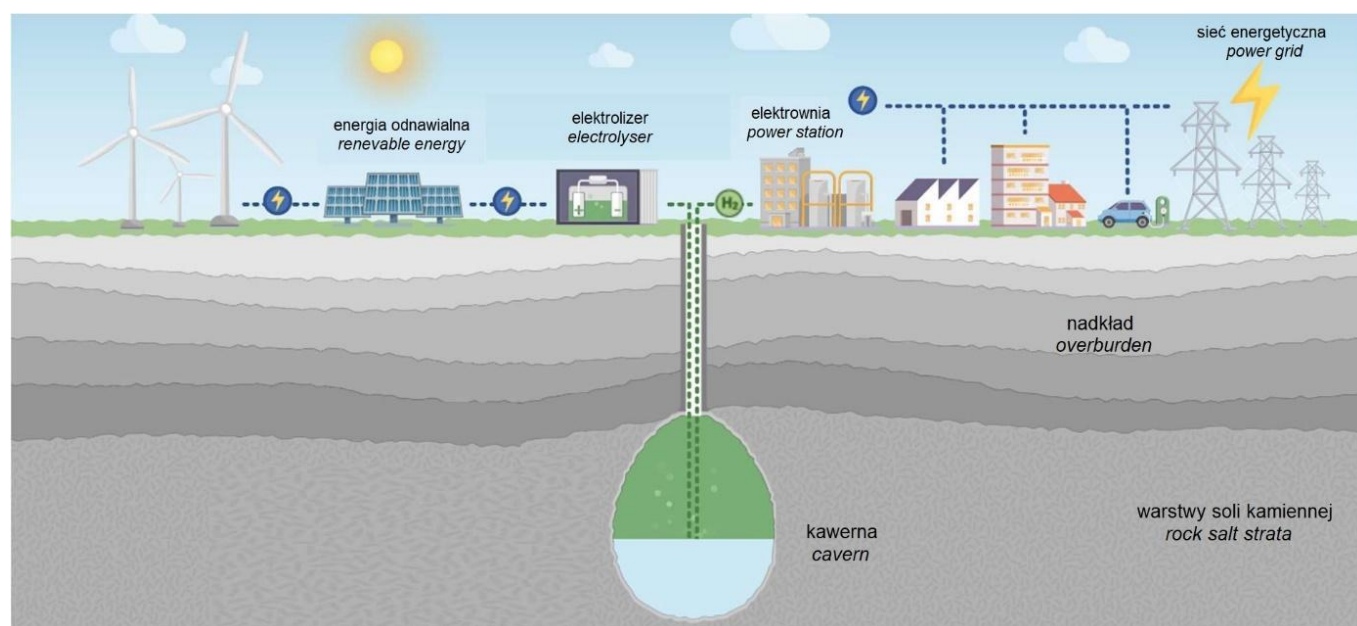
Doświadczenie w magazynowaniu wodoru w kawernach solnych na świecie ogranicza się do kilku obiektów (Ryc. 1). Funkcjonujący od 1972 roku magazyn wodoru w Teesside w Anglii zlokalizowany jest w pokładowym złożu soli kamiennej (Liu i inni, 2023; Miocic i inni, 2023). Trzy kawerny magazynowe, każda o objętości 210 000 m<sup>3</sup> znajdują się na głębokości 365 m (Bérest i inni, 2019). W wysadach solnych Zatoki Meksykańskiej w USA zlokalizowane są kolejne 3 magazyny wodoru. Najstarszy z nich został założony w 1986 roku w wysadzie solnym Clemens. W wysadzie na głębokości od 850 do 1000 m znajdują się dwie kawerny o objętości 580 000 m<sup>3</sup> każda, w których magazynowany jest wodór. Kawerny pracują w zakresie ciśnień od 7,0 do 13,5 MPa. Od 2007 roku w wysadzie solnym Moss Bluff na głębokości około 1200 m funkcjonuje jedna kawerna do magazynowania wodoru o objętości 566 000 m<sup>3</sup>. Zakres ciśnienia roboczego w tej kawernie zawiera się w granicach od 5,5 do 15,2 MPa. Największa kawerna solna (objętość 906 000 m<sup>3</sup>) magazynująca wodór zlokalizowana jest w wysadzie solnym Spindletop na głębokości 1340 m. Kawerna pracuje przy

### 3.2. Compressed air energy storage

Compressed air energy storage (CAES) involves storing energy by compressing air, which can later be utilized when needed (Budt et al., 2016; Guo et al., 2017; Olabi et al., 2021). The basic operational principle of CAES is to compress and store air during periods of low electricity demand and subsequently release the stored air to generate electricity during peak demand periods (Liu et al., 2018). To effectively use renewable energy sources, mainly wind and solar power, large-scale CAES can be employed using underground salt caverns. Salt caverns are an example of the successful commercial implementation of CAES technology (Li et al., 2023).

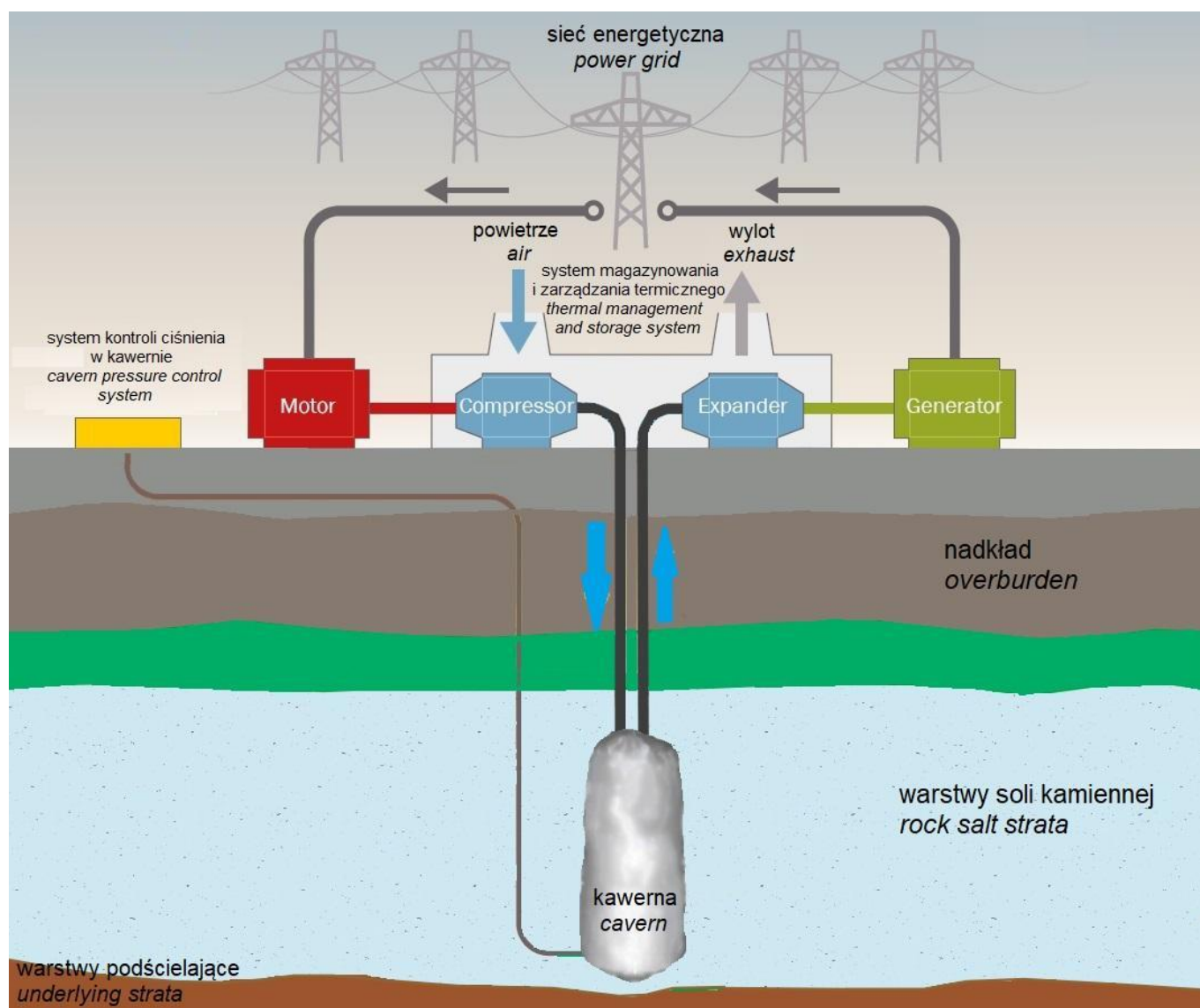
Salt formations are considered the best option for developing CAES storage facilities (Fig. 2) due to rock salt's low permeability, which prevents gas leakage and ensures the integrity of the cavern, as well as the low cost and large storage volume (Aghahosseini & Breyer, 2018). The preferred formations are domal salt deposits, where narrow and tall salt caverns with minimal roof spans can be leached. Most CAES plants are located in salt domes with homogeneous salt beds. Bedded salt deposits are more challenging when large storage volumes are required (Aghahosseini & Breyer, 2018; Li et al., 2023).

It was found (Jiang et al., 2023) that the shape of a salt cavern for CAES significantly affects temperature distribution. Thus, ellipsoidal caverns are more favourable for the stability of the surrounding rock (Wang et al., 2022). From a geomechanical perspective, salt caverns used for CAES meet stability requirements when constructed at depths between 500 and 1000 m (Wang et al., 2024). The minimum and maximum compressed air pressures in the salt cavern are 30% and 80% of the vertical stress of the overlying strata, respectively



**Ryc. 1.** Schematyczny diagram systemu podziemnego magazynowania wodoru w kawernach solnych (Djizanne et al., 2024)

**Fig. 1.** Schematic diagram of underground hydrogen storage system in salt caverns (Djizanne et al., 2024)



Ryc. 2. Schematyczny diagram systemu magazynowania sprężonego powietrza w kavernach solnych (<https://www.storelectric.com/technology>)

Fig. 2. Schematic diagram of CAES system in salt caverns (<https://www.storelectric.com/technology>)

zakresie ciśnień 6,8 - 20,2 MPa (Bérest i inni, 2019; Evans Shaw, 2021; Liu i inni, 2023).

### 3.2. Magazynowanie sprężonego powietrza

Technologia magazynowania energii elektrycznej w postaci sprężonego powietrza (CAES - Compressed Air Energy Storage) polega na kompresji powietrza i przechowywaniu go do późniejszego wykorzystania (Budt i inni, 2016; Guo i inni, 2017; Olabi i inni, 2021). Podstawowa zasada działania CAES polega na sprężaniu i magazynowaniu powietrza w okresach niskiego zapotrzebowania na energię elektryczną, a następnie uwalnianiu go w celu wytwarzania energii elektrycznej w okresach szczytowego zapotrzebowania (Liu i inni, 2018). Kaverny solne są przykładem udanej implementacji technologii CEAS do wielkoskalowego magazynowania energii (Li i inni, 2023).

Złoża soli są uważane za najlepszą opcję dla rozwoju technologii CAES (Rys. 2), ze względu na niską porowatność i przepuszczalność soli kamiennej, co zapobiega ewen-

(Chen et al., 2021; Liu et al., 2020). Similar to hydrogen storage caverns, a high frequency of injection and withdrawal cycles (up to 6–12 per year) is required for CAES caverns (Li et al., 2020).

During production cycles, compressed air is injected into the salt cavern after having been cooled. During withdrawal, the compressed air is released from the cavern and mixed with natural gas for heating. The heated air expands in the gas turbine to drive the generator and produce electricity (Han et al., 2022). In the injection and withdrawal cycles, temperature variations induce thermal stresses on the cavern wall due to heat exchange between the flowing gas and the surrounding rock salt. This affects the stability of the surrounding rocks (Li et al., 2020; Han et al., 2022).

A salt cavern located at a depth of 1000 m and with a volume of 500,000 m<sup>3</sup>, operating at a working pressure of 15 MPa, has the capacity to store 96 750 t of compressed air, which

tualnym ucieczkom gazu, a także niskie koszty wykonania kavern magazynowych i ich dużą pojemność magazynową (Aghahosseini, Breyer, 2018). Do magazynowania CAES preferowane są wysadowe złoża soli kamiennej, w których można wyługować wysokie kaverny o niewielkiej rozpiętości stropu. Z tego względu, większość obiektów CAES zlokalizowano w wysadach solnych, które charakteryzują się homogenicznymi warstwami soli kamiennej. Pokładowe złoża soli kamiennej są mniej pożądane, ponieważ do CAES potrzebna jest duża pojemność magazynowa (Aghahosseini i Breyer, 2018; Li i inni, 2023).

Stwierdzono (Jiang i inni, 2023), że kształt kaverny solnej w której magazynowane jest sprężone powietrze, ma istotny wpływ na rozkład temperatury. Najbardziej korzystne pod względem utrzymania długotrwałej stateczności są kaverny o kształcie elipsoidalnym (Wang i inni, 2022). Z geomechanicznego punktu widzenia, kaverny solne wykorzystywane do CAES spełniają warunki stateczności, gdy są zlokalizowane na głębokości pomiędzy 500 a 1000 m (Wang i inni, 2024). Minimalne i maksymalne ciśnienie sprężonego powietrza w kavernie solnej wynosi odpowiednio 30% i 80% pionowego naprężenia skał nadległych (Chen i inni, 2021; Liu i inni, 2020). Podobnie jak w przypadku kavern do magazynowania wodoru, dla kavern magazynowych na sprężone powietrze częstotliwość zatłaczania i wytłaczania przyjmowana jest na poziomie 6-12 cykli rocznie (Jiang i inni, 2020). W cyklach produkcyjnych sprężone powietrze jest wtłaczane do kaverny solnej po uprzednim schłodzeniu. Natomiast podczas wytłaczania, sprężone powietrze jest uwalniane z kaverny i mieszane z gazem ziemnym w celu ogrzania. Ogrzane powietrze rozszerza się w turbinie gazowej, napędzając generator i wytwarzając energię elektryczną (Han i inni, 2022). W cyklach pracy kaverny (cykle napełniania i wytłaczania) zmiany temperatury indukują naprężenia termiczne na ścianach kaverny. Naprężenia te są spowodowane wymianą ciepła między przepływającym powietrzem a górotworem w otoczeniu kaverny. Opisany proces ma niekorzystny wpływ na stateczność górotworu w otoczeniu kaverny magazynowej (Jiang i inni, 2020; Han i inni, 2022).

Przyjmuje się, że kaverna solna o pojemności 500 000 m<sup>3</sup>, która jest zlokalizowana na głębokości 1000 m, przy średnim ciśnieniu roboczym na poziomie 15 MPa, może zmagazynować 96 750 ton sprężonego powietrza, co odpowiada łącznej energii 5,86 GWh (Liu i inni, 2023). Na przykładzie Chin, szacuje się, że 10 kavern magazynowych na sprężone powietrze o łącznej mocy 1000 MW, może zapewnić bezpieczeństwo energetyczne (w okresie szczytowego zapotrzebowania na energię) dla miasta o populacji liczącej milion mieszkańców (Li i inni, 2023).

Obecnie na świecie działa kilka obiektów magazynujących sprężone powietrze w kavernach solnych: Huntorf w Niemczech, McIntosh w Stanach Zjednoczonych (Alabama) oraz Jintan w Chinach. W magazynie Huntorf zlokalizowanym

corresponds to a total energy of 5.86 GWh (Liu et al., 2023). It is estimated that in China, 10 CAES caverns with a total installed capacity of 1000 MW can provide power security for a city with a population of one million during peak periods (Li et al., 2023).

Several CAES facilities are currently in operation worldwide: the Huntorf CAES Plant in Germany, the McIntosh CAES Plant in the United States (Alabama), and the Jintan CAES Plant in China. At the Huntorf facility, there are two salt caverns (NK1 and NK2) with an average volume of 310 000 m<sup>3</sup> and a rated power of 290 MW (Li et al., 2023) located in a salt dome. One salt cavern is used to generate electricity, and the other is used as a reserve. The salt caverns are located at depths of 650–800 m, and they operate at pressures of 4.6–6.6 MPa. Although these salt caverns have been operating for over 40 years, regularly conducted sonar measurements have shown no significant deformations in the walls of these caverns (Li et al., 2023; Liu et al., 2023). The McIntosh CAES facility is also located in a salt dome. It has a large salt cavern with a volume of 538 000 m<sup>3</sup>, located at a depth of 450 m, and operates at a pressure range of 4.5–7.6 MPa with a rated power of 110 MW. The McIntosh facility has been running for more than 30 years (Li et al., 2023). The Jintan CAES facility in China was built in 2022 as the world's first non-supplementary combustion CAES plant with a power output of 60 MW. The entire process operates without combustion and produces zero emissions. The salt storage cavern has a volume of about 220 000 m<sup>3</sup> and is located at a depth of 1000 m in a bedded salt deposit, with a working pressure between 12 and 14 MPa (Liu et al., 2023).

The Huntorf and McIntosh CAES plants are considered traditional CAES plants because natural gas is required as a supplementary combustion material for their operation (Chen et al., 2016). However, the Jintan CAES plant integrates CAES with a thermal energy storage system, resulting in zero carbon emissions. Moreover, the efficiency of this system is estimated to be higher than that of conventional CAES technology (Zhou et al., 2018).

### 3.3. CO<sub>2</sub> storage

Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) can be captured from fossil fuels, industry, biomass, and even the atmosphere. After capture, CO<sub>2</sub> is transported to storage facilities by pipeline, ship, train, or truck. When considering the utilization of salt caverns for CO<sub>2</sub> storage, it is essential to weigh the pros and cons, as well as the high demand for the storage of oil, natural gas, and hydrogen.

The problem of CO<sub>2</sub> storage in salt caverns requires detailed research and in-depth examination because there are no active projects related to CO<sub>2</sub> storage in salt caverns worldwide. Only a few papers on this issue are available. The possibility of permanent CO<sub>2</sub> storage in salt caverns in the Lotsberg

w wysadzie solnym, znajdują się dwie kaverny magazynowe na sprężone powietrze (NK1 i NK2) o średniej pojemności 310 000 m<sup>3</sup> co odpowiada mocy 290 MW (Li i inni, 2023). Tylko jedna z tych kavern jest wykorzystywana do wytwarzania energii elektrycznej, natomiast druga służy jako rezerwa. Obydwie kaverny znajdują się na głębokości 650-800 m i pracują w zakresie ciśnień 4,6 - 6,6 MPa. Prowadzone regularnie pomiary sonarowe nie wykazały znaczących odkształceń w ścianach tych kavern, pomimo że magazyn pracuje od ponad 40 lat (Li i inni, 2023; Liu i inni, 2023). Kaverna magazynowa w wysadzie solnym McIntosh jest największą istniejącą kaverną (pojemność 538 000 m<sup>3</sup>) do magazynowania sprężonego powietrza. Kaverna ta znajduje się na głębokości 450 m i pracuje w zakresie ciśnień 4,5-7,6 MPa, co odpowiada mocy 110 MW. Magazyn i elektrownia McIntosh działają od ponad 30 lat (Li i inni, 2023). Kolejny obiekt CAES o mocy 60 MW został wybudowany w 2022 roku w Jintan w Chinach. Jest to pierwsza na świecie elektrownia CAES, która nie wykorzystuje turbin gazowej do rozprężania powietrza, dlatego cały proces odznacza się zerową emisją CO<sub>2</sub>. Pojemność kaverny magazynowej wynosi około 220 000 m<sup>3</sup>. Kaverna ta jest zlokalizowana w pokładowym złożu soli kamiennej na głębokości 1000 m i pracuje w przedziale ciśnień 12 - 14 MPa (Liu i inni, 2023). Należy podkreślić, że obiekty Huntorf i McIntosh są uznawane za tradycyjne elektrownie CAES, ponieważ do ich działania wykorzystuje się gaz ziemny, który jest potrzebny do podgrzewania powietrza podawanego na turbinę (Chen i inni, 2016). Natomiast elektrownia Jintan integruje CAES i system magazynowania energii cieplnej, co skutkuje zerową emisją CO<sub>2</sub>. Dodatkowo wydajność całego zintegrowanego systemu elektrowni Jintan jest oceniana jako wyższa niż w przypadku konwencjonalnej technologii CAES (Zhou i inni, 2018).

### 3.3. Magazynowanie CO<sub>2</sub>

Dwutlenek węgla (CO<sub>2</sub>) może być wychwytywany z paliw kopalnych, procesów przemysłowych, biomasy, a nawet z atmosfery. Po wychwyceniu, CO<sub>2</sub> jest transportowany do obiektu magazynującego rurociągiem, statkiem, pociągiem lub samochodem ciężarowym. W przypadku kavern solnych do magazynowania CO<sub>2</sub>, należy ocenić plusy i minusy tego przedsięwzięcia oraz wysokie zapotrzebowanie na magazynowanie ropy naftowej, gazu ziemnego i wodoru w kavernach solnych.

Problematyka magazynowania CO<sub>2</sub> w kavernach solnych wymaga szczegółowych badań i dogłębnej analizy, ponieważ na świecie nie ma obecnie aktywnych projektów tego typu. Dostępna wiedza opiera się jedynie na kilku artykułach naukowych rozważających tą kwestię. Możliwość trwałego magazynowania CO<sub>2</sub> w kavernach solnych w formacji Lotsberg w Albercie (Kanada) została przeanalizowana przez Dusseaulta i inni (2004). W pracy stwierdzono, że w warunkach geologicznych formacji Lotsberg można zmagazynować

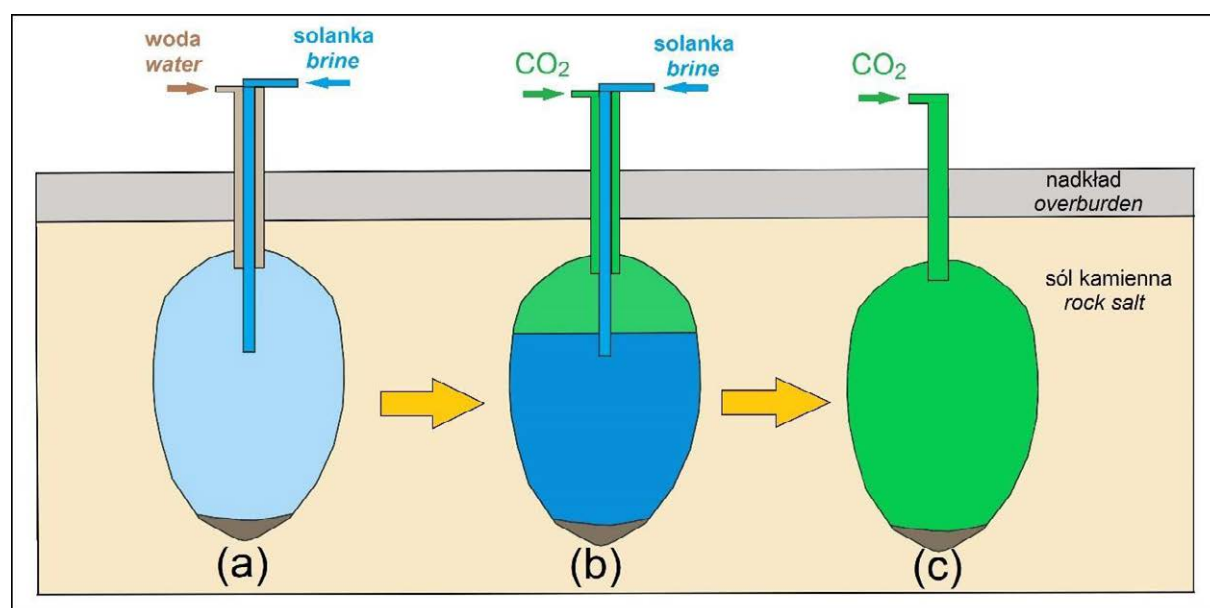
Salt Formation in Alberta (Canada) was analysed by Dusseault et al. (2004). It was found (Dusseault et al., 2004) that under the geological conditions of the Lotsberg Formation, about 364 500 tonnes of CO<sub>2</sub> can be stored, taking into account a temperature of 35°C and CO<sub>2</sub> density (in the supercritical domain) of 810 kg/m<sup>3</sup>. The cavern pressure was calculated at 15.0 MPa with a cavern volume of 450 000 m<sup>3</sup>.

An interesting idea, described by Costa et al. (2019, 2020) and Goulard et al. (2020), involves an experimental salt cavern constructed in ultra-deep offshore water for CO<sub>2</sub> capture and storage applications in Brazil. This is the first project related to offshore salt storage caverns in the world. The project idea originated from the demand for capturing and storing large quantities of CO<sub>2</sub> associated with methane production in the pre-salt offshore oil fields in Brazil. These papers describe the conceptual design and evaluation process, from parametric studies, leaching time, and structural stability to the final geomechanical design. The authors claimed the technical feasibility of a huge storage cavern, 450 m high and 150 m in diameter, which can store about 4.0 billion m<sup>3</sup> or 7.2 million tonnes of CO<sub>2</sub>. Simulations presented in these papers considered salt caverns with dimensions of 48 m high and a diameter of 20 m, as well as 275 m high and a diameter of 93 m. The simulated caverns were located at depths of -3850 m and -3590 m, respectively. The caverns were cylindrical in shape with a slightly enlarged bottom. The salt formation, 2000 m thick, is located 200–300 km from the coast (pre-salt oil fields in the Santos Basin) and was selected as a potential storage site.

Under the geological conditions of the Maha Sarakham Formation (Thailand), the most optimal cavern shape for CO<sub>2</sub> storage was assessed (Pajonpai, 2022). The comparison showed that a bulb-shaped cavern (101 m high and a maximum diameter of 52 m) provided the best results in simulated geological conditions at a depth of 900 m.

The study by Zhang et al. (2022) proposed a novel carbon cycle model based on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> storage in salt caverns. Short-term (30 years) and long-term (1000 years) safety and suitability evaluations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> storage were conducted under the geological conditions of a bedded rock salt formation (Jintan Rock Salt, Jiangsu Province, China). In the study, a spheroid-shaped cavern (64 m in diameter) was simulated at depths ranging from 800 to 2000 m. The minimum and maximum pressures for CO<sub>2</sub> storage in salt caverns were determined to be between 4.98 MPa (at a depth of 800 m) and 37.09 MPa (at a depth of 2000 m).

Cavern construction and CO<sub>2</sub> storage operations are divided into four stages (Pajonpai, 2022): leaching, brine discharge by CO<sub>2</sub> injection, pre-pressurization of the cavern by CO<sub>2</sub> injection, and cavern closure (Fig. 3). The cavern is leached by solution mining to achieve the required geometry and volume. During the leaching of salt caverns, modelling



**Ryc. 3.** Schematyczny diagram etapów konstrukcji kawern magazynowych na CO<sub>2</sub>: a) ługowanie, b) usunięcie solanki przez wtłoczenie CO<sub>2</sub>, c) napełnienie kawerny CO<sub>2</sub> i zamknięcie

**Fig. 3.** Schematic diagram of salt cavern construction for CO<sub>2</sub> storage: a) leaching, b) brine discharge by CO<sub>2</sub> injection, c) CO<sub>2</sub> injection and cavern closure.

około 364 500 ton CO<sub>2</sub> (biorąc pod uwagę temperaturę 35°C i gęstość CO<sub>2</sub> w stanie nadkrytycznym wynoszącą 810 kg/m<sup>3</sup>). Ciśnienie w kawernie magazynowej w tych warunkach geologicznych obliczono na 15,0 MPa, a jej objętość na 450 000 m<sup>3</sup>.

Interesującym pomysłem jest, opisana przez Costę i inni (2019; 2020) oraz Goularda i inni (2020), eksperymentalna kawerna do magazynowania CO<sub>2</sub> zlokalizowana w ultragłębokich wodach przybrzeżnych w Brazylii. Jest to pierwszy na świecie projekt związany z magazynowaniem w kawernach solnych na dnie morza. Pomysł projektu wynika z zapotrzebowania na wychwytywanie i magazynowanie dużych ilości CO<sub>2</sub> związanego z produkcją metanu w podmorskich złożach ropy naftowej w Brazylii. Wspomniane powyżej artykuły opisują proces koncepcyjnego projektowania kawerny oraz jej ewaluację począwszy od badań parametrycznych, przez czas ługowania i stateczność, aż po ostateczny projekt geomechaniczny. Autorzy twierdzą, że wykonanie ogromnej kawerny magazynowej, o wysokości 450 m i średnicy 150 m jest możliwe pod względem technicznym. Kawerna ta mogłaby pomieścić około 4,0 miliardów m<sup>3</sup> lub 7,2 miliona ton CO<sub>2</sub>. Symulacje numeryczne przedstawione w powyższych artykułach dotyczą kawern solnych o wymiarach: 48 m wysokości i 20 m średnicy oraz 275 m wysokości i 93 m średnicy, znajdujących się na głębokości odpowiednio -3850 m i -3590 m. Symulowane kawerny charakteryzowały się cylindrycznym kształtem z nieco rozszerzonym dołem. Na potencjalne miejsce magazynowania została wybrana formacja solna o miąższości 2000 m, zlokalizowana 200-300 km od wybrzeża (region złoża ropy naftowej w Basenie Santos).

and simulation of the cavern development are necessary for stability considerations (Li et al., 2019). At the end of the leaching process, the brine is withdrawn by CO<sub>2</sub> injection into the cavern. Then, the CO<sub>2</sub>, transported from an adjacent factory by tanks or pipelines, is injected to achieve 57% to 90-95% of the lithostatic pressure. In the final step, the cavern is closed.

#### 4. FUTURE DEVELOPMENT

It is estimated (Yolkan, 2023) that the share of renewables in the global energy will rise to 77.0% by 2050. As the demand for clean and renewable energy sources grows, the need for large-scale, efficient storage solutions like salt caverns is likely to increase. Salt caverns offer secure storage space with established engineering practices in their design, construction, and operation. Thus, high demand for hydrogen storage, CAES and CO<sub>2</sub> in salt caverns, which exceed the current scale, is expected.

Salt caverns are recognised as part of the energy transition process towards net-zero emissions by 2050. The European Union have successfully issued the EU Hydrogen Energy Strategy and the EU Energy System Integration Strategy (Liu et al., 2023). Various ongoing and upcoming research initiatives focus on hydrogen storage in salt caverns. For instance, the HyUnder project, initiated in six countries, including Germany, France, the UK, Spain, the Netherlands, and Romania (Simon et al., 2014, 2015) Another project is the ROSTOCK-H conducted by the French Geodenergies consortium from 2016 to 2021 (Tackie-Otto & Haq, 2024). Within this consortium, a demonstrator project was launched in the EZ53cavern

Wykonanie kawerny i operacja magazynowania CO<sub>2</sub> jest podzielona na cztery etapy (Pajonpai i inni, 2022): ługowanie kawerny, wytłoczenie solanki poprzez zatłoczenie CO<sub>2</sub>, zwiększenie ciśnienia w kawernie przez zatłoczenie CO<sub>2</sub> oraz zamknięcie kawerny (Rys. 3). Na etapie ługowania uzyskuje się wymaganą geometrię i objętość kawerny. Dodatkowo, ze względu na konieczność spełnienia warunków stateczności, podczas procesu ługowania wykonywane jest modelowanie i symulacja rozwoju kawerny (Li i inni, 2019). Po zakończeniu procesu ługowania, solanka jest wytłaczana z kawerny poprzez zatłoczenie CO<sub>2</sub> do kawerny. Następnie CO<sub>2</sub>, np. dostarczony z pobliskiej fabryki i transportowany przy użyciu zbiorników lub rurociągów, jest zatłaczany do kawerny, aż zostanie osiągnięty poziom od 57% do 90-95% ciśnienia lito-statycznego. W ostatnim etapie kawerna jest zamykana.

#### 4. PRZYSZŁY ROZWÓJ SKŁADOWANIA I MAGAZYNOWANIA

Szacuje się (Yolkan, 2023), że udział odnawialnych źródeł energii na światowym rynku energetycznym wzrośnie do 77,0% w 2050 roku. Wzrost zapotrzebowania na czyste i odnawialne źródła energii, prawdopodobnie spowoduje wzrost popytu na obiekty magazynowe, takie jak kawerny solne. Kawerny solne oferują bezpieczną przestrzeń do magazynowania oraz odpowiedni zasób wiedzy i metodologii w zakresie ich projektowania, wykonania i eksploatacji. Z wymienionych względów, oczekuje się wysokiego, przekraczającego dotychczasowy poziom, zapotrzebowania na magazynowanie wodoru, CAES i CO<sub>2</sub> w kavernach solnych.

Kawerny magazynowe w złożach soli kamiennej są uznawane za część procesu transformacji energetycznej w kierunku osiągnięcia zerowej emisji do 2050 roku. Unia Europejska skutecznie wprowadziła Strategię Wodorową oraz Strategię Integracji Systemu Energetycznego (Liu i inni, 2023). Prowadzone są różne inicjatywy badawcze dotyczące podziemnego magazynowania wodoru w kavernach solnych, np. projekt HyUnder zainicjowany w sześciu różnych krajach, w tym w Niemczech, Francji, Wielkiej Brytanii, Hiszpanii, Holandii i Rumunii (Simon i inni, 2014, 2015). Kolejnym projektem jest ROSTOCK-H realizowany przez francuskie konsorcjum Geodenergies w latach 2016-2021 (Tackie-Otto, Haq, 2024). W ramach tego projektu, uruchomiono projekt demonstracyjny w kawernie EZ53 w magazynie gazu Etrez, który jest zarządzany przez Storengy (Pique i inni, 2021). Oprócz projektów związanych z wodorem, na całym świecie rozwijane są także liczne projekty CAES. W Chinach trwa pierwsza faza projektu elektrowni Jintan CAES, a także obiektów CAES w Hengyang, Hunan (300 MW), Feicheng, Shandong (300 MW), Yuning, Hubei i Yulin, Shaanxi (300 MW). Nowy obiekt CAES (324 MW), którego uruchomienie planowane jest na 2025 rok (<http://www.apexcaes.com/bethel-energy-center>), powstaje

of the Etrez gas storage operated by Storengy (Pique et al., 2021).

In addition to hydrogen projects, several CAES projects have been developed worldwide. In China, the first phase of the Jintan CAES plant project is under construction, along with CAES facilities in Hengyang, Hunan (300 MW), Feicheng, Shandong (300 MW), Yuning, Hubei and Yulin, Shaanxi (300 MW). A new CAES facility (324 MW), scheduled for operation in 2025 (<http://www.apexcaes.com/bethel-energy-center>), is being built in the Bethel Salt Dome (Anderson County, Texas, USA).

However, when considering the utilisation of salt caverns for CO<sub>2</sub> storage, it is essential to weigh the pros and cons. While salt caverns offer secure storage space, the high demand for oil, natural gas, and hydrogen storage makes this option less favourable for CO<sub>2</sub> storage. In this context, salt caverns can only be considered for short-term CO<sub>2</sub> storage.

The high demand for salt caverns may generate interest in old and abandoned caverns. These old caverns may be considered due to lower costs and shorter construction times (Liu et al., 2023). Moreover, hydrogen storage in salt caverns involves a similar design and requirements to natural gas storage, and may include repurposing existing natural gas assets. In 2023, the Etzel storage facility (Germany) began converting two natural gas caverns to hydrogen (<https://h2cast.com>).

The design, construction, and stability of salt caverns are complex issues. Therefore, innovations in cavern construction and stability evaluation, such as advanced modelling techniques, should be developed to ensure the safety and cost-effectiveness of storage in varying geological and mining conditions (Li et al., 2019).

#### 5. CONCLUSION

The development and optimization of salt caverns for hydrogen, compressed air, and CO<sub>2</sub> storage are essential for advancing decarbonization strategies. Due to their large capacity, flexible operation cycles (injection and withdrawal), and proven history in energy storage, salt caverns offer a secure solution for meeting the increasing demand for energy storage and represent a crucial component in the transition to a low-carbon economy. However, realizing their full potential in decarbonization requires overcoming various technical and operational challenges. The role of salt caverns in the global decarbonization strategy will require a comprehensive approach to design and operational management. Further research, technological advancements, and collaboration between industry, government, and researchers will be crucial to advancing these storage technologies. Looking ahead, the shift towards renewable energy and the increasing demand for efficient storage solutions will likely drive further innovations in the utilization of salt caverns. The trans-

w wysadzie solnym Bethel (Anderson, Teksas, USA). Odmienienie do opisanych powyżej, przedstawia się kwestia magazynowania CO<sub>2</sub> w kawernach solnych. Rozważając wykorzystanie kawern solnych do magazynowania CO<sub>2</sub>, należy ocenić zarówno zalety, jak i wady. Mimo że kawerny solne oferują bezpieczną przestrzeń do magazynowania, wysokie zapotrzebowanie na magazynowanie ropy naftowej, gazu ziemnego i wodoru sprawia, że opcja ta jest mniej korzystna dla magazynowania CO<sub>2</sub>. W tym kontekście kawerny solne mogą być rozważane jedynie do krótkoterminowego magazynowania CO<sub>2</sub>.

Wysokie zapotrzebowanie na kawerny solne może skierować zainteresowanie na stare i porzucone kawerny. Kawerny te mogą być brane pod uwagę ze względu na niższe koszty i krótszy czas przystosowania do magazynowania wodoru czy CAES (Liu i inni, 2023). Ponadto, wymagania techniczne dla magazynowania wodoru w kawernach solnych są podobne jak dla magazynowania gazu ziemnego, dlatego w takim przypadku można rozważać zmianę magazynowanej substancji. W 2023 roku w magazynie Etzel (Niemcy) rozpoczęto przekształcanie dwóch kawern magazynujących gaz ziemny na potrzeby magazynowania wodoru (<https://h2cast.com>).

Projektowanie, wykonanie i stateczność kawern magazynowych w złożach soli kamiennej to skomplikowane zagadnienia. Z tego względu innowacje w zakresie wykonania kawern i oceny stateczności, tj. zaawansowane techniki modelowania powinny być rozwijane, aby zapewnić bezpieczne i opłacalne magazynowanie w różnych warunkach geologicznych i górniczych (Li i inni, 2019).

## 5. PODSUMOWANIE

Rozwój i optymalizacja kawern solnych w kierunku magazynowania wodoru, sprężonego powietrza i CO<sub>2</sub> jest kluczową kwestią w strategii dekarbonizacji. Ze względu na znaczną pojemność magazynową, elastyczność cykli zatłaczania i wytlaczania oraz długą historię w magazynowaniu energii, kawerny solne oferują bezpieczne rozwiązanie dla zaspokojenia rosnącego zapotrzebowania na magazynowanie energii, a także stanowią istotny element przejścia na gospodarkę niskoemisyjną. Pełne wykorzystanie ich potencjału w strategii dekarbonizacji, wymaga pokonania wyzwań technicznych i operacyjnych. Rola kawern solnych w globalnej strategii dekarbonizacji będzie zależeć od kompleksowego podejścia do projektowania i zarządzania operacyjnego. Dalsze badania, postęp technologiczny oraz współpraca między przemysłem, instytucjami rządowymi i naukowcami będą kluczowe dla rozwoju opisanych powyżej technologii. Patrząc w przyszłość, przejście na energię odnawialną i rosnące zapotrzebowanie na wydajne rozwiązania jej magazynowania prawdopodobnie będą napędzać kolejne innowacje w zakresie wykorzystania kawern solnych. Przejście na zerową emisję stwarza dla sektora energetycznego zarówno wyzwania, jak i możliwości, w których kawerny solne mogą odegrać kluczową rolę.

ition towards net-zero emissions presents both challenges and opportunities for the energy sector, with salt caverns potentially playing a pivotal role.

## LITERATURA/REFERENCES

- AGHAHOSSEINI A., BREYER C., 2018. Assessment of geological resource potential for compressed air energy storage in global electricity supply. *Energy Conversion and Management* 169: 161–173. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.058>.
- BÉREST P., BROUARD B., HÉVIN G., RÉVEILLÈRE A., 2019. Tightness of salt caverns used for hydrogen storage. *SMRI Spring Virtual Technical Conference*.
- BEUTEL T., BLACK S., 2005. Salt deposits and gas cavern storage in the UK with a case study of salt exploration from Cheshire. *Oil Gas European Magazine* 31 (1): 31–35.
- BUDT M., WOLF D., SPAN R., YAN J., 2016. A review on compressed air energy storage: basic principles, past milestones, and recent developments. *Applied Energy* 170: 250–268.
- CHEN J., DU C., JIANG D., FAN J., HE J., 2016. The mechanical properties of rock salt under cyclic loading-unloading experiments. *Geomechanics and Engineering* 10 (3): 325–334. <https://doi.org/10.12989/gae.2016.10.3.325>.
- CHEN X.S., LI Y.P., SHI Y.F., YU Y., JIANG Y.L., LIU Y.X., DONG J.L., 2021. Tightness and stability evaluation of salt cavern underground storage with a new fluid-solid coupling seepage model. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 202: Article 108475.
- CAŁA M., CYRAN K., KOWALSKI M., WILKOSZ P., 2018. Influence of the anhydrite interbeds on the stability of the storage caverns in the Mechelinki Salt Deposit (Northern Poland). *Archives of Mining Sciences* 63: 1007–1025.
- COSTA A.M., COSTA P.V.M., MIRANDA A.C.O., GOULART M.B.R., UDEBHULU O.D., EBECKEN N.F.F., AZEVEDO R.C., DE ESTON S., DE TOMI G., MENDES A.B., 2019. Experimental salt cavern in offshore ultra-deep water and well design evaluation for CO<sub>2</sub> abatement. *International Journal of Mining Science and Technology* 29: 641–656. doi:10.1016/j.ijmst.2019.05.002.
- COSTA P.V.M., COSTA A.M., MENEGHINI J.R., NISHIMOTO K., SAMPAIO C.M., ASSI G., MALTA E., GOULART M.B.R., BERGSTEN A., UDEBHULU O.D., 2020. Parametric study and geomechanical design of ultra-deep-water offshore salt caverns for carbon capture and storage in Brazil. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 131: 104354. doi:10.1016/j.ijrmms.2020.104354.
- CYRAN K., 2021. The influence of impurities and fabrics on mechanical properties of rock salt for underground storage in salt caverns – a review. *Archives of Mining Sciences* 66 (2): 155–179. <https://doi.org/10.24425/ams.2021.137454>.
- CYRAN K., KOWALSKI M., 2021. Shape modelling and volume optimisation of salt caverns for energy storage. *Applied Science* 11: 423. <https://doi.org/10.3390/app11010423>.
- DEVRIES K.L., MELLEGARD K.D., CALLAHAN G.D., 2002. Proof-of-concept research on a salt damage criterion for cavern design: A project status report. *SMRI Spring Technical Conference*, 29–30 April 2002, Banff, Alberta, Canada.
- DJIZANNE H., PRATS F., MURILLO C., SYLVAINE P., 2024. Hippolyte Djizanne, Franck Prats, Carlos Murillo, Pique Sylva-

- ine. *SMRI Fall Technical Conference*, 22-25 September 2024, Edmonton, Alberta, Canada.
- DOPFFEL N., AN-STEPEC B.A., BOMBACH P., WAGNER M., PASSARIS E., 2024. Microbial life in salt caverns and their influence on H<sub>2</sub> storage – current knowledge and open questions. *International Journal of Hydrogen Energy* 58: 1478–1485. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.334>.
- DOPFFEL N., JANSEN S., GERRITSE J., 2021. Microbial side effects of underground hydrogen storage – knowledge gaps, risks and opportunities for successful implementation. *International Journal of Hydrogen Energy* 46: 8594–8606.
- DOPFFEL N., MAYERS K., KEDIR A., 2023. Microbial hydrogen consumption leads to a significant pH increase under high-saline conditions: implications for hydrogen storage in salt caverns. *Scientific Reports* 13: 10564. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37630-y>.
- DUSSEAU M.B., ROTHENBURG L., BACHU S., 2002. Sequestration of CO<sub>2</sub> in salt caverns. *Proceedings of the Canadian International Petroleum Conference*, Petroleum Society of Canada, April 5, 2002.
- EVANS J., SHAW T., 2021. Storage of hydrogen in solution-mined salt caverns for long-duration energy storage. *SMRI Virtual Spring Technical Conference*.
- FATAH A., AL-YASERI A., THERAVALLAPIL R., RADWAN O.A., AMAO A., AL-QASIM A.S., 2024. Geochemical reactions and pore structure analysis of anhydrite/gypsum/halite-bearing reservoirs relevant to subsurface hydrogen storage in salt caverns. *Fuel* 371: Article 131857. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131857>.
- GUO C., XU Y., ZHANG X., GUO H., ZHOU X., LIU C., QIN W., LI W., DOU B., CHEN H., 2017. Performance analysis of compressed air energy storage systems considering dynamic characteristics of compressed air storage. *Energy* 135: 876–888.
- HAN Y., CUI H., MA H., CHEN J., LIU N., 2022. Temperature and pressure variations in salt compressed air energy storage (CAES) caverns considering the airflow in the underground wellbore. *Journal of Energy Storage* 52, Part A: 104846. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104846>.
- JIANG Z., LI P., TANG D., 2020. Experimental and Numerical Investigations of Small-Scale Lined Rock Cavern at Shallow Depth for Compressed Air Energy Storage. *Rock Mech Rock Eng* 53, 2671–2683 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00603-019-02009-x>
- JIANG Z., OUYANG Y., HAN K., TANG D., 2023. Study on temporal and spatial distribution and temperature control methods of compressed air in underground caverns. *Journal of Engineering Thermophysics* 44 (12): 3433–3444.
- LI J.L., TANG Y., SHI X.L., XU W., YANG C., 2019. Modelling the construction of energy storage salt caverns in bedded salt. *Applied Energy* 255: 113866. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113866>.
- LI H., MA H., LIU J., ZHU S., ZHAO K., ZHENG Z., ZENG Z., YANG C., 2023. Large-scale CAES in bedded rock salt: A case study in Jiangsu Province, China. *Energy* 281: Article 128271. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128271>.
- LIANG W., ZHANG C., GAO H., YANG X., XU S., ZHAO Y., 2012. Experiments on mechanical properties of salt rocks under cyclic loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 4 (1): 54–61.
- LIU J., ZHANG C., WANG Y., 2018. A review of compressed air energy storage systems: technology, application, and future development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81: 191–203.
- LIU W., ZHANG X., FAN J.Y., JIANG D.Y., CHEN J., 2020. Research on gas leakage and collapse in the cavern roof of underground natural gas storage in thinly bedded salt rocks. *Journal of Energy Storage* 31: Article 101669.
- LIU W., LI Q., YANG C., SHI X., WAN J., JURADO M.-J., LI Y., JIANG D., CHEN J., QIAO W., ZHANG X., FAN J., PENG T., HE Y., 2023. The role of underground salt caverns for large-scale energy storage: a review and prospects. *Energy Storage Materials* 63: 103045. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2023.103045>.
- LOOFF K.M., RAUTMAN C.A., 2010. Inferring the geologic significance and potential impact of salt fabric and anomalous salt on the development and long-term operation of salt storage caverns on Gulf Coast salt domes. *SMRI Spring Technical Conference*, 26-27 April 2010, Grand Junction, Colorado.
- LOOFF K.M., 2017. The impact of anomalous salt and boundary shear zones on salt cavern geometry, cavern operations, and cavern integrity. *American Gas Association Operations Conference*, 2-5 May 2017, Orlando, Florida.
- LUX K.H., 2009. Design of salt caverns for the storage of natural gas, crude oil, and compressed air: geomechanical aspects of construction, operation, and abandonment. *Geological Society London Special Publication* 313: 93–128.
- MA L.J., LIU X.Y., WANG M.Y., XU H.F., HUA R.P., FAN P.X., JIANG S.R., WANG G.A., YI Q.K., 2013. Experimental investigation of the mechanical properties of rock salt under triaxial cyclic loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 62: 34–41.
- MAŁACHOWSKA A., ŁUKASIK N., MIODUSKA J., GĘBICKI J., 2022. Hydrogen storage in geological formations—the potential of salt caverns. *Energies* 15: 5038. <https://doi.org/10.3390/en15145038>.
- MIOCIC J., HEINEMANN N., EDLMANN K., SCAFIDI J., MOLAEI F., ALCALDE J., 2023. Underground hydrogen storage: a review. *Geological Society, London, Special Publications* 528: 73–86. <https://doi.org/10.1144/SP528-2022-8>.
- MUHAMMED N.S., HAQ B., AL SHEHRI D., AL-AHMED A., MIZANUR RAHMAN M., ZAMAN E., 2022. A review on underground hydrogen storage: insight into geological sites, influencing factors, and future outlook. *Energy Reports* 8: 461–499. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.12.002>.
- OLABI A.G., WILBERFORCE T., RAMADAN M., ABDELKAREEM M.A., ALAMI A.H., 2021. Compressed air energy storage systems: components and operating parameters—a review. *Journal of Energy Storage* 34: Article 102000. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102000>.
- PAJONPAI N., BISSEN R., PUMJAN S., HENK A., 2022. Shape design and safety evaluation of salt caverns for CO<sub>2</sub> storage in Northeast Thailand. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 120: 103773. doi:10.1016/j.ijggc.2022.103773.
- PAN B., YIN X., JU Y., IGLAUER S., 2021. Underground hydrogen storage: influencing parameters and future outlook. *Advances in Colloid and Interface Science* 294: Article 102473. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102473>.
- PIQUE S., THORAVALL A., LAHAIE F., SARRIQUET A., 2021. Preliminary risk assessment (PRA) for tests planned in a pilot salt cavern hydrogen storage in the frame of the French Project STOPIL-H<sub>2</sub>.

- PLAAT H., 2009. Underground gas storage: why and how. In: Evans, D.J. & Chadwick, R.A. (eds) *Underground Gas Storage: Worldwide Experiences and Future Development in the UK and Europe*. Geological Society, London, Special Publications 313: 25–37.
- RAMESH KUMAR K., HONORIO H., CHANDRA D., LESUEUR M., HAJIBEYGI H., 2023. Comprehensive review of geomechanics of underground hydrogen storage in depleted reservoirs and salt caverns. *Journal of Energy Storage* 73, Part B: 108912. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108912>.
- RATIGAN J.L., 2001. Testimony before the Kansas Senate Utilities Committee Topeka, Kansas. Report for Kansas Geological Survey. <https://www.kgs.ku.edu/Hydro/Hutch/GasStorage/ratigan.pdf>.
- SIMON J., FERRIZ A.M., CORREAS L.C., 2015. HyUnder – Hydrogen Underground Storage at Large Scale: Case Study Spain. *Energy Procedia* 73: 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.661>.
- SIMÓN J., ALBES D., BALL M., BECKER A., BÜNGER U., CAPITO S., 2014. Assessment of the potential, the actors, and relevant business cases for large scale and long term storage of renewable electricity by hydrogen underground storage in Europe.
- TACKIE-OTOO B.N., HAQ M.B., 2024. A comprehensive review on geo-storage of H<sub>2</sub> in salt caverns: prospect and research advances. *Fuel* 356: Article 129609. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129609>.
- WANG T., YANG C., CHEN J., DAEMEN J., 2018. Geomechanical investigation of roof failure of China's first gas storage salt cavern. *Engineering Geology* 243: 59–69.
- WANG T., LI J., JING G., ZHANG Q., YANG C., DAEMEN J., 2019. Determination of the maximum allowable gas pressure for an underground gas storage salt cavern: a case study of Jintan, China. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 11: 251–262.
- WANG T., DING Z., HE T., XIE D., LIAO Y., CHEN J., ZHU K., 2024. Stability of the horizontal salt cavern used for different energy storage under varying geological conditions. *Journal of Energy Storage* 84: Article 110817. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110817>.
- WANG X., WANG J., ZHANG Q., SONG Z., LIU X., FENG S., 2022. Long-term stability analysis and evaluation of salt cavern compressed air energy storage power plant under creep-fatigue interaction. *Journal of Energy Storage* 55: Article 105843. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105843>.
- WARREN J.K., 2006. *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- YANG C., WANG, T., MA, H., LI, Y., SHI, X., DAEMEN, J., 2016. Feasibility analysis of using closely spaced caverns in bedded rock salt for underground gas storage: a case study. *Environmental Earth Science* 75: 1138.
- YOLCAN O.O., 2023. World energy outlook and state of renewable energy: 10-year evaluation. *Innovation and Green Development* 2 (4): Article 100070. <https://doi.org/10.1016/j.igd.2023.100070>.
- ZIEMIAŃSKI P.P., DERKOWSKI A., 2022. Structural and textural control of high-pressure hydrogen adsorption on expandable and non-expandable clay minerals in geologic conditions. *International Journal of Hydrogen Energy* 47: 28794–28805. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.204>.
- ZHANG Z., LIU W., GUO Q., DUAN X., LI Y., WANG T., 2022. Tightness evaluation and countermeasures for hydrogen storage salt caverns containing various lithological interlayers. *Journal of Energy Storage* 50: Article 104454. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104454>.
- ZHOU S., XIA C., ZHOU Y., 2018. Long-term stability of a lined rock cavern for compressed air energy storage: thermo-mechanical damage modeling. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24 (12): 2070–2093. <https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1499556>.
- ZHU S., SHI X., YANG C., LI Y., LI H., YANG K., WEI X., BAI W., LIU X., 2023. Hydrogen loss in salt cavern hydrogen storage. *Renewable Energy* 218: Article 119267. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119267>.

# Ślady po halicie – studium wybranych przykładów

## Halite casts – a case of selected examples

Joanna JAWORSKA

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, Instytut Geologii, ul. B. Krygowskiego 12, Poznań; e-mail: veronika@amu.edu.pl

### STRESZCZENIE

W zależności od warunków krystalizacji halit może wykształcić kilka form: kryształów lejowych, sześciannów, osobników dendrytycznych (szkieletowych), sześciennych kryształów lejowych. Ponieważ jest to minerał, który łatwo się rozpuszcza to w zapisie geologicznym, częściej niż sam halit, zachowują się ślady po halicie, np. jako: wolne przestrzenie - pustki po halicie, haloturbacje - odciski w osadzie, wypełnienia - odcisków lub odlewów po halicie, pseudomorfozy po halicie – zastąpienie halitu innym minerałem oraz „pseudo-pseudomorfozy” po halicie. Krystalizacja halitu zachodzi w szczególnych warunkach klimatycznych i z tego powodu jego obecność lub częściej ślady jego obecności w materiale skalnym pozwalają na daleko idące interpretacje dotyczące paleośrodowiska i diagenety tworzenia tych skał.

**Słowa kluczowe:** ślad po halicie, pseudomorfozy po halicie, kryształ lejowy, sześcienny kryształ lejowy,

### ABSTRACT

Depending on the crystallization conditions, halite can develop several forms: hopper crystals, cubes, dendritic (skeletal) forms, and cubic hopper crystals. Since halite is a mineral that easily dissolves, in the geological record, casts of halite are more commonly preserved than the halite itself. These can appear as: voids left by dissolved halite, haloturbations - imprints in the sediment, fillings of these imprints or casts left by halite, pseudomorphs of halite - replacements of halite by another mineral, and “pseudo-pseudomorphs” after halite. Halite crystallizes under specific climatic conditions, and for this reason, its presence, or more often casts of its presence in rock material, allows for far-reaching interpretations regarding the paleoenvironment and diagenesis of the rock formation.

**Key words:** halite casts, halite pseudomorphs, pyramidal hopper, hopper cube.

### 1. WSTĘP

Pomijając złoża soli kamiennych, pojedyncze kryształy halitów są stosunkowo rzadko spotykane w osadach/skałach. Wynika to faktu, że jest to minerał, który bardzo łatwo ulega rozpuszczaniu. Współcześnie pojedyncze kryształy tego minerału można spotkać na wybrzeżach wysychających słonych zbiorników – od bardzo płytkich (playa, sabkha) po głębsze osiągające kilkadziesiąt czy nawet kilkaset metrów głębokości, np. Morze Martwe. Krystalizacja tego minerału następuje z roztworu, który jest przesycony względem NaCl, w miejscach, w których solanka osiąga największe stężenie - zazwyczaj są to: powierzchnia zbiornika oraz dno zbiornika, a także stosunkowo luźny, porowaty osad penetrowany przez solanki, blisko powierzchni terenu, gdzie następuje silna ewaporacja. Zatem halit występuje w wyjątkowych środowiskach

### 1. INTRODUCTION

Apart from rock salt deposits, individual halite crystals are relatively rare in sediments/rocks. This is due to the fact that halite is a mineral that easily dissolves. Nowadays, individual crystals of this mineral can be found along the shores of evaporating saline bodies of water, ranging from very shallow ones (playa, sabkha) to deeper bodies reaching several dozen or even hundreds of meters in depth, such as the Dead Sea. The crystallization of this mineral occurs from a solution that is supersaturated with NaCl, in places where the brine reaches the highest concentration – typically on the surface of the body of water, the bottom of the basin, and also in relatively loose, porous sediment penetrated by brine, close to the surface, where intense evaporation occurs. Therefore, halite is found in unique environments representing hot and dry clima-

reprezentujących gorący i suchy klimat, gdzie następuje intensywne parowanie zbiornika i jego najbliższego otoczenia (np. Schreiber, El Tabakh, 2000; Warren 2010). Ekspozycja osadów i skał zawierających takie pojedyncze kryształy na działanie wód, roztworów nienasyconych względem halitu narażała je na szybkie ługowanie. Z tego powodu w zapisie kopalnym częściej niż sam halit odnotowywane są ślady po halicie.

## 2. FORMY HALITU

W zależności od miejsca (na powierzchni słonego zbiornika, na dnie zbiornika, w obrębie osadu zbiornika, w jego otoczeniu) i warunków (np. szybka, wolna ewaporacja) w jakich krystalizują pojedyncze halitu mogą one przybrać kilka form, np.:

- 1) kryształów lejowych – mających kształt odwróconej piramidy schodkowej (ang. *pyramidal hopper*); formujących się na powierzchni słonego zbiornika często łącząc się i tworząc rodzaj mat na jego powierzchni (Arthurton, 1973; Gonitz, Schreiber, 1981; Handford, 1982, 1991);
- 2) sześciątów (ang. *halite cube*); to najbardziej podstawowa (wyjściowa) forma halitu, często krystalizacja innych form zaczyna się od sześciątów;
- 3) osobników dendrytycznych (szkieletowych) (ang. *reticulate*, *reticulate ridge* lub *dendritic halite*) oraz typu pagoda (ang. *pagoda halite*); krystalizujących na dnie płytkiego zbiornika, rozrastając się równolegle do powierzchni osadu, tworząc na nim rodzaj regularnej siatki (Southgate, 1982; Handford, 1991);
- 4) sześciennych kryształów lejowych (ang. *hopper cube* lub *skeletal cube*); krystalizujących w miękkim osadzie. Jeżeli wzrost halitu następuje szybko, to materiał osadu jest włączany do kryształu (ang. *incorporative hopper*), natomiast gdy krystalizacja następuje stosunkowo wolno – to materiał otoczenia jest „odpychany” i tylko w niewielkich ilościach, sporadycznie zanieczyszcza rosnący kryształ (ang. *displacive hopper*) (Gonitz, Schreiber, 1981; Handford, 1982, 1991).

## 3. ŚLADY PO HALICIE

Halit ulegając rozpuszczeniu niekiedy pozostawiając po sobie ślady świadczące o jego obecności, m. in. znane są z utworów dewonu (Rychliński i in., 2014; Jaworska, 2017), syluru (Demicco, Hardie, 1994), kambriu (Southgate, 1982; Raine, Smith, 2017) a nawet archaiku (Eriksson i in., 2003). Ślady te mogą przybierać kilka odmian (Ryc. 1):

- 1) wolnych przestrzeni, „mumii” - pustek po halicie w kształcie sześciątów; mogą one być wtórnie wypełnione innymi minerałami lub ulec deformacjom;
- 2) haloturbacji, pogrążeń - odcisków w osadzie po formach sześciennych, lejowych lub sześciennych formie lejowej, gdy

tes, where intense evaporation of the basin and its immediate surroundings takes place (Schreiber, El Tabakh, 2000; Warren, 2010). The exposure of sediments and rocks containing such individual crystals to waters or solutions undersaturated with respect to halite made them prone to rapid leaching. For this reason, in the fossil record, traces of halite are more commonly noted than the halite itself.

## 2. FORMS OF HALITE

Depending on the location (on the surface of the saline body of water, at the bottom of the basin, within the basin's sediment, in its surroundings) and the conditions (e.g., rapid, or slow evaporation) in which individual halite crystals form, they can take on several shapes, such as:

- 1) pyramidal hopper crystals – having the shape of an inverted hollow-stepped pyramidal hoppers; forming on the surface of a brine pool (nucleation at the brine/air interference) zbiornika (Arthurton, 1973; Gonitz, Schreiber, 1981; Handford, 1982, 1991);
- 2) halite cubes; this is the most basic (initial) form of halite;
- 3) dendritic crystals (reticulate or dendritic halite and pagoda halite); crystallizing at the bottom of a shallow brine pool, growing parallel to the sediment surface (Southgate, 1982; Handford, 1991);
- 4) hopper cube or skeletal cube; crystallizing in soft sediment (intrasedimentary precipitation). If halite grows rapidly, the sediment is incorporated into the crystal (incorporative hopper). But when crystallization occurs relatively slowly, the soft mud is “pushed aside” and only in small amounts sediments contaminating the growing crystal (displacive hopper) (Gonitz, Schreiber, 1981; Handford, 1982, 1991).

## 3. HALITE CASTS

Halite, when dissolving, sometimes leaves behind casts indicating its presence. Such casts are known from Devonian formations (Rychliński et al., 2014; Jaworska, 2017), Silurian (Demicco, Hardie, 1994), Cambrian (Southgate, 1982; Raine, Smith, 2017), and even Archean (Eriksson et al., 2003). These casts can take several forms (Fig. 1):

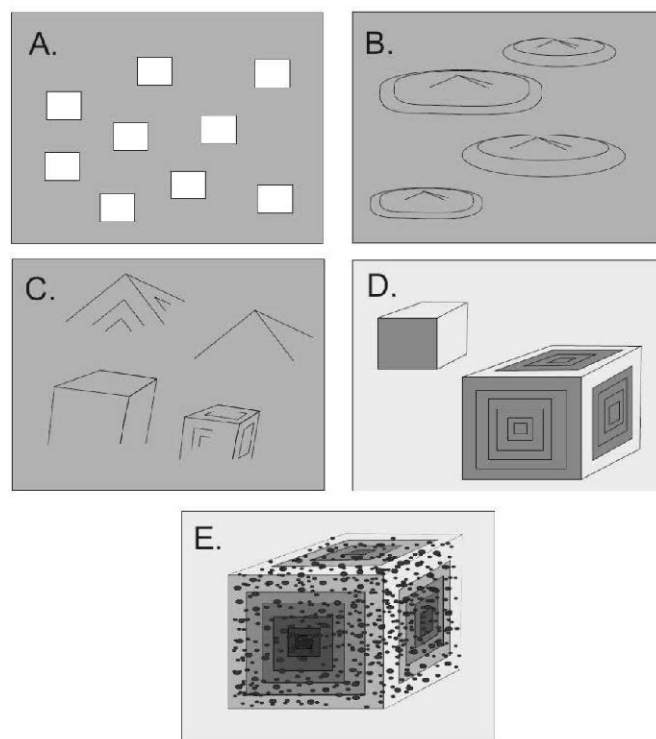
- 1) free spaces, “mummies” - cube-shaped halite voids; cast after halite cube dissolution;
- 2) haloturbation, sinkholes - casts in the sediment after cubic, hopper or cubic hopper forms, when halite is dissolved at a very early stage of diagenesis (before lithification of the sediment);
- 3) fillings, epi- or hyporelief - casts after cubic or hopper cubic halite, when halite is dissolved at a later stage of diagenesis (during lithification of the sediment). They are clearly shaped cube forms;
- 4) pseudomorphs after halite - replacing halite with another mineral;

halit rozpuścił się na bardzo wczesnym etapie diagenety (przed lityfikacją osadu). Te ślady najszybciej ulegają „zatarciu” i łatwo je przeoczyć, czy też pomylić z innymi procesami, które prowadzą do wykształcenia zbliżonych form (Jaworska, 2017);

- 3) wypełnień - odcisków lub odlewów po formach sześciennych lub sześciennych form lejowej, gdy halit rozpuścił się na późniejszym etapie diagenety (w czasie lityfikacji osadu). Mają one często wyraźny kształt fragmentów sześciątów, często są to „wystające” naroża sześciątów (Rychliński i in., 2014). W przypadku, gdy zachowane są sześciennie formy lejowe – sytuacja jest jasna – pochodzą one od halitów. Natomiast w niektórych przypadkach, sześciennie formy mogą pochodzić od innych kryształów, które również przybierają taki kształt, np. pirytu. Wówczas rodzaj minerału, który pozostawił po sobie taki ślad może być dyskusyjny.
- 4) pseudomorfoz po halicie – zastąpienie halitu innym minerałem, np. kalcytem, gipsem, chalcedonem. Podobnie jak wyżej - w przypadku zachowanej sześciennych form lejowej, taki ślad nie powinien budzić wątpliwości, natomiast forma sześcienna może pochodzić od innych minerałów, które przybierają taki kształt, np. pirytu. Wyjątkowe są pseudomorfozy chalcedonu po halicie dendrytycznym (Southgate, 1982);
- 5) „pseudo-pseudomorfoz” po halicie - w całości zachowanych form po halicie typu *incorporative hopper*; są to kryształy, które mają charakterystyczny, nie budzący wątpliwości kształt sześciennych kryształów lejowych (Gonitz, Schreiber, 1981).

#### 4. PODSUMOWANIE

Niektóre ślady po halitach są czytelne i łatwe do rozpoznania np. kryształy lejowe, sześciennie kryształy lejowe, czy też dendrytyczne, natomiast inne - łatwe do przeoczenia, np. haloturbacje, czy też pomylenia – np. kryształy sześciennie (ponieważ w formie sześciątów krystalizuje kilka minerałów). Właściwie rozpoznane i zinterpretowane ślady pozostawione przez pojedyncze kryształy halitu odgrywają ważną funkcję - pozwalają bardzo precyzyjnie określić warunki środowiska, tworzenia osadów /skał w obrębie których takie formy się znajdują.



**Ryc. 1.** Ślady po halicie: A. wolne przestrzenie - pustki po halicie w kształcie sześciątów, B. haloturbacje, pograży - odciski w osadzie po halicie, C. wypełnia, odciski lub odlewy po halicie, D. pseudomorfozy po halicie, E. „pseudo-pseudomorfozy” po halicie typu *incorporative hopper*.

**Fig. 1.** Halite casts: A. free spaces - cube-shaped halite voids, B. haloturbation, sinkholes - casts in the sediment after halite, C. fillings, epi- or hyporelief after halite, D. pseudomorphs after halite, E. “pseudo-pseudomorphs” after incorporative hopper halite.

- 5) “pseudo-pseudomorphs” after halite - completely preserved forms after halite of the incorporative hopper type.

#### 4. CONCLUSION

Some casts of halite are clear and easy to recognize, such as hopper crystals, cubic hopper crystals, or dendritic forms. However, others are easy to overlook, such as haloturbations, or can be mistaken for something else, for example, cubic crystals (since several minerals crystallize in cubic forms). Properly identified and interpreted casts left by individual halite crystals play an important role - they allow for a very precise determination of the environmental conditions in which the sediments/rocks containing these forms were created.

## LITERATURA/ REFERENCES

- ARTHUTON R.S., 1973. Experimentally produced halite compared with Triassic layered halite-rock from Cheshire, England. *Sedimentology* 20 (1): 145–160.
- DEMICCO, R.V., HARDIE L.A., 1994. Sedimentary Structures and Early Diagenetic Features of Shallow Marine Carbonate Deposits. SEPM (Society for Sedimentary Geology), Tulsa, Oklahoma.
- ERIKSSON K.A., SIMPSON E.L., MASTER S., HENRY G., 2005. Neoarchaeon (c. 2.58 Ga) halite casts: implications for palaeoceanic chemistry. *Journal of the Geological Society* 162: 789–799.
- GORNITZ V.M., B.C. SCHREIBER, 1981. Displacive halite hoppers from the Dead Sea: Some implications for ancient evaporative deposits. *Journal of Sedimentary Petrology* 51 (3): 787–794.
- HANDFORD C.R., 1982. Sedimentology and evaporite genesis in a Holocene continental-sabkha playa basin—Bristol Dry Lake, California. *Sedimentology* 29: 239–254.
- HANDFORD C.R., 1991. Marginal marine halite: sabkhas and salinas. In: Melvin J.L. (ed.) *Evaporites, Petroleum and Mineral Resources: Developments in Sedimentology* 50: 1–66.
- JAWORSKA J., 2017. Ślady po kryształach halitu w dolomitach dewońskich w kamieniołomie Zachemie. Casts of halite crystals in the Devonian dolomites of the Zachemie Quarry. *Przegląd Solny / Salt review* 13: 135–140.
- RAINE R.J., SMITH M.P., 2017. Sabkha facies and the preservation of a falling-stage systems tract at the SaukII-III supersequence boundary in the Late Cambrian Eilean Dubh Formation, NW Scotland. *Journal of Sedimentary Research* 87: 41–65.
- RYCHLIŃSKI T., JAGLARZ P., UCHMAN A., VAINORIUS J., 2014. Unusually well preserved casts of halite crystals: A case from the Upper Frasnian of northern Lithuania. *Sedimentary Geology* 308: 44–52.
- SCHREIBER B.C., EL TABAKHT M., 2000. Deposition and early alteration of evaporates. *Sedimentology* 47: 215–238.
- SOUTHGATE P., 1982. Cambrian skeletal halite crystals and experimental analogues. *Sedimentology* 29 (3): 391–407.
- WARREN J.K., 2010. Evaporites through time: tectonic, climatic, and eustatic controls on marine and nonmarine deposits. *Earth-Science Reviews* 98: 217–268.

# **Zapobieganie szkodliwym skutkom wydobywania soli kamiennej i soli potasowych poprzez zastosowanie badań geologicznych i techniki modelowania złóż, wraz z wykorzystaniem analizy geomechanicznej i wyników modelowania do planowania działalności górniczej**

## **Prevention of Hazardous Impact from Rock Salt and Potash Mining by Application of Geological Exploration and Deposit Modelling Followed by Application of Geotechnical Analysis and Modelling Results for Mine Planning**

Thomas KIEßLING<sup>1</sup>, Andreas JOCKEL<sup>1</sup>, Sebastiaan N. G. C. VAN DER KLAUW<sup>1</sup>, Till POPP<sup>2</sup>, Ralf-Michael GÜNTHER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH, e-mail: mining@ercosplan.com

<sup>2</sup> Institut für Gebirgsmechanik GmbH; e-mail: office@ifg-leipzig.de

### **STRESZCZENIE**

Większość rentownych złóż soli kamiennej i soli potasowych w Polsce osadziła się w okresie cechsztynu (późny perm, ok. 255 mln lat temu). Osady solonośne sedimentowały w europejskim basenie permskim, który rozciąga się na obszarze ok. 700 000 km<sup>2</sup> w północnej części Europy Środkowej, od wschodniej Anglii na zachodzie po Litwę na wschodzie. Osady solne są w Polsce podzielone na cztery cyklotemy (PZ1 do PZ4), przy czym skały solne dominują w cyklotemach dolnym i środkowym. Cyklotemy od Z5 do Z7 zidentyfikowane w Niemczech są uważane za pododdziały górnego cyklotemu PZ4 w Polsce. W północnej i środkowej Polsce (do około 60% powierzchni kraju) skały solne tych cyklotemów mogą osiągać grubość do 1400 m. Rentowne złoża soli potasowych i magnezowych, takie jak sylwin, karnalit i polihalit, występują w dolnych trzech cyklach (PZ1 do PZ3).

Ponadto sekwencje soli kamiennej o grubości do 300 m osadzały się w zapadlisku przedkarpackim w południowej Polsce w okresie miocenu. Te miocenne sole kamienne, które lokalnie występowały płytko pod powierzchnią ziemi, stanowiły podstawę wydobywania soli kamiennej przez wiele lat.

### **ABSTRACT**

Most of the economically interesting rock salt and potash deposits in Poland were deposited during the Zechstein (Late Permian, approx. 255 million years ago). The salt-bearing sediments were deposited within the European Permian Basin, which extends across an area of approx. 700,000 km<sup>2</sup> in northern Central Europe, from eastern England in the west to Lithuania in the east. The salt-bearing sediments are divided into four cycles (PZ1 to PZ4) in Poland, with the salt rocks dominating in the lower and middle cycles. The cycles Z5 to Z7 identified in Germany are considered subdivisions of the upper PZ4 cycle in Poland. In northern and central Poland (below about 60% of the country), the salt rocks of these cycles can reach a thickness of up to 1,400 m. Potassium and magnesium salts of economic interest: sylvinit, carnallit and polyhalit have been reported in the lower 3 cycles (PZ1 to PZ3).

In addition, up to 300 m thick rock salt sequences were deposited within the Carpathian Foredeep Depression in southern Poland during the Miocene. These Miocene rock salts, which are locally deposited close to the earth's surface,

W Polsce, większość złóż pokładowych z poziomo zalegającymi warstwami soli o minimalnym lub umiarkowanym wpływie tektoniki, występuje na Wschodniej Platformie Prekambryjskiej na północnym wschodzie oraz monoklinie przedsudeckiej i niecki północnosudeckiej na południowym zachodzie basenu cechsztyńskiego. W centralnej części basenu cechsztyńskiego, w rejonie antyklinorium środkowopolskiego o kierunku NW-SE, oraz w towarzyszących mu synklinach, sól występuje w strukturach solnych poddanych wpływem tektonicznym. Struktury solne wykorzystywane są do wydobywania soli kamiennej (np. kopalnia Kłodawa) lub do magazynowania węglowodorów (np. Mogilno).

W trakcie prac poszukiwawczych przeprowadzonych w drugiej połowie XX w. odkryto nie tylko złoża soli kamiennej, ale także złoża soli potasowych i magnezowych. Złoża te z różną intensywnością były dalej eksplorowane. Wiedza na temat ogólnej struktury geologicznej tych złóż jest jednak minimalna. Otwory poszukiwawcze przecinały sole potasowe i magnezowe na głębokościach od 700 do 1800 m. Sylwin, karnalit, polihalit i również niewielkie ilości kizerytu ( $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), kainitu, heksahydratu ( $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) i langbainitu ( $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4$ ) zostały zidentyfikowane jako minerały zawierające potas i magnez (Czapowski, Bukowski, 2013; Czapowski et al., 2020). Źródła historyczne, oszacowane zgodnie ze standardami stosowanymi w czasie eksploracji, zostały zgłoszone tylko dla kilku złóż soli kamiennej.

W obszarze Zatoki Puckiej na Wschodniej Platformie Prekambryjskiej, w ramach cyklotemu PZ1, zidentyfikowano warstwy siarczanów potasu i magnezu na głębokościach przekraczających 1000 metrów. Warstwy mają grubość kilkudziesięciu metrów i występują w kilku otworach wiertniczych, w czterech różnych podobszarach o łącznej powierzchni wynoszącej około 18 km<sup>2</sup>. Złoże jest pokładowe z warstwami ułożonymi prawie poziomo, z minimalnym wpływem tektoniki. Głównym minerałem zawierającym potas i magnez jest polihalit (15,6%  $\text{K}_2\text{O}$ ) z karnalitem obecnym w niewielkich ilościach. Dla całego złoża zgłoszono źródła historyczne wynoszące od 600 milionów ton z minimalną zawartością 7,7%  $\text{K}_2\text{O}$  do maksymalnej zawartości 13,7%  $\text{K}_2\text{O}$  (Państwowa Służba Geologiczna, 2022).

W odniesieniu do struktury solnej Kłodawa, znajdującej się w Antyklinorium Środkowopolskim, zidentyfikowano minerały soli zawierające potas i magnez w cyklotemach PZ2 i PZ3. Karnalit zawierający kieseryt (8,5%  $\text{K}_2\text{O}$ ; 8,1%  $\text{MgO}$ ) w cyklu PZ3 może mieć grubość od 15 do 30 m. Na podstawie badań geologicznych zgłoszono źródła historyczne wynoszące około 90 milionów ton karnalitu (Czapowski, Bukowski, 2010).

Oprócz tych intensywniej eksplorowanych złóż, w ramach poszukiwań historycznych zidentyfikowano dalsze potencjalne złoża soli potasowych na Wschodniej Platformie Prekambryjskiej (np. Żelazna Góra), w Antyklinorium Środ-

formed the basis of rock salt mining, which was active over a long period of time.

Mostly horizontally layered salt deposits with minimal to moderate tectonic overprint occur on the East European Precambrian Platform in the northeast as well as within the Peri Sudetic Monocline and the North Sudetic Depression in the southwest of areas with Zechstein-aged salts in Poland. In the central part of the area with Zechstein-aged salts in Poland, within the NW-SE striking Central Polish Anticlinorium and within accompanying synclines, the salt is present in tectonically overprinted salt structures. Salt structures are used for rock salt mining (e.g. Kłodawa Mine) or for hydrocarbon storage (e.g. Mogilno).

As part of several geological prospection campaigns in the second half of the 20th century, besides several deposits with rock salt, deposits with potassium and magnesium salts were found and these have been further explored with different intensities. The knowledge about the overall geological structure of these deposits is usually minimal. The exploration drill holes intersected potassium and magnesium salts at depths between 700 and 1,800 m. As potassium- and magnesium-bearing minerals, sylvite, carnallite, polyhalite and also minor amounts of kieserite ( $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), kainite, hexahydrate ( $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) and langbeinite ( $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4$ ) have been reported (Czapowski, Bukowski, 2013; Czapowski et al., 2020).

Historical resources estimated according to the standards used at the time of exploration have been reported only for a few of these deposits.

In the general area of Puck Bay on the East European Precambrian Platform, potassium and magnesium sulphate horizons have been identified within the PZ1 cycle at depths greater than 1,000 m and with a thickness of several tenths of metres in several drill holes within four sub-areas with a total area of about 18 km<sup>2</sup>. The deposit is considered to be horizontally layered with minimal tectonic overprint. The main potassium- and magnesium-bearing mineral is polyhalite (15.6%  $\text{K}_2\text{O}$ ) with carnallite present in minor amounts. For the whole deposit, historical resources of 600 million metric tonnes with 7.7%  $\text{K}_2\text{O}$  at minimum and 13.7%  $\text{K}_2\text{O}$  at maximum have been reported (Państwowa Służba Geologiczna, 2022).

Regarding the Kłodawa Salt Structure located in the Central Polish Anticlinorium, potassium- and magnesium-bearing salt minerals have been identified in the cycles PZ2 and PZ3. The kieserite-bearing carnallite (8.5%  $\text{K}_2\text{O}$ ; 8.1%  $\text{MgO}$ ) within the PZ3 cycle may have a thickness of between 15 and 30 m. Based on geological exploration, historical resources amounting to about 90 million metric tonnes of carnallite have been reported (Czapowski, Bukowski, 2010).

Besides these more intensely explored deposits, the historical prospection and exploration efforts have identified further potential potash deposits in the East European Precambrian Platform (e.g. Żelazna Góra), the Central Polish Anticlino-

kowopolskim (np. Inowrocław, Góra, Mogilno), a także na monoklinie przedsudeckiej (np. Zielona Góra-Koźuchów, Nowa Sól-Otyń).

Dla złóż pokładowych z poziomo zalegającymi warstwami soli o minimalnym lub umiarkowanym wpływie tektoniki, potencjał soli potasowych i magnezowych szacuje się na około 3,64 miliarda ton. Najbardziej znaczące zasoby soli potasowych i magnezowych odnaleziono na Wschodniej Platformie Prekambryjskiej na głębokościach od 700 do 1800 m, w monoklinie przedsudeckiej na głębokościach od 900 do 1800 m oraz w niecce północnosudeckiej na głębokościach od 970 do 1800 m, na obszarze ogółem wynoszącym 466 km<sup>2</sup> (Czapowski, Bukowski, 2013). Dla różnych złóż, średnia miąższość warstw zawierających sole potasu i magnezu wynosi od 2 do 7 m, podczas gdy średnia zawartość K<sub>2</sub>O waha się od 4 do 9%.

Podczas gdy istnieje obszerna wiedza na temat konwencjonalnego wydobywania podziemnego i wydobywania otworowego soli kamiennej, złoża potasowo-magnezowe nie były dotąd eksplorowane ani wykorzystywane do celów górniczych. Dlatego też zaleca się korzystanie z doświadczenia w eksploatacji i przetwarzaniu podobnych złóż znajdujących się w sąsiednich Niemczech.

Jak w przypadku każdego innego rodzaju złoża, najważniejszymi czynnikami umożliwiającymi bezpieczną, ekonomiczną i, co nie mniej ważne, zrównoważoną eksploatację złoża są:

- sytuacja geologiczna i hydrogeologiczna złóż i otaczających je formacji skalnych (sekwencja litostratygraficzna, warunki depozycji, mineralizacja, klasyfikacja hydrogeologiczna i strukturalno-geologiczna warstw),
- fizyczne i mechaniczne właściwości poszczególnych horyzontów skalnych (skały horyzontu górniczego, skały hydrogeologicznych barier w ścianie wiszącej i ścianie horyzontu wydobywczego, skały leżące nad nimi masywu skalnego),
- różnice w gradientach temperatury w różnych lokalizacjach, stany naprężenia, dynamika wód gruntowych itp.,
- ramy polityczne i prawne: np. przepisy górnicze, BHP, Ochrona środowiska i ochrona przyrody, przepisy dotyczące podatków, opłat i ceł, ale także stabilność systemów politycznych, akceptacja społeczna czy czynniki logistyczne, takie jak np. dostępność szlaków energetycznych, wodnych i transportowych.

Oprócz tych czynników, które dotyczą wszystkich złóż, należy uwzględnić konkretne czynniki dotyczące złóż soli kamiennej, a zwłaszcza złóż soli potasowych i magnezowych. Do tych czynników należą wysoka rozpuszczalność soli, specyficzne właściwości mechaniczne i reologiczne soli potasowych i magnezowych, wybór metody przeróbki, na którą duży wpływ ma forma wydobywanej soli (stała kontra ciepla), oraz zarządzanie płynnymi i stałymi odpadami, które gromadzą się podczas przetwarzania (Rauche, 2015).

rium (e.g. Inowrocław, Góra, Mogilno) as well as in the the Peri Sudetic Monocline (e.g. Zielona Góra-Koźuchów, Nowa Sól-Otyń).

For deposits considered to be more or less horizontally layered and with minor tectonic overprint, the potential for potassium and magnesium salts is estimated to be in the range of 3.64 billion metric tonnes. The most significant occurrences have been found in the East European Precambrian Platform at depths between 700 and 1,800 m, in the Peri Sudetic Monocline at depths between 900 and 1,800 m and in the North Sudetic Depression at depths between 970 and 1,800 m over an area totalling 466 km<sup>2</sup> (Czapowski, Bukowski, 2013). For the different deposits, the average thickness of the potassium and magnesium salt-bearing layers ranges between 2 and 7 m, whereas the average K<sub>2</sub>O content varies between 4 and 9%.

While extensive experience is available for the conventional underground mining and solution mining of rock salt, the existing potassium-magnesium deposits have not been developed or used for mining, so that it is advisable to fall back on experience in the extraction and processing of the fundamentally comparable deposits in neighbouring Germany.

Like for any other type of deposit, the most important factors that enable safe, economical and, last but not least, sustainable exploitation of a deposit are:

- the geological and hydrogeological situation of the deposits and the rock formations surrounding the deposits (lithostratigraphic sequence, depositional conditions, mineralisation, hydrogeological and structural-geological classification of the strata),
- physical and rock mechanical properties of the relevant rock horizons (rocks of the mining horizon, rocks of the hydrogeological barriers in the hanging wall and foot-wall of the extraction horizon, rocks of the overlying rock mass),
- the locally differing temperature gradients, stress states, groundwater dynamics, etc.,
- political and legal framework: e.g. mining regulations, health and work safety, environmental protection and nature conservation, regulations on taxes, levies and customs duties, but also the stability of the political systems, social acceptance or logistical factors, such as e.g. the availability of energy, water and transport routes.

In addition to these factors, which apply to all deposits, specific factors must be taken into account for rock salt deposits and, in particular for potassium-magnesium salt deposits. These include the high water solubility of the salt rocks, the specific rock mechanical and rheological behaviour of the potassium-magnesium salts, the selection of the processing method, which is strongly influenced by the form of the extracted salt (solid vs liquid), and the management of the liquid and solid residues that accrue during processing (Rauche, 2015).

W związku z kosztami i stratami górnictwami, jakich należy się spodziewać w przypadku konwencjonalnego górnictwa podziemnego, może powstać domniemanie, że wiele złóż potasowych jest predystynowanych do wydobywania techniką otworową, między innymi ze względu na korzystniejsze warunki rozpuszczania w głębokościach większych niż 800 m i związane z tym temperatury in situ wynoszące około 40 do 60°C. Jednakże, aby przeprowadzić precyzyjną ocenę wykonalności i ekonomicznej opłacalności procesu wydobywania, nie jest uzasadnione podejmowanie szybkich decyzji opierających się na odosobnionych czynnikach, takich jak głębokość złoża czy początkowe inwestycje kapitałowe (CAPEX).

Zamiast tego zaleca się przeprowadzenie kompleksowej oceny opartej na wpływie wszystkich czynników i dziedzin specjalistycznych, zwykle również opartej na badaniach materiałowych. Podczas gdy społeczno-ekonomiczne warunki można określić i opisać bez dodatkowych badań technicznych, określenie hydrogeologicznych warunków i właściwości materiałowych skał wiąże się z dużym wysiłkiem, który przynosi pozytywne rezultaty tylko wtedy, gdy prowadzona jest ukierunkowana na cel i profesjonalna eksploracja złoża.

Zważywszy na założenia wynikające z lub oparte na regionalnych badaniach geologicznych, konieczne jest ustalenie odpowiedniego programu rozpoznawania dostosowanego do charakterystyki złoża. Zgodnie z typowymi procedurami międzynarodowymi jest to realizowane głównie poprzez etapowe badanie złoża, przy czym badania powinny odpowiadać wymaganiom norm międzynarodowych (np. NI 43-101<sup>1</sup>, Kod JORC<sup>2</sup>, Kod PERC<sup>3</sup>):

<sup>1</sup> CSA (2016): National Instrument 43-101. Standards of Disclosure for Mineral Projects. Canadian Securities Administrators (CSA). Effective 09 May 2016.

CSA (2011): Form 43-101F1 Technical Report. Canadian Securities Administrators (CSA). Effective 30 June 2011.

CSA (2016): Companion Policy 43-101CP to National Instrument 43-101. Standards of Disclosure for Mineral Projects. Canadian Securities Administrators (CSA). Effective 09 May 2016.

CSA (2016): Krajowy Instrument 43-101. Standardy Ujawniania Projektów Mineralnych. Kanadyjscy Administratorzy Papierów Wartościowych (CSA). Wprowadzenie w życie 9 maja 2016 roku.

CSA (2011): Formularz 43-101F1 Raport Techniczny. Kanadyjscy Administratorzy Papierów Wartościowych (CSA). Wprowadzenie w życie 30 czerwca 2011 roku.

CSA (2016): Polityka Towarzysząca 43-101CP do Krajowego Instrumentu 43-101. Standardy Ujawniania Projektów Mineralnych. Kanadyjscy Administratorzy Papierów Wartościowych (CSA). Wprowadzenie w życie 9 maja 2016 roku.

<sup>2</sup> JORC (2012): Australasian Code for Reporting of Mineral Resources and Ore Reserves – The JORC Code 2012 Edition.- The Joint Ore Reserves Committee of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy and the Australian Institute of Geoscientists and the Minerals Council of Australia. 20 December 2012.

JORC (2012): Kodeks Wykazania Wyników Prac Geologicznych i Zasobów Złóż Rud Metali Australii i Oceanii– Kodeks JORC, wydanie 2012. - Wspólny Komitet Rezerw Złóż Kopalni Instytutu Górnictwa i Hutnictwa Australii i Oceanii, Australijski Instytut Specjalistów z Dziedziny Nauk o Ziemi, Rada Surowców Mineralnych [kopalni stałych] Australii. 20 grudnia 2012 roku

<sup>3</sup> PERC (2015): Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves. Pan-European Reserves and Resources Reporting Committee (PERC)

In connection with the costs and mining losses to be expected for conventional underground mining, the presumption may arise that many potash deposits are predestined for solution mining, not least because of the more favourable dissolution conditions at depths greater than 800 m and the associated in situ temperatures of approx. 40 to 60°C. However, in order to comprehensively assess the feasibility and economic viability of extraction, hasty decisions regarding the extraction method made by considering isolated assessment factors (e.g. depth, initial CAPEX) are not expedient.

Instead, a comprehensive assessment based on the influence of all factors and specialist disciplines, which is usually also based on material investigations, is recommended. While socio-economic framework conditions can generally be determined and described without additional technical investigations, the determination of the geological-hydrogeological framework conditions and the material properties of the rocks is associated with a considerable effort, which only leads to success if there is a target-oriented and professional exploration of the deposit.

Taking into consideration the assumptions to be expected or based on regional geological conclusions, an exploration programme adapted to the formation of the deposit must be determined. In accordance with typical international procedures, this is mostly realised by a phased exploration of the deposit, whereby the investigations should correspond to the requirements of international standards (e.g. NI 43-101<sup>1</sup>, JORC Code<sup>2</sup>, PERC Code<sup>3</sup>):

- prospecting (usually already carried out as part of a comprehensive, state-initiated country-wide survey),
- preliminary exploration (by concentrating the exploration measures in a potentially promising area),
- detailed exploration (focusing of suitable exploration measures on a pre-selected part of the deposit),
- underground exploration during mining.

In general, during all phases of exploration, the use of drill holes combined with borehole geophysical methods and/or geophysical surface investigations (gravimetry, geoelectrics, 2D and 3D seismic) is possible (Rauche, 2015). The knowledge gained in each case must be evaluated with regard to fur-

<sup>1</sup> CSA (2016): National Instrument 43-101. Standards of Disclosure for Mineral Projects. Canadian Securities Administrators (CSA). Effective 09 May 2016.

CSA (2011): Form 43-101F1 Technical Report. Canadian Securities Administrators (CSA). Effective 30 June 2011.

CSA (2016): Companion Policy 43-101CP to National Instrument 43-101. Standards of Disclosure for Mineral Projects. Canadian Securities Administrators (CSA). Effective 09 May 2016.

<sup>2</sup> JORC (2012): Australasian Code for Reporting of Mineral Resources and Ore Reserves – The JORC Code 2012 Edition.- The Joint Ore Reserves Committee of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy and the Australian Institute of Geoscientists and the Minerals Council of Australia. 20 December 2012.

<sup>3</sup> PERC (2015): Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves. Pan-European Reserves and Resources Reporting Committee (PERC)

- poszukiwania (zwykle przeprowadzane już w ramach kompleksowego, zainicjowanego przez państwo badania ogólnokrajowego),
- wstępne rozpoznanie (poprzez skoncentrowanie działań poszukiwawczych na potencjalnie obiecującym obszarze),
- szczegółowe rozpoznanie (skupienie odpowiednich działań rozpoznawczych na wcześniej wybranej części złoża),
- eksploracja podziemna podczas wydobywania.

Ogólnie rzecz biorąc, w trakcie procesu rozpoznania możliwe jest wykorzystanie odwiertów oraz różnych technik geofizycznych, zarówno w odwiertach jak i badaniach powierzchniowych, takich jak grawimetria, geoelektryka oraz sejsmika 2D i 3D, na wszystkich etapach eksploracji (Rauche, 2015). Wiedza zdobyta w każdym przypadku musi być oceniana pod kątem dalszego rozwoju projektu i, jeśli to konieczne, brana pod uwagę przy planowaniu dalszych działań rozpoznawczych.

W celu uzyskania odpowiednich tj. w dużej mierze nie naruszonych próbek do niezbędnych badań materiałowych, w złożu zwykle wierci się otwory. Podczas pobierania próbek rdzeni wiertniczych, należy uwzględnić warunki dotyczące przeprowadzanych badań. Należą do nich analizy chemiczno-mineralogiczne, które najlepiej jest wykonywać za pośrednictwem odpowiednio doświadczonych i akredytowanych instytucji, badania laboratoryjne mające na celu określenie właściwości fizycznych i mechanicznych skał oraz specjalne testy rozpuszczania, które pozwalają sprawdzić możliwość wydobywania metodą ługowania. Dodatkowo przeprowadza się testy dotyczące przetwarzania soli. Ze względu na wysoką rozpuszczalność soli potasowych w roztworach wodnych, należy przywiązywać dużą wagę do zapewnienia wystarczającego nasycenia stosowanej płuczki wiertniczej. Stosunkowo niska wytrzymałość skał solnych wymaga użycia odpowiedniego sprzętu i metod wiercenia. Aby chronić wody gruntowe i osady soli, w otwory wiertnicze należy włożyć osłonę/ochronę i ją zacementować. Nawet jeśli wokół wywierconych otworów pozostanie strefa bez wydobywania, to w przypadku późniejszego tradycyjnego wydobywania podziemnego, będą one zabezpieczone i odpowiednio uszczelnione.

Sama interpretacja wyników badań geologicznych nie jest wystarczająca do dalszego planowania wydobywania. Oprócz tego, na podstawie modelu stratygraficznego złoża i parametrów geofizycznych określonych przy użyciu próbek ze złoża należy wyprowadzić następujące elementy:

- model geologiczno-hydrogeologiczny barier / warstw ochronnych w ścianie wiszącej i ścianie złoża,
- opracowanie parametrów wydobywania podziemnego, w tym wybór odpowiedniej metody wydobywania,
- model mechanicznych właściwości skał do obliczeniowego potwierdzenia integralności warstw ochronnych,

ther project development and, if necessary, taken into account when planning further exploration measures.

In order to obtain adequate, i.e. largely intact samples for the necessary material investigations, drill holes are usually drilled into the deposit. When extracting drill cores, the requirements of the investigations to be carried out, such as chemical-mineralogical analyses, preferably by appropriately experienced and accredited institutions, laboratory investigations to determine physical and rock mechanical properties, special dissolution tests to check the possibility of solution mining as well as tests for the processing of the salt need to be taken into account. Due to the high solubility of potash salts in aqueous solutions/suspensions, great importance must be attached to ensuring sufficient saturation of the drilling fluid used. The comparatively low strength of salt rocks requires the use of suitable equipment and drilling methods. To protect the groundwater and the salt deposits, casing needs to be inserted into the drill holes and cemented. Even if a no-extraction zone is left around the drill holes, at least in the case of subsequent conventional underground mining of the deposit, they must always be documented and properly sealed.

A mere interpretation of the geological exploration results is not sufficient for further ex-traction planning. Instead, the following should be derived based on a stratigraphic model of the deposit and on the geophysical parameters determined using samples from the deposit:

- a geological and hydrogeological model of the barriers/protective layers in the hanging wall and footwall of the deposit,
- a dimensioning of the underground mining parameters, including the selection of an appropriate extraction method,
- a rock mechanical model for the computational proof of the integrity of the protective layers,
- a subsidence forecast, for the operational and post-operational phase.

This is for the protection of:

- Employees from a rock fall or major failure events or even a rock burst,
- Aquifers from serious damage or even unfitness for use or pollution,
- the earth's surface and its inhabitants against impermissible subsidence or shocks in the form of seismic events or rock bursts,
- the deposit from a failure of the protective layers and the associated inflow of gas or brines into the deposit, as well as from the resulting restrictions on mining or even the abandonment of the deposit.

Since the beginning of potash mining, there have been signs of failure from pillars or even rock bursts or seismic events due to the incorrect dimensioning of the underground mining parameters or insufficient knowledge of the geophysical properties (John, Schicht, 2022; Gimm, Pforr, 1961;

- prognoza osiadania się terenu, na etapie operacyjnym i pooperacyjnym.

Podejmuje się te działania w celu zapewnienia odpowiedniego zabezpieczenia:

- pracowników przed obrywem skał, poważnymi awariami lub nawet wybuchem,
- warstw wodonośnych przed poważnymi uszkodzeniami, zanieczyszczeniem lub nawet niezdolnością do użytkowania,
- powierzchni ziemi i jej mieszkańców przed niepożądanym osiadaniem się, lub wstrząsami w postaci zdarzeń sejsmicznych, lub wybuchów skalnych,
- złoża przed awarią warstw ochronnych i związanym z nią wnikaniem gazu lub solanek do złoża, a także przed wynikającymi z tego ograniczeniami wydobywania lub nawet zakończeniem eksploatacji złoża.

Od początku wydobywania soli potasowych obserwowane były problemy z filarami, a nawet wybuchy skalne lub zdarzenia sejsmiczne, wynikające z niewłaściwego określenia parametrów wydobywania podziemnego oraz braku wystarczającej wiedzy na temat właściwości geomechanicznych (John, Schicht, 2022; Gimm, Pforr, 1961; Ahorner, 1989; Minkley, 1998; Malovichko et al., 1999; Malovichko et al., 2001). Oprócz nieodwracalnego uszkodzenia złoża i zagrożenia dla pracowników i ludności zamieszkującej w okolicy eksploatowanego złoża, warstwy ochronne mogą być również narażone na nadmierne naprężenia z powodu awarii lub nadmiernego osiadania na podstawie niewłaściwego wymiarowania, co może prowadzić do napływu wody lub solanki do złoża, co z kolei może prowadzić do całkowitego zakończenia działalności górniczej. Niektóre spektakularne przypadki powodzi kopalni miały miejsce w Niemczech (Bergmannsverein „Staßfurt, Wiege des Kalibergbaus” e. V., 2002), Kanada (Minkley, 2004) lub górna Kama (Rosja); (Van Sambeek, 2000; ERCOSPLAN, 2007).

Wbrew założeniu, że zjawiska sejsmiczne lub awarie wyrobisk górniczych, a nawet zapadliska, są zwykle związane z przekroczeniem granic wymiarowania tradycyjnych kopalni podziemnych, istnieją przypadki awarii związanych z zapadliskami nad kawernami wydobywczymi, które sięgają nawet głębokości 1000 m (Monaghan, 2014; Minkley, Lüdeling, 2020). Tych sytuacji można było uniknąć, stosując odpowiednie planowanie i wymiarowanie.

Cechą szczególną skał solnych, którą należy wziąć pod uwagę podczas określania parametrów geofizycznych, jest ich nieliniowe zachowanie wytrzymałościowe i wytrzymałość resztkowa, przy czym wytrzymałość zależy w dużej mierze od minimalnego naprężenia głównego, prędkości odkształcenia i temperatury.

Ponadto ważnym punktem jest pojawienie się mikropęknięć, którym towarzyszy wzrost przepuszczalności. Rozwój mikropęknięć mierzy się wzrostem objętości (dylatacja), któ-

Ahorner, 1989; Minkley, 1998; Malovichko et al., 1999; Malovichko et al., 2001). In addition to the irreparable damage to the deposit and the danger to the employees and the inhabitants on the surface, the protective layers can also be subjected to excessive stress due to failure or excessive subsidence based on incorrect dimensioning, which can lead to water or brine inflow into the deposit, which can in turn lead to the complete loss of the mining operation. Some spectacular cases of mine flooding have occurred in Germany (Bergmannsverein “Staßfurt, Wiege des Kalibergbaus” e. V., 2002), Canada (Minkley, 2004) or the Upper Kama (Russia) (Van Sambeek, 2000; ERCOSPLAN, 2007).

Contrary to the assumption that seismic events or failure phenomena of mining cavities or even sinkholes are a phenomenon of exceeding the dimensioning limits of conventional underground mining, there are prominent examples of failure cases with sinkholes above solution mining caverns that are at up to 1,000 m depths (Monaghan, 2014; Minkley, Lüdeling, 2020), which could have been prevented with sound planning and dimensioning.

A special feature of the salt rocks that must be taken into account when determining the geophysical parameters: they have a non-linear strength and residual strength behaviour, in which the strength depends heavily on the minimum principal stress, the strain rate and the temperature.

In addition, an important point is the appearance of microcracks, which are accompanied by an increase in permeability. The development of microcracks is measured by an increase in volume (dilatancy), which occurs well before the maximum strength is reached.

These characteristics are examined in a suitable testing facility in a deformation-controlled triaxial compression test (TCC test). This is done at a high, constant strain rate until the residual strength is reached, which typically occurs with axial deformations of around 20% at different confining pressures.

The test temperature must be adjusted to the in-situ temperature, e.g.  $T = 50^{\circ}\text{C}$ . However, if a hot solution mining is desired, the test can also be carried out with a  $T_{\text{brine}}$  of  $80^{\circ}\text{C}$ . A typical test series consists of approx. 7 tests between 0.2 MPa and 20 MPa confining pressure.

The focus here is on the low confining pressures, since the strength is lowest and the dilatancy sets in early under such conditions. The strength and dilatancy parameters required for the material models for describing the changes in the rock mechanical behaviour can be obtained from the test curves.

The so-called steady-state creep is required for the time-dependent deformations.

Creep can be divided into 3 phases, which must be taken into account when designing the test (presented below).

1. Primary creep, which is irrelevant in solution mining and only plays a role in conventional underground mining-in-

ry następuje na długo przed osiągnięciem maksymalnej wytrzymałości.

Te cechy są badane w laboratorium w teście trójosiowego ściskania z kontrolowanym przyrostem odkształceń (test TCC). Odbyna się on z wysoką, stałą szybkością odkształcania, aż do osiągnięcia wytrzymałości resztkowej, która zwykle występuje przy odkształceniach osiowych wynoszących około 20% przy różnych ciśnieniach otaczających.

Przyjmuje się, że temperatura testu musi być dostosowana do temperatury *in situ*, na przykład  $T = 50^{\circ}\text{C}$ . Jednakże, jeśli pożądane jest gorące wydobywanie solanki, test można również przeprowadzić przy temperaturze  $T_{\text{brine}}$  wynoszącej  $80^{\circ}\text{C}$ . Typowa seria testowa składa się z około 7 testów przy ciśnieniu okólnym wynoszącym od 0,2 MPa do 20 MPa.

Główny nacisk kładzie się tu na niskie ciśnienie okólnym, ponieważ wytrzymałość jest najniższa, a w takich warunkach dylatacja zaczyna się wcześniej. Parametry wytrzymałości i dylatacji wymagane do opisu zmian w mechanicznej charakterystyce skał można uzyskać na podstawie krzywych testowych.

Do odkształceń zależnych od czasu wymagane jest tak zwane pełzanie w stanie ustalonym.

Pełzanie można podzielić na trzy fazy, które należy wziąć pod uwagę przy projektowaniu testu (fazy poniżej).

1. Pełzanie pierwotne, które nie ma znaczenia w wydobywaniu otworowym i odgrywa rolę tylko w przypadku gwałtownych zmian naprężenia wywołanych tradycyjnym wydobywaniem podziemnym (np. filarowo-komorowym systemie eksploatacji).
2. Druga faza pełzania, zwana również pełzaniem ustalonym, jest istotna dla wszystkich długotrwałych procesów deformacji, takich jak konwergencja kawern czy zapadliśka pod ziemią i na powierzchni.
3. Pełzanie trzeciorzędowe, nazywane także pełzaniem progresywnym, opisuje związek między dylatacją a uszkodzeniem, np. filarów.

Dla pełnego określenia parametrów konieczne jest przeprowadzenie około 6-10 testów TCC przy różnicy naprężeń między 4 a 20 MPa. Pomiar najlepiej przeprowadza się przy użyciu technologii wieloetapowej, aby zwiększyć liczbę wyników testów przy tej samej liczbie próbek testowych. Zwiększając liczbę wyników, możliwe staje się dokładniejsze formułowanie stwierdzeń, ponieważ testy pełzania zazwyczaj zawsze wykazują rozbieżność wyników (Karimi-Jafari et al., 2008).

Ponieważ pełzanie w stanie ustalonym jest silnie zależne od temperatury, zazwyczaj określa się także energię aktywacji. W tym celu zmianę temperatury przeprowadza się przy stałym obciążeniu po okresie testowym wynoszącym około 60 dni. Energię aktywacji można uzyskać z oceny szybkości pełzania w 2 różnych temperaturach (Salzer i in., 2015).

duced rapid stress shifts (e.g. extraction faces in room & pillar mining).

2. Secondary creep, also called stationary creep, is relevant for all long-term deformation processes, e.g. cavity convergence or underground subsidence and subsidence at the surface.
3. Tertiary creep, also called creep rupture, for describing the connection between dilatancy and the failure of e.g. pillars.

Approx. 6-10 TCC tests at differential stresses between 4 and 20 MPa are required for a complete parameter determination. The measurement is ideally carried out using multi-stage technology in order to increase the number of test results with the same number of test specimens. With an increasing number of results, more accurate statements are possible, since creep tests usually always show a scatter (Karimi-Jafari et al., 2008).

Since steady-state creep is also strongly temperature-dependent, the activation energy is usually also determined. For this purpose, a temperature change is carried out at a constant load after a test period of around 60 days. The activation energy can be derived from the evaluation of the creep rates at the 2 different temperatures (Salzer et al., 2015).

The geophysical parameters determined in this way are used to set up a mine dimensioning, and subsequently a rock mechanical model. It should be noted that the subsequent rock mechanical modelling requires numerical models that are able to reproduce the specific characteristics of potash salt. In the past decades, highly abstract, manually adjusted 2D models have been used for this purpose. Even if these enable a 3D representation, the results may quickly be overestimated, which can lead to misinterpretations.

In Germany, integrated 3D numerical models that are based on a realistic prediction of the deformation and stress development and the associated assessment of the stress redistribution, stress on the pillar and hanging wall barriers, seismic events and surface subsidence, have been developed over the past 15 years. The basic prerequisite for this is that the material model used for the geomechanical analysis appropriately depicts the phenomena of creep, dilatancy, damage, fracture and post-fracture behaviour and takes them into account in a closed approach. At the same time, for example, rock salt and carnallite differ in terms of in-situ deformation behaviour in that rock salt exhibits plastic behaviour at high levels of restraint, while carnallite tends towards brittle fracture. The state-of-the-art material approaches used at Institut für Gebirgsmechanik meet these complex requirements in a unique way (Günther et al., 2015; Günther, 2009).

With the help of the procedure explained, it is possible to plan a safe and sustainable extraction of potash and salt deposits using modern planning methods that are based on experience from more than 170 years of potash mining and

Określone w ten sposób parametry geomechaniczne są wykorzystywane do ustalenia wymiarowania kopalni, a następnie modelu mechanicznego skały. Należy zauważyć, że późniejsze modelowanie mechaniczne skał wymaga użycia modeli numerycznych zdolnych do odtworzenia specyficznych cech soli potasowych. W ostatnich dziesięcioleciach wykorzystywano do tego celu wysoce abstrakcyjne, ręcznie dostosowywane modele 2D. Nawet jeśli umożliwiają one prezentację 3D, wyniki mogą zostać szybko przeszacowane, co może prowadzić do błędnych interpretacji.

W Niemczech, w ciągu ostatnich 15 lat, opracowano kompleksowe modele numeryczne 3D. Modele te opierają się na realistycznych prognozach dotyczących odkształceń i rozwoju naprężeń. Obejmują również oceny przekształcenia naprężeń. Dodatkowo uwzględniają naprężenia występujące na filarach oraz bariery w stropie, ponadto analizują zjawiska sejsmiczne i osiadanie powierzchni. Podstawowym warunkiem jest, aby model używany do analizy geomechanicznej odpowiednio odwzorowywał zjawiska pełzania, dyatacji, uszkodzeń oraz pęknięcia. Model ten powinien także uwzględniać zachowanie materiału po wystąpieniu uszkodzeń i integrować te elementy w zamkniętym podejściu. Na przykład, porównując sól kamienną i karnalit, wykazują one różne zachowanie deformacyjne w miejscu występowania. Sól kamienna ma tendencję do wykazywania plastycznego zachowania pod wysokim naprężeniem, podczas gdy karnalit skłania się ku kruchemu pękaniu. Zastosowane podejścia materiałowe w Instytucie Mechaniki Górskiej zostały zaprojektowane w sposób unikalny, aby sprostać tym skomplikowanym wymaganiom (Günther et al., 2015; Günther, 2009).

Dzięki opisanej procedurze można zaplanować bezpieczne i zrównoważone wydobywanie złóż soli i soli potasowych przy użyciu nowoczesnych metod planowania, które opierają się na doświadczeniach zdobytych przez ponad 170 lat wydobywania soli potasowych i ponad 500 lat wydobywania soli kamiennej w Niemczech (Rauche, 2015). Planowanie skoncentrowane na celach, uwzględniające geologiczne i geomechaniczne cechy złóż soli potasowych, jest zalecane niezależnie od wybranej metody wydobywania. Aby ustalić optymalne parametry wydobywania złoża, konieczne jest takie wszechstronne podejście, które uwzględnia wymiarowanie filarów oraz modelowanie mechaniczne skał. To jest niezbędne zarówno w przypadku tradycyjnych metod górnictwa, jak i przy wydobywaniu za pomocą kawern w metodzie otworowej.

more than 500 years of rock salt mining in Germany (Rauche, 2015). Such target-oriented planning, taking into account the geological and geotechnical characteristics of potash deposits, is recommended regardless of the choice of extraction method, since pillar dimensioning and rock mechanical modelling are also required for solution mining caverns to determine the optimal extraction parameters of the deposit.

## LITERATURA/REFERENCE

AHORNER L., 1991. Entstehung und Ablauf des Gebirgsschlages bei Völkershäusen am 13. März 1989 aus seismologischer Sicht. Kali '91 - Second International Potash Technology Conference. Hamburg, 26 – 29 May 1991.

BERGMANN'SVEREIN "STAßFURT, WIEGE DES KALIBERG-BAUS" E.V., 2002. Geschichte des Staßfurter Salzbergbaus und der Staßfurter Kaliindustrie in der Zeit von 1952 – 2002.

- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., 2010. Geology and resources of salt deposits in Poland: the state of the art. *Geological Quarterly* 54 (4): 509–518.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., 2013. Potencjał zasobowy soli kamiennej i soli potasowych w Polsce a perspektywy jego wykorzystania. *Górnictwo Odkrywkowe* 54 (2): 74 – 84.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., MAZUREK S., 2020. Sól kamienna (rock salt, salt, halites) i sole potasowo-magnezowe (potash salts, potassium salts, potassium-magnesium salts). W: Bilans perspektywicznych zasobów kopalin Polski wg stanu na 31.12.2018 r. (red. Szamałek K., Szuflicki M., Mizerski W.): 218–232. PIG-PIB, Warszawa.
- ERCOSPLAN, 2007. Expert statement on the environmental impact of flooding Mine BKPRU-1. In: LSE (ed.): Prospectus Initial Public Offering (IPO) JSC URALKALI. London Stock Exchange Group, Alternative Investment Market, Exhibit B, Executive Summary, English Version 12-18, London, 12 October 2007.
- GIMM W., PFORR H., 1961. Gebirgsschläge im Kalibergbau unter Berücksichtigung von Erfahrungen des Kohle und Erzbergbaus. FFH Freiburger Forschungshefte, A 173, Akademie Verlag Berlin, 1961.
- GÜNTHER R.-M., 2009. Erweiterter Dehnungs-Verfestigungs-Ansatz - Phänomenologisches Stoffmodell für duktile Salzgesteine zur Beschreibung primären, sekundären und tertiären Kriechens (Dissertation). TU Bergakademie Freiberg, Freiberg.
- GÜNTHER R.-M., SALZER K., POPP T., LÜDELING C. (2015). Steady state-creep of rock salt – Improved Approaches for Lab Determination and Modelling. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 48 (6): 2603-2613.
- JOHN S., SCHICHT T., 2022. Kombinierte VSP- und Oberflächen-hybridseismik zur Salzhangerkundung am Fallbeispiel von zwei Kavernenstandorten in den Niederlanden. 70 Years of Potash Engineering Made in Erfurt – 30 Years of Experience Worldwide International Symposium, Erfurt, 06 – 08 October 2022.
- KARIMI-JAFARI M., BÉREST P., BROUARD B., 2008. Subsidence, Sinkholes and Craters above Salt Caverns. SMRI Spring 2008 Technical Conference, Porto, Portugal.
- MALOVICHKO A.A., SHULAKOV D.Y., SABIROV R.H., GHI-LYOV M.V., FOMINYKH V.I., 1999. Ground and seismic control of a large-scale emergency at a potash mine. Proc. 101st Annual Gen. Meeting of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Calgary, 02 – 05 May 1999.
- MALOVICHKO A.A., SABIROV R.H., MYNKA Y.V., 2001. Seismological monitoring in the system of comprehensive control at Upper Kama Potash Mines. Exkurs.f. u. Veröffentl. GGW, 211, Berlin, 2001, 5-27 - 5-35.
- MINKLEY W., 1998. Zum Herdmechanismus von großen seismischen Ereignissen im Kalibergbau. *Geologisches Jahrbuch E* 55, 1998, 69 - 84.
- MINKLEY W., 2004. Gebirgsmechanische Beschreibung von Entfestigung und Spröbrucherscheinungen im Carnallitit. Schriftenreihe des Instituts für Gebirgsmechanik GmbH, Heft 1, Shaker Verlag, Aachen, 2004, 200 Seiten.
- MINKLEY W., LÜDELING C., 2020. Sinkholes over Deep Caverns. In: Konietzky, H. (Hrsg.), 49. Geomechanik-Kolloquium. Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg, Heft 2020-4.
- MONAGHAN J., 2014. Images of Giant Russian Sinkhole Linked to Uralkali Mining Accident Published Online. The Moscow Times. <https://www.themoscowtimes.com/2014/11/21/images-of-giant-russian-sinkhole-linked-to-uralkali-mining-accident-published-online-a41611>; Last accessed: 14 June 2023.
- PAŃSTWOWA SŁUŻBA GEOLOGICZNA, 2022. BILANS ZASOBÓW ZŁOŻ KOPALIN W POLSCE wg stanu na 31 XII 2021 r. PIG-PIB, Warszawa.
- RAUCHE H., 2015. Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert – Stand der Technik bei der Rohstoffgewinnung und der Rohstoffaufbereitung sowie bei der Entsorgung der dabei anfallenden Rückstände. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015.
- SALZER K., GÜNTHER R.-M., MINKLEY W., NAUMANN D., POPP T., HAMPEL A., LUX K.-H., HERCHEN K., DÜSTERLOH U., ARGÜELLO J.G., HANSEN F., 2015. Joint project III on the comparison of constitutive models for the mechanical behavior of rock salt II: Extensive laboratory test program with clean salt from WIPP. Mechanical Behaviour of Salt VIII, Ed.: L. Roberts, CRC Press 2015, pp. 3–12.
- VAN SAMBEEK L.L., 2000. An introduction to subsidence over salt and potash mining facilities. In: Proceedings, Fall 2000 Meeting SMRI Solution Mining Research Institute, San Antonio, Texas, 15 – 18 October 2000, 10p.

# **Eksploracja otworowa jako potencjalna metoda wydobycia głęboko zalegających złóż soli potasowych w Polsce**

## **Solution Mining Technology – a Potential Mining Method for Deeply Buried Potash Deposits in Poland**

Sebastiaan N.G.C. VAN DER KLAUW, Christian FRITZE, Stephan PFEIFER, Andreas JOCKEL

ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH, e-mail: [mining@ercosplan.com](mailto:mining@ercosplan.com)

W niniejszej pracy zostanie omówiona technologia wydobycia otworowego soli potasowych oraz jej potencjał zastosowania w głęboko zalegających złóżach w Polsce. Przedstawione zostaną warunki i ograniczenia tej metody a także przeprowadzony zostanie krótki przegląd dostępnych złóż soli potasowych w kraju. Celem analizy jest określenie obszarów w Polsce, gdzie ta technologia może być skutecznie wykorzystywana do wydobycia solanek zawierających potas, a także ewentualnie magnez, z podziemnych złóż soli.

W skrócie, metoda otworowego wydobycia soli potasowych polega na sprowadzeniu wody lub solanki (rozpuszczalnika) na poziom złoża, pozwalając na rozpuszczenie potasu i innych minerałów solnych ze złoża, a następnie wydobyciu powstałej solanki z utworzonej pod ziemią kawerny. Na powierzchni solanka jest przetwarzana w celu uzyskania nadającego się do sprzedaży produktu potasowego w postaci chlorku potasu (MOP) o zawartości  $K_2O$  większej niż 60% lub w postaci siarczanu potasu (SOP) o zawartości  $K_2O$  większej niż 50%. Wyzwaniem jest efektywne połączenie operacji wydobycia otworowego i przetwarzania solanek, w celu osiągnięcia ekonomicznie opłacalnego procesu.

Warunkiem osiągnięcia wydajności w procesie ekstrakcji soli metodą otworową jest uzyskanie stosunkowo wysokiej zawartości potasu w wytworzonej solance. Aby tak się stało, określona ilość rozpuszczalnika musi wejść w kontakt z odpowiednią ilością soli mineralnych zawierających potas, podczas całego okresu eksploatacji kawerny. W tym celu należy rozpuścić w rozpuszczalniku znaczną ilość (> 35%) minerałów obecnych w złożu (nie tylko minerałów zawierających potas, ale często też halitu (NaCl)). W ten sposób w pozostałościach po rozpuszczeniu rozwinię się odpowiednia porowatość, umożliwiając wymianę rozpuszczalnika i po-

This presentation will first discuss the solution mining technology for potash salts to define boundary conditions for its application also for deeply buried deposits. This will be followed by a brief overview of potash deposits in Poland. The boundary conditions for solution mining will then be used to infer where in Poland solution mining technology can be applied for the economic extraction of potassium- and possibly magnesium-bearing brines from the salt deposits in the underground.

In a nutshell, the technique of solution mining of potash salts is to bring down water or brine (solvent) towards the deposit level, let this material dissolve the potassium and possibly other salt minerals from the deposit, and then extract the resulting production brine back towards the surface from the cavern developing in the underground. At the surface, the production brine is processed to a saleable potash product, either a Muriate of Potash (MOP) with  $K_2O > 60\%$  or a Sulphate of Potash (SOP) with  $K_2O > 50\%$ . The challenge is to combine the solution mining and brine processing operations in such a way that an overall efficient and economically viable process can be obtained.

An important boundary condition for an overall efficient operation is that a relatively high potassium content is reached in the production brine by solution mining. The prerequisite for this to happen is that a given volume of solvent is able to get into contact with an adequate amount of potash-bearing salt minerals over the lifetime of the cavern operation. To achieve this, a significant (> 35%) volume of the minerals within the deposit (not only the potassium-bearing minerals, but usually also halite (NaCl)) has to be dissolved by the solvent. This way, either an adequate porosity develops within the dissolution residues to allow for an exchange of solvent

wstajej na powierzchni rozpuszczania solanki, w przeciwnym razie pozostałe nierozpuszczone minerały rozpadną się i opadną na dno kawerny w miarę jej powstawania. Wymóg ten zwykle nie stanowi problemu w przypadku skał z dominacją sylwinu (KCl), karnalitu ( $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) czy nawet kainitu ( $\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2,75\text{H}_2\text{O}$ ), ale wyklucza to eksploatację ługowanie skał, w których dominuje polihalit ( $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Gdy nawet niewielka ilość polihalitu rozpuści się w wodzie, dochodzi do nasycenia anhydrytem ( $\text{CaSO}_4$ ). Rezultatem jest rozpuszczenie się jeszcze większej ilości polihalitu; równocześnie dochodzi do krystalizacji anhydrytu na powierzchni rozpuszczania a sam proces znacznie spowalnia. Niemożliwe jest wówczas osiągnięcie w rozsądnym czasie wymaganego wysokiego stężenia potasu w wyprodukowanej solance.

Aby doprowadzić wodę lub solankę do poziomu złoża, konieczne jest utworzenie drogi w dół poprzez wywiercenie otworu z powierzchni do tego poziomu. Wydobywanie solanki natomiast wymaga utworzenia innej drogi, ponieważ powietrze, gaz, woda lub solanka muszą wypierać solankę wypełniającą kavernę i jednocześnie zapobiegać powstaniu próżni w kawernie. Można to osiągnąć łącząc powierzchnię terenu z kaverną dwoma oddzielnymi otworami wiertniczymi lub łącząc je jednym odwiertem, który ma co najmniej dwie oddzielne ścieżki. Wiercenie jednego lub większej liczby otworów w celu utworzenia ścieżki transportu dla wody lub solanki w znacznym stopniu obciąża finanse operacji wiertniczych, zwłaszcza w przypadku złóż, które znajdują się głęboko pod powierzchnią ziemi. Dlatego też należy w pełni poznać geologię złoża, aby mieć pewność, że otwór wiertniczy kawerny pozwoli na rozpuszczenie określonej minimalnej objętości złoża w trakcie całego procesu wydobywania otworowego. Grubość złoża to czynnik, który może wpłynąć na potencjalną objętość złoża dostępną dla każdego otworu wiertniczego kawerny, co może potencjalnie umożliwić większe objętości w procesie wydobywania dla złoża o większej grubości. Kolejnym czynnikiem do uwzględnienia jest rozwijanie się boczne kawerny nad obszarem złoża, z dala od pierwotnego otworu wiertniczego. Z biegiem czasu i w zależności od grubości złoża, powstaje kaverna o dużej średnicy, co z kolei może wpłynąć na odpowiednio większą część złoża. Aby to osiągnąć, należy kontrolować wzrost kawerny ku górze, co osiąga się poprzez wstrzykiwanie wody lub solanki o mniejszej gęstości niż powstająca solanka produkcyjna. Osiąga się to poprzez zastosowanie warstwy izolującej „blanketu”, „poduszki” czyli medium o mniejszej gęstości niż woda i mającego niewielką lub żadną zdolność do rozpuszczania minerałów złoża osadzie. W roli „medium izolującego strop” zazwyczaj występuje ciecz węglowodorowa, gaz azotowy lub powietrze. Jednakże, w zależności od składu rozpuszczalnika, można zastosować również naturalną barierę, na przykład skałę solną, której dany rodzaj rozpuszczalnika

and production brine at the dissolution face, or the remaining non-dissolved minerals disaggregate and fall from the dissolution face to the bottom of the developing cavern. This requirement is usually not a problem within deposit rocks dominated by either sylvite (KCl), carnallite ( $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) or even kainite ( $\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2,75\text{H}_2\text{O}$ ), but this precludes the solution mining of rocks dominated by the mineral polyhalite ( $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). As soon as a small amount of polyhalite dissolves in water, the saturation of anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ) is reached. At this point more polyhalite will dissolve, but this is accompanied by the crystallisation of anhydrite at the dissolution face and the dissolution process will slow down dramatically. It is then not possible to achieve the required high K-concentrations in the production brine within a reasonable amount of time.

To bring water or brine down to the deposit level, a pathway from the surface to the deposit level is necessary, requiring the drilling of a hole from the surface down to that level. The extraction of the brine requires another pathway, because either air/gas, water or brine has to displace the brine that is removed from the underground to prevent the development of a vacuum in the underground cavern. This is achieved by either connecting the surface to the cavern with two separate drill holes or by connecting both with one drill hole, which has at least two separate pathways. Drilling of the hole(s) to provide the pathways for water/brine transport is a major cost factor for a solution mining operation, especially for deeply buried deposits. Therefore, the geology of the deposit has to be known well enough to be certain that a cavern drill hole will, over its operation time, allow the solution mining operation to dissolve a certain minimum volume of the deposit. One factor influencing the available deposit volume per cavern drill hole is the thickness of the deposit, with potentially larger volumes available for solution mining in deposits with larger thicknesses. Another factor is the lateral cavern development over the deposit area, away from the drill hole, which results, over time and at a given deposit thickness, in a cavern with a large diameter influencing a correspondingly large volume of the deposit. To achieve this, the upward development of a cavern, which is predetermined by injection of water/brine with a lower density than the resulting production brine, has to be controlled. This is accomplished by using a “blanket”, which is a medium with a lower density than water and has no or minimal capacity to dissolve any of the deposit minerals. Usually, a liquid hydrocarbon product, nitrogen gas or air is used as a blanket material. However, depending on the composition of the solvent, a natural blanket consisting of a salt rock that hardly dissolves in this solvent can also be used. In deposits with an interlayering of horizons with different mineral compositions, the use of a natural blanket can limit the mineable thickness of the deposit.

może praktycznie nie rozpuszczać. W złożach z wkładkami przenikaniem się poziomów o różnym składzie mineralnym zastosowanie naturalnej warstwy ekranizującej może ograniczyć grubość eksploatacyjną złoża.

Ponieważ wiercenie otworów jest głównym elementem generującym koszty, kluczowe jest ustalenie, ile kawern musi działać jednocześnie, aby uzyskać odpowiednią ilość potasu w solance przeznaczonej do zakładów przetwórczych oraz osiągnąć planowaną roczną produkcję. To kwestia kluczowa z perspektywy ekonomii realizowanych operacji. Liczba otworów produkcyjnych niezbędnych do osiągnięcia określonej rocznej produkcji zależy od natężenia przepływu przez komorę, rzeczywistej średniej zawartości potasu osiągniętej w solance produkcyjnej oraz efektywności procesu jej przetwarzania. Natężenie przepływu nad kawerną oraz zawartość potasu w solance produkcyjnej są ze sobą powiązane i wpływają na siebie. Są one uzależnione od czasu retencji rozpuszczalnika na powierzchni rozpuszczania oraz od dostępnego efektywnego obszaru rozpuszczania na tej powierzchni. W tym kontekście- jeśli natężenie przepływu w systemie kawern maleje, a czas dostępny dla rozpuszczalnika do oddziaływania z minerałami zawierającymi potas na powierzchni rozpuszczania się wydłuża, i przy założeniu, że brak jest dalszych zmian w systemie wydobywania, nastąpi wzrost zawartości potasu w solance produkcyjnej. Teoretycznie, przy bardzo niskich prędkościach przepływu oraz przy określonej temperaturze, można osiągnąć nasyconą potasem solankę produkcyjną. Przy tak niskich prędkościach przepływu, liczba kawern, które muszą być jednocześnie eksploatowane, aby wyprodukować odpowiednią objętość wysokogatunkowej solanki, która umożliwi osiągnięcie planowanej rocznej produkcji, będzie bardzo duża, co poprzez wiercenie otworów zwiększy koszty w ramach projektu. Przy wyższych prędkościach przepływu, czas retencji rozpuszczalnika w kawernie jest krótszy, co skutkuje niższą zawartością potasu w solance produkcyjnej. Ponownie, aby uzyskać wystarczającą ilość potasu w solance produkcyjnej w ilości potrzebnej do osiągnięcia zaplanowanej rocznej produkcji, konieczne jest jej wydobycie z większej liczby kawern. Efektywność przetwarzania solanki o niższej jakości jest niższa w porównaniu z przetwarzaniem solanki o wyższej zawartości potasu. Dlatego też konieczne jest znalezienie optymalnej równowagi między średnią szybkością przepływu nad kawerną, uzależnioną od mineralogii złoża i mieści się gdzieś między 20 m<sup>3</sup>/h a 55 m<sup>3</sup>/h, a dostępną efektywną powierzchnią rozpuszczania (średnicą kawerny) wewnątrz kawerny. Ta równowaga jest niezbędna do uzyskania solanki produkcyjnej o zawartości potasu zbliżonej do, ale wciąż niższej niż nasycenie potasem.

Wielkość kawerny, w której prowadzona jest eksploatacja, ma istotny wpływ na ekonomię całego projektu wydobywania soli potasowych metodą otworową. Wpływa ona zarówno na liczbę otworów wiertniczych, które trzeba wykonać na po-

Since the drilling of cavern drill holes is a major cost factor, the number of simultaneously operating caverns required to reach an adequate amount of K in the brine brought to the processing plant to achieve a defined annual production is important for the economics of the operation. The number of cavern drill holes that are required to achieve a defined annual production depends on the flow rate over the cavern, the actual average K-content achieved in the production brine and the efficiency of the brine processing. The flow rate over the cavern and K-content of the production brine, however, are not independent, but are related to the retention time of the solvent at the dissolution face and the effective available area for dissolution at that face. For a defined dissolution area, the reduction of the flow through a cavern system and the increase in time for the solvent to react with potash-bearing minerals at the dissolution face will lead, under the assumption of no further changes to the solution mining system, to an increase in the K-content of the production brine. At very low flow rates, it is theoretically possible to achieve a K-saturated production brine at a given temperature. At such low flow rates, however, the number of caverns that need to be operated simultaneously to produce an adequate volume of this high-grade brine to achieve the planned annual production will be very large, increasing the project drilling costs. At higher flow rates, the retention time of the solvent in the cavern is shorter and the K-content of the production brine will be lower. Again, in order to have sufficient K in the overall production brine to achieve the planned annual production, more caverns have to produce brine. The processing of this low-grade brine has a lower efficiency compared to processing brine with a higher K-content. Therefore, an optimum balance has to be found between the average flow rate over a cavern, depending on the mineralogy of the deposit and being somewhere between 20 m<sup>3</sup>/h and 55 m<sup>3</sup>/h, and the available effective dissolution area (cavern diameter) available within the cavern to obtain a production brine with a K-content that is close to, but still below K-saturation.

Taking into consideration the factors of cavern lifetime, effective dissolution area and average production brine flow rate, the cavern size influences the economics of a solution mining project due to the number of required drill holes at the start and during continuous operation. To which size (diameter) a cavern is developed, depends on the short-term and long-term stability of the cavern, evaluated by rock mechanical modelling, and needs to consider, to a lesser degree, how much time it would take to prepare a cavern for production. Especially for deeply buried deposits, the solution mining technique has some advantages over the conventional underground mining technique when it comes to the rock mechanical modelling and interpretation of the results related to short- and long-term stability:

czątku operacji oraz podczas trwającej eksploatacji. Długość życia kaverny, efektywna powierzchnia rozpuszczania soli oraz natężenie przepływu solanki produkcyjnej to kluczowe czynniki, które wpływają na ten proces i decydują o jego opłacalności. Do jakiej wielkości (średnicy) rozwija się kavernę, zależy od jej krótko- i długoterminowej stateczności, ocenianej za pomocą modelowania geomechanicznego. W mniejszym stopniu uwzględnia się również czas potrzebny na przygotowanie kaverny do produkcji. Dla głęboko zalegających złóż, technika wydobywania otworowego posiada kilka zalet w porównaniu z konwencjonalną techniką górnictwa podziemnego, zwłaszcza jeśli chodzi o modelowanie geomechaniczne oraz interpretację wyników związanych ze statecznością krótko- i długoterminową. Oto one:

- W operacjach wydobywania otworowego nie wymaga się obecności personelu do prac pod ziemią, wskaźniki bezpieczeństwa dotyczące interpretacji wyników modelowania geomechanicznego w kontekście stabilności krótkoterminowej mogą więc być niższe niż w przypadku konwencjonalnego górnictwa podziemnego. Rurociągi w odwiertach mogą ulec uszkodzeniu z powodu niestateczności stropu, co może skutkować koniecznością dodatkowych prac przy kawernie lub w najgorszym przypadku, jej porzuceniem, jednak nie ma ryzyka utraty ludzkiego życia.
- W trakcie eksploatacji lub nawet po jej zakończeniu, kolumna rur prowadząca od kaverny do powierzchni generuje ciśnienie hydrostatyczne lub litostatyczne co najmniej równe z tym na poziomie kaverny. W porównaniu z konwencjonalnymi podziemnymi komorami górnictwymi wypełnionymi powietrzem, ciśnienie hydrostatyczne/litostatyczne kavern eksploatowanych otworowo, podczas pracy na równoważnych głębokościach skutkuje niższymi naprężeniami różnicowymi wokół wyrobisk górniczych.

Z tego powodu techniki wydobywania otworowego mogą być nadal stosowane z relatywnie wysoką efektywnością w głęboko zalegających złóżach, gdzie analiza geomechaniczna sugeruje, że w tradycyjnym górnictwie podziemnym możliwe byłoby jedynie minimalne wydobycie ze względów bezpieczeństwa.

Kolejnym atutem wydobywania otworowego w porównaniu do tradycyjnego wydobywania podziemnego w głęboko zalegających złóżach jest wpływ gradientu geotermalnego, który skutkuje wyższymi temperaturami w głębszych warstwach złóż. W przypadku operacji wydobywania otworowego jest to korzystne, ponieważ tempo rozpuszczania większości minerałów soli zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury, a saturację solanki potasem osiąga się przy wyższych stężeniach potasu w solance. Dzięki temu możliwe jest eksploatowanie kavern w głęboko zalegających złóżach przy wyższych prędkościach przepływu, co pozwala na uzyskanie wyższego stężenia potasu w solance produkcyjnej w porównaniu z kavernami eksploatowanymi w podobnych złóżach na mniejszych głębokościach. W przypadku konwencjonalnych operacji

- As no personnel are required for underground work in a solution mining operation, the safety factors for the interpretation of the rock mechanical modelling results regarding short-term stability can be lower for solution mining compared to conventional underground mining. Down-hole piping might get damaged due to minor roof instability, requiring additional work on the cavern or, in the worst case, abandonment of a cavern, but there is no risk of loss of human life.
- During operation or even after abandonment of a cavern, the solvent or production brine column from the cavern to surface has at least a hydrostatic/halmostatic pressure at the cavern level. Compared to air-filled conventional underground mining rooms, the hydrostatic/halmostatic pressure for an operation at comparable depths results in a smaller differential stress around the mine opening for the solution mining cavern.

For these reasons, solution mining techniques can still be applied with a relatively high recovery ratio in deeply buried deposits, where rock mechanical modelling suggests that only very low recovery ratios would be feasible for a safe conventional underground mining operation.

A further advantage of solution mining compared to conventional underground mining in deeply buried deposits stems from the geothermal gradient, which results in relatively high deposit temperatures at greater depths. For a solution mining operation, this is advantageous as the dissolution rate of most salt minerals increases at higher temperatures and also the K-saturation of the brine is reached at higher K-concentrations in the brine. This allows caverns in deeply buried deposits to be operated at higher flow rates, achieving higher K-concentration in the production brine compared to caverns operated within similar deposits at shallower depths. For a conventional underground mining operation, higher deposit temperatures are not advantageous as they require additional investment for ventilation.

From the previous sections, the following boundary conditions for the mining of deeply buried potash deposits can be derived:

- the deposit should consist of the potassium- and/or magnesium-bearing salt minerals sylvite, carnallite or kainite in combination with halite. Other phases can be present, but their influence on the solution mining operation has to be investigated during further studies,
- the average thickness of a single deposit layer should exceed 2 m. The thicker the layer the better; however, it is feasible to mine several such layers from a cavern drill hole,
- it has to be possible to use information from drill holes that are several 100 m apart to predict the thickness and mineral composition of the deposit between these drill holes in order to evaluate in advance how much deposit

górnictwych pod ziemią wyższe temperatury w złożu nie są korzystne, ponieważ wiążą się z koniecznością dodatkowych inwestycji w system wentylacyjny.

Na podstawie wcześniejszych sekcji można wyciągnąć następujące wnioski dotyczące ograniczeń związanych z głębino-  
wą eksploatacją kopalń soli potasowej:

- złożo powinno składać się z soli potaso- i/lub magnezono-  
śnych, tj. minerałów takich jak sylwin, karnalit lub kainit,  
w połączeniu z halitem. Inne fazy mineralne mogą występować, lecz ich wpływ na operację wydobywania otworowego wymaga dalszych badań,
- średnia grubość pojedynczej warstwy złoża powinna wynosić ponad 2 m. Im grubsza warstwa, tym lepiej; jednakże możliwe jest wydobywanie kilku takich warstw z jednego otworu kawernowego,
- by dokładnie oszacować, ile materiału złożowego można wydobyć z jednego lub więcej otworów kawernowych, niezbędne jest wykorzystanie informacji z odwiertów, które są oddalone od siebie o kilkaset metrów. Te dane pozwalają przewidzieć grubość i skład mineralny złoża między tymi odwiertami jeszcze przed rozpoczęciem eksploatacji.

Większość rentownych złóż soli kamiennych i soli potasowych w Polsce osadziła się podczas okresu cechsztynu (późny perm, około 255 milionów lat temu). Osady solonośne sedymentowały w obszarze europejskiego basenu permskiego, rozciągającego się na obszarze około 700 000 km<sup>2</sup> w północnej części Europy Środkowej, od wschodniej Anglii na zachodzie aż po Litwę na wschodzie. Osady solne w Polsce są podzielone na cztery cyklotemy (PZ1 do PZ4), z przewagą skał solnych w cyklotemach dolnych i środkowych. Cyklotemy od Z5 do Z7 zidentyfikowane w Niemczech uważane są za podcykle górnego cyklotemu PZ4 w Polsce. W obszarze obejmującym północną i centralną Polskę (do około 60% powierzchni kraju), skały solne tych cyklotemów mogą osiągać grubość nawet do 1400 m. Sole potasu i magnezu o znaczeniu ekonomicznym, takie jak sylwin, karnalit i poli-halit, występują w dolnych trzech cyklotemach (PZ1 do PZ3).

Większość złóż pokładowych z poziomo zalegającymi warstwami soli o minimalnym lub umiarkowanym wpływie tektoniki, występują na Wschodniej Platformie Prekambryjskiej na północnym wschodzie oraz monoklinie przedsudeckiej i niecki północnosudeckiej na południowym zachodzie basenu cechsztyńskiego. W centralnej części basenu cechsztyńskiego w Polsce, w rejonie antyklinorium środkowopolskiego z przyległymi synklinami, biegnącego od północnego zachodu na południowy wschód, warstwy soli uległy tektonicznemu przekształceniu.

W drugiej połowie XX wieku przeprowadzono wiele prac geologicznych w poszukiwaniu zasobów soli kamiennych, soli potasowych i magnezowych. Odkryto wówczas liczne złoża, które poddano dalszym badaniom i eksploracji, jednak

material can be extracted from one or more cavern drill holes.

Most of the economically interesting rock salt and potash deposits in Poland were deposited during the Zechstein (Late Permian, approx. 255 milion years ago). The salt-bearing sediments were deposited within the European Permian Basin, which extends across an area of approx. 700,000 km<sup>2</sup> in northern Central Europe, from eastern England in the west to Lithuania in the east. The salt-bearing sediments are divided into four cycles (PZ1 to PZ4) in Poland, with the salt rocks dominating in the lower and middle cycles. The cycles Z5 to Z7 identified in Germany are considered subdivisions of the upper PZ4 cycle in Poland. In northern and central Poland (below about 60% of the country), the salt rocks of these cycles can reach a thickness of up to 1,400 m. Potassium and magnesium salts of economic interest: sylvinite, carnallite and polyhalite have been reported in the lower 3 cycles (PZ1 to PZ3).

Mostly horizontally layered salt deposits with minimal to moderate tectonic overprint occur on the East European Precambrian Platform in the northeast as well as within the Peri Sudetic Monocline and the North Sudetic Depression in the southwest of areas with Zechstein-aged salts in Poland. In the central part of the area with Zechstein-aged salts in Poland, within the NW-SE striking Central Polish Anticlinorium and within accompanying synclines, the salt is present in tectonically overprinted salt structures.

As part of several geological prospecting campaigns in the second half of the 20th century, besides several deposits with rock salt, deposits with potassium and magnesium salts were found and these have been further explored with different intensities. The knowledge about the overall geological structure of these deposits is usually minimal. The exploration drill holes intersected potassium and magnesium salts at depths between 700 and 1,800 m. As potassium- and magnesium-bearing minerals, sylvite, carnallite, polyhalite and also minor amounts of kieserite (MgSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O), kainite, hexahydrite (MgSO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O) and langbeinite (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·2MgSO<sub>4</sub>) have been reported (Czapowski, Bukowski, 2013; Czapowski et al., 2020).

Historical resources estimated according to the standards used at the time of exploration have been reported only for a few of these deposits.

In the general area of Puck Bay on the East European Precambrian Platform, potassium and magnesium sulphate horizons have been identified within the PZ1 cycle at depths greater than 1,000 m and with a thickness of several tenths of metres in several drill holes within four sub-areas with a total area of about 18 km<sup>2</sup>. The deposit is considered to be horizontally layered with minimal tectonic overprint. The main potassium- and magnesium-bearing mineral is polyhalite (15.6% K<sub>2</sub>O) with carnallite present in minor amounts. For the whole

z uwagi na zróżnicowany stopień ich zaawansowania, wiedza na temat struktury geologicznej tych złóż jest ograniczona. W wyniku wiercenia otworów badawczych napotkano złoża soli potasowych i magnezowych na głębokościach sięgających od 700 do 1800 metrów poniżej powierzchni ziemi. Wśród minerałów zawierających potas i magnez zidentyfikowano sylwin, karnalit, polihalit, a także w mniejszych ilościach kieseryt ( $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), kainit, heksahydrat ( $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) i langbeinit ( $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4$ ) (Czapowski, Bukowski, 2013; Czapowski et al., 2020).

Źródła historyczne, w których zasoby soli potasowych oszacowano zgodnie z normami obowiązującymi w tamtym czasie, zostały zgłoszone tylko dla kilku złóż soli kamiennej.

W obszarze Zatoki Puckiej na Wschodniej Platformie Prekambryjskiej, w ramach cyklotemu PZ1, zidentyfikowano warstwy siarczanów potasu i magnezu na głębokościach przekraczających 1000 metrów. Warstwy mają grubość kilkudziesięciu metrów i występują w kilku otworach wiertniczych, w czterech różnych podobszarach o łącznej powierzchni wynoszącej około 18 km<sup>2</sup>. Złoże jest pokładowe z warstwami ułożonymi prawie poziomo, z minimalnym wpływem tektoniki. Głównym minerałem zawierającym potas i magnez jest polihalit (15,6%  $\text{K}_2\text{O}$ ), natomiast karnalit występuje w mniejszych ilościach. Dla całego złoża zgłoszono historyczne zasoby wynoszące od 600 milionów ton z minimalną zawartością 7,7%  $\text{K}_2\text{O}$  do maksymalnej zawartości 13,7%  $\text{K}_2\text{O}$  (Państwowa Służba Geologiczna, 2022).

W odniesieniu do struktury solnej Kłodawa, znajdującej się w Antyklinorium Środkowopolskim, zidentyfikowano minerały soli zawierające potas i magnez w cyklotemach PZ2 i PZ3. W cyklocie PZ3 występuje karnalit zawierający kieseryt (8,5%  $\text{K}_2\text{O}$ ; 8,1%  $\text{MgO}$ ), którego warstwy osiągają miąższość od 15 do 30 m. Na podstawie badań geologicznych zgłoszono historyczne zasoby wynoszące około 90 milionów ton karnalitu (Czapowski, Bukowski, 2010).

Oprócz tych bardziej intensywnie badanych złóż, działania w zakresie historycznej prospekcji i eksploracji wykazały obecność potencjalnych złóż soli potasowych na Wschodniej Platformie Prekambryjskiej (np. Żelazna Góra), w Antyklinorium Środkowopolskim (np. Inowrocław, Góra, Mogilno), a także na monoklinie przedsudeckiej (np. Zielona Góra-Kożuchów, Nowa Sól-Otyń).

Dla złóż pokładowych, potencjał soli potasowych i magnezowych szacuje się na około 3,64 miliarda ton. Najbardziej znaczące zasoby soli potasowych i magnezowych odnaleziono na Wschodniej Platformie Prekambryjskiej na głębokościach od 700 do 1800 m, w monoklinie przedsudeckiej na głębokościach od 900 do 1800 m oraz w niecce północnosudeckiej na głębokościach od 970 do 1800 m, na obszarze ogółem wynoszącym 466 km<sup>2</sup> (Czapowski, Bukowski, 2013). Dla różnych złóż, średnia miąższość warstw zawierających

deposit, historical resources of 600 million metric tonnes with 7.7%  $\text{K}_2\text{O}$  at minimum and 13.7%  $\text{K}_2\text{O}$  at maximum have been reported (Państwowa Służba Geologiczna, 2022).

Regarding the Kłodawa Salt Structure located in the Central Polish Anticlinorium, potassium- and magnesium-bearing salt minerals have been identified in the cycles PZ2 and PZ3. The kieserite-bearing carnallite (8.5%  $\text{K}_2\text{O}$ ; 8.1%  $\text{MgO}$ ) within the PZ3 cycle may have a thickness of between 15 and 30 m. Based on geological exploration, historical resources amounting to about 90 million metric tonnes of carnallite have been reported (Czapowski, Bukowski, 2010).

Besides these more intensely explored deposits, the historical prospection and exploration efforts have identified further potential potash deposits in the East European Precambrian Platform (e.g. Żelazna Góra), the Central Polish Anticlinorium (e.g. Inowrocław, Góra, Mogilno) as well as in the the Peri Sudetic Monocline (e.g. Zielona Góra-Kożuchów, Nowa Sól-Otyń).

For deposits considered to be more or less horizontally layered and with minor tectonic overprint, the potential for potassium and magnesium salts is estimated to be in the range of 3.64 billion metric tonnes. The most significant occurrences have been found in the East European Precambrian Platform at depths between 700 and 1,800 m, in the Peri Sudetic Monocline at depths between 900 and 1,800 m and in the North Sudetic Depression at depths between 970 and 1,800 m over an area totalling 466 km<sup>2</sup> (Czapowski, Bukowski, 2013). For the different deposits, the average thickness of the potassium and magnesium salt-bearing layers ranges between 2 and 7 m, whereas the average  $\text{K}_2\text{O}$  content varies between 4 and 9%.

Taking into account the boundary conditions inferred for the solution mining of deeply buried deposits, the tectonically complex salt structures present in the Central Polish Anticlinorium are not a prime target, because there is no potential to reliably extrapolate thickness and mineral grade a distance away from a drill hole intersecting the deposit. Within these structures, there is a high risk that it will not be possible to access an adequate volume of the deposit via a cavern drill hole to produce enough production brine with sufficient K-content for an overall economically viable operation. In this respect, the best options to define a deposit suitable for solution mining occur in areas where the deposits are considered to be more or less horizontally layered and with minor tectonic overprint as present in the East European Precambrian Platform, the Peri Sudetic Monocline and the North Sudetic Depression. The polyhalite-dominated deposit that has been defined in Puck Bay and all other polyhalite-dominated deposits are not suitable for solution mining. Taking into account the reported average  $\text{K}_2\text{O}$  contents of between 4% and 9%, the best options for solution mining in these areas are probably present where carnallite is the main potassium- and

sole potasu i magnezu wynosi od 2 do 7 m, podczas gdy średnia zawartość  $K_2O$  waha się od 4 do 9%.

Biorąc pod uwagę ograniczenia wynikające z wydobywania otworowego głęboko zalegających złóż, skomplikowane struktury solne w Antyklinorium Środkowopolskim nie stanowią głównego obiektu zainteresowania, ze względu na brak możliwości wiarygodnej ekstrapolacji wartości miąższości i zawartości minerałów w odległości od otworu wiertniczego, przecinającego dane złoża. W obrębie skomplikowanych struktur solnych, istnieje ryzyko, że nie będzie możliwe uzyskanie dostępu do wystarczającej objętości złoża za pomocą otworu wiertniczego. Stanowi to problem, ponieważ aby operacja była opłacalna, potrzebna jest określona ilość solanki produkcyjnej zawierająca dostateczną ilość potasu. W kontekście poszukiwań złóż odpowiednich do wydobywania otworowego, najlepsze warunki występują w obszarach, gdzie występują złoża pokładowe z warstwami soli zalegającymi poziomo, niezaangażowane tektonicznie, na przykład takie jak na Wschodniej Platformie Prekambryjskiej, w monoklinie przedsudeckiej oraz w niecce północnosudeckiej. Złoża zdominowane przez polihalit, takie jak to w Zatoce Puckiej, oraz inne złoża o podobnym składzie mineralnym, nie nadają się do wydobywania otworowego. Jeśli jednak uwzględnimy średnie zawartości  $K_2O$  między 4% a 9%, to najlepsze opcje do rozważenia pojawiają się tam, gdzie głównym minerałem zawierającym potas i magnez jest karnalit. Bez dokładnego przeanalizowania wszystkich dostępnych danych nie można jednak wykluczyć, że istnieją również złoża z dominacją sylwinu, które też mogą nadawać się do wydobywania otworowego.

magnesium-bearing mineral of the deposit. Without having reviewed all available data in detail, however, it cannot be ruled out that sylvite-dominated deposits suitable for solution mining can also be defined.

## LITERATURA/ REFERENCES

- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., 2010. Geology and resources of salt deposits in Poland: the state of the art. *Geological Quarterly*, 2010, 54 (4): 509–518.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., 2013. Potencjał zasobowy soli kamiennej i soli potasowych w Polsce a perspektywy jego wykorzystania. *Górnictwo Odkrywkowe*, 54 (2): 74 – 84.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., MAZUREK S., 2020. Sól kamienna (rock salt, salt, halites) i sole potasowo-magnezowe (potash salts, potassium salts, potassium-magnesium salts). W: Bilans perspektywicznych zasobów kopalin Polski wg stanu na 31.12.2018 r. (red. Szamałek K., Szufflicki M., Mizerski W.): 218–232. PIG-PIB, Warszawa.
- PAŃSTWOWA SŁUŻBA GEOLOGICZNA, 2022. BILANS ZASOBÓW ZŁÓŻ KOPALIN W POLSCE wg stanu na 31 XII 2021 r. PIG-PIB, Warszawa.

# Aspekty prawne składowania odpadów przemysłowych w kawernach solnych w Kanadzie

## Legal aspects of industrial waste storage in salt caverns in Canada

Piotr KUKIAŁKA

Kukialka Consulting Ltd., 207 Glamorgan Pl SW, Calgary, AB T3E 5B9, Kanada; e-mail: piotr\_kukialka@hotmail.com

### STRESZCZENIE

Zachodnia Kanada jest obok Stanów Zjednoczonych największym użytkownikiem kawern do składowania odpadów przemysłowych na świecie. Bezpośrednio związane jest to z główną gałęzią gospodarki, jaką jest przemysł wydobywczy węglowodorów. Tak powszechne ich zastosowanie w tych krajach jest możliwe dzięki istnieniu dokładnych i przejrzystych przepisów dotyczących ich budowy oraz eksploatacji. W Kanadzie szczegółowe zalecenia dotyczące składowania odpadów w kawernach solnych zostały określone przez *Canadian Standard Association (CSA)*. Najnowsza ich wersja została opublikowana w biuletynie Z341-22 wydanym przez *Canadian Standards Association*. Kolejnym aspektem ich użytkowania jest sposób utylizacji wyprodukowanej podczas ich budowy i eksploatacji solanki, która jest zatłaczana do otworów zrzutowych. W Albercie przepisy dotyczące otworów zrzutowych regulowane są przez *Directive 051: Injection and Disposal Wells – Well Classifications, Completions, Logging, and Testing Requirements* wydane przez *Energy Resources Conservation Board*. Określają one dokładnie substancje dozwolone do zatłaczania do otworów zrzutowych, jak i te, których zatłaczanie jest absolutnie niedopuszczalne.

**Słowa kluczowe:** kawerny solne, kawerny do składowania odpadów, otwory zrzutowe solanki, zrzut solanki, regulacje prawne, Canadian Standards Association, Z341-22, Directive 051, Kanada

### ABSTRACT

Western Canada, alongside the United States, is one of the world's largest users of caverns for industrial waste storage. This is directly related to the economy's primary sector, the hydrocarbon extraction industry. Their widespread use in these countries is made possible by precise and transparent regulations regarding their construction and operation. In Canada, detailed guidelines for the storage of waste in salt caverns have been established by the *Canadian Standards Association (CSA)*. The latest version was published in the Z341-22 bulletin issued by the CSA. Another aspect of their use is the disposal method for the brine produced during their construction and operation, which is injected into disposal wells. In Alberta, regulations regarding disposal wells are governed by *Directive 051: Injection and Disposal Wells – Well Classifications, Completions, Logging, and Testing Requirements* issued by the *Energy Resources Conservation Board*. This directive precisely defines the substances permitted for injection into disposal wells, as well as those whose injection is strictly prohibited.

**Keywords:** salt caverns, waste storage caverns, brine disposal wells, brine discharge, regulatory frameworks, Canadian Standards Association, Z341-22, Directive 051, Canada

### 1. WSTĘP

Najmniej znanym typem kawern solnych są kawerny przeznaczone do składowania odpadów. Historia powstania

### 1. INTRODUCTION

The least known type of salt caverns are those used for waste storage. The origins of this practice trace back to the early 1960s, when the first cavern for the underground

pierwszej z nich sięga początków lat 60-tych ubiegłego wieku, kiedy to w Anglii powstała pierwsza kawerna do podziemnego składowania odpadów pochodzących z przemysłu chemicznego (Hoather, Challinor, 1994; Thoms, Gehle, 2000). Od tego czasu w Europie kawerny tego typu funkcjonują również w ograniczonym zakresie w Holandii (Wassmann, 1983). Jednak generalnie wiedza o ich istnieniu oraz o zasadach ich funkcjonowania zarówno w Polsce, jak i w Europie, jest bardzo znikoma. Największy rozkwit tej technologii nastąpił w XXI wieku w Zachodniej Kanadzie oraz Stanach Zjednoczonych (Brassow, 2000, 2006). W Zachodniej Kanadzie jest to ściśle związane z specyfiką jej gospodarki, szczególnie w prowincji Alberta, której główną gałęzią jest przemysł naftowy, zaś kawerny przeznaczone są do składowania odpadów związanych z wydobywaniem gazu ziemnego, ropy naftowej oraz ciężkich bituminów smolistych. Początkowo do tego celu wykorzystywano wyeksploatowane kawerny poprodukcyjne solanki, jednak wraz ze wzrostem zapotrzebowania na bezpieczne składowanie odpadów przemysłowych, rozpoczęto budowę kawern specjalnie zaprojektowanych i przeznaczonych, już od początku, wyłącznie jako składowiska odpadów. W obecnej chwili w Zachodniej Kanadzie, kawerny tego typu stanowią około 30% wszystkich budowanych kawern solnych. Dodatkowo, poza przemysłem naftowym, w mniejszym stopniu eksploatowane są przez przemysł chemiczny wykorzystujący solankę jak surowiec do swojej produkcji.

Produktem ubocznym powstającym podczas eksploatacji kawern solnych jest solanka. Ze względu na niską cenę soli, produkcja NaCl z solanki jest nieopłacalna i z tego względu stanowi ona odpad podlegający utylizacji. Natomiast, najłatwiejszym sposobem na jej pozbycie się jest zatłoczenie jej do górotworu. Tego typu działanie regulowane jest przez przepisy zawarte w *Directive 051: Injection and Disposal Wells – Well Classifications, Completions, Logging, and Testing Requirements* z wydane przez *Energy Resources Conservation Board*. Określa ono dokładnie strefy ochronne wód podziemnych oraz substancje zawarte w wodzie, których zatłaczanie jest dozwolone oraz te których jest bezwzględnie zabronione

## 2. REGULACJE PRAWNE DOTYCZĄCE KAWERN SOLNYCH

Regulacje prawne dotyczące budowy oraz eksploatacji kawern solnych w Kanadzie są bezpośrednio połączone ze specyfiką tego kraju. Kanada stanowi federację prowincji i terytoriów. Z tego względu jej konstytucja dzieli władzę między rząd federalny i rządy poszczególnych prowincji. Zarząd nad surowcami mineralnymi i ich eksploatacją pozostaje w gestii poszczególnych prowincji, zaś rząd federalny sprawuje jurysdykcję jedynie w terytoriach. Z tego względu w Kanadzie nie istnieją ogólnokrajowe przepisy dotyczące budowy oraz eks-

storage of chemical industry waste was created in England (Hoather, Challinor, 1994; Thoms, Gehle 2000). Since then, similar caverns have been used, though to a limited extent, in the Netherlands (Wassmann, 1983). Despite this, knowledge about these caverns and their operational principles remains minimal both in Poland and across Europe. The most significant expansion of this technology occurred in the 21st century in Western Canada and the United States (Brassow, 2000 and 2006). In Western Canada, particularly in Alberta, this development is closely linked to the region's oil industry. Caverns in this area are primarily used for the disposal of waste associated with the extraction of natural gas, crude oil, and heavy bituminous sands. Initially, decommissioned caverns from brine production were used for this purpose. However, with the growing demand for safe industrial waste disposal, the construction of caverns specifically designed and intended solely for waste storage began. Currently, such caverns account for approximately 30% of all salt caverns built in Western Canada. Additionally, while the oil industry is the main user, the chemical industry also utilizes these caverns to a lesser extent for storing brine used as a raw material for production.

A byproduct of operating salt caverns is brine. Due to the low price of salt, producing NaCl from brine is economically unviable, making brine a waste product that requires disposal. The simplest method for disposing of it is to inject it into the rock mass. This activity is regulated by *Directive 051: Injection and Disposal Wells – Well Classifications, Completions, Logging, and Testing Requirements*, issued by the *Energy Resources Conservation Board*. The directive provides detailed guidelines on protective zones for groundwater and specifies which substances in the water can be injected, as well as those that are strictly prohibited.

## 2. LEGAL REGULATIONS CONCERNING THE CONSTRUCTION AND OPERATION OF SALT CAVERNS IN CANADA

The legal regulations regarding the construction and operation of salt caverns in Canada are directly linked to the country's specific governance structure. Canada is a federation of provinces and territories, and its constitution divides powers between the federal government and the provincial governments. The management of mineral resources and their exploitation falls under the jurisdiction of the individual provinces, while the federal government has jurisdiction only in the territories. As a result, there are no nationwide regulations for the construction and operation of salt caverns in Canada. The regulation of these activities, particularly for caverns associated with the oil industry, is overseen by the *Canadian Standards Association (CSA)*, which functions similarly to the Polish Committee for Standardization. The CSA has estab-

ploatacji kawern solnych. Uregulowaniem tych przepisów, dotyczących jednak jedynie kawern, które ściśle związane są z przemysłem naftowym, zajęła się organizacja *Canadian Standard Association (CSA)*, będąca w pewnym sensie odpowiednikiem Polskiego Komitetu Normalizacyjnego. Powołano w niej grupę zajmującą się szeroko pojętym podziemnym magazynowaniem i składowaniem (*Technical Committee on Storage in Underground Formations*). W jej skład wchodzi przedstawiciele rządów poszczególnych prowincji, które są zainteresowane rozwojem kawern solnych, jak np. Alberta, Kolumbii Brytyjskiej, Ontario i Saskatchewan oraz firm zajmujących się budową i przede wszystkim eksploatacją kawern solnych. Wchodzi ona w skład większej grupy zajmującej się generalnie całokształtem przepisów i norm dotyczących przemysłu naftowego (*Strategic Steering Committee on Petroleum and Natural Gas*). Jednak ze względu na to, że nie jest to organizacja stricte rządowa, normy przez nią stworzone stanowią bardziej wytyczne, a nie rzeczywiste przepisy. Spotkania grupy odbywają się kilka razy w roku.

Wytyczne dotyczące podziemnego magazynowania i składowania wydawane są pod nazwą *Z341 Series Storage of Hydrocarbons in underground formations*. Najnowsza edycja opublikowana została w roku 2022. Składa się z dwóch części. Pierwsza dotyczy kawern magazynowych, druga zaś kawern do składowania odpadów. W przeciwieństwie do norm *PN-EN 1918-3 Infrastruktura Gazowa, Podziemne Magazynowanie Gazu, Część 3: Zalecenia funkcjonalne dotyczące magazynowania w wylugowanych komór solnych* obowiązujących w Unii Europejskiej, które są bardzo ogólnikowe, wytyczne zawarte w *Z341 Series Storage of Hydrocarbons in underground formations* są niezmiernie dokładne i dotyczą wszystkich aspektów budowy i eksploatacji kawern. Obejmują one zagadnienia poczynając od lokalizacji nowoprojektowanych kawern poprzez proces wiercenia, budowy, aż do eksploatacji i zabezpieczania nieczynnych już kawern. *Z341 Series Storage of Hydrocarbons in underground formations* w przeciwieństwie do *PN-EN 1918-3*, który jest zbiorem dość ogólnikowych norm *Z341* stanowi w miarę szczegółową instrukcję budowy i eksploatacji kawern solnych.

Ze względu na brak federalnych przepisów obowiązujących w całej Kanadzie, rządy poszczególnych prowincji odpowiedzialne są za przepisy górnicze i każda z nich odnosi się trochę inaczej do wytycznych zawartych w *Z341 Series Storage of Hydrocarbons in underground formations*. Poniżej przedstawione jest zestawienie dla poszczególnych prowincji:

- Alberta – normy zawarte w *Z341* nie są oficjalnie obowiązkowe, jednak *Alberta Energy Regulator (AER)* bardzo mocno zaleca ich przestrzeganie. Kawerny zbudowane zgodnie z zaleceniami *Z341* są dopuszczane do eksploatacji bez potrzeby wykonywania dodatkowych testów, z wyjątkiem testu szczelności (*Mechanical Integrity Test*), który jest obowiązkowy.

lished the *Technical Committee on Storage in Underground Formations* to address various aspects of underground storage and disposal. This committee includes representatives from the provincial governments interested in the development of salt caverns, such as Alberta, British Columbia, Ontario, and Saskatchewan, as well as companies involved in the construction and operation of salt caverns. The *Technical Committee on Storage in Underground Formations* is part of a larger group, the *Strategic Steering Committee on Petroleum and Natural Gas*, which oversees regulations and standards for the oil and gas industry. However, since the CSA is not a strictly governmental organization, the standards it develops serve more as guidelines rather than actual laws. The committee meets several times a year to discuss and update these standards.

The guidelines for underground storage and disposal are published under the name *Z341 Series Storage of Hydrocarbons in Underground Formations*. The latest edition was released in 2022, consisting of two parts: one for storage caverns and the other for waste disposal caverns. Unlike the broad and general norms in the *PN-EN 1918-3 Gas Infrastructure, Underground Gas Storage, Part 3: Functional Recommendations for Storage in Leached Salt Caverns*, which are applicable in the European Union, the guidelines in the *Z341 Series* are extremely detailed, covering all aspects of the construction and operation of caverns. They address issues ranging from the location of newly designed caverns through drilling, construction, operation, and securing decommissioned caverns. The *Z341 Series* thus provides a comprehensive manual for building and operating salt caverns.

Due to the lack of federal regulations in Canada, the provincial governments are responsible for mining regulations, and each province treats the guidelines in the *Z341 Series* differently:

- Alberta: The guidelines in *Z341* are not officially mandatory, but the *Alberta Energy Regulator (AER)* strongly recommends compliance. Caverns built according to *Z341* are allowed to operate without additional testing, except for the mandatory leak test (*Mechanical Integrity Test*).
- British Columbia: Due to the absence of salt deposits, the government has not introduced official regulations for salt caverns but mandates adherence to *Z341* for underground gas hydrocarbon storage in porous formations.
- Nova Scotia: Has its regulations closely modeled on *Z341*.
- Ontario: Has adopted *Z341* as official regulations.
- Quebec: Like Nova Scotia, has regulations closely modeled on *Z341*.
- Saskatchewan: Strict adherence to *Z341* is recommended.

- Kolumbia Brytyjska – ze względu na brak złoża soli kamiennej na jej terenie, rząd nie wprowadził oficjalnych przepisów dotyczących kawern solnych, jednak nakazane jest przestrzeganie Z341 w stosunku do podziemnego magazynowania węglowodorów gazowych w porowatych formacjach.
- Nowa Szkocja – posiada własne przepisy ściśle wzorowane na Z341.
- Ontario – Z341 zostało przyjęte jako oficjalne przepisy obowiązujące w tej prowincji.
- Quebec – podobnie jak Nowa Szkocja posiada własne przepisy ściśle wzorowane na Z341.
- Saskatchewan – zalecane jest ściśle przestrzeganie Z341.

W Albercie istnieje pewien dość dziwny paradoks. Przepisom zawartym w Z341 podlegają jedynie kawerny magazynowe oraz kawerny przeznaczone do składowania odpadów związane bezpośrednio z przemysłem naftowym. Z drugiej strony, kawerny przeznaczone do produkcji solanki regulują jedynie przepisy zawarte w *Mines and Minerals Act* opublikowanym przez rząd Alberta. Wynika to z faktu, że kawerny użytkowane przez firmy związane z przemysłem naftowym podlegają zaś *Alberta Energy Regulator (AER)*. Jest to instytucja podlegająca rządowi prowincjonalnemu, mająca uprawnienia polskich Departamentów Ropy i Gazu oraz Górnictwa, ale tylko odnośnie do kopalnych surowców energetycznych. Taka sytuacja powoduje istnienie podwójnych standardów w górnictwie solnym, gdzie *Z341 Series Storage of Hydrocarbons in underground formations* dość rygorystycznie określa zasady budowy oraz użytkowania kawern solnych, zaś *Mines and Minerals Act* podchodzi do tego tematu bardzo ogólnikowo. Wynika to prawdopodobnie z kilku powodów. Przede wszystkim na terenie prowincji występuje stosunkowo mała ilość kopalni otworowych solanki i znajdują się one generalnie z dala od dużych ośrodków miejskich na terenach o niewielkim zaludnieniu. Ponadto jak dotąd, oby nigdy, w prowincji Alberta nie doszło do wypadków związanych bezpośrednio z działalnością kopalni otworowych. Jednak kopalnie otworowe generalnie stosują się do zaleceń Z341. Prawdopodobnie największy wpływ na to ma możliwość późniejszej sprzedaży wyeksploatowanych kawern poprodukcyjnych firmom zajmującym się komercyjnym składowaniem odpadów. Aby do tego jednak mogło dojść i kawerny poprodukcyjne były dopuszczone do tego typu eksploatacji, muszą być budowane zgodnie z wytycznymi zawartymi w *Z341 Series Storage of Hydrocarbons in underground formations*. W przeciwniej sytuacji mogą zostać niedopuszczone przez *Alberta Energy Regulator (AER)* do składowania odpadów, co stanowiłoby dużą stratę finansową dla inwestora.

Nieco odmienna sytuacja panuje w prowincji Saskatchewan, gdzie produkcja soli potasowej (metody otworowe i konwencjonalne) stanowi, poza rolnictwem, główną gałąź gospodarki i jest dużo bardziej rozwinięta od przemysłu wy-

A paradox exists in Alberta where only storage caverns and waste disposal caverns associated with the oil industry are subject to Z341 guidelines, whereas brine production caverns are regulated by the *Mines and Minerals Act* published by the Alberta government. This dual standard arises because caverns used by oil industry-related companies fall under the jurisdiction of the *Alberta Energy Regulator (AER)*. This institution, which operates under the provincial government, holds the authority equivalent to the Polish Departments of Oil and Gas and Mining, but exclusively for energy resources. This situation leads to double standards in salt mining, with the *Z341 Series* providing stringent rules for the construction and use of salt caverns, while the *Mines and Minerals Act* adopts a more general approach. This likely arises from several factors. First and foremost, there is a relatively small number of solution mines within the province, and these are generally located away from major urban centers in sparsely populated areas. Additionally, to date—hopefully never—there have been no accidents directly associated with borehole mining activities in Alberta. However, borehole mines generally adhere to the recommendations of the *Z341 Series*. The possibility of later selling depleted production caverns to companies engaged in commercial waste storage likely has the greatest influence on this compliance. For such transactions to occur and for depleted caverns to be approved for this type of exploitation, they must be constructed in accordance with the guidelines contained in the *Z341 Series Storage of Hydrocarbons in Underground Formations*. Otherwise, they may be deemed unsuitable by the *Alberta Energy Regulator (AER)* for waste storage, which would represent a significant financial loss for the investor.

A somewhat different situation exists in the province of Saskatchewan, where potash production, using both borehole and conventional mining methods, is a primary economic sector alongside agriculture. This industry is much more developed than the hydrocarbon extraction industry (Labbe, Kelly, 2009). Consequently, companies do not consider the possibility of converting caverns for waste storage in the future. Instead, they focus exclusively on maximizing brine production.

### 3. WASTE DISPOSAL CAVERNS

Waste disposal in caverns is closely tied to the industry. It was first used in England for the disposal of chemical industry waste (Thoms, Gehle, 2000). In Alberta, the dominant industry is oil, which determines the type of waste stored in salt caverns. Due to the extensive use of unconventional extraction methods (such as open-pit and thermal techniques) tailored to the specific nature of heavy bitumen deposits, large quantities of environmentally hazardous waste are produced,

dobywczego węgłowodórów (Labbe, Kelly, 2009). Z tego względu, firmy nie uwzględniają możliwości późniejszej konwersji kawern z przeznaczeniem ich na składowiska odpadów i nastawione są wyłącznie na maksymalną produkcję solanki.

### 3. ODPADY SKŁADOWANE W KAWERNACH

Kawerny do składowania odpadów od samego początku ściśle związane są z przemysłem. Po raz pierwszy wykorzystano je do tego celu w Anglii, w celu utylizacji odpadów pochodzących z przemysłu chemicznego (Thoms, Gehle, 2000). W Albercie dominującą gałęzią gospodarki jest przemysł naftowy i to właśnie warunkuje rodzaj odpadów, które są składowane w kawern solnych. Ze względu na szerokie zastosowanie niekonwencjonalnych metod eksploatacji (metoda odkrywkowa i termalna) dostosowanych do specyficznego charakteru złóż ciężkich bituminów, powstają bardzo duże ilości odpadów niebezpiecznych dla środowiska naturalnego. Generuje to potrzebę ich bezpiecznego odizolowania i jak do tej pory najlepszym rozwiązaniem tego problemu są właśnie kawerny solne.

Przepisy regulujące rodzaj odpadów, których zatłaczanie do kawern solnych jest dozwolone zawarte są w czwartej części *Z341.4-22 Salt cavern waste disposal* w paragrafie 1.2. Są to generalnie substancje powstałe w wyniku poszukiwania, wiercenia, uzbrojenia wgłębnego otworów, produkcji, likwidacji starych otworów, przeróbki oraz transportu ropy naftowej lub produktów ropopochodnych, między innymi takie jak:

- płuczki wiertnicze,
- zwierciny,
- odpady z procesów szczelinowania,
- piaski poprodukcyjne,
- osady ze zbiorników,
- gleba zanieczyszczona ropa naftowa i produktami ropopochodnymi,
- gleba zanieczyszczona solą (NaCl),
- odpady ciekłe i stałe z produkcji pary używanej w metodzie SAGD oraz do napędu generatorów parowych.
- solankę oraz osady denne ze stawów solankowych,
- osady z procesu uzdatniania wody.

Ze względu na źródło ich pochodzenia, odpady te można podzielić pięć głównych grup:

- Odpady powstałe podczas procesu wiercenia otworów:
  - płuczka wiertnicza
  - zwierciny
  - skażona ziemia
- Odpady powstałe w wyniku konwencjonalnego wydobywania ropy i gazu:
  - woda
  - piasek
  - proppant

necessitating safe isolation, for which salt caverns are currently the best solution.

Regulations governing the types of waste permissible for disposal in salt caverns are detailed in Section 4 of *Z341.4-22 Salt Cavern Waste Disposal*, specifically in Paragraph 1.2. These regulations generally cover substances resulting from the exploration, drilling, wells completion, production, abandonment of old wells, processing, and transportation of crude oil or petroleum products. The types of waste allowed include:

- Drilling muds
- Cuttings
- Waste from hydraulic fracturing processes
- Production sands
- Tank sludge
- Soil contaminated with crude oil and petroleum products
- Soil contaminated with salt (NaCl)
- Liquid and solid waste from steam production used in SAGD methods and for driving steam generators
- Brine and sediment from brine ponds
- Sludge from water treatment processes

Based on their source, these wastes can be divided into five main categories:

- Waste from the drilling process:
  - Drilling muds
  - Cuttings
  - Contaminated soil
- Waste from conventional oil and gas extraction:
  - Water
  - Sand
  - Proppant
- Waste from thermal extraction of heavy hydrocarbons (SAGD and CSS):
  - Sand
  - Blowdown water (wastewater from steam production)
  - Production water
- Waste from open-pit mining of bituminous sands:
  - Sand
  - Water
- Other waste:
  - Chemical industry byproducts

Wastes injected into the cavern should be in either solid or liquid form and must not occur as colloidal suspensions in brine. Additionally, the specific gravity of the solid fraction should be higher than that of the brine to ensure that the waste settles quickly at the bottom of the cavern.

The next paragraph, 1.3 (*Z341.4-22*), lists **substances that are strictly prohibited from being injected into salt caverns. These include:**

- Spent nuclear fuel
- Radioactive substances

- Odpady z wydobycia ciężkich węglowodorów metodami termicznymi (SAGD i CSS)
  - piasek
  - odpady po produkcji pary wodnej (blowndown water)
  - woda poprodukcyjna (production water)
- Odpady pochodzące z kopalń odkrywkowych piasków bitumicznych
  - piasek
  - woda
- Inne odpady
  - przemysł chemiczny.

Odpady zatłaczane do kawerny powinny należeć do frakcji stałej lub ciekłej zaś nie powinny występować w formie koloidalnej zawiesiny w solance. Ponadto ciężar właściwy frakcji stałej powinien być większy od ciężaru właściwego solanki w celu szybkiej ich sedimentacji na dnie kawerny.

Z kolei następny paragraf 1.3 (Z341.4-22) wymienia **substancje, których zatłaczanie do kawern solnych jest bezwzględnie zabronione**. Są to:

- zużyte paliwo jądrowe,
- substancje radioaktywne,
- odpady biologiczne,
- odpady, których pH jest mniejsze od 4,5 albo większe od 12,5,
- substancje których temperatura zapłonu jest poniżej 60,5°C,
- substancje zawierające siarkowodor ( $H_2S$ ) o stężeniu powyżej 1% (10 mol).

Jak widać z powyższych przepisów, w Kanadzie zabronione jest składowanie w kawernach solnych odpadów radioaktywnych. Jednak wraz z rosnącym wydobyciem węglowodorów metodami niekonwencyjnym, jak produkcja gazu łupkowego metodą szczelinowania hydraulicznego pojawił się nowy typ odpadów charakteryzujących się naturalnym promieniowaniem *Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM)* (Veil i in., 1998a, 1998b). Podczas procesu wydobycia i przetwarzania ropy naftowej oraz gazu mogą tworzyć się nagromadzenia odpadów o podwyższonym naturalnym promieniu. W większości przypadków źródłem ich podwyższonej radioaktywności są izotopy uranu-238 (U-238) i toru-232 (Th-232), które często obecne są w formacjach skalnych z których wydobywane są ropa i gaz. Jednak dopiero radioizotopy rad-226 (Ra-226) powstający w wyniku rozpadu uranu-238 (U-238) oraz rad-228 (Ra-228) będący wynikiem rozpadu toru-232 (Th-232) mogą stanowić pewne zagrożenie. Inne izotopy promieniotwórcze będące przedmiotem zainteresowania obejmują radionuklidy, które powstają w wyniku rozpadu Ra-226 i Ra-228, takie jak radon-222 (Ra-222). Ich zwiększone stężenie wywołuje już jednak skażenie, które może obejmować wodę poprodukcyjną, fragmenty skał oraz szlam (Smith i in., 1995). Składowanie tego typu odpadów w kawernach solnych w Kanadzie i USA jest już dozwolone

- Biological waste
- Waste with a pH below 4.5 or above 12.5
- Substances with an ignition temperature below 60.5°C
- Substances containing hydrogen sulfide ( $H_2S$ ) at concentrations above 1% (10 mol)

As outlined in the regulations, the storage of radioactive waste in salt caverns is prohibited in Canada. However, with the rise in unconventional extraction methods, such as hydraulic fracturing for shale gas production, a new type of waste characterized by natural radioactivity, known as *Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM)*, has emerged (Veil et al., 1998a, 1998b). During the extraction and processing of oil and gas, waste with elevated natural radioactivity can accumulate. Typically, this increased radioactivity comes from isotopes of uranium-238 (U-238) and thorium-232 (Th-232), which are commonly found in the rock formations from which oil and gas are extracted. However, the primary concern arises from the radioisotopes radium-226 (Ra-226), a decay product of U-238, and radium-228 (Ra-228), a decay product of Th-232. Other radioactive isotopes of interest include radionuclides that are produced from the decay of Ra-226 and Ra-228, such as radon-222 (Ra-222). Elevated levels of these radioactive substances can lead to contamination of produced water, rock fragments, and sludge (Smith et al., 1995). Although the disposal of such waste in salt caverns is permitted in both Canada and the USA, it requires careful management. Special attention is needed during the removal of hanging pipe columns from caverns due to the frequent presence of contaminated sediment on their walls (Z341.4-22, 2022).

#### 4. REGULATIONS REGARDING THE DISPOSAL OF CONTAMINATED WATER INTO DISPOSAL WELLS

Another critical aspect regulated in Alberta for waste disposal in salt caverns is the injection of brine into disposal wells. These regulations are detailed in *Directive 051: Injection and Disposal Wells—Well Classifications, Completions, Logging, and Testing Requirements*, issued on March 1, 1994, by the *Energy Resources Conservation Board*, the predecessor to the current *Alberta Energy Regulator (AER)*. This document provides comprehensive guidelines on well construction, completion, testing, operation, and classification of injected liquid wastes, with a primary focus on environmental protection, particularly groundwater preservation. In Alberta, groundwater is fully protected to depths ranging from 65 to 600 meters, depending on the region. Below these depths, the injection of liquid wastes into porous formations is permitted, provided these formations are well isolated from protected layers and the formation waters have a salinity exceeding 4000 mg/liter. The average depth of disposal wells in Alberta

ne. Wymaga ono jednak wzmożonej uwagi, szczególnie podczas operacji wyjmowania kolumn rur wiszących z kawerny, głównie ze względu na częstą obecność skażonego osadu na ich ścianach (Z341.4.22 2022).

#### 4. REGULACJE PRAWNE DOTYCZĄCE ZRZUTU ZANIECZYSZCZONEJ WODY DO OTWORÓW ZRZUTOWYCH

Kolejnym aspektem niezbędnym podczas składowania odpadów w kawernach solnych który został dokładnie uregulowany w Albercie przez przepisy jest zatłaczanie solanki do otworów zrzutowych. Zawarte one są w *Directive 051: Injection and Disposal Wells – Well Classifications, Completions, Logging, and Testing Requirements* z dnia 1 marca 1994 wydane przez *Energy Resources Conservation Board*, która była poprzednikiem obecnej *Alberta Energy Regulator (AER)*. Dokument ten dostarcza informacji na temat budowy i uzbrojenia otworów, testów, eksploatacji oraz klasyfikacji zatłaczanych odpadów płynnych z których najważniejsze są przepisy dotyczące ochrony środowiska, a w szczególności wód podziemnych. W prowincji Alberta całkowitą ochroną objęte są wody podziemne znajdujące się, w zależności od rejonu, do głębokości 65 – 600 metrów. Poniżej tej głębokości możliwe jest zatłaczanie odpadów płynnych do formacji porowatych, które charakteryzują się dobrą izolacją od warstw objętych ochroną, oraz wody złożowe w nich występujące mają mineralizację powyżej 4000 mg/litr. Średnio głębokość otworów zrzutowych w prowincji Alberta waha się pomiędzy 750 a 1250 metrów, zaś naj płytszy otwór, który został dopuszczony do zatłaczania odpadów ma głębokość jedynie 178 m.

- **Odpady dozwolone do zatłaczania do otworów zrzutowych**
- nie spełniające kryteriów zrzutu do wód powierzchniowych,
- pH pomiędzy 4,5 a 12,5,
- zawierające niechlorowane odpady organiczne w ilości mniejszej od 10% masy (10000 mg/kg), jeżeli nie jest to:
  - nieprzetworzona emulsja, składająca się z wody i ropy naftowej lub piasek poeksploatacyjny,
  - płyn niezamarzający lub odwadniający, który zawiera ponad 60% wody,
- zawiera jeden lub więcej chlorowanych składników organicznych o całkowitym sumarycznym stężeniu mniejszym od 1000mg/kg,
- stężenie polichlorowanych bifenyli (ang. *polychlorinated biphenyls, PCB*) jest poniżej 50 mg/kg.
- **Substancje, których zrzut jest niedozwolony**
- ścieki komunalne lub przemysłowe, które podlegają standardowemu procesowi oczyszczania,

ranges from 750 to 1250 meters, with the shallowest approved disposal well being only 178 meters deep.

- **Wastes Permitted for Injection into Disposal Wells**
- Wastes that do not meet the criteria for discharge into surface waters
- Wastes with a pH between 4.5 and 12.5
- Wastes containing non-chlorinated organic materials in amounts less than 10% by mass (10000 mg/kg), except for:
- Unprocessed emulsions consisting of water and crude oil or post-extraction sand
- Antifreeze or dewatering fluids containing more than 60% water
- Wastes containing one or more chlorinated organic components with a total combined concentration of less than 1000 mg/kg
- Wastes with polychlorinated biphenyls (PCBs) concentration below 50 mg/kg
- **Substances Prohibited from Injection**
- Municipal or industrial wastewater is subject to standard treatment processes
- Water allowed for surface discharge or with low treatment costs
- Used oils, greases, and solvents
- Oil-based drilling mud (inverted mud)
- Wastes for which existing treatment processes are neither costly nor complex

#### 5. CONCLUSION

The establishment of robust and transparent legal frameworks in Canada regarding the construction and operation of salt caverns, as well as the regulation of brine injection into porous rock formations, has facilitated the rapid development of this method for industrial waste disposal. Consequently, it is intriguing to compare the regulations in Canada with those in Poland. The entire fourth section of the *Z341 Series*, titled “*Z341.4-22 Salt Cavern Waste Disposal*,” is dedicated to caverns intended for waste storage. This section not only provides guidelines for their construction—from geological surveys and drilling to final integrity testing—but also specifies the types of waste that can be stored in these caverns and lists substances that are strictly prohibited from being injected into them.

In contrast, the regulations in Poland, and the broader European Union, are outlined in *PN-EN 1918-3 “Gas Infrastructure - Underground Gas Storage - Part 3: Functional Recommendations for Storage in Leached Salt Caverns,”* which focuses on gas storage caverns. This difference is due to the distinct characteristics of the two markets. In Western Canada, as previously mentioned, natural gas production significantly exceeds demand, eliminating the need to maintain

- woda, której zrzut na powierzchnię jest dozwolony albo koszt jej oczyszczenia nie jest wysoki,
- zużyte oleje, smary i rozpuszczalniki,
- płuczka wiertnicza na bazie oleju napędowego (*invert mud*),
- odpady, których proces oczyszczenia istnieje i nie jest kosztowny.

## 5. PODSUMOWANIE

Stworzenie w Kanadzie solidnych i przejrzystych podstaw prawnych dotyczących budowy oraz eksploatacji kavern solnych, oraz regulujących możliwość zatłaczania solanki w porowatych formacjach skalnych, pozwoliło na szybki rozwój tej metody utylizacji odpadów przemysłowych. Z tego względu, interesująco wygląda porównanie przepisów obowiązujących w Kanadzie i Polsce. Cała czwarta część *Z341 Series Storage of Hydrocarbons in underground formations* zatytułowana *Z341.4-22 Salt cavern waste disposal* poświęcona jest kavernom przeznaczonym do składowania odpadów. Poza wytycznymi odnośnie ich budowy, poczynając od badań geologicznych i wiercenia, aż po końcowe testy szczelności, określa ona również dokładnie rodzaje odpadów, których składowanie w kavernach jest dozwolone, oraz substancje, których zatłaczanie do kavern jest surowo zabronione. Obowiązujące zaś w Polsce, jak i w całej Unii Europejskiej *PN-EN 1918-3 Infrastruktura Gazowa Podziemne Magazynowanie Gazu Część 3: Zalecenia funkcjonalne dotyczące magazynowania w wylugowanych komorach solnych* dotyczy kavern magazynowych gazu. Jest to wynikiem odmiennej specyfiki obu rynków. W Zachodniej Kanadzie, jak już wcześniej wspomniano, produkcja gazu ziemnego znacznie przewyższa zapotrzebowanie i z tego względu, nie ma potrzeby utrzymywania strategicznych rezerw tego surowca. Ponadto, w złożach pokładowych soli o stosunkowo małej miąższości залегаjących na dużych głębokościach (ok. 2000 m) w Zachodniej Kanadzie nie ma możliwości budowy w miarę dużych magazynów gazu. Obecnie istniejąca niewielka liczba kavern przeznaczonych do magazynowania gazu ziemnego, pełni raczej rolę zbiorników buforowych niż w pełnym słowa znaczeniu magazynów tego surowca.

Całkowicie odmienna sytuacja ma miejsce w Europie, która jest generalnie uzależniona od importu tego surowca i posiadanie zapasów strategicznych jest niezbędne. Ponadto, w Europie występują liczne złoża wysadowe soli kamiennej, idealnie nadające się do lokalizacji w nich magazynów tego surowca. Z tych dwóch głównych powodów, jak do tej pory największy nacisk kładziony jest na kaverny solne przeznaczone właśnie do magazynowania gazu. Z drugiej strony, w Europie składowanie odpadów w kavernach solnych wciąż nie jest szeroko rozpowszechnione i ma bardzo lokalne znaczenie (Warren, 2016). Tego typu kaverny użytkowane są

strategic reserves of this resource. Furthermore, the relatively thin salt beds found at great depths (around 2000 meters) in Western Canada do not allow for the construction of large gas storage facilities. The few existing caverns designated for natural gas storage primarily serve as buffer tanks rather than full-scale storage facilities.

The situation in Europe is entirely different, as the continent is generally dependent on the import of natural gas, making the possession of strategic reserves essential. Moreover, Europe has numerous domal rock salt deposits that are ideally suited for natural gas storage. For these two main reasons, the focus has so far been primarily on salt caverns intended for natural gas storage. Conversely, in Europe, the disposal of waste in salt caverns is still not widespread and has very local significance (Warren, 2016). Such caverns are used only to a very limited extent in the United Kingdom and the Netherlands (Wassmann, 1983; Hoather, Challinor, 1994), while in Germany, tests have been conducted for the disposal of various types of waste (Langer, 1993, Lorenzen, 2003). Perhaps one of the primary reasons for the limited interest in Europe in using salt caverns for waste disposal is the lack of appropriate regulations on this issue. As a result, local regulations apply in each of these countries (Langer, 1993, Veil, 1996).

In Poland, the primary document regulating salt borehole mining is the *Geological and Mining Law (Dz. U. 2011 nr 163, poz. 981, dated June 9, 2011)*, while the regulations concerning waste classification are contained in the *Regulation of the Minister of Climate (Dz. U. 2020, poz. 10, dated January 2, 2020)* on the waste catalog. Additionally, the rules regarding the disposal of specific types of waste are regulated by the *Regulation of the Minister of Environment (Dz. U. 2015, poz. 796, dated May 11, 2015)* on the recovery of waste outside installations and devices.

The above conclusions indicate that, despite the complexity and potential risks, properly implemented regulations and continuous regulatory oversight can effectively manage the process of waste disposal in salt caverns, ensuring environmental protection and public health. This underscores the potential value of developing similar legal frameworks in Poland, tailored to its specific needs and conditions.

jedynie w bardzo ograniczonym zakresie w Wielkiej Brytanii i Holandii (Wassmann, 1983; Hoather, Challinor, 1994), zaś w Niemczech, przeprowadzone zostały testy składowania różnych typów odpadów (Langer, 1993, Lorenzen, 2003). Prawdopodobnie jedną z podstawowych przyczyn tak małego zainteresowania w Europie składowaniem odpadów w kawernach solnych, jest jak dotąd, brak odpowiednich regulacji dotyczących tego zagadnienia. Z tego względu, w każdym z tych krajów mają zastosowanie lokalne przepisy (Langer, 1993, Veil, 1996).

W Polsce, podstawowym dokumentem regulującym solne górnictwo otworowe jest *Prawo geologiczne i górnicze* (Dz. U. 2011 nr 163, poz. 981 z dnia 9 czerwca 2011 r.), zaś przepisy dotyczące klasyfikacji odpadów zawarte są w *Rozporządzeniu Ministra Klimatu* (Dz. U. 2020, poz. 10 z dnia 2 stycznia 2020 r) w sprawie katalogu odpadów. Z kolei, przepisy dotyczące możliwości składowania poszczególnych typów odpadów, reguluje *Rozporządzenie Ministra Środowiska* (Dz. U. 2015, poz. 796 z dnia 11 maja 2015 r) w sprawie odzysku odpadów poza instalacjami i urządzeniami.

Powyższej opisane wnioski wskazują, że pomimo złożoności i potencjalnych zagrożeń, prawidłowo wdrożone przepisy oraz stały nadzór regulacyjny mogą skutecznie zarządzać procesem składowania odpadów w kawernach solnych, zapewniając jednocześnie ochronę środowiska i zdrowia publicznego. Patrząc się na to może by było warto stworzyć podobne podstawy prawne w Polsce odpowiednio dostosowane do polskich realiów i potrzeb.

## LITERATURA/ REFERENCES

- BRASSOW C.L., THOMAS, R.L., 2000. Use of Solution – Mined Salt Caverns for the Disposal of Hazardous and Industrial Waste Products, 8th World Salt Symposium, 7 - 11 May 2000: 229-235, The Hague, The Netherlands.
- BRASSOW C.L., 2006. Update of US Gulf Coast Area Oilfield Waste Disposal Projects, Spring Conference Brussels, Belgium.
- HOATHER H., CHALLINOR D., 1994. The Use of Salt Cavities for the Disposal of Waste, Solution Mining Research Institute, Fall 1994 Conference, Hannover, Germany.
- LABBE P., KELLY D., 2009. A Saskatchewan Potash Review, World Salt Symposium, 2009 Fall, Beijing.
- LANGER M., 1993, Use of solution-mined caverns in salt for oil and gas storage and toxic waste disposal in Germany, Engineering Geology, Volume 35, Issues 3–4, October 1993, Pages 183-190
- LORENZEN H.E., 2003, Solids Fill in Salt Caverns – A Struggle with Laws of Physics and Authorities, SMRI Fall 2003 Meeting, Chester, UK October 5 to 8, 2003.
- SMITH K.P., BLUNT D.L., WILLIAMS G.P., TEBES C.L., 1995. Radiological Dose Assessment Related to Management of Naturally Occurring Radioactive Materials Generated by the Petroleum Industry, SPE/EPA Exploration and Production Environmental Conference, document SPE-29712-MS, Houston, Texas, USA.
- THOMS R.L., GEHLE R.M., 2000. A brief history of salt cavern use (keynote paper). Proc. 8th World Salt Symp., R.M. Geertman ed., Elsevier, p. 207-214.
- VEIL, J., 1996. Salt caverns show promise for nonhazardous oil field waste disposal. *Oil & Gas Journal* 94, 47: 42-45.
- VEIL J., SMITH K., TOMASKO D., ELCOCK D., WILLIAMS G., BLUNT D., 1998a. Disposal of NORM-Contaminated Oil Field Wastes in Salt Caverns - Legal, Economic and Risk Issues Solution Mining Research Institute, SMRI Spring 1998 Meeting, New Orleans, Louisiana, USA, April 19-22, 1998.
- VEIL J. A., SMITH K. P., TOMASKO D., ELCOCK D., BLUNT D., WILLIAMS G. P., 1998b. Disposal of NORM-contaminated oil field wastes in Salt Caverns, Technical Report, US Department of Energy (US).
- WARREN J. K., 2016. Evaporites A Geological Compendium, Second Edition, Springer.
- WASSMANN, T. H., 1983. Cavity utilization in the Netherlands, Sixth International Symposium on Salt, v. II: 191–201.

## USTAWY I NORMY/ LEGISLATIONS AND STANDARDS

- Directive 051: Injection and Disposal Wells – Well Classifications, Completions, Logging, and Testing Requirements, March 1994, Energy Resources Conservation Board (aktualnie Alberta Energy Regulator (AER)).
- PN-EN 1918-3 Infrastruktura Gazowa Podziemne Magazynowanie Gazu Część 3: Zalecenia funkcjonalne dotyczące magazynowania w wylugowanych komorach solnych, Polski Komitet Normalizacyjny Polska Norma, Warszawa 2016.
- Z341-22 Storage of hydrocarbons in underground formations, 2022, Canadian Standard Association.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 11 maja 2015 r. w sprawie odzysku odpadów poza instalacjami i urządzeniami. Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej Warszawa, dnia 12 czerwca 2015 r. Poz. 796.
- Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów. Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej Warszawa, dnia 3 stycznia 2020 r. Poz. 10
- Prawo geologiczne i górnicze. Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej Warszawa, rok 2011, |Nr 163 poz. 981, Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r.
- Mines and Minerals Act, RSA 2000, c M-17, Legislative Assembly of Alberta,  
[https://kings-printer.alberta.ca/1266.cfm?page=M17.cfm&leg\\_type=Acts&isbncln=9780779847044](https://kings-printer.alberta.ca/1266.cfm?page=M17.cfm&leg_type=Acts&isbncln=9780779847044).

# Praktyczne przykłady badań geofizycznych z zastosowaniem georadaru i radaru otworowego do oceny struktury i zasobów złóż kopalni soli

## Practical examples of geophysical GPR and borehole radar investigations for the structural and resource assessment of salt mine deposits

Paul LECHMANN<sup>1</sup>, Thomas RICHTER<sup>1</sup>, Christian AßMUTH<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bo-Ra-tec GmbH, Weimar

<sup>2</sup>ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH, Erfurt

### STRESZCZENIE

Efektywność i bezpieczeństwo wydobywania soli w dużej mierze zależą od wszechstronnej wiedzy na temat geologicznych warunków złoża soli, w tym jego granic stratygraficznych oraz cech strukturalnych. Powszechnie stosowane metody badawcze, takie jak sondowanie poprzez wiercenie oraz interpolacja i ekstrapolacja na podstawie odsłonięć mogą pozostawiać spore wątpliwości co do dokładności między punktami pobierania próbek, zwłaszcza w przypadku złóż soli z trudnymi warunkami mechanicznymi. Metody geofizyczne, zwłaszcza georadar (GPR) i radar otworowy (BHR), stanowią odpowiednie, bezinwazyjne narzędzie do kompleksowego badania złóż soli, w tym halitu oraz złóż potasu. Umożliwiają one głęboką penetrację, najczęściej sięgającą kilkudziesięciu metrów (i więcej), co pozwala na dokładniejsze wypełnienie luk informacyjnych i uzyskanie pełniejszego obrazu złoża.

Przedstawimy kilka przykładów efektywnego zastosowania GPR i BHR w niemieckich kopalniach soli. Metody te są używane do oceny grubości pozostałego złoża na dużych obszarach, wykorzystując dane zarówno z dna i stropu istniejących wyrobisk, jak i z pionowych oraz (pół-) poziomych otworów wierconych w masywie skalnym.

**Słowa kluczowe:** wydobywanie soli, badania radarowe, zanieczyszczenia w soli kamiennej, warstwy anhydrytu, pęknięcia

### ABSTRACT

The efficiency and safety of salt mining is largely dependent on the most comprehensive knowledge about the geologic setting of the salt deposit including its stratigraphic boundaries and its structural features. The common investigation method of probing via drilling or interpolation and extrapolation from outcrops can leave large uncertainties between the sampling points especially in difficult salt mechanical situations. Geophysical methods, especially ground penetrating radar and borehole radar provide a very suitable, non-destructive tool to comprehensively investigate salt deposits, as especially halite, but also potash deposits allow significant penetration ranges mostly of several decameters and more to close these gaps.

We present various examples of the efficient application of GPR and BH radar surveys in German salt mines for the assessment of the remaining deposit thickness over large areas both from the floor and roof of existing drifts and from vertical or (sub-) horizontal boreholes into the undeveloped rock mass.

**Keywords:** salt mining, radar surveys, impurities in rock salt, anhydrite layers, cracks

## 1. WSTĘP

Górnictwo solne wciąż odgrywa kluczową rolę w produkcji nawozów rolniczych, produkcji soli drogowej oraz produktów przemysłu spożywczego i chemicznego, dlatego poprawa efektywności i produktywności wydobywania soli ze złóż jest niezwykle ważna dla sektora górniczego. Znaczące straty zasobów oraz wynikające z tego konsekwencje finansowe spowodowane niejasnościami co do objętości złóż mogą być ogromne. W związku z tym istnieje silna potrzeba doskonalenia metod pobierania próbek i eksploracji w celu uzyskania dokładniejszego obrazu rzeczywistego stanu złoża.

Powszechnie stosowana metoda bezpośredniego sondowania poprzez wiercenie otworów i interpolację lub ekstrapolację na podstawie bezpośrednich obserwacji odkrywek w już wyeksploatowanych obszarach kopalni może pozostawiać spore wątpliwości co do dokładności między tymi rozproszonymi punktami pobierania próbek. Zwłaszcza w trudnych warunkach geologicznych, takich jak uskoki i fałdowania, w połączeniu ze zmiennością grubości złoża spowodowaną procesami diagenety, złożoność sytuacji może być łatwo błędnie zinterpretowana, często z powodu zwykłego braku wystarczającej liczby punktów pobierania próbek.

Metody geofizyczne oferują skuteczny i zazwyczaj nieinwazyjny sposób na uzyskanie brakujących informacji, poprzez dokładne badanie złóż soli dzięki falom radarowym, które w zależności od częstotliwości anteny radarowej i rodzaju skały solnej, mogą przenikać suchą sól na głębokość od kilku do ponad 100 metrów (Thierbach, 1994).

Przedstawimy wybrane przykłady badań geofizycznych z wykorzystaniem georadaru (GPR) oraz radaru otworowego (BHR) w kopalni soli kamiennej w południowych Niemczech.

## 2. BADANIA RADAROWE

Kopalnia soli w Heilbronn eksploatuje sól kamienną z okresu triasu od 1883 roku. Wydobywana jest ona z poziomego złoża o grubości od 5 do 25 m, na głębokości około 150–200 m, przy użyciu metody komorowo-filarowej.

### 2.1. Badania georadarem (GPR) prowadzone z powierzchni

W latach 2014–2021 przeprowadziliśmy szereg badań radarowych, w celu oceny grubości pozostałego złoża w różnych obszarach kopalni, obejmujących łączną długość profilu wynoszącą ponad 6 km. W większości z tych obszarów metoda komorowo-filarowa pozostawiła półkę ochronną o grubości kilku metrów zarówno powyżej, jak i poniżej wyeksploatowanych miejsc. Jednakże grubość ta była szacowana na podstawie ekstrapolacji i interpolacji między punktami, w których grubość warstwy mierzyliśmy przez wiercenie. Głównym wyzwaniem w tej kopalni były lokalne zanieczyszczenia w warstwie soli kamiennej, charakteryzujące się nierównomiernie rozłożonymi wtrętami anhydrytu o szerokości

## 1. MOTIVATION

Salt mining continues to play an important role in the supply and production of agricultural fertilizer, road salt as well as the food and chemical industry, among others. Hence, the efficiency and productivity of mining in existing salt deposits is of great importance to the mining industry. The resource losses and resulting financial losses connected to uncertainties in the remaining volumes of the salt deposit can be immense and thus present a motivational factor for better sampling and exploration methods to provide a more comprehensive picture of the real situation of the salt deposit.

The commonly used method of direct probing via drilling of boreholes and the interpolation or extrapolation from direct observations of outcrops in already excavated areas of the mine can leave large uncertainties between these discrete sampling points. Especially in difficult rock mechanical situations of faulting and folding combined with diagenetically varying deposit thicknesses, the complexity of the situation can easily be misinterpreted simply because of a shortage of sampling points.

Geophysical methods provide a suitable and (mostly) non-destructive tool to close these knowledge gaps by comprehensively investigating salt deposits, as radar waves can travel great distances of up several meters to more than 100 m in dry salt, depending on the center frequency of the radar antenna and on the type of salt rock (Thierbach, 1994).

We present selected examples of geophysical investigations using Ground Penetrating Radar (GPR) and Borehole Radar (BHR) surveys in a rock salt mine in the South of Germany.

## 2. RADAR SURVEYS

The salt mine in Heilbronn has been producing Triassic rock salt since 1883 in a horizontal deposit of a thickness of 5 to 25 m at about 150 to 200 m depth using room and pillar mining.

### 2.1. Surface-based GPR surveys

Between 2014 and 2021 we conducted several radar surveys with the goal of determining the remaining deposit thickness in different areas of the mine, at a total profile length of more than 6 km. In most of these areas the room and pillar mining left a remaining safety slab above and below of several meters thickness. However, this areal thickness was only assumed from extrapolation and interpolation between discrete spots where the slab thickness was controlled via drilling. The special challenge in this mine arose from local impurities of the salt rock layer, as it featured irregularly distributed local inhomogeneities in the form of anhydrite inclusions of few decimeters width. When the drilling hit such an inclusion amidst the thicker salt layer the interpretation and

kilku decymetrów. Gdy podczas wiercenia napotymano na takie wtręty w grubszej warstwie soli, interpretacja i interpolacja granicy między solą a anhydrytem często wskazywały na znacznie płytszą głębokość i w rezultacie na mniejszą pozostałą objętość soli, niż była rzeczywistość obecna.

Radarowe badanie obejmujące cały obszar umożliwiłoby rozróżnienie lokalnych wtrąceń od granicy warstwy na większych głębokościach, jak pokazano na przykładzie radarogramów przedstawionych na rysunkach 2 i 3.

Część badania wykonano przy użyciu georadaru (GPR), skanując spągi i stropy istniejących szybów i komór w kopalni. Anteny radarowe o częstotliwościach centralnych od 100 do 400 MHz były przesuwane wzdłuż kilku równoległych linii pomiarowych. Dzięki specjalnej konstrukcji tych osłoniętych anten radarowych, emitowane fale radarowe penetrują masyw skalny poniżej (w przypadku pomiarów wykonanych na spągu) lub powyżej (w przypadku pomiarów wykonanych na stropie). Fale te odbijają się od granic warstw, takich jak anhydryt, który ogranicza złożę od góry i od dołu. Anhydryt działa jako bardzo efektywny, niemal doskonały reflektor, co umożliwia oszacowanie jego głębokości na podstawie czasu dwukierunkowego przejścia odbitej fali radarowej, przy założeniu standardowej prędkości fali dla soli kamiennej z okresu triasu wynoszącej 0,114 m/s.

Oddzielne badania w kopalni były przeprowadzane w celu wykrywania oznak łuszczenia się ścian i stropów w miejscach, gdzie było wiadomo lub istniało podejrzenie, że to zjawisko może wystąpić. Zaletą użycia radaru w tym przypadku jest to, że skutecznie odbija sygnały od pęknięć, szczelin i miejsc na płytach, gdzie materiał już się łuszczy. Pomiarami radarowymi można śledzić nie tylko rozmiar pęknięć w masywie skalnym, gdy łuszczenie jest już widoczne na powierzchni, ale również wykrywać podobne

interpolacja of the salt layer boundary to the anhydrite would indicate a much shallower depth and thus much less remaining salt volume than it actually was.

An area-wide radar survey would be able to differentiate between these locally limited inclusions and the contiguous layer boundary at greater depths, as seen in the exemplary radargrams in Figures 2 and 3.

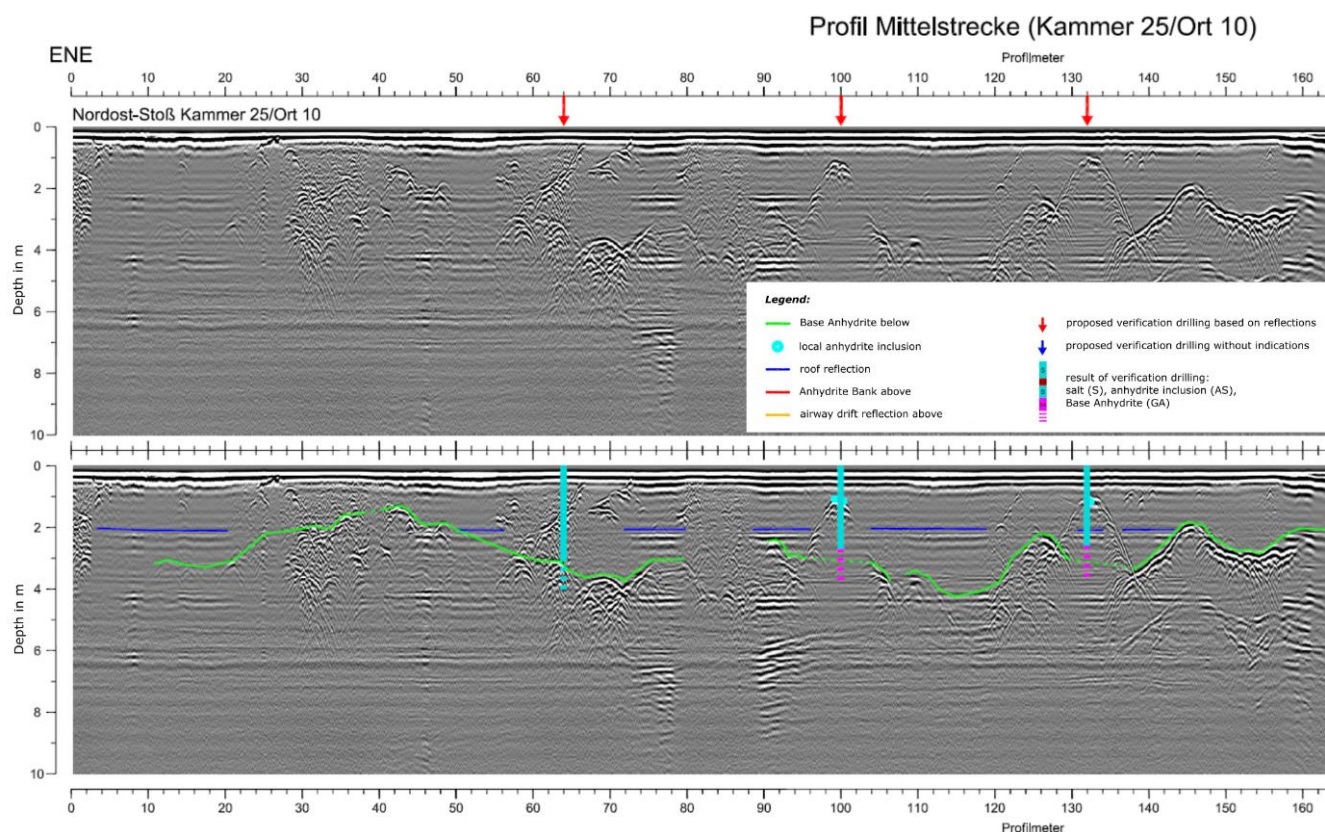
Part of the survey was done by GPR measurements on the floor and roofs of existing drifts and rooms. The radar antennas of different center frequencies between 100 and 400 MHz were moved along several parallel profiles. According to the specific design of the shielded radar antennas the emitted radar waves travel mainly into the rock mass below (floor-based survey) or above (roof-based survey) where they are reflected by layer boundaries (of different dielectric properties) like the anhydrite limiting the deposit from above and below. The anhydrite presents an almost perfect reflector, so the depth of that reflector can be surmised from the two-way travel time of the reflected radar wave, assuming a generally valid radar wave velocity of 0.114 m/s in this Triassic rock salt.

Separate surveys in the mine were aimed at detecting signs of spalling of the walls and roofs of parts of the mine where this common salt mechanical phenomenon was known or suspected to happen. The advantage of radar in this case is based on the clear reflectivity of cracks, fissures and already fully spalled slabs. Radar measurements can thus not only follow the extent of cracks in the rock mass, if spalling is already apparent at the surface but can also see if similar looking cracks and fissures have formed beneath the surface before they break through to the surface. The systematic search for these signs using non-destructive method of GPR presents a great value to the safety of ongoing mining operations.



**Ryc. 1:** Anteny GPR ciągnięte za pojazdem podczas badania na spągu (po lewej) oraz przymocowane do suwnicy podczas badania na stropie (po prawej).

**Fig 1:** GPR antennas pulled behind vehicle during floor-based survey (left) and attached to a gantry crane for roof-based survey (right).



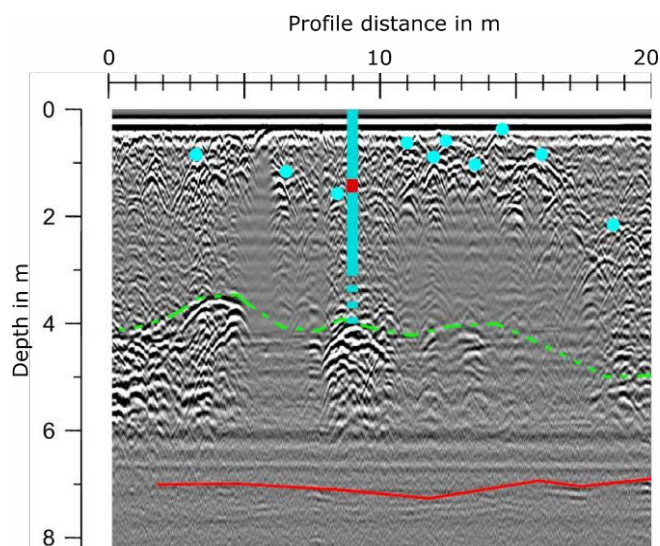
**Ryc. 2.** Przetworzony i oznaczony radarogram z badania opartego na spągu z użyciem anteny 200 MHz, z zaznaczoną granicą anhydrytu poniżej (kolor zielony) oraz lokalnymi wtrętami anhydrytu (kolor turkusowy). Słupki przedstawiają wyniki wierceń weryfikacyjnych.

**Fig. 2.** Processed and marked radargram of a floor-based GPR survey with a 200 MHz antenna with marking of the anhydritic boundary below (green) as well as locally limited anhydrite inclusions (cyan). The bars represent the results of verification drillings.

pęknięcia i szczeliny, które pojawiły się pod powierzchnią, zanim staną się widoczne na zewnątrz. Systematyczne poszukiwanie tych oznak za pomocą nieinwazyjnej metody GPR ma ogromne znaczenie dla bezpieczeństwa prowadzonych prac górniczych.

## 2.2. Badania radarem otworowym

W innej części obrzeży wyrobiska przewidywano, że grubość warstwy solnej zmniejszy się do kilku metrów, w miarę jak złożo stopniowo zanika między warstwami anhydrytu. Ponieważ nie było dostępnych chodników ani komór, z których można by przeprowadzić pomiary przy użyciu bardziej masywnych naziemnych systemów anten georadarowych, badanie zostało przeprowadzone za pomocą anten radarowych zainstalowanych w długich, poziomych otworach wiertniczych o długości do 300 m. Chociaż doświadczony zespół wiertniczy starał się utrzymać wszystkie otwory wiertnicze w obrębie warstwy solnej, niektóre z nich częściowo trafiły na anhydryt, co uniemożliwiło kontynuowanie wiercenia do pełnej planowanej długości. W badaniu radarowym odcinki otworów wiertniczych, które trafiły na anhydryt, nie mogły być wykorzystane, ponieważ skała anhydrytowa (w większości przypadków) całkowicie tłumi sygnał radarowy, uniemoż-



**Ryc. 3.** Oznaczony radarogram z lokalnymi przewarstwieniami anhydrytu (kolor turkusowy) oraz wierceniami weryfikacyjnymi, które trafiły na przewarstwienia (kolor czerwony) w złożu soli.

**Fig. 3.** Marked radargram with locally limited anhydrite inclusions (cyan) and verification drilling that encountered inclusion (red) within the salt rock.



Ryc. 4. Liny i wciągarki kablowe służące do przemieszczania sond radarowych w głębokim poziomym otworze wiertniczym.

Fig. 4. Rope and cable winches to move the radar probes inside a deep horizontal borehole during measurement.

liwiając tym samym wyciągnięcie wniosków na temat granic warstw na podstawie uzyskanych danych.

Ponieważ otwory wiertnicze były nieznacznie nachylone ku górze (od  $3^\circ$  do  $5^\circ$ ), sondy wiertnicze musiały być przesuwane w otworze przy użyciu specjalnie skonstruowanego, systemu kotwowego z liną do wciągania sond oraz wciągarki kablowej do ich wyciągania podczas pomiaru, jak pokazano na rysunku 4. W ten sposób możliwe jest badanie dużych głębokości poziomych otworów wiertniczych o długości do 500 m, a w specjalnych warunkach także w dłuższych poziomych otworach, za pomocą systemów pomiarowych opartych na kablu lub radarze.

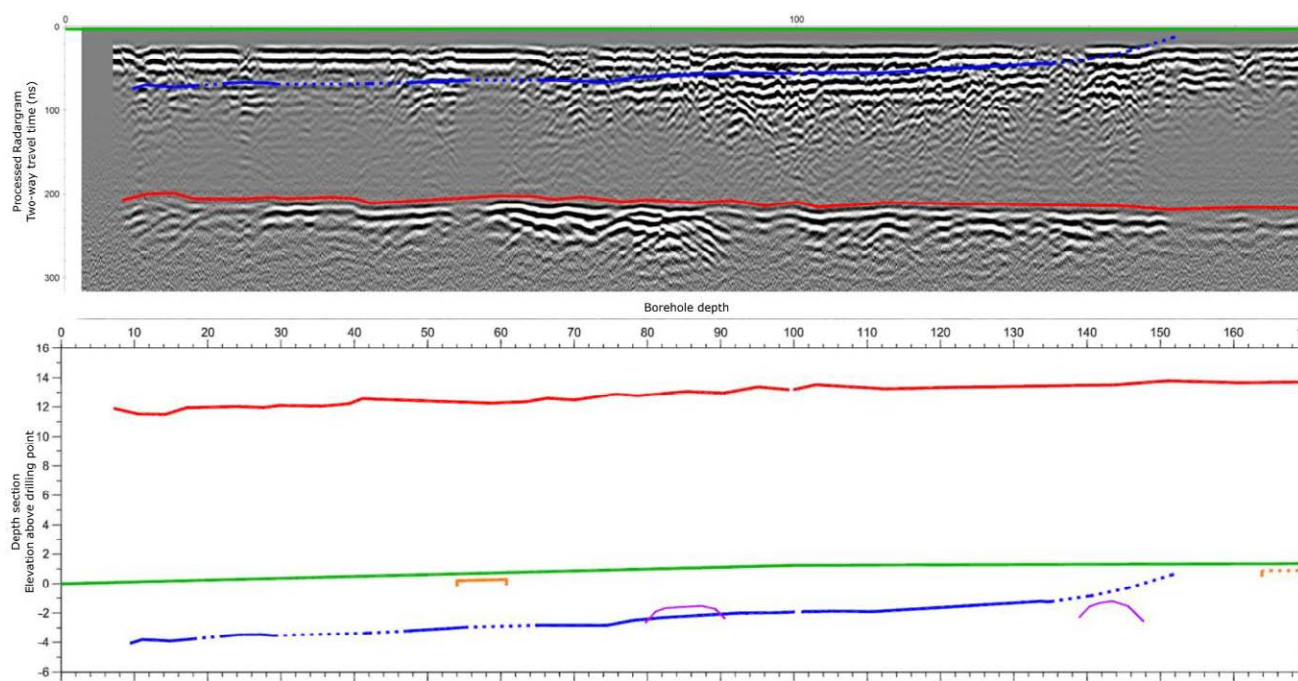
Pomiary radarowe rejestrowane w pobliżu otworu wykazały, że warstwa anhydrytu podstawowego w dolnej części skanowanego obszaru generowała odbicia, które były widoczne jako nieregularne i nieciągłe. W przeciwieństwie do tego, odbicia od anhydrytu brzeżnego, znajdującego się dalej i powyżej otworu wiertniczego, były bardziej wyraźne i ciągłe (Ryc. 5). Różnice te można wyjaśnić odmiennymi właściwościami obu warstw anhydrytu. Anhydryt podstawowy, który jest bardziej kruchy i fragmentaryczny, generuje mniej jednorodne odbicia, podczas gdy anhydryt brzeżnego, mający ciągłą strukturę przypominającą sąsiadujące płyty, wytwarza bardziej spójne odbicia. Dzięki tym różnicom łatwiej jest interpretować i rozróżniać odbicia pochodzące z warstw znajdujących się powyżej i poniżej otworu wiertniczego. Antena w otworze wiertniczym emituje i odbiera fale radarowe we wszystkich kierunkach, co pozwala na rejestrowanie odbicia z wszystkich stron otaczających otwór.

## 2.2. Borehole radar surveys

In another area at the edges of the excavated mine the salt layer thickness was expected to decrease to few meters as the deposit gradually peters out between the anhydrite strata. Since there was no existing drift or room to measure from using the bulkier surface GPR antenna systems, the investigation was conducted using borehole radar antennas from long horizontal boreholes of up to 300 m length. While the experienced drilling team tried to keep the path of all boreholes within the wedged salt layer, some of the boreholes partially hit and crossed the anhydrite and could not be continued to the full planned length. For the radar investigation the parts where borehole entered the anhydrite could not be used, since the anhydrite rock (in most cases) fully attenuates the radar signal, so no information about layer boundaries can be deduced from the radar data.

As the boreholes were slightly inclined upwards ( $3^\circ$  to  $5^\circ$ ) the borehole probes had to be moved in the borehole using custom-built anchored pulley system with a rope to pull the probes in and the cable winch to pull it back out during measurement, as seen in Fig. 4. This way large horizontal borehole depths of up to 500 m and under special conditions also in longer horizontal holes can be investigated with cable-bound borehole logging or radar systems.

The radar data showed clear reflections from the Base Anhydrite from below, which showed as a somewhat irregular, not continuous reflection signal close to the borehole, as well as the clearer, more significant and continuous reflection from the Anhydrite Bank at a greater distance from above the borehole (Fig. 5). These differences in the reflection signal



**Ryc. 5.** Radarogram anteny radarowej o częstotliwości 100 MHz z zaznaczonymi odbiciami od warstwy anhydrytu podstawowego (kolor niebieski) od dołu oraz warstwy anhydrytu brzeżnego (kolor czerwony) od góry.

**Fig. 5.** Radargram of the 100 MHz borehole radar antenna with marked reflections from Base Anhydrite (blue) from below and Anhydrite Bank (red) from above.

### 3. WNIOSKI

Technologia radarowa, stosowana jako georadar (GPR) na powierzchniach przekopów i komór w kopalni soli, jak i w otworach wiertniczych z użyciem specjalistycznych anten, oferuje cenne i szczegółowe informacje na temat struktury geologicznej badanego masywu skalnego. Jej główne zalety to łatwość użycia i szybka aplikacja, która umożliwia badanie setek do tysięcy metrów w czasie jednej zmiany roboczej, oraz proste przetwarzanie danych, które w krótkim czasie pozwala na uzyskanie szczegółowych obrazów 2D i 3D masywu skalnego. Radar najlepiej sprawdza się w materiałach o niskiej przewodności, takich jak sucha sól, osiągając głębokość penetracji od kilku do kilkuset metrów, w zależności od częstotliwości systemu radarowego. Jego użycie może być poważnie ograniczone w skałach o wysokiej przewodności, takich jak anhydryt, lub jeśli sól jest wilgotna lub nasycona solanką, ponieważ właściwości fizyczne tych materiałów znacznie tłumią lub nawet całkowicie absorbują energię fal radarowych. W ostatnim przypadku radar może być skutecznie użyty do wykrywania potencjalnych stref wilgoci w suchych masach solnych.

Przykłady przedstawione w tym artykule obejmują jedynie pomiary w solach kamiennych z okresu triasu z serii wapienia muszlowego (Muschelkalk), które charakteryzują się niższą jakością i czystością, co ogranicza głębokość penetracji do kilkudziesięciu metrów. Warto jednak zaznaczyć, że w starszych permskich złożach soli z epoki cechsztyńskiej

characteristics can be explained with the different properties of the lower Base Anhydrite, which has more brittle, broken-up composition whereas the Anhydrite Bank features a solid slab-like contiguous body. These known differences facilitate the more certain interpretation and differentiation between reflections coming from below and above in a radargram that shows reflections from all sides around the borehole, as the borehole antenna emits and receives radar waves omnidirectionally.

### 3. CONCLUSION

Radar technology, either applied as GPR from surfaces of excavated drifts and rooms of a salt mine or applied from boreholes with special borehole sized antennas, can provide valuable and comprehensive insight into the geological structure of the investigated rock mass. The great advantage arises from its easy and fast applicability, as several hundreds to thousands of meters can be investigated in one work shift, as well as its simple data processing which can yield instructive 2D or even 3D representations of the rock mass in short time. Radar works best in low-conductivity materials like dry salt achieving penetration depths of tens to hundreds of meters, depending on the frequency of the radar system. However, its use can be severely limited in high-conductivity rock types like anhydrite or also if the salt is affected by moisture or brine, as their physical properties severely attenuate or even completely absorb the energy of the radar waves. In the lat-

w Europie warunki są zazwyczaj jeszcze bardziej sprzyjające technologii radarowej, co pozwala na osiąganie głębokości penetracji radarowej do 100 metrów i więcej.

ter case radar can successfully be applied for the detection of suspected moisture zones in the otherwise dry salt body.

The examples presented here merely covered measurements in Triassic rock salts of the Muschelkalk series, which were of lower quality and pureness, thus reducing penetration depths to few tens of meters. It needs to be pointed out, however, that in older Permian salt series of the Zechstein era, the salt conditions in Europe are usually even more favorable for the radar technology as they easily yield radar penetration depths of up to 100 m and more.

#### LITERATURA/ REFERENCES

THIERBACH, R., *Twenty Years of Ground-Probing Radar in Salt and Potash Mines* (Dwadzieścia lat georadaru w kopalniach soli i potasu). In: *Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar* (Piąta Międzynarodowa Konferencja na temat Georadaru). *European Association of Geoscientists & Engineers* 1994. s. cp-300-00069.

# **Perspektywy rozpoczęcia eksploatacji złoża soli kamiennej Terebla w kontekście odbudowy górnictwa solnego na Zakarpaciu, Ukraina**

## **Perspectives on the commencement of exploitation of the Terebla rock salt deposit in the context of the revival of salt mining in Transcarpathia, Ukraine**

Jriy V. SADOVYI<sup>1</sup>, Anatoliy R. GALAMAY<sup>2</sup>, Krzysztof BUKOWSKI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> State Institution State Scientific Research and Design Institute of Basic Chemistry (NIOCHIM), st. Myronosytska, 25, Kharkiv, Ukraine, 61002, e-mail: ysadovyi@gmail.com

<sup>2</sup> Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals, NAS of Ukraine, st. Naukova, 3A, Lviv, Ukraine, 79060, e-mail: galamaytolik@ukr.net

<sup>3</sup> AGH University, Faculty of Geology, Geophysics and Environmental Protection, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland, e-mail: buk@agh.edu.pl

### **STRESZCZENIE**

W artykule podkreślono znaczenie dokładnego rozpoznania budowy geologicznej złoża solnego przed rozpoczęciem jego eksploatacji. W przypadku złoża soli kamiennej w rejonie Terebli, analiza geologiczna i strukturalna wykazuje podobieństwa do innych znanych złóż w Polsce, Kazachstanie oraz Bośni i Hercegowinie, co jest kluczowe w kontekście planowania eksploatacji.

W złożu Terebli wykryto skomplikowaną strukturę tektoniczną, gdzie seria solna jest złożona w system fałdów różnego rzędu. Główne struktury to antykliny w północnej i południowej części złoża oraz synklina w centralnej części. Zrozumienie tej wewnętrznej budowy jest kluczowe zarówno dla eksploatacji podziemnej, jak i metody ługowania otworami wiertniczymi, która jest obecnie rozważana i wdrażana.

Przy planowaniu ługowania metodą otworową, zaleca się rozpoczęcie od jak największych głębokości. Konieczne jest także uwzględnienie prognozowanej budowy wewnętrznej złoża, litostratygrafii oraz tektoniki przy rozmieszczaniu otworów eksploatacyjnych, co ma na celu optymalizację procesu wydobywania i minimalizację ryzyka.

### **ABSTRACT**

The article emphasizes the importance of accurately understanding the geological structure of a salt deposit before beginning its exploitation. In the case of the rock salt deposit in the Terebli region, geological and structural analysis reveals similarities to other known deposits in Poland, Kazakhstan, and Bosnia and Herzegovina, which is crucial for planning exploitation.

The Terebli deposit has been found to have a complex tectonic structure, with the salt series arranged in a system of folds of various orders. The main structures include anticlines in the northern and southern parts of the deposit and a syncline in the central part. Understanding this internal structure is essential for both underground exploitation and the solution mining method using boreholes, which is currently being considered and implemented.

When planning borehole leaching, starting from the greatest depths possible is recommended. It is also necessary to consider the predicted internal structure of the deposit, lithostratigraphy, and tectonics when positioning the production wells, aiming to optimise the extraction process and minimise risks.

**Słowa kluczowe:** sól kamienna, wysady solne, podziemne ługowanie, złoża tereblińskie

**Keywords:** rock salt, salt domes, underground leaching, Tereblia deposit

## 1. WSTĘP

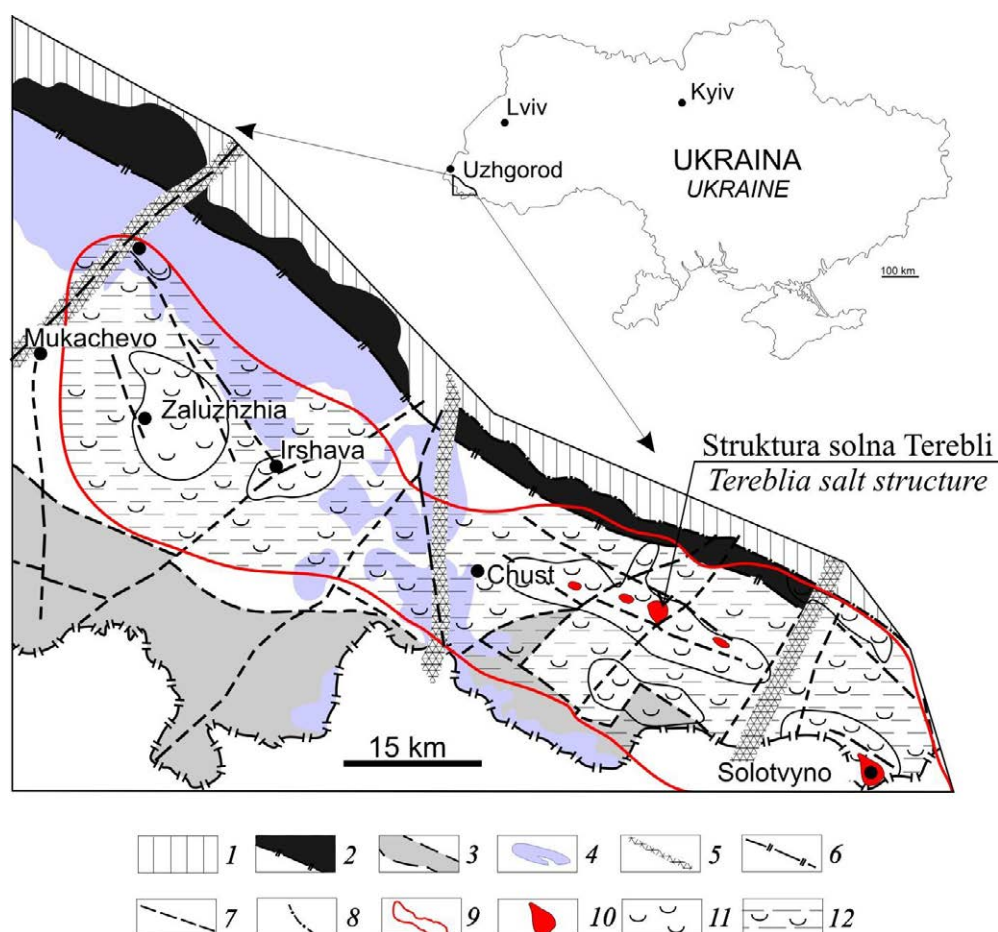
W ciągu ostatnich dekad zaopatrzenie Ukrainy w sól kamienną było związane z masowym wydobywaniem tego surowca w regionie Dnieprówsko-Donieckim (złoża Artemińskie). Po rozpoczęciu agresji Rosji na Ukrainę w 2022 roku i okupacji jej wschodnich regionów, Ukraina utraciła możliwość stabilnego zaopatrzenia ludności i przemysłu w sól kamienną oraz utrzymania należytego stanu dróg zimą. Pomimo potężnych zasobów (zapadlisko Dnieprówsko-Donieckie, rejon Karpat, region czarnomorski), potrzeby Ukrainy w zakresie zaopatrzenia w sól są obecnie praktycznie zaspokajane w całości przez import z innych krajów.

W ostatnich latach w regionie Karpat rozpoczęto prace nad zagospodarowaniem tereblińskich złóż soli kamiennej,

## 1. INTRODUCTION

In recent decades, Ukraine's supply of rock salt has been linked to large-scale extraction in the Dnieper-Donets region (Artemivsk deposit). However, with the onset of the Russian aggression against Ukraine in 2022 and the occupation of its eastern regions, Ukraine lost its ability to ensure a stable supply of rock salt for both the population and industry, as well as to maintain roads during winter. Despite having substantial resources (Dnieper-Donets depression, Carpathian region, Black Sea region), Ukraine's salt supply needs are now almost entirely met through imports from other countries.

In recent years, work has begun on the development of the Tereblińskie rock salt deposits located within the Solotvynsk depression in the Transcarpathian basin (Fig. 1). These



**Ryc. 1.** Tektoniczny schemat obniżenia zakarpackiego oraz rozmieszczenie w nim osadów solonośnych i terygeniczo-solonośnych (Kityk et al., 1983). Objasnienia: 1 – Karpaty fliszowe, 2 – północna strefa brzeżna (strefa głębokiego rozłamu zakarpackiego), 3 – południowa strefa brzeżna (strefa przypanonńskiego głębokiego rozłamu), 4 – Vihorlat-Hutyński, grzbiet wulkaniczny wieku pliocen-plejstocen, 5 – poprzeczne uskoki I rzędu (transkarpackie), 6 – uskoki południowo-pienińskie, 7 – uskoki II rzędu, 8 – północno-wschodnia granica neogeńskich molas w zapadlisku sołotwińskim, 9 – zasięg badeńskiej formacji solonośnej, 10 – wysady solne, 11 – kompleks solonośny, 12 – kompleks terygeniczo-solonośny.

**Fig. 1.** Tectonic schematic of the Transcarpathian depression and the distribution of salt-bearing and terrigenous-salt-bearing sediments (Kityk et al., 1983). Explanations: 1 – Flysch Carpathians, 2 – northern marginal zone (deep fault zone of the Transcarpathian depression), 3 – southern marginal zone (pre-Pannonian deep fault zone), 4 – Vihorlat-Hutyn volcanic ridge (Pliocene-Pleistocene), 5 – transverse first-order faults (Transcarpathian), 6 – south-Pieniny fault, 7 – second-order faults, 8 – the northeastern boundary of Neogene molasses in the Solotvynsk depression, 9 – Badenian salt-bearing formation extent, 10 – salt domes, 11 – salt-bearing complex, 12 – terrigenous-salt-bearing complex.

położonych w obrębie zapadliska sołotwińskiego w obniżeniu zakarpackim (Ryc. 1). Sole te zostały rozpoznane w 1955 roku przez Zakarpacką Ekspedycję Geologiczno-Poszukiwawczą jako baza surowcowa do produkcji sody. Od 2023 roku rozpoczęto tutaj budowę podziemnej kopalni i rozważane są opcje wyboru obszarów do wydobywania soli kamiennej metodą podziemnego ługowania.

Podstawowe informacje dotyczące budowy złoża soli kamiennej w rejonie Terebli zostały uzyskane pod koniec lat 50. i na początku lat 60 (szczegółowe badania przeprowadzono w latach 1956-1958 oraz 1964-1965, przy czym główny zakres prac geologiczno-poszukiwawczych wykonano w latach 1956-1957). W wyniku tych prac stwierdzono wysadową budowę tego złoża (Ryc. 2). Chociaż złoże jest jednym z lepiej zbadanych w Zakarpaciu, to obecnie brak jest wystarczających informacji na temat wewnętrznej budowy struktury solnej Terebli. W naszej ocenie przekroje opracowane przez różnych autorów nie odzwierciedlają w pełni tektoniki fałdowej typowej dla tego rodzaju struktur.

Podczas analizy wysadów solnych w warunkach ograniczonej dostępności danych geologicznych, warto korzystać z doświadczeń zdobytych podczas badań analogicznych, wcześniej zidentyfikowanych struktur (Dzhinoridze, Sokolova, 1982). W takich przypadkach kompleks skał solnych bywa wciskany w strome, skompresowane, liniowo wydłużone izoklinalne fałdy. Amplituda tych fałdów często osiąga kilkaset metrów, a niejednokrotnie można zaobserwować również fałdy odwrócone. Pod wpływem sił tektonicznych skały solne mogą podlegać wielokrotnej rekryształizacji i mogą być zbrekcjonowane. Dodatkowo w tych strukturach tworzą się uskoki o zróżnicowanej morfologii i amplitudzie przesunięcia. Wiele z nich jest wypełnionych wtórnym halitem, powstałym w wyniku kilku późniejszych generacji, choć mogą występować również pęknięcia otwarte lub słabo zcementowane.

Analiza danych dotyczących budowy wysadów solnych w Polsce (Kłodawa), Kazachstanie (Inder), Bośni i Hercegowinie (Tuzla), wskazuje, że fałdy w wysadach solnych są często strukturami kompresyjnymi, a dokładniej systemami fałdów (Dzhinoridze, Sokolova, 1982; Korin i in., 2002; Korin, Sadovyi, 1998). W strefach kontaktu soli z otaczającymi skałami często tworzą się fałdy antyklinalne, podczas gdy w centralnej części struktury wysadowej dominują fałdy synklinalne. Zarówno antykliny, jak i synkliny, to skomplikowane struktury fałdowe niższego rzędu.

Celem naszej pracy jest analiza budowy tereblińskiego złoża soli kamiennej, oparta na interpretacji geologicznych przekrojów złoża oraz danych dotyczących budowy wysadów solnych o podobnym charakterze.

Salts were identified in 1955 by the Transcarpathian Geological Exploration Expedition as a raw material base for soda production. Since 2023, construction of an underground mine has commenced, and options for selecting areas for rock salt extraction using underground leaching are being considered.

Basic information about the geological structure of the rock salt deposit in the Tereblia region was obtained in the late 1950s and early 1960s (detailed studies were conducted between 1956-1958 and 1964-1965, with the main scope of geological exploration carried out in 1956-1957). These studies confirmed the diapiric structure of the deposit (Fig. 2). Although this deposit is one of the better-studied ones in Transcarpathia, there is currently a lack of sufficient information about the internal structure of the Tereblia salt formation. In our assessment, the cross-sections developed by various authors do not fully reflect the folding tectonics typical of this type of structure.

When analyzing salt domes with limited geological data availability, it is valuable to use experiences gained from studying analogous, previously identified structures (Dzhinoridze, Sokolova, 1982). In such cases, salt rock complexes may be squeezed into steep, compressed, linearly extended isoclinal folds. The amplitude of these folds often reaches several hundred meters, and overturned folds may also be observed. Under tectonic forces, salt rocks may undergo multiple recrystallizations and can become brecciated. Additionally, these structures may develop faults with varying morphologies and displacement amplitudes. Many of these are filled with secondary halite formed from several later generations, although open fractures or poorly cemented ones may also be present.

Analysis of data regarding the structure of salt domes in Poland (Kłodawa), Kazakhstan (Inder), and Bosnia and Herzegovina (Tuzla) indicates that folds in salt domes are often compressional structures, specifically fold systems (Dzhinoridze, Sokolova, 1982; Korin et al., 2002; Korin, Sadovyi 1998). Anticlines often form in the contact zones between salt and surrounding rocks, while synclines dominate the central part of the salt dome structure. Both anticlines and synclines are complex lower-order fold structures.

Our work aims to analyze the structure of the Tereblia rock salt deposit based on the interpretation of geological cross-sections of the deposit and data on salt dome structures of a similar nature.

## 2. GEOLOGICAL AND MINING CONDITIONS OF THE TEREBLIA DEPOSIT

Existing concepts and models of the internal structure of the Tereblia deposit are quite approximate, leading to varying interpretations (Fig. 2; Bosevska, 2017).

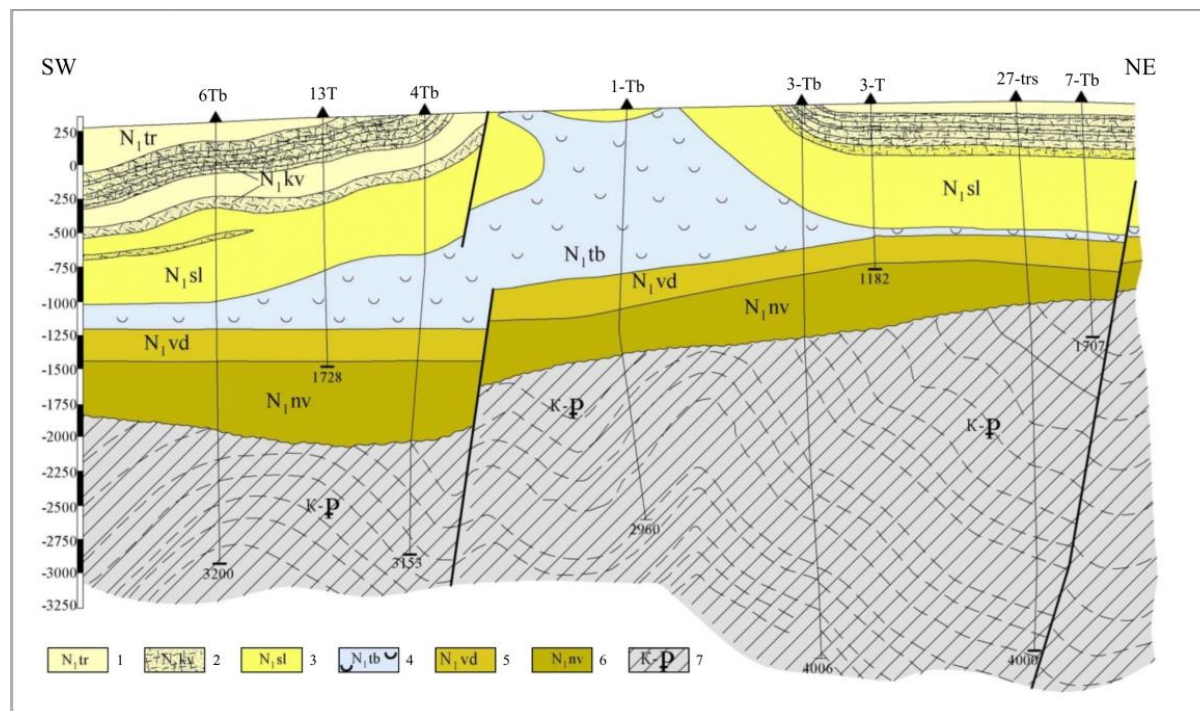
## 2. WARUNKI GEOLOGICZNO-GÓRNICZE ZŁOŻA TEREBLA

Dotychczasowe koncepcje i schematy wewnętrznej budowy struktury Terebła są bardzo przybliżone, dlatego interpretacje mogą się różnić (Ryc.2; Bosevska, 2017).

Uzyskane podczas wierceń dane dotyczące głębokości występowania zwierciadła solnego, zmienności zawartości NaCl, a także głębokości zalegania spagu warstw solonośnych, pozwalają jedynie na przybliżone oszacowanie grubości pokładów produkcyjnych. W trakcie badań złoża nie zidentyfikowano horyzontów korelacyjnych (markerów), które mogłyby umożliwić szczegółową charakterystykę jego struktury, chociaż sugerowano możliwość wykorzystania do tego celu wewnątrz formacyjnych warstw ilastych. Jednak ze względu na uproszczone wyobrażenia o budowie serii solonośnych i strukturach wysadów solnych, które dominowały w połowie XX wieku, dane te nie zostały praktycznie wykorzystane. Cechy strukturalno-litologiczne odkryte w trakcie wierceń na obszarze złoża były interpretowane zgodnie z istniejącymi wyobrażeniami o zewnętrznej formie diapiru solnego. Dlatego też w celu efektywnej eksploatacji złoża należy jak najdokładniej rozpoznać jego budowę wewnętrzną.

Data obtained from drilling regarding the depth of the salt mirror, variability in NaCl content, and the depth of the salt-bearing layers allow only an approximate estimation of the thickness of the production layers. During the deposit exploration, no correlation horizons (markers) were identified that could facilitate a detailed characterization of its structure, although the use of internal clay layers was suggested for this purpose. However, this data was practically unused due to the simplified understanding of salt-bearing series and salt dome structures prevalent in the mid-20th century. Structural and lithological features discovered during drilling in the deposit area were interpreted according to existing notions of the external form of the salt diapir. Therefore, it is crucial to understand its internal structure accurately to exploit the deposit effectively.

The geological and structural-tectonic features of the salt dome area in Transcarpathia suggest an analogous structural type to those described above, and based on this, we adopted a similar model for interpreting the deposit cross-sections. According to our interpretation, the salt series within the diapir is compressed into a system of folds of varying orders. The main structures are the northern and southern anticlines separated by a central syncline. The presence of the syncline



**Ryc. 2.** Przekrój przez centralną część diapiru solnego w Terebli (Bosevska, 2017).

- 1 – Seria tereswińska (iłowce, mułowce, piaskowce); 2 – Regionalny poziom korelacyjny tufów kowackich; 3 – Seria solotwińska (iłowce, piaskowce z warstwami tufów ryolitowych, tufitów); 4 – Seria solonośna seria Terebła; 5 – Seria wodycka (iłowce, mułowce, tufity); 6 – Seria nowosielicka (osadowo-wulkaniczna formacja: zielone tufy ryolitowo-dacytowe z warstwami tufitów, iłowców, tufopiaszczowców, zlepieńców); 7 – Paleogeńsko-kredowe podłoże krystaliczne (margle, wapień, iłowce, mułowce).

**Fig. 2.** Cross-section of the central part of the salt diapir at Terebła (Bosevska, 2017).

- 1 – Teresva Series (claystones, siltstones, sandstones); 2 – Regional correlation level of Kovach tuffs; 3 – Solotvyno series (claystones, sandstones with layers of rhyolite tuffs, tuffites); 4 – Salt-bearing Terebła series; 5 – Vodytsya series (claystones, siltstones, tuffites); 6 – Novoselytsya series (sedimentary-volcanic formation: green rhyolite-dacite tuffs with layers of tuffites, claystones, tuff-sandstones, conglomerates); 7 – Paleogene-Cretaceous crystalline basement (marlstones, limestones, claystones, siltstones).

Geologiczne i strukturalno-tektoniczne cechy obszaru występowania wysadów solnych w Zakarpaciu wskazują na analogiczny typ strukturalny do opisanych powyżej i na tej podstawie przyjęliśmy podobny model do interpretacji przekrojów złoża. Według naszej interpretacji, seria solna w obrębie wysadu jest wciśnięta w system fałdów różnego rzędu. Głównymi strukturami są antykliny północna i południowa rozdzielone centralną synkliną. Obecność synkliny potwierdza występowanie skał należących do swity (grupy) solotwińskiej w jej centralnej części, co jest odzwierciedlone w przekrojach (wiercenia nr 27 i nr 37).

Wzdłuż fałdów skały są mniej zdeformowane, z płaskim, bliskim poziomemu ułożeniem. Kontakt soli z warstwami terygenicznymi swity solotwińskiej jest tektoniczny.

Północny uskok jest bardziej płaski, co jest związane z kierunkiem nacisku tektonicznego z północy na południe. Kąty nachylenia skał solnych są również bardziej płaskie w północnych fałdach antyklinalnych niż w południowych. Według pomiarów rdzeni wiertniczych są one strome i wynoszą 70-80° (w przekrojach geologicznych, które są zbudowane na podstawie wyników badań, nie jest to odzwierciedlone). Południowa antyklina jest bardziej zdeformowana, co potwierdza obecność brekcji tektonicznych oraz powtórzenie warstwy iłu, która najprawdopodobniej została podzielona w wyniku budinażu. Zwiększenie intensywności fałdowania niższego rzędu w tej strukturze potwierdza również pogorszenie jakości soli, a także obecność owalnych konkrecji anhydrytowych zarówno w soli, jak i w warstwach terygenicznym. Jakość soli pogarsza się tutaj w wyniku częstszego powtarzania tych samych warstw ilastych, podczas gdy w północnej antyklinie intensywność fałdowania jest mniejsza, a jakość soli wyższa.

Istnieje szereg czynników, które determinują potencjalną efektywność eksploatacji oraz bezpieczeństwo techniczno-ekologiczne eksploatacji złóż soli. Przy wyborze metody eksploatacji i planowaniu systemu eksploatacji złóż kluczowe, naszym zdaniem, jest zrozumienie struktury złoża oraz uwzględnienie cech budowy podczas jego eksploatacji.

Efektywność i bezpieczeństwo eksploatacji przyszłej kopalni soli zależy nie tylko od zasobów soli, które są tu dość znaczące, ale także od tego, jak obiektywnie oceniona jest budowa geologiczna złoża (Korin i in., 2002). Największe zagrożenie dla bezpiecznej eksploatacji złoża soli związane jest z zjawiskami wodnymi, które związane są z budową geologiczną złoża oraz istniejącymi uskokami (Korin, Sadovyi, 1998). Często właśnie czynniki tektoniczne decydują o powstawaniu zjawisk wodnych i solankowych w kopalni soli. Zagrożenia wodne terminowo nierozpoznane mogą doprowadzić do zalania kopalni z wszystkimi negatywnymi konsekwencjami. Wdarcie się wody do wyrobisk górniczych może być także spowodowane wyborem nieuzasadnionej metody eksploatacji złóż i nieprawidłowym wykonywaniem prac wydobywczych.

confirms the occurrence of rocks belonging to the Solotvynsk suite in its central part, as reflected in the cross-sections (drillings No. 27 and No. 37).

The rocks are less deformed along the folds, with a flat, nearly horizontal arrangement. The contact between the salt and the terrigenous layers of the Solotvynsk suite is tectonic. The northern fault is gentler and is associated with the direction of tectonic pressure from north to south. The inclination angles of the salt rocks are also flatter in the northern anticlines than in the southern ones. According to core measurements, these angles are steep, ranging from 70-80° (this is not reflected in the geological cross-sections based on research results). The southern anticline is more deformed, as evidenced by tectonic breccias and repetition of the clay layer, which has likely been split due to deformation. The increased intensity of lower-order folding in this structure also confirms the deterioration in salt quality and the presence of oval anhydrite concretions in both the salt and terrigenous layers. Salt quality deteriorates here due to more frequent repetition of the same clay layers, while in the northern anticline, the folding intensity is lower, and salt quality is higher.

Several factors determine the potential efficiency and technical-ecological safety of salt deposit exploitation. Understanding the deposit structure and considering its geological features during exploitation is crucial when selecting and planning the extraction method.

The efficiency and safety of the future salt mine depend not only on the significant salt resources available but also on how objectively the geological structure of the deposit is assessed (Korin et al., 2002). The greatest threat to the safe exploitation of the salt deposit is related to water phenomena associated with the geological structure of the deposit and existing faults (Korin, Sadovyi, 1998). Often, tectonic factors lead to the formation of water and brine phenomena in salt mines. Untimely recognition of water hazards can lead to flooding the mine with all its negative consequences. Water intrusion into mining workings can also result from selecting an unjustified extraction method and improper execution of mining operations.

### 3. THE IMPORTANCE OF ACCURATE DEPOSIT CHARACTERIZATION: THE CASE OF THE EFREMOV SALT DOME

An analysis of the brine plant's operations at the Efremov salt dome in the Dnieper-Donets Basin, which ran from 1974 to 2007, reveals that negative outcomes during its exploitation stemmed from inadequate geological characterization of the deposit, particularly regarding the lithostratigraphy of the salt series. As a result, almost all boreholes became hydraulically interconnected despite leaving 80-meter-thick pillars. Al-



### 3. ZNACZENIE PRAWIDŁOWEGO ROZPOZNANIA ZŁOŻA NA PRZYKŁADZIE EKSPLOATACJI WYSADU SOLNEGO EFREMOV

Analiza działalności zakładu solankowego, na wysadzie soli Efremov w Zapadlisku Dniepro-Donckim, działającego w latach 1974-2007, pokazuje, że przyczyną negatywnych skutków podczas jego eksploatacji był brak rozpoznania geologicznego złoża w tym litostratygrafii serii solnej. W efekcie praktycznie wszystkie odwierty zostały hydraulicznie połączone między sobą, pomimo pozostawienia filarów o grubości 80 m. Chociaż w rdzeniach dwóch odwiertów (nr 1 i nr 3) w osadach solnych znaleziono fragmenty tufów, które mogłyby stanowić pewny poziom stratygraficzny dla rozpoznania budowy wysadu.

Z powodu nadmiernego rozwoju w niektórych kierunkach, komory połączyły się, co miało znaczący negatywny wpływ na normalną pracę zakładu solankowego, ponieważ stało się niemożliwe utrzymanie ich eksploatacji zgodnie z planowaną metodą ługowania (Ryc. 3).

Z powodu takiego niekontrolowanego i niezarządzanego procesu rozpuszczania, trzeba było wstrzymać pracę odwiertów na dłuższy czas, podejmować próby przywrócenia normalnej pracy odwiertów oraz skreślać z bilansu planowane do wydobywania zasoby surowca. W przypadku, gdyby proces ługowania został rozpoczęty wyżej niż to miało miejsce, możliwości naprawienia sytuacji poprzez nowe rozpuszczanie komory przygotowawczej i kontynuowanie procesu ługowania byłyby mniejsze, a niski współczynnik wykorzystania zasobów surowca okazałby się jeszcze niższy. Biorąc pod uwagę to doświadczenie, należy zalecić wydobywanie złóż soli z Tereblia metodą ługowania przez odwierty ułożone jak najbliżej spągu serii solnej. Ponadto, przy rozmieszczaniu otworów, należy uwzględnić przewidywaną wewnętrzną strukturę wysadu, rozprzestrzenienie uskoków oraz charakter fałdowań.

Jak jest to pokazane na rycinie 3, komory ługowania w wysadzie rozwijały się bardzo nierównomiernie. Wskazuje to na znaczną anizotropię środowiska, w którym zachodzi proces ługowania soli. Chociaż dane z rozpoznania wskazywały na wysoką jakość surowca (zawartość NaCl w skale waha się w granicach 95-98%), przegląd materiału rdzeniowego z odwiertów wykonanych na złożu pokazuje, że pod względem cech strukturalno-litologicznych można wyróżnić szeroką gamę odmian soli kamiennej – od czystej białej po prawie czarną, zawierającą fragmenty ilastych łupków węglowych różnej wielkości oraz solną brekcję.

Podczas szczegółowego badania materiału rdzeniowego uwagę zwracają strome kąty nachylenia warstw, wynoszące od 70 do 80° względem pionu. Wszystko to wskazuje na znaczne dyslokacje skał solnych oraz obecność w wysadzie intensywnej izoklinalnej fałdowości różnych rzędów. Takie

though fragments of tuff, which could have served as reliable stratigraphic markers for understanding the dome's structure, were found in the cores of two boreholes (No. 1 and No. 3), this information was not effectively utilized.

Due to excessive development in some directions, the chambers merged, which significantly impacted the normal operation of the brine plant, making it impossible to maintain extraction according to the planned leaching method (Fig. 3). Due to this uncontrolled and unmanaged dissolution process, operations had to be suspended for extended periods, attempts were made to restore normal operations, and planned resources were written off. If leaching had been initiated at a higher elevation, the possibility of rectifying the situation through the new dissolution of the preparatory chamber and continuing leaching would have been reduced, resulting in an even lower resource utilization rate. Given this experience, it is recommended to conduct salt extraction at the Tereblia deposit using drilling methods placed as close as possible to the base of the salt series. Additionally, when planning borehole locations, the anticipated internal structure of the dome, the spread of faults, and the characteristics of folding should be considered.

As shown in Figure 3, the leaching chambers in the dome developed very unevenly, indicating significant anisotropy in the environment where salt leaching occurs. Although exploration data indicated high-quality raw material (NaCl content in the rock ranges from 95-98%), the examination of core material from boreholes at the deposit reveals a wide range of rock salt varieties – from pure white to nearly black, containing fragments of clayey carbonaceous shales of various sizes and salt breccia.

Detailed examination of the core material reveals steep layer inclinations, ranging from 70 to 80° from vertical. This indicates significant dislocations of the salt rocks and the presence of intense isoclinal folding of various orders within the dome. These conditions were not considered during the design of the brine plant.

We conducted a series of studies to observe the dissolution characteristics of different types of salt discovered in the Efremov deposit. Four types of salt core samples were selected for the study: halite of light gray to transparent color and massive texture, layered rock salt with alternating light and dark gray layers up to 2 cm thick, and coarse-grained and fine-grained salt breccia. Observations showed that the coarse-grained salt breccia dissolved (degraded) the fastest. Some fragments made of halite settled on the bottom, remaining undissolved among clayey and carbonaceous shale fragments and mud (in the rams). The fine-grained breccia dissolved next in terms of intensity. The pure massive rock salt was the least affected sample, which visually showed almost no insoluble residue.

okoliczności nie były w żaden sposób uwzględnione podczas projektowania zakładu solankowego.

Przeprowadziliśmy serię badań w celu obserwacji cech rozpuszczania kilku rodzajów soli odkrytych w złożu Efre-mów. Do badań wybrano cztery rodzaje rdzeni soli kamiennej: halit o jasnoszarym do przezroczystego kolorze i masywnej teksturze, warstwowa sól kamienna z naprzemiennymi jasnymi i ciemnoszarymi warstwami o grubości do 2 cm, a także brekcja solna gruboziarnista i drobnoziarnista. W wyniku obserwacji okazało się, że najszybciej rozpuszczał się (ulegał niszczeniu) rdzeń reprezentowany przez gruboziarnistą brekcję solną. Część fragmentów zbudowanych z kawałków halitu osiadała na dnie, gdzie pozostawała nierozpuszczona wśród fragmentów gliniastych i węglowych łupków oraz mułu (w rzapiu). Kolejną pod względem intensywności rozpuszczania była brekcja drobnoziarnista. Najmniej zniszczonym próbką okazała się czysta masywna sól kamienna, w której wizualnie praktycznie nie zaobserwowano zanieczyszczeń nierozpuszczalnym osadem.

Wyniki przeprowadzonych obserwacji dotyczących intensywności rozpuszczania różnych rodzajów soli kamiennej wskazują, że choć proces rozpuszczania (wypłukiwania) soli jest głównie postrzegany jako proces nasycania roztworu i osiągnięcia przez niego odpowiedniej koncentracji, w rzeczywistości jest przede wszystkim procesem niszczenia (sztucznego krasowienia) masywu solnego. Proces ten zachodzi bardziej aktywnie w najbardziej przepuszczalnych, osłabionych obszarach. Woda lub słabo mineralizowane roztwory przenikają bardziej intensywnie do bardziej porowatego środowiska niż do praktycznie pozbawionych porów monolitycznych soli, a podczas rozpuszczania soli w ilastych i terygenicznym warstwach (np. w zubrach) następuje osłabienie więzi między cząstkami skały i ich dezintegracja. Ważne jest, aby zwrócić uwagę, że często obecność w przekroju przyszłego interwału wypłukiwania obszarów wzbogaconych materiałem terygenicznym jest rozważana jako taka, która będzie ekranować powierzchnię soli i spowalniać rozwój komory.

#### 4. WNIOSKI

Jakość rozpoznania złoża soli kamiennej w Terebli jest obecnie niewystarczająca. Priorytetowym zadaniem dla przedsiębiorstwa wydobywczego jest ustalenie modelu budowy geologicznej złoża. Ponieważ podczas rozpoznania złoża nie ustalono jednoznacznych kryteriów do interpretacji wewnętrznej budowy struktury wysadu solnego, uważamy za racjonalne uwzględnienie doświadczeń szczegółowego badania struktur solnych podobnego typu. Ogólnie rzecz biorąc, struktury typu tereblińskiego są strukturami wznoszenia, które powstają na obszarach, gdzie rozwinięty jest system uskoków.

Bez wątpienia każda z struktur solnych różni się swoimi charakterystycznymi cechami budowy. Jednak nasze do-

The results of the dissolution intensity observations indicate that while the dissolution (leaching) of salt is primarily seen as a process of solution saturation and reaching the desired concentration, it is, in fact, primarily a process of destruction (artificial karstification) of the salt massif. This process occurs more actively in the most permeable, weakened areas. Water or weakly mineralized solutions penetrate more intensely into the more porous environment than into nearly pore-free monolithic salt. During salt dissolution in clayey and terrigenous layers (e.g., in the zubres), the bond between rock particles and their disintegration is weakening. It is important to note that the presence of terrigenous material-enriched areas in the cross-section of the future leaching interval is often considered a factor that will screen the salt surface and slow down chamber development.

#### 4. CONCLUSIONS

The current geological characterization of the Tereblia rock salt deposit is insufficient. A priority for the mining company is to establish a detailed geological model of the deposit. Given that clear criteria for interpreting the internal structure of the salt dome were not established during the exploration phase, it is rational to consider the experiences from detailed studies of similar salt structures. In general, Tereblia-type structures are uplifted formations that develop in areas with a well-developed fault system.

While each salt structure has its unique features, our experience with direct studies of such objects indicates that certain general patterns of internal structure likely arise from their formation mechanism.

For Tereblia-type structures, predicting the presence of two main anticlines and a central syncline is reasonable. Different parts of the dome exhibit variations in structure, affecting the salt quality and the extraction system's stability.

In the next phase, when exposing salt layers through underground mining works or drilling additional exploration boreholes from the surface, it is essential to conduct more detailed investigations of the lithological features of the deposits to identify characteristic indicator layers. This will help to supplement existing information, refine geological cross-sections, and develop maps for the working levels of the future mine.

It is important to consider the presence of fault zones of various scales, including so-called plastic faults, which may not always be visible in core documentation but can be identified with appropriate experience during a detailed examination of significant mine exposures.

When planning to extract resources from the Tereblia deposit using underground leaching methods, leaching operations should begin from the greatest possible depths. Currently, the deposits have been explored to a depth of 500 me-

świadczenia w bezpośrednim badaniu takich obiektów wskazują, że istnieją pewne ogólne prawidłowości ich wewnętrznej struktury, wywołane prawdopodobnie mechanizmem ich powstawania.

Dla struktur typu tereblińskiego można prognozować obecność dwóch skrajnych antyklin i centralnej synkliny. Różne części wysadu charakteryzują się różnicami w budowie, co wpływa na jakość soli i stabilność systemu eksploatacji.

W dalszym etapie, przy odsłanianiu warstw solnych za pomocą podziemnych wyrobisk górniczych lub przy wierceniu dodatkowych odwiertów rozpoznawczych z powierzchni, należy dokładniej badać litologiczne cechy osadów, aby zidentyfikować charakterystyczne warstwy wskaźnikowe. Pozwoli to uzupełnić istniejące informacje, precyzować przekroje geologiczne i opracować mapy na roboczych poziomach przyszłej kopalni.

Należy uwzględnić, że istnieją strefy uskoków o różnej skali, w tym tzw. uskoków plastycznych, które nie zawsze są widoczne w dokumentacji rdzenia, ale mogą być zidentyfikowane przy odpowiednim doświadczeniu podczas szczegółowego badania w odsłonięciach głównych wyrobisk górniczych.

Podczas planowania eksploatacji zasobów złoża tereblińskiego metodą podziemnego ługowania, należy rozpocząć ługowanie komór od możliwie największych głębokości. Obecnie złoża zostały rozpoznane do głębokości 500 m, chociaż według danych z niektórych odwiertów podstawa warstwy solonośnej w rejonie kopuły Tereblińskiego osiąga głębokości przekraczające 1000 metrów. Biorąc pod uwagę, że eksploatacja złóż metodą rozpuszczania jest procesem słabo kontrolowanym z niskim współczynnikiem odzysku surowca, istotne jest optymalne rozmieszczenie odwiertów wydobywczych w obszarze, który jest potencjalnie planowany do eksploatacji tą metodą.

ters, although data from some boreholes indicate that the base of the salt-bearing layer in the Tereblia dome region reaches depths exceeding 1000 meters. Since the extraction of deposits using dissolution methods is a poorly controlled process with a low recovery rate, it is crucial to optimally place extraction boreholes in the areas that are potentially planned for exploitation using this method.

## LITERATURA/REFERENCES

- BOSEVSKAYA L. P., 2017. Targeted Geological-Industrial Evaluation of the Tereblyanska Salt-Dome Structure (Transcarpathia). Dniprop. Univer. bulletin. Geology, geography., 25(2), 3–22. doi: 10.15421/111716.
- DJINORIDZE N. M., SOKOLOVA T. M., 1982. Marker Horizons, Tectonic Structure, and the Paths of Rock Transformation of Potassium-Magnesium Salt Deposits of One of the Domes of Central Pre-Caspian. Leningrad, VNIIG., pp. 44–70.
- KITIK V. I., BOKUN A. N., PANOV G. M., 1983. Halogen Formations of Ukraine: Transcarpathian Basin. – Kyiv: Naukova Dumka, 168 pp.
- KORIN S. S., SADOVYI J. V., 1998. Occurrences of Brine in Salt Mines and the Nature of Their Formation. Geological Review, 46: 155–158.
- KORIN S. S., SADOVYI Y. V., MOSORA T. M., 2002. Tectonics of the Upper Permian Kłodawa Dome in Poland and Its Influence on Salt Quality, and the Nature of Water and Oil Manifestations // Geology and Geochemistry of Combustible Minerals. No. 1, pp. 41–51.

# Geomorfologiczne zróżnicowanie Jordanii

## Geomorphological diversity of Jordan

Tomasz TOBOŁA<sup>1</sup>, Katarzyna CYRAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,  
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: tobolatomasz@agh.edu.pl

<sup>2</sup>Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami,  
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: keyran@agh.edu.pl

### STRESZCZENIE

Budowa geologiczna obszaru Jordanii charakteryzuje się znaczną różnorodnością i obejmuje utwory geologiczne od prekambryjskich skał magmowych i metamorficznych po osadowe skały ery proterozoicznej, mezozoicznej i kenozoicznej. Najbardziej znaczącymi elementami budowy geologicznej obszaru Jordanii są Dolina Ryftowa Jordanu i Morze Martwe. Krajobraz Jordanii zdominowany jest przez pustynie, ale występują także obszary górskie, które wznoszą się powyżej 1000 metrów nad poziom morza. Pomimo obecności skał osadowych, szczególnie piaskowców z potencjalnymi właściwościami zbiornikowymi, Jordania posiada niewielkie zasoby wody pitnej i przemysłowej oraz ropy naftowej w porównaniu z sąsiednimi krajami, takimi jak Arabia Saudyjska i Syria. Morze Martwe stanowi atrakcję turystyczną rejonu Jordanii. Jego zasolenie jest prawie dziesięciokrotnie wyższe niż w normalnej wodzie morskiej. Bogata w pierwiastki woda i błoto z Morza Martwego przyciągają turystów. Ponadto woda z Morza Martwego jest intensywnie wykorzystywana przez Izrael i Jordanię do produkcji soli kamiennej i potasowo – magnezowej w panwiach.

**Słowa kluczowe:** Jordania, budowa geologiczna, Dolina Ryftowa Jordanu, Morze Martwe, zasoby naturalne.

### ABSTRACT

The geological structure of Jordan is characterized by significant diversity that includes a range of formations from Precambrian igneous and metamorphic rocks to sedimentary rocks of the Proterozoic, Mesozoic, and Cenozoic eras. The most notable geological features of the Jordan area include the Jordan Rift Valley and the Dead Sea. Deserts dominate Jordan's landscape, but there are also mountainous regions that rise above 1,000 meters. Despite the presence of sedimentary rocks, particularly sandstones with potential reservoir properties, Jordan possesses limited potable and industrial water resources. There are no significant oil reserves compared to neighboring countries like Saudi Arabia and Syria. The Dead Sea is a tourist attraction in the Jordan region, with a salinity almost ten times higher than that of normal seawater. The mineral-rich water and mud from the Dead Sea attract tourists. Additionally, the water from the Dead Sea is heavily utilized by Israel and Jordan to produce rock salt and potassium-magnesium salts in evaporation ponds.

**Keywords:** Jordan, geological structure, Jordan Rift Valley, Dead Sea, natural resources.

### 1. WSTĘP

Jordania (pełna nazwa: Haszymidzkie Królestwo Jordanii) położona jest w zachodniej Azji i graniczy od północy z Syrią, od wschodu z Irakiem, od południowego wschodu z Arabią Saudyjską oraz od zachodu z Autonomią Palestyń-

### 1. INTRODUCTION

Jordan (officially known as the Hashemite Kingdom of Jordan) is located in Western Asia and borders Syria to the north, Iraq to the east, Saudi Arabia to the southeast, and the Palestinian Authority and Israel to the west. Additionally, it shares a 26 km stretch of coastline along the Red Sea (Aqa-

ską i Izraelem. Ponadto, poprzez 26 km odcinek wybrzeża Morza Czerwonego (zatoka Aqaba) graniczy z Egiptem. Stolicą kraju jest Amman. Jordania uzyskała niepodległość po podpisaniu Traktatu Londyńskiego zawartego między Wielką Brytanią, a Emiratem Transjordańskim w dniu 25 maja 1946. Pierwszym królem Jordanii został Emir Abdullah I bin Al-Hussein.

Jordania jest krajem półsuchym, zajmującym powierzchnię 89 342 km<sup>2</sup> i liczącym około 10 milionów mieszkańców, co czyni go jedenastym pod względem liczby ludności krajem arabskim. Większość populacji kraju stanowią muzułmanie sunniccy z przeważającą mniejszością chrześcijan arabskich. Już w 1948 roku Jordania przyjęła uchodźców z wielu sąsiadujących ze sobą krajów objętych konfliktem. Według spisu ludności z 2015 r. w Jordanii przebywa około 2,1 miliona uchodźców palestyńskich i 1,4 miliona syryjskich; przy czym większość uchodźców palestyńskich posiada obywatelstwo jordańskie. Królestwo jest także schronieniem dla tysięcy chrześcijańskich Irakijczyków uciekających przed prześladowaniami ze strony Państwa Islamskiego (Ghazal, 2016).

Obszar Jordanii w starożytności zamieszkiwały semickie plemiona Ammonitów, Moabitów i Edomitów. W VI w p.n.e. na obszarze tym osiedliło się arabskie plemię Nabadejczyków. Trudnili się pasterstwem, rolnictwem i handlem, a z czasem utworzyli silne państwo z stolicą w Petrze. W kolejnych wiekach ulegali wpływom greckim, a następnie rzymskim. W 106 r n.e. zostali włączeni do rzymskiej prowincji Arabii przez cesarza Trajana (2001).

Po okresie wpływów Cesarstwa Bizantyjskiego, Jordania jak i obszary sąsiednie (Syria, Palestyna) dostały się pod panowanie arabskie. Pod koniec XI w n.e. podczas wypraw krzyżowych krzyżowcy przekroczyli Jordan i założyli wzdłuż wschodniego jego brzegu umocnienia. Wkrótce jednak (pod koniec XII w) tereny te dostały się pod panowanie sunnickiej dynastii Ajjubidów. Od początku XVI w rozpoczął się długi okres panowania tureckiego (Imperium Osmańskie), który trwał do końca I Wojny Światowej. W 1921 roku utworzony został Emirat Tranjordanii, który znajdował się pod brytyjskim protektorem do ustanowienia niepodległości Jordanii.

Celem niniejszego artykułu jest przybliżenie morfologii, budowy i historii geologicznej oraz tektoniki Jordanii, w kontekście wyprawy naukowej zorganizowanej przez Polskie Stowarzyszenie Górnictwa Solnego (PSGS). Wyprawa odbyła się we wrześniu 2023 roku, a jej uczestnicy mieli okazję zgłębić różnorodne aspekty budowy geologicznej i morfologii tego regionu, od unikalnych formacji skalnych po złożone procesy tektoniczne, które ukształtowały dzisiejszy krajobraz Jordanii.

## 2. KRAINY GEOGRAFICZNE, MORFOLOGIA I KLIMAT

Jordania, pomimo że jest niewielkim krajem i trzy czwarte jej terytorium to pustynia, charakteryzuje się dużą różnorod-

ba Gulf) with Egypt. The capital of the country is Amman. Jordan gained independence on May 25, 1946, following the signing of the London Treaty between Great Britain and the Emirate of Transjordan. The first king of Jordan was Emir Abdullah I bin Al-Hussein.

Jordan is a semi-arid country covering an area of 89,342 km<sup>2</sup> and has a population of approximately 10 million, making it the eleventh most populous Arab country. The majority of Jordan's population is Sunni Muslim, with the largest minority being Arab Christians. As early as 1948, the country welcomed refugees from neighboring conflict-ridden states. According to the 2015 census, Jordan is home to approximately 2.1 million Palestinian refugees and 1.4 million Syrian refugees, with most of the Palestinian refugees holding Jordanian citizenship. The kingdom also serves as a refuge for thousands of Christian Iraqis fleeing persecution by the Islamic State (Ghazal, 2016).

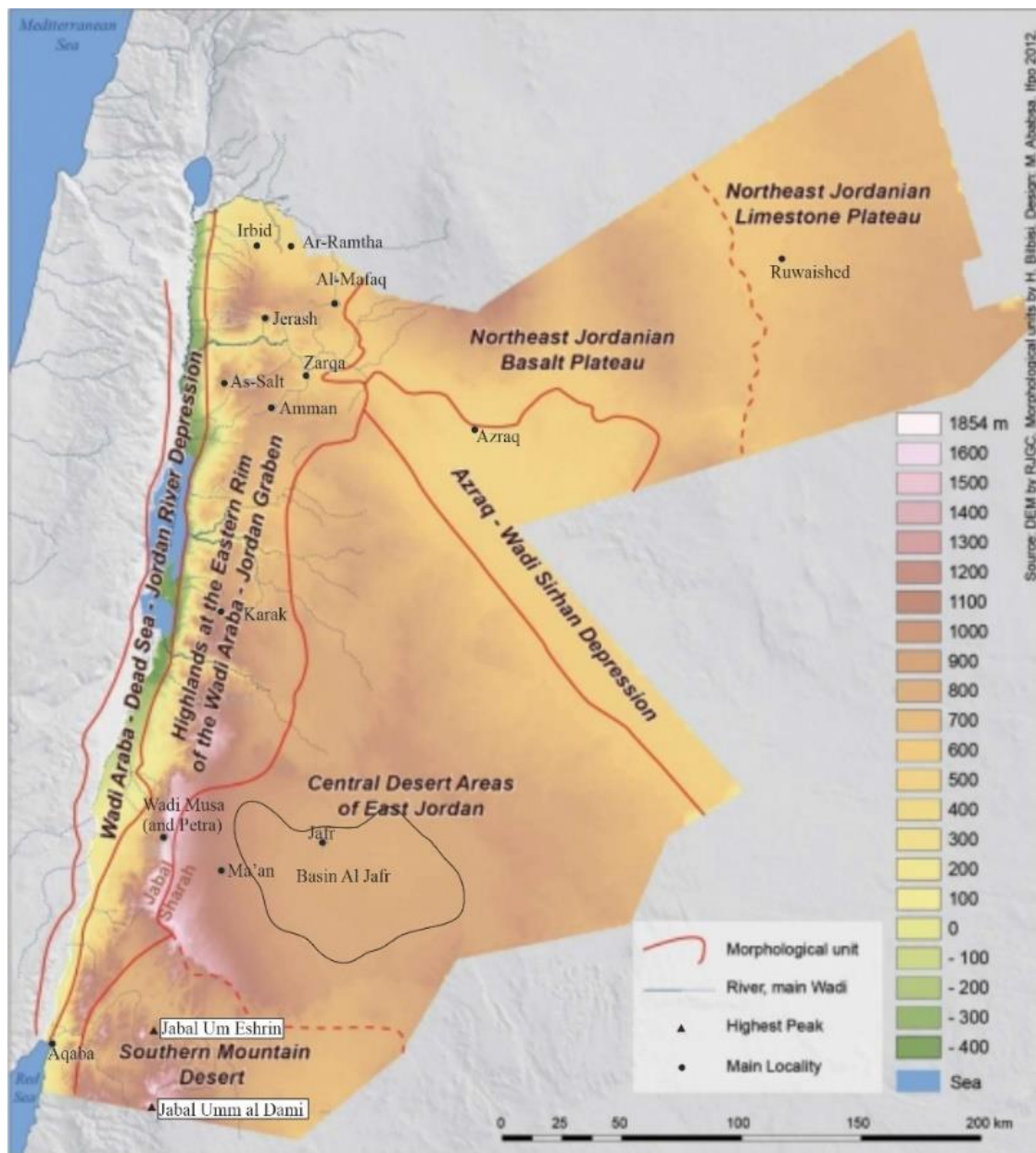
In ancient times, the area of modern-day Jordan was inhabited by the Semitic tribes of the Ammonites, Moabites, and Edomites. In the 6th century BCE, the Arab tribe of the Nabataeans settled in the region. They were engaged in pastoralism, agriculture, and trade, eventually establishing a powerful state with its capital in Petra. In the following centuries, the Nabataeans came under Greek and later Roman influence. In 106 CE, they were incorporated into the Roman province of Arabia by Emperor Trajan (2001).

After the period of influence from the Byzantine Empire, Jordan, along with neighboring regions (Syria and Palestine), came under Arab rule. In the late 11th century CE, during the Crusades, the Crusaders crossed the Jordan River and established fortifications along its eastern bank. However, by the late 12th century, these areas fell under the control of the Sunni Ayyubid dynasty. In the early 16th century, a long period of Turkish rule (under the Ottoman Empire) began, lasting until the end of World War I. In 1921, the Emirate of Transjordan was established, which remained under British protection until Jordan gained independence.

The aim of this article is to present the morphology, structure, geological history, and tectonics of Jordan, in the context of a scientific expedition organized by the Polish Association of Salt Mining (PSGS). The expedition took place in September 2023, providing participants with the opportunity to explore various aspects of the region's geological structure and morphology, from unique rock formations to the complex tectonic processes that have shaped the current landscape of Jordan.

## 2. GEORAPHICAL REGIONS, MORPHOLOGY AND CLIMATE

Jordan, despite being a small country where three-quarters of its territory is desert, exhibits a significant diversity



Rys. 1. Mapa Jordanii z granicami obszarów fizjograficznych (wg Ababsa, 2013).

Fig. 1. The map of Jordan with physiographic boundaries (after Ababsa, 2013).

nością krajobrazów. Wyróżnia się pięć głównych regionów fizjograficznych Jordanii (Rys. 1), które jednocześnie odpowiadają pięciu głównym strefom morfologicznym (Bender, 1974, 1975; Ababsa, 2013).

Dolina ryftowa Wadi al'Arabah – Jordanu (*The Wadi al Arabah – Jordan Rift*) – jest to dolina ryftowa stanowiąca podłużną depresję o kierunku osi N-S, ciągnącą się od zatoki Akaba po jezioro Tyberiadzkie (*Sea of Galilee*) na odcinku około 360 km (Rys. 1). Stanowi część wschodnioafrykańskiego systemu ryftowego (East African Rift System) (Bender, 1975). Na odcinku około 80 km począwszy od Zatoki Akaba dno doliny stopniowo wznosi się. W środkowym rejonie Wadi al 'Arabah osiąga wysokość około 250 m n.p.m., a następnie opada w kierunku Morza Martwego. Należy zaznaczyć, że rejon Morza Martwego jest najgłębszą depresją na świecie

of landscapes. Five main physiographic regions of Jordan are distinguished (Fig. 1), which correspond to five primary morphological zones (Bender, 1974, 1975; Ababsa, 2013).

The Wadi al'Arabah – Jordan Rift is a rift valley that forms an elongated depression oriented in a north-south direction, stretching approximately 360 km from the Gulf of Aqaba to the Sea of Galilee (Fig. 1). It is part of the East African Rift System (Bender, 1975). Over a stretch of about 80 km from the Gulf of Aqaba, the valley floor gradually rises. In the central part of Wadi al 'Arabah, it reaches an elevation of around 250 meters above sea level, before descending towards the Dead Sea. It is worth noting that the Dead Sea area is the lowest depression on Earth, reaching 423 meters below sea level. Further north, along the Jordan Valley, the terrain gradually rises, reaching 209 meters below sea level in

cie osiagającą 423 m p.p.m. Dalej, w kierunku północnym, wzdłuż doliny Jordanu, teren stopniowo podnosi się osiagając w rejonie jeziora Tyberiadzkiego (Galilejskie) wysokość 209 m p.p.m. Jezioro to jest jednocześnie najniżej na Ziemi położonym zbiornikiem słodkowodnym. Rejon doliny Jordanu, szczególnie w północnej części, należy do najważniejszych obszarów rolniczych Jordanii, dzięki stałemu zaopatrzeniu w wodę z rzeki Jarmuk. Uprawia się tu trzcinę cukrową, bawełnę, palmę daktylową a tereny nieuprawne porasta bujna wiecznie zielona roślinność m.in. tamaryszki, oleandry, lasy o cechach podzwrotnikowych (Warszyńska, 2001). W kierunku południowym roślinność stopniowo zanika i zostaje zastąpiona roślinnością krzaczastą (Rys. 2A).

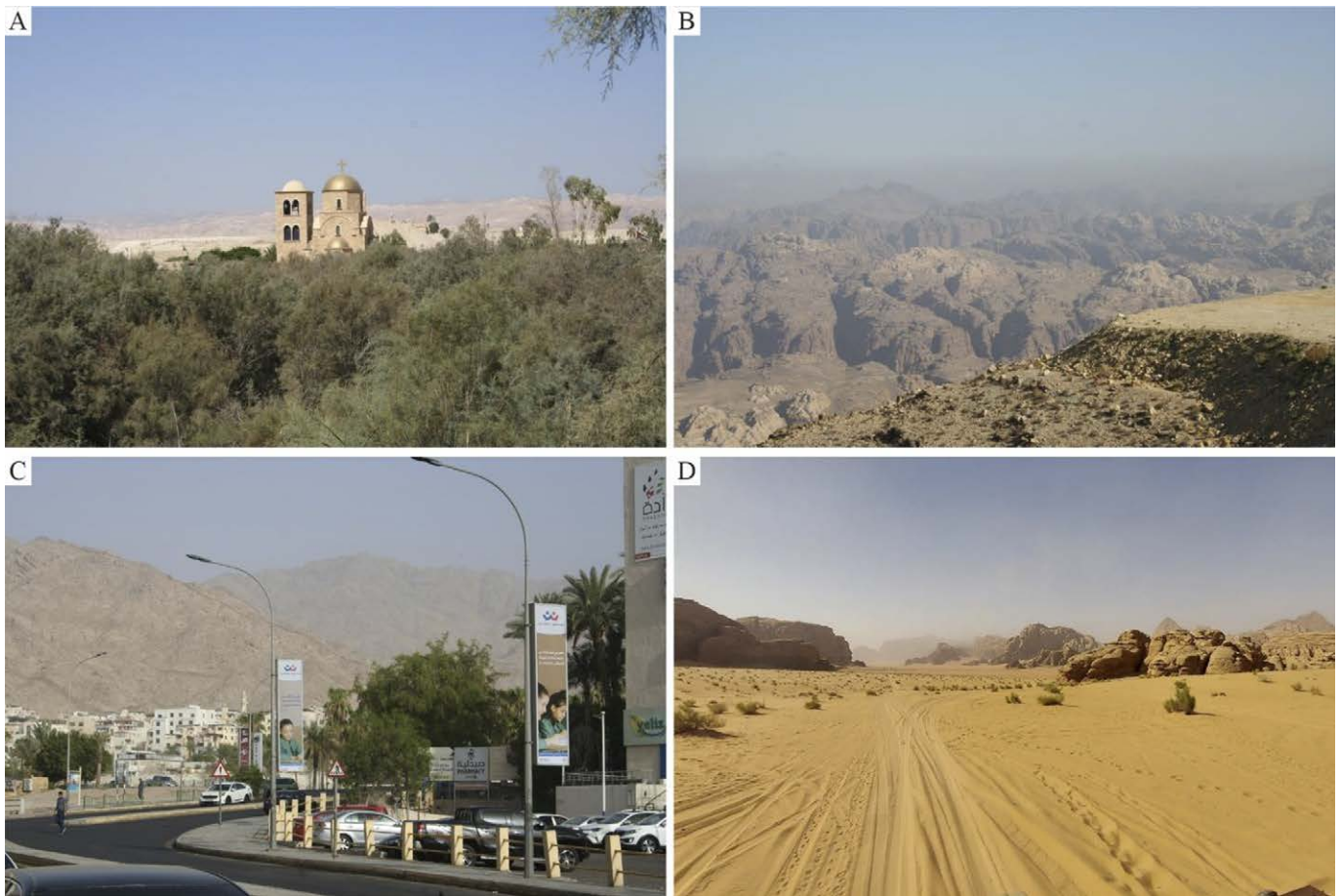
Grzbiet górski na wschód od doliny ryftowej (Highlands at the Eastern Edge of the Wadi Araba-Jordan Graben) - Strefa ta, nazywana jest zarówno Grzbietem Górskim (Mountain Ridge – Bender, 1975), jak i Wyżyną Północną (Northern Highlands – Bender, 1975). Rozciąga się na wschód od Wadi al'Araba, doliny Jordanu i Płaskowyżu Transjordańskiego, na przestrzeni 370 km. Generalnie jest spójnym obiektem fizjograficznym, pomimo zróżnicowanego charakteru geologicznego. Obszar ten opada łagodnie w kierunku centralnego płaskowyżu (The Central Plateau) na wschodzie i stromo w kierunku doliny ryftowej Morza Martwego i Jordanu na zachodzie. Ze względu na aktywność tektoniczną i stałe obniżanie doliny ryftowej na zachodzie, baza erozyjna rzek okresowych i stałych podlegała obniżeniu, co skutkowało wcinaniem się dolin w głąb i w kierunku wschodnim (Rys. 2B) zajmując dodatkowe obszary dla zlewni doliny ryftowej. Najbardziej znanymi i najczęściej odwiedzanymi są kaniony Wadi Mujib i Wadi Yabes (Ababsa, 2013; Bender, 1975). Południowa część wyżyn, w okolicach Akaby, gdzie pojawiają się najstarsze skały krystaliczne posiada charakter górzysty ze stromymi szczytami sięgającymi 1500 m n.p.m. (Rys. 2C).

Południowa Górzysta Pustynia (The Southern Mountainous Desert) - zajmuje obszar na południe od wyraźnie widocznej w morfologii terenu skarpy Ra's an Naqb, ciągnącej się w kierunku północno-zachodnim, i kontynuuje się na południe w kierunku Arabii Saudyjskiej. Pomiędzy Akabą (Al Aqabah) i Al Quwayrah, gdzie odsłonięte są skały magmowe podłoża prekambryjskiego, morfologia staje się bardziej zróżnicowana, a strome góry wznoszą się do 1550 m n.p.m. Dalej na wschód, piaskowce paleozoiku i mezozoiku przykrywają kompleks podłoża prekambryjskiego, a od Kawr Ramm (Wadi Ramm, Wadi Rum – Rys. 2D) pokrywają go całkowicie. Piaskowce tworzą również strome klify i góry o wysokości ponad 1700 m (Góra Um Eshrin - Jabal Ramm, 1754 m). Na tym obszarze przy granicy z Arabią Saudyjską znajduje się najwyższy szczyt w Jordanii zwany Jabal Umm ad Dami o wysokości 1854 m, według SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Bliżej używanej linii kolejowej Hejaz (Al Mudawwarah) i dalej na wschód (Jabal at Tubayq) dominującym

the area of the Sea of Tiberias (Sea of Galilee). It is also the lowest freshwater lake on Earth. The Jordan Valley region, particularly in its northern part, is one of the most important agricultural areas in Jordan, thanks to a steady water supply from the Yarmouk River. Sugarcane, cotton, and date palms are cultivated here, while non-cultivated areas are covered by lush, evergreen vegetation, including tamarisks, oleanders, and subtropical forests (Warszyńska, 2001). Moving southward, the vegetation gradually diminishes, giving way to bushy vegetation (Fig. 2A).

The mountain ridge east of the rift valley (Highlands at the Eastern Edge of the Wadi al'Arabah-Jordan Graben) is an area referred to as both the Mountain Ridge (Mountain Ridge – Bender 1975) and the Northern Highlands (Bender, 1975). It extends eastward from Wadi al'Arabah, the Jordan Valley, and the Transjordan Plateau, over a length of 370 km. In general, this is a cohesive physiographic feature, despite its varied geological characteristics. The area gently slopes towards the Central Plateau to the east and steeply towards the rift valley of the Dead Sea and Jordan to the west. Due to tectonic activity and the continuous lowering of the rift valley to the west, the base level of erosion for both seasonal and permanent rivers has been lowered, resulting in valleys cutting deeper and extending eastward (Fig. 2B), occupying additional areas of the rift valley watershed. The most well-known and frequently visited canyons are Wadi Mujib and Wadi Yabes (Ababsa, 2013; Bender, 1975). The southern part of the highlands, around Aqaba, where the oldest crystalline rocks are found, is mountainous, with steep peaks reaching 1500 meters above sea level (Fig. 2C).

The Southern Mountainous Desert occupies the area south of the clearly visible escarpment of Ra's an Naqb, which extends northwestward and continues southward towards Saudi Arabia. Between Aqaba (Al Aqabah) and Al Quwayrah, where Precambrian igneous rocks are exposed, the morphology becomes more varied, and steep mountains rise up to 1550 meters above sea level. Further east, Paleozoic and Mesozoic sandstones cover the Precambrian basement complex, completely overlaying it from Kawr Ramm (Wadi Ramm, Wadi Rum – Fig. 2D). The sandstones also form steep cliffs and mountains rising over 1700 meters (Mount Um Eshrin - Jabal Ramm, 1754 m). In this area, near the border with Saudi Arabia, lies the highest peak in Jordan, known as Jabal Umm ad Dami, with an elevation of 1854 meters according to the SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Closer to the utilized Hejaz railway line (Al Mudawwarah) and further east (Jabal at Tubayq), the dominant topographic feature is a series of monadnock and large depressions. These depressions, which are erosion channels carved during Pleistocene pluvial periods, create wide, generally flat areas indicating a mature stage of erosion. The filling of these depressions consists of sand and pelite sediments of significant thickness. Drainage



**Rys. 2.** A) Dolina Jordanu w Betanii z widocznym w tyle kościołem baptystów pod wezwaniem Św. Jana. B) Widok wyżyn (okolice Rajif) w kierunku doliny Wadi al'Araba (NW) z głęboko wciętymi dolinami rzek okresowych. C) Widok gór z miasta Aquaba. D) Wadi Rum (fot. K. Bukowski).

**Fig. 2.** A) Jordan Valley in Bethany with the Baptist Church of St. John visible in the background. B) View of the highlands (near Rajif) towards the Wadi al'Araba Valley (NW) with steep-sided periodic rivers. C) View of the mountains from the city of Aqaba. D) Wadi Rum (photo by K. Bukowski).

elementem topograficznym jest szereg ostańców w formie gór stołowych i dużych zagłębień. Zagłębienia te będące kanałami erozyjnymi wyżłobionymi w plejstocenijskich okresach pluwialnych, tworzą szerokie, na ogół płaskie obszary wskazujące na dojrzały etap erozji. Wypełnienie tych zagłębień stanowi piasek i osady pelityczne o znacznej miąższości. Drenaż w zachodniej części tej prowincji fizjograficznej prowadzi do Zatoki Akaba. We wschodniej części kierunek drenażu zmienia się na południowo-wschodni (Bender, 1975).

Płaskowyż centralny (The Central Plateau) – od zachodu ograniczony jest skłonem wyżyn i gór (Highlands at the Eastern Edge of the Wadi Araba-Jordan Graben), od południa i południowo-wschodu brzegiem skarpy Ra's an Naqb oraz Południową Pustynią Górską (The Southern Mountainous Desert). W kierunku południowo-wschodnim obszar ten kontynuuje się na terenie Arabii Saudyjskiej, a od północno-wschodu przechodzi w obszar obniżenia Al Azraq-Wadi Sirhan Depression (Fig. 1). Poziome lub słabo nachylone warstwy wapieni i margli z czertami wieku górnej kredy i dolnego trzeciorzędu tworzą skarpy płaskowyżu i płaskie ostańce skalne. Są one częściowo przykryte i otoczone gru-

in the western part of this physiographic province leads to the Gulf of Aqaba, while in the eastern part, the drainage direction shifts to the southeast (Bender, 1975).

The Central Plateau is bounded on the west by the slopes of the highlands and mountains (Highlands at the Eastern Edge of the Wadi al'Arabah-Jordan Graben), to the south and southeast by the escarpment edge of Ra's an Naqb, and by the Southern Mountainous Desert. To the southeast, it continues into the area of Saudi Arabia, and from the northeast, it transitions into the Al Azraq-Wadi Sirhan Depression (Fig. 1). Horizontal or gently sloping layers of limestone and marl containing deposits from the Late Cretaceous and Lower Tertiary periods form the escarpments of the plateau and flat rock outcrops. These mesas are partially covered and surrounded by weathering debris. The mesas reach an elevation of about 1000 m above sea level (Bender, 1975). In the southern part of the plateau, the terrain descends to an elevation of approximately 500-850 m above sea level, creating an endorheic basin known as Al Jarf (Bender, 1975; Davis, 2005). It is characterized by a gently sloping surface, within which there are horizontally layered light clayey-silty deposits with crystal-

zem wietrzeniowym. Ostańce osiągają wysokość około 1000 m nad poziomem morza (Bender, 1975). W południowej części płaskowyżu teren obniża się do wysokości około 500-850 m n.p.m. tworząc bezodpływowy basen zwany Al Jarf (Bender, 1975; Davis, 2005). Charakteryzuje się on łagodnie nachyloną powierzchnią, w obrębie której występują poziomo zalegające, jasne osady ilasto-muliste z wykrystalizowanymi solami. Są one osadami efemerycznych jezior typu *playa* powstającymi w okresach zimowych, wilgotnych (Davis, 2005)

Depresja Azraq-Wadiego Sirhan (Azraq-Wadi Sirhan Depression) to obszar, w którym oś obniżenia stopniowo wznosi się od 500 m do 700 m na południowym wschodzie. Zagłębienie to zbiera wodę z sąsiednich dolin i miało w przeszłości ogromne znaczenie dla nomadów. Był to ważny szlak handlowy pomiędzy Wyżyną a Półwyspem Arabskim. Obecnie jest to istotny rejon ze względu na występowanie niewielkich złóż ropy naftowej (Lüning, Kuss, 2014).

Północno-wschodnia pustynia (North-Eastern Desert) – znana jest także jako region Badiya (Ababsa 2013). Obejmuje ona dwa obszary tj. północno-wschodni płaskowyż bazaltowy (Northeast Jordan Basalt Plateau) i północno-wschodni płaskowyż węglanowy (Northeast Jordan Limestone Plateau) (Rys. 1). Płaskowyż bazaltowy zajmuje obszar około 11000 km<sup>2</sup>. Często określany jest w języku arabskim jako Harrat al-Shaba, co oznacza Czarna Pustynia. Budują go pokrywy law bazaltowych, rzędy wulkanów, które tworzą szeregi izolowanych wzgórz. Generalnie teren jest płaski, a wysokość zmniejsza się od 1100 m n.p.m. na północy przy granicy z Syrią do 500-550 m n.p.m. na południu przy granicy z Arabią Saudyjską. Kierunek drenażu w części zachodniej jest skierowany na południe i południowy-zachód do depresji Azraq-Wadiego Sirhan, a w części wschodniej płaskowyżu biegnie w kierunku południowo-wschodnim i wschodnim (Bender, 1975). Północno-wschodni płaskowyż węglanowy posiada monotony, prawie płaski krajobraz. Obszar ten niemal w całości zbudowany jest z wapiennych i krzemionkowych skał osadowych paleogenu, lokalnie występują również skały wapienne i piaszczyste neogenu oraz nieskonsolidowane osady czwartorzędowe. Drenaż na tym obszarze pokrywa się z osłabieniami strukturalnymi i jest generalnie ukierunkowany na północny-zachód (Bender, 1975).

Klimat Jordanii jest określany jako przejściowy od śródziemnomorskiego po suchy, (Ababsa, 2013; Abu-Ghazalah i in., 2011, Al-Homoud i in., 1995). Obszar doliny ryftowej Wadi al'Arabah i Jordanu oraz wyżyn na wschód od doliny ryftowej charakteryzuje się klimatem śródziemnomorskim, z suchym i gorącym latem oraz łagodną zimą. Pozostałe tereny obejmujące wschodnią część Jordanii cechuje klimat pustynny z bardzo gorącym, suchym i zapyłonym latem oraz suchą zimą. Ilość opadów maleje z północy na południe i z zachodu na wschód (Rys. 3).

lized salts. These are deposits of ephemeral playa lakes that form during winter wet periods (Davis, 2005).

The Azraq-Wadi Sirhan Depression is an area where the axis of depression gradually rises from 500 m to 700 m in the southeast. This basin collects water from neighboring valleys and has historically been of great importance to nomads. It served as a vital trade route between the Highlands and the Arabian Peninsula. Today, it is an important region due to the presence of small oil reserves (Lüning, Kuss, 2014).

North-Eastern Desert – also known as the Badiya region (Ababsa, 2013). It encompasses two areas: the Northeast Jordan Basalt Plateau and the Northeast Jordan Limestone Plateau (Fig. 1). The basalt plateau covers an area of approximately 11,000 km<sup>2</sup>. It is often referred to in Arabic as Harrat al-Shaba, meaning Black Desert. It consists of basalt lava flows and rows of volcanoes that form isolated hills. Generally, the terrain is flat, with elevation decreasing from 1,100 m above sea level in the north, at the border with Syria, to 500-550 m above sea level in the south, at the border with Saudi Arabia. The drainage direction in the western part is south and southwest toward the Azraq-Wadi Sirhan Depression, while in the eastern part of the plateau, it flows southeast and eastward (Bender, 1975). The Northeast Jordan Limestone Plateau features a monotonous, almost flat landscape. This area is almost entirely composed of Paleogene limestone and siliceous sedimentary rocks, with locally occurring Neogene limestone and sandy rocks, as well as unconsolidated Quaternary sediments. The drainage in this area corresponds to structural weaknesses and is generally directed northwestward (Bender, 1975).

The climate of Jordan is characterized as transitional from Mediterranean to arid (Ababsa, 2013; Abu-Ghazalah et al., 2011; Al-Homoud et al., 1995). The area of the Wadi al'Arabah and Jordan Rift Valley, as well as the highlands to the east of the rift valley, features a Mediterranean climate characterized by dry and hot summers and mild winters. The remaining areas, which include the eastern part of Jordan, exhibit an arid desert climate with very hot, dry, and dusty summers and dry winters. Precipitation decreases from north to south and from west to east (Fig. 3).

### 3. GEOLOGY

Jordan is located along the northwestern edge of the Arabian Plate (Fig. 4). In the southern part of Jordan (the Wadi al'Arabah region), the Arabian-Nubian Shield (ANS) is exposed (Alnawafleh et al., 2013). The Arabian Plate is one of the smaller and younger lithospheric plates on Earth. Initially, it was part of a larger African plate, from which it gradually separated due to tectonic movements. During the Miocene (about 20-30 million years ago), the Arabian Plate began to separate from the African Plate, creating fractures and rifts

### 3. GEOLOGIA

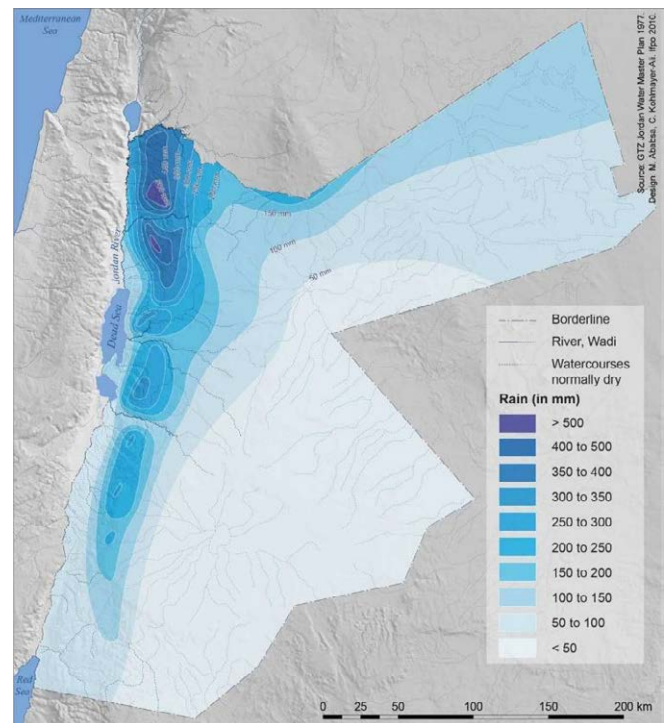
Jordania leży wzdłuż północno-zachodniego krańca platformy arabskiej (Arabian Plate) (Rys. 4). W południowej części Jordanii (rejon Wadi al'Araba) odsłania się Arabsko-Nubijska tarcza (Arabian Nubian Shield - ANS (Alnawafleh i in., 2013)). Płyta Arabska jest jedną z mniejszych i młodszych płyt litosferycznych Ziemi. Początkowo była ona częścią większej płyty afrykańskiej, z której stopniowo oddzielała się na skutek ruchów tektonicznych. W okresie miocenu (około 20-30 milionów lat temu) Płyta Arabska zaczęła oddzielać się od Płyty Afrykańskiej, tworząc pęknięcia i rozłamy, które z czasem doprowadziły do powstania Zatoki Adeńskiej i Morza Czerwonego (Stern, Johnson, 2010). Płyta składa się z krystalicznego podłoża odsłaniającego się na powierzchni wzdłuż wybrzeża Morza Czerwonego, gdzie tworzy tarczę arabską i nubijską (Rys. 4). Większość skał tej płyty datuje się na neoproterozoik (1000–540 mln lat) i stanowią one podłoże dla osadów fane-rozoicznych o miąższości do 10 km oraz pokryw bazaltowych wieku kenozoicznego (harrat) (Stern, Johnson, 2010).

#### 3.1. ZARYS LITOLOGII

##### Proterozoik

Najstarsze skały wieku dolnoprotetozoicznego występują na powierzchni w południowej części Jordanii w rejonie Akaby (Rys. 5). Tworzą one tzw. granitowy kompleks Akaby, który należy do tarczy arabsko – nubijskiej (Abdallah, Abu-Hamatteh, 2007; Alnawafleh, 2013; Bandel, Salameh, 2013). Kompleks ten budują gabra, dioryty kwarcowe, granodiority oraz granity, które stanowią północno-zachodni fragment tarczy arabskiej (Bender, 1974; Stern, Johnson, 2010; Jarrar i in., 2003). Towarzyszą im wysoko zmetamorfizowane, granatowo-biotytowe gnejsy, biotytowo- hornblendowe gnejsy i łupki biotytowe. Występują one w formie bloków ostańców w obrębie skał magmowych. Całość pocięta jest licznymi dajkami o rozciągłości głównie NW których gęstość występowania zmniejsza się w kierunku wschodnim. Dajki te intrudowały w kilku fazach, a ich skład petrologiczny jest bardzo zróżnicowany (Bender, 1975).

Górnoprotetozoiczne skały oddzielone są powierzchnią erozyjną od skał magmowych (dolnoprotetozoicznych). Reprezentowane są przez zlepionce formacji Saramuj i serię łupkowo – szarogłazową (Bender, 1975). Odsłaniają się one lokalnie we wschodniej części doliny Wadi al 'Arabah. Otoczaki w zlepioncach są dobrze obtoczone i zbudowane z fragmentów starszych skał magmowych i metamorficznych spojonych arkozowym piaskiem i przeławicone z piaskowcami arkozowymi. Wykazują one ślady słabego metamorfizmu i są silnie pofałdowane. Pokryte są zgodnie zalegającą serią łupkowo – szarogłazową składającą się z zielonych i czerwono – brązowych, zsylikowanych piaskowców i łupków krzemionkowych. Obie formacje posiadają sumaryczną miąż-



Rys. 3. Mapa średnich opadów w Jordanii (wg Ababsa, 2013).

Fig. 3. Map of average rainfall in Jordan (after Ababsa, 2013).

that eventually led to the formation of the Aden Gulf and the Red Sea (Stern, Johnson 2010). The plate consists of crystalline basement rock exposed along the coast of the Red Sea, where it forms the Arabian and Nubian shields (Fig. 4). Most of the rocks in this plate date back to the Neoproterozoic (1000–540 million years) and serve as a substrate for Phanerozoic sediments with a thickness of up to 10 km, as well as Cenozoic basaltic covers (harrat) (Stern, Johnson, 2010).

#### 3.1. OVERVIEW OF LITHOLOGY

##### Proterozoic

The oldest rocks of lower Proterozoic age are found at the surface in the southern part of Jordan, in the Aqaba region (Fig. 5). They form the so-called Aqaba Granite Complex, which belongs to the Arabian-Nubian Shield (Abdallah, Abu-Hamatteh, 2007; Alnawafleh, 2013; Bandel and Salameh, 2013). This complex consists of gabbros, quartz diorites, granodiorites, and granites, which form the northwestern part of the Arabian Shield (Bender, 1974; Stern and Johnson, 2010; Jarrar et al., 2003). It is accompanied by highly metamorphosed garnet-biotite gneisses, biotite-hornblende gneisses, and biotite shales. These occur in the form of outcrop blocks within the igneous rocks. The entire area is cut by numerous dikes mainly extending NW, with a decreasing density of occurrence toward the east. These dikes intruded in several phases, and their petrological composition is highly varied (Bender, 1975).

The Upper Proterozoic rocks are separated from the magmatic rocks (Lower Proterozoic) by an erosional surface.

szość około 400 m i pocięte są licznymi diabazowymi, porfirowymi i kwarcowo – porfirowymi dajkami (Bender, 1975; Bandel, Salameh, 2013).

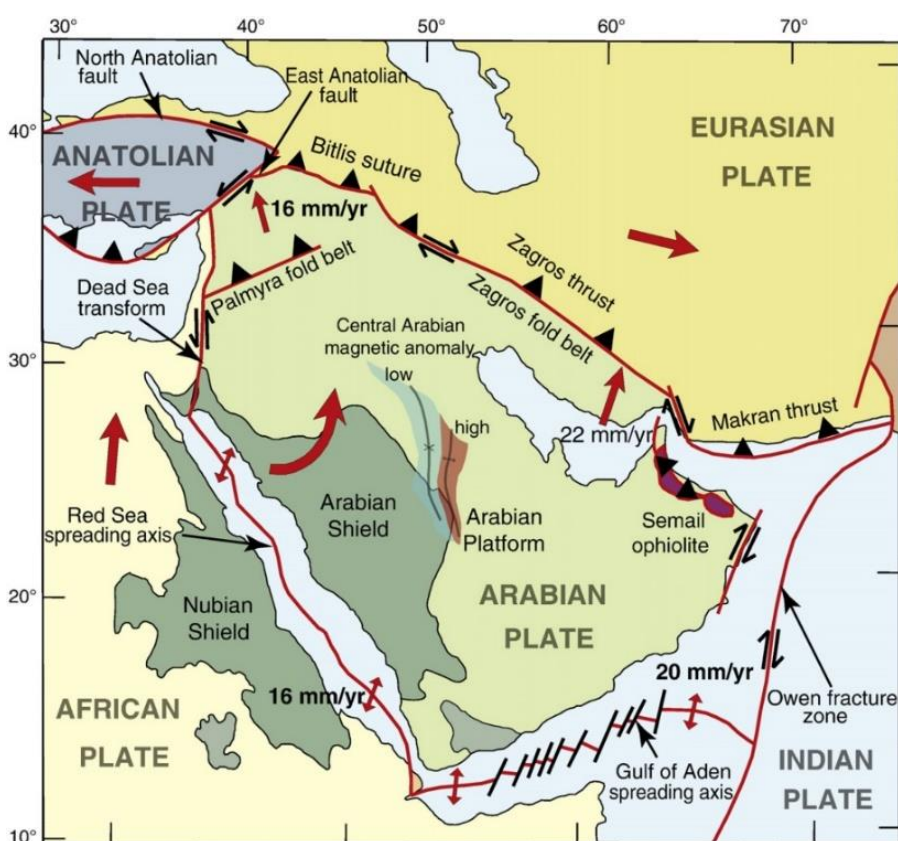
### Paleozoik

Młodsze utwory (paleozoiczne), należące do kambru, odsłaniają się pasmem od południa do okolic Morza Martwego wzdłuż wschodniego brzegu doliny Wadi al 'Arabah. Leżą one na utworach starszych z wyraźną niezgodnością kątową. Sekwencję osadów rozpoczynają zlepieńce reprezentujące środowisko lądowe. Ich miąższość sięga do około 50 m i wypełniają one pradoliny na spenepienionych starszych utworach. Powyżej zalega kompleks piaskowców wietrzejących na kolor czerwono – brązowy lub jasnoszary, które są na przemian lądowego lub morskiego pochodzenia (Bender, 1975; Bandel, Salameh, 2013; Powell i in., 2014). Miejscami są one zastępowane przez morskie sekwencje dolomityczno – wapienno – łupkowe.

Osady ordowiku, podobnie jak kambru, reprezentowane są głównie przez skały piaszczyste. Zalegają one zgodnie na utworach kambru i reprezentują zmieniające się środowisko kontynentalne i morsko – deltowe (Bender, 1975; Bandel, Salameh, 2013). Piaskowce mają ziarna od grubo- do drobnodziarnistych i są różnie wysortowane, w kolorach od jasnoszarego, czerwono-brązowego, przez szaro-beżowy, po biały, niekiedy różowy. Przekładane są łupkami często skrzemionkowanymi. W piaskowcach i łupkach licznie występują skamieniałości co pozwoliło na ich dobre rozpoziomowanie (Bender, 1975; Bandel, Salameh, 2013). W górnej części profilu stwierdzono występowanie bardzo drobnodziarnistych piaskowców i łupków ilastych, które zawierają przerosty gipsów i soczewki soli kamiennej o miąższości około 1 cm.

Położona w skalnej dolinie Petra, została wykuta w dwóch formacjach paleozoicznych piaskowców: kambryjskiej formacji Um Ishrin i formacji Disi datowanej na ordowik. Piaskowce z formacji Um Ishrin cechuje czerwono-brunatna barwa i silna cementacja. Natomiast białe piaskowce formacji Disi są miękkie i charakteryzują się zaokrąglonymi krawędziami w wyniku wietrzenia (Barjous, 2003; Abu-Jaber i in., 2020). Piaskowce obydwu formacji można sklasyfikować jako kwarcowe arenity (Powell i in., 2014).

Osady sylurskie zalegają zgodnie na utworach ordowiku i reprezentowane są głównie przez serię piaskowców przekła-



Rys. 4. Uproszczona mapa platformy arabskiej z granicami płyt (czerwone linie), przybliżonymi wektorami zbieżności płyt (strzałki) i głównymi cechami geologicznymi (wg Stern i Johnson, 2010).

Fig. 4. Simplified map of the Arabian Plate, with plate boundaries (red lines), approximate plate convergence vectors (arrows), and principal geologic features (after Stern & Johnson, 2010).

They are represented by the conglomerates of the Saramuj formation and a shale-graywacke series (Bender, 1975). They are locally exposed in the eastern part of the Wadi al'Arabah valley. The pebbles in the conglomerates are well-rounded and composed of fragments of older magmatic and metamorphic rocks, cemented with arkosic sand and interlayered with arkosic sandstones. They show signs of weak metamorphism and are strongly folded. They are covered by a conformably lying series of shale-graywacke, consisting of green and reddish-brown siliceous sandstones and siliceous shales. Both formations have a total thickness of about 400 m and are intruded by numerous diabase, porphyry, and quartz-porphyry dikes (Bender, 1975; Bandel, Salameh, 2013).

### Paleozoic

Younger formations from the Paleozoic era, specifically the Cambrian period, are exposed in a belt stretching from the south to the vicinity of the Dead Sea along the eastern edge of the Wadi al 'Arabah valley. These formations rest on older layers, characterized by a distinct angular unconformity. The sediment sequence begins with conglomerates that indicate a terrestrial environment, reaching a thickness of approximately 50 meters as they fill the paleo-valleys formed in the pene-

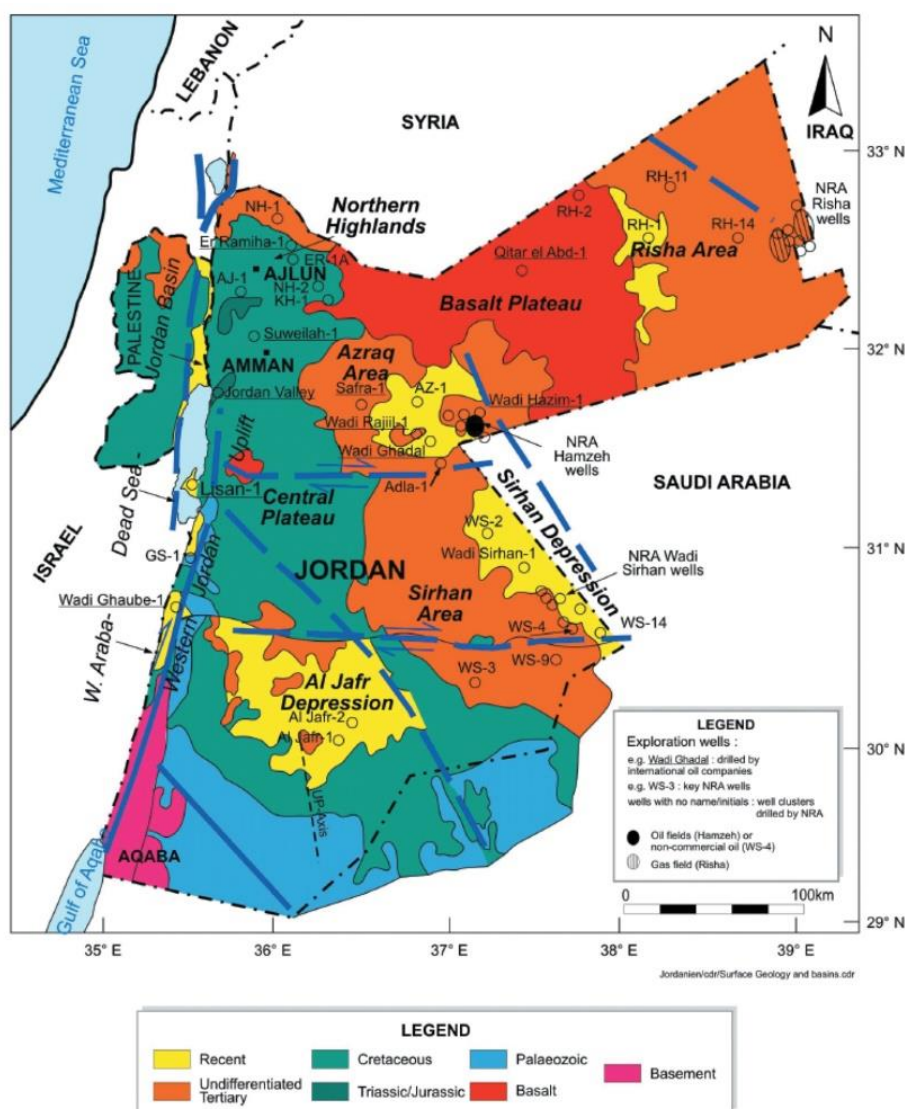
danych łupkami piaszczystymi. W dolnej części są to drobnoziarniste, faliście warstwowane piaskowce i łupki z dużą ilością skamieniałości (Bender, 1975; Bandel, Salameh, 2013). Ku górze przechodzą one w czerwono-brązowe gruboziarniste piaskowce przekładane drobnoziarnistymi piaskowcami i łupkami reprezentujące początkowo środowisko lądowe a następnie morskie.

Górno-paleozoiczne skały osadowe (dewon – dolny perm) nie odsłaniają się w Jordanii na powierzchni i znane są tylko fragmentarycznie z odwiertów oraz z wychodni w państwach sąsiednich (Bender, 1975; Bandel, Salameh, 2013). Dolno-dewońskie osady złożone są głównie z naprzemianległych zespołów warstwowanych piaskowców, łupków piaszczystych, wapieni oraz wapieni dolomitycznych o łącznej miąższości około 200 m (Bender, 1975). Utwory karbońskie reprezentowane są przez mikowe i piaskowce, łupki piaszczyste i zanieczyszczone wapienie o miąższości przekraczającej 200 m.

Górno-permskie osady odsłaniają się w północnym zboczu doliny Morza Martwego (Bandel, Salameh, 2013). Są

planed older rocks. Above these conglomerates lies a complex of weathered sandstones, which display a color palette of red-brown to light gray, with origins alternating between terrestrial and marine (Bender, 1975; Bandel and Salameh, 2013; Powell et al., 2014). In some areas, these sandstones are replaced by marine sequences of dolomitic limestone and shale.

The Ordovician sediments, similar to those of the Cambrian, are primarily represented by sandstone. These layers conformably overlie Cambrian formations, reflecting a changing continental and marine-deltaic environment (Bender, 1975; Bandel, Salameh, 2013). The sandstones vary from coarse to fine-grained and are poorly to well-sorted, exhibiting colors such as light gray, red-brown, gray-beige, or white, and occasionally pink. They are interbedded with shales, often siliceous. Abundant fossils within the sandstones and shales have facilitated their precise stratigraphic correlation (Bender, 1975; Bandel, Salameh, 2013). In the upper part of the profile, very fine-grained sandstones and clay shales containing gyp-



Rys. 5. Mapa geologiczna Jordanii (wg. Lüning i Kuss, 2014).

Fig. 5. Geological map of Jordan (after Lüning & Kuss, 2014).

to osady o miąższości 85 m składające się w dolnej części z gruboziarnistych, zlepieńcowatych piaskowców przechodzących ku górze w średnio- i drobnoziarniste piaskowce. W wyższej części profilu piaskowce zanikają i przechodzą w czerwone do szarych mułowce, a w najwyższej części w ciemnoszare i zielonkawe iłowce z szczątkami roślin i przerostami węgla.

### Mezozoik

Mezozoiczne skały pokrywają znaczą część Jordanii (Rys. 5) (m.in. Alnawafleh i in., 2013; Bender, 1975). Reprezentowane są przez osady triasu, jury i kredy. Utwory triasu odsłaniają się w centralnej części wschodniego brzegu doliny Morza Martwego. Wykształcone są w postaci kompleksu żółto – brązowych, drobnoziarnistych piaskowców i łupków przekładanych drobno- do grubo- ziarnistymi piaskowcami oraz szaro – zielonymi łupkami i czerwono – fioletowymi łupkami piaszczystymi o miąższości około 150 m. Reprezentują one zmieniające się środowisko lądowe, lagunowe, litoralne do nerytycznego. W kierunku północnym miąższość tego kompleksu wzrasta do 280 m, wydatniej zaznacza się udział osadów morskich i pojawiają się także osady gipsowe.

Jurajskie skały mają mniejszy zasięg w kierunku południowym niż osady triasu (Bender, 1975). Złożone są z wapieni, zapiaszczonych margli i piaskowców reprezentujących środowisko od litoralnego do nerytycznego. Łączna miąższość tych utworów w miejscach wychodni sięga około 360 m, a w kierunku północnym i zachodnim wzrasta do 2000 m.

Dolno-kredowe skały odsłaniają się jedynie w wyniesieniach strukturalnych w Północnej Jordanii oraz na wschód od doliny ryftowej wzdłuż skarpy Ra's an Naqb. Reprezentowane są przez wapniste piaskowce, od grubo do drobnoziarnistych piaskowców, łupki piaszczyste i zapiaszczone margle. Górno-kredowe osady pokrywają większą część grzbietu górskiego i Central Plateau (środkowa wyżyna). Tworzą je w północnej i centralnej części wapienie, wapienie dolomityczne, margle, łupki miejscami z warstwami gipsu. W kierunku południowym facja wapienna zostaje zastąpiona przez osady piaszczyste reprezentujące środowisko kontynentalne. Z punktu widzenia gospodarczego dla Jordanii ważne są górnokredowe fosforyty (kampan i mastrycht) o miąższości dochodzącej do 90 m. Seria fosforonośna składa się z drobno warstwowanych, w różnym stopniu skrzemionkowanych wapieni, w których fosforyty tworzą soczewki i warstwy (Bender, 1975).

### Kenozoik

Osady ery kenozoicznej stanowią kontynuację sedymentacji górnokredowej. Osady paleocenu i eocenu pokrywają znaczny obszar na północy, północnym – wschodzie i wschodzie Jordanii oraz wzdłuż wschodniej części doliny ryftowej Wadi al 'Arabah. Budują je drobnowarstwowane wapienie

sum layers and lenticular salt deposits, approximately 1 cm thick, have been identified.

Located in the rocky valley, Petra was carved from two Paleozoic sandstone formations: the Cambrian Um Ishrin formation and the Ordovician Disi formation. The sandstones from the Um Ishrin formation are characterized by a reddish-brown color and strong cementation. In contrast, the white sandstones of the Disi formation are soft and feature rounded edges due to weathering (Barjous, 2003; Abu-Jaber et al., 2020). The sandstones of both formations can be classified as quartz arenites (Powell et al., 2014).

Silurian deposits lie conformably on Ordovician formations and are mainly represented by a series of sandstones interbedded with sandy shales. In the lower part, there are fine-grained, wavy-bedded sandstones and shales with a large number of fossils (Bender, 1975; Bandel, Salameh, 2013). Towards the top, they transition into red-brown, coarse-grained sandstones, which are interbedded with fine-grained sandstones and shales, initially representing a terrestrial environment and later a marine one.

The Upper Paleozoic sedimentary rocks (Devonian – Lower Permian) do not appear at the surface in Jordan and are known only fragmentarily from boreholes and outcrops in neighboring countries (Bender, 1975; Bandel, Salameh, 2013). The Lower Devonian deposits consist mainly of alternating layers of sandstones, sandy shales, limestones, and dolomitic limestones with a total thickness of approximately 200 meters (Bender, 1975). The Carboniferous formations are represented by micaceous sandstones, sandy shales, and impure limestones, with a thickness exceeding 200 meters.

Upper Permian deposits are exposed on the northern slope of the Dead Sea valley (Bandel, Salameh, 2013). They have a thickness of 85 meters and consist, in the lower part, of coarse-grained, conglomeratic sandstones, which transition upwards into medium- and fine-grained sandstones. In the higher part of the profile, the sandstones disappear, giving way to reddish to gray siltstones, and in the uppermost part, to dark gray and greenish clay-stones with plant remains and coal intercalations.

### Mesozoic

Mesozoic rocks cover a significant part of Jordan (Fig. 5) (e.g., Alnawafleh et al., 2013; Bender, 1975). They are represented by Triassic, Jurassic, and Cretaceous sediments. Triassic formations are exposed in the central part of the eastern shore of the Dead Sea valley. These formations are developed as a complex of yellow-brown, fine-grained sandstones and shales interbedded with fine- to coarse-grained sandstones, along with gray-green shales and red-purple sandy shales, with a thickness of approximately 150 meters. They represent a changing environment ranging from terrestrial, lagoonal, litoral, to neritic. Toward the north, the thickness of this com-

i czerty, wapienie numulitowe, margle, margle z barytem i bituminami.

Oligoceńskie i miocene osady pokrywają niezgodnie osady paleocenu i eocenu (Bender, 1975). Reprezentują one inne środowisko sedymentacji, gdzie w profilu przeważają piaskowce zlepieńcowate, zlepieńce, piaskowce glaukonitowe, wapienie i wapienie piaszczyste. W wyższej części profilu pojawiają się w dolinie Wadi Al'Araba syntektoniczne zlepieńce przekładane piaskowcami, marglami, łupkami, gipsowymi łupkami i wapieniami. Osady te wskazują na ruchy obniżające dno doliny ryftowej a ich wiek jest szacowany na podstawie szczątków organicznych jest od oligocenu po górny neogen (Bender, 1975).

Odminną sedymentację obserwuje się w dolinie ryftowej co było wynikiem ruchów tektonicznych. Na północ od doliny Wadi Al'Araba, w dolinie Jordanu, która reprezentuje najgłębszą część doliny ryftowej, osady podzielone zostały na 3 główne serie (Zak, Freund, 1981, García-Veigas i in., 2009): (1) osady rzeczno-jeziorne formacji Hazeva (miocen); (2) margle morskie utworów formacji Bira-Lido-Gesher w rejonie północnym i ewaporaty formacji Sedom na południu (pliocen – wczesny plejstocen); (3) osady rzeczno-jeziorne formacji Amora i Lisan (od plejstocenu do obecnych czasów).

Osady formacji Hazeva reprezentowane są przez utwory klastyczne takie jak: piaskowce, zlepieńce, ily. Drugi typ tworzą węglanowe osady jeziorne jak margle i wapienie (Calvo, Bartov, 2001; Calvo i in., 1996; Longstaffe i in., 2003; Zak, Freund, 1981). Są to osady rzeczne i jeziorne sięgające na południe od Morza Martwego około 2000 m miąższości (Zak, Freund, 1981).

Kolejne serie, tj. formacje Bira-Lido-Gesher i Sedom powstałe w jednym basenie sedymentacyjnym są prawie równiekowe, a zmienność osadów wynika z rozwoju i paleogeografii basenu. W okresie pliocenu wody z Morza Śródziemnego przedostały się w głąb lądu przez dolinę Yezreel do doliny ryftowej zajmując obszar od jeziora Tyberiadzkiego do rejonu na południe od dzisiejszego Morza Martwego (Rys. 6). Formacja Bira-Lido-Gesher rozwinięta jest w północnej części zajmowanego obszaru i poprzedza depozycję soli formacji Sedom (Zak, Freud, 1981). Reprezentowana jest głównie przez osady margliste. Formacja Sedom to osady ewaporatowe powstałe w suchym klimacie w południowej, głębszej części basenu. W najgłębszej części basenu wykształcone są jako warstwy soli kamiennych miejscami z solami potasowo-magnezowymi. Ich miąższość przekracza 2000 m (García-Veigas i in., 2009). Pod wpływem obciążenia nadkładem formacja Sedom uległa w późniejszym okresie ruchom halokinecznym tworząc na zachodnim brzegu Morza Martwego wysad Sedom (Weinberger i in., 2006, 2007; Zak i Freud, 1981). Po wschodniej stronie Morza Martwego, w rejonie półwyspu Lisan także występuje wysad solny, ale nie przebijający się na powierzchnię.

plex increases to 280 meters, with a greater presence of marine sediments, and gypsum deposits also appear.

Jurassic rocks have a smaller extent to the south compared to Triassic deposits (Bender, 1975). They consist of limestones, sandy marls, and sandstones, representing environments ranging from littoral to neritic. The total thickness of these formations at the outcrops reaches approximately 360 meters, and towards the north and west, it increases to 2,000 meters.

Lower Cretaceous rocks are exposed only in structural uplifts in Northern Jordan and to the east of the rift valley along the Ra's an Naqb escarpment. They are represented by calcareous sandstones, ranging from coarse- to fine-grained sandstones, sandy shales, and sandy marls. Upper Cretaceous deposits cover a larger part of the mountain ridge and the Central Plateau (central highlands). In the northern and central parts, they consist of limestones, dolomitic limestones, marls, shales, and locally, layers of gypsum. Toward the south, the limestone facies is replaced by sandy deposits representing a continental environment. From an economic standpoint, the Upper Cretaceous phosphorites (Campanian and Maastrichtian), with a thickness reaching up to 90 meters, are important for Jordan. The phosphate-bearing series consists of finely layered, variably silicified limestones, in which phosphorites form lenses and layers (Bender, 1975).

## Cenozoic

Deposits from the Cenozoic era represent a continuation of Upper Cretaceous sedimentation. Paleocene and Eocene deposits cover a significant area in the north, northeastern, and eastern parts of Jordan, as well as along the eastern section of the Wadi al 'Arabah rift valley. They consist of finely layered limestones and cherts, nummulitic limestones, marls, barite marls, and bituminous materials.

Oligocene and Miocene deposits unconformably overlie Paleocene and Eocene deposits (Bender, 1975). They represent a different sedimentary environment, where the profile is dominated by conglomeratic sandstones, conglomerates, glauconitic sandstones, limestones, and sandy limestones. In the upper part of the profile, in the Wadi Al'Arabah valley, syntectonic conglomerates are interbedded with sandstones, marls, shales, gypsum-bearing shales, and limestones. These deposits indicate subsidence movements of the rift valley floor, and their age, based on organic remains, is estimated to range from the Oligocene to the Upper Neogene (Bender, 1975).

A different sedimentation pattern is observed in the rift valley, which resulted from tectonic movements. North of the Wadi Al'Arabah valley, in the Jordan Valley, which represents the deepest part of the rift valley, the deposits are divided into three main series (Zak, Freund, 1981; García-Veigas et al., 2009): (1) fluvial-lacustrine deposits of the Hazeva Forma-

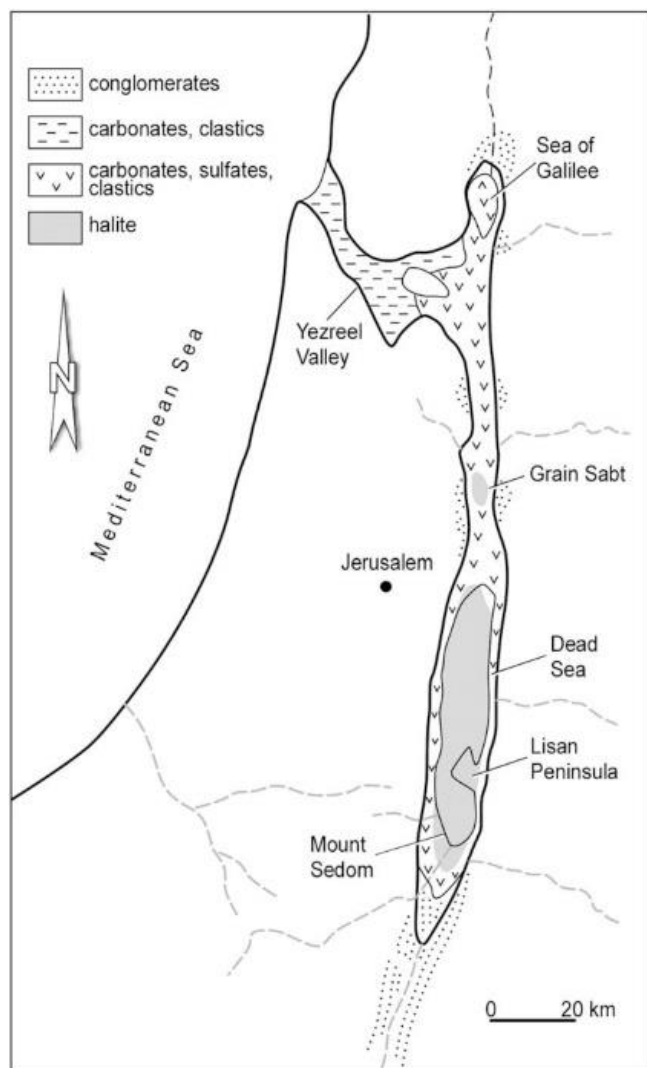
Po oddzieleniu basenu formacji Sedom od Morza Śródziemnego w zagłębieniach tektonicznych doliny ryftowej powstało kilka jezior (Shoval, Zlatkin, 2009). Bezpośrednio nad formacją Sedom zdeponowane zostały osady jeziorne należące do formacji Amora i Lisan (Torfstein i in., 2008, 2009; Shoval, Zlatkin 2009; Weinberger i in., 2006, 2007; Zak, I., Freund, R., 1981; Landmann i in., 2002; Bartov i in., 2002; Kaufman, 1971). Osady formacji Amora w południowej części basenu przy wysadzie Sedom złożone są z margli, kredy, warstw soli kamiennych, piaskowców i zlepieńców (Weinberger i in., 2006). Wiek formacji jest szacowany na około 350 000 – 100 000 lat p.n.e. (Kaufman, 1971; Kaufman i in., 1992). Osady kolejnej formacji Lisan złożone są z aragonitowo – gipsowych warstw przekładanych warstwami iłu i piasku. Powstały one w jeziorze sięgającym od jeziora Tyberiadzkiego na północy po obszar na południe od Morza Martwego (Rys. 7). Osady te datowane są na 70 000 do 14 000 lat p.n.e. (Kaufman, 1971, Schramm i in., 2000; Haase-

tion (Miocene); (2) marine marls of the Bira-Lido-Gesher formations in the northern region and evaporites of the Sedom Formation in the south (Pliocene to Early Pleistocene); (3) river-lake deposits of the Amora and Lisan formations (from the Pleistocene to the present).

The deposits of the Hazeva Formation are represented by clastic materials such as sandstones, conglomerates, and clays. The second type consists of carbonate lake deposits, such as marls and limestones (Calvo, Bartov, 2001; Calvo et al., 1996; Longstaffe et al., 2003; Zak and Freund, 1981). These are river and lake deposits, reaching a thickness of approximately 2,000 meters to the south of the Dead Sea (Zak, Freund, 1981).

The subsequent series, namely the Bira-Lido-Gesher and Sedom formations, formed within the same sedimentary basin and are nearly contemporaneous, with the variability of the deposits arising from the development and paleogeography of the basin. During the Pliocene, waters from the Mediterranean Sea penetrated inland through the Jezreel Valley into the rift valley, occupying an area from the Sea of Galilee to regions south of the present-day Dead Sea (Fig. 6). The Bira-Lido-Gesher Formation is developed in the northern part of the occupied area and predates the deposition of salts in the Sedom Formation (Zak, Freund, 1981). It is primarily represented by marl deposits. The Sedom Formation consists of evaporitic deposits formed in a dry climate in the southern, deeper part of the basin. In the deepest section of the basin, it is characterized by layers of rock salt, occasionally interbedded with potassium and magnesium salts. Its thickness exceeds 2,000 meters (García-Veigas et al., 2009). Under the influence of overburden loading, the Sedom Formation later underwent halokinetic movements, resulting in the formation of the Sedom salt diapir on the western shore of the Dead Sea (Weinberger et al., 2006, 2007; Zak and Freund, 1981). On the eastern side of the Dead Sea, in the Lisan Peninsula region, there is also a salt diapir; however, it does not reach the surface.

After the separation of the Sedom Formation basin from the Mediterranean Sea, several lakes formed in the tectonic depressions of the rift valley (Shoval, Zlatkin, 2009). Directly above the Sedom Formation, lake deposits belonging to the Amora and Lisan formations were deposited (Torfstein et al., 2008, 2009; Shoval, Zlatkin, 2009; Weinberger et al., 2006, 2007; Zak, Freund, 1981; Landmann et al., 2002; Bartov et al., 2002; Kaufman, 1971). The deposits of the Amora Formation in the southern part of the basin near the Sedom diapir consist of marls, chalks, layers of rock salt, sandstones, and conglomerates (Weinberger et al., 2006). The age of the formation is estimated to be around 350,000 to 100,000 years B.C. (Kaufman, 1971; Kaufman et al., 1992). The deposits of the subsequent Lisan Formation are composed of aragonitic and gypseous layers interbedded with layers of clay and sand.

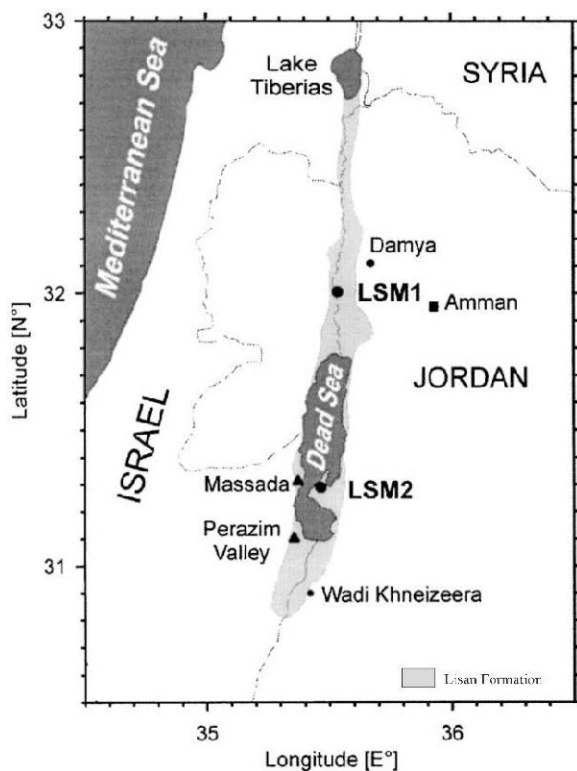


**Rys. 6.** Mapa rozwoju i rozmieszczenia facji plioceńskiej laguny Sedomskiej (wg. García-Veigas i in., 2009; Zak i Bentor, 1972).

**Fig. 6.** Map of the development and distribution of the Pliocene facies of the Sedom Lagoon (after García-Veigas et al., 2009; Zak & Bentor, 1972).

-Schramm i in., 2004; Shoval, Zlatkin, 2009; Weinberger i in., 2007). Powstały one w jeziorze, którego poziom wód ulegał zmianom w czasie i sięgał maksymalnie do -130 m n.p.m. (Landmann i in., 2002). Zmiany te spowodowane były zmieniającymi się warunkami klimatycznymi. Kontynuacją sedimentacji formacji Lisan są osady formacji Damya o miąższości do 10 m (Landmann i in., 2002). Złożone są ciemnych, laminowanych iłowców i mułwców przewarstwionych nieulawicznymi piaskami.

Pozostałością po jeziorze Lisan jest jezioro Tyberiadzkie i Morze Martwe. Morze Martwe stanowi bardzo atrakcyjny turystycznie rejon. Jest to najniższe położone miejsce na Ziemi. Dzięki wysokiemu zasoleniu, które jest prawie dziesięciokrotnie wyższe niż w normalnej wodzie morskiej, ludzie mogą swobodnie unosić się na powierzchni Morza Martwego. To niezwykle doświadczenie przyciąga wielu turystów, którzy chcą poczuć, jak to jest pływać bez wysiłku. Ponadto woda i błoto z Morza Martwego są bogate w pierwiastki, takie jak magnez, potas i brom. Uznaje się, że mają one właściwości lecznicze i pielęgnacyjne, pomagając w leczeniu różnych schorzeń skóry, takich jak łuszczyca, oraz przynosząc ulgę w bólach stawów.



Rys. 7. Mapa zasięgu formacji Lisan (wg. Landmann i in., 2002).

Fig. 7. Distribution of Lisan Formation (after Landmann et al., 2002).

Obecnie Morze Martwe tworzy bezodpływowy zbiornik o długości około 80 km i szerokości około 15 km (Rys. 8). Rozdzielony jest na dwie części półwyspem Lisan, który jest wyniesieniem spowodowanym ruchami mas solnych tworzą-

They formed in a lake that extended from the Sea of Galilee in the north to areas south of the Dead Sea (Fig. 7). These deposits date back to 70,000 to 14,000 years B.C. (Kaufman, 1971; Schramm et al., 2000; Haase-Schramm et al., 2004; Shoval, Zlatkin, 2009; Weinberger et al., 2007). They formed in a lake whose water level fluctuated over time, reaching a maximum of -130 meters above sea level (Landmann et al., 2002). These changes were caused by varying climatic conditions. The sedimentation of the Lisan Formation continues with the deposits of the Damya Formation, which have a thickness of up to 10 meters (Landmann et al., 2002). These consist of dark, laminated clay stones and mudstones interbedded with sands.

The remnants of Lake Lisan are represented by the Sea of Galilee and the Dead Sea. The Dead Sea is a highly attractive tourist destination, as it is the lowest point on Earth. Due to its high salinity, which is nearly ten times greater than that of normal seawater, people can easily float on the surface of the Dead Sea. This unique experience draws many tourists eager to feel what it's like to swim effortlessly. Additionally, the water and mud from the Dead Sea are rich in elements such as magnesium, potassium, and bromine. These are believed to have therapeutic and cosmetic properties, helping to treat various skin conditions like psoriasis and providing relief for joint pain.

Currently, the Dead Sea forms a closed basin approximately 80 km long and 15 km wide (Fig. 8). It is divided into two parts by the Lisan Peninsula, which is an uplift caused by the movements of salt masses forming a salt dome that does not breach the surface, unlike the Sedom salt dome located on the western side, within Israeli territory (Zak, Freund, 1981; Weinberger et al., 2006; Warren, 2016; García-Veigas et al., 2009; Frumkin, 2009). The southern basin is intensively exploited by Israel and Jordan for the production of rock salt and potassium-magnesium salts in evaporation ponds (Fig. 8). The brine in the ponds is replenished with brine from the northern part of the basin. The main source of fresh water to the Dead Sea is the Jordan River, which flows from the north into the Sea of Galilee and then, exiting to the south, joins the Yarmouk River as it flows southward to the Dead Sea.

The level of the Dead Sea has fluctuated throughout its history due to climatic changes. Frumkin and Elitzur (2002), based on biblical data, geological and morphological evidence, radiocarbon dating ( $^{14}\text{C}$ ), archaeological data, and other sources, identified three distinct periods: 2000–1500 BCE, characterized by a low reservoir level; 1500–1200 BCE, marked by a high water level; and 1000–700 BCE, which again experienced a low sea level. During the first and third periods, the southern basin was likely completely dry at times. Similar findings have been reported by other researchers in this field (e.g., Klein and Flohn, 1987; Kagan et al., 2015; Goldsmith et al., 2023). In modern times, fluctuations in the level of the Dead Sea have been associated with climat-

cych wysad nie przebijający się na powierzchnię w przeciwieństwie do położonego po zachodniej stronie, na terytorium Izraela wysadu Sedom (Zak, Freund, 1981; Weinberger i in., 2006; Warren, 2016; García-Veigas i in., 2009; Frumkin, 2009). Południowy basen jest intensywnie wykorzystywany przez Izrael i Jordanię do produkcji soli kamiennej i potasowo – magnezowej w panwiach (Rys. 8). Solanka w panwiach jest uzupełniana solanką z części północnej basenu. Głównym dopływem wód słodkich do Morza Martwego jest rzeka Jordan. Rzeka ta dopływa od północy do jeziora Tyberiadzkiego z którego na południu wypływa i łącząc się z rzeką Jarmuk płynie ku południowi do Morza Martwego.

Poziom Morza Martwego ulegał wahaniom w historii jego rozwoju w wyniku zmian klimatycznych. Frumkin i Elitzur (2002) w oparciu o dane biblijne, dowody geologiczne i morfologiczne, datowania radiowęglem  $^{14}\text{C}$ , dane archeologicznymi itp. wydzielili trzy okresy, tj. 2000–1500 lat p.n.e o niskim poziomie zbiornika, 1500–1200 lat p.n.e o wysokim poziomie wód i 1000-700 lat p.n.e o ponownie niskim poziomie morza. W okresach pierwszym i trzecim prawdopodobnie zbiornik południowy był okresowo całkowicie wysuszony. Podobne wyniki otrzymali także inni badacze tego tematu (m.in. Klein i Flohn, 1987; Kagan i in., 2015; Goldsmith i in., 2023). W czasach nowożytnych wahania poziomu Morza Martwego były związane z takimi zmianami klimatycznymi jak średniowieczne optimum klimatyczne (The Medieval Warm Period (1150–750 yr cal BP) i mała epoka lodowcowa (Little Ice Age) (Lamb, 1965; Mann i in., 2009; Goldsmith i in., 2023). W XX w. najwyższy poziom Morza Martwego został odnotowany w 1920 roku (–392 m n.p.m.) i od tego czasu obserwuje się stopniowe jego obniżanie (Hassan, Klein, 2002; Warren, 2016). Od 01.10.1976 Rząd Izraela (Rządowy Urząd ds. Wodociągów i Kanalizacji) prowadzi comiesięczne szczegółowe badania poziomu morza (Rys. 9). Z pomiarów tych wynika stopniowe obniżanie się poziomu z bardzo krótkotrwałymi okresami jego niewielkiego wzrostu. Spadek ten jest związany z rosnącym wykorzystaniem wody rzeki Jordan do celów rolniczych i przemysłowych.

**Wulkanizm kenozoiczny.** Podczas trwania górnego neogenu i plejstocenu wulkanizm bazaltowy objął takie obszary Jordanii jak: dolina ryftowa, środkowy i południowy obszar grzbietu górskiego, częściowo na płaskowyż centralny i płaskowyż bazaltowy. W dolinie ryftowej małe obszary występowania bazaltów i tufów zostały stwierdzone pomiędzy Morzem Martwym i Jezioro Tyberiadzkim. Pokrywają one osady dolnego plejstocenu, a pokryte są górnym plejstocenem (formacja Lisan). W rejonie grzbietu górskiego wylewy law bazaltowych i dajki występują pomiędzy Jabal Unayzah na południu do Wadi al Mawjib na północy na obszarze o długości 110 km i szerokości 20 km (Bender, 1975).



**Rys. 8.** Zdjęcie satelitarne Morza Martwego (wg. Google Maps).

**Fig. 8.** Satellite image of the Dead Sea (after Google Maps).

ic changes such as the Medieval Warm Period (1150–750 cal BP) and the Little Ice Age (Lamb, 1965; Mann et al., 2009; Goldsmith et al., 2023). In the 20th century, the highest level of the Dead Sea was recorded in 1920 (–392 m below sea level), and since then, a gradual decline has been observed (Hassan, Klein, 2002; Warren, 2016). Since October 1, 1976, the Israeli government (Government Water and Sewage Authority) has conducted monthly detailed studies of the sea level (Fig. 9). These measurements indicate a steady decline in the water level, with only very brief periods of slight increase. This decline is linked to the growing use of the Jordan River's water for agricultural and industrial purposes.

### Cenozoic Volcanism

During the late Neogene and Pleistocene epochs, basaltic volcanism affected regions of Jordan, including the rift valley, the central and southern areas of the mountain range, and partially the central plateau and basalt plateau. In the rift valley, small areas of basalt and tuff have been identified between the Dead Sea and the Sea of Galilee. These cover the sediments of the lower Pleistocene and are overlain by the upper Pleistocene (Lisan Formation). In the mountain range, basalt lava

Na płaskowyżu centralnym, wzdłuż strefy uskokuwej ciągnącej się od Al Karak do Wadi al Fayba na odcinku ponad 300 km występują pojedyncze wylewy law bazaltowych oraz pojedyncze dajki bazaltowe i dolerytowe. Wylewy te wykształciły system uskokuwej i pokrywają lub przecinają średnio-plejstoceny żwiru.

Największy obszar pokryw bazaltowych występuje w północnej Jordanii tworząc płaskowyż bazaltowy. Na tym obszarze wydzielonych zostało sześć głównych etapów erupcji wulkanicznych (Bender, 1975). Trzy dolne znane są jedynie z odwiertów i tworzą je pokrywy o łącznej miąższości około 150 m. Pokrywy te są oddzielone około 5 m miąższości paleoglebami, czerwonymi ilami i zwietrzalymi bazaltami. Czwarta pokrywa lawowa oddzielona jest od dolnych 6–20 m miąższości paleoglebami i miejscami odsłania się na powierzchni. Wiek tych pokryw określony został na podstawie znajdujących się w spągu i stropie osadów na od górnio-eoceńskiego do miocenu. Piąta pokrywa lawowa posiada największe rozprzestrzenienie i miąższość sięgającą ponad 25 m. Pokryta jest górnoplejstoceny pokrywą zwietrzelinową. Szósta, najmłodsza pokrywa bazaltowa posiada miąższość około 30 m i jej powierzchnia nie wykazuje oznak wietrzenia (Bender, 1975).

### 3.2. TEKTONIKA

W obrębie Jordanii Bender (1975) wyróżnił 4 obszary o zróżnicowanej budowie geologicznej, tj. dolina ryftowa Wadi al ‘Arabah – Jordan (Wadi al ‘Arabah-Jordan rift), tarcza nubijsko – arabska (Nubo-Arabian Shield), tektonika uskokuwej w środkowej i południowo – wschodniej Jordanii

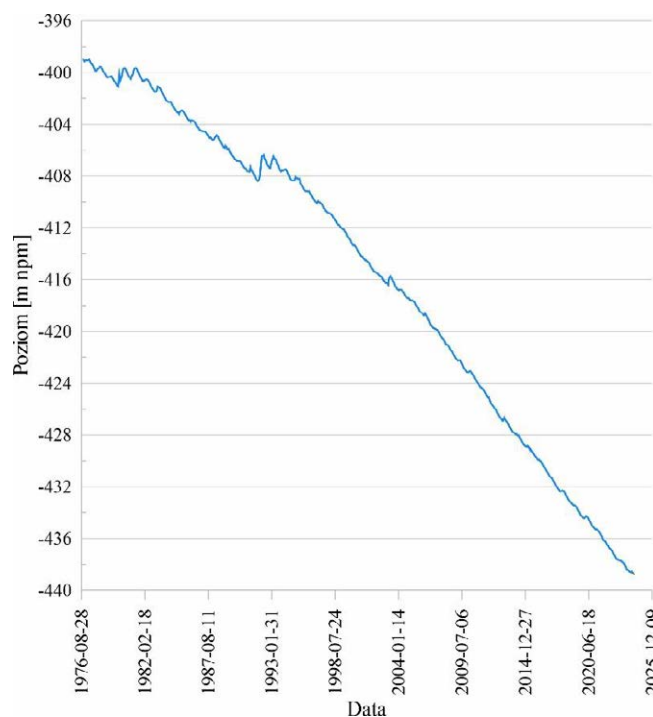
flows and dikes extend from Jabal ‘Unayzah in the south to Wadi al-Mawjib in the north, covering an area approximately 110 km long and 20 km wide (Bender, 1975).

On the central plateau, along the fault zone stretching from Al Karak to Wadi al Fayba over a distance of more than 300 km, there are individual basalt lava flows as well as isolated basalt and dolerite dikes. These flows utilized the fault system and either cover or intersect the Middle Pleistocene gravels.

The largest area of basalt coverage is found in northern Jordan, forming a basalt plateau. Six main stages of volcanic eruptions have been identified in this region (Bender, 1975). The three lower stages are known only from boreholes, consisting of layers with a total thickness of about 150 m. These layers are separated by paleosols, red clays, and weathered basalts, approximately 5 m thick. The fourth lava layer is separated from the lower ones by paleosols with a thickness of 6–20 m and is exposed in places on the surface. The age of these layers has been determined based on sediments found at their base and top, ranging from Upper Eocene to Miocene. The fifth lava layer has the greatest extent, with a thickness exceeding 25 m, and is covered by an upper Pleistocene weathered layer. The sixth and youngest basalt layer has a thickness of about 30 m and shows no signs of weathering on its surface (Bender, 1975).

### 3.2. TECTONICS

Within Jordan, Bender (1975) identified four areas with varied geological structures: the Wadi al ‘Arabah-Jordan Rift, the Nubo-Arabian Shield, the block faulting in central and



Rys. 9. Wykres poziomu Morza Martwego (wg. Rządowy Urząd ds. Wodociągów i Kanalizacji).

Fig. 9. Graph of the Dead Sea level (after the Government Water and Sewerage Authority).

(Block faults in central and southeastern Jordan), wyniesienie, nachylenie i tektonika blokowa w Północnej Jordanii (Upwarping, tilting, and block faulting in northern Jordan).

Dolina ryftowa jest bardzo wyraźnie widoczna w morfologii terenu. Stanowi ona fragment większego systemu uskokuwego ciągnącego się od ryftu Morza Czerwonego po wschodni uskoku brzeżny płyty anatolijskiej i strefy Zagros-Taurus (Rys. 4) na odcinku ponad 1000 km (Stern, Johnson, 2010; Marco, 2007; Garfunkel, 1981). Rozdziela ona Płytę Arabską od Sub-płyty Synaj, a początek ruchów tektonicznych datuje się na miocen. Szerokość doliny wynosi od 5 do 20 km i ograniczona jest uskokami normalnymi, przesuwczymi, o przebiegu N-S. Całkowite przesunięcie w poziomie wschodniej części bloku w kierunku północnym wynosi 105 km a zrzut szacowany jest na kilka kilometrów (Garfunkel 1981; Zain Eldeen i in., 2002). Początek ruchów przesuwczych i obniżających dolinę ryftową przypada na granicę między oligocenem i miocenem a ruchy kontynuują się do czasów obecnych.

W południowej Jordanii występuje północno-zachodni fragment Tarczy Arabskiej. Generalnie tarcza ta złożona jest z trzech terranów łuków wyspowych (Asir, Al-Hijaz i Midyan) i dwóch terranów zbudowanych z skorupy kontynentalnej (Afifi i Ar Rayn) rozdzielonych szwami skorupowymi (Mizerski 2021). W obrębie Jordanii występują skały terranu Midyan. Utwory tarczy stopniowo zapadają w kierunku północnym i wschodnim, gdzie przykryte są skałami osadowymi platformy arabskiej. Skały osadowe generalnie tworzą monoklinę zapadającą w kierunku północnym i wschodnim a ich miąższość wzrasta w tych kierunkach sięgając do 10 km (Stern, Johnson, 2010).

Środkowa i wschodnia część Jordanii posiada budowę blokową z systemami uskokuw głębnych, których aktywność wywarła wpływ na powstawanie skał pokrywy osadowej. Wyróżniono 4 systemy uskokuwe o kierunkach N-S, NE-SW, E-W, NW-SE (Al-Zoubi, 2007). System ten jest związany z poszczególnymi okresami rozwoju budowy geologicznej platformy arabskiej.

Historia tektoniczna Jordanii może być podzielona na trzy odrębne fazy: (1) faza Gondwany, (2) faza Łuku Syryjskiego oraz (3) faza ryftu (Dewey i in., 1973). Podczas fazy Gondwany (kambr-wczesna kreda) Jordania zajmowała pozycję w pobliżu północnej krawędzi paleokontynentu Gondwany. Tektonicznie obszar ten był stosunkowo stabilny, a sedymentacja miała głównie charakter kontynentalny, z niewielkimi, ale rozległymi morskimi transgresjami (Al-Zoubi, Abu-Hammatte, 2009).

Wzorzec sedymentacji z fazy Gondwany kontynuował się w triasie i wczesnej jurze, ale stawał się coraz bardziej morski. Pozycja linii brzegowej od triasu do późnej kredy pozostawała mniej więcej stała w centralnej części Jordanii. Podczas późnej kredy subdukcja oceanicznej litosfery

southeastern Jordan, and the upwarping, tilting, and block faulting in northern Jordan.

The rift valley is clearly visible in the terrain morphology. It forms part of a larger fault system that extends from the Red Sea rift to the eastern boundary fault of the Anatolian plate and the Zagros-Taurus zone (Figure 4) over a distance of more than 1,000 km (Stern, Johnson, 2010; Marco, 2007; Garfunkel, 1981). It separates the Arabian Plate from the Sinai Subplate, with the onset of tectonic movements dating back to the Miocene. The valley's width ranges from 5 to 20 km and is bounded by normal and strike-slip faults oriented in a north-south direction. The total horizontal displacement of the eastern part of the block toward the north is 105 km, while the vertical drop is estimated to be several kilometers (Garfunkel, 1981; Zain Eldeen et al., 2002). The onset of strike-slip and subsiding movements in the rift valley occurred at the boundary between the Oligocene and Miocene and continues to the present day.

In southern Jordan, there is a northwestern fragment of the Arabian Shield. Generally, this shield consists of three island arc terranes (Asir, Al-Hijaz, Midyan) and two terranes built from continental crust (Afifi and Ar Rayn), separated by crustal sutures (Mizerski, 2021). Within Jordan, rocks from the Midyan terrane are present. The shield's formations gradually dip toward the north and east, where they are covered by sedimentary rocks of the Arabian platform. The sedimentary rocks generally form a monocline that dips to the north and east, with thickness increasing in those directions, reaching up to 10 km (Stern, Johnson, 2010).

The central and eastern parts of Jordan have a block structure characterized by subsidence fault systems, which have influenced the formation of the sedimentary cover rocks. Four fault systems have been identified with orientations of N-S, NE-SW, E-W, and NW-SE (Al-Zoubi, 2007). This system is associated with different periods of geological development of the Arabian platform.

The tectonic history of Jordan can be divided into three distinct phases: (1) the Gondwana phase, (2) the Syrian Arc phase, and (3) the rifting phase (Dewey et al., 1973). During the Gondwana phase (Cambrian to Early Cretaceous), Jordan occupied a position near the northern edge of the paleocontinent Gondwana. Tectonically, this area was relatively stable, and sedimentation was primarily continental, with minor but extensive marine transgressions (Al-Zoubi, Abu-Hammatte, 2009).

The sedimentation pattern from the Gondwana phase continued into the Triassic and Early Jurassic but became increasingly marine. The position of the shoreline from the Triassic to the Late Cretaceous remained relatively stable in central Jordan. During the Late Cretaceous, subduction of the oceanic lithosphere of the Neo-Tethys was initiated in the north, resulting in compression along the southern edge of the Neo-Tethys and folding along the trends of the Syrian Arc. Ex-

NeoTetydy została zainicjowana na północy, co skutkowało kompresją wzdłuż południowej krawędzi NeoTetydy i fałdowaniem zgodnie z trendami Łuku Syryjskiego. Ekstensja w obrębie Płyty Arabskiej podczas późnej kredy (Bender, 1974; Lovelock, 1984) spowodowała powstanie serii basenów o orientacji północno-zachodnim, takich jak Al-Azraq i Wadi Sirhan. W neogenie uskoki przesuwcze zmodyfikowały ogólną konfigurację i styl strukturalny Basenów Al-Azraq i Wadi Sirhan oraz skompensowały geometrię fałdów. W mezozoiku miało miejsce kilka transgresji morskich z północnego zachodu ku południowemu wschodowi. W zachodniej części Jordanii między środkową jurą a wczesną kredą występowała aktywność wulkaniczna. Podczas późnego oligocenu i wczesnego miocenu zostały zainicjowane poziome ruchy wzdłuż doliny ryftowej Morza Martwego (Al-Zoubi, Abu-Hamattah, 2009).

Faza ryftowa miała miejsce w dwóch kolejnych etapach podczas miocenu i późnego plejstocenu (Quennell, 1951). Całkowite przesunięcie uskokowe wzdłuż systemu ryftowego Morza Martwego szacuje się na 105 km (Freund i in., 1970). Szacuje się (Garfunkel, 1981; Freund i in., 1970), że drugi etap fazy ryftowej miał miejsce 4-5 milionów lat temu. W miarę otwierania się ryftu Morza Martwego od późnego miocenu do wczesnego plejstocenu zostały zdeponowane osady ewaporatów o miąższości ponad 3,5 km (Bender, 1974), przy czym miąższość wszystkich osadów basenu Morza Martwego przekroczyła 10 km (Ginzburg, Ben-Avraham, 1997).

## PODSUMOWANIE

Jordania, pomimo że jest niewielkim krajem charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem morfologicznym. Najniżej położony obszar, tj. dolina Jordanu i Morza Martwego, to zjednoczenie najgłębsza depresja na świecie, która wraz z ciągnącym się wzdłuż jej wschodniego brzegu grzbieciem górskim sięgającym ponad 1000 m n.p.m. stanowi bardzo malowniczy krajobraz. Większość obszaru Jordanii stanowią jednak pustynie

Pod względem geologicznym Jordania wykazuje duże zróżnicowanie. Występują tu skały od pretorozyicznych, magmowych i metamorficznych poprzez zespół skał osadowych, proterozoicznych i mezozoicznych, po kenozoiczne. Pomimo, że w większości skały osadowe stanowią piaskowce o niekiedy dobrych właściwościach zbiornikowych Jordania nie posiada dużych zasobów wód pitnych i przemysłowych. W porównaniu z krajami sąsiednimi (Arabia Saudyjska, Syria) nie posiada też dużych zasobów ropy naftowej.

tension within the Arabian Plate during the Late Cretaceous (Bender, 1974; Lovelock, 1984) led to the formation of a series of northwest-oriented basins, such as Al-Azraq and Wadi Sirhan. In the Neogene, strike-slip faults modified the overall configuration and structural style of the Al-Azraq and Wadi Sirhan Basins and compensated for the geometry of the folds. Several marine transgressions occurred from the northwest to the southeast during the Mesozoic. In western Jordan, volcanic activity was present between the Middle Jurassic and Early Cretaceous. Horizontal movements along the Dead Sea rift valley were initiated during the Late Oligocene and Early Miocene (Al-Zoubi, Abu-Hamattah, 2009).

The rift phase occurred in two successive stages during the Miocene and Late Pleistocene (Quennell, 1951). The total offset along the Dead Sea rift system is estimated to be 105 km (Freund et al., 1970). It is estimated (Garfunkel, 1981; Freund et al., 1970) that the second stage of the rift phase took place 4-5 million years ago. As the Dead Sea rift opened from the Late Miocene to the Early Pleistocene, evaporite sediments with a thickness exceeding 3.5 km were deposited (Bender, 1974), with the total thickness of all sediments in the Dead Sea basin exceeding 10 km (Ginzburg, Ben-Avraham, 1997).

## SUMMARY

Jordan, despite being a small country, exhibits significant morphological diversity. The lowest area, namely the Jordan Valley and the Dead Sea, is the deepest depression in the world, which, along with the mountain range extending along its eastern shore, rising over 1000 meters above sea level, creates a picturesque landscape. However, the majority of Jordan's territory consists of deserts.

Geologically, Jordan displays considerable diversity. It contains rocks ranging from Precambrian, igneous, and metamorphic, through sedimentary rocks, Proterozoic and Mesozoic formations, to Cenozoic. Although most sedimentary rocks are sandstones with sometimes good reservoir properties, Jordan lacks significant resources of drinking and industrial water. Compared to neighboring countries (Saudi Arabia, Syria), it also has limited oil reserves.

## LITERATURA/ REFERENCES

- ABABSA M., (Ed.), 2013. Atlas of Jordan – History, Territory and Society. Publications de l'Institut français du Proche-Orient. Presses de l'Ifpo.
- ABU-GHAZALAH S., ABDULSALAM A.A., DAYYED N.A., GHANIMEH A.A., 2011. Building's Envelope: Surface-to-volume ratio as an energy saving tool in Jordanian homes. *Nuova Energia*.
- ABDALLAH S.A., ABU-HAMATTEH Z.S.H., 2007. The Breakdown of the Northwestern Arabian Plate: For Example, Jordan. The 3rd Symposium of the International Geological Correlation Programme, Geological Anatomy of East and South Asia-IGCP 516, Delhi, India, 8–9 October 2007, University of Delhi and UNESCO, 9–11.
- ABU-JABER N., AL KHASAWNEH S., ALQUDAH M., HAMARNEH C., AL-RAWABDEH A., MURRAY A., 2020. Lake Elji and a geological perspective on the evolution of Petra, Jordan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 557: 109904. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.109904>.
- AL-HOMOUD A.S., ALLISON R.J., BASAM S.F., WHITE K., 1995. Geology, Geomorphology, Hydrology, Groundwater and Physical Resources of the Desertified Badia Environment in Jordan. *GeoJournal*, 37 (1): 51–67.
- ALNAWAFLEH H., TARAWNE K., ALRAWASHDEH R., 2013. Geologic and economic potentials of minerals and industrial rocks in Jordan. *Natural Science*, 5: 756–769.
- AL-ZOUBI A.S., 2007. The Basement Faults System Northwestern Arabian Plate, Jordan. Bulletin of the Geological Society of Greece, 40. Proceedings of the 11th International Congress, Athens, May 2007.
- AL-ZOUBI A., ABU-HAMATTEH Z., 2009. Geological evolution of the Jordan valley. In: Talat Ahmad, Francis Hirsch, Punya Charusiri (Eds.), *Journal of the Virtual Explorer*, 32: 10. <https://doi.org/10.3809/jvirtex.2009.00248>.
- BANDEL K., SALAMEH E., 2013. Geologic Development of Jordan-Evolution of its Rocks and Life. The University of Jordan Press, Amman, pp. 1–276.
- BARJOUS M.O., 2003. The Geology of Petra and Wadi Al Lahyana Area: Map Sheets No. 3050-I and 3050-IV. Natural Resources Authority, Amman, Jordan.
- BARTOV Y., STEIN M., ENZEL Y., AGNON A., RECHES Z., 2002. Lake Levels and Sequence Stratigraphy of Lake Lisan, the Late Pleistocene Precursor of the Dead Sea. *Quaternary Research*, 57: 9–21.
- BENDER F., 1974. Geology of Jordan. Gebruder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- BENDER F., 1975. Geology of the Arabian Peninsula – Jordan. Geological Survey Professional Paper, 560-I.
- CALVO R., BARTOV Y., 2001. Hazeva Group, southern Israel: new observations, and their implications for its stratigraphy, paleogeography, and tectono-sedimentary regime. *Israel Journal of Earth Sciences*, 50: 71–99.
- CALVO R., BARTOV Y., KOLODNY Y., AYALON A., 1996. Petrology and geochemistry of lacustrine limestones in the Hazeva Formation: implications for the development of sedimentary basins and morphotectonics of the Rift Valley. Geological Survey of Israel, *Current Research*, 10: 47–50.
- DAVIES C.P., 2005. Quaternary Paleoenvironments and Potential for Human Exploitation of the Jordan Plateau Desert Interior. *Geoarchaeology: An International Journal*, 20 (4): 379–400.
- DEWEY J.F., PITMAN C.C., RYAN W.B.F., BONNIN J., 1973. Plate tectonics and the evaluation of the Alpine system. *Geological Society of America Bulletin*, 84: 3137–3180.
- FREUND R., GARFUNKEL Z., ZAK I., GOLDBERG M., WEISSBORD T., DERIN B., 1970. The shear along the Dead Sea rift. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 267: 107–130.
- FRUMKIN A., 2009. Formation and dating of a salt pillar in Mount Sedom diapir, Israel. *Geological Society of America Bulletin*, 121: 286–293. <https://doi.org/10.1130/B26376.1>.
- FRUMKIN A., ELITZUR Y., 2002. Historic Dead Sea Level Fluctuations Calibrated with Geological and Archaeological Evidence. *Quaternary Research*, 57: 334–342.
- GARCÍA-VEIGAS J., ROSELL L., ZAK I., PLAYÀ E., AYORA C., STARINSKY A., 2009. Evidence of potash salt formation in the Pliocene Sedom Lagoon (Dead Sea Rift, Israel). *Chemical Geology*, 265 (3–4): 499–511.
- GARFUNKEL Z., 1981. Internal structure of the Dead Sea leaky transform (rift) in relation to plate kinematics. *Tectonophysics*, 80 (1–4): 81–108.
- GHAZAL M., 2016. Population stands at around 9.5 million, including 2.9 million guests. The Jordan Times, 22 January 2016. <https://www.jordantimes.com/news/local/population-stands-around-95-million-including-29-million-guests>.
- GINZBURGA., BEN-AVRAHAM Z., 1997. A seismic refraction study of the north basin of the Dead Sea. *Geophysical Research Letters*, 24 (16): 2063–2066. <https://doi.org/10.1029/97GL01884>.
- GOLDSMITH Y., COHEN O., STEIN M., TORFSTEIN A., KIRO Y., KUSHNIR Y., BARTOV Y., BEN-MOSHE L., FRUMKIN A., LENSKY N.G., KEINAN J., GONEN L., ENZEL Y., 2023. Holocene humid periods of the Levant – evidence from Dead Sea lake-levels. *Quaternary Science Reviews*, 318: 108312.
- HASSAN M.A., KLEIN M., 2002. Fluvial adjustment of the Lower Jordan River to a drop in the Dead Sea level. *Geomorphology*, 45: 21–33.
- HAASE-SCHRAMM A., GOLDSTEIN S.L., STEIN M., 2004. U-Th dating of Lake Lisan aragonite (late Pleistocene Dead Sea) and implications for glacial East Mediterranean climate change. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 985–1005. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2003.07.016>.
- JARRAR G., STERN R.J., SAFFARINI G., AL-ZUBI H., 2003. Late- and post-orogenic Neoproterozoic intrusions of Jordan: implications for crustal growth in the northernmost segment of the East African Orogen. *Precambrian Research*, 123: 295–319.
- KAGAN E.J., LANGGUT D., BOARETTO E., NEUMANN F.H., STEIN M., 2015. Dead Sea Levels During the Bronze and Iron Ages. *Radiocarbon*, 57 (2): 237–252.
- KAUFMAN A., 1971. U-Series dating of Dead Sea Basin carbonates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 35: 1269–1281.
- KAUFMAN A., YECHIELI Y., GARDOSH M., 1992. Reevaluation of the lake sediment chronology in the Dead Sea basin, Israel, based on new <sup>230</sup>Th/U dates. *Quaternary Research*, 38: 292–304. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(92\)90039-L](https://doi.org/10.1016/0033-5894(92)90039-L).
- KLEIN C., FLOHN H., 1987. Contributions to the Knowledge of the Fluctuations of the Dead Sea Level. *Theoretical and Applied Climatology*, 38: 151–156.
- LAMB H.H., 1965. The early medieval warm epoch and its sequel. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1: 13–37. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(65\)90004-0](https://doi.org/10.1016/0031-0182(65)90004-0).

- LANDMANN G., ABU QUDAIRA G.M., SHAWABKEH K., WREDE V., KEMPE S., 2002. Geochemistry of the Lisan and Damya Formations in Jordan, and implications for palaeoclimate. *Quaternary International*, 89: 45–57.
- LONGSTAFFE F.J., CALVO R., AYALON A., DONALDSON S., 2003. Stable isotope evidence for multiple fluid regimes during carbonate cementation of the Upper Tertiary Hazeva Formation, Dead Sea Graben, southern Israel. *Journal of Geochemical Exploration*, 80: 151–170.
- LOVELOCK P., 1984. A review of the tectonics of the northern Middle East Region. *Geological Magazine*, 121: 577–587. <https://doi.org/10.1017/S0016756800030727>.
- LÜNING S., KUSS J., 2014. Petroleum geology of Jordan. In: L. Marlow, C. Kendall, L. Yose (Eds.), *Petroleum Systems of the Tethyan Region. AAPG Memoir* 106, pp. 217–239.
- MARCO S., 2007. Temporal variation in the geometry of a strike-slip fault zone: Examples from the Dead Sea Transform. *Tectonophysics*, 445: 186–199.
- MIZERSKI W., 2021. Geologia kontynentów. Wydawnictwo PWN, Warszawa, pp. 1–377.
- POWELL J.H., ABED A.M., LE NINDRE Y.-M., 2014. Cambrian stratigraphy of Jordan. *GeoArabia*, 19 (3): 81–134.
- QUENNELL A., 1951. The geology and mineral resources of (former) Trans-Jordan. *Colonial Geological and Mineral Resources*, London, 2: 85–115.
- SHOVAL S., ZLATKIN O., 2009. Climatic changes during the Pliocene as observed from climate-sensitive rocks and clay minerals of the Sedom formation, the Dead Sea Basin. *Clay Minerals*, 44: 469–486.
- SCHRAMM A., STEIN M., GOLDSTEIN S., 2000. Calibration of the  $^{14}\text{C}$  time scale to >40 ka by  $^{234}\text{U}$ – $^{230}\text{Th}$  dating of Lake Lisan sediments (last glacial Dead Sea). *Earth and Planetary Science Letters*, 175: 27–40. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00279-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00279-4).
- STERN R.J., JOHNSON P., 2010. Continental lithosphere of the Arabian Plate: A geologic, petrologic, and geophysical synthesis. *Earth-Science Reviews*, 101: 29–67.
- TARAWNEH M.A., 2011. Structural setting of the Jordan Northern Highlands: an integrated study using surface and sub-surface geological data by utilizing GIS Technology. PhD Thesis, University of Cape Town, Republic of South Africa
- TORFSTEIN A., GAVRIELI I., KATZ A., KOLODNY Y., STEIN M., 2008. Gypsum as a monitor of the paleo-limnological–hydrological conditions in Lake Lisan and the Dead Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 2491–2509.
- TORFSTEIN A., HAASE-SCHRAMM A., WALDMANN N., KOLODNY Y., STEIN M., 2009. U-series and oxygen isotope chronology of the mid-Pleistocene Lake Amora (Dead Sea basin). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73: 2603–2630.
- Rządowy Urząd ds. Wodociągów i Kanalizacji Izraela. <https://data.gov.il/dataset/https-www-data-gov-il-dataset-683>.
- WARREN J.K., 2016. *Evaporites: A Geological Compendium*. Second Edition. Springer, pp. 1–1813.
- WARSZYŃSKA J., 2001. Jordania. In: J. Warszyńska (Ed.), *Geografia turystyczna świata. Cz. 2*. Wydawnictwo PWN, Warszawa.
- WEINBERGER R., BEGIN Z.B., WALDMANN N., GARDOSH M., BAER G., FRUMKIN A., WDOWINSKI S., 2006. Quaternary rise of the Sedom diapir, Dead Sea basin. *Geological Society of America, Special Paper*, 401.
- WEINBERGER R., BAR-MATTHEWS M., LEVI T., BEGIN Z.B., 2007. Late-Pleistocene rise of the Sedom diapir on the backdrop of water-level fluctuations of Lake Lisan, Dead Sea basin. *Quaternary International*, 175: 53–61.
- Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Jordan>.
- ZAIN ELDEEN U., DELVAUX D., JACOBS P., 2002. Tectonic evolution in the Wadi Araba Segment of the Dead Sea Rift, South-West Jordan. *EGU Stephan Mueller Special Publication Series*, 2: 63–81.
- ZAK I., FREUND R., 1981. Asymmetry and basin migration in the Dead Sea rift. In: R. Freund, Z. Garfunkel (Eds.), *The Dead Sea Rift. Tectonophysics*, 80: 27–38.



# Rola mecenatu Kopalni Soli „Wieliczka” w kultywowaniu górniczych tradycji i promocji dziedzictwa (na przykładzie twórczości muzycznej i rzeźbiarskiej)

## The Role of Patronage of the Wieliczka Salt Mine in Cultivating Mining Traditions and Promoting Heritage (Using the Example of Musical and Sculptural Creativity)

Agnieszka WOLAŃSKA

Kopalnia Soli „Wieliczka” Wsparcie Sp. z o. o., Park Kingi 10, 32-020 Wieliczka,  
e-mail: agnieszka.wolanska@kopalnia.pl

### STRESZCZENIE

Artykuł porusza kwestie zagadnień związanych z działalnością artystyczną wielickich górników. Autorka podjęła próbę sformułowania odpowiedzi na pytanie: jak opieka organizacyjna, finansowa i twórcza wpłynęła na poziom obecnie prezentowanego rzeźbiarstwa solnego i koncertów orkiestry górniczej? Mecenat jakim zarząd kopalni obejmował artystyczne aspekty działalności górników przyczynił się do rozwoju muzycznych przedsięwzięć Reprezentacyjnej Orkiestry Dętej Kopalni Soli „Wieliczka” oraz do zrealizowania wielu projektów rzeźbiarskich. Pielęgnowanie i ochrona tradycji rzeźbiarskich i muzycznych wpisane są w misję wielickiej kopalni, która wiąże się z zachowaniem i udostępnianiem dziedzictwa kulturowego.

**Słowa kluczowe:** Wieliczka, kopalnia, mecenat, dziedzictwo, orkiestra, rzeźbiarstwo

### ABSTRACT

This article addresses the artistic activities of the Wieliczka miners. The author attempts to answer the question: how have organizational, financial, and creative support influenced the quality of the currently presented salt sculptures and concerts by the miners' band? The patronage provided by the mine's management for the artistic aspects of the miners' activities has contributed to the development of the Wieliczka Salt Mine's Representative Brass Band and the creation of numerous sculptural projects. Nurturing and preserving the sculptural and musical traditions are integral to the mission of the Wieliczka Salt Mine, which is focused on safeguarding and making its cultural heritage accessible.

**Keywords:** Wieliczka, mine, patronage, heritage, brass band, sculpting

### 1. WSTĘP

Podejmując temat mecenatu zarządów wielickiej kopalni soli w kultywowaniu tradycji muzycznych i rzeźbiarskich, należy na początku spróbować zdefiniować pojęcie mecenatu, a szczególnie jego współczesny wymiar, jak również spróbować odpowiedzieć na pytanie: czym jest dziedzictwo kulturowe? „Pojęcie mecenatu oznacza w zasadzie bezinteresowne, głównie finansowe wspieranie realizacji różnych przedsięwzięć (głównie w dziedzinie sztuki i na-

### 1. INTRODUCTION

When discussing the role of the Wieliczka Salt Mine's management in cultivating musical and sculptural traditions, it is essential first to define the concept of patronage, particularly in its modern aspects, and to address the question: what constitutes cultural heritage?

“The concept of patronage essentially refers to the generous, primarily financial, support for various endeavors, especially in art and science. It originates from the name of Gaius Maecenas (70-8 BC), a political advisor to Emperor

uki). Wywodzi się od nazwiska Gaiusa Maecenasa (70-8 BC), politycznego doradcy cesarza Augusta, wspierającego rzymskich poetów (m.in. Horacego (65-8 BC), Wergiliusza (70-19 BC), Propercjusza (50-2 BC), Lucjusza Wariusza Rufusa (70-15-BC). Stosowane jest powszechnie i rozumiane intuicyjnie, chociaż często mylone z pojęciami dobroczynności, patronatu czy sponsoringu” (<https://www.historiasztuki.com.pl/strony/023-00-00-MECENAT.html>). Mecenat jest obecnie zjawiskiem częstym, ale w różnych dziedzinach życia ma on różne znaczenie. Ponieważ w znacznej mierze polega on na finansowaniu i promowaniu różnych zjawisk, jego zasięg i znaczenie można rozpoznać tylko wtedy, gdy potrafimy określić, kto i co finansuje. Cytując autorów przywołanej powyżej strony internetowej „najtrudniej jest odróżnić mecenat od patronatu w dziedzinie sztuki. Wg teoretyków zjawiska mecenat oznacza wspieranie działań artystycznych o charakterze ogólniejszym, a jego celem jest zachowanie i rozwijanie pewnej tradycji kulturowej - czyli pożytek wspólnoty, natomiast patronat oznacza wspieranie działań konkretnego artysty (grupy, nurtu) i ma na celu umożliwienie patronowi wpływu na rozwój jakiegoś konkretnego zjawiska”.

Kolejnym bardzo ważnym terminem jest dziedzictwo kulturowe, czyli zasoby odziedziczone po poprzednich pokoleniach. To przedmioty, tradycje, wierzenia, wartości i wiedza, które kolejne pokolenia uznają za cenne i prowadząc twórczy dialog z przeszłością – nadają im znaczenia spajające społeczność. Dziedzictwo kulturowe daje nam poczucie tożsamości, poczucie więzi i trwania w czasie i miejscu. (<https://www.nid.pl>)<sup>1</sup>. Dziedzictwo to pojęcie, które okazuje się niezbędne do zrozumienia relacji między przeszłością a teraźniejszością. Jest ono procesem nieustannej reinterpretacji przeszłości, w którym fundamentalną rolę odgrywają nasza pamięć i nasz wybór (Purchla J., 2013). Ten autonomiczny wybór odróżnia pojęcie dziedzictwa kultury, które z natury rzeczy ma wymiar węższy, od zasobów nazywanych dobrami kultury. Te ostatnie to szersze pojęcie, w którym zamyka się cały kulturalny i artystyczny dorobek ludzkości (Gawęł Ł., 2013).

Współczesny mecenat Kopalni Soli „Wieliczka” jest ściśle związany z faktem wpisania kopalni w 1978 roku na I Światową Listę Dziedzictwa Kulturowego i Przyrodniczego UNESCO. Dwa lata wcześniej wielicką kopalnię wpisano do krajowego rejestru zabytków (wpis z dnia 2. 04. 1976 roku do rejestru Wojewódzkiego Konserwatora Zabytków w Krakowie. Nr rejestru A-580), natomiast w roku 1994 Prezydent RP uznał ją za Pomnik Historii.

Ochrona dziedzictwa górniczego w przypadku wielickiej kopalni to również ochrona tradycji rzeźbiarskich i muzycznych. Działania zarządów Kopalni Soli „Wieliczka” w zakresie wspierania muzyków i rzeźbiarzy doskonale wpisuje

Augustus, known for his support of Roman poets such as Horace (65-8 BC), Virgil (70-19 BC), Propertius (50-2 BC), and Lucius Varius Rufus (70-15 BC). While the term is widely used and understood intuitively, it is often confused with concepts such as philanthropy or sponsorship” (own translation; source: <https://www.historiasztuki.com.pl/strony/023-00-00-MECENAT.html>).

Patronage is a common phenomenon today, but it has different meanings in various areas of life. Since it largely involves funding and promoting various causes, its scope and significance can only be understood by identifying who is providing the support and what is being financed. As the authors of the aforementioned website note, “The most difficult distinction to make in art is between patronage and sponsorship. According to theorists, patronage involves supporting artistic endeavors on a broader scale to preserve and foster a particular cultural tradition for the benefit of the community. In contrast, sponsorship focuses on supporting the work of a specific artist (group or movement) and gives the sponsor some influence over the development of a particular phenomenon” (own translation).

Another crucial term is cultural heritage, which refers to the “resources inherited from previous generations. These include objects, traditions, beliefs, values, and knowledge that successive generations consider valuable. Through creative dialogue with the past, these elements acquire meanings that help unify the community. Cultural heritage gives us a sense of identity, connection, and continuity through time and place” (own translation; source: <https://www.nid.pl>)<sup>1</sup>. The concept of heritage is essential for understanding the relationship between the past and the present. It is a process of continuous reinterpretation of the past, where memory and choice play a fundamental role (Purchla J., 2013). This autonomous choice distinguishes the concept of cultural heritage, which is inherently narrower, from the broader resources referred to as cultural assets. The latter is a broader term encompassing the entirety of humanity’s cultural and artistic achievements (Gawęł Ł., 2013).

The modern patronage of the Wieliczka Salt Mine is closely linked to its inclusion on the UNESCO World Heritage List in 1978. Two years prior, the mine had been listed as a national historic monument (entered into the register of the Regional Conservator of Monuments in Krakow, No. A-580 on April 2, 1976). In 1994, it was further recognized as a Historic Monument by the President of the Republic of Poland.

The protection of the mining heritage at the Wieliczka Salt Mine also involves the preservation of sculptural and musical traditions. The management’s efforts to support musicians and sculptors align with the broader issue of managing cultural heritage by state-owned companies.

<sup>1</sup> <https://nid.pl/wp-content/uploads/2023/10/Guidance-and-toolkit-for-impact-assessments-POLISH-09.10.pdf>

<sup>1</sup> <https://nid.pl/wp-content/uploads/2023/10/Guidance-and-toolkit-for-impact-assessments-POLISH-09.10.pdf>

się w problematykę zarządzania dziedzictwem kulturowym przez spółki skarbu państwa.

## 2. REPREZENTACYJNA ORKIESTRA DĘTA KOPALNI SOLI „WIELICZKA” - ZARYS DZIAŁALNOŚCI (HISTORIA I WSPÓŁCZESNOŚĆ)

Za początek działalności orkiestry salinarnej przyjmuje się rok 1830, jednak z całą odpowiedzialnością możemy tę datę przesunąć przynajmniej do przełomu XVIII/XIX wieku. Niektórzy badacze historii początki kopalnianej orkiestry umiejscawiają jeszcze wcześniej. Muzyka rozbrzmiewała bowiem w wielickich podziemiach od czasów, gdy zaczęły one stanowić swoistą atrakcję turystyczną. Tak było już w czasach staropolskich, kiedy to uczestnikom podziemnych biesiad towarzyszyła muzyka (Markowski I., 2001). W latach 70. XVIII wieku, po pierwszym rozbiórce Polski, Austriacy obejmując zarząd w kopalni zadbali również o uporządkowany rozwój ruchu turystycznego. Wyznaczili trasę turystyczną i określili atrakcje towarzyszące zwiedzającym. Jedną z najbardziej oczekiwanych - było zwiedzanie kopalni przy dźwiękach orkiestry górniczej (Konwerska B., 2020). Organizowana początkowo jedynie dla uczczenia szczególnych wydarzeń kapela, przekształciła się z czasem w stałą orkiestrę górniczą. Ważnymi wydarzeniami były ceremonie przyjmowania szczególnie ważnych gości. Oprawą tych wizyt były popisy górniczej orkiestry. W 1809 roku na poziomie I (poziom pierwszy Bono – 64 m pod powierzchnią) wielickiej kopalni urządzono salę balową Łętów, w której znajdowała się specjalnie wzniesiony balkon – galeria dla orkiestry. Muzyka salinarna towarzyszyła gościom nie tylko w sali balowej Łętów, ale również w komorze Michałowice, i przy jeziorze Przykos. W 1830 roku orkiestra występująca w wielickich podziemiach nosiła miano Cesarsko-Królewskiej Muzyki Salinarnej. Sprawcą całego przedsięwzięcia tj. regularnego dęcia w instrumenty był wybitny administrator Urzędu Salinarnego, zarządzający kopalnią w latach 1812-1832, Józef Lill von Lillienbach. Koszt utrzymania orkiestry salinarnej (zakupy instrumentów, honoraria) pokrywano początkowo ze specjalnie na ten cel założonego w 1847 roku Funduszu Muzycznego, regularnie zasilanego comiesięcznymi składkami wpłacanymi przez stałych i niestałych robotników jak również przez dozorców. Pracownicy zastrzeżli sobie: „za te opłaty górnicy wymawiają sobie, że muzyka salinarna winna grać bezpłatnie na uroczystości górniczej w dniu św. Klemensa, św. Kingi, przy uroczystych pochodach górniczych W 1868 roku, wprowadzono nowy regulamin zwiedzania wielickich podziemi i uregulowano opłaty za zwiedzanie (Konwerska B., 2020). Fundusz Muzyczny (Kasa Muzyczna) na utrzymanie orkiestry górniczej był zasilany z comiesięcznych, regularnych urzędniczych składek oraz (co było nowością) z części środków uzyskanych z turystyki. Liczono, że

## 2. THE WIELICZKA SALT MINE REPRESENTATIVE BRASS BAND - AN OVERVIEW OF ACTIVITIES (HISTORY AND PRESENT)

The saline band is generally thought to have begun in 1830; however, it is more accurate to trace its origins back to the late 18th or early 19th century. Some historians suggest that the band's origins might be even earlier. Music had been resonating through the Wieliczka underground since the time tourists began to visit the mines. This was already the case in the early Polish period when music accompanied participants of underground feasts (Markowski I., 2001). In the 1770s, following the First Partition of Poland, the Austrians, upon taking over the management of the mine, also ensured the organized development of tourism. They established a designated tourist route and outlined the attractions for visitors. One of the most anticipated features was a tour of the mine accompanied by the sounds of the miners' band (Konwerska B., 2020). Originally formed only to commemorate special events, the music group gradually evolved into a permanent miners' band. Key events included ceremonies welcoming distinguished guests. The highlight of these visits was the showcases of the miners' band. In 1809, a ballroom named Łętów was established on Level I (the first level, called Bono, 64 meters below the surface) of the Wieliczka mine, featuring a specially constructed balcony designed as a gallery for the band. The saline music accompanied guests not only in the Łętów ballroom but also in the Michałowice Chamber and by the Przykos Lake. In 1830, the band performing in the Wieliczka underground was known as the Imperial and Royal Salinary Music Ensemble. The driving force behind the entire endeavor, involving the regular buzzing and blowing into the instruments, was the distinguished administrator of the Salinary Office, Józef Lill von Lillienbach, who managed the mine from 1812 to 1832. The costs of maintaining the saline band, including the purchase of instruments and musicians' fees, were initially covered by the Music Fund, which was established for this purpose in 1847. This fund was regularly replenished through monthly contributions from both permanent and temporary workers, as well as from the mine's foremen. The employees stipulated that “with these payments, miners ensured that the saline music shall perform free of charge during mining celebrations on St. Clement's Day, St. Kinga's Day, and at ceremonial mining processions” (own translation). In 1868, new regulations were introduced for visiting the Wieliczka underground, and tour fees were regulated (Konwerska B., 2020). The Music Fund (Cash Office), established to support the miners' band, was financed through monthly contributions from officials, and (as a new development), a share of tourism revenue. It was anticipated that the band's costs would be recouped over time and that playing for tourists would boost tourism income. Over the years, this proved to be true, with the Music Fund's in-

koszty poniesione na orkiestrę zwrócić się i z czasem granie dla turystów zwiększy dochody z turystyki. Z upływem lat tak się stało i dochody Funduszu Muzycznego rosły wprost proporcjonalnie do wzrostu frekwencji zwiedzających kopalnię. Z funduszu tego pokrywano również wynagrodzenie dla muzyków, aż do 1932 roku, kiedy to nastąpiła zmiana i pensje zaczęto wypłacać z bezosobowego funduszu płac. W przepisach, nowelizowanego w 1871 roku, Funduszu Muzycznego, można znaleźć następującą informację „celem muzyki salinarnej jest harmoniczna gra przy publicznych pochodach górniczych; uroczystościach pogrzebowych; świątecznych mszach górniczych; tourach gościnnych w Kopalni; wreszcie produkcjach w ogrodach i na placach publicznych, jak nie mniej wystąpienie muzykantów przy każdej sposobności, gdzie tego Cesarsko-Królewski Zarząd Salinarny uzna za stosowne” (Krokosz P., 2011)<sup>2</sup>. Obok zapewnienia muzyki salinarnej, Fundusz Muzyczny był również źródłem, z którego udzielano niskoprocentowych, krótkoterminowych pożyczek oraz wsparcia dla wielickich organizacji dobroczynnych (Konwerska B., 2022).

Pierwszymi kapelmistrzami wielickiej orkiestry byli Austriacy, Czesi i Słowacy. Dokonywali oni wyboru repertuaru, przeprowadzali próby oraz dyrygowali orkiestrą podczas ważniejszych koncertów. Ich zastępcy zwani tamburmajorami odpowiadali za kwestie organizacyjne, a także dyrygowali podczas marszów i pogrzebów. Przy orkiestrze działała również szkoła muzyczna, która uczyła praktycznej gry na instrumentach (KOZŁOWSKI R., 1998). Członkami orkiestry byli pracownicy saliny, a jej skład i liczebność ulegały zmianom w zależności od sytuacji ekonomiczno-politycznej (w 1876 – 29 osób; w 1899 – 35 osób; od 1900-1914 – 40 osób). Przynależność do orkiestry górniczej silnie łączyła robotników salinarnych, którzy, z racji muzykowania, zatrudniani byli głównie przy lżejszych pracach fizycznych. Wynikało to z faktu, iż rolę muzyków zarząd kopalni traktował jako ważniejszą niż rolę zawodowych górników. W XIX wieku orkiestra górnicza wielickiej kopalni reprezentowała wysoki poziom artystyczny, o czym świadczą liczne zamówienia na koncerty w całej Galicji. Muzycy występowali też wspólnie z założonym w 1878 roku Towarzystwem Śpiewaczym Lutnia. Od połowy XIX wieku przy kapeli górniczej działała namiastka szkoły muzycznej, w której uczono praktycznej gry na instrumentach. Instrumenty nabywano w firmie Häusslerów w Krakowie, jak również w Schönbach koło Egeru i w Königsgrätz. Dla orkiestry zakupywano również uniformy, na które składały się kitla górnicza, spodnie, kołpak z pióropuszem, czapka i krawatka uniformowa (Markowski I., 2001). W archiwum Muzeum Żup Krakowskich zachował się kwestionariusz z 1911 roku, gdzie dokładnie wyliczono, że w tym roku dano 26

come rising proportionally to the increase in visitor numbers. The fund covered musicians' salaries until 1932, when these payments were shifted to a general payroll fund. The regulations of the Music Fund, updated in 1871, specified that: “The purpose of the saline music is to provide harmonious performance during public mining processions, funerals, festive mining masses, guest tours in the mine, and events in gardens and public squares, as well as at any other opportunity deemed appropriate by the Imperial Royal Salinary Administration” (own translation; Krokosz P., 2011)<sup>2</sup>. Alongside providing saline music, the Music Fund also provided low-interest, short-term loans and supported charitable organizations in Wieliczka town (Konwerska B., 2022).

The first bandmasters of the Wieliczka mine music group were Austrians, Czechs, and Slovaks. They were responsible for selecting the repertoire, leading rehearsals, and conducting the band during major performances. Their deputies, known as drum majors (tamburmajor), managed organizational duties and conducted the ensemble during marches and funerals. There was also a music school affiliated with the band that provided practical instruction in playing instruments (Kozłowski R., 1998). The band consisted of employees from the salt mine, and its size and structure fluctuated according to economic and political conditions. For example, it had 29 members in 1876, 35 members in 1899, and 40 members between 1900 and 1914. Being part of the miners' band strongly bonded the saline workers, who were often assigned lighter physical tasks due to their musical duties. This was because the mine management considered the role of musicians to be more important than that of the professional miners. In the 19th century, the Wieliczka miners' band represented a high level of artistic excellence, as evidenced by numerous requests for performances throughout Galicia. The musicians also performed together with the Lutnia Singing Society, established in 1878. Instruments were sourced from the Häussler firm in Krakow, as well as from Schönbach near Eger and Königsgrätz. The band was also equipped with uniforms, which included mining jackets, trousers, a hat with a plume, a cap, and a uniform tie (Markowski I., 2001). A 1911 questionnaire preserved in the archives of the Cracow Saltworks Museum records that the band performed regularly throughout that year: 26 concerts in the city park (now A. Mickiewicz Park) on Wednesdays, weekly performances every Sunday at the parish church, around 20 appearances at amateur theater productions, 50 performances during mine tours, and about 5 at national and mining ceremonies. At the beginning of the 20th century, the band held approximately 100 concerts annually. Starting in 1864, the Wałczyn Chamber in the Wieliczka

<sup>2</sup> Za Krokosz P., por. Arch. MŻKW, V, sygn.. 261, k.3v. Wszyscy członkowie kapeli uczestniczący w uroczystościach pogrzebowych i występach publicznych zobowiązani byli nosić stosowne uniformy.

<sup>2</sup> According to Krokosz P., see Archives of Cracow Saltworks Museum in Wieliczka, V, file no. 261, folio 3v. All members of the band participating in funeral ceremonies and public performances were required to wear appropriate uniforms.

koncertów we środy w parku miejskim (obecny park A. Mickiewicza), w każdą niedzielę w kościele parafialnym, ok. 20 występów podczas przedstawień amatorskiego teatru, 50 występów podczas zwiedzania kopalni, a także około 5 podczas uroczystości narodowych i górniczych. Na początku XX wieku w sumie odbyło się około 100 koncertów rocznie. Od 1864 roku, w komorze Wałczyn w wielickiej kopalni organizowany był półgodzinny postój z bufetem i muzyką orkiestry górniczej. Cyklicznym wydarzeniem o charakterze kulturalnym był „festyn górniczy”, na którym również koncertowała orkiestra. Festyn odbywał się w rocznicę odwiedzin kopalni przez cesarza Franciszka Józefa I. Udostępniano wtedy „za mierną opłatą” trasę turystyczną wszystkim chętnym. Równie uroczyście obchodzono rocznice urodzin Panującego (Krokosz P., 2011)<sup>3</sup>. Muzycy nie ograniczali się tylko do uatrakcyjniania pobytu gości w kopalni, lecz z wielkim zaangażowaniem brali udział w licznych uroczystościach o charakterze kościelnym i patriotycznym odbywających się w mieście. Zarząd kopalni wyrażał zgodę na bezpłatny udział orkiestry salinarnej podczas uroczystości patriotycznych organizowanych przez władze miasta Wieliczki (Międzybrodzka M., 2021). Pozwalała na to od lat 60 XIX wieku autonomia galicyjska. Stałą atrakcją dla mieszkańców były popisy muzyczne w wielickich parkach. Warto podkreślić, iż wysoki poziom wykonywanego repertuaru powodował napływ licznych próśb do Zarządu Salinarnego o „wypożyczenie” orkiestry na zamiejscowy występ<sup>4</sup>. Orkiestra wielickiej kopalni grała w Krakowie, gdy sprowadzano do kraju prochy Adama Mickiewicza w 1891 roku oraz gdy w 1900 roku Uniwersytet Jagielloński obchodził swoje 500-lecie a także przy uroczystościach odsłonięcia Pomnika Grunwaldzkiego w 1910 roku. Orkiestra salinarna nie zawiesiła działalności artystycznej nawet w czasie I wojny światowej (1914-1918). Koncertowano w ograniczonym wymiarze, niemniej jednak organizowano występy zarówno w parku miejskim, jak i salinarnym. W zbiorach Muzeum Żup Krakowskich w Wieliczce zachował się program koncertu z 15 sierpnia 1915 roku, gdzie odnotowano tytuły ośmiu utworów granych wtedy, w tym „Walce Akademickie” autorstwa ówczesnego kapelmistrza Mieczysława Nigrina. W okresie międzywojennym orkiestra powróciła do grania dla turystów w składzie zmniejszonym do 12 osób. Z zachowanej „Taryfy zwiedzania kopalni soli” z 1934 roku, wiemy, że za granie dla grupy do 100 turystów muzycy otrzymywali po 1,70 zł a kapelmistrz 3,50 zł. W niedzielę honorarium podwajano. Biorąc pod uwagę ówczesne stawki pracownicze było to godziwe

mine hosted a half-hour break, complete with a buffet and music from the miners’ band. A recurring cultural event was the “Miners’ Festival,” where the band performed. The festival was held annually to mark the anniversary of Emperor Franz Joseph I’s visit to the mine. At that time, the tourist route was made available to all interested parties for a modest fee. The anniversaries of the reigning monarch’s birth were also celebrated with equal ceremony (Krokosz P., 2011)<sup>3</sup>. The musicians didn’t just enhance the experience of visitors in the mine; they were also deeply involved in numerous religious and patriotic ceremonies taking place in the town. The mine’s management granted permission for the saline band to participate free of charge in patriotic ceremonies organized by the authorities of Wieliczka town (Międzybrodzka M., 2021). This was made possible by the Galician autonomy established in the 1860s. A regular attraction for the residents was the musical performances held in Wieliczka’s parks. It is worth noting that the high quality of the performed repertoire led to frequent requests for the Salinary Administration to “rent” the band for performances in other locations<sup>4</sup>. The Wieliczka mine band played in Krakow during the repatriation of Adam Mickiewicz’s remains to Poland in 1891, the 500th anniversary of Jagiellonian University in 1900, and the unveiling of the Grunwald Monument in 1910. The *saline* band did not suspend its artistic activities even during World War I (1914-1918). Although performances were limited, concerts were still held both in the city park and the saline park. In the collections of the Cracow Saltworks Museum in Wieliczka, a concert program from August 15, 1915, has been preserved. This program features the titles of eight pieces performed that day, including the “Academic Waltzes” composed by the then-conductor Mieczysław Nigrin. During the interwar period, the band resumed performing for tourists, though with a reduced ensemble of 12 members. According to the preserved “Salt Mine visitor tariff” from 1934, we know that musicians were paid 1.70 PLN per performance for a group of up to 100 tourists, while the bandmaster was paid 3.50 PLN. On Sundays, the fee was doubled. Considering the wage rates of the time, this was fair compensation. After Poland regained its independence, the cultural and social life of Wieliczka’s residents experienced a revival. The mine’s band played a significant role in this revival, often performing alongside other groups like the Lutnia Singing Society. The band also accepted invitations for joint performances initiated by various groups, including the Amateur Society “Sokół.” The full

<sup>3</sup> Arch. MŻKW, AS, sygn.2889, k. 289-292.

<sup>4</sup> W 1873 roku Zarząd Zdrojowy w Krynicy, zwrócił się do Zarządu salinarnego o oddelegowanie kilkunastu muzyków aby umilali czas kuracjom. Zarząd kopalni nie zgodził się ponieważ: „składa się ona z robotników górniczych, których na tak długi czas od roboty uwolnić nie można”. O wielicką orkiestrę prosili też władze kopalni w Sierszy oraz władze salinarne w Borysławiu, aby godnie powitać przybywającego tam w 1884 roku cesarza Franciszka Józefa I.

<sup>3</sup> Archives of Cracow Saltworks Museum in Wieliczka, AS, file no. 2889, folios 289-292.

<sup>4</sup> In 1873, the Health Resort Management in Krynica requested the Salinary Management to delegate several musicians to entertain the spa guests. The mine management declined, stating that “it consists of mining workers who cannot be released from work for such a long time.” The Wieliczka band was also requested by the mine authorities in Siersza and the salinary authorities in Boryslaw to properly welcome Emperor Franz Joseph I when he visited there in 1884.

wynagrodzenie. Po odzyskaniu przez Polskę niepodległości rozkwitły na nowo kulturalno-społeczne sfery życia mieszkańców Wieliczki. Brała w nim udział również kopalniana orkiestra. Często towarzyszyła też innym zespołom, jak np. Towarzystwu Śpiewaczemu Lutnia oraz przyjmowała zaproszenia na wspólne występy artystyczne inicjowane przez inne organizacje np. Towarzystwo Amatorskie „Sokół”. Orkiestra górnicza w pełnym składzie grała na uroczystościach: państwowych, kościelnych i górniczych. Orkiestranci wielickiej kopalni występowali, gdy wmurowano kamień węgielny pod budowę Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie w 1923 roku. Muzycy saliny wielickiej zapewniali oprawę muzyczną na festynach zorganizowanym przez Ochotniczą Straż Pożarną. Celebrowano w towarzystwie muzyków dętej orkiestry wydarzenia z dawnej historii Polski (jak rocznice powstań narodowych listopadowego i styczniowego), jak również wydarzenia z najnowszej historii np. 10. rocznicę odzyskania przez Polskę dostępu do Bałtyku (10 lutego 1920 roku). 6 marca 1921 roku orkiestra koncertowała w kościele parafialnym w intencji Plebiscytu Górnoląskiego. Tradycją były uroczyste obchody imienin Marszałka Józefa Piłsudskiego, każdego roku w marcu. 12 grudnia 1918 roku orkiestra towarzyszyła uroczystości poświęcenia Groty im. Józefa Piłsudskiego w wielickiej kopalni. Przy dźwiękach orkiestry obchodzono kolejne rocznice Konstytucji 3 Maja. Celebrowano również jubileusze związane z twórcami polskiej kultury np. w 1932 roku „Dzień Moniuszkowski”, podczas którego orkiestra dała koncert w Parku Mickiewicza. 10 listopada 1938 roku orkiestra uczestniczyła wraz z Lutnią w jubileuszowym koncercie z okazji 20-lecia odzyskania niepodległości. Z towarzyszeniem górniczej orkiestry, każdego roku, prowadzono procesję Bożego Ciała. Do wybuchu II wojny światowej równoległe z orkiestrą dętą działała orkiestra smyczkowa, licząca około 40 muzyków, którą dyrygowali tamburmajorzy.

W czasie II wojny światowej (1939-1945) orkiestra nadal dawała koncerty. Muzykowano w kościele parafialnym św. Klemensa oraz co tydzień na dziedzińcu Zamku Żupnego, który był siedzibą dyrektora kopalni soli. Muzycy koncertowali również pod ziemią w kaplicy św. Kingi, m. in. podczas uroczystej mszy z okazji ślubu dyrektora kopalni Kurta von Felsena<sup>5</sup>.

Na przestrzeni wieków zapal uzdolnionych muzycznie górników do pracy w orkiestrze kopalnianej nigdy nie zgasł. Bywały lata osłabionej działalności, ale wynikały one głównie z zawirowań politycznych i z niesprzyjających warunków społeczno-ekonomicznych.

Ważnym elementem zapewniającym komfort koncertowania i przeprowadzania prób były budynki nadszybi, gdzie orkiestra miała swoją siedzibę. Próby odbywały się w nad-

band performed at state, religious, and mining ceremonies. The Wieliczka mine band players performed at the cornerstone laying ceremony for the AGH University of Krakow in 1923 and also provided musical accompaniment for festivals organized by the Volunteer Fire Brigade. Events from both Poland's past and recent history were celebrated with the accompaniment of the band, including anniversaries of national uprisings such as the November and January Uprisings, as well as more recent events like the 10th anniversary of Poland regaining access to the Baltic Sea on February 10, 1920. On March 6, 1921, the band performed a concert at the parish church in support of the Upper Silesian Plebiscite. The annual celebration of Marshal Józef Piłsudski's name day in March became a tradition. On December 12, 1918, the band performed at the dedication ceremony of the Józef Piłsudski Grotto in the Wieliczka mine. The band also played at the celebrations marking the anniversaries of the May 3rd Constitution. They celebrated jubilees honoring figures of Polish culture, such as the "Moniuszko Day" in 1932, during which the band gave a concert in Mickiewicz Park. On November 10, 1938, the band, along with Lutnia, participated in a commemorative concert marking the 20th anniversary of Poland's regained independence. Every year, the band accompanied the Corpus Christi processions. Before the outbreak of World War II, a string group, consisting of about 40 musicians under the leadership of the drum majors, operated alongside the brass band.

During World War II (1939-1945), the band continued to perform. They played in the Parish Church of St. Clement and every week in the courtyard of the Saltworks Castle, which served as the residence of the mine director. The musicians also performed underground in

St. Kinga's Chapel, including at a special Mass for the wedding of the mine director, Kurt von Felsen<sup>5</sup>.

Over the centuries, the enthusiasm of musically gifted miners for participating in the mine's band never waned. There were periods of diminished activity, but these were mainly due to political upheavals and unfavorable socio-economic conditions.

A key factor in ensuring comfort for performances and rehearsals was the shaft top buildings, which housed the band. Rehearsals were held in the shaft top buildings of the J. I. Paderewski, Daniłowicz, Górsko, and Regis Shafts<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> General Governor Hans Frank was present at this Mass and started inviting the mine band to perform at Wawel Castle. The Wieliczka band performed in the Wawel Castle courtyard, including in 1943.

<sup>6</sup> Rehearsals since the 19th century took place in the shaft top of the Emperor Franciszek Shaft (renamed the Ignacy Jan Paderewski Shaft in 1918). Around 1918, the band was moved to the attic of the southern wing of the Daniłowicz Shaft shaft top. In the 1920s, the band returned to the Paderewski Shaft, playing until the shaft top was dismantled in 1958. The exception was three years of occupation (1942-1945) when the ensemble was relocated to the Saltworks Castle. After 1958, the band was moved to the Regis Shaft shaft top, where it operated until 1963. Subsequently, due to the adaptation of

<sup>5</sup> Na tej mszy obecny był generalny gubernator Hans Frank, który zaczął zapraszać kopalnianą orkiestrę na specjalne występy na Wawel. Na dziedzińcu zamku wawelskiego wielicka orkiestra występowała m.in. w 1943 roku.

szybiach szybów: J. I. Paderewskiego, Daniłowicza, Górsko i Regis<sup>6</sup>.

Już po zakończeniu II wojny światowej liczba muzyków Orkiestry Zakładowej Żupy Solnej wzrosła do 30 osób. Uświetniali swoimi występami liczne pochody i akademie, m.in. 4 listopada 1945 roku uczestniczyli w uroczystym pogrzebie Wincentego Witosa. W lipcu 1946 roku orkiestra salinarna jak i reaktywowane Towarzystwo Śpiewacze Lutnia uatrakcyjnili swoimi występami obchody „Święta Morza”. Rozpoczął się wtedy również dla orkiestry czas popularności w mediach. 3 września 1948 roku muzycy wieliczcy wzięli udział w audycji „Szczypta soli” w ramach cyklicznego programu Polskiego Radia „Przy sobocie po robocie”. Od lat 60. XX wieku spada zainteresowanie członkostwem w orkiestrze. Wynikać to mogło z ogólnego pogorszenia się sytuacji materialnej muzyków, jak również z sytuacji gospodarczo – politycznej w kraju<sup>7</sup>. Niestety w połowie lat 80. XX wieku skład orkiestry skurczył się do 17 muzyków, którzy występowali głównie na imprezach miejscowych. Grali również dla szczególnych gości zwiedzających trasę turystyczną m. in. na zakończenie obrad Komisji Chemicznej RWPGR w komorze Stanisława Staszica (1984 roku). Dyrekcja kopalni wyznaczała osobę, która była opiekunem orkiestry i pomagała w sprawach administracyjno-organizacyjnych<sup>8</sup>. Dzięki zaangażowaniu kilku najbardziej aktywnych muzyków i dyrekcji wielickiej kopalni, orkiestra w II połowie lat 80. zaczęła powoli odbudowywać swój skład i poszerzać repertuar. Aby ratować orkiestrę w świadomy sposób złamano tradycję naboru członków do orkiestry. Do lat 80. XX wieku muzycy rekrutowali się wyłącznie spośród pracowników kopalni, często grając w orkiestrze było tradycją wielopokoleniową wielickich rodzin górniczych. Natomiast od ok. 35 lat skład orkiestry zasilają zawodowi muzycy bądź studenci krakowskich szkół muzycznych i Akademii Muzycznej, nie związani zawodowo z kopalnią<sup>9</sup>. W tym czasie rozpoczął się również owocny, okres występów poza granicami kraju. W 1988 roku orkiestra przyjęła zaproszenie Związku Muzycznego w Buchloe w Ba-

After the end of World War II, the number of musicians in the Corporate Saltworks Band increased to 30. They enhanced numerous parades and ceremonies, including participating in the solemn funeral of Wincenty Witos on November 4, 1945. In July 1946, both the salinary band and the revived Lutnia choir contributed to the celebrations of “Święto Morza” (the Sea Festival) with their performances. This marked the beginning of a period of increased media attention for the band. On September 3, 1948, the Wieliczka mine musicians appeared on the Polish Radio program “Szczypta soli” (A Pinch of Salt), which was part of the recurring show “Przy sobocie po robocie” (Saturday After Work). From the 1960s onward, interest in joining the band began to wane, likely due to the worsening financial situation of the musicians and the broader economic and political climate in the country<sup>7</sup>. By the mid-1980s, the band had dwindled to just 17 members, mostly performing at local events. They also played for distinguished guests visiting the tourist route, including the conclusion of the Chemical Committee of the COMECON (Council for Mutual Economic Assistance) meeting in the Stanisław Staszic Chamber in 1984. The mine management appointed a supervisor to assist the band with administrative and logistical tasks<sup>8</sup>. With the dedication of a few active musicians and the support of the Wieliczka mine management, the band slowly began to rebuild its ranks and expand its repertoire in the late 1980s. To save the band, a deliberate decision was made to break the tradition of recruiting only from the mine’s employees. Until the 1980s, musicians were exclusively drawn from mine workers, and playing in the band was often a multi-generational tradition in Wieliczka’s mining families. However, for the past 35 years, the band has been supplemented by professional musicians and students from Krakow’s music schools and the Academy of Music, who are not professionally connected to the mine<sup>9</sup>. During this time, the band also embarked on a fruitful period of performances abroad. In 1988, they accepted an invitation from the Music Association in Buchloe, Bavaria, to participate in the International Brass Bands Festival “Dźwięczna Europa” (Resounding Europe), which featured 37 bands from Central Europe. Under the direction of Mieczysław Waga, the Wieliczka band performed several hour-long concerts during the event, marking the start of numerous trips abroad for the band in the following years. Subsequent visits to Buchloe, including by then-director of the mine Ryszard Poda, took place

<sup>6</sup> Próby od XIX wieku odbywały się w nadszymbiu szybu cesarza Franciszka (nazwanego w 1918 roku szybem Ignacego Jana Paderewskiego). Ok. 1918 roku orkiestrę przeniesiono na poddasze południowego skrzydła nadszymbia szybu Daniłowicza. W latach 20. XX wieku orkiestra wróciła do szybu Paderewskiego, gdzie grano aż do rozebrania nadszymbia w 1958 roku. Wyjątkiem były 3 lata okupacji (1942-1945) kiedy to zespół przeniesiono do Zamku Żupnego. Po 1958 roku orkiestrę przeniesiono do nadszymbia szybu Regis, gdzie funkcjonowała do roku 1963. Następnie w związku z adaptacją sali prób na hale sportową siedzibę orkiestry przeniesiono do Domu Robotniczego przy ul. Szpunara, a stamtąd muzycy powrócili do budynku nadszymbia (jego północnej części) szybu Daniłowicza. Wreszcie, w 1985 roku orkiestra zyskała niezależny budynek w nadszymbiu szybu Górsko. Potem wrócono jeszcze na kilka lat do nadszymbia Regis, aby już definitywnie, w 2009 roku, na stałe przenieść się do wyremontowanych budynków dawnej warzelni soli.

<sup>7</sup> Lata 70. XX wieku związane są z Mieczysławem Wagą, który został sprowadzony z Krakowa jako zawodowy kapelmistrz.

<sup>8</sup> W latach 90. XX opiekunem orkiestry był Jan Kaszowski, następnie (od 2005 roku) m.in. Janusz Kobyłecki.

<sup>9</sup> Informacje uzyskane od świadka historii Stanisława Fiołka.

the rehearsal hall into a sports hall, the band’s headquarters were transferred to the Workers’ House on Szpunara Street. The musicians then returned to the northern part of the Daniłowicz Shaft shaft top. Finally, in 1985, the band acquired an independent building in the Górsko Shaft shaft top. The ensemble briefly returned to the Regis shaft top before permanently relocating in 2009 to the renovated buildings of the former salt refinery.

<sup>7</sup> The 1970s are associated with Mieczysław Waga, who was brought from Krakow as a professional bandmaster.

<sup>8</sup> In the 1990s, Jan Kaszowski served as the band’s supervisor, followed by Janusz Kobyłecki, who took over in 2005.

<sup>9</sup> Information obtained from the historical witness Stanisław Fiołek

warii, gdzie wzięła udział w Międzynarodowym Festiwalu Orkiestr Dętych „Dźwięczna Europa”. Na festiwalu tym zagrało 37 orkiestr z Europy środkowej. Wielicka orkiestra, pod dyktando Mieczysława Wagi, dała podczas festiwalu kilka ponad godzinnych koncertów. Był to początek licznych w latach późniejszych wyjazdów muzyków wielickiej orkiestry dętej. Kolejne wyjazdy do Buchloe (w których uczestniczył ówczesny dyrektor kopalni Ryszard Poda) miały miejsce w 1990 i 1993 roku<sup>10</sup>. Aby orkiestra godnie reprezentowała kopalnię zakupiono dla niej nowe uniformy, obuwie i koszule. Orkiestra odnosiła sukcesy m. in. w kategorii musztry paradej także dzięki przyjętemu na stanowisko kapelmistrza majorowi Aleksandrowi Dębskiemu. On to zapoczątkował próby w maszerowaniu na stadionie wielickiego klubu sportowego „Górnik”. Duże zasługi dla orkiestry miała działalność kapelmistrza Józefa Wandasa, w pierwszej połowie lat 90. XX wieku, orkiestra grała głównie repertuar złożony wojskowych marszów<sup>11</sup>. W 1994 roku, gdy dyrygentem został Władysław Chorobik (z pasji jazzman) zmieniono również repertuar. Górnicza orkiestra zaczęła grać muzykę taneczną, w tym latynoamerykańską. Od 1989 roku zmieniona sytuacja polityczna w Polsce umożliwiła orkiestrze kopalnianej powrót do grania również na uroczystościach kościelnych. Chociaż należy odnotować, że i wcześniej, sporadycznie, takie występy miały miejsce m.in. podczas procesji z katedry wawelskiej na Skałkę. Tuż przed zmianami ustrojowymi, w maju 1989 roku orkiestra przyjęła zaproszenie do Krakowa, gdzie grała na wiecu reaktywowanego ówczesnie NSZZ Solidarność na Rynku Głównym i Placu Jana Matejki. Następnie, po dziesięcioleciach przerwy, powróciła orkiestra z występami na uroczystości z okazji kolejnych rocznic odzyskania przez Polskę niepodległości 11 listopada i uchwalenia Konstytucji 3 Maja. Grała na Rezurekcyjnej mszy św. i podczas procesji Bożego Ciała. Lata 90. XX wieku to kolejne wyjazdy zagraniczne, m. in. do Augsburga na XVI Festiwal Orkiestr Dętych. Powrócono do tradycji witania dętą muzyką znakomitych gości kopalni. Tak też powitano m. in. Prezydenta USA Georga Busha z małżonką, a także kolejnych Prezydentów Polski Aleksandra Kwaśniewskiego, Lecha Wałęsę oraz Lecha Kaczyńskiego. W 1992 roku dyrekcja kopalni, z ówczesnym dyrektorem naczelnym Zbigniewem Zarębskim, przywróciła obyczaj organizowania corocznego wyjazdu orkiestry do Starego Sącza na rocznicową mszę św. poświęconą patronce solnych górników Św. Kindze. Muzycy brali również udział w pielgrzymkach do Kalwarii Zebrzydowskiej i w odpustach

in 1990 and 1993<sup>10</sup>. To ensure the band could represent the mine with dignity, new uniforms, shoes, and shirts were purchased for the musicians. The band achieved success in the category of parade drill, largely thanks to Major Aleksander Dębski, who was appointed as bandmaster. He initiated marching rehearsals at the “Górnik” sports club stadium in Wieliczka. The band owed much to the efforts of bandmaster Józef Wandas. In the early 1990s, under his leadership, the band primarily performed a repertoire of military marches<sup>11</sup>. In 1994, when Władysław Chorobik, a passionate jazz musician, became the conductor, the band’s repertoire expanded to include dance music and Latin American styles. Since 1989, the political changes in Poland allowed the band to resume performing at church ceremonies. However, even before this, they occasionally participated in such events, including processions from Wawel Cathedral to Skałka. In May 1989, just before the political changes, the band performed at a rally of the newly reestablished NSZZ Solidarity in Krakow’s Main Market Square and Jan Matejko Square. After decades of absence, the band returned to perform at ceremonies commemorating Poland’s Independence Day on November 11 and the anniversary of the May 3 Constitution. They also played at the Easter Sunday Resurrection Mass and during the Corpus Christi procession. The 1990s saw further international trips, including a visit to Augsburg for the 16th Brass Band Music Festival. The tradition of welcoming distinguished guests to the mine with music was also revived during this period. Notable guests included U.S. President George Bush and his wife, as well as Polish Presidents Aleksander Kwaśniewski, Lech Wałęsa, and Lech Kaczyński. In 1992, under the leadership of then-chief director Zbigniew Zarębski, the mine’s management reinstated the tradition of the band’s annual pilgrimage to Stary Sącz for a mass dedicated to St. Kinga, the patron saint of salt miners. The musicians also participated in pilgrimages to Kalwaria Zebrzydowska (Zebrzydowska Calvary) and the feast of Our Lady of Sorrows in Staniątka. The band fostered a familial atmosphere, with members gathering for events like the Barbórka (St. Barbara’s Day) celebration and the traditional Christmas wafer exchange during the holiday season. They sang carols with the mine’s management and exchanged well wishes for the coming year. It became a tradition to honor miners’ funerals with the solemn music of the brass band. On October 4, 1991, the Lutnia choir and the band participated in the final “Szczęść Boże” (God bless) farewell to Ignacy Markowski, the mine director who had passed away prematurely. Markowski had strongly supported the band’s revival and was even a member, playing the double

<sup>10</sup> Ryszard Poda – dyrektor kopalni w latach 1986–1991, z którego inicjatywy kopalniana orkiestra po raz pierwszy wyruszyła z koncertami za granicę.

<sup>11</sup> Józef Wandas (ur. w 1937 roku w Chorągwie), z pracą w orkiestrach był związany od czasów służby wojskowej. W latach 1960–1983 grał na basie w Kolejowej Orkiestrze Dętej w Krakowie. Od 1991 roku do sierpnia 1994 był kapelmistrzem w Wieliczce. Z pracy w orkiestrze kopalnianej zrezygnował w 1997 roku.

<sup>10</sup> Ryszard Poda, the mine director from 1986 to 1991, initiated the first international tour of the mine band.

<sup>11</sup> Józef Wandas (born in 1937 in Chorągwa) was involved with bands since his military service. From 1960 to 1983, he played bass in the Railway Wind Band in Krakow. He served as the bandmaster in Wieliczka from 1991 until August 1994. He resigned from the mine band in 1997.

Matki Boskiej Bolesnej w Staniątkach. W orkiestrze panowała rodzinna atmosfera, spotykano się nie tylko z okazji święta barbórkowego, ale też dzielono się opłatkiem na Boże Narodzenie. Wspólnie z dyrekcją kopalni kolędowano i składano sobie życzenia pomyślności. Tradycją stało się celebrowanie uroczystych górniczych pogrzebów z towarzyszeniem muzyki orkiestry dętej. 4 października 1991 roku Lutnia i orkiestra wzięły udział w ostatnim „Szczęść Boże” zmarłego przedwcześnie dyrektora kopalni Ignacego Markowskiego. Wspierał on odbudowę orkiestry, której sam był członkiem (grał na kontrabasie). Uroczyste żegnano na wielickim cmentarzu również zmarłych muzyków (w 1996 roku trębacz Zygmunta Juras) oraz zasłużonych Wieliczczan (w 1994 prof. Stanisława Gawędę). W 2000 roku orkiestra górnicza wzięła udział w ceremonii pogrzebowej zasłużonego, byłego dyrektora zakładu Stanisława Hwałka, a w 2022 roku emerytowanego dyrektora Muzeum Żup Krakowskich prof. Antoniego Jodłowskiego. Orkiestra żegna też zmarłych przewodników, którzy oprowadzali turystów po trasie turystycznej w kopalni. W myśl Rozdziału V par.13 pkt e Regulaminu przewodnictwa po Kopalni Soli „Wieliczka” i podziemnej ekspozycji Muzeum Żup Krakowskich – „Przewodnik ma prawo do: uczestnictwa Reprezentacyjnej Orkiestry Dętej Kopalni Soli „Wieliczka” podczas pogrzebu przewodnika”.

Przeobrażenia organizacyjne w Kopalni Soli „Wieliczka”, które nastąpiły w 1997 roku wpłynęły pozytywnie na funkcjonowanie orkiestry<sup>12</sup>. Zmieniono wtedy nazwę zespołu z Zakładowej Orkiestry Dętej przy Kopalni Soli w Wieliczce na Reprezentacyjną Orkiestrę Dętą Kopalni Soli „Wieliczka”. Patronat nad nią objęła nowo powołana spółka, która zorganizowała muzyczne i ekonomiczno-socjalne życie orkiestry. Zatrudniono wówczas nowego dyrygenta, Adama Czyżowskiego. (Leśny M., Wolańska A., 2017). Troska zarządu kopalni, przełożyła się bardzo szybko na podniesienie poziomu artystycznego orkiestry. Wzbogacono repertuar, rozbudowano sekcje fletów, klarnetów i trąbek. Rozpoczęto również inwentaryzację w bibliotece zespołu, spisywanie nut oraz porządkowanie zasobu archiwalnego po nieistniejącym już zespole smyczkowym. Biorąc pod uwagę różnorodny charakter uroczystości, które uświetniała swoimi występami, musiała ona dysponować szerokim i zróżnicowanym repertuarem. Sprowadzono nowe pozycje – zeszyty wydawnictwa Haltera oraz kompozycje takich twórców jak: Franciszek Liszt „Marzenie miłosne”; Rudolf Herzer „Hoch Heidecksburg”; Edward Elgar „Pomp and circumstance”, Jarosław Zeman „Wirbelwind”, Jacob de Haan „Free Word Fantasy”,

bass. The band also solemnly bid farewell to other deceased musicians at the Wieliczka cemetery, such as trumpeter Zygmunt Juras in 1996, and distinguished locals like Professor Stanisław Gawęda in 1994. In 2000, the band took part in the funeral of the esteemed former mine director, Stanisław Hwałek, and in 2022, they honored the retired director of the Cracow Saltworks Museum, Professor Antoni Jodłowski. The band also plays at funerals of deceased guides who led tourists through the mine’s tourist route. According to Chapter V, Section 13, Item E of the Regulations for Guiding in the Wieliczka Salt Mine and the underground exhibition of the Cracow Saltworks Museum: “A guide is entitled to the participation of the Wieliczka Salt Mine Representative Brass Band at their funeral.”

The organizational changes at the Wieliczka Salt Mine in 1997 had a positive impact on the functioning of the band<sup>12</sup>. At that time, the ensemble’s name was changed from the Corporate Saltworks Band of the Wieliczka Salt Mine to the Representative Brass Band of the Wieliczka Salt Mine. The newly established company took over the patronage of the band, organizing both its musical and socio-economic life. A new conductor, Adam Czyżowski, was hired at that time (Leśny M., Wolańska A., 2017). The management’s care quickly translated into a significant improvement in the band’s artistic level. The repertoire was expanded, and sections for flutes, clarinets, and trumpets were developed. An inventory of the ensemble’s library was also initiated, including cataloging sheet music and organizing the archival material from the now-defunct string ensemble. Given the variety of events the band was called upon to enhance its performances, it needed a broad and diverse repertoire. New musical scores were purchased, including scores from Halter Publishing and compositions by various composers such as Franz Liszt’s “Liebestraum”; Rudolf Herzer’s “Hoch Heidecksburg”; Edward Elgar’s “Pomp and Circumstance”; Jarosław Zeman’s “Wirbelwind”; Jacob de Haan’s “Free World Fantasy”; Francesco Sartori’s “Con te Partirò”; Robert Allmend’s “Europa – March”; Hans Kolditz’s “Arizona Bill”; Kenneth J. Alford’s “Colonel Bogey”; and “My Way” – a trumpet solo, among many others. Several new instruments were purchased, and three CDs were recorded. It also became a tradition for the band to travel for concerts to Austria (Salzburg, Hallstatt, Hallein, Innsbruck – for the opening of the Polish consulate), Hungary (Kazincbarcika, Mór), Slovenia (Zagorje), and Germany (Ferropolis, Munich, Kirchheim, Bad Salzufflen).

<sup>12</sup> 30.06.1996 roku zaprzestano wydobywania soli, priorytetem stała się ochrona, zwalczanie zagrożeń podziemnych i zabezpieczanie zabytkowych wyrobisk. Wszystko to przy równoczesnym rozwoju turystyki w zmieniających się warunkach geopolitycznych i ekonomicznych. Powstała spółka Kopalnia Soli „Wieliczka” trasa turystyczna., z prezesem zarządu Marianem Leśnym. Właścicielem tej spółki była Kopalnia Soli „Wieliczka” Przedsiębiorstwo Państwowe.

<sup>12</sup> On June 30, 1996, salt extraction ceased, and the priority shifted to protection, addressing underground hazards, and securing historical excavations. This was done alongside the development of tourism amidst changing geopolitical and economic conditions. A company named Kopalnia Soli „Wieliczka” Trasa Turystyczna (the Wieliczka Salt Mine Tourist Route) was established, with Marian Leśny as the CEO. The owner of this company was the Wieliczka Salt Mine S.A.

Francesco Sartori „Con de Partiro”, Robert Allmend „Europa – Marsz”, Hans Kolditz „Arizona Bill”, Keneth J. Alford „Colonel Bogey”, „My Way” – solo na trąbkę i wiele innych. Zakupiono kilka nowych instrumentów oraz nagrano 3 płyty CD. Tradycją stały się także wyjazdy orkiestry na koncerty do Austrii (Salzburg, Hallstadt, Hallein, Innsbruck – z okazji otwarcia polskiego konsulatu) na Węgry (Kazincbarcika, Mor), Słowenii (Zagorije) czy Niemiec (Ferropolis, Monachium, Kirchheim, Bad Salzflen).

Od 1998 roku tradycją stało się granie z okazji rozpoczęcia letniego sezonu turystycznego w wielickiej kopalni soli. Orkiestra uświetniała swoim udziałem również ważne lokalne uroczystości na terenie miasta i gminy. Wzięła udział w uroczystym nadaniu imienia Świętej Jadwigi Królowej szkole Podstawowej w Sierczy (1998 roku), grano podczas otwarcia Międzynarodowego Turnieju Sportowego w „Ringo”. W czerwcu 1998 roku orkiestra koncertowała dla zaproszonych gości z okazji otwarcia traktu pieszego łączącego Szyb Daniłowicza z szybem Regis – poświęconego i nazwanego Aleją Jana Pawła II (Ryc. 1, 2, 3).



**Ryc. 1.** Orkiestra przed szybem Daniłowicza, 2015.

Fot. R. Stachurski

**Fig. 1.** Wind Band in front of the Daniłowicz Shaft, 2015.

Photo: R. Stachurski



**Ryc. 2.** Święto Soli, Wieliczka, 2011, Fot. R. Stachurski

**Fig. 2.** Salt Festival, 2011. Photo: R. Stachurski.

Since 1998, it has been a tradition for the band to perform at the start of the summer tourist season at the Wieliczka Salt Mine. The band also participated in significant local events within the city and municipality. For example, it played at the ceremonial naming of St. Jadwiga the Queen Primary School in Siercza in 1998 and performed at the opening of the International “Ringo” Sports Tournament. In June 1998, the band gave a concert for invited guests to mark the opening of the pedestrian walkway connecting the Daniłowicz Shaft with the Regis Shaft, which was dedicated and named John Paul II Avenue (Fig. 1, 2, 3).

In 1998, the band also performed in Krakow on May 10th during the procession for Saint Stanislaus at Skałka, which was attended by Cardinals Franciszek Macharski and Józef Glemp, as well as Bishop Stanisław Dziwisz. They also played in Krakow in October 1998 to mark the opening of the new flight route between Krakow and London. Additionally, the band performed in the Main Market Square to celebrate the 20th anniversary of Pope John Paul II's pontificate.

On June 21, 1998, Wieliczka hosted the XIV International Competition of Corporate Brass Bands, under the patronage of the Department of Culture and Tourism of the Krakow Voivodeship Office and the Municipal Cultural Center in Wieliczka. The participating bands included: the Brass Band of the Wieliczka Salt Mine, the Brass Band of the Bochnia Salt Mine, the Brass Band of the Tarnów Chemical Works, the Brass Band of the Okocim Brewery, the Brass Band of the Kęty Light Metal Works, the Brass Band of the T. Sędzimir Steelworks in Krakow, the Brass Band of Solvay in Krakow, and the Brass Band of the ZNTK in Nowy Sącz. The Wieliczka mine band secured second place in the competition and was awarded a medal by the Main Board of the Polish Association of Choirs and Orchestras for its contributions to the musical community.

Traditionally, the salinary band performed at the inauguration of the academic year at the AGH University of Krakow.



**Ryc. 3.** Koncert orkiestry w parku Św. Kingi, Wieliczka, 2015, dyr. R. Kozłowski. Fot. R. Stachurski

**Fig. 3.** Concert in St. Kinga's Park, Wieliczka, 2015, cond. R. Kozłowski. Photo: R. Stachurski.

Grała także w Krakowie w 1998 roku (10 maja) podczas procesji św. Stanisława na Skalkę, w której udział wzięli: kardynałowie Franciszek Macharski i Józef Glemp oraz biskup Stanisław Dziwisz. W Krakowie grano również w październiku 1998 roku z okazji otwarcia linii lotniczych na trasie Kraków – Londyn. Koncertowała też na Rynku Głównym z okazji 20-lecia pontyfikatu Jana Pawła II.

21 czerwca 1998 roku w Wieliczce odbył się XIV Międzynarodowy Konkurs Zakładowych Orkiestr Dętych pod patronatem Wydziału Kultury i Turystyki Urzędu Wojewódzkiego w Krakowie i Miejskiego Domu Kultury w Wieliczce. Zaprezentowały się wówczas: Orkiestra Dęta Kopalni Soli „Wieliczka”, Orkiestra Dęta Kopalni Soli Bochnia, Orkiestra Dęta Zakładów Azotowych Tarnów, Orkiestra Dęta Zakładów Piwowarskich Okocim, Orkiestra Dęta Zakładów Metali Lekkich Kęty, Orkiestra Dęta Huty im. T. Sędzimirza Kraków, Orkiestra Dęta „Solvay” Kraków, Orkiestra Dęta ZNTK Nowy Sącz. Wielicka orkiestra zajęła w konkursie II miejsce i została odznaczona przez Zarząd Główny Polskiego Związku Chórów i Orkiestr medalem za zasługi dla społecznego ruchu muzycznego.

Tradycyjnie orkiestra salinarna koncertowała z okazji inauguracji roku akademickiego na Akademii Górniczo-Hutniczej. Muzycy otwierali paradę profesorów oraz młodzieży i pracowników, która maszerowała od budynku rektora do głównego gmachu AGH przy Alei Trzech Wieszców.

1 lipca 1998 roku zespół orkiestry w kilkunastoosobowym składzie rozpoczął regularne koncertowanie w komorze Weimar, dla turystów zwiedzających trasę turystyczną. Występy te były kontynuowane przez kilka kolejnych lat (Ryc. 4, 5, 6). W czerwcu 1999 roku orkiestra grała podczas kolejnej edycji organizowanych przez spółkę Trasa Turystyczna, Międzynarodowych Targów Mineralów i Skamieniałości. Orkiestra często uświetniała wernisaże wystaw organizowanych w kopalni, tak było np. 13 lipca 2000 roku, gdy w komorze Stanisława Staszica otwarto wystawę fotografów Ryszarda Horowitza. W 2000 roku, Kopalnia zorganizowała Międzynarodowe Dni Obrzędów i Zwyczajów Górniczych, w ramach, których odbył się I Europejski Podziemny Festiwal Orkiestr Dętych. Obok wernisaży, sesji naukowych i targów głównym punktem programu był występ wielickiej orkiestry. Odbył się on na stadionie Klubu Sportowego „Górniki”, gdzie wspólnie zagrały z wielicką orkiestrą, zespoły orkiestr dętych, z Niemiec, Słowenii i Śląska (Jaworzna).

11 stycznia 2004 roku zainaugurowano w podziemiach wielickiej kopalni, w komorze Warszawa, nowe cykliczne wydarzenie - noworoczny koncert Reprezentacyjnej Orkiestry Dętej (Ryc. 4). W programie znalazły się utwory m. in.: G. Rossiniego, J. Straussa oraz G. Verdiego.

The musicians led the parade of professors, students, and staff, which marched from the rector's building to the main AGH building on Three Bards Avenue.

On July 1, 1998, the band began regular performances in the Weimar Chamber for tourists visiting the mine's tourist route. These performances continued for several years (Fig. 4, 5, 6). In June 1999, the band performed during another edition of the International Mineral and Fossil Fair organized by the Tourist Route Office. The band also frequently performed at exhibition openings held in the mine, such as on July 13, 2000, when the Stanisław Staszic Chamber hosted a photogram exhibition by Ryszard Horowitz. In 2000, the mine organized the International Days of Mining Rituals and Customs, which included the First European Underground Festival of Brass Bands. Alongside exhibitions, academic sessions, and fairs, the highlight of the event was the performance by the Wieliczka band. The concert took place at the “Górniki” Sports Club stadium, where the Wieliczka band played alongside brass bands from Germany, Slovenia, and Silesia (Jaworzno).

On January 11, 2004, a new annual event was inaugurated in the Wieliczka mine's Warsaw Chamber: The New Year's Concert by the Representative Brass Band. The program featured works by G. Rossini, J. Strauss, and G. Verdi, among others (Fig. 4). On June 19, 2005, in celebration of its 175th anniversary, the band gave an unforgettable concert titled “Movie Classics in the Wieliczka Underground”<sup>13</sup>. “The international competition among brass musicians is fostered by numerous festivals, with the Krakow Military Band Festival being particularly well-known. At the 16th International Military Band Festival in 2006 in Krakow, the Representative Brass Band of the Wieliczka Salt Mine participated as the only civic band.

On May 11, 2007, at the invitation of the President of Poland, Lech Kaczyński, the Wieliczka Salt Mine hosted the Presidents of Lithuania, Valdas Adamkus; Ukraine, Viktor Yushchenko; Azerbaijan, Ilham Aliyev; and Georgia, Mikheil Saakashvili. The Wieliczka band performed the national anthem of each president's country. In 2003, the 25th anniversary of the inclusion of Krakow's historic center and the Wieliczka Salt Mine on the UNESCO (Fig. 7) World Heritage List was celebrated in Krakow's Main Market Square to the sounds of the Wieliczka Salt Mine's Representative Brass Band. The festivities included the unveiling of a salt sculpture crafted by miner sculptors Stanisław Anioł, Paweł Janowski, and Piotr Starowicz. In 2016, again accompanied

<sup>13</sup> In the program, the following pieces were included: Always Look on the Bright Side of Life (Eric Idle), The Godfather Saga (Nino Rota/Carmen Coppola), My Heart Will Go On (James Horner), The Pink Panther (Henry Mancini), Polonaise from the Film Pan Tadeusz (*Sir Thaddeus*) (Wojciech Kilar), 1492: Conquest of Paradise (Vangelis), Moment for Morricone (Ennio Morricone), Jurassic Park (John Williams), GoldenEye (Bono and The Edge), Oh, Pretty Woman (Roy Orbison/Bill Dees).



**Ryc. 4.** Koncert orkiestry w komorze Warszawa, 2016,  
dyr. W. Groń.  
Fot. R. Stachurski

**Fig. 4.** Concert in the Warsaw Chamber, 2016,  
cond. W. Groń. Photo: R. Stachurski.



**Ryc. 6.** Koncert w kaplicy Św. Kingi. Fot. R. Stachurski  
**Fig. 6.** Concert in the Chapel of St. Kinga. Photo: R. Stachurski.



**Ryc. 5.** Koncert orkiestry w komorze Haluszki, 2018,  
dyr. A. Czyżowski. Fot. R. Stachurski

**Fig. 5.** Concert in the Haluszka Chamber, 2018,  
cond. A. Czyżowski. Photo: R. Stachurski.

by the Wieliczka band, the church at the John Paul II Centre in Krakow 's Łagiewniki district was consecrated.

Some of the band's most significant artistic achievements during this period include first place at the 24th Brass Bands Festival "Echo Trombity" (Echo Trembits) (Nowy Sącz, 2001); first place at the 25th Brass Band Festival "Echo Trombity" (Nowy Sącz, 2002); and first place at the International Mining Bands Competition (Ferropolis, 2006).

In its recent history, the Wieliczka Salt Mine's Representative Brass Band has recorded three CDs. The first album was recorded from December 6-9, 1999<sup>14</sup>. The second was produced from May 21-24, 2001<sup>15</sup>, and the third album was completed on June 17-18, 2002<sup>16</sup>.

<sup>14</sup> The lineup included: Conductor: Adam Czyżowski; Flute: Stanisław Węgrzyn, Piotr Skotniczny; Clarinet: Dezyderiusz Boroni, Krzysztof Woźniak, Paweł Pazgan, Mieczysław Szymanek, Jacek Rozwadowski, Henryk Gawor, Joanna Włoch; Alto Saxophone: Konrad Zdunek, Agnieszka Wilkoń; Tenor Saxophone: Krzysztof Krawczyk, Stanisław Zięba; French Horn: Tomasz Łatak, Zbigniew Trjański, Krzysztof Nagiel; Trumpet, Flugelhorn: Robert Kozłowski, Piotr Matoga, Jakub Magoń, Szczepan Gawor, Józef Leńczowski, Kazimierz Grochot, Józef Kuś, Józef Wąsik; Tenor, Baritone: Kazimierz Tańcula, Jan Iskra, Marek Matoga, Jerzy Sądowski; Trombone: Andrzej Bigoś, Marek Perc, Grzegorz Salamon, Stanisław Iskra; Tuba: Stanisław Fiolek, Jacek Czaplak, Adam Bogunia, Stefan Kalita; Percussion: Marek Godula, Marek Włoch, Krzysztof Rozwadowski.

Fifteen pieces were recorded: "Florentine March" (Julius Fucik), "Radetzky March" (Johann Strauss), "Tequila" (C. Rio, arr. A. Treves), "Belcanto Overture" (Willy Hautvast), "One Moment in Time" (J. Bettis, arr. J. Higgins), "Nights in White Satin" (J. Hayward, arr. J. Treves), "Europa March" (Robert Allmend), "The Continental" (C. Conrad, arr. M. Viziru), "Beyond the Walls of Kraków" (Julian Kwiatkowski), "Charmaine – English Waltz" (E. Rapee, arr. V. Kabec), "Can-Can March" (J. Offenbach, arr. R. Beck), "The Glory of Love" (G. Kothe, R. Heck, arr. E. Meji), "Amor, Amor, Amor!" (G. Ruiz, arr. J. Treves), "Hello Dolly" (J. Herman, arr. H. Kolditz), "Apaches" (J. Lordan, arr. V. Kabec).

<sup>15</sup> Conductor: Adam Czyżowski; Flute: Anna Kozłowska, Agata Kielar, Agnieszka Dąbroś, Piotr Skotniczny; Clarinet: Dezyderiusz Boroni, Krzysztof Woźniak, Paweł Pazgan, Artur Figiel, Mieczysław Szymanek, Tadeusz Paciorek, Henryk Gawor, Natalia Salawa; Saxophone: Krzysztof Kopeć, Łukasz Piatek, Stanisław Zięba, Agnieszka Wilkoń; French Horn: Tomasz Łatak, Eugeniusz Adamiak, Zbigniew Trjański, Krzysztof Nagiel; Trumpet, Flugelhorn: Robert Kozłowski, Piotr Matoga, Jakub Magoń, Tadeusz Kurtycz, Szczepan Gawor, Józef Leńczowski, Kazimierz Grochot, Józef Kuś, Józef Wąsik; Tenor, Baritone: Kazimierz Tańcula, Jan Iskra, Marek Matoga; Trombone: Andrzej Bigoś, Marek Perc, Grzegorz Salamon, Stanisław Iskra; Tuba: Stanisław Fiolek, Jacek Czaplak, Adam Bogunia, Stefan Kalita; Percussion: Dominik Dołęga, Marek Godula, Krzysztof Rozwadowski.

The works recorded on 3rd CD titled *Hymns and Marches*: "Odwach" (E. Maj), "Pod Wawelem" (*Under Wawel*) (W. Luty), "Parada Puzonów" (*Trombone Parade*) (L. Landowski), "Śląsk" (*Silesia*) (arr. T. Głodziński), "Intrada Regionalna" (*Regional Intrada*) (arr. B. Król), "Florentyński Po-chód" (*Florentine March*) (J. Fucik), "Friendship Sounds" (S. Rundel), "Salut" (anonymous), "Ruetz" (E. Trojan), "Under the Star-Spangled Banner" (J. P. Sousa), "Salut 2" (anonymous), "Europa" (R. Allmend), "Radetzky March" (J. Strauss), Hymn Polski (*Polish National Anthem*) (arr. A. Wiśniewski), Hymn Górniczy (*Mining Anthem*), Hymn Solidarności (*Solidarity Anthem*) (J. Narbut, S. Markowski), European Union Anthem (L. van Beethoven, arr. M. Schneider).

<sup>16</sup> Conductor: Adam Czyżowski; Flute: Anna Kozłowska, Agata Kielar, Agnieszka Dąbroś, Piotr Skotniczny; Clarinet: Dezyderiusz Boroni, Krzysztof Woźniak, Paweł Pazgan, Artur Figiel, Mieczysław Szymanek, Tadeusz Paciorek, Henryk Gawor, Natalia Salawa; Saxophone: Krzysztof Kopeć, Łukasz Piatek, Stanisław Zięba, Agnieszka Wilkoń; French Horn: Tomasz Łatak, Eugeniusz Adamiak, Zbigniew Trjański, Krzysztof Nagiel; Trumpet, Flugelhorn: Robert Kozłowski, Piotr Matoga, Jakub Magoń, Tadeusz Kurtycz, Szczepan Gawor, Józef Leńczowski, Kazimierz Grochot, Józef Kuś,

19 czerwca 2005 roku z okazji 175-lecia swojego istnienia orkiestra dała niezapomniany koncert pt. Filmowe przeboje w wielickich podziemiach<sup>13</sup>.

Międzynarodowej rywalizacji muzyków dętych sprzyjają liczne festiwale, szczególnie znany jest krakowski festiwal orkiestr wojskowych. Na XVI Międzynarodowym Festiwalu Orkiestr Wojskowych w 2006 roku w Krakowie, Reprezentacyjna Orkiestra Dęta Kopalni Soli „Wieliczka” uczestniczyła w nim jako jedyna orkiestra cywilna.

11 maja 2007 roku na zaproszenie Prezydenta RP Lecha Kaczyńskiego do wielickiej kopalni zawitali Prezydenci: Litwy, Valdas Adamkus, Ukrainy, Wiktor Juszczenko, Azerbejdżanu, İlham Alijew i Gruzji, Michaił Saakaszwili. Każdemu z Prezydentów wielicka orkiestra zagrała hymn państwowy jego kraju. W 2003 roku, na Rynku Głównym w Krakowie, przy dźwiękach Reprezentacyjnej Orkiestry Dętej Kopalni Soli „Wieliczka” obchodzono 25-lecie wpisania historycznego centrum Krakowa oraz wielickiej kopalni na I Światową Listę Dziedzictwa Kulturowego i Przyrodniczego UNESCO (Ryc. 7). Uroczystościom towarzyszyło m.in. odsłonięcie solnej rzeźby wykonanej przez górników-rzeźbiarzy Stanisława Anioła, Pawła Janowskiego i Piotra Starowicza. W 2016 roku, również przy dźwiękach wielickiej orkiestry konsekrowano kościół w Centrum Jana Pawła II w krakowskich Łągiwnikach.

Ważniejszymi osiągnięciami artystycznymi orkiestry w tym okresie były: I miejsce na XXIV Festiwalu Orkiestr Dętych „Echo Trombity” (Nowy Sącz 2001); I miejsce na XXV Festiwalu Orkiestr Dętych „Echo Trombity” (Nowy Sącz 2002); I miejsce na Międzynarodowym Konkursie Orkiestr Górniczych (Ferropolis 2006).

W swojej najnowszej historii Reprezentacyjna Orkiestra Dęta Kopalni Soli w „Wieliczce” nagrała trzy płyty CD. Pierwszą płytę orkiestra nagrywała w dniach 6-9 XIII 1999 roku<sup>14</sup>. Druga płyta została zrealizowana w dniach 21-24 maja



**Ryc. 7.** Górniczy-rzeźbiarze i górnicza orkiestra na Rynku Głównym w Krakowie, 2003. Fot. R. Stachurski

**Fig. 7.** Miners-sculptors and a miner's brass orchestra, Main Square, Krakow, 2003. Photo: R. Stachurski.

For several decades, since television became the dominant medium, whenever a program was produced about or broadcast live from the Wieliczka Salt Mine, the most striking feature was often the performance by the mine's band. The Representative Brass Band of the Wieliczka Salt Mine recorded the opening sequence for the TV show „Indywidualności 97” (Individualities '97). The band's musicians also appeared in programs such as „Podróże kulinarne Roberta Makłowicza” (Robert Makłowicz's Culinary Travels), „Pytanie na śniadanie” (Question for Breakfast), „Dzień dobry TVN” (Good Morning TVN), and many others.

Starting on January 1, 2010, Robert Kozłowski became the conductor of the salinary band, having been associated with the ensemble as a trumpeter since 1994 (Fig. 3). Under his baton, the band earned the “Gold Diploma” at the 8th International Brass Band Festival in Mór, Hungary, in 2010. In May 2011, they performed at the opening of the photographic exhibition „Kopalnia Soli ‘Wieliczka’ – Ukryty Wymiar” (Wieliczka Salt Mine – A Hidden Dimension) in the heart of Europe, Brussels (Fig. 8). In 2012, the band once again secured first place at the “Echo Trombity” festival. In 2015, the band celebrated another milestone with a series of outdoor

<sup>13</sup> W programie znalazły się następujące utwory: Always look on the bright side of life (Erie Idle), The Godfather Saga (Nino Rota/Carmen Coppola), My heart will go on (James Horner), The Pink Panther (Henry Mancini), Polonez z filmu Pan Tadeusz (Wojciech Kilar), 1492 Conquest of Paradise (Vangelis), Moment For Moricone (Ennio Moricone), Jurassic Park (John Williams), Golden Eyes (bono and The Edge), Oh Pretty Woman (Roy Orbison/Bill Dees).

<sup>14</sup> W składzie: Dyrygent: Adam Czyżowski; Flet: Stanisław Węgrzyn, Piotr Skotniczny; Klamet: Dezyderiusz Boroni, Krzysztof Woźniak, Paweł Pazgan, Mieczysław Szymanek, Jacek Rozwadowski, Henryk Gawor, Joanna Włoch; Saksofon alt: Konrad Zdunek, Agnieszka Wilkoń; Saksofon tenor: Krzysztof Krawczyk, Stanisław Zięba; Waltornia: Tomasz Łatak, Zbigniew Trjański, Krzysztof Nagiel; Trąbka, Flugelhorn: Robert Kozłowski, Piotr Matoga, Jakub Magoń, Szczepan Gawor, Józef Leńczowski, Kazimierz Grochot, Józef Kuś, Józef Wąsik; Tenor, Baryton: Kazimierz Tańcula, Jan Iskra, Marek Matoga, Jerzy Sądowski; Puzon: Andrzej Bigoś, Marek Perc, Grzegorz Salamon, Stanisław Iskra; Tuba: Stanisław Fiolek, Jacek Czaplak, Adam Bogunia, Stefan Kalita; Perkusja: Marek Godula, Marek Włoch, Krzysztof Rozwadowski.

Nagrano piętnaście utworów: Florentyński pochód (Julius Fucik), Marsz Radetzkiego (Johann Strauss), Tequilla (C. Rio, arr. A. Treves), Belcanto ouverture (Willy Hautvast), One moment in time (J. Bettis, arr. J. Higgins), Nights in White Satin (J. Hayward, arr. J. Treves), Europa Marsz (Robert

Józef Wąsik; Tenor, Baritone: Kazimierz Tańcula, Jan Iskra, Marek Matoga; Trombone: Andrzej Bigoś, Marek Perc, Grzegorz Salamon, Stanisław Iskra; Tuba: Stanisław Fiolek, Jacek Czaplak, Adam Bogunia, Stefan Kalita; Percussion: Dominik Dołęga, Marek Godula, Krzysztof Rozwadowski.

The works recorded on 3rd CD titled *Hymns and Marches*: “Odwach” (E. Maj), “Pod Wawelem” (*Under Wawel*) (W. Luty), “Parada Puzonów” (*Trombone Parade*) (L. Landowski), “Śląsk” (*Silesia*) (arr. T. Głodziński), “Intrada Regionalna” (*Regional Intrada*) (arr. B. Król), “Florentyński Pochód” (*Florentine March*) (J. Fucik), “Friendship Sounds” (S. Rundel), “Salut” (anonymous), “Ruetz” (E. Trojan), “Under the Star-Spangled Banner” (J. P. Sousa), “Salut 2” (anonymous), “Europa” (R. Allmend), “Radetzky March” (J. Strauss), Hymn Polski (*Polish National Anthem*) (arr. A. Wiśniewski), Hymn Górniczy (*Mining Anthem*), Hymn Solidarności (*Solidarity Anthem*) (J. Narbut, S. Markowski), European Union Anthem (L. van Beethoven, arr. M. Schneider).

2001 roku<sup>15</sup>. Trzecią płytą powstała w dniach 17-18 czerwca 2002 roku<sup>16</sup>.

Od kilkadziesiąt lat, kiedy główne miejsce w przekazie medialnym zajęła telewizja, gdy tylko jakiś program realizowany był o kopalni czy też „na żywo” z kopalni, najbardziej barwnym elementem był występ górniczej orkiestry. Reprezentacyjna Orkiestra Dęta Kopalni Soli „Wieliczka” nagrała czołówkę do programu TV „Indywidualności 97”. Salinarzy muzycy występowali również w programach: „Podróże kulinarne Roberta Makłowicza”, „Pytanie na śniadanie”, „Dzień dobry TVN” i wielu innych.

Od 1 stycznia 2010 roku dyrygentem orkiestry salinarnej był Robert Kozłowski, który był z nią związany jako trębacz od 1994 roku (Ryc. 3). Pod jego batutą orkiestra zdobyła „Złoty Dyplom” na VIII Międzynarodowym Festiwalu Orkiestr Dętych – Mór (Węgry), 2010 roku, a w maju 2011 roku koncertowała z okazji otwarcia wystawy fotograficznej „Kopalnia Soli Wieliczka – Ukryty Wymiar”, w sercu Euro-

concerts held at the pavilion in St. Kinga's Park (Fig. 3). These summer concerts became an annual tradition, taking place every Saturday in July and August (with a break in 2020-2021 due to the pandemic). On July 24, 2015, the band performed the Grand Anniversary Concert in the Warsaw Chamber, accompanied by the Camerata choir and the legendary group Laboratorium (Laboratory). The Representative Brass Band also gave a show in the Polish Parliament building on the occasion of the opening of a photographic exhibition about the Wieliczka Salt Mine.

In 2015, the band consisted of 45 musicians, including 5 women. Among its members were 2 retired mine workers and 6 active employees of the mine. The conductor was Dr. Waldemar Groń. For over half a century, key figures in the band have included its long-time members: tambour-major Stanisław Zięba and the longest-serving member (since 1968), the band inspector Stanisław Fiołek (Fig. 9).

The band operates within the organizational structure of the Wieliczka Salt Mine based on its regulations. This document was updated in April 2021 (following changes in the Wieliczka Salt Mine Capital Group) and adopted by the board resolution. After the restructuring, the band now functions within the organizational structure of the Wieliczka Salt Mine S.A.<sup>17</sup>. The organizational regulations define the tasks and operational procedures of the Representative Brass Band of the Wieliczka Salt Mine. They clearly outline the rights and responsibilities of the band members as well as the mine's obligations toward the band and its members<sup>18</sup>. The artistic director is once again Adam Czyżowski, with Antoni Majerski serving as his deputy. Majerski is also a clarinetist. The band's tasks mainly arise from its marching and concert performance nature. The band is composed of 36 members, including six individuals professionally associated with the salt mine (3 active employees and 3 retired employees)<sup>19</sup>. The remaining band members are predominantly professional musicians, employed daily in various companies and institutions (such as schools, music schools, and musical institutions). The band is divided into a main group and a supplementary group, with membership being flexible. The main group consists of musicians with optimal qualifications—those with the highest level of instrumental performance, availability, and active participation in the band's activities. Under the baton of Adam Czyżowski, the band's sound is ensured by six clarinetists, three percussionists, three trombonists, and three saxophones, along with one tenor horn (baritone), one alto saxophone, one

Allmend), The Continental (C. Conrad, arr. M. Viziru), Za murami Krakowa (Julian Kwiatkowski), Charmaine – walc angielski (E. Rapee, arr. V. Kabec), Can – can marsz (J. Offenbach, arr. R. Beck), The Glory of Love (G. Kothe, R. Heck, arr. E. Meji), Amor, Amor, Amor! (G. Ruiz, arr. J. Treves), Hello Dolly (J. Herman, arr. H. Kolditz), Apacze (J. Lordan, arr. V. Kabec),

<sup>15</sup> W składzie: Dyrygent: Adam Czyżowski; Flet: Anna Kozłowska, Piotr Skotniczny; Klarinet: Krzysztof Woźniak, Paweł Pazgan, Artur Figiel, Mieczysław Szymanek, Tadeusz Paciorek, Henryk Gawor, Joanna Włoch;

Klarinet basowy: Dezyderiusz Boroni; Saksofon alt: Krzysztof Kopec, Agnieszka Wilkoń; Saksofon tenor: Łukasz Płatek, Stanisław Zięba; Saksofon baryton: Tomasz Duda; Waltornia: Tomasz Łatak, Zbigniew Trjański, Krzysztof Nagiel; Trąbka, Flugelhorn: Robert Kozłowski, Piotr Matoga, Jakub Magoń, Szczepan Gawor, Karol Cholewa, Józef Leńczowski, Kazimierz Grochot, Józef Kuś, Józef Wąsik; Tenor, Baryton: Kazimierz Tańcula, Jan Iskra, Marek Matoga; Puzon: Andrzej Bigoś, Marek Perc, Grzegorz Salamon, Stanisław Iskra; Tuba: Stanisław Fiołek, Jacek Czaplak, Adam Bogunia, Stefan Kalita; Perkusja: Dominik Dołęga, Marek Godula, Marek Włoch, Krzysztof Rozwadowski.

Nagrano 11 utworów: Caravan (D. Ellington/J. Tizol, arr. N. Iwai), New York overture (Kees Vlak), Don't cry for me Argentina A. L. Weber, arr. W. Tuschla), Odwach (Edwar Maj), Saragossa – Band (arr. H. Kolasch), Java (Toussaint/Tyler, arr. T. Reinau), Mambo no.5 (Lou Bega, arr. S. Rabe), Time to say goodbye (Francesco Sartori, arr. J. G. Mortimer), Always look on the bright side of life (E. Idle, arr. M. Schneider), Pod gwiazdzistym sztandarem (John Philip Sousa), Sparkling drums (Ted Huggen).

<sup>16</sup> Dyrygent: Adam Czyżowski; Flet: Anna Kozłowska, Agata Kielar, Agnieszka Dąbroś, Piotr Skotniczny;

Klarinet: Dezyderiusz Boroni, Krzysztof Woźniak, Paweł Pazgan, Artur Figiel, Mieczysław Szymanek, Tadeusz Paciorek, Henryk Gawor, Natalia Salawa; Saksofon: Krzysztof Kopec, Łukasz Płatek, Stanisław Zięba, Agnieszka Wilkoń; Waltornia: Tomasz Łatak, Eugeniusz Adamiak, Zbigniew Trjański, Krzysztof Nagiel; Trąbka, Flugelhorn: Robert Kozłowski, Piotr Matoga, Jakub Magoń, Tadeusz Kurtycz, Szczepan Gawor, Józef Leńczowski, Kazimierz Grochot, Józef Kuś, Józef Wąsik; Tenor, Baryton: Kazimierz Tańcula, Jan Iskra, Marek Matoga; Puzon: Andrzej Bigoś, Marek Perc, Grzegorz Salamon, Stanisław Iskra; Tuba: Stanisław Fiołek, Jacek Czaplak, Adam Bogunia, Stefan Kalita; Perkusja: Dominik Dołęga, Marek Godula, Krzysztof Rozwadowski.

Utwory nagrane na 3 CD pt. Hymny i Marsze: Odwach (E. Maj), Pod Wawelem (W. Luty), Parada puzonów (L. Landowski), Śląski (arr. T. Głodziński), Intrada regionalna (arr. B. Król), Florentyński pochód (J. Fucik), Freundschaftsklänge (S. Rundel), Salut (nn), Ruetz (E. Trojan), Pod gwiazdzistym sztandarem (J. Ph. Sousa), Salut 2 (nn), Europa (R. Allmend), Radetzky (J. Strauss), Hymn Polski (arr. A. Wisniewski), Hymn górniczy, Hymn Solidarności (J. Narbut, S. Markowski), Hymn Unii Europejskiej (L. van Beethoven, arr. M. Schneider).

<sup>17</sup> Information obtained by the author from Ms. Aneta Miklas-Buła of the Marketing and Corporate Communication Department at KSW SA (*The Wieliczka Salt Mine S.A.*) on June 14, 2022.

<sup>18</sup> Membership in the band is based on a civil law agreement with KSW SA (*The Wieliczka Salt Mine S.A.*).

<sup>19</sup> Personnel status as of July 29, 2022. In the case of instrumentalists with similar qualifications, preference for inclusion in the core ensemble of the band is given to employees of the KSW SA (*The Wieliczka Salt Mine S.A.*) Capital Group.

py, Brukseli (Ryc. 8). W 2012 roku po raz kolejny uzyskała I miejsce na festiwalu „Echo Trombity”. W 2015 roku orkiestra obchodziła swój kolejny jubileusz dając cykl koncertów plenerowych, w altanie, w parku św. Kingi (Ryc. 3). Te letnie koncerty odbywały się od tamtego czasu corocznie cyklicznie w każdą sobotę w lipcu i w sierpniu (z przerwą w latach 2020-2021 ze względu na sytuację epidemiczną w kraju i na świecie). 24 lipca 2015 roku wybrzmiał Wielki Koncert Jubileuszowy w komorze Warszawa z towarzyszeniem chóru Camerata oraz z legendarną grupą „Laboratorium”. Reprezentacyjna górnicza orkiestra zagrała również koncert w budynku Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z okazji wernisażu wystawy fotograficznej o wielickiej kopalni soli.

W 2015 roku orkiestra liczyła 45 muzyków w tym 5 kobiet. W składzie grało 2 emerytowanych pracowników kopalnianych oraz 6 czynnych pracowników kopalni. Dyrygentem był dr Waldemar Groń. Od ponad pół wieku ważnymi postaciami orkiestry są jej wieloletni członkowie, tamburmajor Stanisław Zięba i najstarszy stażem (od 1968 roku w orkiestrze) inspektor górniczej orkiestry Stanisław Fiołek (Ryc. 9).

Orkiestra funkcjonuje w strukturze organizacyjnej Kopalni Soli „Wieliczka” w oparciu o regulamin. Dokument ten został w kwietniu 2021 roku (po zmianach w Grupie Kapitałowej Kopalnia Soli „Wieliczka”) uaktualniony i przyjęty uchwałą zarządu. Po wprowadzonych restrukturyzacjach orkiestra funkcjonuje obecnie w strukturze organizacyjnej Kopalni Soli „Wieliczka” S.A.<sup>17</sup>. Regulamin organizacyjny określa zadania i sposób funkcjonowania Reprezentacyjnej Orkiestry Dętej Kopalni Soli „Wieliczka”. Ściśle określono w nim prawa i obowiązki członków orkiestry jak również obowiązki kopalni w stosunku do orkiestry i jej członków<sup>18</sup>. Dyrektorem artystycznym został ponownie Adam Czyżowski, a jego zastępcą Antoni Majerski, który jest także klawirzystą. Zadania orkiestry wynikają głównie z jej marszowo-estradowego charakteru. Skład orkiestry tworzą 36 osoby, wśród nich sześć osób zawodowo związane z wielicką kopalnią (3 osoby to czynni pracownicy, 3 osoby to emerytowani pracownicy)<sup>19</sup>. Pozostali orkiestranci to w zdecydowanej większości zawodowi muzycy, no co dzień zatrudnieni w innych firmach i instytucjach (szkołach, szkołach muzycznych, placówkach muzycznych, itp.). Orkiestra dzieli się na skład podstawowy i skład uzupełniający, a przynależność do nich jest ruchoma. Do składu podstawowego należą instrumentalści o optymalnych kwalifikacjach, czyli najwyższym poziomie gry na instrumencie, dyspozycyjności i aktywnie uczestniczący w życiu orkiestry. Brzmienie orkiestry pod batutą Adama Czyżowskiego zapew-



Ryc. 8. Wielki Plac (La Grand-Place) w Brukseli, 2011,  
Fot. R. Stachurski

Fig. 8. La Grand-Place, Brussels, 2011, Photo: R. Stachurski.



Ryc. 9. Pamiątkowa solna rzeźba dla St. Fiołka z okazji 50-lecia  
grania w orkiestrze, 2018, Fot. R. Stachurski

Fig. 9. Salt sculpture for S. Fiołek commemorating the musician's  
50 th anniversary of playing in the miners' brass orchestra, 2018,  
Photo: R. Stachurski.

baritone saxophone, three tenors, six trumpeters, five tubists, and three French horn players. The band's lineup is adjusted, as in previous decades, to fit the nature of each performance. In its artistic activities, the band performs on behalf of the mine, providing musical accompaniment for marketing and promotional events. This category also includes performances at religious and funeral ceremonies, as well as events organized by public institutions and entities (e.g., local governments, organizers of social and cultural events, and organizers of patriotic ceremonies). A separate category consists of performances commissioned by external clients as part of commercial events held in the mine's underground spaces.

Today, the band performs much as it did in the past, for various anniversaries and patriotic events, mining ceremonies, and official visits by crowned heads, state dignitaries, and representatives from the world of culture and science. It

<sup>17</sup> Informacje uzyskane przez autorkę od Pani Anety Miklas-Buła z Działu Marketingu i Komunikacji Korporacyjnej KSW SA w dniu 14. 06. 2022.

<sup>18</sup> Podstawą członkostwa w orkiestrze jest umowa cywilnoprawna z KSW SA.

<sup>19</sup> Stan osobowy na dzień 29 lipca 2022 roku. W przypadku instrumentalistów o podobnych kwalifikacjach pierwszeństwo w przyjęciu do składu podstawowego orkiestry ma pracownik Grupy Kapitałowej KSW SA

nia sześciu klawecistów, trzech perkusistów, trzech puzonistów oraz trzy saksofony, jeden sakshorn tenorowy (barytonowy), jeden saksofon altowy, jeden saksofon barytonowy, trzech tenorów, sześciu trębaczy, pięciu muzyków grających na tubach i trzech na waltorniach. Skład osobowy orkiestry jest dopasowywany wzorem ubiegłych dziesięcioleci do rodzaju występu. W ramach działalności artystycznej orkiestra realizuje występy na zlecenie kopalni, które stanowią muzyczną oprawę wydarzeń o charakterze marketingowym i promocyjnym. W tej kategorii występów mieszczą się także występy odbywające się podczas uroczystości religijnych oraz uroczystości pogrzebowych, a także występy podczas uroczystości organizowanych przez instytucje i podmioty publiczne (np. samorządy, organizatorów akcji i wydarzeń o charakterze społeczno-kulturalnym, organizatorów uroczystości patriotycznych, itp.). Osobną kategorię występów stanowi udział orkiestry w imprezach, zlecanych przez klientów zewnętrznych jako element organizowanych w podziemiach kopalni wydarzeń komercyjnych.

Współcześnie Orkiestra występuje, podobnie jak kiedyś, z okazji wszelkiego rodzaju rocznic i uroczystości patriotycznych, uroczystości górniczych, oficjalnych wizyt koronowanych głów, dostojników państwowych oraz przedstawicieli świata kultury i nauki. Bierze udział w paradach i przemarszach oraz koncertach galowych.

Do najbardziej spektakularnych wydarzeń z ostatnich kilku lat można zaliczyć dwa wydarzenia z 2018 roku. W styczniu 2018 odbył się koncert karnawałowy orkiestry z transmisją na żywo w mediach społecznościowych, a we wrześniu orkiestra wystąpiła na Rynku Głównym w Krakowie podczas pikniku patriotycznego „#NIEPODLEGŁA małopolska (Ryc. 10)”, zorganizowanego przez Małopolski Urząd Wojewódzki z okazji obchodów 100. Rocznicy Niepodległości Polski. Orkiestra wystąpiła również w czerwcu 2019 roku, podczas 15. Kongresu Organizacji Miast Światowego Dziedzictwa (OWHC) w Krakowie. W roku 2020 orkiestra zaprezentowała się z nowym repertuarem podczas w IV Balu Karnawałowym.



**Ryc. 10.** Uroczystości z okazji 11 listopada, Niepodległa Małopolska, 2018. Fot. R. Tatomir

**Fig. 10.** National Independence Day – 11th November. Independent Lesser Poland, 2018. Photo: R. Tatomir

also participates in parades and processions, as well as gala concerts.

Some of the most notable events from recent years include two significant occurrences in 2018. In January 2018, the band held a carnival concert with a live broadcast on social media. Later that year, in September, the band performed at the Main Square in Krakow during the patriotic picnic “#NIEPODLEGŁA Małopolska” (INDEPENDENT Lesser Poland), organized by the Małopolska Voivodeship Office to celebrate the 100th anniversary of Poland’s independence (Fig. 10). The band also performed in June 2019 at the 15th World Congress of the Organization of World Heritage Cities (OWHC) in Krakow. In 2020, the band showcased a new repertoire at the IV Carnival Ball of the Tourism Industry, organized by the mine for cooperating tour operators and tourism institutions. Due to the global pandemic situation, the band’s performances in 2021 and 2022 were significantly limited. Between 2017 and 2021, the band participated in over 270 performances (Fig. 11 A, B). The repertoire of the Representative Brass Band of the Wieliczka Salt



**Ryc. 11.** W klasztorze klarysek w Starym Sączu, 24. 07. 2022, Fot. T. Kordula

**Fig. 11.** Monastery of the Poor Clares, Stary Sącz, 24 July 2022. Photo: T. Kordula

wego Branży Turystycznej, organizowanego przez kopalnię dla współpracujących z nią touroperatorów oraz organizacji i instytucji turystycznych. Występy Orkiestry w latach 2021 i 2022 (Ryc. 11 A, B) – ze względu na sytuację epidemiczną w kraju i na świecie – były znacząco ograniczone. W latach 2017 – 2021 Orkiestra wzięła udział łącznie w ponad 270 różnego rodzaju występach.

Repertuar Reprezentacyjnej Orkiestry Dęta Kopalni Soli „Wieliczka” jest bardzo bogaty. Podczas występów wykonują różne kategorie utworów: marsze i hymny, pieśni i marsze żałobne, utwory kościelne (kolędy, pieśni), utwory rozrywkowe (muzyka popularna, w tym muzyka filmowa). Powyższy repertuar, obligatoryjny dla orkiestry górniczej, wymaga - jako minimum zapewniające należyte brzmienie - składu orkiestry od 18 - 25 osób. Większość występów, w tym zdecydowana większość występów imprezowych (komercyjnych) realizowana jest w składzie do 20 osób. W składzie 20-24 osób orkiestra występuje na pogrzebach. Zapewnienie oprawy muzycznej uroczystości pogrzebowych to jeden z ważnych elementów funkcjonowania orkiestry.

Skład minimum 25 osobowy pozwala na prezentację szeroko rozumianego repertuaru rozrywkowego. W przypadku występów na wolnym powietrzu i przemarszach paradnych wskazane jest zwiększenie składu orkiestry, co związane jest z zapewnieniem właściwej słyszalności orkiestry, ale także odpowiedniej prezencji orkiestry jako całości (skład ponad 30 osobowy). Większych składów wymaga też repertuar koncertowy, który stanowią utwory o rozbudowanej instrumentacji i na ogół o dużych wymaganiach technicznych stawianych instrumentalistom. Utwory takie wykonuje się zwykle na przeglądach, konkursach czy większych koncertach. Utwory koncertowe wymagają składu 35-osobowego. Niezwykle istotna jest struktura składu orkiestry rozumiana jako udział poszczególnych grup instrumentów w odniesieniu do składu całego zespołu. Nie występują tu sztywne reguły, ale jest pewne optimum wynikające z oceny dyrygenta biorącego pod uwagę podstawowe dla danej orkiestry rodzaje wykonywanych utworów. Zgodnie z tradycją wielicka orkiestra występuje w jednolitych, oryginalnych, charakterystycznych dla górnictwa mundurach. Umundurowanie orkiestrantów składa się z czarno ozdobionego czerwonym pióropuszem, marynarki, spodni lub spódnicy, koszuli mundurowej czarnej lub białej, białych rękawiczek i kurtki z szalikiem.

Sposoby promocji tradycji muzycznych wielickiej kopalni są różnorodne i prowadzone za pomocą wielorakich narzędzi. Jedną z form promocji jest organizowanie cyklu koncertów letnich. Te plenerowe spotkania muzyczne w Parku św. Kingi to kontynuacja najlepszych tradycji górniczej orkiestry, do których powrócono w lipcu 2015 roku. Orkiestra ma swój własny profil na FB, gdzie zamieszczane są również ciekawostki, jak ta o jednym z muzyków wielickiej orkiestry,

Mine is extensive. During performances, they play various categories of pieces, including marches and anthems, funeral dirges, church music (carols and hymns), and light music (popular and film music). This diverse repertoire, which is essential for a mining band, requires a minimum of 18 to 25 musicians to achieve the desired sound quality. Most performances, including the majority of commercial events, are carried out with a band of up to 20 musicians. The band performs at funerals with a lineup of 20 to 24 members. Providing musical accompaniment for funeral services is a key aspect of the band's operations. A minimum ensemble of 25 musicians allows for the performance of a wide range of light music. For outdoor performances and parades, it is advisable to increase the band's size to ensure both proper audibility and a fitting visual presentation (with more than 30 musicians). Larger ensembles are also needed for concert repertoire, which includes pieces with elaborate instrumentation and generally high technical demands. Such works are typically performed at contests, competitions, or major concerts and require a band of 35 musicians. The structure of the band, meaning the distribution of different instrument groups within the overall ensemble, is crucial. While there are no rigid rules, an optimal configuration is determined by the conductor, who considers the primary types of music performed by the band. Traditionally, the Wieliczka band performs in uniform, original, and distinctive mining attire. The uniform consists of a ceremonial hat adorned with a red plume, a jacket, trousers or a skirt, a black or white shirt, white gloves, and a jacket with a scarf. The promotion of the musical traditions of the Wieliczka Salt Mine employs a variety of methods and tools. One prominent promotional strategy is organizing a series of summer concerts. These open-air musical events in St. Kinga's Park continue the long-standing traditions of the mining band, a practice resumed in July 2015. Since then, the summer concerts have been held annually, every Saturday in July and August (with a break in 2020-2021 due to the pandemic). The band maintains a Facebook profile where updates and interesting facts are shared, such as a feature on one of the band's musicians who became a bugler at St. Mary's Basilica in Krakow<sup>20</sup>. Currently, the profile has 391 followers, with posts reaching between 100 and 300 people<sup>21</sup>. The content mainly covers current events related to the band, including reports from state ceremonies held on May 3rd and November 11th. Additionally, video materials are posted, such as film reports from concerts and the first rehearsal after the pandemic break. Recent content includes a series of posts titled „Kapelmistrowie górniczej Orkiestry” (Conductors of the

<sup>20</sup> Source: <https://www.kopalnia.pl/kopalnia-wiedzy/muzyk-reprezentacyjnej-orkiestry-detej-kopalni-soli-wieliczka-hejnalista-na-wiezy-mariackiej-w-krakowie-6snj>

<sup>21</sup> Data as of July 31, 2022

który został hejnalistą w kościele Mariackim w Krakowie<sup>20</sup>. Aktualnie rejestrujemy 391 obserwujących profil. Natomiast posty docierają do 100 – 300 osób<sup>21</sup>. Publikowana tematyka dotyczy głównie bieżących wydarzeń z życia orkiestry. Przykładem mogą być relacje z uroczystości państwowych organizowanych 3 maja i 11 listopada. Publikowane są także materiały video, relacje filmowe z koncertów, relacja z pierwszej po przerwie pandemicznej próbie orkiestry, itp. W ostatnim czasie prezentowany był także cykl postów „Kapelmistrzowie górniczej Orkiestry” z sylwetkami dyrygentów. Pojawił się również cykl „Muzyczne historie” z ciekawymi historiami z życia orkiestry oraz cykl „Co to za instrument?”. Publikowane są także muzyczne cytaty oraz posty dotyczące muzycznych świąt (Dzień Jazzu, Dzień Muzyki Polskiej czy Dzień Bluesa). Materiały filmowe z udziałem orkiestry trafiają również na kanał Kopalni Soli „Wieliczka” na YouTube. ([https://www.youtube.com/playlist?list=PLxBBt5wRZ\\_PNrE7EwsD5LKRO75Ob1k3S4](https://www.youtube.com/playlist?list=PLxBBt5wRZ_PNrE7EwsD5LKRO75Ob1k3S4)). Działalność orkiestry promowana jest także przy okazji promocji przedsięwzięć, w których bierze ona udział. W zależności od planu promocji i kanałów komunikacji wybranych dla poszczególnych wydarzeń, są to zarówno materiały drukowane (np. plakaty w przypadku cyklu letnich koncertów), jak i materiały graficzne przygotowywane pod kątem mediów elektronicznych (banery, zapowiedzi, posty, np. te związane z koncertem ze stycznia 2018 roku w komorze Haluszka, który był również transmitowany na żywo w mediach społecznościowych).

### 3. RZEŹBIARSTWO POD PATRONATEM ZARZĄDÓW WIELICKIEJ KOPALNI

Kopalnia Soli „Wieliczka” jest miejscem, w którym już od kilkuset lat rozwija się rzeźbiarstwo w soli. Przed wiekami, najczęściej realizowanymi tematami były wizerunki świętych patronów, szczególnie bliskich górniczym profesjom. Charakterystycznym zjawiskiem była anonimowość pierwszych rzeźbiących górników (Kalwajtys E., 1996). Tradycja rzeźbienia w soli przez górników jest wciąż kontynuowana, niejednokrotnie przekazywana (dziedziczona) w rodzinie razem z zawodem górnika. Od końca XVII w. po czasy współczesne datuje się wyraźny mecenat zarządców wielickiej kopalni nad szczególnie utalentowanymi górnikami. Jeśli zauważono u któregoś samorodny talent, zwalniano go z dotychczas wykonywanych prac i kierowano do prac rzeźbiarskich. W wielickiej kopalni soli, której właścicielem był polski król, decydujące znaczenie miało to, że zarządzający kopalnią rozumieli potrzebę zmieniania funkcji niektórych wyrobisk, ozdabiania ich i przekształcania w kaplice czy też sale balowe. Jednym z najstarszych przykładów jest XVII wieczna kaplica. św.

Mining Band), featuring profiles of the band’s conductors, “Muzyczne Historie” (Musical Stories) with intriguing anecdotes from the band’s history, and „Co to za instrument?” (What’s That Instrument?) highlighting various instruments. Musical quotes and posts about musical holidays (such as Jazz Day, Polish Music Day, and Blues Day) are also featured. Videos involving the band are also uploaded to the Wieliczka Salt Mine’s YouTube channel ([https://www.youtube.com/playlist?list=PLxBBt5wRZ\\_PNrE7EwsD5LKRO75Ob1k3S4](https://www.youtube.com/playlist?list=PLxBBt5wRZ_PNrE7EwsD5LKRO75Ob1k3S4)).

The band’s activities are also promoted in conjunction with the events in which it participates. Depending on the promotion plan and the communication channels chosen for each event, this includes both printed materials (e.g., posters for the summer concert series) and graphic materials designed for electronic media (such as banners, announcements, and posts). An example of this is the concert held in January 2018 in the Haluszka Chamber, which was broadcast live on social media.

### 3. SCULPTURE UNDER THE PATRONAGE OF THE MANAGEMENT OF WIELICZKA SALT MINE

The Wieliczka Salt Mine has been a site of salt sculpture for several centuries. Historically, the primary themes of these sculptures were images of patron saints, particularly those associated with mining professions. Anonymity was a characteristic feature of the early miners who created these sculptures (Kalwajtys E., 1996). The tradition of salt sculpting by miners continues to this day, often passed down through generations along with the mining profession. Since the late 17th century, there has been a clear patronage by the management of the Wieliczka mine towards particularly talented miners. When a miner’s innate talent was recognized, they were often relieved of their regular duties and redirected to sculpting work. In the Wieliczka Salt Mine, owned by the Polish king, the mine wardens understood the need to repurpose some of the mine’s workings, decorating and transforming them into chapels or ballrooms. One of the earliest examples is the 17th-century chapel of St. Anthony, which was established through the patronage of the then mine foreman Jakub Władysław Morsztyn, in honor of the reigning King Augustus II the Strong. Karl Pistl, the chief mining engineer in Stare Góry, initiated and oversaw the creation of another chapel, the Chapel of the Holy Cross, in the 16th-century Piżmowa Chamber, which is still referred to as Pistl’s Chamber today (Wolańska A., Skubisz M., 2016). From the first half of the 19th century, miners who engaged in artistic work began to sign their creations. An example of this is the salt sculpture of St. John of Nepomuk, beneath which a plaque was found inscribed with: “On March 24, 1828, Józef Grabowski,

<sup>20</sup> <https://www.kopalnia.pl/kopalnia-wiedzy/muzyk-reprezentacyjnej-orkestry-detek-kopalni-soli-wieliczka-hejnalista-na-wiezy-mariackiej-w-krakowie-6snj>

<sup>21</sup> Dane z 31.07.2022 roku

Antoniego, która powstała dzięki fundacji ówczesnego bachelmistrza wielickiej kopalni Jakuba Władysława Morsztyna, ku chwale ówczesnie panującego króla Augusta II Sasa. Karl Pistl szachmajster czyli kierownik robót górniczych w Starych Górach był inicjatorem i sprawcą powstania kolejnej kaplicy św. Krzyża w XVI wiecznej komorze Piżmowa, określanej po dzień dzisiejszy komorą Pistla. (Wolańska A., Skubisz M., 2016). Od pierwszej połowy XIX wieku górnicy zajmujący się również pracami stricte artystycznymi zaczęli podpisywać swoje prace. Tak było w przypadku solnej rzeźby przedstawiającej św. Jana Nepomucena, pod której cokołem znaleziono deskę z napisem „Dnia 24 marca 1828, Józef Grabowski, Maister”.<sup>22</sup>

Osiągnięcia górników-rzeźbiarzy przypadające na wiek XIX, ściśle związane są z panowaniem austriackich Habsburgów. Ówczesny zarząd kopalni widział potrzebę prowadzenia nie tylko eksploatacji soli, ale również upamiętniania znakomitych gości kopalni imponującymi pomnikami czy też ozdobnymi tablicami. W komorze im. Arcyksięcia Franciszka Karola wzniesiono obelisk przypominający o jego wizytach w kopalni. Jednocześnie, w tym samym okresie (połowa XIX wieku), zarządcy kopalni zezwolili i sfinansowali renowację XVII-wiecznej kaplicy św. Antoniego. Gdyby nie zamiłowanie członków zarządu saliny i ich wspierająca sztukę rzeźbiarską rola, zapewne nie powstałaby kaplica św. Kingi, od 120 lat najpiękniejsze miejsce w wielickiej kopalni. Należy wspomnieć chociażby Erazma Barącz, który odegrał kluczową rolę, obok Edwarda Windakiewicza i Sylwera Miszke, w protegowaniu solnego rzeźbiarstwa<sup>23</sup> (Gawroński W., 2008). Mecenas Kopalni Soli „Wieliczka” polega również na organizowaniu wystaw poświęconych górnikom-rzeźbiarzom, wysyłaniu ich prac na międzynarodowe wystawy oraz organizowaniu akcji popularyzatorskich. Geneza popularyzacji rzeźbiarstwa solnego, a tym samym wielickiej kopalni, sięga organizowanych od XIX wieku krajowych i światowych wystaw, na których prezentowano solne rzeźby. W 1894 roku odbyła się krajowa wystawa we Lwowie, na której eksponowano m.in. solną płaskorzeźbę przedstawiającą Upadek Chrystusa pod krzyżem. Wycięto ją z solnego ociosu niefunkcjonującej już w tamtym czasie kaplicy św. Krzyża w komorze Lizak (Wolańska A., 2016). W 1900 roku, w związku z organizowaną w Paryżu Światową Wystawą, która była swoistym podsumowaniem osiągnięć technicznych XIX wieku, Polacy także zaprezentowali własny dorobek, choć niestety nie pod szyldem swojej ojczyzny. Pokazano

Master.”<sup>22</sup> The achievements of miner-sculptors in the 19th century are closely tied to the reign of the Austrian Habsburgs. The management of the mine at that time recognized the need not only for salt extraction but also for commemorating distinguished visitors with impressive monuments and decorative plaques. In the Archduke Francis Charles Chamber, an obelisk was erected to commemorate his visits to the mine. Simultaneously, during the same period (mid-19th century), the mine’s management permitted and funded the renovation of the 17th-century chapel of St. Anthony. Without the enthusiasm of the mine’s management and their supportive role in the arts, the Chapel of St. Kinga—the most beautiful place in the Wieliczka mine for the past 120 years—might never have been created. Notably, figures such as Erazm Barącz, alongside Edward Windakiewicz and Sylwester Miszke, played a crucial role in fostering salt sculpting<sup>23</sup> (Gawroński W., 2008). The patronage of the Wieliczka Salt Mine also involves organizing exhibitions dedicated to miner-sculptors, sending their works to international exhibitions, and conducting promotional activities. The promotion of salt sculpting, and thus of the Wieliczka mine, dates back to national and international exhibitions held since the 19th century, where salt sculptures were showcased. In 1894, a national exhibition in Lwów featured a salt bas-relief depicting the Fall of Christ under the Cross, carved from a salt block from the no longer functioning chapel of the Holy Cross in the Lizak Chamber (Wolańska A., 2016). In 1900, during the World Exhibition in Paris, which summarized the technical achievements of the 19th century, Poles also presented their work, though unfortunately not under their own country’s banner. Among the exhibits was a life-size replica of the main altar of the Chapel of St. Anthony, sculpted in salt by Józef Markowski (these sculptures can now be seen in the Chapel of St. Kinga in the Wieliczka mine). The statue of Our Lady of Lourdes by Józef Markowski was also presented at the Agricultural and Industrial Exhibition in Kyiv in 1913. In 1938, through the Museum of Technology and Industry in Warsaw, a salt bas-relief titled “Wielka Legenda”, (The Great Legend) created by Antoni Wyrodek, was exhibited in New York (Gawroński W., 2008). A fascinating example for considering the forms of patronage by the mine towards miner-sculptors is the figure of Antoni Wyrodek, who created some of his works as an amateur miner-sculptor and signed them as “A. Wyrodek

<sup>22</sup> Trudno rozstrzygnąć, jak zauważył Marek Skubisz, czy Grabowski był twórcą tej rzeźby czy tylko pełniąc funkcję Maistra i nadzorował prace.

<sup>23</sup> Erazm Barącz (1859-1928) - wybitny inżynier, mierniczy, kolekcjoner, znawca dzieł sztuki; w latach 1915 i 1917-18 naczelnik Zarządu Salinarnego oraz pierwszy Dyrektor wielickiej Żupy Solnej w czasach II Rzeczypospolitej. W latach 1922-1928 – kustosz Muzeum Narodowego w Krakowie. Pochodził z rodziny polsko – ormiańskiej, której członkowie tworzyli elitę intelektualno-artystyczną Lwowa. Erazm przeszedł wszystkie stopnie kariery górniczej, od elewa do naczelnika zarządu.

<sup>22</sup> It is difficult to determine, as Marek Skubisz noted, whether Grabowski was the creator of this sculpture or if he merely served as the master overseeing the work.

<sup>23</sup> Erazm Barącz (1859-1928) was a distinguished engineer, surveyor, collector, and art connoisseur. He served as the head of the Salinity Administration in 1915 and 1917-18 and was the first Director of the Wieliczka Salt Mine during the Second Polish Republic. From 1922 to 1928, he was the curator of the National Museum in Krakow. Barącz came from a Polish-Armenian family, whose members were part of the intellectual and artistic elite of Lwów. Erazm advanced through all levels of a mining career, from trainee to head of the administration.

m.in. naturalnej wielkości kopię ołtarza głównego kaplicy św. Antoniego, wyrzeźbioną w soli przez Józefa Markowskiego (te rzeźby można dziś oglądać w kaplicy św. Kingi w wielickiej kopalni). Rzeźba Matki Boskiej z Lourdes wykonana przez Józefa Markowskiego, prezentowana była również na Wystawie Rolniczej i Przemysłowej w Kijowie w 1913 roku. W 1938 roku, za pośrednictwem Muzeum Techniki i Przemysłu w Warszawie, solna płaskorzeźba wykonana przez Antoniego Wyrodka pt. Wielka Legenda, była eksponowana na wystawie w Nowym Jorku (Gawroński W., 2008). Ciekawym przykładem do rozważania nad formami mecenatu kopalni nad górnikami-rzeźbiarzami jest postać Antoniego Wyrodka, który część swoich prac wykonał jako górnik-rzeźbiarz amator i podpisywał je „A. Wyrodek samouk”. Po skierowaniu go przez zarząd kopalni (na wniosek ministra Eugeniusza Kwiatkowskiego, który zachwycił się jego pracami podczas wizyty na trasie turystycznej) i ukończeniu w 1935 roku Państwowej Szkoły Sztuk Zdobniczych i Przemysłu Artystycznego w Krakowie, pracował już jako wykwalifikowany rzeźbiarz. Jego artystyczna droga to ponad 40 lat rzeźbiarstwa w soli – od samouka po dyplomowanego rzeźbiarza. Które z jego prac bardziej są cenione przez odbiorców i krytyków, czy te sprzed podjęcia nauki czy też te wykonane po uzyskaniu dyplomu? Zdania są podzielone. Również współcześnie zarząd kopalni kieruje górników-rzeźbiarzy na kursy doszkolające. Znaczącą rolę w zmianie postrzegania kopalni i przystosowaniu trasy turystycznej do współczesnych oczekiwań odegrał Aleksander Batko<sup>24</sup>. Z racji zajmowanych stanowisk, jak również pasji artystycznych nadzorował w latach 60 i 70. XX w., prace remontowo-konserwatorskie na trasie turystycznej i podziemnej ekspozycji MŻKW. Przyczynił się do wyrzeźbienia przez Władysława Hapka pomników Mikołaja Kopernika i Kazimierza Wielkiego. Współpracował z górnikami-rzeźbiarzami: Mieczysławem Kluzkiem, który jest autorem grupy rzeźb tworzących tzw. Wielką Legendę w komorze Janowice oraz postaci Pokutników w komorze Spalone; Antonim Wyrodkiem autorem m.in. pomnika Cieśli górniczych w komorze Drozdowice i popiersia Stanisława Staszica w komorze jego imienia; Stefanem Kozikiem – autorem m.in. grupy krasnoludków na podszybiu szybika Kunegunda.

Sztuki piękne nie były również obce Ignacemu Markowskiemu<sup>25</sup>, który był dyrektorem kopalni a z pasji malarzem-amatorem i członkiem Towarzystwa Śpiewaczego Lutnia. Zarządzał kopalnią w latach 1975-85, starając się zapewnić

self-taught”. After being recommended by the mine management (following a recommendation from Minister Eugeniusz Kwiatkowski, who was impressed by his work during a visit to the tourist route) and graduating from the School of Decorative and Applied Arts in Krakow in 1935, he worked as a qualified sculptor. His artistic career spanned over 40 years, from self-taught sculptor to diploma-holding artist. Whether his pre-education works or those created after obtaining his diploma are more valued by audiences and critics remains a topic of debate. Even today, the mine’s management directs miner-sculptors to further training courses. A significant role in changing the perception of the mine and adapting the tourist route to modern expectations was played by Aleksander Batko<sup>24</sup>. Due to his positions and artistic passions, he oversaw renovation and conservation work on the tourist route and the underground exhibition of the Cracow Saltworks Museum in Wieliczka during the 1960s and 1970s. He contributed to the creation of statues by Władysław Hapek, including those of Nicolaus Copernicus and Casimir the Great. He also collaborated with miner-sculptors such as Mieczysław Kluzek, who created the group of sculptures known as the “Great Legend” in the Janowice Chamber and the Penitents in the Spalone (Bruned) Chamber; Antoni Wyrodek, author of the Mining Carpenters’ Monument in the Drozdowice Chamber and the bust of Stanisław Staszic in the chamber bearing his name; and Stefan Kozik, who created the group of dwarfs on the casing of Kunegunda’s small opening. Fine arts were also familiar to Ignacy Markowski<sup>25</sup>, who, as the director of the mine and an amateur painter and member of the Lutnia Singing Society, managed the mine from 1975 to 1985, striving to ensure production continuity while also preserving the historical values and achievements of the miner-sculptors.

The new era for salt mine sculpture began with the organizational changes in the Wieliczka Salt Mine in 1997. This transformation included the creation of a separate entity, the “Kopalnia Soli ‘Wieliczka’ Trasa Turystyczna,” (The Wieliczka Salt Mine Tourist Route) marking the end of salt extraction and a new approach to presenting the site, which was becoming Poland’s greatest tourist attraction. The management, in its role as a patron of salt sculptors, proved to be excellent. They understood its role in making the underground heritage accessible in the best possible way. Emphasizing the mine’s historical, natural, and cultural values was a key priority from the start. In 1997, the tradition of salt sculpture continued with the installation of a statue of Marshal Józef Piłsudski, sculpt-

<sup>24</sup> Aleksander Batko (1928-2006) - dr nauk technicznych, przeszedł wszystkie szczeble kariery w wielickiej kopalni soli od sztygara zmianowego, przez kierownika robót po dyrektora technicznego (1969-78) oraz zastępcę dyrektora ds. Inwestycji Zabytkowej Kopalni Soli „Wieliczka (1979-83)

<sup>25</sup> Ignacy Markowski Ignacy Klemens (1934-1991) - inżynier górniczy, pochodził z rodziny górniczej, od szóstego pokolenia związanej z wielicką kopalnią. Był wnukiem jednego z pierwszych twórców kaplicy Św. Kingi-Tomasza Markowskiego.

<sup>24</sup> Aleksander Batko (1928-2006) - Doctor of Technical Sciences, progressed through all levels of his career at the Wieliczka Salt Mine, from shift foreman and works manager to Technical Director (1969-78) and Deputy Director for Investments at the Historical Salt Mine Wieliczka (1979-83).

<sup>25</sup> Ignacy Klemens Markowski (1934-1991) - a mining engineer, came from a mining family that had been connected with the Wieliczka Salt Mine for six generations. He was the grandson of Tomasz Markowski, one of the original creators of the Chapel of St. Kinga.

ciągłość produkcji a jednocześnie chronić walory historyczne i dokonania górników-rzeźbiarzy.

Nowy etap wyznaczyły zmiany organizacyjne w kopalni, przeprowadzone w 1997 roku. Polegały one m.in. na wyodrębnieniu z przedsiębiorstwa państwowego jakim była wówczas Kopalnia Soli „Wieliczka” – spółki Kopalnia Soli „Wieliczka” Trasa Turystyczna. Zbiegło się to w czasie z zakończeniem eksploatacji soli i nowym spojrzeniem na udostępnianie zabytku, który stawał się największą atrakcją turystyczną Polski. Zarząd w roli mecenasa rzeźbiarzy solnych sprawdzał się znakomicie. Rozumiał, że został powołany do tego aby w jak najlepszy sposób udostępnić podziemne dziedzictwo. Od początku było jasne, że należy podkreślić walory kopalni – jej wartości historyczne, przyrodnicze i kulturowe. Nadal czerpano z rzeźbiarskich tradycji, w 1997 roku w komorze Józefa Piłsudskiego stanął pomnik Marszałka dłuta Stanisława Anioła. Dwa lata później w kaplicy św. Kingi odsłonięto pomnik Jana Pawła II (Leśny M., 2018). W czasach nam współczesnych wielicka kopalnia zaistniała na dwóch światowych wystawach w Niemczech i Japonii. Na Expo 2000 w Hanowerze, gdzie główny temat brzmiał: „Człowiek – Przyroda – Technika”. Założeniem wystawy było pokazanie możliwości osiągnięcia równowagi między rozwojem techniki, życiem człowieka i naturą. Wieliccy górnicy zrealizowali tam i pokazali również swoje prace, m.in. ponad dwumetrowej wysokości rzeźbę pt. Skarbnik. W 2005 roku zorganizowano EXPO w japońskiej prefekturze Aichi. Tematem przewodnim tej wystawy było hasło „Mądrość natury”. Ekspozycja, zbudowana z solnych rzeźb wielickich górników, znakomicie wpisała się w klimat polskiego narodowego pawilonu. W 2003 roku z okazji 25. lecia wpisania wielickiej kopalni na Listę UNESCO, górnicy-rzeźbiarze wykonali pełną symbolicznego przekazu rzeźbę solną na krakowskim Rynku, która została przekazana prezydentowi Krakowa. W 2009 r. w Lille Saint Andre we Francji zaprezentowano wystawę zatytułowaną „Kopalnia Soli Wieliczka”. Składały się na nią eksponaty z wielickiej kopalni oraz z Muzeum Żup Krakowskich i Urzędu Miasta i Gminy Wieliczka. Ekspozycje opowiadające o wielickich podziemiach, w skład których wchodziły również rzeźby solne, prezentowano także we Włoszech, Belgii, Niemczech. Kopalnia uczestnicząc w międzynarodowych targach turystycznych (Londyn, Mediolan, Berlin), organizowała również na swoim firmowym stoisku pokazy rzeźbienia w soli, które cieszyły się bardzo dużym zainteresowaniem. Było to niesza-blonowe promowanie kopalni poprzez rzeźbiarstwo, ale również propagowanie artystycznego kunsztu obróbki solnych brył. Podczas pokazów organizowanych w szkołach, czy też w czasie warsztatów twórczych w Polsce i za granicą, górnicy-rzeźbiarze starają się przekazać młodzieży swoje zamiłowanie do wykonywania prac plastycznych w soli. Podczas turnieju Salt Mine Cup co roku organizowane jest stoisko rzeźbiarskie. Przez kilka lat górnicy-rzeźbiarze wykonywali

ed by Stanisław Anioł, in the Józef Piłsudski Chamber. Two years later, a statue of John Paul II was unveiled in the Chapel of St. Kinga (Leśny M., 2018). In modern times, the Wieliczka mine has made its mark on global exhibitions in Germany and Japan. At Expo 2000 in Hanover, themed “Man – Nature – Technology.” The aim of the exhibition was to showcase the possibility of achieving a balance between technological development, human life, and nature. The mine’s sculptors presented their work, including a two-meter-tall sculpture titled “Skarbnik” (Treasurer). In 2005, the Aichi Expo in Japan, with the theme “Wisdom of Nature,” featured an exhibit of salt sculptures by Wieliczka miners, blending seamlessly with the Polish national pavilion. For the 25th anniversary of the Wieliczka mine’s inclusion on the UNESCO World Heritage List in 2003, miners sculpted a symbolic salt sculpture in Krakow’s Main Square, which was handed over to the mayor of Krakow. In 2009, an exhibition titled “Wieliczka Salt Mine” was held in Lille Saint Andre, France, showcasing exhibits from the Wieliczka mine, the Cracow Saltworks Museum, and the Town and Municipality Office of Wieliczka. Exhibitions featuring Wieliczka’s underground world, including salt sculptures, have also been presented in Italy, Belgium, and Germany. The mine’s participation in international tourism fairs (London, Milan, Berlin) included live salt sculpting demonstrations at their stall, which garnered significant interest. It was an unconventional way of promoting the mine through sculpture, as well as advancing the artistic craftsmanship of working with salt blocks. During workshops and demonstrations in schools in Poland and abroad, miner-sculptors strive to share their passion for creating art from salt. The Salt Mine Cup tournament features a dedicated sculpting stall every year, and for several years, miner-sculptors created their salt art at Children’s Day events in Warsaw (KPRM) (Chancellery of the Prime Minister of Poland). They also participated in the Salt Festival organized by the Cracow Saltworks Museum. An important and interesting initiative related to salt sculpting was the arrangement of three outdoor sculpting workshops in the Wieliczka Salt Mine in 2006, 2008, and 2010. Particularly significant was the first workshop titled Towards Absolute Synthesis, during which a group of students from the Krakow Academy of Fine Arts, inspired by their journeys through the underground passages of the Wieliczka mine, created sculptural projects in salt blocks<sup>26</sup>. Miners provided consultations on salt carving techniques. This workshop served as an excellent opportunity for experience exchange and artistic workshops. Another noteworthy form of promoting salt sculpture was organizing exhibitions in the mine dedicated to the work of individual miners-sculptors. The first exhibi-

<sup>26</sup> The workshops were conducted according to proprietary educational programs and under the supervision of Professor Bogusław Salwiński, Dean of the Sculpture Department at the Academy of Fine Arts, along with Professor Aleksander Śliwa, Dr. Bartłomiej Struzik, and Dr. Dobiesław Gała.

również swoje solne dzieła podczas Dnia Dziecka w Warszawie (KPRM). Rzeźbiarze byli obecni także podczas Święta Soli organizowanego przez Muzeum Żup Krakowskich. Ważną i ciekawą inicjatywą związaną z rzeźbiarstwem była realizacja w Kopalni Soli „Wieliczka” w latach 2006, 2008, 2010 trzech plenerów rzeźbiarskich. Szczególnie ważny był pierwszy plener pt. Ku syntezie absolutnej, podczas którego grupa studentów krakowskiej Akademii Sztuk Pięknych, zainspirowana wędrówkami przez podziemne trasy wielickiej kopalni, realizowała projekty rzeźbiarskie w bryłach solnych<sup>26</sup>. Konsultacje w zakresie technologii rzeźby solnej prowadzili górnicy-rzeźbiarze. Plener ten był doskonałą okazją do wymiany doświadczeń i stał się formą warsztatów artystycznych. Ciekawą formą promocji rzeźbiarstwa solnego i przedstawienia dorobku poszczególnych górników-rzeźbiarzy było organizowanie wystaw w kopalni poświęconych twórczości górników. Pierwszą tego typu wystawą była zorganizowana w 2000 roku, w komorze Stanisława Staszica, przez Kopalnię Soli „Wieliczka” wspólnie z Muzeum Górnictwa Węglowego w Zabrzu, czasowa ekspozycja pt. Górnicy – artystami. Zaprezentowano na niej prace górników-samouków, wykonane w różnych technikach plastycznych, w tym także rzeźbę w soli<sup>27</sup>. W kwietniu 2002 roku zaprezentowano wystawę czasową pt. Władysław Hapek – artysta malarz, rzeźbiarz wielickiej kopalni<sup>28</sup>. W 2012 roku górnik-rzeźbiarz Józef Kowalczyk zaprezentował w komorze Drozdowice w wielickiej kopalni swoją autorską jubileuszową setną wystawę. Odrębną formą promocji wielickiego rzeźbiarstwa w soli były wygłaszane prelekcje np. podczas cyklicznych spotkań Wieliczka-Wieliczanie i różnego typu konferencji i sympozjów<sup>29</sup>.

Najlepszymi „ambasadorami” rzeźbiarstwa solnego są po prostu rzeźby solne, wykonywane dzięki mecenatowi zarządu wielickiej kopalni i eksponowane na stałe poza Kopalnią Soli „Wieliczka”. Najokazalszym przykładem jest kaplica św. Kingi w Centrum Jana Pawła II w krakowskich Łagiewnikach. Powstała w 2013 roku, a jej wystrój wzorowano na wielickiej kaplicy św. Kingi. Projekt kaplicy św. Kingi zakładał wyko-

tion of this kind was the exhibition titled *Miners as Artists*, organized in 2000 in the Stanisław Staszic Chamber by the Wieliczka Salt Mine in collaboration with the Coal Mining Museum in Zabrze. The exhibition showcased the works of self-taught miners, created using various artistic techniques, including salt sculpture<sup>27</sup>. In April 2002, a temporary exhibition titled “Władysław Hapek – Artist, Painter, Sculptor of the Wieliczka Mine” was presented<sup>28</sup>. In 2012, miner-sculptor Józef Kowalczyk held his 100th jubilee exhibition in the Drozdowice Chamber of the Wieliczka mine. An additional form of promoting Wieliczka’s salt sculpting tradition includes lectures delivered at regular events such as the *Wieliczka-Wieliczanie* (*Wieliczka- The People of Wieliczka*) meetings and various conferences and symposia<sup>29</sup>.

The most effective ambassadors of salt sculpture are the very works themselves, which, thanks to the patronage of the Wieliczka Salt Mine’s management, are displayed permanently outside the mine. A prime example is the Chapel of St. Kinga at the John Paul II Center in Krakow’s Łagiewniki, which was completed in 2013. This chapel’s design emulates the interior of the Wieliczka Chapel of St. Kinga, using salt as the primary material for its most valuable decorative elements. The central feature of the altar in the new chapel is a statue of St. Kinga, created by miner-sculptor Piotr Starowicz. The miners also replicated six bas-reliefs (the originals are located 101 meters underground in the Chapel of St. Kinga in the Wieliczka mine): “The Massacre of the Innocents” and “The Flight into Egypt” by Jan Banaś and Jacek Talapka; “The Twelve-Year-Old Christ Teaching in the Temple” and “The Wedding at Cana” by Marek Stachura and Michał Anioł; and “The Last Supper” and “Doubting Thomas” by Piotr Starowicz and Marek Janowski. Other miners involved in the chapel’s installation included Karol Kobyłko, Mirosław Sikora, and Marcin Piątek. A statue of St. Kinga by Marek Stachura (two meters tall without the pedestal) is also on display at the Salt and Tobacco Museum in Tokyo. In 2016, Wieliczka miners Jan Banaś and Michał Anioł created two bas-reliefs for the Jagiellonian University’s newly opened Center for Natural Education. They represent the coat of arms of Alma Mater and the logo of the Wieliczka Salt Mine. They promote

<sup>26</sup> Plenery były realizowane według autorskich programów dydaktycznych i pod opieką dziekana Wydziału Rzeźby ASP prof. Bogusza Salwińskiego oraz prof. Aleksandra Śliwy, dr Bartłomieja Struzika, dr. Dobiesława Gały.

<sup>27</sup> Wystawa ta była jednym z elementów imprezy pt. I Europejskie Dni Obrzędów i Zwyczajów Górniczych.

<sup>28</sup> Wystawa zorganizowana wg scenariusza Agnieszki Wolańskiej, obejmowała w formie przekrojowej całą twórczość artysty, w tym również prace związane tematycznie z kopalnią soli w Wieliczce.

<sup>29</sup> W 2001 roku odbyło się 38 spotkanie z cyklu *Wieliczka-Wieliczanie* pt. *Górnicy-rzeźbiarze z Kopalni Soli „Wieliczka”*, podczas którego dr Urszula Janicka-Krzywda wygłosiła prelekcję pt. *Tradycje rzeźby w soli w wielickiej kopalni*. W 2016 roku odbyło się 219 spotkanie z cyklu *Wieliczka – Wieliczanie* pt. *Górnicy – rzeźbiarze Kopalni Soli „Wieliczka”*. Podczas tego spotkania Agnieszka Wolańska wygłosiła odczyt pt. *Górnicy rzeźbiarze dawniej i dziś, czyli o tradycji rzeźbienia w wielickiej kopalni soli*. Podczas tych spotkań zostały również zarejestrowane przez ich organizatorkę Jadwigę Dudę wspomnienia przybyłych górników-rzeźbiarzy. Prezentację na temat wielickich rzeźb pokazywane były wielokrotnie m.in. podczas Międzynarodowych Targów Turystyki Pielgrzymkowej w Krakowie.

<sup>27</sup> This exhibition was part of the event ‘I, European Days of Mining Customs and Traditions’.

<sup>28</sup> The exhibition, organized according to Agnieszka Wolańska’s script, provided a comprehensive overview of the artist’s entire body of work, including pieces thematically related to the Wieliczka Salt Mine.

<sup>29</sup> In 2001, the 38th meeting in the *Wieliczka-Wieliczanie* series, titled “Miner-Sculptors from the Wieliczka Salt Mine,” took place, during which Dr. Urszula Janicka-Krzywda delivered a lecture titled “Traditions of Salt Sculpture in the Wieliczka Mine.” In 2016, the 219th meeting in the series, also titled “Miners-Sculptors from the Wieliczka Salt Mine,” was held. During this meeting, Agnieszka Wolańska presented a talk titled “Miners as Sculptors Past and Present: On the Tradition of Carving in the Wieliczka Salt Mine.” During these events, the organizer, Jadwiga Duda, also recorded the memories of the attending miner-sculptors. Presentations about the Wieliczka sculptures were shown multiple times, including at the International Pilgrimage Tourism Fair in Krakow.

rzystanie soli jako materiału, w którym zostały wykonane najcenniejsze elementy wystroju wnętrza. Centralne miejsce w ołtarzu głównym zajmuje figura św. Kingi, zaprojektowana i wykonana przez górnika – rzeźbiarza Piotra Starowicza. Górnicy wykonali kopie sześciu płaskorzeźb (oryginały znajdują się 101 metrów pod ziemią, w kaplicy św. Kingi w wielickiej kopalni): „Rzeź Niewiniątek”, „Ucieczka do Egiptu” – to dzieła Jana Banasia oraz Jacka Talapki; „Dwunastoletni Chrystus nauczający w świątyni” oraz „Wesele w Kanie Galilejskiej” – wyrzeźbił Marek Stachura wraz z Michałem Aniołem; natomiast „Ostatnia Wieczerza” i „Niewierny Tomasz” to prace Piotra Starowicza i Marka Janowskiego. Pozostali górnicy, którzy pracowali przy montażu wystroju kaplicy to: Karol Kobyłko, Mirosław Sikora, Marcin Piątek. Rzeźba przedstawiająca Świętą Kingę (wys. bez postumentu 2 m) autorstwa Marka Stachury jest eksponowana w Muzeum Soli i Tabaki w Tokio. W 2016 roku, wieliczcy górnicy-rzeźbiarze Jan Banaś i Michał Anioł wykonali w soli dwie płaskorzeźby, które zarząd kopalni ofiarował Uniwersytetowi Jagiellońskiemu do nowo otwartego Centrum Edukacji Przyrodniczej. Jest to herb Alma Mater oraz logo Kopalni Soli „Wieliczka”. Promują one sztukę rzeźbienia w soli i wielicką kopalnię na terenie Campusu Uniwersyteckiego w Krakowie. W tym samym roku, podczas Światowych Dni Młodzieży górnicy rzeźbiarze Piotr Starowicz i Jan Banaś wykonali, mierzący 160 cm, dębowy krzyż z figurą Chrystusa Ukrzyżowanego, wykonaną w drewnie lipowym. Poprzez swoją symbolikę, na którą składają się wkomponowane w kulę ziemską herby Ojca Świętego Franciszka i kardynała Stanisława Dziwisza oraz logo Światowych Dni Młodzieży i Kopalni Soli „Wieliczka” wpisał się w duchowość franciszkańską, która jest bardzo bliska wielickim górnikom. Krzyż ten po poświęceniu przez Ojca Świętego na wielickich Brzegach, został zawieszony w budynku nadszybia szybu Regis. W 2018 roku górnicy-rzeźbiarze wykonali kolejny dębowy krzyż, tym razem inkrustowany kryształami soli, w darze dla bazyliki św. Brygidy w Gdańsku. W jego centrum umieścili Serce Chrystusa, a na ramionach herby: Gdańska, zakonu sióstr brygidek, rodu Arpadów z którego wywodziła się św. Kinga oraz znak firmowy wielickiej kopalni. Krzyż ten stał się częścią Bursztynowego Ołtarza Ojczyzny. Do promowania rzeźbiarstwa w soli przyczynia się przede wszystkim zabezpieczanie i udostępnianie podziemnych komór, których wnętrza zdobią solne rzeźby. Ogląda je *in situ* około 2 000 000 ludzi rocznie. Fotografując czy też opisując później swoje wrażenia z peregrynacji przez unikatową podziemną galerię sztuki stają się oni popularyzatorami tego miejsca.

W wielickiej kopalni soli powstawały dzieła o treści religijnej, jak i pomniki ku czci zasłużonych ludzi polityki, nauki i sztuki oraz dzieła symboliczne i dekoracyjne. Na przestrzeni ponad 300 lat solne artefakty pełniły różne funkcje, zmieniała się również pozycja i kwalifikacje wielickich górników-rzeź-

the art of salt sculpting and the Wieliczka mine within the university's campus in Krakow. During World Youth Day in 2016, miner-sculptors Piotr Starowicz and Jan Banaś crafted a 160 cm wooden cross with a figure of the Crucified Christ in limewood. Through its symbolism, which includes the coats of arms of Pope Francis and Cardinal Stanisław Dziwisz integrated into the globe, as well as the logos of World Youth Day and the Wieliczka Salt Mine, it aligns with the Franciscan spirituality that is very dear to the miners of Wieliczka. After being blessed by the Pope, the cross was hung in the Regis Shaft's top building. In 2018, another wooden cross, inlaid with salt crystals and featuring the Heart of Christ in the center, was gifted to the Basilica of St. Bridget in Gdańsk. The cross includes coats of arms for Gdańsk, the Bridgettine sisters, the Arpad dynasty (from which St. Kinga originated), and the Wieliczka mine. It became part of the Amber Altar of the Homeland. Promoting salt sculpture is also achieved by safeguarding and showcasing the underground chambers decorated with these sculptures. Approximately 2,000,000 visitors per year experience these unique underground art galleries. By photographing and describing their experiences, these visitors further popularize the Wieliczka Salt Mine and its artistic heritage.

Over more than 300 years, the Wieliczka Salt Mine has been a site of significant artistic creation, producing works ranging from religious sculptures to monuments honoring distinguished figures in politics, science, and art, as well as symbolic and decorative pieces. The role and qualifications of Wieliczka's salt sculptors have evolved, reflecting the changes in artistic, technical, and managerial approaches over the centuries. Maintaining the tradition of salt sculpting has been a key aspect of the patronage provided by successive management of the Wieliczka Salt Mine. This support is manifested through the establishment of a professionally equipped sculpting workshop within the company and the employment of both self-taught sculptors and those with formal artistic training. The contemporary team of salt sculptors employed by Kopalnia Soli Wieliczka Wsparcie Sp. z o.o. (The Wieliczka Salt Mine Support Ltd.) (formerly Kopalnia Soli Wieliczka Trasa Turystyczna Sp. z o.o. (The Wieliczka Salt Mine Tourist Route Ltd.)) includes: Jan Banaś, Michał Anioł, Wojciech Dańda, Wojciech Markowski, Mirosław Sikora, and Marcin Piątek. These sculptors either inherited their craft from family traditions or honed their skills under the guidance of more experienced artists. Their workshop is diverse. The conditions in which they grew up undoubtedly influenced the style of their sculptures. They create based on well-established patterns and are most inclined towards realistic depictions of reality or replicating motifs found in traditional sacred art. Wieliczka sculptors utilize a range of tools, from traditional hand tools for stone and wood carving to advanced power tools. Despite often working on projects with prede-

biarzy. Podtrzymywanie tradycji rzeźbienia w soli, a zarazem formą mecenatu kolejnych zarządów kopalni, jest utrzymywanie w strukturach firmy profesjonalnie wyposażonej pracowni rzeźbiarskiej oraz zatrudnianie w niej górników-rzeźbiarzy samouków oraz osób z wykształceniem plastycznym. Współcześni górnicy-rzeźbiarze zatrudnieni są w Kopalni Soli „Wieliczka” Wsparcie sp. z o. o. (poprzednio w Kopalni Soli „Wieliczka” Trasa Turystyczna sp. z o.o.) to: Jan Banaś, Michał Anioł, Wojciech Dańda, Wojciech Markowski, Mirosław Sikora, Marcin Piątek. Sztukę obróbki soli i drewna wynieśli z tradycji rodzinnych lub doskonalić się przy pomocy bardziej doświadczonych rzeźbiarzy. Ich warsztat jest zróżnicowany. Uwarunkowania w jakich wyrosli mają niewątpliwie wpływ na stylistykę ich rzeźb. Tworzą w oparciu o sprawdzone wzorce i najbliższe jest im realistyczne odwzorowywanie rzeczywistości lub powielanie wzorów obecnych w tradycyjnej sztuce sakralnej. Obok rzeźbiarskich przyborów do ręcznej obróbki kamienia i drewna używają również nowoczesnych elektronarzędzi. Pomimo tego, iż tematyka wykonanych rzeźb bardzo często jest narzucona przez zleceńodawcę, górnicy-rzeźbiarze niejednokrotnie sami występują z inicjatywą konkretnego tematu, który jest później przez nich realizowany. Do górników-rzeźbiarzy należy również jakie wybiorą rozwiązania formalne, przy wykonywaniu zlecenia.

Górnicy-rzeźbiarze, poprzez swoją twórczość, dają też świadectwo postaw patriotycznych i zawodowej jedności i solidarności<sup>30</sup>. Solne posągi dowodzą ich dumy z najwybitniejszych Polaków, jak Kazimierz Wielki, Mikołaj Kopernik, Juliusz Słowacki, Jan Paweł II. Przywołują postaci będące wzorem niezłomności np. popiersie ks. Jerzego Popiełuszki, a także twórców naszej niepodległości – posągi marszałka Józefa Piłsudskiego i gen. Józefa Hallera. Wymowna jest tu rzeźba, powstała w 2018 roku w 100 lecie odzyskania niepodległości pt. Pierwsza chwila wolności wyobrażająca skutą łańcuchami Polskę w jej dawnych granicach, nad którą rozpościera skrzydła orzeł w koronie. Łańcuchy rozrywają górnicy solni, używając do tego narzędzi górniczych.

#### 4. FACEBOOK ORAZ INSTAGRAM

Kopalnia Soli „Wieliczka” obecna jest również na najbardziej popularnych platformach społecznościowych, czyli na Facebooku (fb) i Instagramie. Platformy te stały się niezwykle istotnymi kanałami komunikacji we współczesnym świecie. Użytkownicy tych platform informują o wydarzeniach, w których uczestniczą, dzielą się zdjęciami, wyrażają swoje opinie (aprobatę – „lubię to”). Kopalnia Soli „Wieliczka” prowadzi swój profil poprzez publikowanie treści o angażującym

terminated themes set by clients, these sculptors frequently propose their own ideas, showcasing their creative initiative. They also make key decisions regarding formal solutions and artistic execution when fulfilling commissions. Their work reflects a deep engagement with both historical techniques and current artistic trends. While adhering to proven patterns, they are also encouraged to innovate and adapt, ensuring that their creations continue to resonate with both traditional and contemporary audiences.

The miners and sculptors at the Wieliczka Salt Mine, through their art, also demonstrate their patriotic attitudes and professional unity and solidarity<sup>30</sup>. The salt statues highlight their pride in the most distinguished Poles, such as Kazimierz the Great, Nicolaus Copernicus, Juliusz Słowacki, and Pope John Paul II. They also honor figures of steadfastness, such as the bust of Father Jerzy Popiełuszko, and creators of Polish independence, including the statues of Marshal Józef Piłsudski and General Józef Haller. Notably, a sculpture created in 2018 for the 100th anniversary of Poland's regained independence, titled "The First Moment of Freedom," depicts a chained Poland in its historical borders, with an eagle in a crown spreading its wings above. The chains are being broken by salt miners using mining tools.

#### 4. FACEBOOK AND INSTAGRAM

The Wieliczka Salt Mine is also present on popular social media platforms, namely Facebook and Instagram. These platforms have become crucial communication channels in the modern world. Users of these platforms share information about events they participate in, post photos, and express their opinions (approval – “like”). The Wieliczka Salt Mine utilizes its social media profiles to engage audiences by posting content that raises brand awareness and, consequently, increases ticket sales. On Facebook and Instagram, posts related directly or indirectly to the works of Wieliczka's miners are frequently shared<sup>31</sup>. These posts often showcase sculptures, particularly during anniversaries or special occasions (e.g., the statue of Pope John Paul II on the anniversary of his death or the salt bas-relief “The Last Supper” (Fig. 12) during Easter). One of the most popular types of posts on Facebook includes photo albums, which receive a high number of views. These albums feature artworks created by the sculptors-miners. Examples of such posts/albums are: “Chandeliers with Salt Crystals,” “Art Encased in a Salt Block,” and “Meet the Wieliczka Sculptors (Fig. 13).” This series of posts is continu-

<sup>30</sup> W 25. lecie powstania NSZZ „Solidarność” w chodniku noszącego imię Jana Pawła II, górnik-rzeźbiarz Stanisław Anioł wykonał solną płaskorzeźbę, nawiązującą do rocznicy powstania niezależnego związku oraz pontyfikatu Papieża-Polaka.

<sup>30</sup> On the 25th anniversary of the founding of NSZZ “Solidarność,” (Independent Self-Governing Trade Union ‘Solidarity’) miner-sculptor Stanisław Anioł created a salt bas-relief in the Jan Paweł II (John Paul II) passageway, commemorating both the anniversary of the independent union's founding and the pontificate of the Polish Pope.

<sup>31</sup> Information obtained from Mr. Jakub Banaś from the Marketing and Corporate Communications Department of the Wieliczka Salt Mine S.A.



**Ryc. 12.** Post – Ostatnia Wieczerza, 2022, Fot. R. Stachurski  
**Fig. 12.** Post – The Last Supper, 2022, Photo: R. Stachurski.

charakterze, zwiększając poprzez to świadomość swojej marki wśród odbiorców, a w konsekwencji zwiększając sprzedaż. Na Facebooku oraz Instagramie co jakiś czas pojawiają się posty bezpośrednio lub pośrednio nawiązujące do prac rzeźbiarskich wielickich górników<sup>31</sup>. W postach prezentowane są rzeźby, zwykle w związku z różnymi jubileuszami (np. pomnik Jana Pawła II w rocznicę Jego śmierci czy solna płaskorzeźba „Ostatnia wieczerza” (Ryc. 12) w czasie Wielkanocnym). Jednymi z najpopularniejszych typów postów jakie publikuje kopalnia na Facebooku są albumy. Cieszą się one dużą ilością wyświetleń. Tutaj także prezentowane są dzieła wykonane przez wielickich górników-rzeźbiarzy. Przykładem mogą być posty/albumy: „Żyrandole z solnymi kryształkami”, „Sztuka zamknięta w bryłce soli” czy „Poznajcie wielickich rzeźbiarzy” (Ryc. 13). Cykl postów jest cały czas kontynuowany i aktualizowany. W październiku 2021 roku odbyła się charytatywna gala bokserska: Biznes Boxing Polska gdzie licytowano m.in. solną figurę pięściarza (Ryc. 14). O tym wydarzeniu również informowano w poście na Facebooku. Rzeźby solne są również przekazywane jako nagrody

<sup>31</sup> Informacje uzyskane od Pana Jakuba Banasia z Działu Marketingu i Komunikacji Korporacyjnej KSW SA



**Ryc. 13.** Post – poznajcie wielickich rzeźbiarzy, 2022, Fot. R. Stachurski  
**Fig. 13.** Post – Meet the Wieliczka sculptors, 2022, Photo: R. Stachurski.



**Ryc. 14.** Post – akcja charytatywna, 2022, Fot. R. Stachurski  
**Fig. 14.** Post – Charity event, 2011, Photo: R. Stachurski.

w różnego rodzaju zawodach i konkursach jak np. Salt Mine Cup. Ciekawym przykładem może być seria postów związana z Euro2020, gdzie w grafikach nawiązano do tematu piłki nożnej wspierając polską reprezentację. W postach, odbiorcy kierowani są także na stronę wielickiej kopalni [www](http://www.kopalnia.pl), gdzie w artykułach (blogach) szerzej są opisywane tematy związane z dziełami górników<sup>32</sup>.

## 5. PODSUMOWANIE

W wielickiej kopalni kontynuowana jest długotrwała praktyka wspierania przedsięwzięć artystycznych. Rola mecenatu Kopalni Soli „Wieliczka”, którym objęta jest twórczość rzeźbiarska i muzyczna jest nie do przecenienia i nie do zastąpienia. Jest przykładem właściwego zarządzania dziedzictwem przez spółkę skarbu państwa. Górnicy, którzy są uzdolnieni artystycznie (plastycznie i muzycznie) są zdani na pracodawcę-mecenasa, bez którego ich realizacje nie mogłyby zaistnieć. Tym samym zarządcy kopalni wzięli na siebie odpowiedzialność za finansowe zabezpieczenie twórczej działalności górników-rzeźbiarzy jak również artystycznej działalności muzyków z Reprezentacyjnej Orkiestry Dętej Kopalni Soli „Wieliczka”. Pracownicy wielickiej kopalni, którzy zajmują się twórczością plastyczną lub muzyczną wprawdzie podporządkowani są woli mecenasa, ale nie musi to oznaczać ograniczenia ich wolności twórczej. Z reguły jest tak, że artystyczne wybory twórców odpowiadają oczekiwaniom i wymaganiom mecenasa. Najczęściej tak właśnie się dzieje w kwestiach estetycznych (formy), że patron zdaje się na fachowość artysty. Zostawiając sobie jako zleceniodawca, wybór w zakresie tematu realizowanego dzieła. Niezmienne jest również i to, że jakość dzieł i ich poziom zależy od oczekiwań i wymagań mecenatu, oraz od celu, w jakim dzieło zamawia i za nie płaci. W Kopalni Soli „Wieliczka”, która jest największą atrakcją turystyczną Polski bardzo ważne są zagadnienia związane z mecenatem artystycznym, gdyż dotyczą związków jakie zachodzą między sztuką a turystyką. Podejmowane są próby określenia znaczenia sztuki oraz turystyki we współczesnej kulturze. Wskazują one na rosnące znaczenie dzieł sztuki jako atrakcji turystycznych oraz ściśle powiązanie dziedzictwa kulturowego z rozwojem turystyki (Ziarkowski D., 2012; Purchla J., 1999). W przypadku Wieliczki, która promuje solne rzeźbiarstwo i muzykę orkiestry dętej zachodzi zasada wzajemności tzn. poprzez wytwory pracy górników-rzeźbiarzy promuje się sama kopalnia.

Dziedzictwo jako źródło tożsamości jest podstawą budowania nie tylko silnych więzi społeczności lokalnych, ale prowadzi także do tworzenia silnego państwa. Społeczeństwo, na co dzień spolaryzowane w kwestiach politycznych i świa-

ously updated. In October 2021, the Wieliczka Salt Mine also posted about a charity boxing gala, Biznes Boxing Polska, where a salt sculpture of a boxer was auctioned (Fig. 14). This event was also mentioned in a post on Facebook. Salt sculptures are also given as awards in various competitions and contests, such as the Salt Mine Cup. An interesting example is a series of posts related to Euro 2020, where graphics referenced soccer and supported the Polish national team. In these posts, followers are also directed to the Wieliczka Salt Mine's website, where articles and blog posts provide more detailed information about the miners' artworks<sup>32</sup>.

## 5. SUMMARY

The Wieliczka Salt Mine continues a long-standing tradition of supporting artistic endeavors. The role of patronage by the Wieliczka Salt Mine, encompassing both sculptural and musical artistry, is invaluable and irreplaceable. It represents an exemplary model of heritage management by a state-owned company. Miners who possess artistic talents—whether in sculpture or music—depend on their patron-employer, without whom their creative projects could not come to fruition. Consequently, the mine's management assumes responsibility for the financial support of the miners' sculptural activities as well as the musical activities of the Wieliczka Salt Mine's Representative Brass Band. While employees engaged in artistic or musical creation are generally subject to the patron's directives, this does not necessarily limit their creative freedom. Typically, artistic choices made by creators align with the expectations and demands of their patron. This is especially true in aesthetic matters (form), where the patron tends to rely on the artist's expertise, retaining the final say in selecting the theme of the commissioned work. Consistently, the quality and level of the artwork depend on the patron's expectations and demands, as well as the purpose for which the work is commissioned and funded. At the Wieliczka Salt Mine, Poland's major tourist attraction, artistic patronage is crucial due to its intersection with tourism. Efforts are made to define the significance of art and tourism in contemporary culture. These efforts highlight the growing importance of artworks as tourist attractions and the close connection between cultural heritage and tourism development (Ziarkowski D., 2012; Purchla J., 1999). In the case of Wieliczka, which promotes salt sculpting and the brass band's music, there is a principle of reciprocity: the mine itself is promoted through the creations of its miners. Heritage as a source of identity is fundamental in building not only strong bonds within local communities but also in contributing to the formation of a strong state. A society that is often polarized in political and ideological matters has the

<sup>32</sup> <https://www.kopalnia.pl/kopalnia-wiedzy/czym-jest-dzielo-sztuki-rodzaje-sztuki-w-wielickiej-kopalni>; <https://www.kopalnia.pl/kopalnia-wiedzy/pastoral-papieski-z-kaplicy-sw-kingi-nie-uwierzysz-jak-daleka-droge-przebyl-jntl>

<sup>32</sup> <https://www.kopalnia.pl/kopalnia-wiedzy/czym-jest-dzielo-sztuki-rodzaje-sztuki-w-wielickiej-kopalni>; <https://www.kopalnia.pl/kopalnia-wiedzy/pastoral-papieski-z-kaplicy-sw-kingi-nie-uwierzysz-jak-daleka-droge-przebyl-jntl>

topogładowych, ma jednak szansę zjednoczenia się wokół wspólnych wartości. Mecenat zarządów kopalni, w wyniku którego możliwe jest zapewnienie podstaw ekonomicznych do podtrzymywania tradycji rzeźbiarskich można też odczytywać jako wyraz kultywowania górniczego dziedzictwa. Łączy ono pokolenia, przeszłość z przyszłością; pozwala, by społeczeństwo integrowało się wokół zabytków i dziedzictwa niematerialnego. Ten temat integralnie wpisuje się w przesłanie Konwencji Ramowej Rady Europy o wartości dziedzictwa kulturowego dla społeczeństwa, znanej jako Konwencja z Faro. Prezydent RP Andrzej Duda 14 czerwca 2022 roku podpisał ustawę z dnia 12 maja 2022 roku o ratyfikacji tej konwencji, która została sporządzona w Faro 27 października 2005 roku<sup>33,34</sup>.

opportunity to unite around shared values. The patronage of the mine's management, which ensures the economic foundation for maintaining sculptural traditions, can also be seen as a manifestation of the commitment to preserving mining heritage. This heritage connects generations, bridging the past with the future, and enables society to come together around monuments and intangible heritage. This topic is integral to the message of the Council of Europe Framework Convention on the Value of Cultural Heritage for Society, known as the Faro Convention<sup>33</sup>. On June 14, 2022, the President of Poland, Andrzej Duda, signed the law of May 12, 2022, ratifying this convention, which was drawn up in Faro on October 27, 2005<sup>34</sup>.

## LITERATURA/REFERENCES

- GAWĘŁ Ł., 2013, Zarządzanie dziedzictwem kulturowym – w stronę nowej metodologii, *Problemy Zarządzania*, vol. 11, nr 4 (44), 87-100. Warszawa.
- GAWROŃSKI W., 2008, *Słownik biograficzny wieliczian*, MŻKW, Wieliczka 2008.
- KALWAJTYS E., 1996, Kaplica św. Antoniego, *Studia i Materiały do Dziejów Żup Solnych w Polsce*, t. XIX, 470-110. Wieliczka.
- KONWERSKA B., 2020, Ruch turystyczny w Kopalni Soli Wieliczka w okresie zarządu austriackiego (1772-1918), Wieliczka.
- KONWERSKA B., 2022, Pomoc i opieka społeczna w salinie wielickiej w dobie zaborów (1772-1918). Wieliczka.
- KOZŁOWSKI R., 1998, *Dzieje Reprezentacyjnej Orkiestry Kopalni Soli w Wieliczce na tle amatorskiego ruchu w regionie*, praca magisterska AM w Krakowie, maszynopis, Kraków.
- KROKOSZ P., 2011, Życie kulturalne Wieliczki od XIX wieku do czasów współczesnych, *Studia i Materiały do Dziejów Żup Solnych w Polsce*, t. XXVII, 103-152, Wieliczka.
- LEŚNY M., WOLAŃSKA A., 2017, *Kalendarium, 20-lecie Spółki Kopalnia Soli „Wieliczka” Trasa Turystyczna 1997-2017.*, maszynopis, Wieliczka.
- LEŚNY M., 2018, Marka, z której możemy być dumni, w: UNESCO, *Mina i górnicy. 40 lat Kopalni Soli „Wieliczka” na liście UNESCO.*, 129-138.
- MARKOWSKI I., 2001, Wielicka orkiestra salinarna, *Studia i Materiały do Dziejów Żup Solnych w Polsce*, t. XXI, 179-202, Wieliczka.
- MIEDZOBRODZKA M., 2021, Wieliczka w czasach autonomii galicyjskiej. Relacje między miastem a Kopalnią. Wieliczka.
- PURCHLA J., 1999, red. naukowy, *Dziedzictwo a turystyka*. Kraków.
- PURCHLA J., 2013, *Dziedzictwo kulturowe*, w: *Kultura a rozwój* red. Hausner J., Karwińska A., Purchla J., Warszawa.
- SZYBIŃSKI Z., 1977, Ruch turystyczny w kopalni wielickiej, *Studia i Materiały do Dziejów Żup Solnych w Polsce*, t. VI, 141-160, Wieliczka.
- WOLAŃSKA A., SKUBISZ M., 2016, *Krzyż i sól dziedzictwo wiary wielickich górników*, Wieliczka.
- WOLAŃSKA A., 2018, *Wiara i patriotyzm w rzeźbach wielickich górników*, Kraków
- WOLAŃSKA A., PRZYBYŁO J., 2019/2020, Kaplica Św. Antoniego w Kopalni Soli „Wieliczka” przykładem ratowania kulturowego i naturalnego dziedzictwa.
- WOLAŃSKA A., 2015, Jest w orkiestrze dętej jakaś siła czyli historia Reprezentacyjnej Orkiestry Dętej Kopalni Wieliczka w latach 1830-2015, w: *Biblioteczka Wielicka*, z. 159, 5-21.
- ZIARKOWSKI D., *Turystyka i sztuka – wzajemne relacje z perspektywy semiotycznej*, „*Turystyka Kulturowa*”, nr 5/2012, s. 22-37.
- Dz.U.2023.396. Akt obowiązujący. Konwencja Ramowa Rady Europy o wartościach dziedzictwa kulturowego dla społeczeństwa, sporządzona w Faro dnia 27 października 2005 r.
- Dz. U. 2022 poz. 1288 USTAWA z dnia 12 maja 2022 r. o ratyfikacji Konwencji ramowej Rady Europy o wartości dziedzictwa kulturowego dla społeczeństwa, sporządzonej w Faro dnia 27 października 2005 r.

## STRONY INTERNETOWE/WEBSITES

- www.nid.pl  
<https://www.historiasztuki.com.pl/strony/023-00-00-MECENAT.html>  
<https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/mecenat;3939138.html>  
 www.kopalnia.pl  
<https://sip.lex.pl/akty-prawne/dzu-dziennik-ustaw/konwencja-ramowa-rady-europy-o-wartosci-dziedzictwa-kulturowego-dla-21801205>  
<https://eli.gov.pl/api/acts/DU/2022/1288/text/T/D20221288L.pdf>

<sup>33</sup> <https://sip.lex.pl/akty-prawne/dzu-dziennik-ustaw/konwencja-ramowa-rady-europy-o-wartosci-dziedzictwa-kulturowego-dla-21801205>

<sup>34</sup> <https://eli.gov.pl/api/acts/DU/2022/1288/text/T/D20221288L.pdf>

<sup>33</sup> <https://sip.lex.pl/akty-prawne/dzu-dziennik-ustaw/konwencja-ramowa-rady-europy-o-wartosci-dziedzictwa-kulturowego-dla-21801205>

<sup>34</sup> <https://eli.gov.pl/api/acts/DU/2022/1288/text/T/D20221288L.pdf>

## INSTRUKCJA DLA AUTORÓW

Teksty nadsyłane do Redakcji Przeglądu Solnego będą zamieszczone w dwóch rozdziałach:

### I. Artykuły

### II. Komunikaty, wydarzenia, opinie

#### I. Artykuły

1. Tytuł w języku polskim i angielskim, czcionką Times New Roman 14
2. Pełne imiona i nazwiska (kapitałkami) wszystkich autorów, np.:

Marek KOWALSKI<sup>1</sup>, Jacek NOWAK<sup>2</sup>, Iwona ROŚ<sup>2</sup>

3. Afiliacje autorów czcionką Times New Roman 11, np.:

<sup>1</sup> IKS Solino S.A. ul. Św. Ducha 26a, 88-100 Inowrocław.

E-mail: m.kowal@wp.pl

<sup>2</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii,

al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków. E-mail: nowak@agh.edu.pl

4. Tekst artykułu napisany czcionką Times New Roman 12 obejmujący:
  - a. streszczenie i słowa kluczowe w języku polskim i angielskim,
  - b. treść w języku polskim i angielskim, zawierająca podstawowe człony: wstęp, metody badań, wyniki badań, wnioski,
  - c. podsumowanie (Summary) w j. polskim i angielskim z cytacją wszystkich rycin i tabel zawartych w teście,
  - d. alfabetyczny wykaz cytowanych pozycji literatury,
  - e. spis rycin w j. polskim i angielskim,
  - f. spis tabel w j. polskim i angielskim.

Uwaga!

- W tekście pisanym po polsku, autorów innych publikacji należy cytować używając wyłącznie polskich znaków i przecinków! Np. (Smith i in., 2013), (Kowalski, Plana, 2014).
- W j. angielskim należy używać angielskich znaków i przecinków, np.: (Smith at al., 2013), (Kowalski & Plana, 2014).

5. Ryciny.

Nazwa ryciny (Ryc., ang. Fig.) obejmuje zdjęcia, wykresy, diagramy, itp. Rycina powinna być włączona w tekst oraz dołączona jako załącznik, zapisany w programie Corel Draw w wersji nie nowszej niż X5 lub w plikach TIF, BMP, JPG, PDF w rozdzielczości min. 300 dpi.

Opisy rycin należy podać w j. polskim i angielskim (*kursywą*), numeracja cyframi arabskimi np.:

Ryc. 2. Profil litostratygraficzny.....

Fig. 2. Lithostratigraphic profile.....

Tekst wewnątrz rycin musi być napisany w j. polskim i angielskim (*kursywą*)

Zbioreczny spis rycin należy zamieścić na końcu tekstu głównego, po literaturze.

6. Tabele.

Tabela powinna być zamieszczona w tekście oraz jako załącznik (preferowany program Excel). Opisy tabel należy podać w j. polskim i angielskim (*kursywą*), numeracja cyframi arabskimi. np.:

Tabela 1. Rozkład granulometryczny.....

Table 1. Grain size distribution.....

Tekst wewnątrz tabel musi być napisany w j. polskim i angielskim

Zbioreczny spis tabel należy zamieścić na końcu tekstu głównego, po literaturze.

7. Literatura / References.

W spisie literatury mogą być zamieszczane wyłącznie pozycje cytowane w tekście. Dla listowanej publikacji należy podać kolejno: nazwiska i inicjały imion wszystkich autorów, rok wydania pracy, tytuł pracy, nazwę czasopisma (*kursywą*), numer tomu, numer zeszytu (w nawiasie), strony. W przypadku opracowań archiwalnych należy podać miejsce przechowywania opracowania i jego numer archiwalny. Np.:

#### LITERATURA / REFERENCES

BURNS P.C., CARPENTER M.A., 1996. Phase transitions in the series boracite – trembathite – congolite: phase relations. *Canadian Mineralogist* 34 (12): 881–892.

CHARYSZ W., 1973. Cechy geologiczne i petrologiczne soli młodszych w regionie kujawskim. *Prace Geologiczne*, 75: 7–67.

CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., MISIEK G., 2007. Podział i występowanie górnopernskich skał zubrowych w Polsce. Materiały XII Sympozjum Solnego pt. „Przemysł solny w gospodarce”. Kłodawa, 11-12 października 2007 r. Abstrakt: 31-33.

#### II. Komunikaty, wydarzenia, opinie.

Treści zawarte w tym rozdziale mają charakter informacyjny o wydarzeniach w polskim i światowym górnictwie solnym (informacje o konferencjach, wyprawach naukowych, notki biograficzne, krótkie recenzje itp.). Nie wymagany jest tu układ tekstu jak w przypadku artykułu, np. streszczenie, wstęp, słowa kluczowe itp. Format tekstu jak w artykule.

#### Uwagi końcowe

Redakcja Przeglądu Solnego wymaga od autorów rzetelnego cytowania osiągnięć wcześniejszych badaczy w zakresie tematyki składanych do opublikowania opracowań oraz respektowania podanych wyżej reguł cytacji i listowania literatury. Dodatkowo wzorce można zacytować z

# SKARBY SOLNYCH PODZIEMI – KOPALNIA SOLNO W INOWROCŁAWIU

## SOLNO MINE IN INOWROCŁAW: THE TREASURES OF UNDERGROUND WORKINGS



1. Stalaktyt solny obrosnięty kryształami halitu. Kopalnia Solno, Inowrocław. Kol. 1988.  
*Salt Stalactite Covered with Halite Crystals. Solno Mine, Inowrocław. Coll. 1988.*

2. Kryształy selenitu na halicie. Kopalnia Solno, Inowrocław. Kol. 1987.  
*Selenite Crystals on Halite. Solno Mine, Inowrocław. Coll. 1987.*

3. Brązowe kryształy selenitu. Kopalnia Solno, Inowrocław. Kol. 1984.  
*Brown Selenite Crystals. Solno Mine, Inowrocław. Coll. 1984.*

4. Zrost automorficznych kryształów halitu. Kopalnia Solno, Inowrocław.  
Grota Kryształowa, Poz. IX. Kol. 1982.  
*Growth of Automorphous Halite Crystals. Solno Mine, Inowrocław.  
Crystal Cave, Level IX. Coll. 1982.*