

PRZEGLĄD SOLNY

SALT REVIEW



TOM 17 • 2023



ROCZNIK POLSKIEGO STOWARZYSZENIA Górnictwa Solnego
YEARBOOK OF POLISH SALT MINING ASSOCIATION

PRZEGLĄD SOLNY

SALT REVIEW

TOM XVII

2023

ROCZNIK POLSKIEGO STOWARZYSZENIA Górnictwa Solnego

YEARBOOK OF POLISH SALT MINING ASSOCIATION



Kraków

RADA NAUKOWA / EDITORIAL ADVISORY BOARD

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

ZESPÓŁ REDAKCYJNY / EDITORIAL COMMITTEE

Jacek Wachowiak, Geosalt – Redaktor Naczelny / Editor-in-Chief (psgs@agh.edu.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, 2023

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

Jacek Wachowiak / Artur Kozioł

Fotografia na okładce / Cover photo

Wykwity solne na wybrzeżu Morza Martwego.

Fot. M. Hodbod (podczas wyprawy Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego: Morze Martwe-Jordania 2023).

Salt efflorescences on the coast of the Dead Sea.

Photo by M. Hodbod (during the Polish Salt Mining Association's expedition to Dead See 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: 90 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 wielu dyscyplin pokrewnych. Zamieszczone tu prace przedstawione są w języku polskim i angielskim. Wcześniej zostały poddane ocenie dwóch recenzentów.

Większość zagadnień publikowanych w formie artykułów w XVII tomie *Przeglądu Solnego* była przedmiotem prezentacji na tegorocznym XXVII Międzynarodowym Sympozjum Solnym *Quo Vadis Sal 2023*, które odbyło się w Kopalni Soli w Kłodawie oraz na Zamku Biskupów Gnieźnieńskich w Uniejowie.

Recenzentami artykułów opublikowanych w 17 tomie rocznika *Przegląd Solny* byli: Prof. dr hab. inż. Maciej Pawlikowski, Prof. dr hab. Tadeusz Peryt, Prof. dr hab. Małgorzata Radkiewicz, Dr hab. inż. Waław Andrusikiewicz, Dr hab. inż. Krzysztof Bukowski, Dr hab. Stanisław Burliga, Dr hab. inż. Katarzyna Cyran, Dr hab. Grzegorz Czapowski, Dr hab. Leszek Lankof, Dr hab. inż. Tomasz Tobała, Dr inż. Tadeusz Gargula, Dr inż. Michał Kowalski, Dr Joanna Jaworska, Dr inż. Daniel Pawelus i Dr inż. Jacek Wachowiak.

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 Kłodawa S.A., KGHM Polska Miedź S.A., UOS Drilling S.A., KGHM Metraco S.A., Kopalni Soli Wieliczka S.A., CFT Polska Sp. z o.o., GWE Pol-Bud Sp. z o.o.** za wsparcie logistyczne, merytoryczne i finansowe organizacji XXVII Międzynarodowego Sympozjum Solnego *Quo Vadis Sal 2023*, którego elementem było opracowanie i wydanie XVII tomu *Przeglądu Solnego*.

Szczególne podziękowania składam Zarządowi i Pracownikom **Kopalni Soli Kłodawa 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, bieżące 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 XXVII *Quo Vadis Sal* International Salt Symposium 2023 which took place at the Kłodawa Salt Mine and the Gniezno Bishops' Castle of Uniejów.

The following were the reviewers of the papers: Prof. dr hab. inż. Maciej Pawlikowski, Prof. dr hab. Tadeusz Peryt, Prof. dr hab. Małgorzata Radkiewicz, Dr hab. inż. Waław Andrusikiewicz, Dr hab. inż. Krzysztof Bukowski, Dr hab. Stanisław Burliga, Dr hab. inż. Katarzyna Cyran, Dr hab. Grzegorz Czapowski, Dr hab. Leszek Lankof, Dr hab. inż. Tomasz Tobała, Dr inż. Tadeusz Gargula, Dr inż. Michał Kowalski, Dr Joanna Jaworska, Dr inż. Daniel Pawelus, and Dr inż. Jacek Wachowiak.

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: **Kopalnia Soli Kłodawa S.A., KGHM Polska Miedź S.A., UOS Drilling S.A., KGHM Metraco S.A., Kopalnia Soli Wieliczka S.A., CFT Polska Sp. z o.o., GWE Pol-Bud Sp. z o.o.** for their logistic, substantive, and financial support during the proceedings of the XXVII *Quo Vadis Sal* International Salt Symposium 2023, accompanied by the present Volume of our *Salt Review*.

Special thanks go to the Management Board and Workers of the **Kopalnia Soli Kłodawa 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



SPIS TREŚCI / CONTENTS

I. ARTYKULY / PAPERS

- 5** **Wacław ANDRUSIKIEWICZ**
O możliwościach wypełniania kavern potługowniczych soli kamiennej
On the Possibilities of Backfilling Leached Salt Caverns
- 17** **Józef BIENIASZ, Jakub PIETRAS, Jolanta MARCOLA-SADOWSKA, Damian KURDEK**
Specyfika zaciskania wyrobisk komorowych w polach eksploatacji soli różowych w Kopalni Soli „Kłodawa”
Specificity of convergence in the mining fields of pink salt in the „Kłodawa” Salt Mine
- 25** **Grzegorz CZAPOWSKI, Marta HODBOD**
Obszar przedsudecki zagłębieniem potasowym w Polsce
Fore-Sudetic area as the potash district in Poland
- 39** **Grzegorz CZAPOWSKI, Krzysztof BUKOWSKI, Tomasz TOBOLA, Hanna TOMASSI-MORAWIEC**
Charakterystyka geochemiczno-mineralogiczna zębów mioceńskich w zapadlisku przedkarpackim (południowa Polska)
Geochemistry and mineralogy of Miocene Zuber rocks in the Carpathian Foredeep (southern Poland)
- 51** **Marta HODBOD, Karol ZGLINICKI**
Nowe kierunki dostaw soli potasowo-magnezowych do Polski
New supply directions of potassium and magnesium salts to Poland
- 58** **Joanna JAWORSKA, Przemysław NIEDZIELSKI**
Skład chemiczny soli spożywczych – sole kłodawskie na tle tak zwanych soli morskich
Chemical composition of commercial table salts – rock salt from Kłodawa in comparison with so-called sea salts
- 69** **Joanna JAWORSKA, Przemysław NIEDZIELSKI, Wacław STASZCZAK**
Skład chemiczny kłodawskich soli kamiennych – porównanie składu soli spożywczej z próbkami soli pobranymi ze złoża
Chemical composition of Kłodawa rock salts – a comparison of the composition of table salt with salt samples from the deposit
- 82** **Piotr KRZYWIEC, Aleksandra ARNDT**
Sól i alchemia – Adam Schröter i jego poemat „Regni Poloniae salinarum Vielicensium descriptio carmine elegiaco” oraz jego związki z Olbrachtem Łaskim
Salt and alchemy - Adam Schröter, his poem „Regni Poloniae salinarum Vielicensium descriptio carmine elegiaco” and his ties with Olbracht Łaski
- 87** **Jerzy PRZYBYŁO**
Kopalnia soli „Wieliczka” w filmie „Wieliczka”
Salt Mine in a film „Wieliczka”
- 106** **Yurij V. SADOVYI, Anatolij R. GALAMAY, Krzysztof BUKOWSKI**
Technologiczne i środowiskowe skutki likwidacji kopalni soli z zastosowaniem podsadzki hydraulicznej (kopalnia Kałusz, Ukraina)
Technological and environmental consequences of the liquidation of a salt mine using liquid backfill (Kalush mine, Ukraine)
- 117** **Michał SŁOTWIŃSKI, Marta ADAMUSZEK**
Wpływ uziarnienia soli kamiennych na tempo zaciskania się kavern solnych
Role of rock salt grainsize in cavern convergence
- 139** **Mateusz ŚWIERK, Stanisław BURLIGA**
Współczesna mineralizacja halogenkowa w kopalniach rud miedzi na monoklinie przedsudeckiej
Modern halides mineralization in copper ore mines over the Fore-Sudetic Homocline, SW Poland

II. KOMUNIKATY /NOTICES

- 143** **Jacek WACHOWIAK**
XIV wyprawa naukowa polskiego Stowarzyszenia Górnicstwa Solnego: „Morze Martwe i Jordania 2023”
XIV Scientific Expedition of the Polish Salt Mining Society: Dead Sea and Jordan 2023”



I. ARTYKUŁY / PAPERS

O możliwościach wypełniania kawern poługowniczych soli kamiennej

On the Possibilities of Backfilling Leached Salt Caverns

Wacław ANDRUSIKIEWICZ

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami,
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: andrus@agh.edu.pl

AGH University of Krakow, Faculty of Civil Engineering and Resources Management, Av. Mickiewicza 30,
30-059 Kraków, e-mail: andrus@agh.edu.pl

STRESZCZENIE

Kawerny solne powstają w wyniku ługowania soli przy pomocy wody lub nienasyconych solanek. W wyniku tego procesu powstają pustki o kubaturze kilkuset tysięcy m³, a nawet ponad milion m³. Często uzyskane pustki przeznacza się na magazyny węglowodorów i gazów, ale ich żywotność nie jest nieograniczona w czasie z uwagi na właściwości reologiczne soli. Ze względów geomechanicznych kawerny wypełnia się solanką nasyconą, co pozwala na ograniczenie konwergencji komór, jednak jej nie zatrzymuje. Uwięziona w kawernach solanka zawiera sól stanowiącą ok. 15% objętości kawerny.

W artykule zarysowano możliwości odzyskania znacznej części solanki w różnych technologiach wypełniania kawern materiałem, który zastąpi solankę. Materiał ten często jest odpadem, który może być zagospodarowany w kawernie; w przeciwnym wypadku trafi na składowisko powierzchniowe z wszelkimi tego konsekwencjami środowiskowymi i ekonomicznymi. Wskazano kierunki przyszłych badań, które rokują powodzenie omawianych działań w kierunku związanym z ochroną środowiska.

Słowa kluczowe: kawerny solne, odzysk solanki, wypełnianie kawern

1. WPROWADZENIE

Każdy rodzaj górnictwa kopaliny stałych powoduje negatywny wpływ na szeroko rozumiane środowisko naturalne, a w szczególności na środowisko geologiczne. Pozornie naj-

ABSTRACT

Salt caverns are formed through the process of leaching salt with water or unsaturated brines, resulting in voids ranging in volume from hundreds of thousands to over a million cubic meters. These excavated voids are often designated for storing hydrocarbons and gases. However, their long-term stability is not indefinite due to the rheological properties of salt. To address geomechanical concerns, saturated brine is employed to fill these caverns. This strategy helps limit cavity convergence but does not eliminate it. Notably, the brine enclosed within the caverns contains salt, constituting approximately 15% of the cavern's total volume.

This article discusses the potential for recovering a substantial portion of brine through various technologies employed in the process of backfilling caverns with alternative materials. Frequently, these materials are waste products that can be effectively repurposed within the cavern. Otherwise, they would find their way to surface landfills, with all the resulting environmental and economic consequences. Additionally, the article highlights future research directions that hold promise for the success of the discussed environmental protection initiatives.

Keywords: salt caverns, brine recovery, cavern backfilling.

1. INTRODUCTION

Every type of solid mineral mining has a negative impact on the broader natural environment, with the geological environment being particularly affected. Outwardly, borehole

mniej inwazyjne może się wydawać górnictwo otworowe, w tym soli kamiennej. Na powierzchni to zaledwie głowica eksploatacyjna połączona z rurociągami technologicznymi, natomiast kilkaset metrów poniżej powierzchni terenu powstaje wyrobisko poeksploatacyjne po wylugowanej soli, czyli kawerna. Objętość powstałych kawern liczy się w setkach tysięcy metrów sześciennych, nierzadko nawet w milionach (np. Donadei, Schneider 2022).

Aby kawerna nie utraciła stateczności, koniecznym jest „podparcie” jej ociosów. W przypadku komór w trakcie eksploatacji jest to woda/solanka o różnym stopniu nasycenia, natomiast kawerny wyeksploatowane wypełnione są solanką nasyconą. Jeżeli kawerny pełnią rolę magazynową, wówczas częściowo wypełnione są solanką nasyconą (w części przyspągowej), a częściowo magazynowanym medium (część przystropowa).

Istotą podparcia ociosów kawerny jest wywołanie ciśnienia działającego od wewnątrz kawerny na jej ociosy, o wartości nieprzekraczającej ciśnienia litostatycznego. W praktyce w przypadku komór wyeksploatowanych ciśnieniem tym jest ciśnienie hydrostatyczne solanki. Podobnie jest w przypadku komór magazynowych wypełnionych cieplem medium (solanka/ ropopochodne), z tym, że w przypadku części kawerny wypełnionej cieplymi produktami ropopochodnymi ciśnienie przez nie wywierane jest mniejsze od ciśnienia wywieranego przez solankę (różnica ciężarów właściwych obu cieczy). W przypadku magazynowania gazu koniecznym jest jego sprężenie aż do uzyskania optymalnego ciśnienia.

Bez względu na etap „życia” kawerny jak i sposób jej wykorzystania po zakończonej eksploatacji, ciśnienie wywierane na jej ociosy od wewnątrz będzie zawsze niższe od panującego ciśnienia litostatycznego. To z kolei ma wpływ na prędkość konwergencji, która przebiega z pewną zmiennością w czasie wynikającą m.in. ze sposobu korzystania z kawerny.

Wykorzystanie kawern na cele magazynowe nie jest nieograniczone w czasie. Zjawisko konwergencji, poza wpływem na objętość kawerny, ma także wpływ na stan ociosów. W przypadku kawern magazynowych ma bezpośredni związek ze szczelnością górotworu wokół kawerny, która w tym przypadku jest wartością priorytetową. Zakończenie pracy kawerny jako magazynu powoduje jej likwidację poprzez wypełnienie solanką pełnonasyconą.

Takie rozwiązanie też nie rozwiązuje problemu, gdyż powolne zaciskanie się kawerny powoduje, że konieczny jest odbiór i zagospodarowanie solanki „wypchniętej” z komory. W dłuższym horyzoncie czasowym pojawią się szkody górnicze, które można obecnie szacować przy założeniu, że kawerna (zespół kawern) są cały czas wypełnione solanką. A co w przypadku rozszczelnienia się górotworu wokół kawerny i ucieczki solanki? Szkody górnicze wystąpią w bardzo krótkim czasie, a ich rozmiar może przybrać charakter katastroficznego. Dotychczasowe doświadczenia z katastrof kopalń

mining, including salt mining, may appear to be the least invasive. On the surface, it involves little more than an extraction head connected to technological pipelines. However, a few hundred meters below the surface, post-mining voids known as caverns emerge as a result of salt leaching. The volume of these caverns can be substantial, often reaching hundreds of thousands and, in some instances, even millions of cubic meters (e.g., Donadei, Schneider, 2022).

To maintain the stability of a cavern, it is essential to provide support for its walls. During active mining operations, this support is typically provided by water or brine with varying degrees of saturation, while post-mining caverns are filled with fully saturated brine. When caverns are utilized for storage purposes, they are partially filled with saturated brine (in the lower part) and partially with the stored medium (in the upper part).

The essence of supporting the cavern walls lies in creating an internal pressure on the cavern walls that does not exceed lithostatic pressure. In practice, the hydrostatic pressure of brine provides this pressure for depleted chambers. Similarly, in the case of storage chambers filled with liquid media (brine or petroleum derivatives), albeit with the distinction that in the part of the cavern filled with liquid petroleum products, the pressure they exert is less than that exerted by brine (due to the difference in their specific weights). When storing gas, it is necessary to compress it until the optimal pressure is achieved.

Regardless of the stage of a cavern’s “life” and its intended use after exploitation, the pressure exerted on its walls from the inside will consistently remain lower than the prevailing lithostatic pressure. This, in turn, affects the rate of convergence, which fluctuates over time due to various factors, including the manner in which the cavern is utilized.

The utilization of caverns for storage purposes is not indefinite. The convergence, in addition to impacting the cavern’s volume, also affects the condition of its walls. For storage caverns, this convergence is directly related to the impermeability of the surrounding rock mass, which takes precedence. When a cavern’s storage role comes to an end, it is closed by backfilling it with fully saturated brine.

However, this approach does not completely resolve the issue, as the gradual tightening of the cavern necessitates the removal and proper management of the brine “pushed out” from the chamber. Mining-related damages will emerge over time, which can be approximated assuming that the cavern (or a set of caverns) is continually filled with brine. But what happens in the event of a breach in the rock mass surrounding the cavern, leading to brine leakage? Mining damages will manifest rapidly, and their extent could be catastrophic. Previous experiences from mining disasters in Wapno and Łęzkowice serve as stark reminders that this problem cannot be underestimated.

w Wapnie i w Łęzkowicach wskazują, że problemu tego nie można bagatelizować.

Innym aspektem – czysto gospodarczym – jest ilość pełnowartościowego surowca w postaci solanki nasyconej nadającej się do wykorzystania w przemyśle chemicznym uwięzionej w kawernie. To ok. 15% zasobów wyeksploatowanych z kawerny!

W tej sytuacji koniecznym jest poszukiwanie rozwiązań, które z jednej strony pozwolą na odzyskanie uwięzionej w kawernie solanki, z drugiej zaś zapewnią kawernie stateczność w długich horyzontach czasowych. Niewątpliwie warunki takie spełnia klasyczna podszadzka hydrauliczna (solanka wypełniająca kawernę nie jest podszadką hydrauliczną! – por. Plucińska et. al. 2020), jednak jest to rozwiązanie relatywnie bardzo drogie. Poszukiwany materiał do wypełnienia kawerny powinien spełniać wszelkie wymogi bezpieczeństwa rozumianego jako bezpieczeństwo środowiska geologicznego, w tym także stateczność kawerny po okresie jej eksploatacji. Oczywiście nie są to jedyne warunki, jakie materiał ten powinien spełniać – należy uwzględnić także jego dostępność, cenę, etc.

2. KAWERNY SOLNE JAKO WYROBISKA O WIELU MOŻLIWOŚCIACH

Kawerny solne powstają na skutek otworowej eksploatacji złoża soli. Zatlaczana do górotworu solnego woda rozpuszcza złoże i jest wypompowywana na powierzchnię w postaci solanki o różnym stopniu zasolenia. Celowość wykonywania tego typu wyrobisk można rozpatrywać pod kątem górniczym, mającym za cel wyeksploatowanie określonej ilości kopaliny, a następnie zamknięcie wyrobiska. Drugim aspektem jest aspekt magazynowy. Wydobyta solanka nie jest wykorzystywana gospodarczo, gdyż celem jest pozyskanie kubatury do magazynowania gazu i/lub węglowodorów. W praktyce najczęściej łączy się oba cele – w pierwszej kolejności pozyskuje się surowiec, a następnie przez pewien okres czasu kawerny pełnią rolę magazynową. Ostatnio można się spotkać z coraz większym zainteresowaniem kawernami jako przestrzeniami do magazynowania sprężonego powietrza oraz wodoru. Badane są też możliwości odzyskiwania energii geotermalnej z solanki wypełniającej kawernę.

W Polsce istnieją dwie wielootworowe kopalnie soli – w Mogilnie i w Górze. Kawerny w trakcie eksploatacji pełnią typową rolę górniczą, natomiast część wyeksploatowanych kawern, po odpowiednim przebrojeniu otworów pełni rolę magazynową – Kawernowy Podziemny Magazyn Gazu (KPMG) Mogilno oraz Podziemny Magazyn Ropy i Paliw (PMRiP) Góra.

Z kolei powstały w ostatnim czasie KPMG Kossakowo to typowy obiekt magazynowy gazu, który w trakcie budowy

Another purely economic aspect concerns the quantity of fully valued materials trapped within the cavern in the form of saturated brine suitable for use in the chemical industry. This constitutes approximately 15% of the resources extracted from the cavern!

In this scenario, it is necessary to seek solutions that, on the one hand, enable the recovery of trapped brine within the cavern and, on the other hand, ensure the long-term stability of the cavern. Undoubtedly, the classical hydraulic backfill fulfills these requirements (it's important to note that the brine used to fill the cavern is not a hydraulic backfill; see Plucińska et al., 2020). However, this is a relatively costly approach. The material sought for cavern backfilling should meet all safety requirements, including geological and environmental safety and cavern stability after the period of its exploitation. Of course, these are not the only conditions that this material should meet; considerations such as its availability, cost, etc. must also be taken into account.

2. SALT CAVERNS: EXCAVATIONS WITH NUMEROUS OPPORTUNITIES

Salt caverns are the result of extracting salt deposits through borehole mining. This process involves injecting water into the salt formations, dissolving them, and then bringing the dissolved salt back to the surface in the form of brine with varying levels of saltiness. From a mining perspective, the feasibility of such excavations can be assessed with the aim of extracting a specific quantity of the mineral and subsequently closing the excavation. Another aspect is related to storage. Here, the extracted brine isn't used for economic purposes; instead, the primary objective is to secure space for storing gases and/or hydrocarbons. In practice, these dual objectives are often intertwined. Initially, the focus is on resource extraction, after which the caverns serve as storage spaces for a certain duration. Recently, there has been growing interest in using caverns as storage facilities for compressed air and hydrogen. Additionally, ongoing research is exploring the potential for harnessing geothermal energy from the brine filling these caverns.

There are two multi-borehole salt mines in Poland, one in Mogilno and the other in Góra. During active mining operations, the caverns serve their typical mining purpose. However, after a proper borehole, a portion of the depleted caverns takes on a storage role. This includes the Underground Gas Storage Cavern (Kawernowy Podziemny Magazyn Gazu - KPMG) in Mogilno and the Underground Oil and Fuel Storage (Podziemny Magazyn Ropy i Paliw - PMRiP) in Góra.

On the other hand, KPMG Kossakowo, has been established as a typical gas storage facility. The emphasis during

nie był ukierunkowany na odzysk solanki – ta była zrzucana do Zatoki Puckiej.

Ostatnio można się spotkać z coraz większym zainteresowaniem kavernami jako przestrzeniami do magazynowania sprężonego powietrza oraz wodoru. Badane są też możliwości odzyskiwania energii geotermalnej z solanki wypełniającej kavernę. Przez pewien czas prowadzono badania nad możliwością sekwestracji CO₂.

Kawerna po zakończeniu swojej żywotności zostaje zlikwidowana – najczęściej poprzez wypełnienie solanką nasyconą. W efekcie stopień jej wykorzystania gospodarczego wynosi ok. 85%, pozostałe 15% to sól niezbędna do uzyskania pełnonasyconej solanki wypełniającej kavernę. W celu podniesienia współczynnika wykorzystania kaverny, solankę należy zastąpić innym materiałem, który w co najmniej takim samym stopniu spełni swoje zadanie jak solanka (Kunstman et al. 2002). Największe doświadczenia w tym zakresie mają Niemcy, gdzie uruchomiono kilka instalacji umożliwiających wypełnianie kavern solnych odpadami pochodzącymi z procesów przemysłowych bądź górniczych. Rozwiązania w tym zakresie opracowały i wdrożyły m. in. takie firmy jak: Kavernengesellschaft Stassfurt mbH, Minex plus GmbH, International GmbH Bleicherode. Poprzez uruchomione instalacje w kavernach solnych lokowane są m. in. szlamy wiertnicze, zawiesiny na bazie popiołów lotnych, odpady z procesów przemysłowych przeróbki soli. Zebrane w tym zakresie doświadczenia wskazują, że przy odpowiednio dobranym składzie mieszanin do wypełniania kavern oraz sposobie zatłaczania możliwe jest odzyskanie ok. 70-80% pełnowartościowej solanki. Z geomechanicznego punktu widzenia istotne jest to, że wtłaczane mieszaniny z racji swojego ciężaru objętościowego (zdecydowanie wyższego niż wypełniająca kavernę solanka) poprawiają stateczność ociosu kaverny, co ma wpływ na konwergencję, a w końcowym wyniku – na wielkość szkód górniczych.

Należy zaznaczyć, że niektóre z wdrożonych rozwiązań są chronione patentami zarejestrowanymi także w Polsce.

3. PODSADZANIE, SKŁADOWANIE ODPADÓW, CZY...?

3.1. Uwagi wstępne

Polskie prawo dopuszcza wypełnianie pustek podziemnych (tu: kavern po eksploatacji soli kamiennej) w sposób określony w przepisach. W tym zakresie podstawowym aktem prawnym jest Ustawa Prawo geologiczne i górnicze (dalej Ustawa Pgi) oraz Rozporządzenie w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu zakładów górniczych wydobywających kopaliny otworami wiertniczymi.

3.2. Podsadzanie

Podsadzanie – wypełnianie pustek poeksploatacyjnych materiałem płonnym znajdującym się na miejscu bądź do-

construction was not on brine recovery, which was instead released into Puck Bay.

Lately, there has been a growing interest in utilizing caverns to store compressed air and hydrogen. Research is also underway to explore the potential for harnessing geothermal energy from the brine filling the cavern. Furthermore, studies on the viability of carbon dioxide (CO₂) sequestration have been done for a period of time.

After the end of their operational lives, caverns are usually closed by backfilling them with saturated brine. Consequently, its economic utilization reaches approximately 85%, with the remaining 15% consisting of salt essential for achieving fully saturated brine to fill the cavern. To enhance the cavern's utilization efficiency, it is necessary to replace the brine with another material that can perform its role to at least the same degree as the brine (Kunstman et al., 2002). Germany has gained significant expertise in this area, where several facilities have been established for backfilling salt caverns with waste materials originating from industrial or mining processes. Companies such as Kavernengesellschaft Stassfurt mbH, Minex plus GmbH, and International GmbH Bleicherode have developed and implemented solutions in this regard. These salt cavern installations accommodate materials like drilling mud, suspensions based on fly ash, and waste generated during industrial salt processing. Experience gathered in this field indicates that with a well-chosen mixture composition for cavern filling and an appropriate injection method, it is possible to recover approximately 70-80% of high-value brine. From a geomechanical perspective, it's essential to note that the injected mixtures, due to their higher bulk density (significantly higher than the brine filling the cavern), improve the stability of the cavern's walls. This has an impact on convergence and, ultimately, on the extent of mining-induced subsidence.

It should be noted that some of the implemented solutions are protected by patents registered in Poland.

3. BACKFILLING, UNDERGROUND DISPOSAL OF WASTE, OR...?

3.1. Initial Comments

Polish law allows for backfilling the underground voids (here: caverns after salt extraction) in accordance with specific regulations. In this regard, the primary legal acts include the Geological and Mining Law Act (PGIG Act) and the Regulation on specific requirements for the operation of mining facilities extracting minerals using boreholes.

3.2. Backfilling

Backfilling is the filling of post-exploitation voids with non-valuable material, either found on-site or brought in from external sources, used for the protection of surface structures

starczonym z zewnątrz, stosowane dla ochrony obiektów naziemnych (Leksykon 1989). Przedstawioną definicję można rozszerzyć o stwierdzenie, że celem podsadzania jest szeroko rozumiana ochrona powierzchni terenu nad wyrobiskiem.

Podstawowym materiałem podsadzkowym są piaski kwarcytowe. Norma dotycząca materiałów podsadzkowych (PN-93/G-11010) dopuszcza jako materiały podsadzkowe także żwir i odpady (do tej grupy zakwalifikowano żużle, skałę płoną, odpady przemysłowe, mieszanki różnych materiałów podsadzkowych, inne) spełniające wymagania normy.

W historii polskiego górnictwa otworowego soli kamiennej likwidacji poprzez podsadzenie doczekała się jedynie kopalnia otworowa „Łęzkowice” (Traple, Wilk 2002). Stosunkowo płytka eksploatacja w połączeniu z utratą kontroli nad procesem ługowania kawern spowodowała poważne zagrożenie na powierzchni, skutkiem czego podjęto decyzję likwidacji pustek podziemnych oraz rekultywację powierzchni. W sumie w kawernach ulokowano ponad 1 mln m³ materiału podsadzkowego (piasek), a na powierzchni do rekultywacji terenu wykorzystano przeszło 300 tys. m³ mas ziemnych.

Podsadzanie kawern materiałem neutralnym wobec solanki (piasek, żwir skała płoną) pozwala na jej odzysk na poziomie 80 do 90%, co w pierwszej chwili może wydawać się atrakcyjne. Biorąc jednak pod uwagę tylko sam koszt materiału podsadzkowego (bez kosztów transportu, koniecznej infrastruktury powierzchniowej, prawdopodobnie konieczny drugi otwór do kawerny itd.) proces ten jest ekonomicznie nieuzasadniony.

3.3. Składowanie odpadów

Podziemnym składowiskiem odpadów – jest część górotworu, w tym podziemne wyrobisko górnicze, wykorzystywana w celu unieszkodliwiania odpadów przez ich składowanie (art. 6 pkt 1 ust. 6 Ustawy PgiG). Podziemne składowanie odpadów może odbywać się na podstawie koncesji (art. 22 pkt 1 ust. 6 Ustawy PgiG).

Wyróżnia się następujące typy podziemnych składowisk odpadów (art. 125 pkt 1 Ustawy PgiG):

- 1) podziemne składowisko odpadów niebezpiecznych;
- 2) podziemne składowisko odpadów obojętnych;
- 2a) podziemne składowisko odpadów promieniotwórczych;
- 3) podziemne składowisko odpadów innych niż niebezpieczne, obojętne i promieniotwórcze.

Wg stanu na dzień 31 maja 2023 r. w Polsce funkcjonują 3 koncesjonowane podziemne składowiska odpadów należące do PGNiG S.A.: Borzęcin (zatłaczanie CO₂), Husów-Albigowa-Krasne oraz Świdnik (składowanie odpadów płynnych z wydobycia ropy naftowej i gazu ziemnego) (<https://dane.gov.pl/>).

Wydaje się być realną szansą utworzenia w nieczynnych kawernach solnych podziemnego składowiska odpadów, któremu będzie przyswiecał cel odzyskania „uwięzionej” w ka-

(Leksykon 1989). This definition can be expanded to include the fact that the purpose of backfilling is the comprehensive protection of the surface area above the mine working site.

Quartz sand is the primary backfill material.

The standard regulating backfill materials (PN-93/G-11010) also allows for gravels and waste materials (including slag, barren rock, industrial waste, mixtures of various backfill materials, and others) that meet the standard's requirements.

In the history of Polish borehole salt mining, decommissioning through backfilling has been applied only in the case of the “Łęzkowice” borehole mine (Traple, Wilk 2002). The relatively shallow excavation, combined with a loss of control over the leaching process in the caverns, posed a significant surface hazard. As a result, the decision was made to close the underground voids and carry out surface reclamation. In total, over 1 million m³ of backfill material (sand) was deposited in the caverns, and more than 300,000 m³ of earthworks were used for surface reclamation.

Backfilling caverns with materials like sand, gravel, or barren rock, which are neutral to the brine, enables the recovery of approximately 80 to 90% of it. This initially appears attractive. However, when considering only the cost of backfill material (excluding expenses related to transportation, essential surface infrastructure, the potential need for a secondary borehole to access the cavern, and more), this process proves to be economically unjustifiable.

3.3. Underground disposal of waste

Underground waste storage - is a part of the rock mass, including underground mining workings, that is utilized to neutralize waste through storage (Art. 6 point 1 of the Geological and Mining Law). Underground waste storage may be conducted under concession (Art. 22 point 1 of the Geological and Mining Law).

The following types of underground waste storage are distinguished (Art. 125, point 1 of the Geological and Mining Law):

- 1) Underground storage of hazardous waste;
- 2) Underground storage of non-hazardous waste;
- 2a) Underground storage of radioactive waste;
- 3) Underground storage of waste other than hazardous, non-hazardous, and radioactive waste.

As of May 31, 2023, there are three licensed underground waste storage facilities in Poland owned by PGNiG S.A.: Borzęcin (CO₂ injection), Husów-Albigowa-Krasne, and Świdnik (storage of liquid waste from oil and natural gas extraction) (source: <https://dane.gov.pl/>).

There is a viable opportunity to repurpose inactive salt caverns as underground waste storage facilities, with the goal of recovering the trapped brine for industrial use. The cru-

wernach solanki do dalszego jej przemysłowego wykorzystania. Kwestią jest wskazanie takiego odpadu do składowania, który nie spowoduje zanieczyszczenia solanki.

Interesującym odpadem wydaje się być gips syntetyczny, powstający w procesie odsiarczania spalin (desulfogips), popularnie określany REA-gipsem (nazwa pochodzi od niemieckiej nazwy instalacji do odsiarczania spalin – *Rauchgasentschwefelungsanlage*, w skrócie REA). Gips z instalacji odsiarczania spalin (IOS) charakteryzuje się niską promieniotwórczością naturalną oraz niską zawartością metali ciężkich i innych zanieczyszczeń, a zarazem dużą czystością chemiczną (Jarema-Suchorowska 2013).

Produkcja REA-gipsu ma tendencje rosnące, aktualnie przekracza 3 mln Mg/rok, ale tylko ok. 80% zostaje gospodarczo wykorzystana. Reszta trafia na składowiska powierzchniowe, czyli ostrożnie szacując jest to ok. 500-600 tys. Mg rocznie.

Wstępne zagadnienia związane ze składowaniem REA-gipsu w kawernach były już poruszane (Andrusikiewicz 2016) i wydaje się być zasadne dalsze prowadzenie badań w tym kierunku.

Ideą jest podawanie do kawerny mieszaniny gipsowo-solankowej o odpowiedniej gęstości i z określoną wydajnością. Parametry te są niezwykle istotne, gdyż najbardziej pożądaną formą osadzania się gipsu poniżej buta rury zatłaczającej (strefa wypełnienia mieszaniną gipsowo-solankową) jest jak najmniejsze zanieczyszczenie solanki powyżej wylotu (strefa „brudnej” solanki). Z kolei but rury odbierającej czystą solankę powinien być zlokalizowany jak najwyżej (strefa „czystej” solanki) – Rys. 1.

Przeprowadzone przez autora wstępne badania możliwości wykorzystania REA-gipsu do wypełniania kawern wskazują, że z chwilą zaprzestania podawania mieszaniny gipsowo-solankowej do modelowanej kawerny, w stosunkowo krótkim czasie następuje sedymentacja gipsu ze strefy „brudnej” solanki w strefie wypełnienia. W warunkach przemysłowych przerwy takie będą niezbędne, gdyż wylot rurociągu podającego mieszaninę powinien być zlokalizowany kilka metrów powyżej poziomu osadzania się gipsu i w związku z tym konieczne będą operacje „podciągania” rurociągu.

Docelowo należy zbudować taki mechanizm, by mieszanina równomiernie „rozkładała” się po dnie kawerny przy równoczesnej optymalizacji pracy pomp (ciśnienie tłoczenia). To z kolei wiąże się właściwościami reologicznymi mieszaniny (Ahmaruzzaman 2010) i na tej podstawie dobranie optymalnych proporcji solanka – gips (Malczewska et al. 2013).

Również interesujące wydaje się być składowanie odpadów występujących w postaci pyłów i popiołów. Niewątpliwie konieczna będzie ich obróbka poprzez proces immobilizacji, który polega na fizykochemicznym unieszkodliwianiu odpadów. Celem tego procesu jest takie chemiczne przekształcenie odpadu, by nie dochodziło do wymywania z niego substancji szkodliwych, które występujące w postaci zwią-

cial consideration is selecting waste materials for storage that won't contaminate the brine.

An interesting waste material for consideration is synthetic gypsum, which is generated during the flue gas desulfurization process and is commonly known as REA-gypsum (derived from the German name for flue gas desulfurization installations, Rauchgasentschwefelungsanlage, or REA). Gypsum from flue gas desulfurization installations (FGD) is characterized by low natural radioactivity, minimal heavy metal content, and other pollutants, along with high chemical purity (Jarema-Suchorowska 2013).

The production of REA-gypsum has been on the rise, currently exceeding 3 million metric tons per year. However, only about 80% of it is economically utilized. The remaining portion ends up in surface landfills, estimated to be around 500-600 thousand metric tons annually.

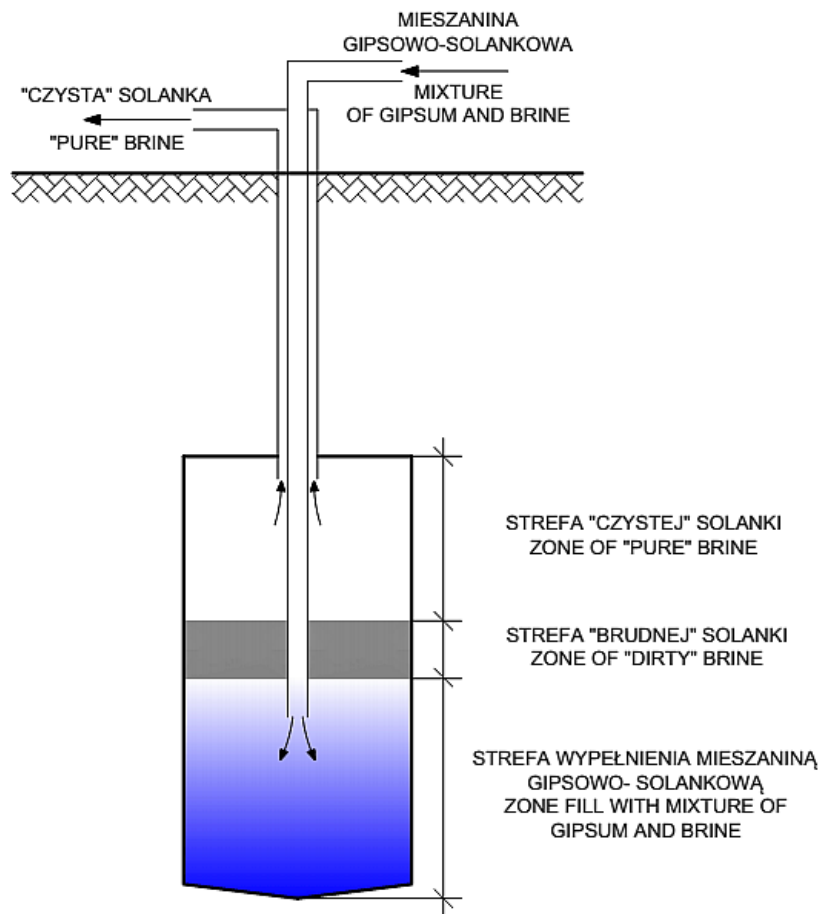
Preliminary issues related to the storage of REA-gypsum in caverns have previously been addressed (Andrusikiewicz 2016), and it seems justified to continue research in this direction.

The concept involves injecting a gypsum-brine mixture into the cavern, carefully controlling its density and flow rate. These parameters are of utmost importance, as the most desirable way for gypsum to settle below casing shoe (the mixture-filling zone) is to minimize brine contamination above the outlet (the “dirty” brine zone). Conversely, the withdrawal casing shoe for clean brine should be positioned as high as possible (the “clean” brine zone) – see Figure 1.

The preliminary investigations conducted by the author regarding the feasibility of using REA gypsum for cavern backfilling indicate that once the supply of the gypsum-brine mixture to the modelled cavern ceases, gypsum sedimentation in the “dirty” brine zone within the filling zone occurs relatively quickly. In industrial conditions, such interruptions will be necessary because the outlet of the pipeline delivering the mixture should be located several meters above the gypsum sedimentation level. Consequently, operations to “lift” the pipeline will be required.

In the long term, it is critical to develop a mechanism that facilitates the even “distribution” of the mixture across the cavern floor while simultaneously optimizing pump performance (discharge pressure). This, in turn, is related to the rheological properties of the mixture (Ahmaruzzaman 2010) and the selection of optimal proportions of brine to gypsum (Malczewska et al. 2013).

Storing waste in the form of dust and ashes also appears to be of interest. Undoubtedly, their treatment through the immobilization process, which involves the physicochemical neutralization of waste, will be necessary. This process aims to chemically transform the waste in such a way that no harmful substances are washed from it, which occur in the form of soluble compounds (e.g., soluble chemical compounds of



Ryc. 1. Schemat osadzania się REA-gipsu w kawernie
 Fig. 1. Scheme illustrating the deposition of REA gypsum in the cavern.

ków rozpuszczalnych (np. rozpuszczalne związki chemiczne metali stanowiące substancje szkodliwe zagrażające środowisku). Ponadto można uzyskać zmianę niektórych parametrów fizycznych odpadu w postaci np. poprawy jego wytrzymałości, zmniejszenia nasiąkliwości, zwiększenia gęstości itp. Procesowi immobilizacji poddaje się najczęściej odpady niebezpieczne o charakterze nieorganicznym (Fengler 2012, Mierzwiński et al. 2017).

Ponadto konieczne są szczegółowe badania w kierunku możliwości potencjalnych reakcji pomiędzy odpadem a solanką, gdyż może dochodzić do wytwarzania gazów w postaci np. wodoru. W takim przypadku może to być przesłanka negatywna w kierunku możliwości składowania danego odpadu.

Innym problemem do rozwiązania będzie technologia podawania odpadów poddanych immobilizacji do kawy, którą będzie determinować ostateczna forma odpadu mającego wypełnić kawę.

3.4. Odzysk odpadów na potrzeby wypełniania kawern

Poprzez odzysk odpadów rozumie się jakikolwiek proces, którego głównym wynikiem jest to, aby odpady służyły użytecznemu zastosowaniu przez zastąpienie innych materiałów, które w przeciwnym przypadku zostałyby użyte do spełnienia danej funkcji, lub w wyniku którego odpady są przygoto-

metals that pose a threat to the environment). Furthermore, it is possible to alter certain physical parameters of the waste, such as improving its strength, reducing its permeability, increasing its density, etc. The immobilization process is most commonly applied to hazardous waste of an inorganic nature (Fengler 2012; Mierzwiński et al. 2017).

Furthermore, detailed studies on the potential reactions between the waste and brine are necessary, as this may lead to the generation of gases such as hydrogen. In such a case, it could serve as a negative factor regarding the feasibility of storing the specific waste.

Another challenge to address is the technology for delivering immobilized waste into the cavern, a process that will be determined by the final form of the waste intended for cavern backfilling.

3.4. The recovery of waste for the purpose of cavern backfilling

The term waste recovery refers to any process whose main result is for waste to serve a useful purpose by replacing other materials that would otherwise be used to fulfil a specific function or by which waste is prepared to fulfil such a function within a given facility or in the economy as a whole (Waste Act)."

wywane do spełnienia takiej funkcji w danym zakładzie lub ogólnie w gospodarce (Ustawa o odpadach).

Odzysk odpadów będących produktami termicznego przekształcania odpadów (w tym także komunalnych) może odbywać się jako:

- spalanie odpadów (przez ich utlenianie);
- inne procesy termicznego przekształcania odpadów, w tym pirolizę, zgazowanie i proces plazmowy, o ile substancje powstające podczas tych procesów termicznego przekształcania odpadów są następnie spalane.

Efektem termicznego przekształcania odpadów są pozostałości w postaci żużli i popiołów paleniskowych. Do tego dochodzą jeszcze tzw. popioły lotne, powstające na skutek przepływu powietrza przez strefę spalania, które „porywa” drobne cząsteczki ciał stałych tworząc emisję pyłu z procesu spalania. Głównym składnikiem pyłów są związki krzemu, glinokrzemiany, tlenki żelaza, ale też związki alkaliczne, w szczególności tlenki siarki. Z uwagi na ochronę środowiska niezbędne jest oczyszczanie spalin. System oczyszczania spalin jest dość skomplikowany i składa się z kilku elementów:

- odpylania gazów spalinowych;
- usuwania gazów kwaśnych;
- usuwania tlenków azotu;
- usuwania metali ciężkich;
- usuwania związków organicznych.

Prócz wymienionych produktów spalania odpadem są wszelkiego rodzaju sorbenty wykorzystane w procesie oczyszczania spalin, albo w postaci ciał stałych (np. węgiel aktywny w przypadku metody „suchej”) bądź szlamów (w przypadku technologii „mokrej”). Wysuszone szlamy określane są jako tzw. placki filtracyjne.

Każdy produkt spalania (odpad wtórny) podlega zaklasyfikowaniu do właściwej grupy odpadów zgodnie z katalogiem odpadów (Rozporządzenie w sprawie katalogu odpadów). Część z nich kwalifikowana jest jako odpad niebezpieczny (tzw. „z gwiazdką”).

Likwidacja kawern poeksploatacyjnych poprzez ich wypełnienie może być realizowana poprzez przeznaczoną do tego celu instalację do odzysku odpadów, którym właśnie mogą być wybrane popioły oraz pyły powstające w instalacjach termicznego przekształcania odpadów. Ponieważ popioły i pyły charakteryzują się stosunkowo niską gęstością (w przeciwieństwie do gipsu), konieczne będzie skomponowanie odpowiedniego medium, które pozwoli na związanie odpadów, a przy tym będzie pompowalne rurociągami. W tym miejscu należy przyrzeć się **światowym osiągnięciom** związanym z technologią pasty, często określanej podsadzką pastową (Marx et al. 2003). Technologia ta stosowana jest w Niemczech w zakładach podziemnych odzysku odpadów. Jej sednem jest sporządzenie mieszaniny o konsystencji pasty składającej się z odpadów drobnofrakcyjnych, materiałów

The recovery of waste that results from thermal waste treatment (including municipal waste) can be performed through:

- waste incineration (through their oxidation).
- other thermal waste treatment processes, including pyrolysis, gasification, and plasma processes, provided that the substances generated during these thermal waste treatment processes are subsequently incinerated.

The thermal transformation of waste results in residues in the form of slag and ash from combustion. Furthermore, there are fly ashes, which result from the airflow through the combustion zone, carrying away fine particles of solid matter and creating emissions of particulate matter from the combustion process. The primary components of these particulates include silicon compounds, silicates, iron oxides, and alkali compounds, particularly sulphur oxides. To protect the environment, flue gas cleaning is essential. The flue gas cleaning system is quite complex and consists of several components:

- flue gas dust removal
- removal of acidic gases
- removal of nitrogen oxides
- removal of heavy metals
- removal of organic compounds

In addition to the mentioned combustion products, there are various types of sorbents used in the flue gas cleaning process, either in solid form (e.g., activated carbon in the “dry” method) or as sludge (in the “wet” technology). Dried sludges are referred to as so-called filtration cakes.

Each combustion product (secondary waste) is subject to classification into the appropriate waste group in accordance with the waste catalogue (Regulation on the Waste Catalogue). Some of them are classified as hazardous waste (so-called “starred” waste).

The process of decommissioning post-exploitation caverns by backfilling them can be facilitated by employing dedicated waste recovery facilities, which can include certain types of ash and dust generated during waste incineration processes. However, due to the relatively low density of ashes and dust (unlike gypsum), it becomes essential to formulate an appropriate medium that enables waste encapsulation while remaining pumpable through pipelines. In this context, it's beneficial to explore the global advancements associated with paste technology, often referred to as paste backfilling (Marx et al. 2003). This technique is currently in use in Germany within underground waste recovery facilities. Its core concept involves creating a mixture with a paste-like consistency, comprising finely ground waste, binding agents, and water (for salt caverns, the brine would be the target fluid), followed by its injection into a specified location via pipelines (see Figure 2).



Ryc. 2. Podsadzka pastowa (Peschken 2018)

Fig. 2. Paste Backfilling (Peschken 2018)

wiązących i wody (w przypadku kawern solnych docelowo byłaby to solanka), a następnie podanie jej rurociągiem w określone miejsce – Rys. 2.

Zawartość materiałów wiążących powoduje, że pasta ulega samozestaleniu, a tak powstały masyw może osiągnąć wytrzymałość na ściskanie nawet do kilkunastu MPa. W przypadku klasycznych kopalń głębinowych technologia ta jest bezodciekowa (Korzeniowski, Poborska-Młynarska 2016). W przypadku zastosowania pasty w przestrzeniach wypełnionych solanką pasta powinna stanowić barierę dla ewentualnych niekorzystnych emisji pochodzących od odpadów wchodzących w skład pasty. Niewątpliwie przyczynić się może do tego fakt, że solanka w przypadku wielu materiałów wiążących przyspiesza proces wiązania, a tym przypadku jest to proces samozestalania.

Podawanie pasty do kawerny powinno odbywać się podobnie jak w przypadku gipsu – but rury wylotowej powinien być zlokalizowany w niewielkiej odległości od dna kawerny, pozwalającej na jej rozplywanie się po dnie kawerny. Oczywiście pasta powinna mieć odpowiednią gęstość (która będzie wynikała z jej składu) i lepkość – to kierunek badań nad jej składem. Prawdopodobnie również powstanie tu strefa solanki „brudnej” (por. Rys. 1), niemniej jednak w chwili obecnej są to tylko hipotezy wymagające naukowej, a następnie praktycznej weryfikacji.

Na potrzeby wypełniania kawern poługowniczych instalacja odzysku odpadów „związanych” w postaci pasty wydaje się być ciekawą propozycją i wyzwaniem dla technologów.

4. PODSUMOWANIE

Aktualne trendy związane z budową kawern solnych związane są z podziemnym magazynowaniem płynnych

The presence of binding materials causes the paste to self-harden, resulting in a solid mass that can attain compressive strengths of several MPa. This technology is seepage-free in conventional underground mines (Korzeniowski, Poborska-Młynarska 2016). When the paste is used in spaces filled with brine, it should serve as a barrier against potential adverse emissions from the waste components within the paste. This effect is likely because, in the case of many binding materials, brine accelerates the binding process, which in this case is the self-hardening phase.

The method of delivering paste into the cavern should resemble the process employed for gypsum. The outlet pipe of the delivery tube should be positioned slightly above the cavern floor, allowing the paste to disperse evenly across the bottom. Naturally, the paste must be of appropriate density (determined by its composition) and viscosity. These attributes are areas of ongoing investigation in terms of formulation. Probably, a “dirty” brine zone will also develop (see Fig. 1); however, these are currently just hypotheses awaiting scientific and practical validation.

To fill leached caverns, the waste recovery installation utilizing a “bound” paste appears to be an intriguing proposition and a challenge for technologists.

4. CONCLUSION

The current trends associated with the construction of salt caverns revolve around the underground storage of liquid and gaseous energy resources. The brine extracted during this process is typically classified as waste and, as a result, is not economically utilized. Simultaneously, caverns are being developed to extract brine for industrial applications, with the

i gazowych surowców energetycznych. Pozyskana solanka traktowana jest jako odpad i w związku z tym nie jest wykorzystywana gospodarczo. Ale równolegle powstają kawerny związane z pozyskiwaniem solanki do celów przemysłowych, natomiast późniejsze przekształcenie ich na podziemne magazyny to danie drugiego życia kawernom. Te, które nie są wykorzystywane na potrzeby magazynowe, po zakończonej eksploatacji pozostają wypełnione solanką z uwagi na konieczność zapewnienia im stateczności.

Bez względu na sposób wykorzystania kawern solnych podlegają one procesom konwergencji, które dążą do „zamknięcia” kawerny, czyli zlikwidowania podziemnej pustki. Jak wynika z aktualnego stanu wiedzy na ten temat, jest to proces rozłożony co najmniej na setki, a być może, tysiące lat. Trzeba mieć świadomość, że kawerny aktualnie eksploatowane jako magazyny mają również ograniczoną żywotność, co wynika z konwergencji. Po zakończeniu pracy jako podziemny magazyn kawerna powinna zostać wypełniona solanką. Należy jednak liczyć się z możliwością rozszczelnienia się kawerny bądź wniknięcia solanki wypełniającej kawernę w górotwór. Wówczas proces „zamykania” może ulec zdecydowanemu przyspieszeniu, co prawdopodobnie będzie skutkowało poważnymi uszkodzeniami na powierzchni (vide kopalnia otworowa Łęzkowice).

W związku z powyższym wydaje się być zasadne podjęcie działań zmierzających do dania kawernom kolejnego życia, tym razem wypełniając je materiałem stałym. Zaletą takiego rozwiązania, poza czysto ekologicznymi, jest trwałe „podparcie” ociosów kawerny, co istotnie powinno ograniczyć konwergencję. Ponadto nawet w sytuacji rozszczelnienia się kawerny materiał wypełniający nadal pozostanie na swoim miejscu i będzie spełniał swoją rolę.

Powyżej zarysowano trzy warianty wypełnienia pustki kawerny, które technicznie są bardzo do siebie zbliżone, gdyż ostatecznie chodzi o wypełnienie kawerny materiałem stałym. Również rozwiązania techniczne w zakresie sposobu wypełniania kawern wydają się być w zasięgu możliwości. Oczywiście w ostatecznym rozrachunku o wyborze wariantu zadecydują względy ekonomiczne, które już na starcie eliminują podsadzanie w postaci jak opisano powyżej.

Opisane rozwiązania mają jednak drugie oblicze – procedury prawno-administracyjne, które mogą okazać się trudniejsze niż strona techniczna. Najprostsze wydają się być te związane z podsadzaniem. Technologia powszechnie znana i stosowana w górnictwie podziemnym, wymagająca jedynie implementacji do górnictwa otworowego. Ale jak już wspomniano, najprawdopodobniej nie atrakcyjna finansowo. Z kolei w przypadku otworowego składowania podziemnego odpadów pierwsze ścieżki są już przetarte, ale dotyczą składowania odpadów ciekłych z wydobycia ropy naftowej i gazu ziemnego w szcerpanych złożach ropy. W przypadku składowania odpadów w kawernach solnych w Polsce nie przeprowadzono jak dotąd ani jednego postępowania prawno-admini-

potential for later conversion into underground storage facilities, effectively providing a second lease of life for these caverns. Those caverns that are not repurposed for storage, following the conclusion of their primary operations, are filled with brine to ensure their stability.

Regardless of how salt caverns are utilized, they are subject to convergence processes that aim to “close” the cavern, essentially eliminating the underground void. According to current knowledge on this topic, this is a process that spans at least hundreds, and possibly thousands, of years. It’s important to be aware that even caverns currently used as storage facilities have limited lifespans due to convergence. Upon completion of their role as underground storage facilities, caverns should be filled with brine. However, it’s essential to consider the possibility of cavern sealing or the intrusion of brine into the surrounding rock mass. In such cases, the “closure” process could significantly accelerate, potentially resulting in significant surface damage, as seen in the Łęzkowice Borehole Salt Mine.

In light of the above, it seems justified to take actions aimed at giving the salt caverns a new lease of life, this time by backfilling them with solid material. One of the advantages of such a solution, apart from its environmental benefits, is the permanent “support” it provides to the cavern walls, which should significantly reduce convergence. Moreover, even in the event of cavern seal failure, the backfilling material will remain in place and continue to serve its purpose.

The three outlined approaches for cavern void backfilling are technically quite similar, as they all involve the use of solid materials to occupy the cavern. The technical solutions for this backfilling process also appear to be within reach. However, the ultimate choice between these variants will be primarily dictated by economic factors, which, right from the outset, rule out the backfilling method as described above.

The described solutions, however, have another facet – legal and administrative procedures that may prove to be more challenging than the technical aspects. The simplest ones are likely to be associated with backfilling, a technology widely familiar and applied in underground mining, only requiring adaptation for borehole mining. Nevertheless, as previously mentioned, it may not be financially appealing. On the other hand, in the case of underground storage of waste in boreholes, the first steps have already been taken, but they concern the storage of liquid waste from oil and gas extraction in depleted oil fields. In the case of waste storage in salt caverns in Poland, not a single legal-administrative procedure has been conducted so far, and one can expect a lengthy process with no guarantee of success.

Conversely, waste recovery facilities lack precise legislative definitions. The determination of whether they should be classified as waste storage facilities or as facilities simi-

nistracyjnego i można spodziewać się długotrwałej procedury bez gwarancji sukcesu.

Z kolei instalacje odzysku odpadów nie zostały w prawodawstwie jasno opisane i kwestią urzędniczą będzie stwierdzenie, czy należy je interpretować jako składowanie odpadów, czy też jako instalację analogiczną jak np. instalacje doszczelniania zrobów zawałowych w kopalniach węgla kamiennego mieszaninami popiołowymi (nota bene traktowane są one jako element profilaktyki przeciwpożarowej). Należy wspomnieć, że jedna z polskich kopalń podziemnych nosi się z zamiarem uruchomienia instalacji do odzysku i unieszkodliwiania odpadów do likwidacji pustek podziemnych poprzez ich wypełnianie. W tym przypadku nie mówi się o składowisku podziemnym odpadów, a mimo to procedury prawno-administracyjne trwają już kilka lat.

Biorąc pod uwagę aktualną sytuację związaną z wykorzystaniem kawern solnych w Polsce należy uznać za w pełni zasadne podjęcie kroków w kierunku docelowego wypełnienia kawern materiałem stałym. Czas jest niewątpliwie elementem, który istotnie wpływa na dobrostan kawern. Wykorzystując skromne doświadczenia niemieckie w tym zakresie należy podjąć działania, które pozwolą wykorzystać potencjał tkwiący w kubaturze kawern i odzyskać z nich „uwięzioną” solankę. Bilans korzyści wydaje się być jednoznaczny, jeżeli uwzględnimy przy tym korzyści płynące z ograniczenia ilości odpadów trafiających corocznie na składowiska powierzchniowe. Planowane nowe kawerny magazynowe w dłuższej perspektywie czasowej to kolejne kubatury do wykorzystania w nieodległej przyszłości. Wypracowanie odpowiednich technologii wypełniania kawern z równoległe wypracowaną ścieżką legislacyjną wydaje się być optymalną metodą likwidacji podziemnych pustek przynoszącą profity gospodarcze i środowiskowe.

lar to those used, for instance, for sealing goaf areas in underground coal mines with ash mixtures (notably treated as part of fire prevention measures) becomes an administrative consideration. It's noteworthy that one of Poland's underground mines is contemplating the establishment of a waste recovery and disposal facility for backfilling underground voids. In this case, it is not referred to as an underground waste repository, yet legal-administrative procedures have been ongoing for several years.

Considering the current scenario regarding the use of salt caverns in Poland, it is entirely justified to take steps towards the ultimate backfilling of these caverns with solid materials. Time plays a crucial role, significantly influencing the well-being of these caverns. Drawing upon the slight German experience in this field, actions should be initiated to tap into the potential inherent in the cavern volumes and recover the “trapped” brine. The balance of benefits appears unequivocal, especially when considering the advantages of reducing the amount of waste annually directed to surface landfills. The planned new storage caverns will, in the long term, provide additional volumes to be utilized in the near future. Developing suitable technologies for cavern backfilling, in parallel with a well-structured legislative framework appears to be the optimal strategy for addressing underground voids. This strategy promises both economic and environmental advantages.

LITERATURA/REFERENCES

- AHMARUZZAMAN M.; 2010. A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36: 327-363.
- ANDRUSIKIEWICZ W., 2016. Possible Uses of Synthetic Gypsum in Salt-Cavern Filling. *Inżynieria Mineralna – Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, No 1(37): 57-62.
- DONADEI S., SCHNEIDER G.-S., 2022. Compressed air energy storage [w:] *Storing Energy (Second Edition)*, Elsevier.
- FENGLER M., 2012. Stabilizacja i zestalanie (immobilizacja) odpadów niebezpiecznych ze spalarni odpadów komunalnych w technologii „Geodur”. *Piece przemysłowe & kotły*, 12:38-44. https://dane.gov.pl/pl/dataset/221/resource/48485,lista-koncesyjna-podziemne-bezbiornikowe-magazynowanie-podziemne-skadowanie-odpadow-oraz-wydobywanie-wod-termalnych-stand-na-31052023-r/table?page=1&per_page=20&q=&sort= (dostęp 24.07.2023 r.)
- JAREMA-SUCHOROWSKA S., 2013. Zagrożenia dla gospodarki gipsem z instalacji odsiarczania spalin. *Biuletyn Naukowo-techniczny Zakładów Pomiarowo-Badawczych Energetyki*. Rok LVIII, Nr 2 (250): 33-40.
- KORZENIOWSKI W., POBORSKA-MŁYNARSKA K.M., 2016. Składowanie i odzysk odpadów wtórnych z instalacji termicznego przekształcania odpadów komunalnych w kopalni podziemnej. *Inżynieria Ekologiczna - Ecological Engineering*, 49: 91-99.
- KUNSTMAN A., POBORSKA-MŁYNARSKA K., URBAŃCZYK K.; 2002: *Zarys otworowego ługownictwa solnego. Aktualne kierunki rozwoju*. Wyd. AGH, Kraków.
- LEKSYKON górniczy, praca zb., 1989. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice.
- MALCZEWSKA M., CZABAN S., GŁOWSKI S., ŚWIERZKO R., KIWACZ T., SOBOTA J., 2013. Badania liniowych strat ciśnienia podczas przepływu mieszaniny dwufazowej w rurociągu na przykładzie mieszaniny popiołowo-wodnej. *Ochrona Środowiska*, 35/2: 69-72.
- MARX H., LACK D., KRAUKE W, 2003. Versatz untertätiger Hohlräume mit Industriellen Reststoffen am Beispiel des Bergwerkes Glückauf Sondershausen. *Symposium Solne „Quo vadis Sal“*, Mikorzyn k. Konina
- MIERZWIŃSKI D., ŁACH M., MIKUŁA J., 2017. Alkaliczna obróbka i immobilizacja odpadów wtórnych ze spalania odpadów.

- Inżynieria Ekologiczna – *Ecological Engineering*. 18 (2): 102-108.
- PESCHKEN P., 2018. Pumptechnik als Alternative zur herkömmlichen Förderung von Feststoffen. *Mining Report Glückauf* 154 (4): 306-317.
- PLUCIŃSKAA., KROWIARZ M., KLEJNOWSKAA., PŁÓCIENNIK J., 2020. Składowanie odpadów vs. podsadzanie wyeksploatowanych komór solankowych – potencjał i możliwości na przykładzie Kopalni Soli „Mogilno”. *Przegląd Solny*, 15: 32-39. PN-93/G-11010. *Górnictwo. Materiały do podsadzki hydraulicznej. Wymagania i badania.*
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Gospodarki z dnia 25 kwietnia 2014 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu zakładów górniczych wydobywających kopaliny otworami wiertniczymi. Dz. U. 2014 poz. 812.
- ROZPORZĄDZENIE Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów. Dz.U.2020.10.
- TRAPLE J., WILK S., 2002. Ekologiczne skutki eksploatacji soli kamiennej metodą otworową w kopalni „Łęzkowice”. Część II. Historia likwidacji kopalni. *Wiertnictwo Nafta Gaz*, 19/1: 237-253.
- USTAWA z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze. Dz. U. 2011 Nr 163 poz. 981 z późn. zm.
- USTAWA z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach. Dz.U.2021.779 t.j.



Specyfika zaciskania wyrobisk komorowych w polach eksploatacji soli różowych w Kopalni Soli „Kłodawa”

Specificity of convergence in the mining fields of pink salt in the „Kłodawa” Salt Mine

Józef BIENIASZ¹, Jakub PIETRAS¹, Jolanta MARCOLA-SADOWSKA², Damian KURDEK²

¹Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych „CHEMKOP” Sp. z o.o.,
31-261 Kraków, ul. Wybickiego 7; jozef.bieniasz@chemkop.pl, jakub.pietras@chemkop.pl

²Kopalnia Soli „KŁODAWA” S.A. 62-650 Kłodawa, Aleja 1000-lecia 2; dkurdek@sol-klodawa.com.pl

¹The Research and Development Center for Mining of Chemical Raw Materials “CHEMKOP” Ltd.,
31-261 Krakow, 7 Wybickiego Street; jozef.bieniasz@chemkop.pl, jakub.pietras@chemkop.pl

²“KŁODAWA” Salt Mine S.A. 62-650 Kłodawa, 2 Aleja 1000-lecia; dkurdek@sol-klodawa.com.pl

STRESZCZENIE

Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych „CHEMKOP” Sp. z o.o. od niemal 20 lat wykonuje pomiary zjawisk deformacji poeksploatacyjnych w dwóch polach cechsztyńskich soli różowych Kopalni Soli „Kłodawa” S.A. Złoże charakteryzuje się swoistym kształtem przestrzennym o znacznej rozciągłości (długości) i niewielkiej szerokości poziomej. Z tego względu komory eksploatacyjne rozmieszczane są zgodnie z jego rozciągłością i bez zachowania pionowej współosiowości filarów międzykomorowych.

Wyniki pomiarów zaciskania komór pozwoliły na uchwycenie zmienności względnej szybkości deformacji, w zależności od głębokości, wieku i wzajemnych relacji pomiędzy pionową a poziomą składową zaciskania przekroju wyrobiska. Przedstawione wyniki pomiarów zaciskania komór pokazują, że zjawisko to jest funkcją nie tylko znanych dotychczas czynników, tj. głębokości położenia i wieku wyrobiska, ale także ma związek z układem wyrobisk w złożu będącym następstwem jego formy geologicznej.

Słowa kluczowe: pomiary deformacji poeksploatacyjnych, Kopalnia Soli „Kłodawa”, monitoring deformacji, konwergencja

ABSTRACT

The Research and Development Center for Mining of Chemical Raw Materials “CHEMKOP” Ltd. has been conducting measurements of post-exploitation deformations in two fields of Zechstein pink salt at the “Kłodawa” Salt Mine for nearly 20 years. The deposit is characterized by a specific spatial shape with considerable elongation (length) and small horizontal width. Therefore, the exploitation chambers are arranged in accordance with its elongation, without maintaining vertical axisymmetry between interchamber pillars.

The results of convergence measurements allowed capturing the variability of relative deformation rates, depending on the depth, age, and mutual relations between the vertical and horizontal components of the convergence in the mine workings. The presented results of convergence measurements show that this phenomenon is influenced not only by known factors such as the depth and age of the mine workings but also by the arrangement of workings in the deposit resulting from its geological structure.

Keywords: post-exploitation deformation measurements, “Kłodawa” Salt Mine, deformation monitoring, convergence.

1. WSTĘP

Eksploatacja cechsztyńskich soli różowych w wydzie kłodawskim prowadzona jest w polach eksploatacyjnych nr 3 i nr 5 (Ryc. 1). Ta część złoża wydobywanego ma w rzucie poziomym kształt długiej i wąskiej „wstęgi” najmłodszej soli kamiennej różowej „Na4a”, otoczonej utworami zuber brunatnego „Na3t”. Wysmukła, w sensie przestrzennym, forma złoża wymusiła zastosowanie systemu eksploatacji komorowej w wariantcie odmiennym od stosowanego w polach eksploatacyjnych w złożu soli białych.

Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych „CHEMKOP” Sp. z o.o. od niemal 20 lat wykonuje pomiary zjawisk deformacji poeksploatacyjnych w polach nr 3 i nr 5 stosując własne, oryginalne rozwiązania pomiarowe. Cyklicznym pomiarom towarzyszy wykonywana systematycznie rozbudowa sieci konwergencyjnej, umożliwiająca obserwację zjawisk w całym profilu głębokościowym i w różnych rejonach pól eksploatacyjnych w złożu soli różowych. W ostatnich latach, podążając za eksploatacją w polu nr 5, schodzącą poniżej poziomu 600, stanowiska pomiarowe instalowano niemal bezpośrednio po zakończeniu wybierania wyrobisk komorowych. Umożliwiło to obserwowanie początkowej fazy deformacji calizn otaczających wyrobisko, co przyniosło bardzo cenne wyniki pomiarowe.

Zebrane dane pomiarowe pozwalają na charakterystykę zjawiska zaciskania pustek w polach eksploatacyjnych w złożu soli różowych oraz uchwycenie istotnych różnic w stosunku do obserwowanych w dłuższym okresie pól nr 1 i nr 2, gdzie prowadzona jest eksploatacja soli białej (brzeźna NE części wydobywanego). Dodatkowo, w kilku komorach zlokalizowanych w polach nr 3 i nr 5 rozbudowano system obserwacji zaciskania poziomego, co pozwala na wstępną analizę porównawczą w stosunku do typowych obserwacji konwergencyj pionowej.

2. CHARAKTERYSTYKA PÓL EKSPLOATACJI SOLI RÓŻOWEJ NR 3 I 5

W polu nr 3 od 1962 r., a w polu nr 5 od 1984 r. do chwili obecnej, eksploatowana jest sól różowa. Przedmiotem eksploatacji jest wąskie „pasma” soli o szerokości od kilkunastu do ok. 100 m i długości (rozciągłości) niemal 3 km, na głębokościach poniżej 450 m p.p.t. Eksploatacja prowadzona jest wielopoziomowym systemem komorowym (Ryc. 1). Komory eksploatacyjne rozmieszczane są w złożu dłuższymi osiami zgodnie z jego rozciągłością i bez zachowania pionowej współosiowości filarów międzykomorowych. Szerokość złoża na danym poziomie pozwala na rozmieszczenie jedynie od 1 do 4 komór (przeciętnie 2 komory). Te charakterystyczne czynniki, wymuszone formą złoża, odróżniają stosowany tu sposób eksploatacji od klasycznego wariantu modularnego,

1. INTRODUCTION

The exploitation of Zechstein pink salts in the Kłodawa salt dome is conducted in mining fields No. 3 and No. 5 (Fig. 1). This part of the domal deposit has a spatially elongated and narrow “strip” shape of the youngest pink rock salt “Na4a,” surrounded by sediments of brown zuber “Na3t”. The slender spatial form of the deposit required the implementation of a chamber exploitation system different from the one used in the mining fields of white salt.

The Research and Development Center for Mining of Chemical Raw Materials “CHEMKOP” Ltd. has been conducting post-exploitation deformation measurements in mining fields No. 3 and No. 5 for almost 20 years, employing their own original measurement solutions. The cyclic measurements are accompanied by a systematically expanding convergence network, enabling the observation of phenomena throughout the entire depth profile and in various areas of the pink salt mining fields. In recent years, following the exploitation in field No. 5, which extended below the level 600, measurement stations were installed almost immediately after completing the mining operations in the chamber. This allowed for the observation of the initial phase of deformation in the surrounding rock mass, which yielded valuable measurement results.

The collected measurement data allows for the characterization of the phenomenon of void convergence in the exploitation fields of pink salt and capturing significant differences compared to those observed in the long-term fields No. 1 and No. 2, where white salt exploitation (located in the edge of the NE part of the Kłodawa salt dome) is conducted. Additionally, in several chambers located in fields No. 3 and No. 5, the horizontal convergence observation system has been expanded, enabling preliminary comparative analysis with typical vertical convergence observations.

2. CHARACTERIZATION OF PINK SALT EXPLOITATION FIELDS NO. 3 AND 5

Pink salt has been exploited in Field No. 3 since 1962 and in Field No. 5 since 1984 to the present day. The subject of exploitation is a narrow “strip” of salt with a width ranging from a few to about 100 meters and a length (stretch) of nearly 3 kilometers at depths below 450 meters below ground level (m.b.g.l.). The exploitation is carried out using a multi-level chamber system (Fig. 1). The exploitation chambers are arranged in the deposit with their longer axes aligned according to its elongation and without maintaining vertical axial symmetry of the interchamber pillars. The width of the deposit at a given level allows for the distribution of only 1 to 4 chambers (on average 2 chambers). These characteristic factors, dictated by the deposit’s shape, distinguish the applied method of exploitation from the classical modular variant adopted in the exploitation fields No. 1 and No. 2 of the white salt deposit.

przyjętego w polach eksploatacyjnych nr 1 i nr 2 w złożu soli białych.

Według stanu na koniec 2021 r. sumaryczna objętość pustek w polach eksploatacyjnych nr 3 i nr 5 wynosi ponad 8,4 mln m³, co stanowi 42% objętości pustek w całej kopalni. Obecnie trwają prace przy wybieraniu złoża w polu nr 5 (w przedziale głębokości 630-750 m p.p.t.) i udostępnianiu nowych poziomów w obu polach eksploatacyjnych, poniżej poziomu 750 m p.p.t..

3. SIEĆ POMIAROWA I TECHNIKA OBSERWACJI

Cykliczne pomiary zaciskania komorowych pustek poeksploatacyjnych w polu nr 3 rozpoczęto w 2003 r. w rejonie pionu KSR-6 w NW części pola, natomiast w 2017 r. pomiarem objęto rejon komór KSR-24 w przeciwległej SE części pola. W polu nr 5 obserwacje rozpoczęto w 2004 r. w rejonie pionu KSR-52 (Ryc. 1).

Do pomiaru długości baz zastosowano technikę pomiarową wykorzystującą dalmierz laserowy, co pozwoliło na rozpoznanie składowych procesów zaciskania wyrobisk (pionowe, poziome, ukośne). Na typowym stanowisku pomiarowym zaciskanie pionowe mierzone jest w osi przekroju poprzecznego komory, a zaciskanie poziome na wysokości ok. 1,5 m nad spągami, przy czym kierunek pomiaru zaciskania poziomego jest prostopadły do rozciągłości złoża (wynika to z przyjętego sposobu rozmieszczenia komór).

Sieć pomiarowa była sukcesywnie uzupełniana wraz z wybieraniem kolejnych, niższych poziomów. W chwili obecnej system kontroli zjawisk poeksploatacyjnych, zachodzących wewnątrz górotworu w polach nr 3 i 5, obejmuje:

- ciąg baz pomiarowych w rejonie pionu KSR-6 pola nr 3, na poziomach 475-750 m,
- ciąg baz pomiarowych w rejonie pionu KSR-24 pola nr 3, na poziomach 475-690 m,
- ciąg baz pomiarowych w rejonie pionu KSR-52 pola nr 5, na poziomach 475-720 m.

W ujęciu statystycznym, w polach nr 3 i 5 obserwowanych było (i jest obecnie) łącznie 147 baz, rejestrujących proces zaciskania 33 komór. Cechą charakterystyczną sieci w polach nr 3 i 5 jest rozbudowanie niektórych stanowisk o dodatkowe bazy, pozwalające dokładniej rejestrować zaciskanie przekroju typowej komory, a nawet zaciskanie całej strefy eksploatacji w kierunku poprzecznym do rozciągłości.

4. ANALIZA WYNIKÓW OBSERWACJI ZACISKANIA KOMÓR W POLACH NR 3 I 5

Systematyczne, kilkunastoletnie pomiary sieci konwergencyjnej w polach eksploatacyjnych nr 3 i nr 5 pozwoliły zgromadzić stosunkowo bogaty materiał pomiarowy dotyczący wielkości, zmienności zaciskania i relacji pomiędzy składową pionową a składową poziomą.

As of the end of 2021, the total volume of voids in exploitation fields No. 3 and No. 5 amounts to over 8.4 million cubic meters, constituting 42% of the total volume of voids in the entire mine. Currently, mine works are underway in the mining field No. 5 (within the depth of 630-750 m.b.g.l.) and on providing access to new levels in both exploitation fields, below the 750 m.b.g.l..

3. MEASUREMENT NETWORK AND OBSERVATION TECHNIQUE

Cyclic measurements of post-exploitation void convergence in Field No. 3 began in 2003 in the KSR-6 vertical section in the NW part of the field, while in 2017, the measurements were extended to include the KSR-24 chamber area in the opposite SE part of the field. In Field No. 5, observations began in 2004 in the KSR-52 vertical area (Fig. 1).

To measure the length of the stations, a laser rangefinder measurement technique was employed, enabling the recognition of the components of the convergence (vertical, horizontal, and inclined) in mine workings. At a typical measurement station, vertical convergence is measured in the axis of the cross-section of the chamber, while horizontal convergence is measured at a height of approximately 1.5 meters above the chamber floor, with the direction of horizontal convergence measurement being perpendicular to the elongation of the deposit (resulting from the adopted chamber distribution).

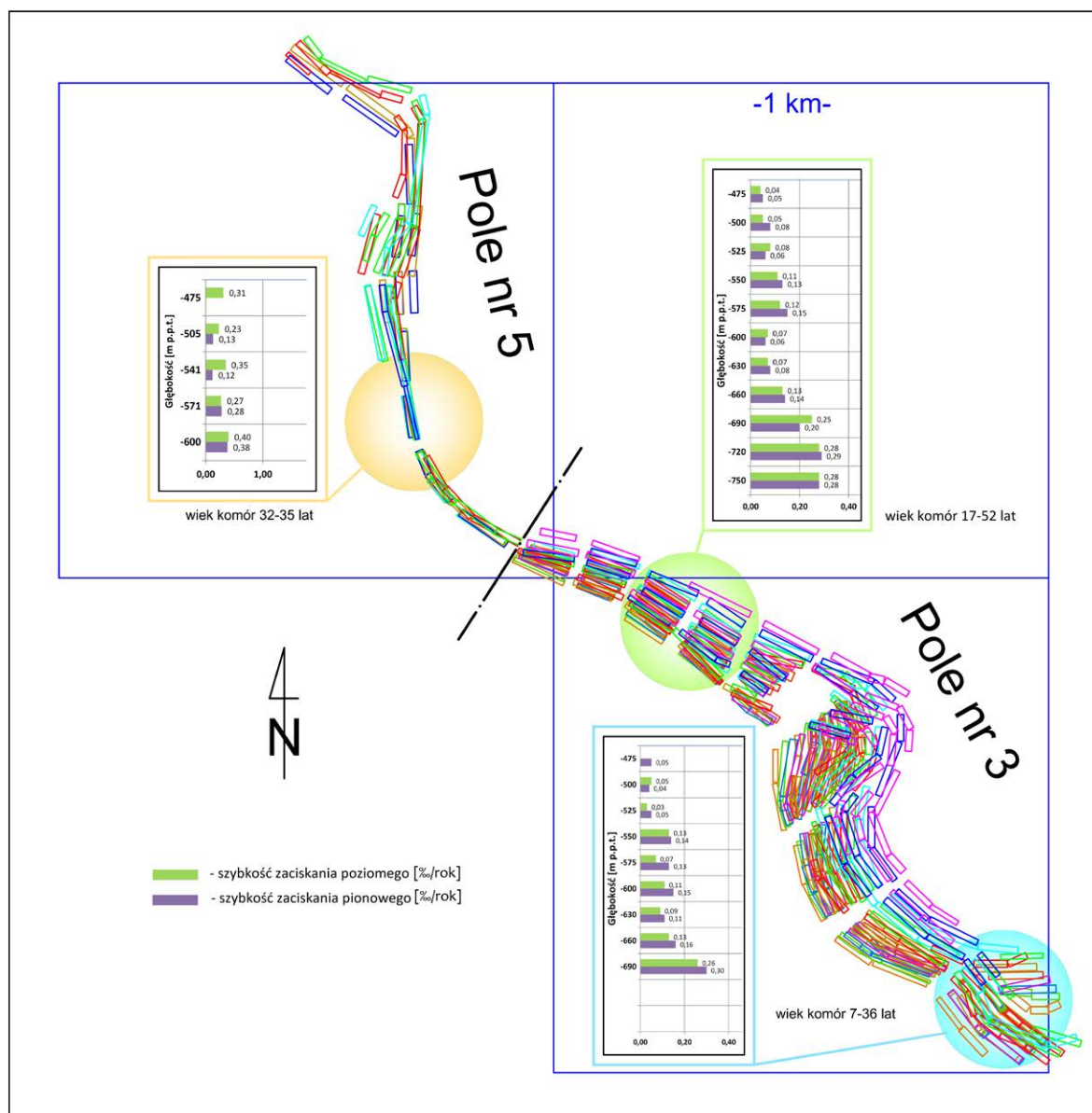
The measurement network has been progressively extended with the mining of deeper levels. At present, the monitoring system of post-exploitation phenomena occurring within the rock mass in fields No. 3 and 5 includes:

- a series of measurement stations in the KSR-6 vertical area of mining field No. 3, at levels from 475 to 750 meters,
- a series of measurement stations in the KSR-24 vertical area of mining field No. 3, at levels from 475 to 690 meters,
- a series of measurement stations in the KSR-52 vertical area of mining field No. 5, at levels from 475 to 720 meters.

In a statistical sense, a total of 147 measurement stations were (and currently are) observed in mining fields No. 3 and 5, recording the convergence process in 33 chambers. A notable aspect of the network in fields No. 3 and 5 is the expansion of specific stations with additional measurement points, enabling a more precise registration of convergence in a typical chamber and even across the entire exploitation zone transversely to the elongation.

4. ANALYSIS OF THE RESULTS OF CHAMBER CONVERGENCE OBSERVATIONS IN MINING FIELDS NO. 3 AND 5

Systematic, multi-year measurements of the convergence network in fields No. 3 and No. 5 have provided a relatively substantial dataset concerning the magnitude, variability of



Ryc. 1. Lokalizacja miejsc pomiaru i wyniki obserwacji zaciskania pionowego i poziomego w przekroju komór w polach eksploatacyjnych w złożu soli różowych na poziomach od 475 do 750 m p.p.t.

Fig. 1. Location of measurement points and results of vertical and horizontal convergence observations in the cross-sections through the chambers in the exploitation fields of pink salt at levels from 475 to 750 m.b.g.l.. Pole nr 5: *Field No 5*; Pole nr 3: *Field No 3*; głębokość (m.p.p.t): *depth [below ground level]*; wiek komór 32-35 lat: *chamber age 32-35 years*; szybkość zaciskania poziomego [%/rok]: *horizontal convergence rate [%/year]*; szybkość zaciskania pionowego [%/rok] - *vertical convergence rate [%/year]*

Generalnie szybkość zaciskania komór w trzech objętych pomiarami rejonach pól eksploatacyjnych w złożu soli różowych jest niska o wartościach: poniżej 0,4 %/rok (Ryc.1). Dotyczy to szczególnie górnej strefy eksploatacji (450-600 m p.p.t.), dla której obecny wiek wyrobisk komorowych wynosi ponad 30 lat. Małe wartości szybkości zaciskania dotyczą zarówno zaciskania pionowego jak i poziomego, przy jednoczesnym braku wyraźnej tendencji w ich wzajemnych relacjach na poszczególnych poziomach. Ledwie widoczny jest też przyrost szybkości konwergencji w funkcji głębokości. Zaobserwowane w polach eksploatacyjnych nr 3 i nr 5 wartości szybkości zaciskania są średnio kilkakrotnie mniejsze, niż

convergence, and the relationship between the vertical and horizontal components.

The chambers in the surveyed regions of the pink salt exploitation fields generally exhibit a low convergence rate, with values below 0.4‰ per year (Fig. 1). This is especially notable in the upper exploitation zone (450-600 m.b.g.l.), where the age of the chamber workings exceeds 30 years. The small convergence rates apply to both vertical and horizontal convergence, with no distinct trend observed in their mutual relationships at different mining levels. Additionally, the increase in convergence rate with depth is barely noticeable. The observed convergence rates in mining fields No. 3 and

obserwowane na ekwiwalentnych głębokościach w polach eksploatacyjnych w złożu soli białych (Ryc. 3).

Ze względów praktycznych, zaciskanie poprzeczne (poziome) przekroju komory mierzone jest w strefie położonej nieco ponad spągiem, czyli nie w osi przekroju poprzecznego, jak to ma miejsce w przypadku standardowego pomiaru zaciskania pionowego. Dla wyznaczenia zmienności zaciskania poziomego na różnych wysokościach ociosu komory stosowane są bazy ukośne. Rozbudowano także wybrane stanowiska o dodatkowe bazy poziome, rozmieszczone na różnych wysokościach nad spągiem.

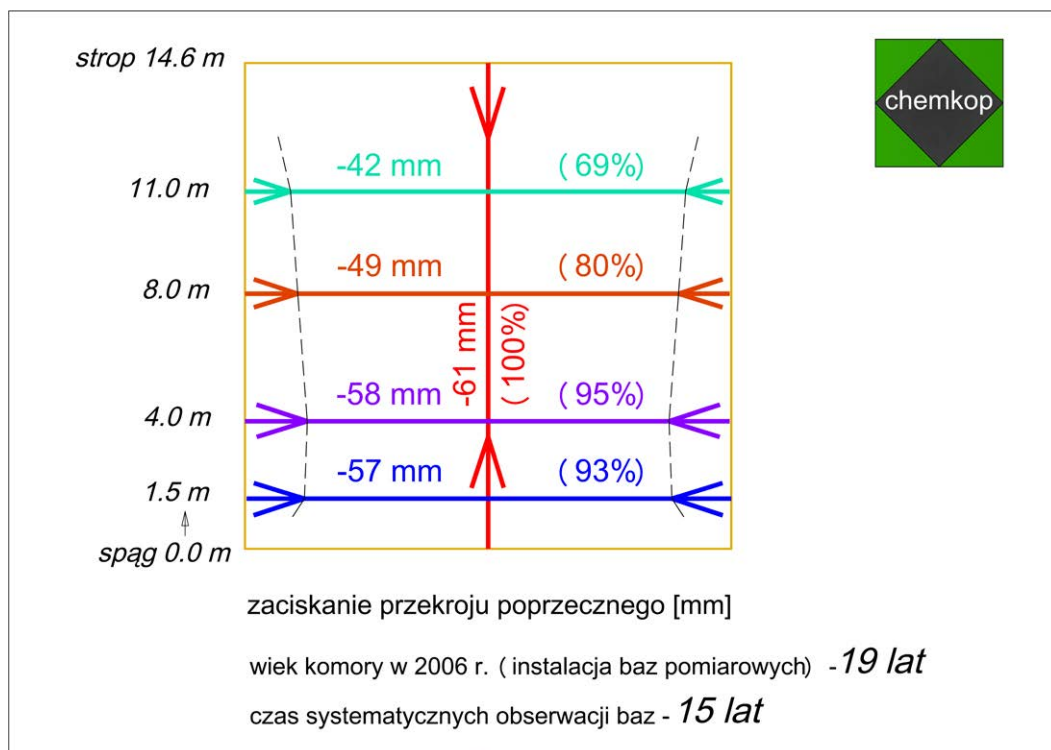
Najbardziej reprezentatywne wyniki obserwacji zaciskania poziomego pochodzą z komory KSR-57 na poziomie 571,5 w polu nr 5. Szerokość złoża na tym poziomie pozwoliła na wybranie tylko jednej komory. W pionowym przekroju poprzecznym komory liczącej wówczas 19 lat o wysokości 14,6 m zainstalowano nietypowe stanowisko pomiarowe składające się m.in. z 4 baz poziomych na wysokościach od 1,5 do ok. 11 m nad spągiem – Ryc. 2. Wyniki systematycznych, cyklicznych pomiarów wykonywanych w kolejnych 15 latach pokazują udział kierunków składowych w zaciskaniu przekroju komory. Przyjmując zaciskanie pionowe w osi przekroju komory jako 100%, składowe poziome zaciskania są niewiele mniejsze i wynoszą od ponad 90% (w dolnych strefach ociosów) do 80%-70% (dla strefy powyżej połowy wysokości ociosów) – Ryc. 2. Znacznie krócej obserwowana-

No. 5 are, on average, several times smaller than those observed at equivalent depths in the exploitation fields of the white salt deposit (Fig 3).

For practical reasons, the horizontal convergence of the chamber cross-section is measured in a zone located slightly above the chamber floor, rather than in the axis of the cross-section, which is the standard method for measuring vertical convergence. In order to assess the variability of horizontal convergence at different heights along the side wall of the chamber, inclined measurement stations are employed. Additionally, certain stations have been expanded to include supplementary horizontal measurement points at various heights above the chamber floor.

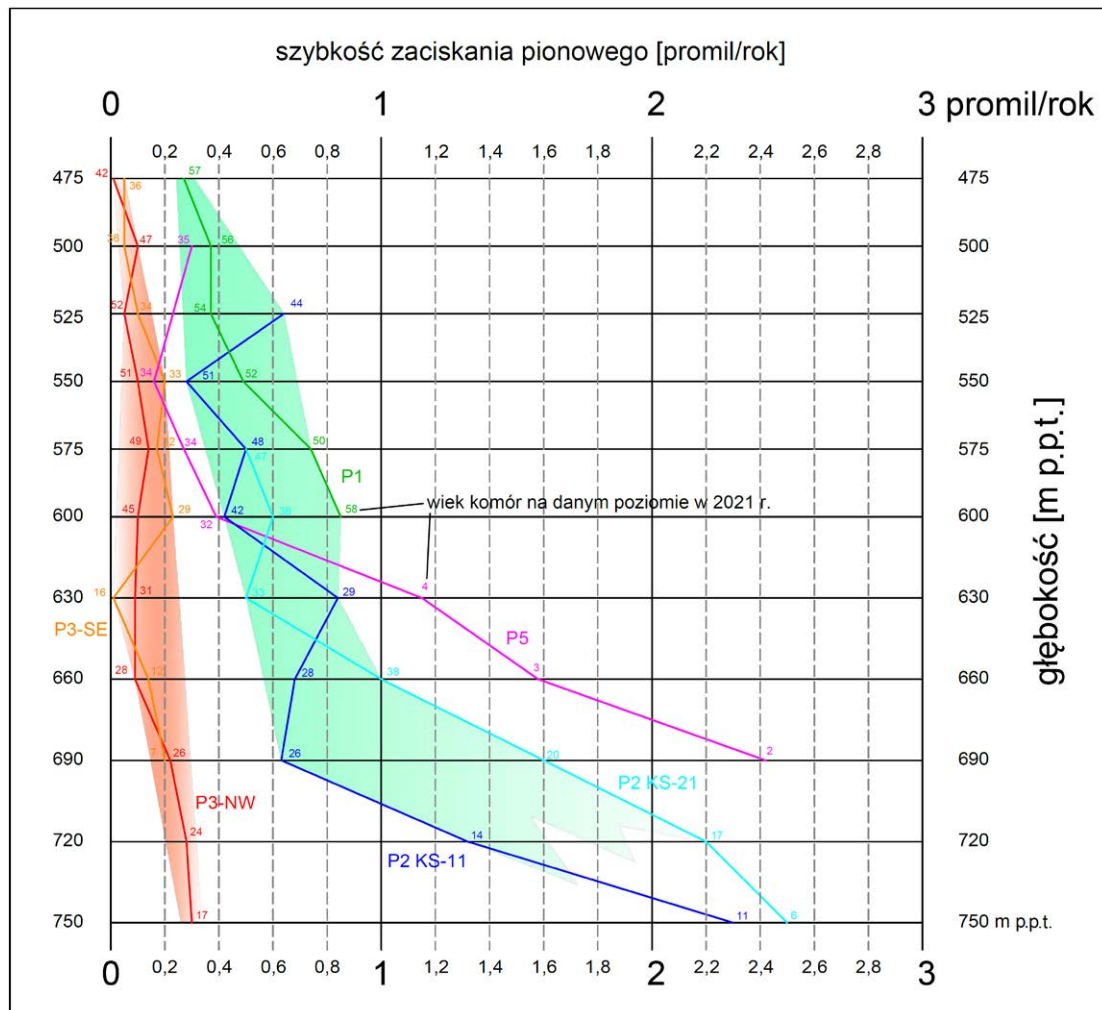
The most representative results of horizontal convergence observations come from chamber KSR-57 at level 571.5 in mining field No. 5. Due to the limited width of the deposit at this level, only one chamber could be selected for examination. The chamber, which was then 19 years old and had a height of 14.6 meters, had an atypical measurement station installed in its vertical cross-section, consisting of 4 horizontal stations placed at heights ranging from 1.5 to approximately 11 meters above the chamber floor - see Fig. 2.

The results of systematic and cyclical measurements conducted over a period of 15 years demonstrate the contribution of directions of components in the convergence of the chamber's cross-section. Assuming vertical convergence in the



Ryc. 2. Relacje pomiędzy zaciskaniem poziomym a pionowym w przekroju komory KSR-57 na poziomie 571,5

Fig. 2. Relations between horizontal and vertical convergence in the cross-section through the chamber KSR-57 at level 571.5. strop: chamber ceiling; spąg: chamber floor; zaciskanie przekroju poprzecznego: convergence of the transverse cross-section; wiek komory w 2006 r. (instalacja baz pomiarowych) – 19 lat: chamber age in 2006 (installation of measurement bases) – 19 years; czas systematycznych obserwacji baz - 15 lat: years of regular base observations – 15.



Ryc. 3. Wartości szybkości zaciskania pionowego komór w solach białych i różowych w funkcji głębokości z uwzględnieniem wieku wyrobiska

Fig. 3. Vertical convergence rates of chambers in white and pink salt beds as a function of depth, considering the age of the excavation. szybkość zaciskania pionowego (promil/rok): vertical convergence rate (per mil/year); wiek komór na danym poziomie w 2021 r.: age of chambers at a given level in 2021; głębokość [m p.p.t.]: depth [m.b.g.l.]; promil/rok: per mil/year; 750 m p.p.t.: 750 m.b.g.l.

ne ok. 4,5 roku, pojedyncze, dodatkowe bazy poziome w komorach położonych na poziomach 525 m i 600 m pokazują podobne relacje między zaciskaniem pionowym a poziomym. Rejestrowane na nich przemieszczenia poziome wynoszą od 70% do 130% osiowego zaciskania pionowego. Wszystkie omawiane przypadki wzajemnej zależności między zaciskaniem pionowym a poziomym dotyczą komór w wieku od 20 do 30 lat, czyli w fazie powolnego, niemal jednostajnego narastania deformacji po okresie intensywnych ruchów w pierwszych latach istnienia wyrobisk.

Zupełnie odmienny charakter deformacji poeksploatacyjnych zaobserwowano natomiast w świeżo wybranych komorach w polu eksploatacyjnym nr 5 na poziomach 630 m, 660 m i 690 m. Ich wiek wynosi jedynie od 2 do 4 lat, zatem obserwowana jest pierwsza faza intensywnej reakcji górotworu po wykonaniu wyrobiska. Zaobserwowane wartości szybkości zaciskania są znacznie większe i wynoszą od 1 do (incydentalnie) ponad 4 ‰/rok (Ryc. 3). Drugą cechą charakterystyczną tej wczesnej fazy deformacji jest wyraźna dominacja

axis of the chamber's cross-section as 100%, the horizontal convergence components were found to be slightly smaller, varying from over 90% in the lower sections of the chamber walls to 80%-70% for the area above half of the chamber wall height, as shown in Figure 2. Additionally, shorter observations of about 4.5 years were made for single, additional horizontal stations in chambers at levels 525 meters and 600 meters, which displayed similar relationships between vertical and horizontal convergence. The recorded horizontal displacements in these cases ranged from 70% to 130% of the axial vertical convergence.

All the discussed cases of mutual dependency between vertical and horizontal convergence pertain to chambers aged between 20 and 30 years, representing a phase of slow and almost uniform growth of deformation after a period of intensive movements during the early years of workings existence.

An entirely different character of post-exploitation deformations was observed in recently mined chambers in the mining field No. 5 at levels 630 m, 660 m, and 690 m. Their age

prędkości zaciskania poziomego nad pionowym, wynosząca od 130% do ponad 280% - na danym poziomie. Efekt ten można wstępnie łączyć z kształtem złoża, gdyż kierunek pomiaru zaciskania poziomego w wyrobiskach jest prostopadły do rozciągłości złoża soli różowych.

Czas obserwacji baz w polach soli różowych jest zbyt krótki, co nie pozwala na pełniejszą ocenę zjawiska. Jednak wstępnie można przyjąć, że w początkowych latach istnienia komór w polach eksploatacyjnych w złożu soli różowych rejestrowane są stosunkowo duże szybkości zaciskania (do kilku %/rok), a składowa boczna (pozioma) przeważa nad pionową. W przypadku obserwacji z poziomów 630-690 m (w polu nr 5) pewnym czynnikiem zakłócającym otrzymany obraz deformacji jest wpływ trwającej nadal w sąsiedztwie (i na poziomach niższych) eksploatacji.

Przedstawione wyniki pomiarów zaciskania komór w polach eksploatacyjnych w złożu soli różowych pokazują, że jego wartość jest funkcją nie tylko znanych dotychczas czynników, tj. głębokości położenia i wieku wyrobiska, ale także ma związek z układem wyrobisk w złożu będącym następstwem jego formy geologicznej. Możliwość obserwacji deformacji od pierwszych lat istnienia komory pozwoliła na wstępne uchwycenie zmienności składowych pionowego i poziomego zaciskania w funkcji czasu istnienia wyrobiska. Wyniki kolejnych, systematycznych pomiarów pozwolą na zweryfikowanie tych wstępnych spostrzeżeń.

5. PODSUMOWANIE

Złoże soli różowych, będące fragmentem wysadu kłodawskiego, charakteryzuje się swoistym kształtem przestrzennym o znacznej rozciągłości (długości) i niewielkiej szerokości poziomej. Czynnikiem ten powoduje, że sól różowa wybierana jest odmianą systemu komorowego dostosowanego do formy przestrzennej złoża. Eksploatacja trwa od kilkadziesiąt lat w polach eksploatacyjnych nr 3 i nr 5.

Od niemal dwóch dekad w polach, w których eksploatuje się sole różowe, funkcjonuje sieć pomiaru konwergencji wyrobisk, obejmująca całą przestrzeń eksploatacji złoża na głębokościach od 450 do 750 m p.p.t. Wyniki systematycznych pomiarów zaciskania komorowych pustek poeksploatacyjnych pozwoliły na uchwycenie zmienności względnej szybkości deformacji w zależności od głębokości, wieku oraz wzajemnych relacji pomiędzy pionową a poziomą składową zaciskania przekroju wyrobiska. Generalnie, dla pól eksploatacyjnych w złożu soli różowych charakterystyczne są niewielkie wartości szybkości zaciskania pionowego i poziomego - poniżej 0,4 %/rok w całym profilu głębokościowym eksploatacji. Słabo widoczny jest typowy dla pól nr 1 i 2 wzrost szybkości konwergencji w funkcji głębokości. Wnioski te dotyczą starszych wyrobisk, w wieku powyżej kilkunastu lat.

ranges from only 2 to 4 years, thus, the observed phenomenon represents the initial phase of an intense rock mass response immediately after excavation. The observed convergence rates are significantly higher, ranging from 1 to (occasionally) over 4 %/year (Fig. 3). Another characteristic feature of this early deformation phase is the clear dominance of horizontal convergence over vertical convergence, ranging from 130% to over 280% at a given level. This effect can be tentatively linked to the deposit's shape, as the direction of horizontal convergence measurements in the excavations is perpendicular to the elongation of the pink salt deposit.

The observation period of the measurement stations in pink salt fields is relatively short, which limits a comprehensive assessment of the phenomenon. However, preliminary findings suggest that during the initial years of chamber existence in pink salt exploitation fields, relatively high convergence rates are recorded (up to several %/year), with the horizontal component prevailing over the vertical one. It should be noted that observations from levels 630-690 m (in field No. 5) may be influenced by ongoing mining activities in the vicinity (and at lower levels), which could impact the obtained deformation picture.

The results presented from chamber convergence measurements in pink salt exploitation fields reveal that its magnitude is influenced not only by well-known factors, such as the depth and age of the excavation, but also by the arrangement of excavations in the deposit, which is a consequence of its geological structure. The ability to observe deformations from the early years of chamber existence provides a preliminary insight into the variations in vertical and horizontal convergence components over time. Further systematic measurements will allow for the validation of these initial observations.

5. CONCLUSION

The pink salt beds, which are a part of the Kłodawa salt dome, are characterized by a distinct spatial shape with considerable elongation (length) and small horizontal width. This inherent characteristic has led to the implementation of a specialized chamber system tailored to the deposit's spatial shape. Exploitation activities have been conducted for several decades in mining fields No. 3 and No. 5.

For nearly two decades, a comprehensive underground convergence measurement network has been active in the mining fields dedicated to pink salt exploitation. This network comprise the entire mining area at depths ranging from 450 to 750 meters below the surface. The systematic measurements of post-exploitation void convergence have yielded insights into the varying rates of deformation, depending on depth, age, and the mutual relationships between the vertical and horizontal components of the chamber's convergence.

Natomiast ostatnie pomiary, wykonane w niedawno wybranych komorach na poziomach 630-690 m, pokazały odmienną charakterystykę deformacji w pierwszych latach po wybraniu wyrobiska. Zarejestrowano wyraźnie większe wartości szybkości zaciskania (z przedziału od 1,1 do 4,3 ‰/rok) oraz znaczącą przewagę zaciskania poziomego nad pionowym (1,3 do 2,8 razy). Krótki czas prowadzenia tych obserwacji nie pozwala na ustalenie przyczyn obserwowanej odmienności zjawiska. Wydaje się, że wzrost szybkości zaciskania w tej fazie deformacji wynika przede wszystkim z wieku wyrobisk i ich głębokości. Czynnikiem zaburzającym może być jednak oddziaływanie trwającej w sąsiedztwie eksploatacji. Natomiast przewagę wartości zaciskania poziomego nad pionowym można wstępnie wiązać z układem wyrobisk, determinowanym specyficznym kształtem przestrzennym złoża. Spostrzeżenia te wymagają pomiarowego potwierdzenia w kolejnych cyklach obserwacyjnych.

In the context of pink salt beds exploitation, modest values of both vertical and horizontal convergence rates prevail, remaining below 0.4 ‰ per year across the entire depth profile of exploitation. The typical increase in convergence rates with depth, often observed in fields No. 1 and 2, is weakly visible. These conclusions pertain to mature excavations, aged beyond a dozen years.

However, recent measurements taken in newly excavated chambers at depths ranging from 630 to 690 meters have revealed a distinct deformation pattern in the initial years post-excavation. Clearly higher convergence rates (ranging from 1.1 to 4.3 ‰ per year) were recorded, along with a significant prevalence of horizontal convergence over vertical convergence (1.3 to 2.8 times). The relatively short duration of these observations precludes a definitive identification of the exact reasons behind this observed difference in the phenomenon.

It seems that the escalation in convergence rates during this deformation phase is primarily attributable to the excavations' age and depth. However, the presence of an influencing factor, such as the ongoing neighboring extraction activities, cannot be dismissed. Furthermore, the dominance of horizontal convergence values over vertical convergence could tentatively be linked to the layout of the excavations, influenced by the unique spatial shape of the deposit. These observations merit further substantiation through measurements conducted in subsequent observational cycles.

LITERATURA/REFERENCES

- BIENIASZ J., WOJNAR W. 2008. Analiza porównawcza deformacji poeksploatacyjnych kłodawskiego systemu komorowo-filarowego przy pionowym i ukośnym układzie wyrobisk. *Przegląd Solny 2008. Kwartalnik IGSMiE, tom 24, zeszyt 3/2 111-120.*
- BIENIASZ J., PIETRAS J. 2018. Deformacje górotworu wywołane eksploatacją pola nr 2 w Kopalni Soli „Kłodawa” S.A., *Przegląd Solny 2018. Rocznik Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego, tom 14, 15-20.*
- BIENIASZ J., PIETRAS J. 2019 Wykonanie instalacji baz pomiarowych do pomiaru konwergencji komór w polu nr 5 wraz z wykonaniem pierwszego pomiaru na poz. 630. *Archiwum OBR GSChem CHEMKOP Sp. z o.o., 1162.*
- BIENIASZ J., PIETRAS J. 2021 Wykonanie pomiarów konwergencji komór, filarów i półek międzykomorowych w polach eksploatacyjnych nr 1, 2, 3 i 5 Kopalni. *Archiwum OBR GSChem CHEMKOP Sp. z o.o., 1171.*



Obszar przedsudecki zagłębieniem potasowym w Polsce

Fore-Sudetic area as the potash district in Poland

Grzegorz CZAPOWSKI, Marta HODBOD

Państwowy Instytut Geologiczny-Państwowy Instytut Badawczy, Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa;
grzegorz.czapowski@pgi.gov.pl, marta.hodbod@pgi.gov.pl

Polish Geological Institute – National Research Institute - Rakowiecka 4, 00-975 Warsaw;
grzegorz.czapowski@pgi.gov.pl, marta.hodbod@pgi.gov.pl

STRESZCZENIE

Osady potasonośne, zbudowane głównie z chlorkowych minerałów potasu i magnezu jak sylwin i karnalit, wyróżniane są w randze formacji w profilach evaporatowych trzech cyklotemów cechsztynu (górnym perm) na obszarze Polski. Największy obszar zajmują utwory formacji starszej soli potasowej (K2, cyklotem Stassfurt [PZ2]) i młodszej soli potasowej (K3, cyklotem Leine [PZ3]), zaś osady formacji najstarszej soli potasowej (K1, cyklotem Werra [PZ1]) stwierdzono tylko lokalnie na obszarze północnej Polski. Pokłady soli K2 i K3, o miąższości >2 m, występujące na głębokości do 2 km na obszarze przedsudeckim uznano za najbardziej perspektywiczne zasobowo i przydatne do przyszłej eksploatacji metodą ługowania podziemnego.

Skały starszej soli potasowej (K2) tworzą zasoby przewidywane 7 obszarów perspektywicznych (wyznaczone 98 otworami wiertniczymi) o sumarycznej wielkości 3,2 mld Mg i łącznej powierzchni 454 km². Z kolei utwory młodszej soli potasowej (K3) tworzą zasoby przewidywane 6 obszarów perspektywicznych (wyznaczonych na podstawie 23 otworów wiertniczych) wielkości 288,8 mln Mg i o sumarycznej powierzchni >60 km². Tym samym obszar przedsudecki charakteryzuje wysoki potencjał zasobowy soli potasowych, na który składa się 13 obszarów perspektywicznych o zasobach przewidywanych oszacowanych na 3,53 mld Mg kopaliny i łącznej powierzchni niemal 514 km². Wstępne szacunki możliwej do pozyskania ilości K₂O w tych zasobach (przyjmując niską średnią zawartość K₂O wynoszącą 1%) wskazują na 35,32 mln Mg,

Słowa kluczowe: sole potasowo-magnezowe, potencjalne zasoby, perm, obszar przedsudecki, Polska

ABSTRACT

The potash-bearing deposits composed mainly of such chloride K-Mg minerals as sylvin and carnallite are recognised as formations in the successions of three cyclothems of the Zechstein (Upper Permian) evaporites in Poland. The largest surface areas are represented by the Older Potash (K2, Stassfurt [PZ2] cyclothem) and the Younger Potash (K3, Leine [PZ3] cyclothem) Formations, while the deposits of the Oldest Potash (K1, Werra [PZ1] cyclothem) Formation have been documented only locally in northern Poland. The seams of K2 and K3 deposits, being over 2 m thick and occurring at the depth of up to 2 km in the Fore-Sudetic Area, are considered to be the most prospective resources for future mining (recommended, owing to their relatively inexpensive extraction costs by the method of solution mining).

The Older Potash (K2) deposits compose the predicted reserves of seven prospective areas (defined by 98 wells), with the total volume estimated at 3.2 billion Mg and situated on the total surface area of 454 km². The Younger Potash (K3) rocks occur in six areas (contoured by 23 wells), with the predicted reserves of 288.8 million Mg and the total surface area of over 60 km². Therefore, the Fore-Sudetic Area has a fairly high resource potential of potassium salts, offering 13 prospective areas, with the total predicted reserves of 3.53 billion Mg of potash and the total surface area of up to 514 km². Preliminary calculations of possible K₂O presence in these reserves suggested the amount of 35.32 million Mg of potassium oxide, at the assumed low average K₂O content of 1%.

Key words: potassium salts, potential reserves, Permian, Fore-Sudetic Area, Poland

1. WSTĘP

Sole potasowo-magnezowe (K-Mg) mają bardzo szerokie zastosowanie. Wykorzystywane są głównie (do 90% produkcji) w rolnictwie i ogrodnictwie jako nawozy sztuczne, służące poprawie wydajności upraw (głównie sole potasowe chlorkowe i siarczanowe – w przypadku soli K-Mg typu siarczanowego szczególnie cenne są polihality). Ponadto są stosowane w przemyśle chemicznym, kosmetycznym (składnik wielu kosmetyków np. kremów, perfum, emulsji, jako sole kąpielowe, itp.), szklarskim, skórzanym, farbiarskim, pirotechnicznym, w lecznictwie (choroby skórne, suplementy diety w celu uzupełnienia mikroelementów). Wojna w Ukrainie istotnie zmieniła układ geopolityczny w Europie, ograniczając możliwości taniego importu soli potasowo-magnezowych (K-Mg) z Białorusi i Rosji. Ponieważ Polska, mimo posiadania udokumentowanych zasobów tej kopaliny, nie prowadzi jej eksploatacji, zatem wzrosło zainteresowanie dotychczas zarejestrowanymi złożami soli potasowo-magnezowych, jak również obszarami, na których stwierdzono ich występowanie (np. Czapowski, 2017; Czapowski, Bukowski, 2013, 2015; Czapowski i in., 2009, 2015; Mikulski i in., 2015; Szamałek i in., 2020).

Niniejsza praca wskazuje na istniejący wysoki potencjał zasobowy soli potasowo-magnezowych na obszarze przed-sudeckim w południowo-zachodniej Polsce, który zasadnie może być uznany za „polskie zagłębie potasowe”. Obszar ten, po lepszym rozpoznaniu geologicznym i udokumentowaniu zasobów kopaliny nowych złóż soli K-Mg, może zaspokoić w pełni potrzeby krajowe.

2. WYSTĘPOWANIE SOLI POTASOWO-MAGNEZOWYCH W POLSCE

Sole potasowo-magnezowe występujące w Polsce, zbudowane są z dwu rodzajów asocjacji minerałów potasu i magnezu:

a) asocjacji minerałów chlorkowych jak sylwin (KCl), karnalit ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) i biszofit ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Minerale te są łatwo rozpuszczalne w wodzie (Łaszkiwicz, 1967; Manecki, 2019; Sonnenefeld, 1984);

b) asocjacji minerałów siarczanowych, obejmujących: polihalit ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Łaszkiwicz, 1967), kizeryt ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$; Łaszkiwicz, 1967) i langbeinit ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4$; Łaszkiwicz, 1967), rzadziej występują: bledyt ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; Łaszkiwicz, 1967), heksahydrat ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; Łaszkiwicz, 1967), leonit ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; Łaszkiwicz, 1967), leweit ($2\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; Łaszkiwicz, 1967) i leonhardtyt ($\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; Łaszkiwicz, 1967; starkeit wg Manecki, 2019). Minerale te są trudno rozpuszczalne w wodzie (Łaszkiwicz, 1967; Manecki, 2019; Sonnenefeld, 1984).

1. INTRODUCTION

Potassium-magnesium salts (K-Mg) are used mainly as fertilisers, in the proportion of up to 90% of the total production output, in agriculture and horticulture to improve crop effectiveness. Such fertilisers contain mainly chloride and sulphate potassium salts, while in the case of the sulphate K-Mg salts, polyhalites are especially valuable. Besides, such salts are also used in chemical and cosmetic products (e.g. in creams, perfumes, emulsions, lotions, or bath salts), as well as by glass, leather, tanning, or pyrotechnical works. Such salts are also used for medicinal purposes, in the treatment of skin diseases, or as dietary supplements providing microelements.

The Russian invasion of Ukraine has essentially changed the geopolitical system of Europe, restricting the availability of inexpensive potassium-magnesium salts (K-Mg) imported from Belarus and Russia. Despite possession of documented resources of the minerals in question, Poland has not been mining such salts. Currently, there is a growing interest in the possible extraction of the potassium-magnesium salts, as well as in the regions of their occurrence (e.g. Czapowski 2017; Czapowski, Bukowski 2013, 2015; Czapowski et al. 2009, 2015; Mikulski et al. 2015; Szamałek et al. 2020).

The present study indicates a high potential of the potassium-magnesium salt deposits on the Fore-Sudetic Monocline of south-western Poland that can be recognized as the Polish Potash District. Upon better geological research and obtaining improved documentation of the new K-Mg salt deposits, salt extraction could fully cover the local demand.

2. DISTRIBUTION OF POTASSIUM-MAGNESIUM SALTS IN POLAND

The Polish potassium-magnesium salt deposits represent two types of mineral potassium and magnesium associations:

a) Associations of such chloride minerals as sylvin (KCl), carnallite ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), and bischofite ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Those minerals are easy to dissolve in water (Łaszkiwicz 1967; Manecki 2019; Sonnenefeld 1984).

b) Associations of sulphate minerals, including polyhalite ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Łaszkiwicz 1967), kieserite ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$; Łaszkiwicz 1967), and langbeinite ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4$; Łaszkiwicz 1967), as well as rarely occurring bloedite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; Łaszkiwicz 1967), hexahydrate ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; Łaszkiwicz 1967), leonite ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; Łaszkiwicz 1967), loeweite ($2\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; Łaszkiwicz 1967), and leonhardtite ($\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; Łaszkiwicz 1967), or starkeyite (Manecki 2019). Those minerals are hard to dissolve in water (Łaszkiwicz 1967; Manecki 2019; Sonnenefeld 1984).

W obu tych asocjacjach mineralnych może się też pojawiać uwodniona sól siarczanowo-chlorkowa – kainit ($\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; Łaszkiwicz, 1967).

Na obszarze Polski sole potasowo-magnezowe występują jedynie w obrębie utworów ewaporatowych górnego permu (Ryc. 1) i tworzą wydzielenia litologiczne, określane jako jednostki litostratygraficzne w randze formacji. Rangę tę uzasadniają: odmienna litologia od skał otaczających, łatwość wyznaczenia granic tych wydzieleni zarówno w obserwacjach makroskopowych jak i w zapisach geofizycznych (karotaże) oraz znaczące rozprzestrzenienie (w skali regionalnej).

Wyróżniono trzy formacje soli K-Mg, stanowiące odpowiednik analogicznych jednostek z basenu permskiego na obszarze Niemiec (np. Bornemann i in., 2008; Braitsch, 1971; Kozur, 1994; Paul i in., 2018; Peryt i in., 2010; Richter-Bernburg, 1955, 1984) i w wersji polskiej od dziesięcioleci stosowane dla utworów cechsztynu na terenie naszego kraju (np. Poborski, 1970; Wagner, 1981, 1986, 1987, 1991, 1995; Wagner, Peryt, 1988; Wagner i in., 1978). Zatem zasadne jest utrzymanie utrwalonych już nazw tych wydzieleni a nie kreowanie nowych nazw własnych zgodnie z wymogami polskiej terminologii stratygraficznej (Racki, Narkiewicz, 2006). Sole K-Mg tworzą pokłady w obrębie kompleksów soli kamiennych kolejnych trzech cyklotemów polskiego cechsztynu (np. Wagner, 1995). W sukcesji cyklotemu PZ1 (Werra) formacja najstarszej soli potasowej (K1) dzieli kompleks najstarszej soli kamiennej (Na1) na tzw. najstarszą sól kamienną dolną (Na1d) i najstarszą sól kamienną górną (Na1g). Podobnie jest w przypadku utworów chlorkowych cyklotemu PZ3 (Leine), gdzie pokład młodszej soli potasowej (K3) rozdziela kompleks młodszej soli kamiennej (Na3) na dwie części: młodszą sól kamienną dolną (Na3d) i młodszą sól kamienną górną (Na3g). Sukcesja utworów chlorkowych cyklotemu PZ2 (Stassfurt) obejmuje kolejno: skały starszej soli kamiennej (Na2), starszej soli potasowej (K2) i starszą sól kamienną kryjącą (Na2r).

Najstarsze utwory potasonośne cechsztynu to **formacja najstarszej soli potasowej** (K1) cyklotemu PZ1 (Tab. 1), której występowanie udokumentowano jedynie na Pomorzu Gdańskim i NW części Warmii w północnej Polsce (Ryc. 1). Formacji tej odpowiadają 2 pokłady potasonośne: Thüringen i Hessen z obszaru Niemiec (Braitsch, 1971; Peryt i in., 2010). Na Pomorzu Gdańskim utwory te przewiercono 3 otworami w rejonie Chłapowo-Władysławowo-Chałupy i jednym otworem w okolicach Lisewa (Mikulski i in., 2015). Miąższość tych utworów zmienia się od 2,7 m do 25,1 m, główne minerały to karnalit, halit i jako domieszki anhydryt i polihalit (np. Pasieczna, 1987; Stępniewski, 1973), zaś udział potasu wynosi 0,19-2,49% i magnezu - 0,06-1,49% (Werner, 1979). Z kolei na terenie Warmii w rejonie Lidzbarka Warmińskiego na utwory te natrafiono dotychczas w 3 otworach wiertniczych, a ich miąższość zmienia się od 6 m do 26 m (Cza-

Hydrated sulphate-chloride salt may also occur in both types of the associations, in the form of kainite ($\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; Łaszkiwicz 1967).

Potassium-magnesium salts occur in Poland only within the Upper Permian evaporitic formations (Fig. 1). They create the lithologic subdivisions determined to be lithostratigraphic units, equivalent to formations. Such ranking is justified by the following: different lithology of surrounding rocks, ease of boundary determination of the subdivisions (units) under both macroscopic observations and geophysical records (carottage or well logging), as well as significant spread of such rocks on a regional scale.

Three K-Mg salt formations have been distinguished. They correspond to analogous units of the Permian Basin occurring in Germany (e.g. Bornemann et al. 2008; Braitsch 1971; Kozur 1994; Paul et al. 2018; Peryt et al. 2010; Richter-Bernburg 1955, 1984). The units of the Polish Zechstein succession have been identified strictly with the German analogs for a number of years (e.g. Poborski 1970; Wagner 1981, 1986, 1987, 1991, 1995; Wagner, Peryt 1988; Wagner et al. 1978). Therefore, it is justified to maintain the traditional terminology of the subdivisions in question, without creating new terms, in accordance with the requirements of the Polish stratigraphic terminology (Racki, Narkiewicz 2006).

K-Mg salts are found in the deposits, within the rock salt complexes of the three subsequent cyclothems of the Polish Zechstein (e.g. Wagner 1995). In the succession of cyclothem PZ1 (Werra), the oldest potash formation (K1) divides the Oldest Halite (Na1) complex into the so-called Lower Oldest Halite (Na1d) and Upper Oldest Halite (Na1g). It is similar in the case of the chloride formations of cyclothem PZ3 (Leine) where the seam of the Younger Potash (K3) divides the Younger Halite (Na3) complex into two sections: lower (Na3d) and upper (Na3g) Younger Halite. The succession of chloride formations of cyclothem PZ2 (Stassfurt) entails the following, in sequence: the rocks of the Older Halite (Na2) and of the Older Potash (K2), as well as the Screening Older Halite (Na2r).

The oldest Zechstein potash-bearing deposits include the **formations of the Oldest Potash** (K1) of cyclothem PZ1 (Table 1) whose occurrence has been documented only in the Gdańsk Pomerania Region and the NW part of the Warmia Region in northern Poland (Fig. 1). Those formations correspond to two potash-bearing seams of Thüringen and Hessen in Germany (Braitsch 1971; Peryt et al. 2010). In the Gdańsk Pomerania Region, the formation under discussion was drilled through, with three boreholes, in the area of Chłapowo-Władysławowo-Chałupy and with one borehole near Lisewo (Mikulski et al. 2015). The thickness of this formation was changing from 2.7 m to 25.1 m. The main minerals included carnallite and halite, with the admixtures of anhydrite and polyhalite (e.g. Pasieczna 1987; Stępniewski 1973), and the

powski, Bukowski, 2015; Czapowski i in., 2015; Mikulski i in., 2015). Brak jednak danych o ich składzie mineralnym i chemicznym..

Wystąpienia soli K-Mg z terenu Warmii stanowią zapewne kontynuację środkowej części górnopermskiej swity (formacji) pregolskiej (Tab. 1) z pobliskiego obszaru kaliningradzkiego (Lukjanowa i in., 2011), gdzie pokład soli K-Mg miąższości od 30 m do 37 m składa się z przewarstwień soli kamiennej i soli K-Mg zawierających sylwin, karnalit, kizeryt, polihalit i kainit. Na udokumentowanym obszarze Niwienskoje udział potasu wynosi 3,41-11,40 % (średnio – 7,42 %), magnezu – 1,06-3,49% (średnio 2,46 %) zaś średnia zawartość K_2O to 9,54 % i MgO – 4,08 % (*op. cit.*). Utwory potasonośne cyklotemu PZ2 cechsztynu budują w Polsce **formację starszej soli potasowej (K2)** (Tab. 1), występującą na znacznej części obszaru basenu ewaporatowego, szczególnie w jego części osiowej (np. Czapowski, 1995; Czapowski i in., 1991; Tomassi-Morawiec i in., 2004). Jej odpowiednikiem na terenie Niemiec jest pokład Stassfurt. Wyróżniona formacja starszej soli potasowej może lokalnie – np. wysady solne Góra, Kłodawa czy Mogilno – obejmować także trudne do odróżnienia najwyższe partie podścielających starszych osadów, tzw. warstw przejściowych Na_2+K_2 (np. Czapowski i in., 2012, 2022a, b i c). Zarejestrowana pozorna miąższość formacji jest zmienna, od kilkudziesięciu cm do ponad 90 m, Czapowski i in., 2012, 2022b).

potassium and magnesium contents of 0.19–2.49% and 0.06–1.49%, respectively (Werner 1979). On the area of Lidzbark Warmiński of the Warmia (Varmia) Region, such formations was identified in three boreholes. The seam thickness was changing from 6 to 26 m (Czapowski, Bukowski 2015; Czapowski et al. 2015; Mikulski et al. 2015). However, mineral or chemical contents are not available.

The occurrence of K-Mg salts in the Warmia Region is probably a continuation of the middle part of the Upper Permian Pregola Formation (Table 1) of the neighbouring Kaliningrad Region (Lukjanowa et al. 2011) where the K-Mg salt seam, with the thickness of 30–37 m, is composed of the rock salt and K-Mg interbeds, containing sylvine, carnallite, kieserite, polyhalite, and kainite. Regarding the documented area of Niwienskoye in the Kaliningrad Region, the proportions of components are the following: potassium 3.41–11.40% (or 7.42% on average) and magnesium: 1.06–3.49% (2.46% on average), with the average K_2O content of 9.54% and MgO 4.08%, respectively (*op. cit.*). The potash-bearing formations of Zechstein's cyclothem PZ2 are composed in Poland of the **Older Potash Formation (K2)** (Table 1), occurring on a significant portion of the evaporitic basin, especially in its axial part (e.g. Czapowski 1995; Czapowski et al. 1991; Tomassi-Morawiec et al. 2004). This formation corresponds to the Stassfurt seam in Germany. The identified Older Potash Formation can entail locally e.g. the salt domes of Góra,

POTASONOŚNE WYDZIELENIA LITOSTRATYGRAFICZNE CECHSZTYNU (GÓRNY PERM) W POŁUDNIOWYM BASENIE PERMSKIM							
<i>Potash-bearing lithostratigraphic units of Zechstein (Upper Permian) in the Southern Permian Basin</i>							
Polska <i>Poland</i>		Niemcy <i>Germany</i>		Anglia <i>England</i>		Rosja <i>obszar kaliningradzki</i> <i>Russia, Kaliningrad area</i>	
Wydzielenie <i>Unit</i>	Cyklotem <i>Cyclothem</i>	Wydzielenie <i>Unit</i>	Cyklotem <i>Cyclothem</i>	Wydzielenie <i>Unit</i>	Cyklotem <i>Cyclothem</i>	Wydzielenie/Swita <i>Unit</i>	Seria/Cyklotem <i>Series/Cyclothem</i>
formacja młodszej soli potasowej (K3)* <i>Younger Potash Formation</i>	PZ3	pokład Riedel <i>Kaliflöz/seam</i> pokład Ronnenberg <i>Kaliflöz/seam</i>	Z3	ogniwo Boulby <i>Member</i>	Z3	-	lejnewska seria <i>Lejniewska Series</i>
formacja starszej soli potasowej (K2)* <i>Older Potash Formation</i>	PZ2	pokład Stassfurt <i>Kaliflöz/seam</i>	Z2	-	Z2	-	stasfurcka seria <i>Stassfurt Series</i>
formacja najstarszej soli potasowej (K1)* <i>Oldest Potash Formation</i>	PZ1	pokład Hessen <i>Kaliflöz/seam</i> pokład Thüringen <i>Kaliflöz/seam</i>	Z1	-	Z1	środkowa część swity pregolskiej <i>middle part of Pregola Formation</i>	waraska seria <i>Warask Series</i>

Tabela 1. Litostratygrafia utworów potasonośnych cyklotemów Z1, Z2 i Z3 cechsztynu w południowym basenie permskim (wg Braitsch, 1971; Lukjanowa i in., 2011; Peryt i in., 2010; Wagner, 1995 - zmienione)

Table 1. Lithostratigraphy of potash-bearing deposits of the Zechstein Z1, Z2 and Z3 cyclothem in the Southern Permian Basin (after Braitsch, 1971; Lukjanowa et al., 2011; Peryt et al., 2010; Wagner, 1995 – modified)

* wydzielenie nieformalne/ *nonformal unit*



Ryc. 1. Występowanie skał solnych górnego permu, struktur solnych i udokumentowanych złóż i wystąpień soli potasowo-magnezowych w Polsce (Czapowski i in., 2022a, zmienione)

Fig. 1. Recent occurrence of Upper Permian salt rocks in Poland, with position of salt structures and documented potash deposits (after Czapowski et al., 2022a, modified)

Najmłodszy kompleks utworów potasonośnych w Polsce to **formacja młodszej soli potasowej (K3)** cyklotemu PZ3 cechsztynu (Tab.1), mająca swój odpowiednik na obszarze Niemiec w postaci pokładów Ronnenberg i Riedel zaś na terenie Anglii – ogniwa Boulby. Zajmuje ona nieco mniejszy obszar w obrębie ewaporatowego basenu cechsztyńskiego w Polsce, koncentruje się głównie w jego części osiowej, a jej zasięg jest bardziej zróżnicowany niż formacji starszej soli kamiennej (np. Czapowski, 1993, 1995; Tomassi-Morawiec i in., 2004). Lokalnie, np. w wysadach solnych Góry, Kłodawy czy Mogilna, w skład formacji młodszej soli potasowej wchodzi także - trudne czasem do odróżnienia - najwyższe partie podścielających starszych osadów, tzw. warstw przejściowych Na₃+K₃ (np. Czapowski i in., 2012, 2022a, b, c). Zrejestrowana miąższość formacji jest zmienna, od kilkudziesięciu cm do ponad 120 m w obrębie wysadów solnych, przeciętnie nie przekracza 30 m (Czapowski i in., 2012, 2022b).

Skład mineralny utworów młodszej soli potasowej obejmuje głównie: karnalit, sylwin, halit, biszofit, anhydryt, kainit, kizeryt, langbajnit i polihalit, występują też domieszki substancji ilastej i bituminów (np. Charysz, 1973; Czapowski

Kłodawa or Mogilno, as well as hard to identify highest sections of underlying older deposits, or the so-called Transitional Beds Na₂+K₂ (e.g. Czapowski et al. 2012, 2022a, b, and c). The recorded apparent formation thickness fluctuates from several dozen to more than 90 m (Czapowski et al. 2012, 2022b).

The youngest complex of potash-bearing formation in Poland includes the **Younger Potash Formation (K3)** of Zechstein's cyclothem PZ3 (Table 1), corresponding to the German Ronnenberg and Riedel seams and the English Boulby Member. The complex occupies a bit smaller area, within the evaporitic Zechstein Basin in Poland, concentrating mainly in its axial part, and its range is more diverse than that of the Older Halite Formation (e.g. Czapowski 1993, 1995; Tomassi-Morawiec et al. 2004). Locally, e.g. in the Góra, Kłodawa, or Mogilno salt domes, the Younger Potash Formation also includes the highest parts of underlying older sediments, or the so-called Transitional Beds Na₃+K₃ that may be hard to identify (e.g. Czapowski et al. 2012, 2022a, b, and c). The registered thickness of the formation is changeable, ranging from several dozens of centimetres to more than 120 m,

i in., 2012, 2022c z literaturą; Dawidowski, 1976; Hanczke, 1969; Podemski, 1972a, b; Werner, 1959, 1962; Werner i in. 1960). W wysadzie solnym Kłodawy średnia zawartość potasu w tych utworach wynosi 1,71 % zaś magnezu – 1,46 % (Czapowski i in., 2012). Na obszarze przedSUDECKIM udział K_2O zmienia się od 0,14 % do 27,18 % (średnia 3-9%) i $MgSO_4$ – od 0,2 % do 49 % (Czapowski i in., 2012; Werner, Dawidowski, 1976).

3. SOLE POTASOWO-MAGNEZOWE NA OBSZARZE PRZEDSUDECKIM

Intensywne badania prowadzone w latach 60. i 70. ubiegłego wieku w Polsce w poszukiwaniu złóż soli potasowo-magnezowych (np. Poborski, 1960, 1961, 1964, 1965, 1969, 1984; Poborski i in., 1956; Podemski, 1964, 1966, 1970, 1971, 1972a, b, 1973a, i b, 1974; Werner, 1959, 1962, 1969, 1971, 1972a, b, 1973, 1974; Werner, Dawidowski, 1976; Werner, Podemski, 1971; Werner i in., 1967) potwierdziły występowanie tych soli w utworach permu, i zakończyły się udokumentowaniem pięciu złóż: czterech złóż soli siarczanowych (polihalit) w rejonie Zatoki Gdańskiej i wspomnianego złoża soli typu chlorkowego w wysadzie solnym Kłodawy (Ryc. 1).

Najwięcej wystąpień soli K-Mg stwierdzono dotychczas otworami wiertniczymi na obszarze przedSUDECKIM w południowo-zachodniej Polsce (Ryc. 1). Utwory potasonośne, których obecność opisano już w latach 50.-70. ubiegłego wieku (np. Garlicki, Szybist, 1986; Kijewski, 1988; Podemski, 1964, 1966, 1971, 1972a, b, 1973a, b, 1974; Sokołowski, 1967; Tomaszewski, 1962; Werner, Dawidowski, 1976; Werner, Podemski, 1971; Zwierzycki, 1951) występują tam w pokładach solnych cyklotemów PZ2 i PZ3 cechsztynu. Obecny południowy zasięg tych soli jest odmienny dla każdego cyklotemu (Czapowski, 1995, 2017; Mikulski i in., 2015), natomiast ku północy rozprzestrzeniają się w całym basenie ewaporatowym cechsztynu, występując na głębokościach do ponad kilku km w jego centrum (np. Wagner, 1995). Udokumentowane wystąpienia soli K-Mg na obszarze przedSUDECKIM nie doczekały się pełnych dokumentacji złożowych i obliczenia zasobów. Jedyne szacunki zasobów wykonano dla pojedynczych otworów wiertniczych w rejonie Nowej Soli. W otworze Nowa Sól Geo-1 (Paduszyński J., 1961) oszacowano zasoby tlenu potasu (K_2O) w kategorii C_2 w obrębie przewierconej formacji starszej soli potasowej o miąższości 24 m (w otoczeniu 1 km² od odwiertu) w ilości 1 814 400 Mg dla zawartości K_2O równej 3,6% i 3 225 600 Mg dla zawartości K_2O wynoszącej 6,4%.

Wyniki prac rozpoznawczych posłużyły w następnych latach kilkukrotnemu oszacowaniu potencjalnych zasobów soli K-Mg w SW Polsce (Bąk, Przeniosło, 1993; Wołkowicz i in., 2011; Mikulski i in., 2015; Szamałek i in., 2020). Wymienione szacunki obejmowały określenie wielkości zasobów przewi-

within the salt domes, and it does not exceed 30 m on average (Czapowski et al. 2012, 2022b).

The mineral composition of the Younger Potash Formation includes mainly the following: carnallite, sylvine, halite, bischofite, anhydrite, kainite, kieserite, langbeinite, and polyhalite, with admixtures of clay matter and bitumen (e.g. Charysz 1973; Czapowski et al. 2012, 2022c (with literature); Dawidowski 1976; Hanczke 1969; Podemski 1972a and b; Werner 1959, 1962; Werner et al. 1960). In the Kłodawa salt dome, the average potassium content amounts to 1.71% and that of magnesium to 1.46% in that formation (Czapowski et al. 2012). In the Fore-Sudetic Area, the proportion of K_2O is changing from 0.14% to 27.18% (3–9% on average) and that of $MgSO_4$ from 0.2% to 49% (Czapowski et al. 2012; Werner, Dawidowski 1976).

3. POTASSIUM-MAGNESIUM SALTS ON THE FORE-SUDETIC AREA

Extensive potassium-magnesium salt prospecting works were conducted in Poland in the 1960's and 1970's (e.g. Poborski 1960, 1961, 1964, 1965, 1969, 1984; Poborski et al. 1956; Podemski 1964, 1966, 1970, 1971, 1972a and b, 1973a and b, 1974; Werner 1959, 1962, 1969, 1971, 1972a and b, 1973, 1974; Werner, Dawidowski 1976; Werner, Podemski 1971; Werner et al. 1967) confirmed the occurrence of such salts in the Permian formations, and the relevant works were concluded by with five deposits documented: four containing sulphate salts (polyhalite) in the Gdańsk Bay area and one containing chloride salt deposit in the Kłodawa salt dome (Fig. 1).

The largest K-Mg salt deposits were identified by drillings on the Fore-Sudetic Area, in south-western Poland (Fig. 1). The potash-bearing formations were recognized in the period between the 1950's to 1970's (e.g. Garlicki, Szybist 1986; Kijewski 1988; Podemski 1964, 1966, 1971, 1972a and b, 1973a and b, 1974; Sokołowski 1967; Tomaszewski 1962; Werner, Dawidowski 1976; Werner, Podemski 1971; Zwierzycki 1951). Those formations occur within the salt deposits of Zechstein's cyclothems PZ2 and PZ3. The current southern extents of those salts are different for each cyclothem (Czapowski 1995, 2017; Mikulski et al. 2015), while to the north these formations cover the whole Zechstein's evaporitic basin, and they locate at the depth of up to several kilometres in the basin center (e.g. Wagner 1995). The K-Mg salt deposits of the Fore-Sudetic Area have not been fully documented or calculated.

Some resource estimations were provided for specific boreholes situated nearby Nowa Sól. In the borehole Nowa Sól Geo-1 (Paduszyński J. 1961), the estimation of K_2O , category C_2 , amounted to 1,814,400 Mg of K_2O 3.6% and 3,225,600 Mg of K_2O 6.4%, within the drilled through Older Potash Formation, with the thickness of 24 m (around 1 km² from the borehole).

dywanych soli potasowo-magnezowych w Polsce do głębokości 2 km przyjmując jako minimalną miąższość pokładu soli 2 m. Brak systematycznego oprobowania geochemicznego pokładów na całym obszarze poddanym oszacowaniu wyeliminował kryterium geochemiczne (zawartość K_2O min. 8%), dlatego podane wielkości zasobów przewidywanych określają ilość skały potasonośnej, a nie ilość pożądanego potasu i magnezu lub ich tlenków.

Zasoby przewidywane podzielono na zasoby prognostyczne i perspektywiczne. *Zasobami prognostycznymi* określono zasoby obliczone do głębokości 1,5 km zaś zasoby występujące w przedziale 1,5 km do 2 km przypisano *zasobom perspektywnym* (np. Czapowski, Bukowski, 2015; Czapowski i in., 2015; Mikulski i in., 2015; Szamałek i in., 2020). Zasoby obliczono mnożąc okonturowaną (w oparciu o pozytywne otwory wiertnicze) powierzchnię wystąpień solnych przez uśrednioną miąższość pokładu/serii solnej (dane z otworów wiertniczych) i wartość gęstości omawianych soli przyjętą jako $2,1 \text{ Mg/m}^3$. W przypadku obszarów ze znaczącą rolą tektoniki – jak obszar przedsudecki – obliczone zasoby pomniejszono do 30 % (tzw. współczynnik komplikacji budowy geologicznej o wartości 0,3).

Analiza udostępnionych danych z otworów wiertniczych, wykonanych po 2014 roku i reinterpretacji zapisów karotażowych ze starszych odwiertów pozwoliła uaktualnić wiedzę o obszarach perspektywicznych wystąpień soli K-Mg na obszarze przedsudeckim w porównaniu ze stanem wcześniejszym (Szamałek i in., 2020). Przedstawiono nowe szacunki powierzchni i zasobów wcześniej wyróżnionych obszarów i wskazano nowe obszary.

3.1. Formacja starszej soli potasowej (K2) - obszary perspektywiczne i zasoby przewidywane

Na obszarze przedsudeckim formacja starszej soli potasowej (K2) została przewiercona licznymi otworami, wykonanymi od rejonu perykliny Żar na zachodzie (SW skraj monokliny przedsudeckiej) po rejon Nowej Soli na wschodzie. Strop formacji (pokładu) występuje na głębokości od 975 m w części SW i S monokliny do 1700-1925 m w części północnej, jej stwierdzona miąższość jest bardzo zróżnicowana, od kilku do 30 m (Mikulski i in., 2015; Podemski, 1966, 1972a, b, 1975). Pokład soli K-Mg tworzą przemienne występujące w profilu warstwy (grubości 0,1-1,0 m) soli kamiennej, soli kamiennej z sylwinem i tzw. soli twardej (skład: halit, anhydryt, polihalit, kizeryt – Podemski, 1966, 1972a, b, 1975). Udział K_2O w pokładzie zmienia się od 1% do 15% (w otworze Wężyska 2 odnotowano udział K_2O w ilości 25%), wartość średniej ważonej mieści się w przedziale 0,5-9,5%, wartość średniej arytmetycznej 1-9% (w partiach bogatszych wynosi ona 4-9% - Mikulski i in., 2015; Podemski, 1975).

Wymienione wcześniej kryteria pozwoliły wyróżnić siedem obszarów perspektywicznych (OP) wystąpień soli

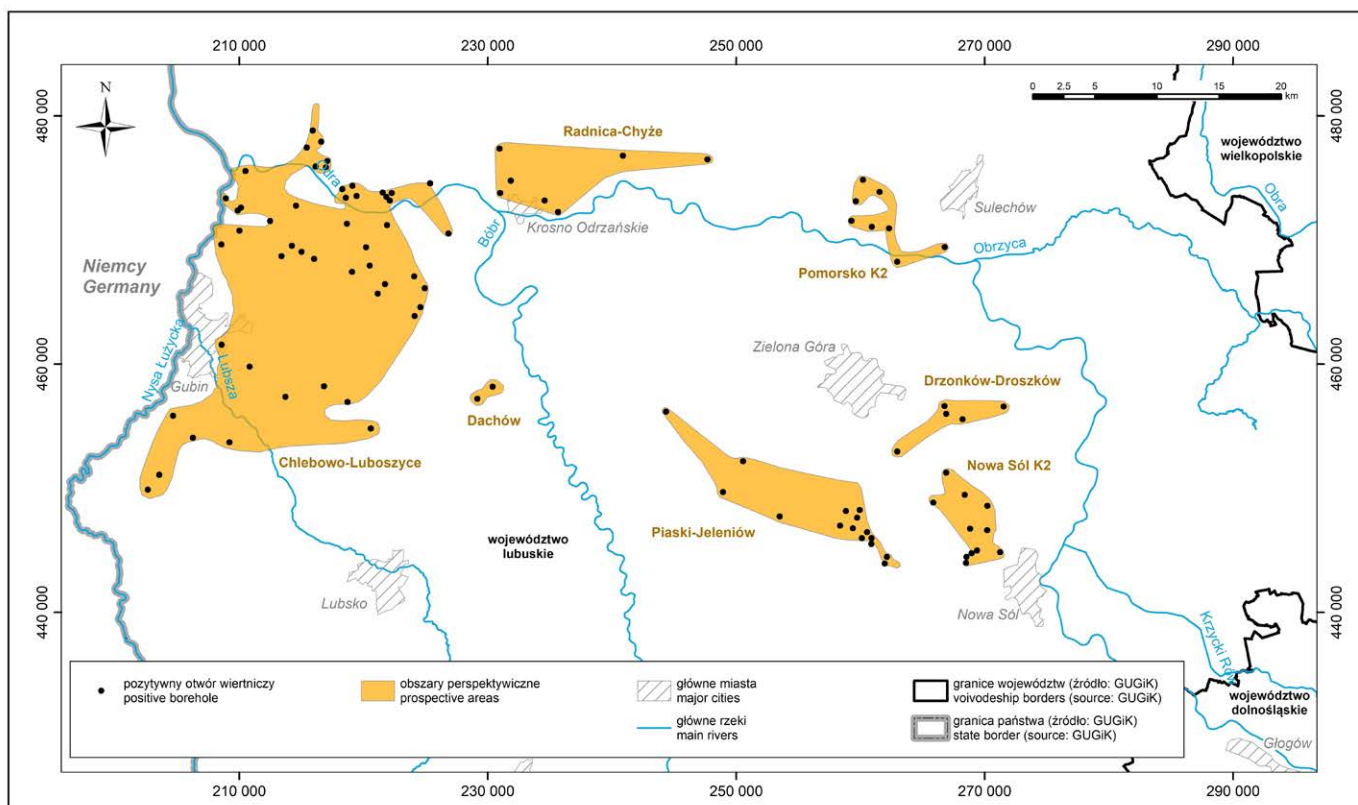
The results of the prospecting works were used in several estimations of potential K-Mg salt resources of SW Poland in the subsequent years (Bąk, Przeniosło 1993; Wołkiewicz et al. 2011; Mikulski et al. 2015; Szamałek et al. 2020). Those estimations involved the determination of the prospective potassium-magnesium salt quantities down to 2 km, assuming the minimum salt seam thickness of 2 m. Lack of regular geochemical sampling of the salt deposits situated on the area subjected to estimations omitted the geochemical criterion of the K_2O content of min. 8%. For that reason, the resource estimations specified rather the quantities of potash-bearing rocks and not the quantities of potassium and magnesium, or their oxides.

The predicted resources have been divided into prognostic and prospective ones. The *prognostic resources* are those calculated down to the depth of 1.5 km, while the *prospective* ones occur from 1.5 km down to 2 km (e.g. Czapowski, Bukowski 2015; Czapowski et al. 2015; Mikulski et al. 2015; Szamałek et al. 2020). The resources were calculated by multiplying the contoured surface areas of salt occurrence (based on positive boreholes) times the averaged salt seam/series thickness (data from the boreholes) and the density of the specific salts, assumed to be 2.1 Mg/m^3 . In the cases of the areas with significant tectonic effects, typical for the Fore-Sudetic Area, the calculated values were reduced down to 30%, in respect of the so-called geological structure complexity factor of 0.3.

Our analysis of the data from the boreholes drilled after 2014 and our reinterpretation of the logging records from older boreholes allowed us to update our knowledge of the prospective occurrence of K-Mg salts on the Fore-Sudetic Area, in comparison to the previous estimates (Szamałek et al. 2020). Presently, estimations of new surface areas and of previously identified resources have been identified and presented.

3.1. Formation of the Older Potash (K2): prospective areas and predicted resources

On the Fore-Sudetic Area, the formation of the Older Potash (K2) was drilled through with a number of boreholes located from the Żary Pericline in the west (SW edge of the Fore-Sudetic Monocline) to the Nowa Sól area in the east. The formation top (or salt seam) occurs at the depth from 975 m SW and S of the Monocline to 1,700–1,925 m in its northern part. Its thickness was found to be much diverse, reaching from several to 30 m (Mikulski et al. 2015; Podemski 1966, 1972a and b, 1975). The K-Mg salt bed is created by intermittent rock salt beds (0.1–1.0 m thick), with sylvine, and the layers of so-called hard salt composed of halite, anhydrite, polyhalite, and kieserite (Podemski 1966, 1972a and b, 1975). The K_2O content in the potash seam is changing from 1 to 15% (in the Wężyska 2 borehole, the K_2O content is 25%), while the weighted average value ranges from 0.5 to 9.5%, and the arithmetic average from 1 to 9%, while in the cases of



Ryc. 2. Obszary perspektywiczne wystąpień soli K-Mg formacji starszej soli potasowej (K2) na obszarze przed-sudeckim
 Fig. 2. Prospective areas with potash-magnesium salt deposits of the Older Potash Formation (K2) in the Fore-Sudetic area

Tabela 2. Charakterystyka obszarów perspektywicznych wystąpień soli potasowo-magnezowych formacji starszej soli potasowej (K2) na obszarze przed-sudeckim

Table 2. Characteristics of prospective areas with potash-magnesium salt deposits of the Older Potash Formation (K2) in the Fore-Sudetic area

NAZWA OBSZARU <i>Prospective area name</i>	POWIERZCHNIA (km ²) <i>Area</i>	ZASOBY PRZEWIDYWANE (mln Mg) <i>Predicted resources</i>	STOPIEŃ ROZPOZNANIA GEOLOGICZNEGO (ilość odwiertów) <i>Geological recognition (number of wells)</i>	PARAMETRY POKŁADU POTASONOSNEGO <i>Parameters of potash seam</i>		STAN WIEDZY O MINERALIZACJI K i Mg <i>Data on K and Mg mineralization</i>
				głębokość spągu (od-do/średnia) (m) <i>bottom depth (min-max/average)</i>	miąższość (od-do/średnia) (m) <i>thickness (min-max/average)</i>	
Chlebowo-Luboszyce	330,8	2 461,7	50	1026,5–1988,0/ 1583,22	2,0–92,0 / 11,81	przypuszczalnie halit+sylvin oraz halit+anhydryt+polihalit, średnia zawartość K ₂ O= 1–9% probable halite+sylvine and halite+anhydrite +polyhalite, average K ₂ O content = 1–9%
Dachów	2,9	6,4	2	960,0-1073,0/1016,5	3,0-4,0/3,5	
Drzonków-Droszków	14,2	91,8	5	1506,5-1800,5/ 1669,6	6,0-16,5/ 10,3	
Nowa Sól K2	23,1	131,6	11	1032,5-1477,5/1248,22	3,0-18,5/ 9,04	
Piaski-Jeleniów	62,0	395,0	15	940,5-1295,0/ 1124,38	3,5-24,4/ 10,1	
Pomorsko K2	15,8	102,4	8	1840,5-1985,0/ 1914,44	5,0-16,5/ 10,25	
Radnica-Chyże	5,2	54,45	7	1813,5-1960,0/ 1882,86	5,5-39,5/16,58	
Liczba obszarów <i>Number of areas</i>	Sumaryczna powierzchnia (km ²) <i>Total area</i>	Sumaryczne zasoby (mln Mg) <i>Total resources</i>	Sumaryczna liczba otworów <i>Total number of wells</i>	Szacowana ilość K₂O <i>Estimated amount of K₂O</i> (mln Mg)		
7	454,0	3 243,35	98	32,43		

K-Mg: OP Chlebowo-Luboszyce, OP Dachów, OP Drzonków-Droszków, OP Nowa Sól K2, OP Piaski-Jeleniów, OP Pomorsko K2 i OP Radnica-Chyże (Tab. 2; Ryc. 2). Są one wyznaczone w oparciu o tzw. otwory pozytywne, w których miąższość pokładu soli K-Mg nie jest mniejsza niż 2 m, zaś głębokość spągu pokładu nie przekracza 2 km.

Spąg pokładu starszej soli potasowej na wskazanych 7 obszarach perspektywicznych jest położony na głębokości od 940,5 m (OP Piaski-Jeleniów) do 1988,0 m (OP Chlebowo-Luboszyce), jego miąższość zmienia się od 2 m do 92 m (OP Chlebowo-Luboszyce; Tab. 2).

Łączna powierzchnia wyróżnionych 7 obszarów perspektywicznych wystąpień pokładu starszej soli potasowej (K2) na obszarze przedsudeckim, udokumentowanych 98 otworami wiertniczymi, wynosi 454 km², zaś zasoby przewidywane kopaliny oceniono na 3,2 mld Mg (Tab. 3). Szacunkowe zasoby K₂O wynoszą – przyjmując niską średnią zawartość tlenu potasu 1% – 32,43 mln Mg. Należy podkreślić różny stopień udokumentowania opisanych obszarów, przekładający się na ich powierzchnię i zasoby: od OP Chlebowo-Luboszyce, rozpoznanego 50 otworami, o powierzchni blisko 331 km² i zasobach 2,46 mld Mg po OP Dachów, udokumentowany 2 otworami, z powierzchnią blisko 3 km² i zasobami 6,4 mln Mg.

3.2. Formacja młodszej soli potasowej (K3) - obszary perspektywiczne i zasoby przewidywane

Przewiercony wieloma otworami pokład soli K-Mg przypisany formacji młodszej soli potasowej (K3) tworzy na obszarze przedsudeckim szereg izolowanych wystąpień, rozmieszczonych w pasie od Sulechowa na zachodzie po rejon Nowej Sól na wschodzie. Strop pokładu lokuje się na głębokości od 838 m w części SW i S obszaru do 1068 m w części północnej, jego miąższość jest bardzo zróżnicowana, od 1 m do >50 m w rejonie Ługi-Kondratowo (Mikulski i in., 2015; Podemski, 1972a, 1973a, 1974, 1975).

Pokład tworzą 2 strefy potasonośne, przedzielone kilkunastometrową serią soli kamiennej (*op. cit.*):

a) strefę dolną o miąższości do 6 m budują sole kamienne z domieszką anhydrytu i przewarstwieniami polihalitu, udział K₂O wynosi 1,0-4,5 %, MgSO₄ – 2,7-4,6 %, CaSO₄ – 3,6-9,9 %,

b) strefę górną o miąższości do 12 m tworzą sole z sylwinem, kizerytem i polihalitem, udział K₂O wynosi 1,0-6,0 %, MgSO₄ – 2,0-49,0 %, a CaSO₄ – do 0,5 %.

W całym pokładzie młodszej soli potasowej zawartość K₂O waha się od 1% do 15% (średnia arytmetyczna 3-9 %, średnia ważona 1,4-16,4 %), MgSO₄ od 2 % do 49 % oraz CaSO₄ od 0,09 % do 9,9 %. Udział NaCl w pokładzie wynosi od 18% do 97%, przeważnie 37-91 % (*op. cit.*).

W oparciu o tzw. pozytywne otwory wiertnicze wydzielono sześć obszarów perspektywicznych: OP Nowa Sól K3, OP

rich sections, this content ranges from 4 to 9% (Mikulski et al. 2015; Podemski 1975).

The criteria specified above allowed us to distinguish seven prospective areas (OP) of the K-Mg salt occurrence: OP Chlebowo-Luboszyce, OP Dachów, OP Drzonków-Droszków, OP Nowa Sól K2, OP Piaski-Jeleniów, OP Pomorsko K2, and OP Radnica-Chyże (Table 2; Fig. 2). The areas were determined on the basis of the so-called positive boreholes in which the K-Mg salt seam thickness is no less than 2 m, with the depth of the deposit bottom not exceeding 2 km.

The bottom of the Older Potash seam of the seven prospective areas are situated at the depths ranging from 940.5 m (OP Piaski-Jeleniów) to 1,988.0 m (OP Chlebowo-Luboszyce), with the seam thickness ranging from 2 to 92 m (OP Chlebowo-Luboszyce; Table 2).

The total surface area of the 7 prospective Older Potash (K2) occurrence on the Fore-Sudetic Area, documented by 98 boreholes, amounts to 454 km², while the predicted resources of the mineral is estimated at 3.2 billion Mg (Table 3). The estimated K₂O amount to 32.43 million Mg, assuming a low average potassium oxide content of 1%. We should emphasise here various degrees of documentation quality relating to the discussed areas, which drawback is reflected in estimated surface and resources: from OP Chlebowo-Luboszyce, with 50 boreholes, surface area of nearly 331 km², and 2.46 billion Mg to OP Dachów, with 2 boreholes, surface area of nearly 3 km², and 6.4 million Mg, respectively.

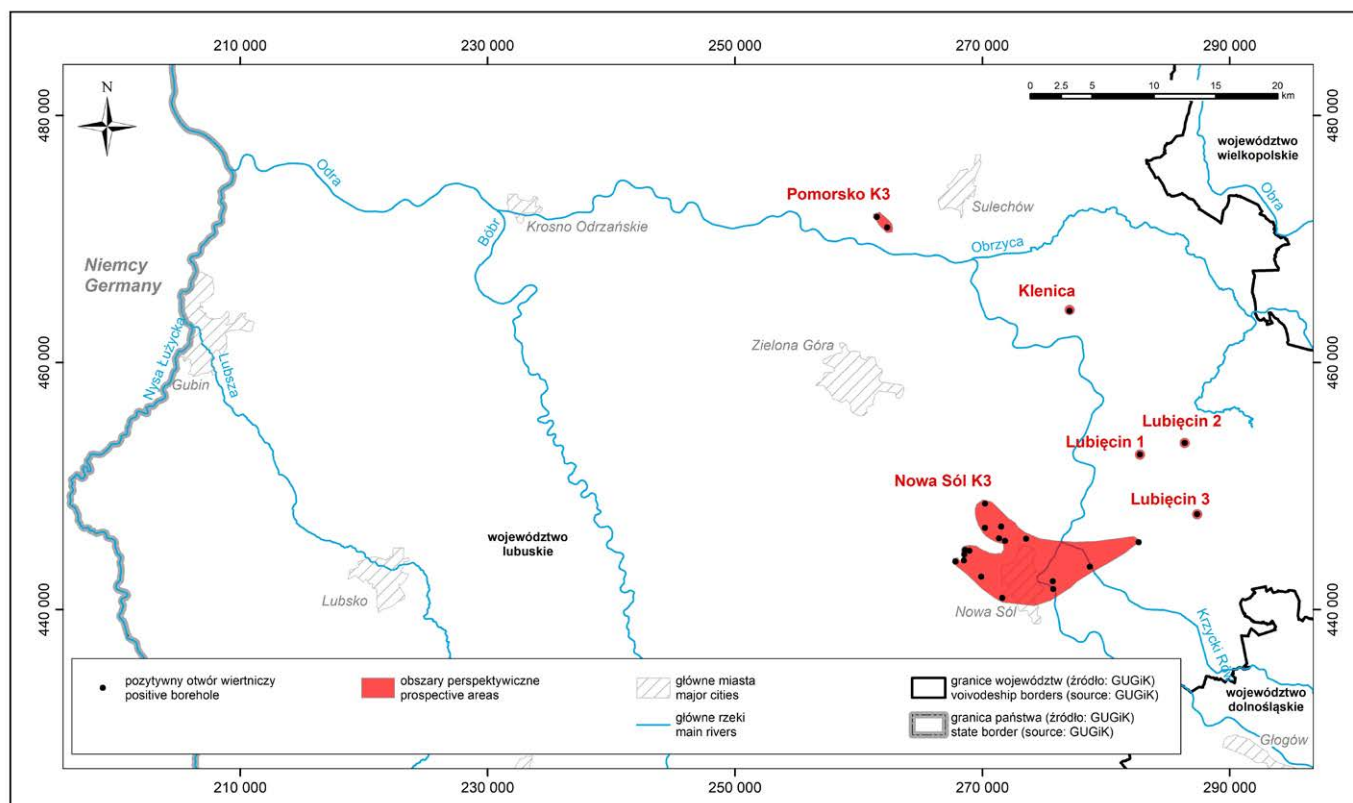
3.2. The younger potassium salt (K3) formation: prospective areas and predicted resources

The K-Mg salt seam, drilled through by a number of boreholes, assigned to the Younger Potash Formation (K3), is composed of many isolated occurrences on the Fore-Sudetic Area. They are distributed in the belt extending from Sulechów in the west to the Nowa Sól area in the east. The seam top is situated at the depth from 838 m in the SW and S to 1,068 m in the northern part, with diverse seam thicknesses ranging from 1 to >50 m in the Ługi-Kondratowo area (Mikulski et al. 2015; Podemski 1972a, 1973a, 1974, 1975). The seam is composed of two potash-bearing zones, separated by a rock salt series about a dozen metres thick (*op. cit.*), as follows:

a) lower potash zone, up to 6 m thick, with rock salts, anhydrite admixtures, and polyhalite interbedding; mineral contents: K₂O 1.0–4.5%, MgSO₄ 2.7–4.6%, and CaSO₄ 3.6–9.9%.

b) upper potash zone, up to 12 m thick, with salts containing sylvine, kieserite, and polyhalites; mineral contents: K₂O 1.0–6.0%, MgSO₄ 2.0–49.0%, and CaSO₄ up to 0.5%.

In the whole Younger Potash salt deposit, the K₂O content is ranging from 1% to 15% (mathematical average: 3–9%, weighted average: 1.4–16.4%); mineral contents: MgSO₄



Ryc. 3. Obszary perspektywiczne wystąpień soli K-Mg formacji młodszej soli potasowej (K3) na obszarze przedsudeckim
 Fig. 3. Prospective areas with potash-magnesium salt deposits of the Younger Potash Formation (K3) in the Fore-Sudetic area

NAZWA OBSZARU <i>Prospective area name</i>	POWIERZCHNIA (km ²) <i>Area</i>	ZASOBY PRZEWIDY- WANE (mln Mg) <i>Predicted resources</i>	STOPIEŃ ROZPOZNANIA GEOLOGICZNEGO (ilość odwiertów) <i>Geological recognition (number of wells)</i>	PARAMETRY POKLADU POTASONOŚNEGO <i>Parameters of potash seam</i>		STAN WIEDZY O MINERALIZACJI K i Mg <i>Data on K and Mg mineralization</i>
				głębokość spągu (od-do/średnia) (m) <i>bottom depth (min- max/average)</i>	miąższość (od-do/średnia) (m) <i>thickness (min- max/average)</i>	
Nowa Sól K3	57,4	265,58	17	980,0-1369,5/ 1098,79	2,0-50,8/ 7,35	Przypuszczalnie 2 aso- cjacje mineralne: górna = sylwin, kizeryt, polihalit (zawartość K ₂ O 1-16%); dolna = halit+anhydryt+polihalit (zawartość K ₂ O 1-4.5%) 2 mineral associations: upper = sylvine+ kieserite+polyhalite (K ₂ O content 1-16%); lower = halite+anhydrite+polyhalite (K ₂ O content 1-4.5%)
Pomorsko K3	1,4	14,3	2	1778,0-1832,0/ 1805,0	6,0-27,0/ 16,5	
Klenica	0,5	3,16	1	1750,0	10,0	
Lubięcin 1	0,5	3,16	1	1495,0	10,0	
Lubięcin 2	0,5	1,27	1	1544,0	4,0	
Lubięcin 3	0,5	1,27	1	1450,0	4,0	
Liczba obszarów <i>Number of areas</i>	Sumaryczna powierzchnia (km²) <i>Total area</i>	Sumaryczne zasoby (mln Mg) <i>Total resources</i>	Sumaryczna liczba otworów <i>Total number of wells</i>	Szacowana ilość K₂O <i>Estimated amount of K₂O</i> (mln Mg)		
6	60,8	288,79	23	2,89		

Tabela 3. Charakterystyka obszarów perspektywicznych wystąpień soli potasowo-magnezowych formacji młodszej soli potasowej (K3) na obszarze przedsudeckim

Table 3. Characteristics of prospective areas with potash-magnesium salt deposits of the Younger Potash Formation (K3) in the Fore-Sudetic area

Pomorsko K3, Klenica, Lubięcín 1, Lubięcín 2 i Lubięcín 3 (Tab. 4, Ryc. 3).

Spąg pokładu młodszej soli potasowej na wskazanych 6 obszarach perspektywicznych jest położony na głębokości od 980,0 m (OP Nowa Sól K3) do 1832,0 m (OP Pomorsko K3), jego miąższość zmienia od 2 m do 50,8 m (OP Nowa Sól K3; Tab. 3).

Łączna powierzchnia wyróżnionych 6 obszarów perspektywicznych wystąpień pokładu młodszej soli potasowej (K3) na obszarze przedsudeckim, udokumentowanych 23 otworami wiertniczymi, wynosi ponad 60 km² zaś zasoby przewidywane kopaliny oceniono na 288,8 mln Mg (Tab. 3). Szacunkowe zasoby K₂O wynoszą – przyjmując niską średnią zawartość tlenu potasu 1% – 2,89 mln Mg. Znaczący jest różny stopień udokumentowania opisanych obszarów, przekładający się na ich powierzchnię i zasoby: od OP Nowa Sól K3, rozpoznanego 17 otworami, o powierzchni ponad 57 km² i zasobach 265,6 mln Mg po obszary Klenica, Lubięcín 1, 2 i 3, udokumentowane pojedynczymi otworami, z powierzchnią 0,5 km² i zasobami 1,3-3,2 mln Mg.

Podsumowując, łączne zasoby kopaliny w obrębie 13 wskazanych obszarów perspektywicznych wystąpień pokładowych soli K-Mg, reprezentujących utwory formacji starszej i młodszej soli potasowej (K2 i K3) na terenie przedsudeckim, udokumentowanych 121 otworami wiertniczymi, oszacowano na 3,53 mld Mg, zaś ich sumaryczna powierzchnia wynosi 514,8 km². Łączną możliwą do pozyskania ilość K₂O z opisanych obszarów – przy przyjęciu niskiego średniego jego udziału w pokładzie potasonośnym wynoszącego 1% – oszacowano na 35,32 mln Mg

4. WNIOSKI

Nowe dane z wykonanych po 2014 r. otworów wiertniczych w SW Polsce oraz reinterpretacja profili karotazowych wcześniejszych odwiertów umożliwiły ponowne oszacowanie potencjału złożowego pokładowych wystąpień soli potasowo-magnezowych na obszarze przedsudeckim. Wytypowano 13 obszarów perspektywicznych, udokumentowanych 121 otworami wiertniczymi, o łącznej powierzchni blisko 514 km² i zasobach przewidywanych soli K-Mg (głównie typu chlorkowego) oszacowanych na 3,53 mld Mg. Większość stanowią obszary wystąpień pokładowych utworów formacji starszej soli potasowej (K2): 7 obszarów perspektywicznych (98 otworów wiertniczych) o łącznej powierzchni 454 km² i zasobach kopaliny ocenionych na 3,2 mld Mg. W obrębie pokładu, reprezentującego formację młodszej soli potasowej (K3), wyznaczono 6 obszarów perspektywicznych (23 otwory wiertnicze) o łącznej powierzchni ponad 60 km² i zasobach kopaliny oszacowanych na 288,8 mln Mg.

2–49% and CaSO₄ 0.09–9.9%. The NaCl content in that deposit is ranging from 18 to 97%, mainly 37–91% (*op. cit.*).

Based on the so-called positive boreholes, it was possible to identify six prospective areas, as follows: OP Nowa Sól K3, OP Pomorsko K3, Klenica, Lubięcín 1, Lubięcín 2, and Lubięcín 3 (Table 4, Fig. 3).

The bottom of the Younger Potash seam of the six prospective areas is situated at the depth from 980.0 m (OP Nowa Sól K3) to 1,832.0 m (OP Pomorsko K3). The thickness of the seam is changing from 2 to 50.8 m (OP Nowa Sól K3; Table 3).

The total surface area of the six distinguished occurrences of the Younger Potash (K3) seam on the Fore-Sudetic Area, documented by 23 boreholes, amounts to more than 60 km², while the predicted resources of the mineral have been estimated at 288.8 million Mg (Table 3). The estimated K₂O resources amount to 2.89 million Mg, assuming a low average potassium content of 1%. The quality of documentation is also significant here and that is reflected in the surface area and resource estimations: from OP Nowa Sól K3, with 17 boreholes, surface area of more than 57 km², and 265.6 million Mg of resources, to the areas of Klenica, Lubięcín 1, 2, and 3 that have been documented by single boreholes, with the surface area of 0.5 km² and the resources estimated at 1.3–3.2 million Mg.

We can conclude that the total resources of the discussed mineral, within 13 identified prospective areas of the bedded K-Mg salt occurrences, representing the Older and Younger Potash Formations (K2 and K3) on the Fore-Sudetic Area, documented by 121 boreholes, have been estimated at 3.53 billion Mg, with their total surface area amounting to 514.8 km². The total extractable K₂O quantities available on the said areas have been estimated at 35.32 million Mg, assuming a low average mineral content in the potash-bearing beds of 1%.

4. CONCLUSIONS

New data obtained from the boreholes drilled in SW Poland after 2014 and reinterpretation of the logging records from older boreholes allowed us to re-evaluate the deposit potential of the stratiform potassium-magnesium salt occurrences on the Fore-Sudetic Area. We selected 13 prospective areas, documented by 121 boreholes, with the total surface area amounting to nearly 514 km² and predicted K-Mg salt resources (mainly of the chloride type) estimated at 3.53 billion Mg. The majority of areas contain stratiform deposits of the Older Potash (K2): 7 prospective areas (with 98 boreholes), total surface area of 454 km², and mineral content estimated at 3.2 billion Mg. Within the relevant deposits, representing the Younger Potash Formation (K3), six prospective areas were identified by 23 boreholes, with the total surface area of more

Należy podkreślić bardzo duże zróżnicowanie wielkości i zasobów opisanych obszarów perspektywicznych: od bardzo rozległego OP Chlebowo–Luboszyce o powierzchni blisko 331 km² i zasobach 2,46 mld Mg po małe obszary jak Klenica, Lubięcín 1, 2 i 3 o powierzchni 0,5 km² i zasobach rzędu 1,3-3,2 mln Mg.

Opisane obszary perspektywiczne pokładowych wystąpień soli K-Mg na terenie przedsudeckim mogą zawierać 35,32 mln Mg tlenku potasu, w tym: utwory starszej soli potasowej (K2) – 32,43 mln Mg tlenku potasu zaś utwory młodszej soli potasowej (K3) – 2,89 mln Mg w przeliczeniu na K₂O.

Przedstawione dane wskazują na wysoki potencjał złożowy występowania soli potasowo-magnezowych obszaru przedsudeckiego, tym większy że utwory te budują głównie sole K-Mg typu chlorkowego, łatwe do eksploatacji metodą podziemnego ługowania, bez konieczności budowy kosztownej kopalni podziemnej. Zasadne jest zatem uznanie tego regionu za „polskie zagłębienie potasowe”. Należy jednak podkreślić, że opisane wystąpienia soli K-Mg wymagają dokładnego rozpoznania geologicznego i udokumentowania ich zasobów w kategorii umożliwiającej podjęcie działalności górniczej.

Podziękowania. Autorzy dziękują Recenzentom pracy: dr hab. inż. Katarzynie Cyran (AGH) i dr hab. Stanisławowi Burlidze (Uniw. Wrocławski) za cenne uwagi i sugestie.

than 60 km² and the mineral resources estimated at 288.8 million Mg.

We should emphasise here a large diversity of the sizes and volumes of the resources belonging to the prospective areas: from the vast OP Chlebowo-Luboszyce, with the surface area of nearly 331 km² and 2.46 million Mg of salt to such small areas as Klenica, Lubięcín 1, 2, and 3, with total surface area of 0.5 km² and the mineral resources estimated at 1.3–3.2 million Mg.

The prospective areas of the stratiform K-Mg salts occurring on the Fore-Sudetic Area under discussion may contain 35.32 million Mg of potassium oxide, including the Older Potash (K2) estimated at 32.43 million Mg of potassium oxide and the Younger Potash (K3) estimated at 2,89 million Mg, recalculated to K₂O.

The data presented here indicate a high potential of the deposits, as regards the occurrence of potassium-magnesium salts on the Fore-Sudetic Area. The more so as the relevant formations are made up mainly of chloride K-Mg salts that are easy to extract by the solution mining method, without the necessity to construct costly underground mines. Therefore, it is justified to recognise the region under discussion as the real Polish Potash District. However, we need to emphasise that the K-Mg occurrences described here required detailed geological prospecting and resource documentation that would be suitable for the future decision of starting any mining operations.

Acknowledgements. The authors wish to thank the following Reviewers: Dr. hab. inż. Katarzyna Cyran (AGH) and Dr. hab. Stanisław Burliga (University of Wrocław) for their valuable remarks and suggestions.

LITERATURA/ REFERENCES

- BAK B., PRZENIOSŁO S. (red.), 1993. Zasoby perspektywiczne kopalni Polski wg stanu na 31.XII.1990 r. PIG, Warszawa.
- BRAITSCHE O., 1971. Salt deposits: their origin and composition. 1-197. Springer-Verlag, New York.
- BORNEMANN O., BEHLAU J., FISCHBECK R., HAMMER J., JARITZ W., KELLER S., MINGERZAHN G., SCHRAMM M., 2008. Standortbeschreibung Gorleben, Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. *Geologisches Jahrbuch, R. C.*, 73: 1-211. Hannover.
- CHARYSZ W., 1973. Cechsztyńskie piętro soli młodszych (Z3) w regionie kujawskim. *Prace Instytutu Geologicznego*, 75: 1-68.
- CZAPOWSKI G., 1993. Facies characteristics and distribution of the Zechstein (Upper Permian) salt deposits of PZ3 (Leine) Cycle in Poland. *Bull. Pol. Acad. Sciences, Earth Sciences*, 41 (4): 229-237.
- CZAPOWSKI G., 1995. Upper Permian (Zechstein) salt deposits on the Żary Pericline - characteristics, origin and economical value. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, 150: 35-60.
- CZAPOWSKI G., 2017. Potencjał zasobowy soli kamienniej i soli potasowo-magnezowych obszaru przedsudeckiego. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 469: 105-128.
- CZAPOWSKI G., ANTONOWICZ L., PERYT T. M., 1991. Facies and paleogeography of the Zechstein (Upper Permian) Older Halite (Na₂) in Poland. *Bull. Pol. Acad. Sciences, Earth Sciences*, 38 (1-4): 45-55.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., 2013. Potencjał zasobowy soli kamienniej i soli potasowych w Polsce a perspektywy jego wykorzystania. *Górnictwo Odkrywkowe*, 54 (2): 74-84.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., 2015. Mapy wystąpień zasobów perspektywicznych soli w Polsce jako narzędzie w projektowaniu przyszłego zagospodarowania złóż kopalni. *Przegląd Solny*, 11: 5-31.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., GAŚIEWICZ A., SĄDŁOWSKA K., 2015. Obszary perspektywiczne wystąpień i zasoby przewidywane surowców chemicznych Polski na mapach w skali 1:200 000 - sól kamienna, sole potasowo-magnezowe i siarka. *Przegląd Geologiczny*, 63 (9): 561-571.
- CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., HANDTKE B., WACHOWIAK J., PERYT T. M., 2022c. Trace Elements and Mineralogy of Upper Permian (Zechstein) Potash Deposits in Poland. *Applied Sciences*, 12. <https://doi.org/10.3390/app12147183>

- CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., PERYT T. M., TOMASZCZYK M., CHEŁMIŃSKI J., 2009. Złoża permskiej soli kamiennej i potasowej w rejonie Zatoki Puckiej – budowa geologiczna i zasoby. *Przegląd Geologiczny*, 57 (9): 757-758.
- CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., TOBOŁA T., TADYCH T., 2012. Geology, geochemistry and petrological characteristics of potash salt units from PZ2 and PZ3 Zechstein (Late Permian) cycles in Poland. *Geology, Geophysics & Environment*, 38 (2):153-188.
- CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., WACHOWIAK J., 2022a. Wybrane pierwiastki śladowe w górnopermskich (cechsztyń) utworach solnych i potasonośnych w Polsce – ocena złożowa. *Przegląd Geologiczny*, 70 (5): 384-409.
- CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., WACHOWIAK J., 2022b. Wybrane pierwiastki śladowe w górnopermskich (cechsztyń) utworach potasonośnych w Polsce – czy warto je stąd pozyskiwać? *Przegląd Solny*, 16: 43-66.
- DAWIDOWSKI S., 1976. Obecne rozpoznanie koncentracji soli potasowych młodszych (K3) w okolicy Nowej Soli i perspektywy ich gospodarczego zastosowania. *Przegląd Geologiczny*, 24 (9): 545-546.
- GARLICKI A., SZYBIST A., 1986. Salinarne osady polskiego cechsztynu z solami potasowo-magnezowymi. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 2 (3-4): 389-404.
- HANCZKE T., 1969. Mineralogia i petrografia soli cechsztyńskich kopalni Kłodawa. *Prace Muzeum Ziemi*, 16:3-52.
- KIJEWSKI P., 1988. Sole cechsztyńskie na północ od Wrocławia. *Konf. nauk. nt. Wybrane zagadnienia złóż Polski Zachodniej*, Wrocław 1988: 60-75.
- KOZUR H., 1994. The Correlation of the Zechstein with the Marine Standard. *Jb. Geol. Bundesanstalt*, 137 (1): 85-103.
- LUKJANOWA I. W., BOGDANOW J. B., WASILJEWA O. W., WARGIN G. P., 2011. Gassudarstwiennoja geologiczieskaja karta Rossyjskoj Fiederacji. Masztab 1: 100 000 (trzeci pokolenie). Serija Cienratralno-Jewropiejskaja. List N-(34) – Kalinninograd. Objasnitielnaja zapiska. 1-253. Sankt-Petersburg.
- ŁASZKIEWICZ A., 1967. Minerale i skały solne. *Prace Muzeum Ziemi*, 11: 101-188.
- MANECKI A., 2019. Mineralogia szczegółowa. Rozpoznawanie, występowanie, znaczenie minerałów. 1-367. MineralPres, Kraków.
- MIKULSKI S. Z., OSZCZEPALSKI S., CZAPOWSKI G., SAŁDŁOWSKA K., GAŚIEWICZ A., MARKOWIAK M., STRZELSKA-SMAKOWSKA B., SZTROMWASSER E., KOŹMA K., SIKORSKA-MAYKOWSKA M., PAULO A., CHMIELEWSKI A., RADWANIEK-BAK B., GIEŁŻECKA-MĄDRY D., MĄDRY S., MICHNIEWICZ M., BUKOWSKI K., KUĆ P., BLIŹNIUK A., KOSTRZ-SIKORA P., PIOTROWSKA M., 2015. Mapy obszarów perspektywicznych wystąpień rud metali i surowców chemicznych w Polsce w skali 1:200 000 wraz z ich oceną surowcową i ograniczeniami środowiskowymi i zagospodarowania przestrzennego. Narodowe Archiwum Geologiczne PIG-PIB nr 1714/2015, Warszawa
- PADUSZYŃSKI J., 1961. Dokumentacja soli potasowych występujących w profilu odwiertu Nowa Sól Geo-1 (z próbą obliczenia zasobów K₂O przypadających na 1 km²). Narodowe Archiwum Geologiczne PIG-PIB nr 4121/142, Warszawa
- PASIECZNA A., 1987. Badania mineralogiczno-geochemiczne cechsztyńskich utworów siarczanowych z rejonu Zatoki Puckiej. *Archiwum Mineralogiczne*, 43 (1):19-40..
- PAUL J., 1986 - Environmental analysis of basin and schwellen facies in the Lower Zechstein of Germany. *Geol. Society Special Publication*, 22:143-147.
- PAUL J., HEGGENMAQNN H., DITRICH D., HUG-DIEGEL N., HUCKRIEDE H., NITSCH E., AG ZECHSTEIN der SHPT/DSK, 2018. Erläuterungen zur Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016: die Zechstein-Gruppe. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 169 (2): 139-145.
- PERYT T. M., GELUK M., MATHIESEN A., PAUL J., SMITH K., 2010 - Zechstein, Chapter 8. W: Doornenbal J. C & Stevenson A. G. (eds) „Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area”. EAGE Publications, b. v. Houten: 1-342.
- POBORSKI J., 1960. Cechsztyńskie zagłębienie solne Europy środkowej na Ziemiach Polskich. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, 30 (II):355-373.
- POBORSKI J., 1961 - Główne kierunki poszukiwań soli potasowo-magnezowych w Polsce. *Przegląd Geologiczny*, 9 (11): 570-573.
- POBORSKI J., 1964. Stosunki facjalne w zagłębieniu cechsztyńskim w Polsce. *Kwartalnik Geologiczny*, 8 (1):111-121.
- POBORSKI J., 1965. Perspektywy poszukiwań i eksploatacji soli potasowych w Polsce. *Przegląd Geologiczny*, 13 (5):189-191.
- POBORSKI J., 1969. Rozwój idei potasonośnego zagłębienia gdańskiego w systemie permskim. *Przegląd Geologiczny*, 17 (5): 231-235.
- POBORSKI J., 1970. The Upper Permian Zechstein in the Eastern Province of Central Europe. 3rd Symposium on Salt, 1: 24-29. Cleveland.
- POBORSKI J., PROCHAZKA K., WALA A., 1956. Sole potasowo-magnezowe w złożach Inowrocławia i Wapna. *Acta Geologica Polonica*, 6 (4): 337-370.
- PODEMSKI M., 1964. Projekt poszukiwań pokładowych złóż soli potasowo-magnezowych i soli kamiennej w strefie przedsudeckiej. wraz z aneksami nr 1, 2 i 3. Narodowe Archiwum Geologiczne PIG-PIB nr 4120/45 (stara 52/94 z. 27), Warszawa.
- PODEMSKI M. 1966. Sole potasowe cechsztyńskiego poziomu starszej soli potasowej (K2) z okolicy Nowej Soli. Narodowe Archiwum Geologiczne PIG-PIB nr 4121/191, Warszawa.
- PODEMSKI M., 1970. Perspektywy poszukiwań złóż soli potasowych na peryklinie Żar w świetle wyników badań sejsmicznych przeprowadzonych przez Program Rozwoju ONZ. Narodowe Archiwum Geologiczne PIG-PIB nr 52/100, Warszawa.
- PODEMSKI M., 1971. Perspektywy poszukiwań złóż soli potasowych na peryklinie Żar w świetle wyników badań sejsmicznych, przeprowadzonych przez Program Rozwoju ONZ. *Kwartalnik Geologiczny*, 15 (4): 990-991.
- PODEMSKI M., 1972a. Cechsztyńskie sole kamienne i potasowe cyklotomów Z2, Z3 w okolicach Nowej Soli. *Biuletyn Instytutu Geologicznego*, 260 (2): 5-62.
- PODEMSKI M., 1972b. Poziom soli potasowej starszej w rejonie Zielonej Góry. Narodowe Archiwum Geologiczne PIG-PIB nr 4121/401, Warszawa.
- PODEMSKI M., 1973a. Sedymentacja cechsztyńska zachodniej części monokliny przedsudeckiej na przykładzie okolic Nowej Soli. *Prace Instytutu Geologicznego*, 71:1-101.
- PODEMSKI M., 1973b. Podsumowanie wyników dotychczasowych badań geofizycznych i geologicznych zachodniej części niecki północno-sudeckiej w aspekcie poszukiwań złóż soli kamiennej i potasowej. Narodowe Archiwum Geologiczne PIG-PIB nr DS/259 z.12 oraz 14624, Warszawa.

- PODEMSKI M., 1974. Wyniki dotychczasowych badań soli potasowych w strefie przedsudeckiej. *Przegląd Geologiczny*, 21 (1): 7-12.
- PODEMSKI M., 1975. Sole cechsztyńskie w rejonie struktury Rybaki. *Biuletyn Instytutu Geologicznego*, 286 (III): 5-63.
- RACKI G., NARKIEWICZ M. (reds), 2006. Polskie Zasady Stratygrafii. 1-78. PAN,PIG, Warszawa.
- RICHTER-BERNBURG G., 1955. Stratigraphische Gliederung des deutschen Zechsteins. *Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft*, 105: 843-854.
- RICHTER-BERNBURG G., 1984. Cykliczna sedymentacja cechsztyńska. *Kwartalnik Geologiczny*, 28 (3-4): 751-752.
- SOKOŁOWSKI J., 1967. Charakterystyka geologiczna i strukturalna obszaru przedsudeckiego. *Geologia Sudetica*, 3: 297-367.
- SONNENFELD P., 1984. Brines and evaporites. 1-613. Academic Press Inc, Orlando.
- STĘPNIEWSKI M., 1973. Niektóre pierwiastki śladowe w cechsztyńskich minerałach solnych z rejonu Zatoki Puckiej. *Biuletyn Instytutu Geologicznego*, 272 (10): 7-68.
- SZAMAŁEK K., SZUFLICKI M., MIZERSKI W. (red.) 2020. Bilans perspektywicznych zasobów kopalin Polski. 1-475. PIG-PIB, Warszawa.
- SZUFLICKI M., MALON A., TYMIŃSKI M. (red.), 2022. Bilans zasobów kopalin i wód podziemnych Polsce wg stanu na 31.XII.2021 r. 1-508, PIG-PIB, Warszawa.
- TOMASSI-MORAWIEC H., CZAPOWSKI G., SKOWROŃSKI L., 2004. Ewolucja zasolenia wód cechsztyńskich zbiorników ewaporacyjnych na obszarze Polski w świetle danych geochemicznych. Narodowe Archiwum Geologiczne PIG-PIB nr 1602/2004, Warszawa.
- TOMASZEWSKI J. B., 1962. Utwory solne cechsztynu monokliny przedsudeckiej w rejonie Lubin-Sieroszowice. *Przegląd Geologiczny*, 10 (12): 668-671.
- WAGNER R., 1981. Some problems of the Zechstein stratigraphy in Poland. Proc. Intern. Symp. Central Europ. Permian: 398-399. Warszawa.
- WAGNER R., 1986. Problemy formalnej litostratygrafii cyklotomów ewaporatowych na przykładzie cechsztynu. *Przegląd Geologiczny*, 34 (5): 250-254.
- WAGNER R., 1987. Stratigraphy of the Uppermost Zechstein North Western Poland. *Bull. Pol. Acad. of Sciences, Earth Sciences*, 35 (3): 265-273.
- WAGNER R., 1991. Stratigraphie des höchsten Zechstein in Polnischen Zentralbecken. *Zbl. Geol. Paläont.*, I (4): 883-892. .
- WAGNER R., 1995. Stratygrafia i rozwój basenu cechsztyńskiego na Niżu Polskim. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, 146: 1-71.
- WAGNER R., PERYT T. M., 1998. O możliwościach podziału cechsztynu w sekwencji stratygraficznej w basenie polskim. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, 155: 129-146.
- WAGNER R., PIĄTKOWSKI T. S., PERYT T. M., 1978. Polski basen cechsztyński. *Przegląd Geologiczny*, 26 (12): 673-786.
- WERNER Zb., 1959. Dokumentacja geologiczna złoża soli potasowo-magnezowych i soli kamiennej w Kłodawie. Narodowe Archiwum Geologiczne PIG-PIB nr 3928/370, 13226. Warszawa.
- WERNER Zb., 1962. Dokumentacja geologiczna złoża soli potasowo-magnezowych i soli kamiennej w kłodawskim wydaniu solnym. Narodowe Archiwum Geologiczne PIG-PIB nr 3927/209, 1919. Warszawa.
- WERNER Zb., 1969 - Złoże polihalitu w rejonie Swarzewa, pow. Puck, woj. Gdańsk. Narodowe Archiwum Geologiczne PIG-PIB nr 2926/87, Warszawa.
- WERNER Z., 1971. Dokumentacja geologiczna złoża polihalitu „Swarzewo”, pow. Puck. Narodowe Archiwum Geologiczne PIG-PIB nr 3027/213, Warszawa.
- WERNER Zb., 1972a. Dokumentacja geologiczna złoża polihalitu „Zdrada”, pow. Puck. Narodowe Archiwum Geologiczne PIG-PIB nr 3026/113/36, Warszawa.
- WERNER Zb., 1972b. Złoże soli potasowych w rejonie Zatoki Puckiej. Przewodnik 54 Zjazdu PTG, Cetniewo: 37-46.
- WERNER Zb., 1973. Dokumentacja geologiczna złoża polihalitu „Zdrada”, pow. Puck. Opracowanie uzupełniające. Narodowe Archiwum Geologiczne PIG-PIB nr 3026/113/36, Warszawa.
- WERNER Zb., 1974. Dodatek do dokumentacji geologicznej złoża polihalitu „Swarzewo”, pow. Puck. Narodowe Archiwum Geologiczne PIG-PIB nr 2927/40, Warszawa.
- WERNER Z., (z zespołem), 1979. Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w kat. C1 w rejonie Zatoki Puckiej. Narodowe Archiwum Geologiczne PIG-PIB nr 13050 CUG, Warszawa.
- WERNER Zb., DAWIDOWSKI J. S., 1976. Poszukiwanie złóż soli potasowych na monoklinie przedsudeckiej. A/73 Podsumowanie wyników I etapu i projekt dalszych prac poszukiwawczych soli potasowych w rej. Nowej Soli. Narodowe Archiwum Geologiczne PIG-PIB nr 4121/140, Warszawa.
- WERNER Z., ORSKA E., KOTOWSKI A., WROTNOWSKA B., 1967. Dokumentacja geologiczna złoża polihalitu i soli kamiennej „Chłapowo-Mieroszyno”. Narodowe Archiwum Geologiczne PIG-PIB nr 2973/32. Warszawa
- WERNER Zb., POBORSKI J., ORSKA J., BĄKOWSKI J., 1960. Złoże solne w Kłodawie w zarysie geologiczno-górnictwem. *Prace Instytutu Geologicznego*, 30: 467-512.
- WERNER Zb., PODEMSKI M., 1971. Wyniki dotychczasowych badań złóż soli potasowych w Polsce i program dalszych poszukiwań. Narodowe Archiwum Geologiczne PIG-PIB nr 9692 [0b0/1265 z. 28], Warszawa.
- WOŁKOWICZ S., SMAKOWSKI T., SPECZIK S. (red.), 2011. Bilans perspektywicznych zasobów kopalin wg stanu na 31.XII.209 r. PIG-PIB, Warszawa.
- ZWIERZYCKI J., 1951. Sole potasowe na północ od Wrocławia. *Prace Instytutu Geologicznego*, 7: 257-291.



Charakterystyka geochemiczno-mineralogiczna zubrów mioceńskich w zapadlisku przedkarpackim (południowa Polska)

Geochemistry and mineralogy of Miocene Zuber rocks in the Carpathian Foredeep (southern Poland)

Grzegorz CZAPOWSKI¹, Krzysztof BUKOWSKI², Tomasz TOBOŁA²,
Hanna TOMASSI-MORAWIEC

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; grzegorz.czapowski@pgi.gov.pl

² Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
buk@agh.edu.pl; tobolatomasz@agh.edu.pl

¹ Polish Geological Institute – National Research Institute - Rakowiecka 4, 00-975 Warsaw
² AGH University of Science and Technology in Cracow, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Cracow
grzegorz.czapowski@pgi.gov.pl

STRESZCZENIE

Skały solne typu zubrów (udział substancji ilastej w przedziale 15-85%) stanowią istotny składnik profilu środkowomioceńskich utworów ewaporatowych formacji z Wieliczki w południowej Polsce. Badania geochemiczne i petrologiczne 43 próbek tych utworów, pobranych w wyrobiskach kopalni soli w Bochni i Wieliczce oraz z rdzeni 3 otworów wiertniczych (Z-1 i nr 42 koło Łęzkowic i H-11 w Wieliczce) wykazały ich niską przydatność jako kopaliny zarówno do pozyskiwania solanki jak i pierwiastków śladowych. Wysoki udział wapnia (3,61-5,03%), siarki i krzemionki (22,32-27,66%), związany z występowaniem węglanów i siarczanów wapnia (gips, anhydryt) i substancji ilastej (>15%; illit, smektyt, chloryty), detrytycznego kwarcu i skaleni (analcym), eliminuje zuby jako sól drogową czy konsumpcyjną. Spośród 26 oznaczonych pierwiastków śladowych największy udział (średnio ok. 0,03-0,08%) w zubrach ma stront, zawartość pozostałych jest bardzo niska (średnio <0,007%). Skład mineralny zubrów mioceńskich jest dość bogaty. Obok dominującego halitu, siarczanów wapnia, substancji ilastej i materiału detrytycznego występują: węglany (dolomit, kalcyt, ankeryt, magnezyt), siarczany (baryt, bassanit, celestyn), siarczki (piryt, markasyt, sfaleryt), rutil, cyrkon, muskowitz, biotyt i chalcedon.

Słowa kluczowe: geochemia, mineralogia, zuby, miocen, Polska

ABSTRACT

Salt rocks of the zuber type, characterized by clay content ranging from 15% to 85%, constitute a significant component within the profile of the Middle Miocene evaporitic Wieliczka Formation in southern Poland. Geochemical and petrological studies of 43 zuber samples collected from salt mines in Wieliczka and Bochnia, as well as from cores of three wells (Z-1 and No. 42 near Łęzkowice and H-11 in Wieliczka), have demonstrated their limited utility for both brine extraction and trace elements production. The high content of calcium (ranging from 3.61% to 5.03%), sulfur, and silica (ranging from 22.32% to 27.66%), associated with calcium carbonates and sulfates (such as gypsum and anhydrite), as well as the presence of clay matter (>15%; including illite, smectite, and chlorites), and the occurrence of detrital quartz and feldspars (particularly analcime), preclude the use of zuber rocks as road salt or for consumption. Among the 26 detected trace elements, only strontium exhibits a higher concentration (averaging approximately 0.03% to 0.08%), while the others occur in very low amounts (averaging <0.007%). The mineral composition of zuber rocks is relatively diverse. Dominant minerals include halite, clay minerals, calcium sulfates, and detrital grains. Additionally, carbonates (dolomite, calcite, ankerite, magnesite), sulfates (barite, bassanite, celestine), sulfides (pyrite, marcasite, sphalerite), rutile, zircon, muscovite, biotite, and chalcedony have been identified.

Keywords: geochemistry, mineralogy, Zuber, Miocene, Poland

1. WSTĘP

“Zubrem” nazywana jest skała, złożona z mieszaniny substancji ilastej i halitu, w której udział ilitu zmienia się od 15% do 85% (Ryka, Maliszewska, 1982). Skały o mniejszej zawartości są określane jako “sole ilaste” czy “zailone”, o wyższej zaś - jako “ilty solne” (Stasik, 1988). W praktyce granice te są bardziej płynne, zubrami nazywane są generalnie skały ilasto-solne, gdzie skały klastyczne występują we frakcji aleurytowej i pelitowej.

Na obszarze Polski skały typu zubrów występują w utworach górnego permu i miocenu (np. Czapowski i in., 2006; Tomassi Morawiec i in., 2019). Zubry miocenijskie (środkowy miocen, piętro baden, podpiętro wielicz) występują w zapadlisku przedkarpackim w formie przewarstwień wśród utworów chlorkowo-siarczanowo-klastycznych w obrębie formacji z Wieliczki w południowej, przykarpackiej części zapadliska (Tab. 1, Ryc. 1), ich łączna zaś grubość sięga kilkunastu-kilkudziesięciu metrów (Bukowski, 1994; Garlicki, 1979). Utwory solne formacji z Wieliczki są podścielone zmiennej miąższości (kilka do >1,5 km) klastycznymi utworami formacji ze Skawiny (podpiętro moraw). Ponad nimi występują klastyczne osady warstw chodenickich i grabowieckich (podpiętro kosow, Tab. 1) miąższości 400-650 m.

Oprócz halitu i substancji ilastej w zubrach stwierdzono obecność siarczanu wapnia (gips, anhydryt), materiału silikoklastycznego (piasek kwarcowy, otoczaki) oraz szeregu minerałów diagenetycznych (np. chloryty, wtórny halit żyłowy – Bukowski, 1994). Zubry miocenijskie przypuszczalnie powstały w subakwalnych do aeralnych warunkach na terenie

1. INTRODUCTION

The term “zuber” is used to describe rocks composed of a mixture of clay material and halite, with clay content ranging from 15% to 85% (Ryka, Maliszewska, 1982). Rocks with lower clay content are often described as “clayey salts” while those with higher clay content are categorized as “salty clays” (Stasik, 1988). In practical terms, these distinctions are somewhat flexible, and “zuber” generally refers to rocks that are clayey-saline, where clastic rocks are present in the aleuritic and pelitic fractions.

In Poland, rocks of the zuber type are found within the Upper Permian and Miocene formations (Czapowski et al., 2006; Tomassi Morawiec et al., 2019). Miocene zuber rocks, specifically of the Middle Miocene age (the Wieliczka substage of Badenian stage) are notably present in the Carpathian Foredeep. These rocks appear as interbeds of chlorides, sulfates, and clastics within the Wieliczka Formation. They locate mostly in the southern, near-Carpathian part of the Foredeep as illustrated in Table 1 and Figure 1. Their combined thickness ranges from several meters to several dozen meters, as documented by earlier studies (Bukowski, 1994; Garlicki, 1979). The Wieliczka formations are underlain by clastic deposits of the Skawina Formation of variable thickness from a few meters to over 1.5 kilometers. These deposits are attributed to the Moravian substage. The overlying sediments are clastics belonging to the Chodenice and Grabowiec Beds (the Kosovian substage), with a thickness from 400 to 650 meters (Table 1).

Tab. 1. Stratygrafia i miąższość miocenijskich utworów solnych i sąsiadujących utworów klastycznych w Polsce.

Table 1. Stratigraphy and thickness of Miocene salts and adjacent deposits in Poland

GLOBAL STAGES piętra globalne	REGIONAL EUROPEAN STAGES regionalne piętra europejskie		LOCAL SUBSTAGES Lokalne podpiętra	LITHOSTRATIGRAPHIC UNIT wydzielenia litostratygraficzne	THICKNESS (m) miąższość (Bukowski, 2011)
	Western Europe Europa zachodnia	Eastern Europe (Central Paratethys area) Europa wschodnia (Paratetyda Centralna)			
MIDDLE MIOCENE miocen środkowy					
Serravallian Serawal	Langenfeldian-Reinbekian langenfeld-reinbek	Sarmatian-Badenian sarmat-baden	Kosovian kosow	Chodenice + Grabowiec Beds (clastics) warstwy chodenickie i grabowieckie (skały klastyczne)	400-650
			Wielician wielicz	Wieliczka Formation (salt) formacja z Wieliczki (sole)	30 -100
			Moravian moraw	Skawina Formation (clastics) formacja ze Skawiny [skawińska] (klastyki)	several to ca 1500 od kilku do około 1500



Ryc. 1. Okaz zuberu mioceńskiego z kopalni soli w Wieliczce. Brunatne spoiwo ilasto- mułowcowe, szare klasty – kryształy halitu, białe i beżowe gruzły anhydrytu.

Fig. 1. Zuber sample from the Wieliczka salt mine. Brownish clay-silty matrix, grey clasts – halite crystals, white and beige anhydrite nodules.

płytkich rozległych równi mułowych, obramowujących basen solny w zapadlisku przedkarpackim. Znaczna część halitu krystalizowała wówczas z przesycających muł solanek, inkludując substancję ilastą (Bukowski, 1994), bądź była później redeponowana w formie spływów gęstościowych osadu (Bukowski i in., 2007) do stref głębszych zbiornika wskutek gwałtownych powodzi czy aktywności sejsmicznej (np. Czapowski, Bukowski, 2002; Bukowski i in., 2003, 2006; Bukowski, Czapowski, 2004, 2007).

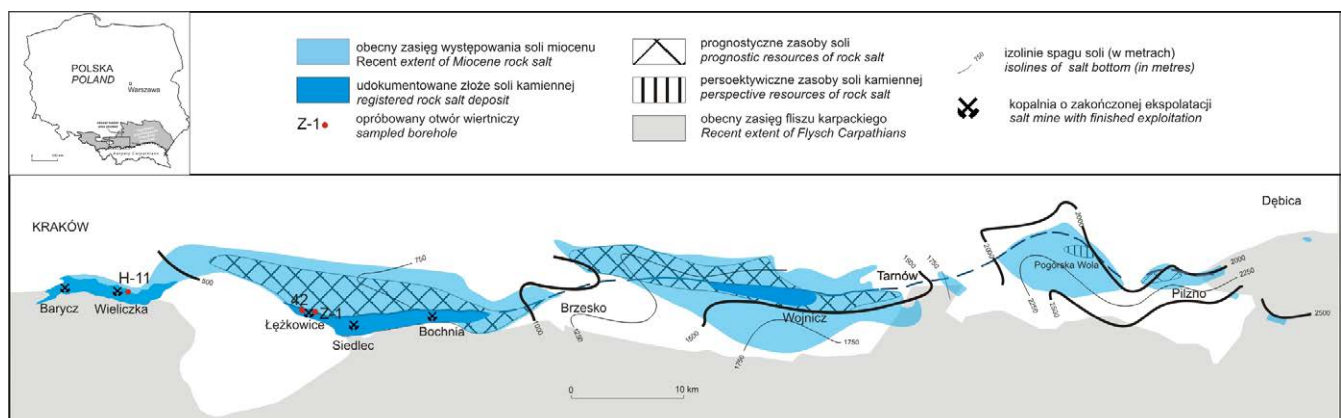
Wysoki udział materiału klastycznego eliminował ten typ skały jako kopalinę użytkową, stąd niskie nią zainteresowanie. Wielokierunkowe badania przeprowadzone na początku wieku (Czapowski i in., 2002) pozwoliły przedstawić pełniejszą charakterystykę geochemiczną i skład mineralny mioceńskich skał zuberowych.

2. WYKSZTAŁCENIE ZUBRÓW

Badania składu chemicznego i mineralnego przeprowadzono na 43 próbkach skał zuberowych, pobranych z wyrobisk

In addition to halite and clay matter, Miocene zuber rocks have been found to contain calcium sulfate (gypsum, anhydrite), siliciclastic material (quartz sand, pebbles), and various diagenetic minerals (such as chlorite and secondary vein halite; Bukowski, 1994). It is presumed that Miocene zuber deposits developed in subaqueous to aerial conditions within shallow, expansive mudflat plains surrounding the salt basin in the Carpathian Foredeep. A significant amount of halite likely crystallized from oversaturated mud brines, incorporating clay material (Bukowski, 1994), or was later re-deposited in the form of density-driven flows in deeper parts of the basin due to abrupt floods or seismic activity (e.g., Czapowski, Bukowski, 2002; Bukowski et al., 2003, 2006; Bukowski, Czapowski, 2004, 2007).

The high content of clastic material eliminated this rock type as a usable mineral, hence the low interest in its exploration. Multidisciplinary studies conducted in the beginning of century (Czapowski et al., 2002) have provided a more complete geochemical characterization and mineral composition of Miocene zuber rocks.



Ryc. 2. Występowanie mioceńskich soli kamiennych w południowej Polsce

Fig. 2. Extent of Miocene rock salts in southern Poland

w kopalniach soli w Bochni i w Wieliczce oraz z rdzeni trzech otworów wiertniczych (Ryc. 2): jednego w Wieliczce (otwór H-11) oraz dwóch otworów w Łęczkowicach (Z-1 i 42).

W kopalni soli w **Bochni** utwory zuberowe tworzą dwa kompleksy skalne: tzw. zuber dolny i zuber górny.

Zuber dolny, miąższości 3-5 m, buduje ciemnoszary ił marglisty z kryształkami halitu i ziarnami soli o średnicy ok. 10 mm, kongregacjami anhydrytu, rzadkimi drobnymi okrucami egzotyków fliszowych (drobnoziarnisty piaskowiec), szczątkami lignitu oraz pojedynczymi okazami koralu gatunku *Caryophyllia salinaria* (Poborski, 1952). Osad ten jest miejscami warstwowany i często pocięty żyłami soli wtórnej.

Zuber górny, miąższości 11-12 m, tworzy szaro-brunatna skała zuberowa grubokrystaliczna, o teksturze witrażowej. Nie wykazuje ona warstwowania, a kryształy halitu średnicy 4-10 cm są rozsiiane w masie skalnej równomiernie. Substancja ilasta występuje w zmiennej ilości od kilkunastu procent do około 80%. Kongregacje anhydrytu mają średnicę 1-5 mm.

Próbki do badań pobrano z okolic objazdu podszybia Campi na poziomie V Podmoście (Ryc. 3). Pobrano tam 7 próbek z kompleksu zuberu górnego oraz 6 próbek z zuberu dolnego. Z kolei z przekopu Werner w rejonie szybu Sutoris pobrano jedną próbkę z kompleksu zuberu górnego.

W wyrobiskach kopalni soli w **Wieliczce** (poprzeczna Geramb, podłużna Geramb oraz w chodniku dojściowym do komory Drozdowice na poziomie II - Ryc. 4) przebadano utwory zuberowe występujące w części bryłowej złoża wielickiego. Opróbowany kompleks zuberów wiązany jest z jednostką soli najstarszych i przypisywany I-szemu i II-giemu cyklotemowi (Bukowski, 1994; Garlicki, 1979).

Zubry mają barwę szarą, ciemnoszarą lub popielato-szarą, udział halitu w skale jest zmienny, najczęściej mieści się w granicach 15-50% wagowych. Kryształy halitu rozmieszczone są w masie skalnej bezładnie a ich wielkość zwykle wynosi 1-3 cm choć największe osiągają >10 cm. Sposiwo ila-

2. ZUBER FORMATION

Chemical and mineral composition studies were conducted on 43 samples of zuber rock material, taken from mine workings within the salt mines of Bochnia and Wieliczka, as well as from the cores of three boreholes (Fig. 2): one located in Wieliczka (hole H-11) and two in Łęczkowice (Z-1 and 42).

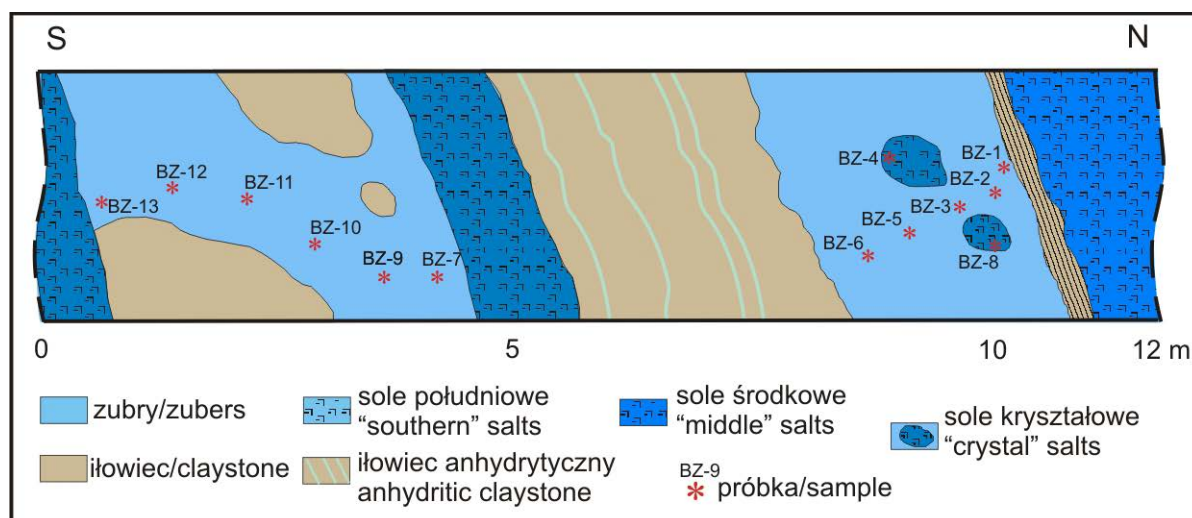
In Bochnia salt mine, the zuber rock formations constitute two rock complexes: the so-called lower zuber and the upper zuber.

The lower zuber, with a thickness of 3-5 meters, consists of dark grey, marly clay with halite crystals and salt grains measuring approximately 10 mm in diameter. It also contains anhydrite concretions, occasional small fragments of exotic flysch rocks (fine sandstone), lignite remnants, and isolated specimens of the coral species *Caryophyllia salinaria* (Poborski, 1952). This sediment is occasionally stratified and frequently intersected by secondary halite veins.

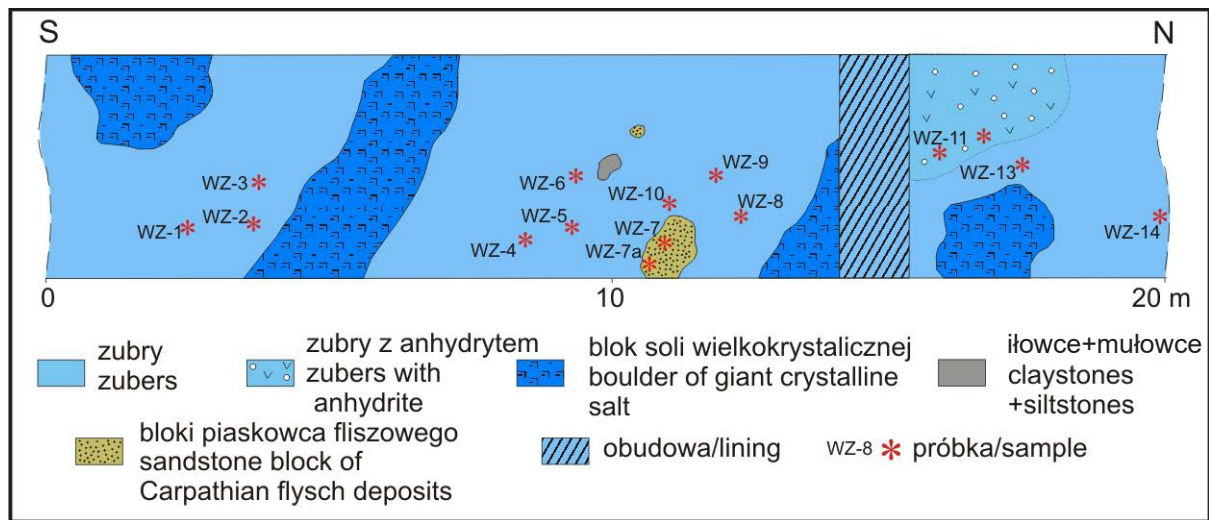
The upper zuber, with a thickness of 11-12 meters, consists of a gray-brown, coarse-crystalline zuber rock with a vitreous texture. This rock does not exhibit bedding, and the halite crystals, with diameters ranging from 4 to 10 cm, are evenly distributed within the rock mass. The clay matter ranges in quantity from a few percent to ca. 80%, and the anhydrite concretions inside it have sizes ranging from 1 to 5 mm.

Samples were collected from the vicinity of the subshaft at level V Podmoście (Fig. 3). Seven samples were collected from the upper zuber complex and six from the lower zuber complex. Additionally, one sample from the upper zuber complex was taken from the Werner crosscut in area of the Sutoris shaft.

In the workings of the Wieliczka Salt Mine (Geramb crosscut, Geramb longitudinal, and the access tunnel to the Drozdowice chamber at the II level, Fig. 4), the zuber rock formations in the massive part of the Wieliczka deposit were



Ryc. 3. Opróbowany profil okolic objazdu podszybia Campi na poziomie V Podmoście, kopalnia soli w Bochni
Fig. 3. Sampled profile nearby the Campi subshaft at level V Podmoście, Bochnia salt mine



Ryc. 4. Opróbowany profil chodnika dojściowego do komory Drozdowice na poziomie II, kopalnia soli w Wieliczce
 Fig. 4. Sampled profile of the corridor to Drozdowice chamber at level II, Wieliczka salt mine

ste, niekiedy margliste, zawiera frakcję mułowo-ilastą (ziarna o średnicy $<0,06$ mm) w ilości około 95-99 % wagowych. Udział grubszego materiału - kwarc, okruchy skał fliszowych, łuszczyki (muskowit i biotyt), zwęglony detrytus roślinny, węglanowe szczątki mikrofauny i kongregacje anhydrytowe – jest niewielki (1-5%).

Z wyrobisk kopalni pobrano łącznie 23 próbki (22 próbki z części brylowej złoża oraz jedną próbkę z górnej części kompleksu soli spizowych). Ponadto jedną próbkę zuberu, reprezentującą złożę brylowe, pobrano z rdzenia otworu wiertniczego H-11 z głębokości 90,5 m.

W okolicach **Łęzkowic** materiału skalnego do badań zubrów dostarczyły rdzenie dwu otworów wiertniczych: otworu Z-1 i otworu eksploatacyjnego nr 42. Występujące tu zubry to szara skała o strukturze kryształowej i teksturze bezładnej, witrażowej. Bezbarwne lub mleczne hipautomorficzne kryształy halitu wielkości do 4 cm są spojone szarą substancją ilaro-piaszczystą. Na granicach kryształów halitu i substancji ilastej występują grona jasnoniebieskiego, kryptokrystalicznego anhydrytu średnicy do 1 cm.

Pobrano 3 próbki z otworu Z-1 z interwału głębokości 80,5-80,8 m oraz jedną próbkę z otworu 42 z głębokości 342,6 m (Ryc. 5).

3. GEOCHEMIA

Dla pobranych próbek zubrów wykonano oznaczenia zawartości pierwiastków głównych (w wersji tlenkowej: SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , SO_3 , Cl i F - 37 próbek) i wybranych pierwiastków śladowych (pierwiastki: As, Ba, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Ga, Hf, La, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sr, Ta, Th, U, V, W, Y, Zn i Zr - 43 próbki).

Wszystkie oznaczenia (na próbkach stapianych i proszkowych prasowanych) zostały wykonane metodą rentgenospek-

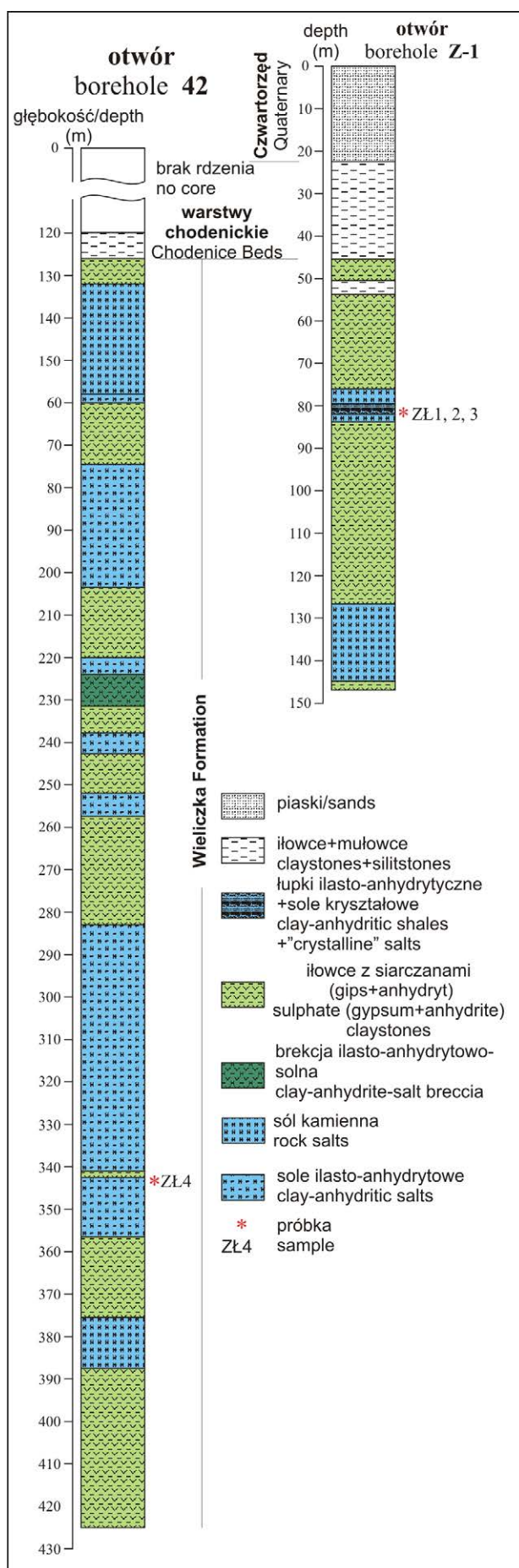
examined. The sampled zuber complex is associated with the oldest salt unit and is attributed to the first and second cyclothems (Bukowski, 1994; Garlicki, 1979).

The zuber rocks have a grey, dark grey, or ashy-grey color, with the halite content in the rock being variable, most commonly falling within the range of 15-50% by weight. Halite crystals are distributed unevenly throughout the rock mass, usually measuring 1-3 cm in size, although some can exceed 10 cm. The binding material is clayey, occasionally marly, and contains a silt-clay fraction (grains with a diameter of <0.06 mm), comprising roughly 95-99% of the total weight. The presence of coarser material such as quartz grains, fragments of flysch rocks, micas (muscovite and biotite), carbonized plant detritus, carbonated microfauna remains, and anhydrite concretions - is minor (1-5%).

A total of 23 samples were collected from the mine workings (22 samples from the boulder deposit and one sample from the upper section of the Spiza salt complex). Additionally, one zuber sample representing the bulder deposit was obtained from core of borehole H-11 at a depth of 90.5 meters.

In the vicinity of **Łęzkowice**, rock material for studying zuber formations was provided by core samples from two drill holes: Z-1 and exploitation borehole No. 42. The zuber formation found here consist of gray rock with a crystalline structure and a chaotic, vitreous texture. Colorless or milky, hipautomorphic halite crystals, measuring up to 4 cm, are cemented by a grey, clay-sand matrix. At the boundaries between halite crystals and the clay matter, clusters of light-blue, cryptocrystalline anhydrite with a diameter of up to 1 cm are present.

Three samples were collected from drill hole Z-1 within the depth interval of 80.5-80.8 meters, along with one sample from borehole 42 at a depth of 342.6 meters (Fig. 5).



Ryc. 5 Opróbowane profile otworów wiertniczych Z-1 i 42 w okolicach Łęzkowic
 Fig. 5. Sampled profiles of Z-1 and 42 boreholes at Łęzkowice

Tab. 2. Parametry statystyczne zawartości pierwiastków głównych i związków w utworach zębrowych miocenu**Table 2.** Statistic parameters of main elements and compounds content in Miocene zuber deposits

PRAMETRY STATYSTYCZNE <i>Statistic parameters</i>	ZAWARTOŚĆ PIERWIASTKÓW GŁÓWNYCH I ZWIĄZKÓW (%) <i>Content of main elements and compounds</i>												
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	F
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
liczba próbek <i>number of samples</i>	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
wartość minimalna <i>minimum</i>	0,43	0,02	0,10	0,33	0,01	0,01	0,53	2,17	0,04	0,01	0,44	1,034	0,03
wartość maksymalna <i>maximum</i>	49,30	0,60	11,08	4,11	0,06	2,59	22,93	55,89	2,24	0,09	25,40	52,845	0,61
średnia arytmetyczna <i>average</i>	22,32	0,28	5,45	2,07	0,03	0,91	5,03	27,66	0,97	0,05	3,61	24,601	0,11
średnia geometryczna <i>geometric mean</i>	17,26	0,23	4,19	1,77	0,02	0,64	4,10	24,00	0,79	0,04	2,01	19,887	0,10
mediana <i>median</i>	20,77	0,26	5,34	2,05	0,02	0,81	4,12	27,67	0,95	0,05	1,46	24,954	0,10

tralną przy użyciu spektrometru fluorescencji rentgenowskiej (WD-XRF) model PW 2400 firmy Philips w Centralnym Laboratorium Chemicznym PIG (Czapowski i in., 2002). Obliczone parametry statystyczne (wartości minimalna i maksymalna oraz wartości średnie: średnia arytmetyczna i geometryczna oraz mediana) zawartości oznaczonych składników zawierają odpowiednio tabele 2 i 3.

Zawartość pierwiastków głównych w 37 próbkach zębrow kształtuje się następująco (Tab. 2):

a) najniższy udział wykazują takie tlenki takich pierwiastków jak: tytan (TiO₂), mangan (MnO), fosfor (P₂O₅) oraz czysty fluor (F): zawartość minimalna – 0,01-0,03%, zawartość maksymalna – 0,06-0,61%, średnia arytmetyczna – 0,03-0,28%, średnia geometryczna – 0,02-0,23%, mediana – 0,02-0,26%,

b) nieco wyższą zawartość mają tlenki: glinu (Al₂O₃), żelaza (Fe₂O₃), magnezu (MgO) i potasu (K₂O): zawartość minimalna – 0,01-0,33%, zawartość maksymalna – 0,06-11,08%, średnia arytmetyczna – 0,91-5,45%, średnia geometryczna – 0,64-4,19%, mediana – 0,81-5,34%,

c) wyższy udział cechuje tlenki wapnia (CaO) i siarki (SO₃): zawartość minimalna – 0,44-0,53%, zawartość maksymalna – 22,93-25,4%, średnia arytmetyczna – 3,61-5,03%, średnia geometryczna – 2,01-4,1%, mediana – 1,46-4,12%,

d) najwięcej badane skały zawierają tlenków krzemu (SiO₂) i sodu (Na₂O) oraz czystego chloru (Cl): zawartość minimalna – 0,43-2,17%, zawartość maksymalna – 49,3-55,89%, średnia arytmetyczna – 22,32-27,66%, średnia geometryczna – 17,26-24,0%, mediana – 20,77-27,67%.

Wysoki udział wapnia, siarki, krzemionki, sodu i chloru w zębrach jest skutkiem składu tych skał, złożonych z mieszniny substancji ilastej i halitu z domieszką siarczanów wapnia (gips, anhydryt), silikoklastów i węglanów. Tak znaczna ilość domieszek i substancji ilastej dyskwalifikuje skały zębrowe

3. GEOCHEMISTRY

Chemical analyses were performed on the collected zuber samples, measuring the concentrations of major elements in oxide form (SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅, SO₃, Cl, and F - 37 samples), as well as selected trace elements (As, Ba, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Ga, Hf, La, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sr, Ta, Th, U, V, W, Y, Zn, and Zr - 43 samples).

All measurements (on fused and powdered pressed samples) were done using X-ray spectrum fluorescence method using the Philips PW 2400 model X-ray fluorescence spectrometer at the PIG Central Chemical Laboratory (Czapowski et al., 2002). The calculated statistical parameters, including minimum and maximum values, arithmetic and geometric average, and the median for the determined component contents, are presented in Tables 2 and 3, respectively.

The content of major elements in the 37 zuber samples (Table 2):

a) the lowest percentages are observed for the oxides of elements such as titanium (TiO₂), manganese (MnO), phosphorus (P₂O₅), and pure fluorine (F): minimum content: 0.01-0.03%; maximum content: 0.06-0.61%; arithmetic average: 0.03-0.28%; geometric means: 0.02-0.23%; median: 0.02-0.26%;

b) slightly higher contents represent the oxides of aluminum (Al₂O₃), iron (Fe₂O₃), magnesium (MgO) and potassium (K₂O): minimum content: 0.01-0.33%; maximum content: 0.06-11.08%; arithmetic mean: 0.91-5.45%; geometric mean: 0.64-4.19%; median: 0.81-5.34%;

c) a higher percentage characterizes the oxides of calcium (CaO) and sulfur (SO₃): minimum content: 0.44-0.53%; maximum content: 22.93-25.4%; arithmetic mean: 3.61-5.03%; geometric mean: 2.01-4.1%; median: 1.46-4.12%;

Tab. 3. Parametry statystyczne zawartości pierwiastków śladowych w utworach zubrowych miocenu
Table 3. Statistic parameters of trace elements content in Miocene zuber deposits

PRAMETRY STATYSTYCZNE <i>Statistic parameters</i>	ZAWARTOŚĆ PIERWIASTKÓW ŚLADOWYCH (ppm)																										
	<i>Content of trace elements (ppm)</i>																										
	As	Ba	Bi	Ce	Co	Cr	Cu	Ga	Hf	La	Mo	Nb	Br	Ni	Pb	Rb	Sr	Ta	Th	U	V	W	Y	Zn	Zr	Cd	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
liczba próbek <i>number of samples</i>	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	4	
wartość minimalna <i>minimum</i>	<3	<10	<3	10	<3	<5	<5	<3	<3	<3	<2	<2	<2	<3	<3	<3	42	<3	<3	<2	<5	<5	<3	8	12	<5	
wartość maksymalna <i>maximum</i>	21	147	54	80	11	57	41	28	12	37	22	11	61	43	20	108	15109	<3	12	3	81	<5	19	137	109	6	
średnia arytmetyczna <i>average</i>	6	62	28	24	7	22	18	13	7	10	10	6	15	16	10	56	782	<3	6	3	31	<5	11	42	69	6	
średnia geometryczna <i>geometric mean</i>	6	53	25	21	7	18	16	12	7	7	9	6	9	14	9	49	309	<3	6	3	26	<5	10	36	59	6	
mediana <i>median</i>	6	53	26	22	8	19	18	13	7	5	9	6	6	15	9	55	265	<3	6	3	28	<5	11	40	68	6	

jako kopalinę użyteczną (sól drogowa, przemysłowa czy konsumpcyjna).

Udział pierwiastków śladowych oznaczonych w 43 próbkach jest dość zróżnicowany (Tab. 3):

- zawartość takich pierwiastków jak Ta, U i W zazwyczaj nie przekracza granicy ich oznaczalności (<2-5 ppm),
- najniższy udział As, Co, Mo, Hf, Mo, Nb, Pb, Th, Y i Cd nie przekracza granicy ich oznaczalności (<2-5 ppm), maksymalna zawartość to 11-21 ppm, średnia arytmetyczna – 6-11 ppm, średnia geometryczna – 6-10 ppm i mediana – 6-11 ppm,
- wyższy udział cechuje Cu, Ga, La i Ni: zawartość minimalna nie przekracza granicy ich oznaczalności (<3-5 ppm), maksymalna zawartość to 27-43 ppm, średnia arytmetyczna – 10-18 ppm, średnia geometryczna – 7-16 ppm i mediana – 5-18 ppm,
- większą zawartość wykazują Bi, Cr, Br i V: zawartość minimalna bądź nie przekracza granicy ich oznaczalności (<2-5 ppm) lub wynosi 10 ppm, maksymalna zawartość to 54-81 ppm, średnia arytmetyczna – 22-31 ppm, średnia geometryczna – 9-25 ppm i mediana – 6-28 ppm,
- jeszcze wyższy i bardzo zróżnicowany jest udział takich pierwiastków jak Ba, Rb, Zn i Zr: ich minimalna zawartość to od granicy ich oznaczalności (<3-10 ppm) do 12 ppm, maksymalna zawartość wynosi 108-147 ppm, średnia arytmetyczna – 42-69 ppm, średnia geometryczna – 36-59 ppm i mediana – 40-68 ppm.

Najwięcej badane zuby zawierają strontu (Sr): zawartość minimalna to 42 ppm, maksymalna zawartość - 15109 ppm, średnia arytmetyczna – 782 ppm, średnia geometryczna – 309 ppm i mediana – 265 ppm,

- the maximum content characterizes silicon (SiO₂) and sodium oxides (Na₂O), as well as pure chlorine (Cl): minimum content: 0.43-2.17%; maximum content: 49.3-55.89%; arithmetic mean: 22.32-27.66%; geometric mean: 17.26-24.0%; median: 20.77-27.67%.

The high content of calcium, sulfur, silica, sodium, and chlorine in the zuber rocks is a result of their composition, which consists of a mixture of clay matter and halite with traces of calcium sulfates (gypsum, anhydrite), siliciclasts, and carbonates. The significant presence of impurities and clay matter disqualifies zuber rocks as a valuable mineral resource for road salt, industrial, or consumer use.

The content of trace elements in the 43 samples is quite diverse (Table 3):

- the content of elements such as Ta, U, and W typically does not exceed the limit of their detectability (<2-5 ppm),
- the lowest amounts of As, Co, Mo, Hf, Mo, Nb, Pb, Th, Y, and Cd does not exceed the limit of their detectability (<2-5 ppm); the maximum content is 11-21 ppm, the arithmetic mean is 6-11 ppm, the geometric mean is 6-10 ppm, and the median is 6-11 ppm.
- higher content levels are found in Cu, Ga, La, and Ni, with the minimum content remaining below their detectability limits (<3-5 ppm), the maximum content being 27-43 ppm, the arithmetic mean being 10-18 ppm, the geometric mean being 7-16 ppm, and the median being 5-18 ppm.
- higher content is observed in Bi, Cr, Br, and V, with the minimum content either not exceeding their detectability limits (<2-5 ppm) or reaching 10 ppm. Maximum content ranges from 54 to 81 ppm. The arithmetic mean is 22-31 ppm, the geometric mean is 9-25 ppm, and the median is 6-28 ppm,

Jako źródło pozyskiwania niektórych pierwiastków śladowych jak np. La (lantan), Ga (gal), Hf (hafn) czy Th (tor) zuby miocénskie nie są przydatną kopaliną ze względu na generalnie bardzo niskie ich koncentracje. Jedynym pierwiastkiem występującym w zubrach w większej ilości jest związany z siarczanami wapnia - stront (średnio ok. 0,03-0,08%).

4. SKŁAD MINERALNY

Wcześniejsze badania rentgenowskie składu zubrów miocénskich (Pawlikowski, 1975, 1978) wykazały obecność kalcytu, gipsu, skaleni, w niewielkiej ilości chlorytu, spośród zaś minerałów ilastych zostały rozpoznane montmorylonit, kaolinit i przerosty montmorylonitowo-kaolinowe.

Badania składu mineralnego zubrów miocénskich z użyciem mikroskopu polaryzacyjnego przeprowadzono na 50 płytkach cienkich. Główne oznaczone minerały i składniki to (Ryc. 6):

- halit: monokryształy wielkości kilku mm (Ryc. 6B, C, E), z licznymi inkluzjami podkreślającymi strefową (zonalną) budowę,
- anhydryt: niewielkie monokryształy (Ryc. 6B) lub skupienia/konkrecje (Ryc. 6A, C), niekiedy w formie rozet i wypełnień cienkich żyłek, liczne klasty zbudowane z anhydrytu bądź gipsu, ponadto siarczany często tworzy spoiwo skały (Ryc. 6B, D, F),
- substancja ilasta (Ryc. 6A, D): tworzy ona piłśń, zbudowaną z bardzo drobnych łuseczek minerałów ilastych,
- kwarc i skaleni: detrytyczne ziarna o zmiennym obciążeniu (Ryc. 6C, F), tkwią w masie ilastej; wielkość ziaren kwarcu zmienna dochodzi do 0,15-0,4 mm, skaleni – do 0,1 mm, ziarna skaleni niezblźniaczonych i plagioklazów w znacznym stopniu zsercytowane,
- glaukonit: sporadycznie, wielkość ziaren do 0,8 mm, niekiedy schlorityzowane,
- muskowit: pospolity, blaszki wielkości do 0,1 mm,
- minerały ciężkie, głównie cyrkon: stosunkowo rzadkie,
- piryt: częsty, forma pigmentu, skupień i pseudomorfoz po szczątkach organicznych,
- rozproszona substancja organiczna,
- węglany: zmienny udział, forma kryształów i skupień drobnokrystalicznych oraz kryptokrystalicznych klastów (geneza glonowa), także skorupki otwornic (Ryc. 6B).

Obserwacje w mikroskopie elektronowym (6 próbek – Czapowski i in., 2002; Starnawska, Czapowski, 2002) potwierdziły obecność wymienionych wcześniej składników. Ponad zidentyfikowano dolomit, biotyt, chalcedon, celestyn, markasyt, sfaleryt i rutyl, spośród zaś minerałów ilastych – illit, smektyt i chloryt.

e) an even higher and highly diverse share is found in elements like Ba, Rb, Zn, and Zr: their minimum content ranges from the limit of their detectability (<3-10 ppm) to 12 ppm, the maximum content is 108-147 ppm, the arithmetic mean is 42-69 ppm, the geometric mean is 36-59 ppm, and the median is 40-68 ppm.

The analyzed zuber samples contain the highest amount of strontium (Sr): the minimum content is 42 ppm, the maximum content is 15109 ppm, the arithmetic mean is 782 ppm, the geometric mean is 309 ppm, and the median is 265 ppm.

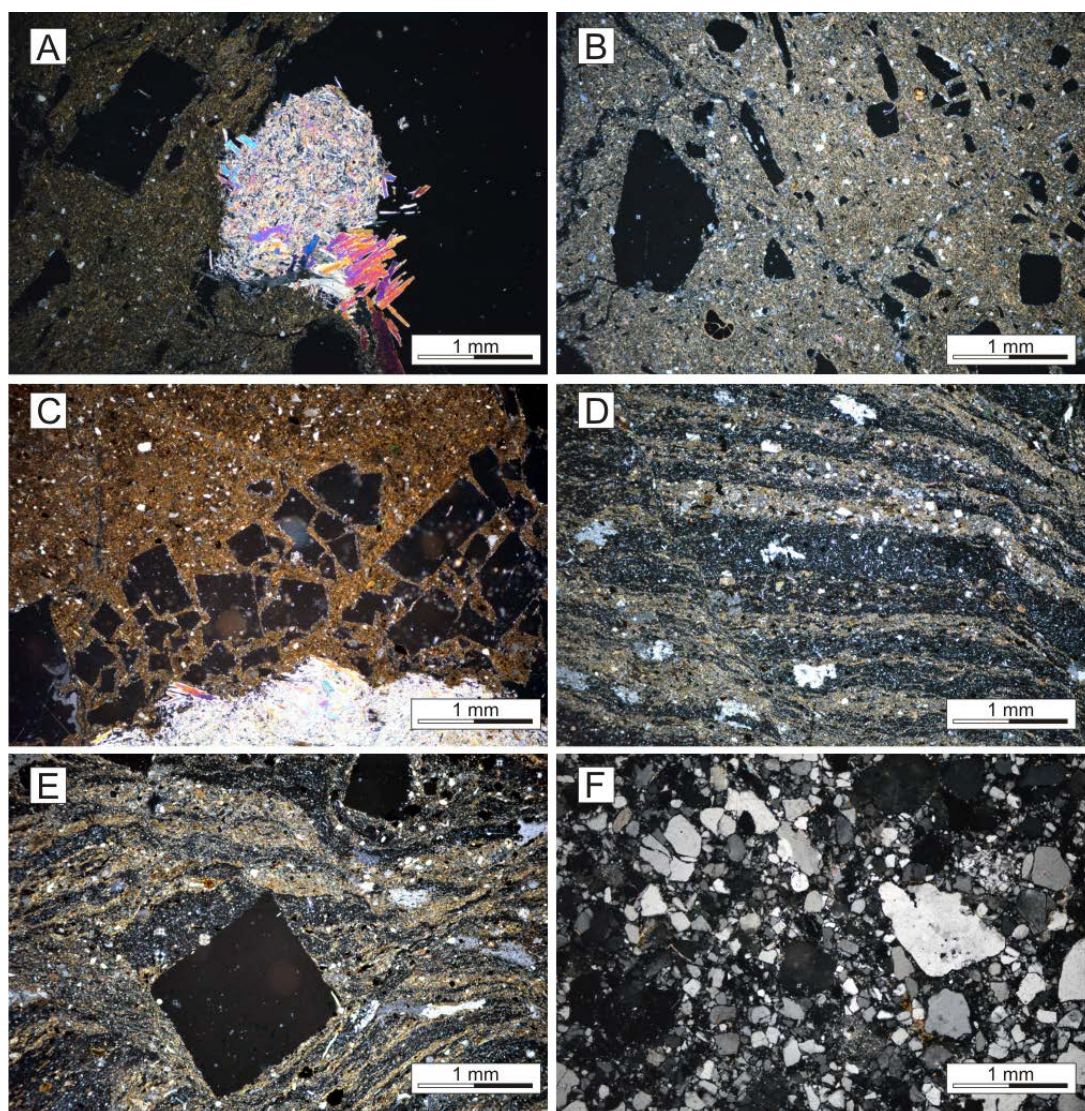
Miocene zuber rocks are not a valuable mineral resource for obtaining certain trace elements like La (lanthanum), Ga (gallium), Hf (hafnium), or Th (thorium) due to their low concentrations. The most abundant element found in zuber rocks is strontium, which is associated with calcium sulfates and averages around 0.03-0.08%.

4. MINERAL COMPOSITION

Earlier X-ray analyses of Miocene zuber rock composition (Pawlikowski, 1975, 1978) revealed the presence of calcite, gypsum, feldspars, and a limited amount of chlorite. Among the clay minerals, montmorillonite, kaolinite, and montmorillonite-kaolinite inter-growths were also identified.

The mineral composition studies of Miocene zuber rocks (50 thin sections) was carried out using a polarizing microscope. The main identified minerals and components are as follows (Fig. 6):

- Halite: monocrystals ranging in size from a few millimetres (Figs 6B, C and E), often exhibiting numerous inclusions highlighting their zonal structure.
- Anhydrite: occurs as small monocrystals (Fig. 6B) or clusters or concretions (Fig. 6A, C), sometimes forming rosettes and filling thin veins. Numerous clasts composed of anhydrite or gypsum are also present, and sulphate often acts as a cementing agent in the rock (Figs 6B, D and F).
- Clay matter (Fig. 6A, D): forms a matrix composed of extremely fine mineral flakes.
- Quartz and feldspar: detrital grains with variable rounding (Fig. 6C, F), embedded in the clay matrix. Quartz grain sizes vary up to 0.15-0.4 mm, while feldspars can reach up to 0.1 mm. Non-twinned feldspar and plagioclase grains are significantly sericitized.
- Glauconite: occasional presence, with grain sizes up to 0.8 mm, sometimes chloritized.
- Muscovite: common, with flakes reaching sizes of up to 0.1 mm.
- Heavy minerals, mainly zircon, are relatively rare.
- Pyrite: frequent occurrence in the form of pigment, aggregates, and pseudomorphs after organic remains.
- Dispersed organic matter.



Ryc. 6. Zubry miocenijskie z kopalń soli w Bochni i Wieliczce w obrazie mikroskopowym.

- A - Zuber o spoiwie ilasto-klastycznym, w centrum kongrecja anhydrytowa, próbka BZ-4, Bochnia;
 B – Zuber o spoiwie siarczanowym z częściowo obtoczonymi lub ostrokrawędzistymi ziarnami halitu, W matriksie widoczne ostrokrawędziste ziarna kwarcu, listewki anhydrytu, związki żelaza oraz pojedyncze otwornice, próbka WZ-8, Wieliczka.
 C – Zuber z drobnymi kryształkami wtórnego, euhedralnego halitu, zarysy kryształów regularne, poniżej większa kongrecja anhydrytowa, próbka BZ-7, Bochnia
 D – Zuber o teksturze wstęgowanej charakteryzująca się obecnością naprzemianległych warstewek o odmiennym składzie (występują naprzemianległe kilkumilimetrowej grubości warstewki siarczanów: gipsu i anhydrytu o barwie jasnoszarej oraz minerałów ilastych), próbka WZ-6, Wieliczka
 E – Zuber o teksturze wstęgowanej, wewnątrz osadu kryształy halitu o regularnym kostkowym zarysie, próbka WZ-6, Wieliczka
 F – Skała piaskowcowo-mułowcowa o strukturze drobnoziarnistej, różnoziarnistej i spoiwie siarczanowym. Wśród składników ziarnistych dominuje kwarc, próbka WZ-7, Wieliczka.

Wszystkie zdjęcia wykonane w świetle przechodzącym, NX, powiększenie 5x.

Fig. 6. Miocene Zuber from Bochnia and Wieliczka salt mines in microscopic view.

- A – Zuber with clayey-clastic matrix and nodular anhydrite, sample BZ-4, Bochnia; B – Zuber with sulphate matrix, partially rounded or sharp-edged halite grains. In the matrix, visible sharp-edged quartz grains, fine anhydrite crystals, iron compounds, and occasional foraminifera, sample WZ-8, Wieliczka.
 C – Zuber with secondary, euhedral halite crystals, and a larger anhydrite concretion below, sample BZ-7, Bochnia.
 D - Banded texture of zuber characterized by alternating layers of different composition (alternate layers of gypsum and light-grey anhydrite of a few millimeters in thickness, along with clay minerals), sample WZ-6, Wieliczka.
 E - Banded texture zuber, with regular cubic-shaped halite crystals inside the sediment, sample WZ-6, Wieliczka.
 F - Sandstone-mudstone rock with a fine and verigrained texture and a sulphate matrix. Quartz dominates among the grain constituents, sample WZ-7, Wieliczka.

All photos were taken in transmitted light, NX, at a magnification of 5x.

Badania rentgenowskie (dyfraktometr PW 1840 Philips, Centralne Laboratorium Chemiczne PIG – 27 próbek) i analiza termiczna (derywatograf firmy MOM, Uniwersytet Śląski – 43 próbki) przeprowadzono na residuum, pozostałym po usunięciu z zuberów soli rozpuszczalnych w wodzie (Czapowski i in., 2002; Cebulak i in., 2004). Wykazały one, oprócz wcześniej wymienionych minerałów, sporadyczne występowanie analcymu, ankerytu, barytu, bassanitu, dolomitu żelazistego, kalcytu i magnezytu, z grupy zaś minerałów ilastych – tzw. minerału 7 Å (interpretowany jako kaolinit bądź szamozyt z rodziny leptochlorytów) oraz minerału mieszanopakietowego I/S (illit/smektyt). Udział węglanów w próbkach zuberów wynosi 7->17%, materii organicznej zaś - od 1% do 2,6%, wyjątkowo – 9,7%.

5. WNIOSKI

Badania próbek zuberów środkowego miocenu z terenu południowej Polski, stanowiących istotny składnik profilu utworów ewaporatowych formacji z Wieliczki, wykazały ich niską przydatność jako kopaliny zarówno do pozyskiwania solanki, jak i pierwiastków śladowych. Wysoki udział siarczanów wapnia (gips, anhydryt), krzemionki i substancji ilastej (>15%; illit, smektyt, chloryty), detrytycznego kwarcu i skaleni (analcym), eliminuje zuber jako sól drogową czy konsumpcyjną.

Jedynym pierwiastkiem śladowym obecnym w większej ilości w zuberach (średnio ok. 0,03-0,08%) jest stront, wiązany w siarczanach wapnia. Udział pozostałych pierwiastków śladowych jest bardzo niski (średnio <0,007%).

Skład mineralny zuberów mioceńskich jest dość bogaty. Obok dominującego halitu, wspomnianych siarczanów wapnia, substancji ilastej i materiału detrytycznego występują: węglany (dolomit, kalcyt, ankeryt, magnezyt), siarczany (baryt, bassanit, celestyn), siarczki (piryt, markasyt, sfaleryt), rutil, cyrkon, muskowitz, biotyt i chalcedon. Zarejestrowano też szczątki organiczne (skorupki otwornic, rozproszona materia organiczna).

Publikacja powstała w oparciu o materiały zawarte w raporcie końcowym z realizacji w latach 2000-2002 projektu pt. *Geneza zuberów późnopermskich i mioceńskich w Polsce – badania porównawcze* (temat nr 6.20.9065.00.0) finansowanego ze środków własnych Państwowego Instytutu Geologicznego.

- Carbonates: variable content, occurring as crystals and clusters of fine- and cryptocrystalline grains (of algal origin), as well as foraminiferal tests (Fig. 6B).

The presence of the above components was verified through electron microscope observations (6 samples; Czapowski et al., 2002; Starnawska, Czapowski, 2002). Additionally, dolomite, biotite, chalcedony, celestine, marcasite, sphalerite, and rutile were identified, along with clay minerals such as illite, smectite, and chlorite.

X-ray examinations (conducted using the PW 1840 Philips diffractometer at the PIG Central Chemical Laboratory-27 samples) and thermal analysis (performed with a MOM derivatograph at the University of Silesia - 43 samples) were carried out on the residue left after the removal of water-soluble salts from the zuber rocks (Czapowski et al., 2002; Cebulak et al., 2004). These analyses, in addition to confirming the presence of the previously mentioned minerals, revealed sporadic occurrences of analcime, ankerite, barite, bassanite, ferrous dolomite, calcite, and magnesite. Among the clay minerals, the so-called mineral 7 Å (interpreted as either kaolinite or a chamosite from the leptochlorite family) and a mixed-layered illite/smectite mineral (I/S) were identified. The carbonate content in the zuber samples amounts from 7% to 17%, and the organic matter ranges from 1% to 2.6%, exceptionally reaching 9.7%.

5. CONCLUSIONS

The research on Middle Miocene zuber samples from the southern Poland region, which constitute a significant component of the evaporite deposits in the Wieliczka Formation, has revealed their limited utility as a resource for both brine extraction and trace elements. The high presence of calcium sulphates (gypsum, anhydrite), silica, and clay minerals (>15%; illite, smectite, chlorite), along with detrital quartz and feldspar (analcime), disqualifies these rocks for use as road salt or for consumption.

The only trace element present in larger quantities in zuber rocks (averaging around 0.03-0.08%) is strontium, bound within calcium sulphates. The contribution of other trace elements is very low, averaging <0.007%.

The mineral composition of Miocene zuber rocks is quite diverse. Alongside the predominant halite, calcium sulphates, clay minerals, and detrital components, a range of additional minerals are present, including carbonates (dolomite, calcite, ankerite, magnesite), sulphates (barite, bassanite, celestine), sulphides (pyrite, marcasite, sphalerite), rutile, zircon, muscovite, biotite, and chalcedony. Furthermore, organic remnants in the form of foraminiferal shells and dispersed organic material have also been identified.

LITERATURA/REFERENCES

- BUKOWSKI K., 1994 - Środowisko sedymentacji i geneza bryłowej części złoże w Wieliczce. *Prz. Geol.*, 42 (9): 754-758.
- BUKOWSKI K., 2011 – Badeńska sedymentacja salinarna na obszarze między Rybnikiem a Dębica w świetle badań geochemicznych, izotopowych i radiometrycznych. *Rozprawy i Monografie AGH*, 236:1-184. Wyd. AGH, Kraków.
- BUKOWSKI K., CZAPOWSKI G., 2004 - Eustatic vs tectonic cyclicity of Middle Miocene (Badenian) evaporite from Fore- and Intracarpathian basins (Southern Poland and East Slovakian Areas). Abstract of Eclipse Project Meeting and RCMNS Interim Colloquium, titled "The Messinian salinity crisis revisited", Corte (Corsica), July 20-24, 2004: 23.
- BUKOWSKI K., CZAPOWSKI G., 2007 - Clastic deposition of chlorides from Marginal Basins – Examples from the Neogene of Poland and Slovakia. Abstract of the First Moroccan Association of Petroleum Geologists Convention, Conference & Exhibition, Marrakech, October 28-31, 2007: 182.
- BUKOWSKI K., CZAPOWSKI G., KAROLI S., 2006 - The redeposition of halite in the Middle Miocene basins of Central Paratethys (Poland and Slovakia). Abstracts of RCMNS Interim Colloquium, 7-9 September, Parma. *Acta Naturalia de "L" Ateneo Parmense*, 42 (2 A.16):2. Parma.
- BUKOWSKI K., MASTEJ W., KĘPIŃSKI J., 2007 – Badania laboratoryjne nad sedymentacją redeponowanych osadów mułowo-solnych na stożku podmorskim. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 23 (1): 175-182.
- CEBULAK S., LANGIER-KUŹNIAROWA A., BZOWSKA G., CZAPOWSKI G., 2004 – Skład mioceńskich skał zubrowych w świetle danych z analizy termicznej i rentgenowskiej. Mat. konferencji nt. Mioceńskie złoże soli w rejonie przykarpackim, 11-12.02.2004, Kraków: 41.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., 2002 – Genesis of clayey salt (zuber) facies (Upper Permian and Middle Miocene case studies from Poland). 16th International Sedimentological Congress Abstract Volume (2002) Johannesburg 8–13 July: 1.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., TOMASSI-MORAWIEC H., 2006 - The clayey salts of epicontinental and foredeep basins (examples of the Upper Permian and the Middle Miocene from Poland). Abstracts of RCMNS Interim Colloquium, 7-9 September, Parma, Italy. *Acta Naturalia de "L" Ateneo Parmense*, 42(2A.16): 2. Parma.
- CZAPOWSKI G., LANGIER-KUŹNIAROWA A., TOMASSI-MORAWIEC H., STARNAWSKA E., IWASIŃSKA-BUDZYK I., NARKIEWICZ W., SKOWROŃSKI L., DOBROSZYCKA T., CEBULAK S., BUKOWSKI K., TOBOŁA T., KOWALEWICZ W. M., GALAMAY A. R., 2002 - Geneza zębów późnopermskich i mioceńskich w Polsce – badania porównawcze:1-103. *NAG PIG* [467/2004], Warszawa.
- GARLICKI A., 1979 - Sedymentacja soli mioceńskich w Polsce. *Prace geol. PAN, Oddz. w Krakowie*, 119: 1-67.
- LANGIER-KUŹNIAROWA A., CEBULAK S., STARNAWSKA E., CZAPOWSKI G., 2002 - Mineral Composition of Mixed Clayey-Salt Deposits (Zubers) from the Neogene (Upper Badenian) Succession of the Polish Carpathian Foredeep. *Mineralogical Collection*, 52 (2): 102-105. Lviv.
- PAWLIKOWSKI M. 1975 - Studium mineralogiczno-petrograficzne utworów terygeniczo - chemicznych złoże solnego Wieliczki. Praca doktorska. *Arch. Zakł. Złóż Rud, Soli i Sur. Chem. AGH*.
- PAWLIKOWSKI M., 1978 - Badania petrograficzne złoże solnego Wieliczki. *Prace Min. PAN*, 58.
- POBORSKI J., 1952 – Złoże solne Bochni na tle geologicznym okolicy. *Biul. PIG*, 78.
- RYKA W., MALISZEWSKA A., 1982 - Słownik petrograficzny. 1-403. Warszawa.
- STARNAWSKA E., CZAPOWSKI G., 2002 - Some mineral components and their genesis in the middle Miocene (Badenian) salt-clay (Zubers) facies from the Carpathian Foredeep (S Poland) in the light of SEM studies. Abstracts of XVIIth Congress of Carpathian-Balkan Geological Association, Bratislava, 1-4 September 2002:20.
- STASIK I., 1988 - W sprawie nomenklatury, terminologii i nazewnictwa skał solnych. *Prz. Geol.*, 36 (5): 294-297..
- TOMASSI-MORAWIEC H., WACHOWIAK J., CZAPOWSKI G., 2019 - Geochemia i wykształcenie skał zubrowych górnego permu (cechsztyn) z obszaru Polski. *Biuletyn PIG*, 477: 69-122.



Nowe kierunki dostaw soli potasowo-magnezowych do Polski

New supply directions of potassium and magnesium salts to Poland

Marta HODBOD¹, Karol ZGLINICKI²

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa, e-mail: marta.hodbod@pgi.gov.pl

² Państwowa Agencja Atomistyki, Nowy Świat 6/12, 00-400 Warszawa, e-mail: karol.zglinicki@paa.gov.pl

¹ Polish Geological Institute – National Research Institute, Rakowiecka 4, 00-975 Warsaw, e-mail: marta.hodbod@pgi.gov.pl

² National Atomic Energy Agency, Nowy Świat 6/12, 00-400 Warsaw, e-mail: karol.zglinicki@paa.gov.pl

Pandemia Covid-19 oraz agresja zbrojna Rosji na Ukrainę przyczyniła się do zaburzenia globalnych łańcuchów dostaw żywności, towarów, w tym surowców (m.in. soli potasowo-magnezowych; fosforytów; siarki) używanych przez przemysł nawozów sztucznych. Strategiczną pozycję na rynku surowców odgrywają sole potasowo-magnezowe (K-Mg). Potas oraz jego związki są kluczowym składnikiem nawozów wykorzystywanych do produkcji żywności dla rosnącej populacji świata. Stały wzrost liczby ludności (1960 – 3,6 mld; 2022 – 8,0 mld), zmniejszenie powierzchni gruntów nadających się pod uprawę (Phosagro, 2020), wzrost światowego PKB (Knoema. World GDP, 2020), zmiany w sposobie odżywiania (Phosagro, 2020) oraz alternatywne zastosowania upraw będą istotnie wpływały na globalny popyt nawozów, w tym nawozów potasowych. Według danych Amerykańskiej Służby Geologicznej (USGS) w 2022 r. konsumpcja soli potasowych w USA wzrosła o około 3% w porównaniu z rokiem 2021. Na światową podaż tego surowca wpłynęły sankcje gospodarcze nałożone na Białoruś i Rosję, co spowodowało wzrost cen i niższe zużycie. USGS szacuje, że światowe zużycie soli potasowych w 2022 r. na produkcję nawozów spadło do 35-39 mln ton z 40,6 mln ton w 2021 roku. Kanadyjscy producenci ogłosili wzrost produkcji w kolejnych latach, oczekuje się tego również od innych krajów eksportujących (Jasinski, 2023). International Fertilizer Association przewiduje, że potencjał wydobycia soli potasowych wzrośnie z 46,7 mln t K₂O w 2022 r. do 54,6 mln t K₂O w 2027 r., co oznacza 17% stopę wzrostu. Prognoza ta zależy m.in. od zdolności Białorusi do zwiększenia alternatywnych dróg wejścia na rynek. Ponadto w latach 2024-2027 spodziewany jest malejący roczny globalny wzrost zużycia nawozów od 4%

The Covid-19 pandemic and Russia's military aggression against Ukraine have contributed to the disruption of global supply chains for food, commodities, including raw materials (potassium-magnesium salts; phosphate rocks; sulfur, among others) used by the fertilizer industry. Potassium-magnesium salts (K-Mg) play a strategic position in the raw materials market. Potassium and its compounds are a key ingredient in fertilizers used for food production for the world's growing population. Steady population growth (1960 – 3.6 billion; 2022 – 8.0 billion), a reduction in the area of land suitable for cultivation (Phosagro, 2020), an increase in global GDP (Knoema. World GDP, 2020), changes in diet (Phosagro, 2020) and alternative uses for crops will significantly affect global demand for fertilizers, including potash fertilizers. According to data from the U.S. Geological Survey (USGS), US consumption of potassium salts increased by about 3% in 2022 compared to 2021. Global supply of the commodity was affected by economic sanctions on Belarus and Russia, resulting in higher prices and lower consumption. The USGS estimates that global consumption of potash salts for fertiliser production in 2022 fell to 35-39 million tonnes from 40.6 million tonnes in 2021. Canadian producers have announced an increase in production in future years, and this is also expected from other exporting countries (Jasinski, 2023). The International Fertilizer Association predicts that the potential for potash salt production will increase from 46.7 million t K₂O in 2022 to 54.6 million t K₂O in 2027, a 17% growth rate. This forecast depends on Belarus' ability to increase alternative routes to market. In addition, a declining annual global increase in fertiliser consumption is expected between 2024

w 2023 r. do 1,2% w 2027 r., w tym soli potasowych do ok 14% więcej niż w roku 2022 (IFA, 2023).

Unia Europejska, w tym Polska jest w pełni zależna od zewnętrznych źródeł dostaw potasu. Sankcje ekonomiczne nałożone przez Unię Europejską oraz Stany Zjednoczone w wyniku łamania międzynarodowego prawa przez Białoruś oraz Rosję za agresję zbrojną, przyczyniły do ograniczenia importu oraz deficytu potasu na europejskim rynku. Brak surowców niezbędnych do produkcji żywności wpływa bezpośrednio na bezpieczeństwo żywnościowe oraz surowcowe państwa, będące składową bezpieczeństwa narodowego.

W Polsce sole K-Mg występują w cechsztyńskiej formacji solnej, która stanowi część ogromnego środkowoeuropejskiego permskiego (cechsztyńskiego) basenu sedimentacyjnego. Pomimo dobrego rozpoznania geologicznego kraju, w Polsce jak dotąd udokumentowano 5 złóż soli K-Mg: w pokładowej formacji solnej na Kaszubach, w rejonie Zatoki Puckiej – złoża: Chłapowo, Mieroszyno, Swarzewo i Zdrada oraz w wysadzie solnym Kłodawa, gdzie towarzyszy złożu soli kamiennej Kłodawa 1. Łączne zasoby tych złóż wynoszą ok. 705 mln ton soli K-Mg. Ponadto wystąpienia soli K-Mg znane są z większości obszarów występowania cechsztyńskiej soli kamiennej. Polska posiada stosunkowo duże szacunkowe zasoby perspektywiczne – o słabym rozpoznaniu geologicznym, wynikającym przede wszystkim ze znacznych głębokości zalegania. Przewidywane (prognostyczne i perspektywiczne) zasoby soli K-Mg, obliczone wyłącznie dla złóż pokładowych, oszacowano na 3,64 mld ton (Czapowski i in., 2020). Występowanie tych złóż stwierdzono na obszarze monokliny mazursko-podlaskiej, monokliny przedsudeckiej oraz niecki północnosudeckiej (peryklina Żar), o łącznej powierzchni ponad 466 km² (Czapowski i in., 2020). Do niedawna (1980-2000) eksploatacja soli K-Mg prowadzona była na niewielką skalę w Kopalni Soli „Kłodawa” S.A. (Czapowski i in., 2020). Obecnie w Polsce nie prowadzi się górniczej eksploatacji soli K-Mg, przy czym wspomniana Kopalnia Soli „Kłodawa” S.A. posiada koncesję nr 5/2028 na wydobywanie soli kamiennej oraz soli potasowo-magnezowej jako kopaliny towarzyszącej ze złoża „Kłodawa 1”. Prowadzone są także prace poszukiwawczo-rozpoznawcze soli potasowo-magnezowych w okolicach Pucka w ramach koncesji nr 28/2014/p przez KGHM Polska Miedź S.A. Ponadto w 2023 r. złożone zostały dwa wnioski o udzielenie koncesji na rozpoznawanie złóż soli potasowych i potasowo-magnezowych w obszarze „Kozuchów-Zielona Góra” i „Otyń-Nowa Sól”.

Brak własnych źródeł soli K-Mg wymaga podjęcia pilnych działań zmierzających do zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego i surowcowego poprzez: 1) rozpoznanie krajowego potencjału surowcowego soli K-Mg; 2) import potasu oraz jego związków z innych źródeł przy bezpiecznym łańcuchu dostaw; 3) współpracę międzynarodową w zakresie poszukiwania soli K-Mg przez polskie firmy geologiczne i górnicze.

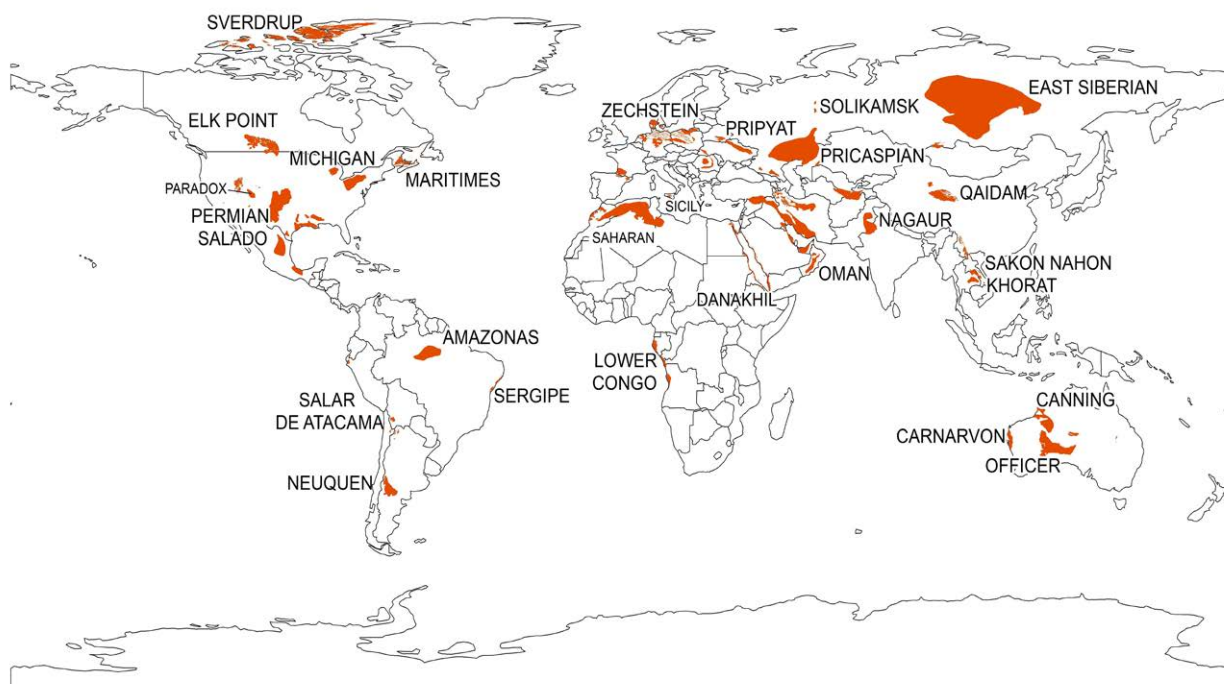
and 2027, from 4% in 2023 to 1.2% in 2027, including potassium salts up to about 14% more than in 2022 (IFA, 2023).

The European Union, including Poland, is fully dependent on external sources of potash supplies. Economic sanctions imposed by the European Union and the United States as a result of violations of international law by Belarus and Russia for armed aggression have contributed to a reduction in imports and a deficit of potash in the European market. The lack of raw materials necessary for food production directly affects the country's food and raw material security, both which are components of national security.

In Poland, K-Mg salt occurs in the Zechstein salt formation, which is part of the vast Permian Central European (Zechstein) sedimentary basin. Despite the country's well-identified geology, 5 K-Mg salt deposits have been documented in Poland so far: in the Zechstein salt formation in Kashubia, in the Puck Bay region - deposits: Chłapowo, Mieroszyno, Swarzewo and Zdrada and in the Kłodawa salt dome, where it's associated with the Kłodawa 1 rock salt deposit. The total resources of these deposits are estimated at 705 million tons of K-Mg salt. In addition, occurrences of K-Mg salt are known from most areas of Zechstein rock salt. Poland has relatively large estimated prospective resources - with poor geological recognition, mainly due to the significant depths. The projected (prognostic and prospective) K-Mg salt resources, calculated only for seam deposits, are estimated at 3.64 billion tons (Czapowski et al., 2020). The occurrence of these deposits was found in the area of the Mazurian-Podlasie Monocline, the Fore-Sudetic Monocline and the North Sudetic Trough (Żary Pericline), with a total area of more than 466 km² (Czapowski et al., 2020). Until recently (1980-2000), K-Mg salt mining was carried out on a small scale at the Kłodawa Salt Mine S.A. (Czapowski et al., 2020). Currently, there is no mining of K-Mg salt in Poland, however, the Kłodawa Salt Mine S.A. holds concession no. 5/2028 for mining rock salt and potassium-magnesium salt as an associated mineral from the “Kłodawa 1” deposit. Exploration and prospecting of potassium and magnesium salts in the area of Puck under licence no. 28/2014/p by KGHM Polska Miedź S.A. is also underway. In addition, two applications for concessions for the exploration of potassium and potassium-magnesium salt deposits in the “Kozuchów-Zielona Góra” and “Otyń-Nowa Sól” areas were submitted in 2023.

The lack of own sources of K-Mg salt requires urgent action to ensure food and raw material security by: 1) recognizing the domestic resource potential of K-Mg salt; 2) importing potassium and its compounds from other sources with a secure supply chain; 3) international cooperation in the exploration of K-Mg salt by Polish geological and mining companies.

K-Mg salts are known from all geological periods and continents on Earth (Fig. 1): North America: Elk Point, Mari-



Ryc. 1. Mapa obszarów występowania soli potasowych na świecie (wg. Orris i in., 2014).
Fig. 1. Map of the occurrence areas of potassium salts in the world (acc. to Orris et al 2014).

Sole K-Mg znane są ze wszystkich okresów geologicznych i kontynentów na Ziemi (Ryc. 1): Ameryce Północnej: Elk Point, Maritimes, Paradox i Salado, w Europie: cechsztyński, prypecki, Solikamsk i przedkaspiski, w Afryce: Danakil i Dolne Kongo, w Azji: Morze Martwe, Khorat, Sakon Nakon, Qaidam i baseny centralnej Azji, w Ameryce Południowej: amazoński, Sergipe, Salar de Atacama i Neuquén (Cocker i in., 2016).

Złoża soli K-Mg w przewadze są złożami kopalnymi. Współczesne akumulacje soli potasowych o dużym znaczeniu są rzadkie, a dobrze rozpoznane, są tylko dwa naturalne stratyfikowane złoża, znajdujące się w Chinach – basen Qaidam oraz w Etiopii – depresja Danakil. Basen Qaidam – bezodpływowa kotlina tektoniczna w północno-wschodniej części Wyżyny Tybetańskiej, w zachodnich Chinach. Inne naturalne, ale znacznie mniejsze złoża soli potasowych tworzą się m.in. w słonych jeziorach kontynentalnych, na playach oraz w glebach, także w postaci efemerycznych wykwitów mineralnych (Warren, 2016).

Zgodnie z raportem USGS Mineral Commodity Summaries 2023 (Jasinski, 2023) całkowite zasoby soli potasowych na świecie wynoszą około 250 mld t, a ich największe udokumentowane zasoby znajdują się w Rosji, Kanadzie oraz Białorusi (Tab. 1).

Światowy rynek potasu charakteryzuje się stosunkowo niewielką liczbą producentów, zwłaszcza tych największych. Ponad 90% udziału w światowej produkcji ma zaledwie 10 firm (Ryc. 2).

times, Paradox and Salado; in Europe: Zechstein, Pripyat, Solikamsk and Pre-Caspian; in Africa: Danakil and Lower Congo; in Asia: Dead Sea, Khorat, Sakon Nakon, Qaidam and the basins of Central Asian; in South America: Amazonian, Sergipe, Salar de Atacama and Neuquén (Cocker et al., 2016).

Potash deposits are predominantly ancient deposits. Significant modern accumulations of potash are rare, with only two well-defined natural stratified deposits, located in China - the Qaidam Basin and in Ethiopia - the Danakil Depression. Qaidam Basin - a tectonic basin in the northeastern part of the Tibetan Plateau, in western China. Other natural, but volumetrically minor deposits of potassium salt are formed, among others, in continental lakes, playas and soils, either in ephemeral mineral efflorescences (Warren, 2016).

According to the USGS Mineral Commodity Summaries 2023 report (Jasinski, 2023), the world's total potash reserves are estimated at about 250 billion tons, with the largest proven reserves in Russia, Canada and Belarus (Tab. 1).

The global potash market is characterized by a relatively small number of producers, especially few large producers. As few as 10 companies account for more than 90% of global production (Fig. 2).

When looking for new supply directions, Poland should undoubtedly focus on the largest producers, leaving out Russian and Belarusian companies, which are subject to international sanctions. Topping the list of countries with the highest potash production is Canada, where the Nutrien company is based. The salts are extracted by underground methods at

Tabela 1. Produkcja górnicza oraz udokumentowane zasoby soli K-Mg na świecie (w tys. ton) dla wybranych krajów wg. danych USGS (Jasinski, 2022, 2023).

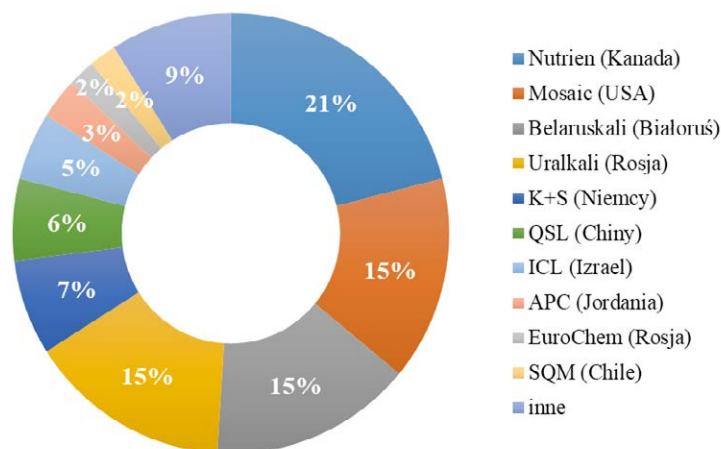
Table 1. Mine production and salts K-Mg ores reserves (in thousand metric tons) of selected countries after USGS (Jasinski, 2022, 2023).

Kraj	Produkcja górnicza			Zasoby	
	2020	2021	2022 ^s	Zasoby do pozyskania	Ekwiwalent K ₂ O
Białoruś	7 400	7 630 ^s	3 000	3 300 000	750 000
Brazylia	254	270	270	10 000	2 300
Chiny	6 000	6 000 ^s	6 000	b.d	170 000
Hiszpania	420	365	450	b.d	68 000
Izrael	2 280	2 380	2 500	b.d	b.d
Jordania	1 590	1 560	1 700	b.d	b.d
Kanada	13 800	14 200	16 000	4 500 000	1 100 000
Niemcy	2 200	2 800 ^s	2 800	b.d	150 000
Rosja	8 110	9 100	5 000	b.d	400 000
USA	460	480	440	970 000	220 000
Świat	44 000	46 300	40 000	>11 000 000	>3 300 000

s – szacowane; b.d – brak danych;

Poszukując nowych kierunków dostaw, Polska powinna niewątpliwie skupić się na największych producentach, pomijając spółki rosyjskie i białoruskie, które objęte są międzynarodowymi sankcjami. Na czele listy krajów o najwyższej produkcji potasu znajduje się Kanada, gdzie swoją siedzibę ma spółka Nutrien. Sole eksploatowane są metodą podziemną w kilku kopalniach, z jednego z największych złóż soli potasowych na świecie – z dewońskiej formacji Praire w obrębie basenu Elk Point, w prowincji Saskatchewan (Nutrien, 2022). Ta sama formacja jest głównym źródłem pozyskania potasu także dla amerykańskiej spółki Mosaic, która posiada 3 kopalnie i zakłady produkcyjne w tym regionie: Belle Plaine, Colonsay i Esterhazy. Ponadto pozyskuje surowiec w kopalni w Carlsbad

several mines, from one of the largest potassium salt deposits in the world - the Devonian Praire formation within the Elk Point Basin, in the Saskatchewan province (Nutrien, 2022). The same formation is a major source of potash acquisition also for a US company called Mosaic, which has 3 mines and production facilities in the region: Belle Plaine, Colonsay and Esterhazy. In addition, it obtains raw material from a mine in Carlsbad (New Mexico, USA) (Mosaic, 2022). Germany's K+S bases its mining mainly on Permian Zechstein Basin deposits, as well as the Canadian deposit of the aforementioned Elk Point Basin, in the Saskatchewan province (K+S, 2022). China's QLS extracts potash from the saline Qinghai Driftless Lake, in Qinghai Province in western China (www.



Ryc. 2. Udział poszczególnych producentów soli potasowych na rynku międzynarodowym (ICL, 2022).

Fig. 2. Share of individual producers of potash on the international market (ICL, 2022).

(Nowy Meksyk, USA) (Mosaic, 2022). Niemiecka spółka K+S swoje wydobycie opiera głównie na permskich złożach basenu cechsztyńskiego, a także na kanadyjskim złożu wspomnianego już basenu Elk Point, w prowincji Saskatchewan (K+S, 2022). Chińskie QLS pozyskuje sole potasowe ze słonego, bezodpływowego jeziora Qinghai, w prowincji Qinghai w zachodniej części Chin (www.qhsalt.com.cn). Spółka Israel Chemicals Limited (ICL) prowadzi wydobycie na obszarze Morza Martwego – z wody morskiej pozyskuje m.in. potas, brom, chlorek sodu, magnezję, chlorek magnezu i magnez metaliczny. Eksploatacja opiera się na ekstrakcji karnalitu ($\text{KCl}\cdot\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$) poprzez proces odparowywania, w południowej, płytkiej części Morza Martwego, na powierzchni ok. 150 km² na obszarze Izraela. W ostatnich latach 2020 – 2021 doszło do rekordowej rocznej produkcji soli K-Mg w tym rejonie, osiągającej prawie 4 mln ton (ICL, 2022). ICL posiada również kopalnię Boulby w północnej części Wielkiej Brytanii, gdzie eksploatowane są złoża permskich (cechsztyńskich) polihalitów ($\text{K}_2\text{SO}_4\cdot\text{MgSO}_4\cdot 2\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Zdolność produkcyjna kopalni wynosi około 1 mln ton rocznie (odnotowano 789 tys. t w 2021 r.). Ponadto ICL prowadzi w Hiszpanii (Suria, Katalonia) podziemną kopalnię sylwinitu (KCl) wykształconego w późnym eocenie w basenie ewaporatowym Ebro (ICL, 2022). Arab Potash Company (APC) z Jordanii pozyskuje surowiec potasowy (głównie karnalit), podobnie jak ICL, na drodze ewaporacji wody z Morza Martwego. Zakład produkcyjny znajduje się 110 km na południe od Ammanu i posiada zdolność produkcyjną wynoszącą około 2,35 mln ton soli potasowych rocznie (Arab Potash Company, 2022). Chilijska spółka Sociedad Química y Minera S.A. (SQM) prowadzi produkcję związków potasu na obszarze olbrzymiego solniska w północnej części kraju – Salar de Atacama, z solanki wydobywanej spod powierzchni ziemi za pomocą studni pompowych, a następnie odparowywanej w stawach ewaporacyjnych (Sociedad Química y Minera de Chile S.A., 2022).

Pomimo że wymienieni „giganci potasowi” dysponują dużymi złożami surowca potasowego oraz zapewniają o możliwościach podniesienia zdolności produkcyjnych, nie będą w stanie w dłuższej perspektywie czasu zapewnić dostaw całemu światu. Dla Europy oraz Polski ważnym źródłem pozyskania potasu będzie kopalnia Muga spółki Highfield Resources, zlokalizowana w prowincjach Navarra i Aragón w Północnej Hiszpanii. Znajdują się tam stosunkowo płytko położone pokłady eocenijskiego złoża sylwinitu – na głębokości ok. 350 metrów od powierzchni terenu. Według szacunków spółki zasoby eksploatacyjne surowca potasowego (ang. *ore reserves*) wynoszą 104,3 mln t, przy średniej zawartości K_2O 10,2%, a zasoby (ang. *resources*) szacowane są na 282,2 mln t, przy średniej zawartości K_2O 11,8% (Highfield Resources, 2022). Planowana kopalnia ma funkcjonować 30 lat. Obecnie spółka dysponuje wszystkimi niezbędnymi pozwoleniami i wchodzi w fazę budowy kopalni Muga, która potrwa kilka lat.

qhsalt.com.cn). Israel Chemicals Limited (ICL) is mining in the Dead Sea area - it extracts potassium, bromine, sodium chloride, magnesia, magnesium chloride and magnesium metal, among others, from seawater. Exploitation is based on the extraction of carnalite ($\text{KCl}\cdot\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$) through an evaporation process, in the southern, shallow part of the Dead Sea, over an area of about 150 square kilometers within Israel. A record annual production of K-Mg salt in the area, reaching nearly 4 million tons, occurred in the recent years 2020 - 2021 (ICL, 2022). ICL also operates the Boulby mine in northern Britain, where Permian (Zechstein) polyhalites ($\text{K}_2\text{SO}_4\cdot\text{MgSO}_4\cdot 2\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) are mined. The mine's production capacity is about 1 million tons per year (789,000 tons reported in 2021). In addition, ICL operates an underground sylvinite (KCl) mine in Spain (Suria, Catalonia) developed in the late Eocene in the Ebro Basin (ICL, 2022). The Arab Potash Company (APC) of Jordan obtains the potash (mainly carnalite), like ICL, by evaporating water from the Dead Sea. The production facility is located 110 kilometers south of Amman and has a production capacity of about 2.35 million tons of potash per year (Arab Potash Company, 2022). Chile's SQM produces potassium compounds in the area of the giant salar in the northern part of the country, the Salar de Atacama, from brine extracted from beneath the earth's surface via pumping wells and then evaporated in evaporation ponds (Sociedad Química y Minera de Chile S.A., 2022).

Despite the fact that the aforementioned “potash giants” manage large deposits of potassium raw material and assure of the possibility of increasing production capacity, they will not be able to supply the whole world in the long term. For Europe and Poland, an important source of potash will be Highfield Resources' Muga Project, located in the provinces of Navarra and Aragón in northern Spain. The project targets relatively shallow deposits of Eocene sylvinite deposits – at a depth of about 350 meters from the ground surface. According to the company's estimates, the ore reserves are equal to 104.3 million tons, with an average K_2O content of 10.2%, and the resources are estimated at 282.2 million tons, with an average K_2O content of 11.8% (Highfield Resources, 2022). The planned mine is expected to operate for 30 years. The company currently has all the necessary permits and is entering the construction phase of the Muga mine, which will take several years.

Highfield Resources also manages two other potash projects: Pintanos located adjacent to the Muga project and the Sierra del Perdón, located southeast of Pamplona. Both projects are under development (Highfield Resources, 2022).

Such prospective projects are being developed on the African continent – in the Republic of Congo (Brazzaville) and Morocco. One of the companies operating in the K-Mg salt exploration and mining sector in the Republic of Congo is Kore Potash. The company is developing 3 projects: DX (sylvinite

Highfield Resources zarządza również dwoma innymi obszarami, na których występują złoża soli potasowych: Pintanos położonym w sąsiedztwie obszaru Muga oraz Sierra del Perdón położonym na południowy wschód od Pampeluny. Oba projekty są w fazie poszukiwawczo-rozpoznawczej (Highfield Resources, 2022).

Perspektywiczne, nowe projekty realizowane są na kontynencie afrykańskim – w Republice Konga (Brazzaville) oraz Maroko. Jedną z firm działających w sektorze poszukiwawczo-wydobywczym soli K-Mg w Republice Konga jest Kore Potash. Spółka realizuje 3 projekty: DX (złożenie sylwinitu), Kola (złożenie sylwinitowo-karnalitowe), Dougou (złożenie karnalitowe), położone w południowo-zachodniej części kraju, na wybrzeżu Atlantyku (Dolne Kongo, Ryc. 2). Seria ewaporatowa utworzyła się w okresie kredy, w rozciągniętym basenie kongijskim. Kore posiada znaczące w skali światowej złoża potasu oraz ma potencjał, aby stać się najtańszą dostawcą potasu głównie na rynki afrykańskie i brazylijski. Wpływają na to przede wszystkim warunki geologiczne – wysokogatunkowe złoża potasowe (ok. 35% zawartości KCl), położone na stosunkowo niewielkiej głębokości 180 m do 300 m, jak i warunki infrastrukturalne – około 80 km na północ od miasta Pointe Noire i ok. 25 km od wybrzeża Atlantyku. Najbardziej obiecującym jest projekt DX z zasobami (ang. *mineral resources*) 232 mln t sylwinitu (przy zawartości 38,1% KCl). Ponadto w obrębie koncesji prowadzone są prace poszukiwawczo-rozpoznawcze, gdzie szacuje się występowanie 320-600 mln t surowca (przy zawartości 30-38% KCl). Kolejnym w strategii rozwoju spółki jest projekt Kola z szacowanymi zasobami (*measured and indicated mineral resource*) 508 mln t (przy zawartości 35,4% KCl). Przewidywana roczna produkcja wynosi 2,2 mln t, na przestrzeni 33 lat (www.korepotash.com).

Khemisset Potash to projekt potasowy zlokalizowany w północnym Maroku, należący do spółki Emmerson Plc. Seria ewaporatowa tego regionu tworzyła się w zamkniętym basenie morskim utworzonym w wyniku otwierania się grzbietu śródatlantyckiego, na przełomie triasu i jury. Miąższość osadów ewaporatowych składających się głównie z halitu, gipsu i lokalnie z sylwinitu i karnalitu, miejscami przekracza nawet 1000 m. Szacowane zasoby (ang. *resource*) soli potasowych wynoszą 537 mln t przy średniej zawartości K_2O 9,24%. Szacowana produkcja wyniesie ok. 6 mln ton soli potasowych rocznie. Okres eksploatacji planowany jest na minimum 19 lat. Projekt z jednej strony nastawiony będzie na pokrywanie zapotrzebowania nawozów w Afryce, z drugiej strony znajduje się blisko rynku europejskiego, na który również może się utworzyć (Emmerson, 2020).

deposit), Kola (sylwinito-karnalit deposit), Dougou (karnalit deposit), located in the southwestern part of the country, on the Atlantic coast (Lower Congo, Fig. 2). The evaporite series formed during the Cretaceous period, in the widely extended Congo Basin. Kore has globally significant potash deposits and has the potential to become the least expensive supplier of potash mainly to the African and Brazilian markets. This is primarily influenced by geological conditions - high-grade potash deposits (about 35% KCl content), located at a relatively shallow depth of 180m to 300m, as well as infrastructure conditions - about 80km north of the city of Pointe Noire and about 25km from the Atlantic coast. The most promising is the DX project with mineral resources estimated at 232 million t of sylwinitu (at 38.1% KCl). In addition, exploration and appraisal work is being carried out as part of the concession, where an estimated 320-600 million t of mineral resources (at 30-38% KCl) are found. Another in the company's development strategy is the Kola project with estimated measured and indicated mineral resource of 508 million t (at 35.4% KCl content). Projected annual production is 2.2 million t, over 33 years (www.korepotash.com).

Khemisset Potash is a potassium project located in northern Morocco, owned by Emmerson Plc. The evaporite series in this region formed in a closed marine basin as a result of opening of the mid-Atlantic ridge, at the turn of the Triassic and Jurassic. The thickness of the evaporite sediments, consisting mainly of halite, gypsum and locally of sylwinitu and karnalitu, exceeds up to 1 000 meters in some places. The resources of potash are estimated at 537 million tons with an average K_2O content of 9.24%. Estimated annual production will be about 6 million tons of potash per year. The initial operating period is assumed to be 19 years. On the one hand, the project will be geared toward covering fertilizer needs in Africa, while on the other hand it is close to the European market, which it could also open up to (Emmerson, 2020).

LITERATURA/REFERENCES

- ARAB POTASH COMPANY, 2022. Annual Report 2021 [www document]. https://www.arabpotash.com/ebv4.0/root_storage/en/eb_list_page/annual_report_2021_en.pdf
- COCKER M.D., ORRIS G.J., WYNN J., 2016. U.S. Geological Survey assessment of global potash production and resources - A significant advancement for global development and a sustainable future. *W: Geoscience for the Public Good and Global Development: Toward a Sustainable Future* (red. G.R. Wessel, J.K. Greenberg). *Geological Society of America Special Paper*, 520: 89–98.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., MAZUREK S., 2020. Sól kamienna (rock salt, salt, halites) i sole potasowo-magnezowe (potashsalts, potassium salts, potassium-magnesium salts). *W: Bilans perspektywicznych zasobów kopalni Polski wg stanu na 31.12.2018 r.* (red. Szamałek K., Szufflicki M., Mizerski W.): 218–232. PIG-PIB, Warszawa.
- EMMERSON, 2020. Feasibility Study Confirms Low Capex, High Margin Potash Minewith Outstanding Economic Metrics [www document]. <https://www.emmersonplc.com/wp-content/uploads/2020/05/Feasibility-Study-Long-Form-1.06.20-FINAL-FOR-WEBSITE.pdf>
- HIGHFIELD RESOURCES, 2022. Annual Report 31 December 2021 [www document]. <https://www.highfieldresources.com.au/wp-content/uploads/sites/2/2022/03/annualReport2022.pdf>
- <https://korepotash.com/projects/overview-of-assets/>
- <https://www.industryarc.com/Report/15988/potassium-sulphate-market.html>
- <http://www.qhsalt.com.cn/foreign/eng/index.asp>
- ICL, 2022. Annual report for the Period Ended December 31, 2021 [www document]. https://s27.q4cdn.com/112109382/files/doc_financials/2021/ar/ICL-2021-Annual-Report-FINAL.pdf
- IFA, 2023. Public Summary Medium-Term Fertilizer Outlook 2023 – 2027, IFA Market Intelligence Service.
- JASINSKI, S.M., 2022. Potash. *W: Mineral commodity summaries 2021*. U.S. Geological Survey.
- JASINSKI, S.M., 2023. Potash. *W: Mineral commodity summaries 2022*. U.S. Geological Survey.
- KNOEMA. World GDP. <https://knoema.com/sxesqmf/world-gdp> [dostęp 18.07.2022].
- K+S, 2022. Annual Report 2021. K+S Aktiengesellschaft, Kassel, Germany [www document]. <https://www.kpluss.com/en-us/investor-relations/publications/annual-report/>
- MOSAIC, 2022. 2021 Annual Report [www document]. https://s1.q4cdn.com/823038994/files/doc_financials/2021/ar/2021AnnualReport_FINAL.pdf
- NUTRIEN, 2022. 2022 Fact Book [www document]. <https://nutrien-prod-asset.s3.us-east-2.amazonaws.com/s3fs-public/uploads/2022-06/Nutrien%202022%20Fact%20Book.pdf>
- ORRIS G.J., COCKER M.D., DUNLAP P., WYNN J., SPANSKI G.T., BRIGGS D.A., GASS L., przy udziale BLISS J.D., BOLM K.S., YANG C., LIPIN B.R., LUDINGTON S., MILLER R.J., SLOWAKIEWICZ M., 2014. Potash – A global overview of evaporite-related potash resources, including spatial databases of deposits, occurrences, and permissive tracts. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5090–S, pp. 76, dane przestrzenne: <http://dx.doi.org/10.3133/sir20105090S>.
- PHOSAGRO, 2020. Reports and Results, https://www.phosagro.ru/investors/reports_and_results [dostęp 18.07.2022].
- SOCIEDAD QUÍMICA Y MINERA DE CHILE S.A., 2022. Annual Report 2021 [www document]. https://s25.q4cdn.com/757756353/files/doc_financials/2021/ar/Memoria-Anual-2021_eng1.pdf
- WARREN J. K., 2016. Evaporites. A Geological Compendium. Second edition. Springer International Publishing Switzerland: I-1813.



Skład chemiczny soli spożywczych – sole kłodawskie na tle tak zwanych soli morskich

Chemical composition of commercial table salts – rock salt from Kłodawa in comparison with so-called sea salts

Joanna JAWORSKA¹, Przemysław NIEDZIELSKI²

¹ Instytut Geologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, ul. B. Krygowskiego 12, 61-680 Poznań; e-mail: veronika@amu.edu.pl

² Wydział Chemii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, ul. Uniwersytetu Poznańskiego 8, 61-614 Poznań; e-mail: przemyslaw.niedzielski@amu.edu.pl

¹ Institute of Geology, Adam Mickiewicz University, B. Krygowskiego 12, 61-680 Poznań; e-mail: :veronika@amu.edu.pl

² Faculty of Chemistry, Adam Mickiewicz University, Uniwersytetu Poznańskiego 8, 61-614 Poznań; e-mail: przemyslaw.niedzielski@amu.edu.pl

STRESZCZENIE

Przebadano skład chemiczny 6 soli spożywczych: (1) jednej soli pochodzenia kopalnego, reprezentowanej przez białą sól kamienną z Kłodawy oraz (2) pięciu soli pozyskiwanych współcześnie (tzw. soli morskich), reprezentowanych przez sole morskie z Francji, Portugalii, Włoch i Izraela oraz jedną sól nie-morską z Peru. W badaniach soli porównano zawartość 15 pierwiastków chemicznych — 4 makroelementów: Ca, Mg, K, S oraz 11 mikroelementów: Si, P, Zn, Cd, Pb, Ni, Fe, Cr, Cu, Al, Mn.

Słowa kluczowe: sól spożywcza, sól morska, sól kamienna, analiza chemiczna, makro- i mikroelementy

1. WSTĘP

Sól kuchenna jest minerałem i jednocześnie pospolitym, powszechnie wykorzystywanym produktem spożywczym, głównie jako przyprawa lub naturalny konserwant. Do dyspozycji konsumentów pozostają ich dwa główne rodzaje: sole kopalne oraz sole współczesne. Oba typy soli powstały/powstają tak samo, tzn. w wyniku strącenia osadu NaCl (soli kuchennej/halitu) z przesyconego roztworu jakim jest solanka. Sole współczesne produkowane są w systemach płytkich zbiorników — salin, parowników, panwi solnych (naturalnych lub sztucznych), w warunkach klimatu ciepłego, czy też gorącego i suchego. Zbiorniki te mogą być: (1) częścią odciętej zatoki morskiej lub oceanicznej — wówczas powsta-

ABSTRACT

The chemical composition of 6 brands of commercial table salt was examined: (1) ancient salt, represented by white rock salt from Kłodawa, and (2) modern salt, represented by so-called sea salts from France, Portugal, Italy, and Israel, as well as one non-sea salt from Peru. When testing the salts, a comparison was made of the content of 15 chemical elements: 4 macroelements (Ca, Mg, K, and S) and 11 microelements (Si, P, Zn, Cd, Pb, Ni, Fe, Cr, Cu, Al, and Mn).

Key words: commercial table salt, sea salt, rock salt, chemical analysis, macro- and microelements

1. INTRODUCTION

Table salt is a mineral and also a common product that is widely used, mainly as a seasoning or natural preservative. There are two main types of table salt available to consumers: ancient salt and modern salt. Both types of salts were/are formed in the same way, i.e. by precipitation of sodium chloride (NaCl) (also known as table salt/halite) from a (super) saturated solution such as brine. Modern salts are produced in systems of shallow reservoirs, referred to as salinas or saline pans (natural or artificial), in warm, or hot and dry climates. These reservoirs can be: (1) a part of a cut-off sea or ocean bay, in which case so called sea salt is formed, or (2) a part of a salt lake or pond located inland and fed by salty springs,

je w nich sól morską lub (2) słonym jeziorem albo stawem znajdującym się w głębi łądu i zasilanym słonymi źródłami — wówczas tworzy się w nich sól nie-morska. Sól zbierana jest jako luźne, nieduże kryształki halitu z dna wysychającego zbiornika. Natomiast sole kopalne to skały — sole kamienne, reprezentujące osady tyle, że dawnych mórz, czy też większych zbiorników ewaporatowych (faktycznie to też sole morskie, ale kopalne). Od współczesnych soli różni je wiek formowania oraz wielkość i forma złoża. Wiek złóż soli kopalnych ma szeroki zakres — od prekambriu po neogen (Zhar'kov, 1981, 1984; Warren, 2006). Również forma tych złóż jest zróżnicowana — od prostych lub sfałdowanych pokładów, po wysady solne. Sole kopalne eksploatowane są metodami górnictwami: (1) tradycyjną, „mechaniczną” metodą podziemną, przy użyciu środków strzałowych lub urabiania ręcznego lub (2) metodą „na mokro” poprzez rozpuszczanie złoża soli kamiennej, produkcję solanki i wtórne strącanie kryształków soli (tzw. „sól warzona”). Tylko w kilku wypadkach złoża soli kamiennej eksploatowane są metodą powierzchniową.

Celem niniejszej pracy było porównanie składu chemicznego 6 soli spożywczych, w tym 1 pochodzenia kopalnego oraz 5 pozyskiwanych współcześnie (tzw. soli morskich). W badaniach soli uwzględniono i porównano zawartość 15 pierwiastków chemicznych: Ca, Mg, K, S, Si, P, Zn, Cd, Pb, Ni, Fe, Cr, Cu, Al, Mn.

2. MATERIAŁ BADAWCZY

Obecnie na rynku konsumenckim dostępne są oba typy soli spożywczych, zarówno sole kamienne, jak i sole współczesne (tzw. sole morskie). Pochodzą one z kilku krajów i tym samym reprezentują różne zbiorniki, w których te sole powstały. W niniejszej pracy prezentowane są wyniki analiz chemicznych popularnych soli spożywczych, które można zakupić w większym supermarkecie; są one również dostępne w sklepach internetowych.

Celowo w badaniach pominięto sole warzone. Łącznie przebadano 6 gatunków soli spożywczych, średnio- i drobno-kryształicznych, białych (zob. ryc. 1):

(1) 4 sole morskie: w tym 2 atlantyckie z Francji (SM-Fr) i Portugalii (SM-Po), 1 z Izraela (z Morza Martwego; SM-Iz) i 1 z Włoch (SM-W). W przypadku soli z Włoch nie podano informacji z którego morza ta sól pochodzi;

(2) 1 sól współczesną, nie-morską, pochodzącą z Peru (SNM-Pe); reprezentującą sole zbiornika śródlądowego (jest to sól jodowana) oraz

(3) 1 sól kopalną, kłodawską (Polska) (SK-Pl-K), reprezentującą białe sole kamienne wieku późnopermskiego (cechsztyn) (jest to sól niejodowana).

Określenia sól morską atlantycką, czy też sól z Morza Martwego itp. pochodzą z opisów znajdujących się na opakowaniach i deklaracji producentów oraz dystrybutorów tych soli.

in which case non-sea salt is formed. The salt is harvested as small loose halite crystals from the bottom of the drying pond. On the other hand, ancient salts are rock salts, representing sodium chloride (NaCl) sediments from ancient seas or larger evaporating reservoirs – salt giants (actually, they are also sea salts, but ancient. They differ from modern salts in their age of formation and the size and form of the deposit. The ancient salt deposits range in age from Precambrian to Neogene (Zhar'kov, 1981, 1984; Warren, 2006). The form of these deposits also varies, from horizontal bed or folded bed to salt diapirs. Ancient salts are mined using the following methods: (1) the traditional, “mechanical” underground method, using shooting materials, or by manual winning, or (2) the “wet” method that involves dissolving the deposit of rock salt, brine production, and secondary precipitation of salt crystals. Only in a few cases are the rock salt deposits mined by the surface method.

The paper compares the chemical composition of 6 brands of table salts, including 1 ancient salts and 5 produced today (sea salts). The tests performed on the salts included and compared the content of 15 chemical elements: Ca, Mg, K, S, Si, P, Zn, Cd, Pb, Ni, Fe, Cr, Cu, Al, and Mn.

2. RESEARCH MATERIAL

Nowadays, both types of table salts are available on the consumer market: rock salts and modern salts, which are often sea salts. They come from several countries and thus represent the different reservoirs in which these salts originated. This paper presents the results of chemical analyses of common table salts that can be purchased at major supermarkets; they are also available in online stores. Refined salts were intentionally not included in the study.

A total of 6 grades of table salt were tested (Fig. 1):

(1) 4 sea salts: including 2 Atlantic salts from France (SS-Fr) and Portugal (SS-Po), 1 from Israel (from the Dead Sea; SS-Is), and 1 from Italy (SS-It). In the case of the salt from Italy, no information was provided about which sea the salt came from;

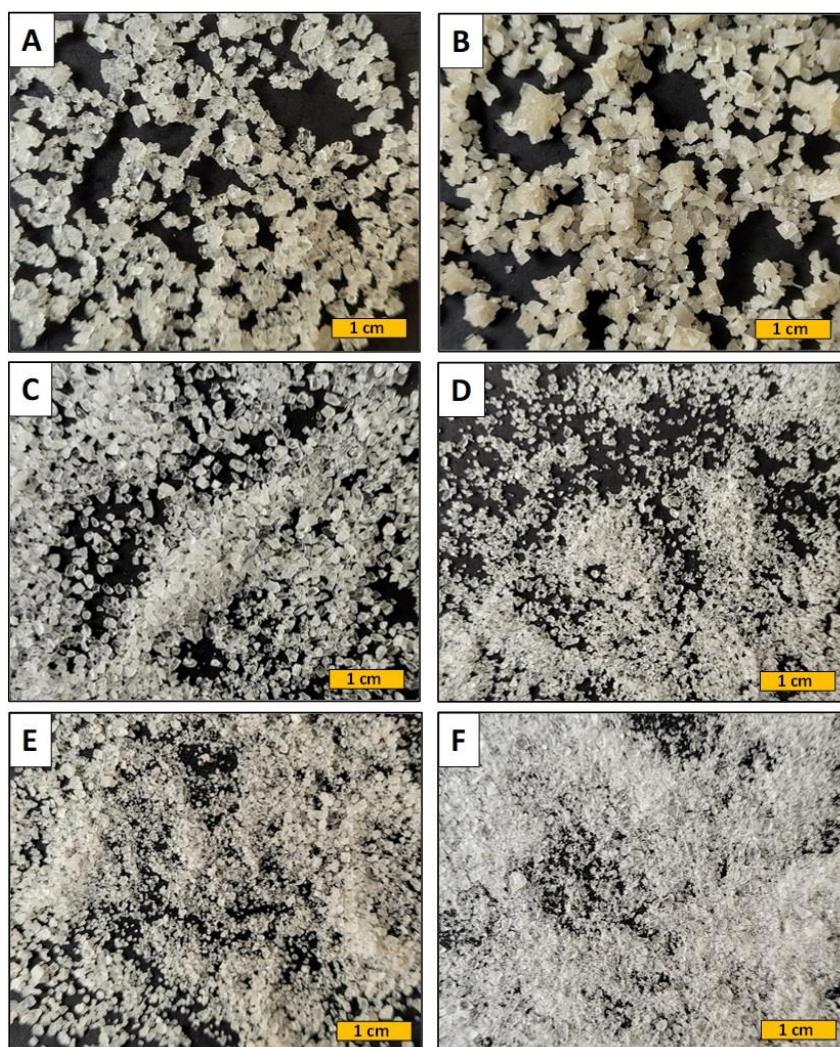
(2) 1 modern, non-sea salt from Peru (NSS-Pe), which is a continental salt; this is an iodized salt; and

(3) 1 ancient salt from Kłodawa (Poland) (RS-Pl-K), representing white rock salts of Late Permian (Zechstein) age; this is a non-iodized salt.

The terms Atlantic sea salt, Dead Sea salt, etc., are derived from descriptions found on the packaging and declarations of the manufacturers and distributors of these salts.

3. METHODOLOGY

The salt samples were dissolved in high purity water obtained in a Milli-Q device (Millipore, Merck, Germany). The aqueous solutions were analyzed using high-resolution opti-



Ryc. 1. Próbkki soli spożywczych: A – sól morską z Portugalii, B – sól morską z Francji, C – sól morską z Włoch, D – sól morską z Izraela, E – sól nie-morską z Peru, F – sól kamienna z Polski (Kłodawa).

Fig. 1. Commercial table salt samples: A - sea salt from Portugal, B - sea salt from France, C - sea salt from Italy, D - sea salt from Israel, E - non-sea salt from Peru, F - rock salt from Poland (Kłodawa).

3. METODYKA BADAŃ

Próbkki soli rozpuszczono w wodzie wysokiej czystości uzyskanej w urządzeniu Milli-Q (Millipore, Merck, Niemcy). Uzyskane wodne roztwory analizowane były z użyciem wysokorozdzielczej optycznej spektrometrii emisyjnej ze wzbudzeniem w plazmie indukcyjnie sprzężonej (ICP hrOES). W oznaczeniach wskazanych powyżej pierwiastków zastosowano procedurę dopasowania matrycy wzorców do matrycy próbek i wzorec wewnętrzny (itr), a w kontroli jakości zastosowano metodę dodatku wzorca.

4. WYNIKI BADAŃ

W tabeli poniżej przedstawiono wyniki badań chemicznych 6 rodzajów soli spożywczych. W analizach wzięto pod uwagę obecność 15 pierwiastków chemicznych — 4 makroelementów: Ca, Mg, K, S oraz 11 mikroelementów: Si, P, Zn, Cd, Pb, Ni, Fe, Cr, Cu, Al, Mn. Wartości wyrażono w mg/kg.

cal emission spectrometry with inductively coupled plasma excitation (ICP hrOES). In the determination of the elements indicated above, the procedure of matching the matrix of standards to the matrix of samples and the internal standard (yttrium) were used, and the standard addition method was used in quality control.

4. RESULTS

The table below shows the results of chemical tests of the 6 brands of table salts. The analyses considered the presence of 15 chemical elements - 4 macroelements (Ca, Mg, K, and S) and 11 microelements (Si, P, Zn, Cd, Pb, Ni, Fe, Cr, Cu, Al, and Mn). The values are expressed in mg/kg.

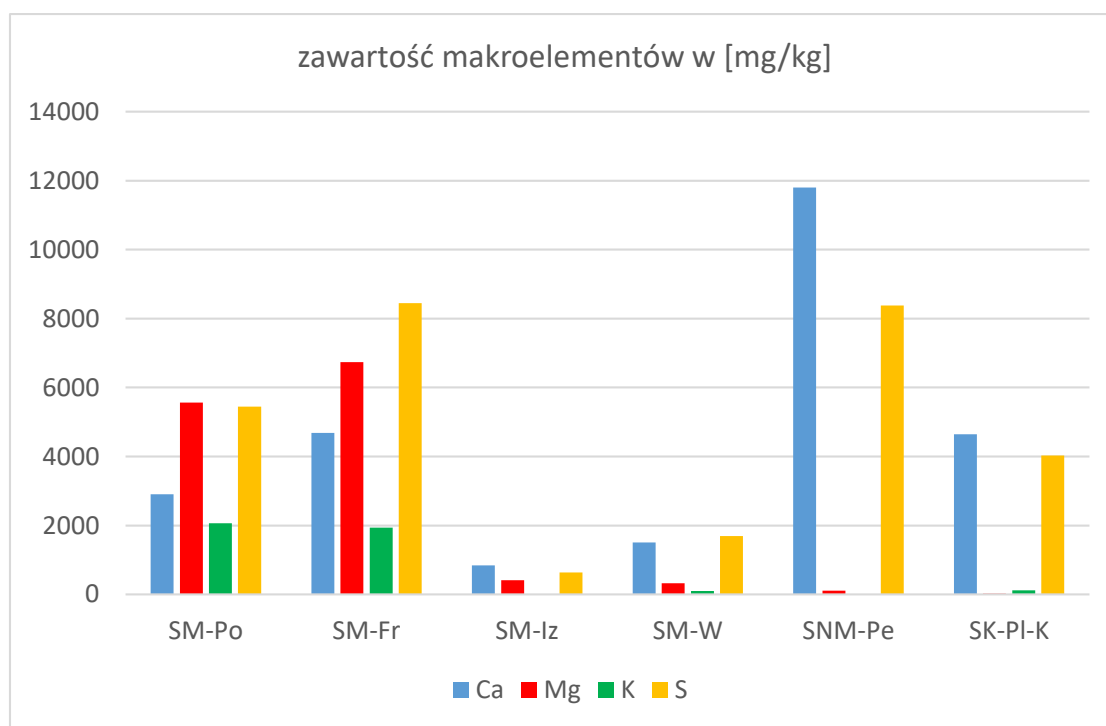
5. DISCUSSION

Salt is an essential component of the human diet, and both its excess and deficiency can be harmful to health. The recom-

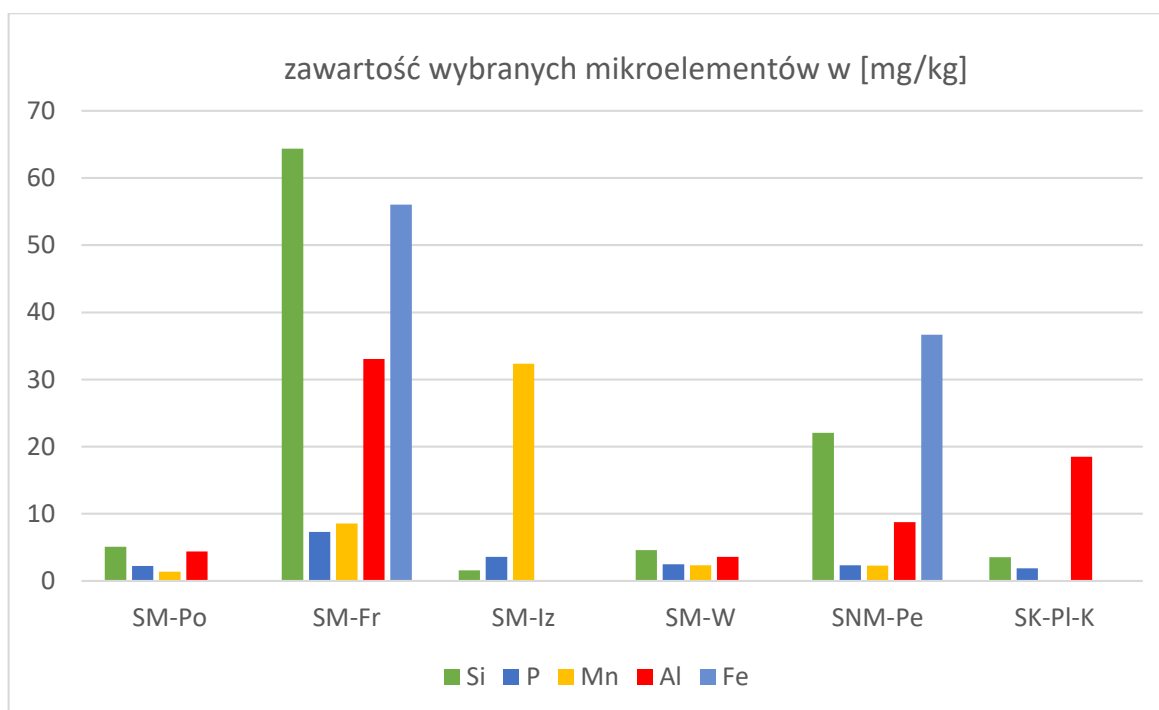
Tabela 1. Skład chemiczny badanych 6 soli spożywczych.
Table 1. The chemical composition of the 6 commercial table salts.

rodzaj soli miejsce produkcji kraj pochodzenia salt types production location country	oznaczenie (symbol) sample ID	wyniki w [mg/kg] results [mg/kg]														
		makroelementy macroelements						mikroelementy microelements								
		Ca	Mg	K	S	Si	P	Mn	Al	Zn	Pb	Ni	Fe	Cr	Cu	Cd
sól morską – atlantycka Portugalia sea salt – Atlantic Oc. Portugal	SM-Po	2900	5560	2060	5450	5.1	2.2	1.4	4.4	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
sól morską – atlantycka Francja sea salt – Atlantic Oc. France	SM-Fr	4680	6740	1940	8450	64.4	7.3	8.5	33.0	0.11	<DL	56.0	0.28	<DL	<DL	<DL
sól morską – Morze Martwe Izrael sea salt – Dead Sea Israel	SM-Iz	839	413	<DL	636	1.6	3.6	32.3	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
sól morską Włochy sea salt Italy	SM-W	1510	325	95	1690	4.6	2.5	2.3	3.6	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
sól nie-morską Peru non-sea salt Peru	SNM-Pe	11800	109	<DL	8380	22.0	2.3	2.3	8.75	3.73	1.7	37.0	<DL	<DL	<DL	<DL
sól kamienna (cechsztyń) Kłodawa, Polska rock salt (Zechstein) Kłodawa, Poland	SK-Pl-K RS-Pl-K	4640	20.3	115	4030	3.5	1.9	<DL	18.5	0.05	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
granica wykrywalności detection limit	DL DL	48	1.1	6.3	4.0	0.47	0.81	0.86	0.5	0.015	0.29	7.9	0.15	0.12	0.075	0.075

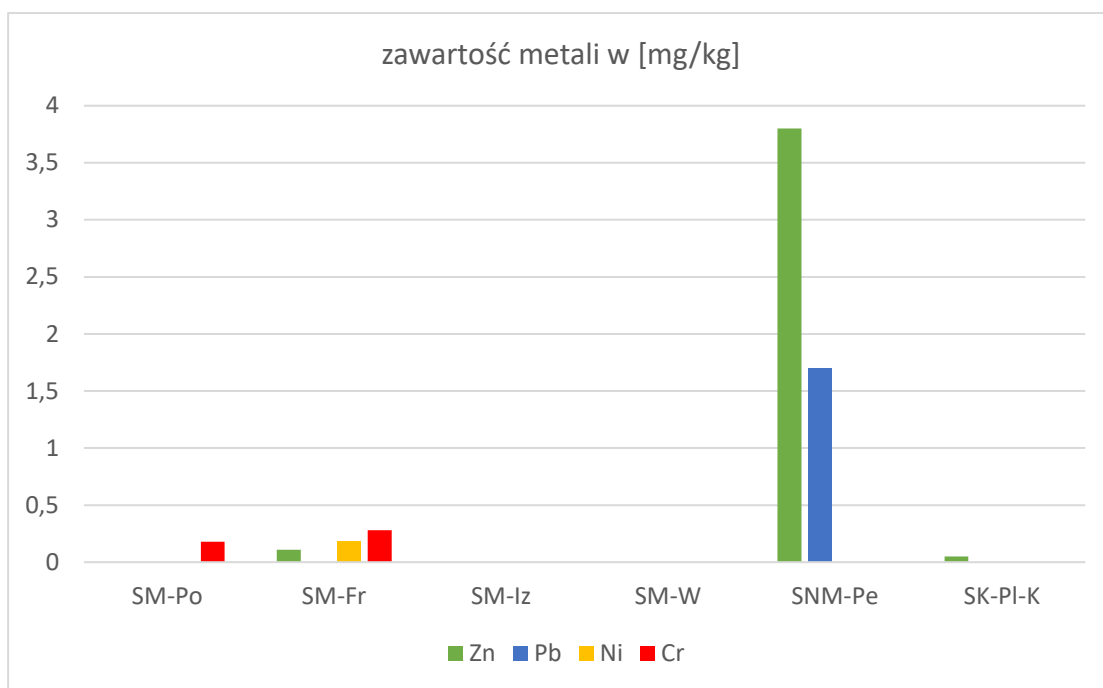
<DL – poniżej granicy wykrywalności
 <DL – below the detection limit



Ryc. 2. Porównanie zawartości makroelementów w badanych solach spożywczych.
Fig. 2. Comparison of the content of macroelements in in studied table salts.



Ryc. 3. Porównanie zawartości wybranych mikroelementów w badanych solach spożywczych.
Fig. 3. Comparison of the content of chosen microelements in studied table salts.



Ryc. 4. Porównanie zawartości wybranych metali w badanych solach spożywczych.
Fig. 4. Comparison of the content of metals in chosen table salts.

5. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Sól jest niezbędnym elementem diety człowieka, a jej nadmiar, jak i niedobór, jest szkodliwy dla zdrowia. Zaleca się spożycie soli w ilościach około 5–6 g na dzień (WHO, 2003 i 2012; Mancina i in., 2007, 2013; https://nadcisnienietetnicze.pl/ptnt/wytyczne_ptnt).

Głównymi składnikami soli spożywczych są jony Cl (60,66%) oraz Na (około 39,34%; zob. np. Patnaik, 2002; <http://webmineral.com/data/Halite.shtml>). Oba jony spełniają istotne funkcje w organizmach; przede wszystkim odpowiadają za utrzymanie równowagi wodno-elektrolitowej i kwasowo-zasadowej oraz prawidłowe funkcjonowanie mięśni i układu nerwowego (Stryer i in., 2007; Ross i in., 2014). Pozostałe jony występują w znacząco mniejszych ilościach. Należą do nich makroelementy, takie jak: potas, wapń, magnez, siarka (prezentowana często jako jon siarczanowy) oraz liczna grupa mikroelementów: żelazo, mangan, glin, nikiel, chrom, ołów, kadm, cynk, miedź, i wiele innych (Titler i Curry, 2011; Yalçin i Mutlu, 2012; Nafees i in., 2013).

Wszystkie makroelementy (Ca, Mg, K) są składnikami pożądanymi w diecie człowieka, podobnie jak niemal wszystkie mikroelementy (np. żelazo, mangan, miedź, chrom, cynk) z zaznaczeniem, że ich dawka nie może przekraczać ustalonych norm (np. Jaroszak i in., 2020; Lindhu, 2012; Nordberg i Cherian, 2012, Otten i in., 2006; Zoroddu i in., 2019). Przykładowe zalecane dzienne normy spożycia (RDA – Recommended Dietary Allowances) poszczególnych pierwiastków dla dorosłego człowieka (w zależności od płci i wieku) wynoszą: K – 3500 mg/dobę, Ca – 1000-1200 mg/dobę, Mg – 310-

6 g per day (WHO, 2003 and 2012; Mancina et al., 2007, 2013).

The main components of table salts are Cl ions (60.66%) and Na ions (about 39.34%; see, for example, Patnaik, 2002; <http://webmineral.com/data/Halite.shtml>). Other ions are present in significantly smaller amounts. The latter include macroelements such as potassium, calcium, magnesium, and sulfur (often in the form of sulfate ion), and a large group of microelements: iron, manganese, aluminum, nickel, chromium, lead, cadmium, zinc, copper, and many others (Titler & Curry, 2011; Yalçin & Mutlu, 2012; Nafees et al., 2013). Salt is an essential part of the human diet. It is responsible for the water and acid-base balance of organisms (Stryer et al., 2007), and its excess, as well as deficiency, is harmful to health. A salt intake of about 5-6 g per day is recommended (WHO, 2003; Mancina et al., 2007, 2013).

All macroelements (Ca, Mg, K) are desirable components in the human diet, much like almost all microelements (e.g., iron, manganese, copper, chromium, zinc), with the caveat that their intake must not exceed established norms (e.g., Jaroszak et al., 2020; Lindhu, 2012; Nordberg and Cherian, 2012, Otten et al., 2006; Zoroddu et al., 2019). Sample recommended daily allowances (RDAs) for individual elements for an adult human (depending on gender and age) are as follows: K – 3500 mg/day, Ca – 1000-1200 mg/day, Mg – 310-420 mg/day, Fe – 10-18 mg/day, Mn – 1.8-2.3 mg/day, Cu – 0.9 mg/day, Zn – 8-11 mg/day, P – 700 mg/day (e.g., Jaroszak et al., 2020; Institute of Medicine, Food and Nutrition Board, 2001). The upper safe levels (ULs) for intake are, for instance, 25 mg/day for Zn and 5 mg/day for Cu (EFSA, 2018).

420 mg/dobę, Fe – 10-18 mg/dobę, Mn – 1,8-2,3 mg/dobę, Cu – 0,9 mg/dobę, Zn – 8-11 mg/dobę, P – 700 mg/dobę (np. Jaroszak i in., 2020; Institute of Medicine, Food and Nutrition Board, 2001). Przy czym przykładowy górny bezpieczny poziom spożycia (UL – Upper Safe Level) dla Zn wynosi 25 mg/dobę a dla Cu – 5 mg/dobę (EFSA, 2018).

Niektóre mikroelementy, takie jak: ołów, kadm czy rtęć, są wysoce niepożądane w produktach spożywczych, ze względu na ich toksyczność, silne oddziaływanie mutagenne czy kancerogenne (np. Fowler i in., 2015; Nielsen, 2013, Nordberg i Cherian, 2012). Należy podkreślić, że wymienione pierwiastki są naturalnymi składnikami przyrody (powietrza, wody, gleby) i występują również w ciele człowieka. Dla organizmów niebezpieczna jest akumulacja tych metali ciężkich. Zależy ona od m.in. przyjętej dawki, stąd wyznaczono maksymalne dopuszczalne zawartości tych pierwiastków w produktach spożywczych, w tym również w soli: Cd – 0,5 mg/kg, Pb – 1 mg/kg, Hg – 0,1 mg/kg (General standard for contaminants and toxins in food and feed, revised in 2019; Contaminants Reference Table, 2022).

Wyniki analiz chemicznych wybranych 6 soli spożywczych przedstawia tabela 1; zilustrowano je dodatkowymi rycinami 2-4. Wartości wyrażono w mg/kg, co oznacza, że w tabeli zaprezentowano dawki makro- i mikroelementów, które konsument przyjąłby w ciągu 200 dni (zakładając, że nie przekracza zalecanej dawki 5 g soli dziennie). To znaczy, że w celu określenia dziennej dawki danego pierwiastka, które jest przyjmowane wraz ze spożyciem 5 g soli, uzyskane wartości należy podzielić przez 200.

Zestawienie wyników analiz chemicznych 6 wybranych próbek soli spożywczych wskazuje, że:

(1) w odniesieniu do makroelementów (Ca, Mg, K i S; zob. Tab. 1, Ryc. 2).

Wapń (Ca): sól nie-morską, peruwiańską wyróżnia wyjątkowo wysoki udział Ca na poziomie 11800 mg/kg (11,8 g/kg). Zawartość Ca w atlantyckiej soli morskiej pochodzącej z Francji i kłódawskiej soli kamienniej jest porównywalna i wynosi odpowiednio 4680 oraz 4640 mg/kg; sól morska portugalska — zawiera 2900 mg/kg, a sól morska włoska — 1510 mg/kg tego jonu. Najniższy udział Ca odnotowano w soli z Morza Martwego — zaledwie 839 mg/kg.

Zalecana dzienna dawka spożycia Ca wynosi 1000-1200 mg. Zawartość Ca w 5 g soli z Peru wynosi 59 mg, w soli atlantyckiej z Francji — 23,4 mg, a w soli kłódawskiej — 23,2 mg. W pozostałych solach udział Ca jest jeszcze mniejszy.

Magnez (Mg): najwięcej jonów Mg znajduje się w atlantyckich solach morskich pochodzących z Francji i Portugalii — odpowiednio 6740 i 5560 mg/kg, znacząco niższe wartości oznaczono w solach morskich z Morza Martwego i z Włoch — odpowiednio 413 i 325 mg/kg, w dalszej kolejności w solach nie-morskich z Peru — zaledwie 109 mg/kg, a najniższa w solach kamiennych z Kłódawy — 20,3 mg/kg.

Some microelements, such as lead, cadmium, or mercury, are highly undesirable in food products due to their toxicity and strong mutagenic or carcinogenic effects (e.g., Fowler et al., 2015; Nielsen, 2013, Nordberg and Cherian, 2012). It should be emphasized that these mentioned elements are natural components of the environment (air, water, soil) and also occur in the human body. The accumulation of these heavy metals is dangerous for organisms. It depends, among other factors, on the ingested dose, which is why maximum permissible contents of these elements have been established in food products, including salt: Cd – 0.5 mg/kg, Pb – 1 mg/kg, Hg – 0.1 mg/kg (General standard for contaminants and toxins in food and feed, revised in 2019; Contaminants Reference Table, 2022).

The results of the chemical analyses of selected 6 table salts are shown in Table 1; they are illustrated in additional Figures 1-3. The values are expressed in mg/kg, which means that the table presents the doses of macro- and microelements that a consumer would take in 200 days (assuming that he or she does not exceed the recommended dose of 5 g of salt per day). To determine the daily intake of a given element with the consumption of 5 grams of salt, the values given in the table should be divided by 200.

A compilation of the results of the chemical analyses of the 6 selected samples of table salts indicates that:

(1) Regarding macroelements (Ca, Mg, K, and S ions; see Tab. 1, Fig. 2):

Calcium (Ca): the Peruvian non-sea salt is distinguished by its exceptionally high proportion of Ca ions at the level of 11,800 mg/kg (11.8 g/kg). The contents of the Ca ion in the Atlantic sea salt from France and the Kłodawa rock salt are comparable, at the level of 4,680 and 4,640 mg/kg, respectively; the Portuguese sea salt contains 2,900 mg/kg and the Italian sea salt - 1,510 mg/kg of that ion. The lowest content of Ca ions was found in the Dead Sea salt - just 839 mg/kg.

The recommended daily intake of Ca is 1000-1200 mg. The content of Ca in 5 g of salt from Peru is 59 mg, in Atlantic salt from France, it's 23.4 mg, and in Kłodawa salt, it's 23.2 mg. In other salts, the presence of Ca is even lower.

Magnesium (Mg): the highest content of Mg ions was found in the Atlantic sea salts from France and Portugal - 6,740 and 5,560 mg/kg, respectively; significantly lower values were determined in sea salts from the Dead Sea and from Italy - 413 and 325 mg/kg, respectively, followed by non-sea salts from Peru - only 109 mg/kg; the lowest content was determined in the rock salt from Kłodawa - 20.3 mg/kg.

The recommended daily intake of Mg is 310-420 mg. The content of Mg in 5 g of Atlantic salt from France is 33.7 mg, and from Portugal, it's 27.8 mg. In other salts, the presence of Mg is significantly lower.

Potassium (K): as with Mg ions, the highest values for the content of K ions were recorded in the Atlantic sea salts from

Zalecana dzienna dawka spożycia Mg wynosi 310-420 mg. Zawartość Mg w 5 g soli atlantyckiej z Francji wynosi 33,7 mg, a z Portugalii — 27,8 mg. W pozostałych solach udział Mg jest znacząco mniejszy.

Potas (K): podobnie jak w przypadku Mg największe wartości udziału K odnotowano w atlantyckich solach morskich pochodzących z Francji i Portugalii — odpowiednio 1940 i 2060 mg/kg. W soli kamiennej kłodawskiej oznaczono 115 mg/kg tego jonu, a w solach morskich z Włoch blisko 95,0 mg/kg. W solach morskich z Morza Martwego, jak i solach nie-morskich z Peru, zawartość K była poniżej granicy wykrywalności (tzn. poniżej 6,3 mg/kg).

Zalecana dzienna dawka spożycia K wynosi 3500 mg. Zawartość K w 5 g soli atlantyckich wynosi około 10 mg. W pozostałych solach udział K jest znacząco mniejszy.

Siarka (S): najwięcej S znajduje się w atlantyckich solach morskich pochodzących z Francji oraz solach nie-morskich z Peru — odpowiednio 8450 i 8380 mg/kg, następnie w atlantyckich solach morskich pochodzących z Portugalii — 5450 mg/kg oraz w soli kamiennej kłodawskiej — 4030 mg/kg. Najmniej S zawierają sole morskie z Włoch — 1690 mg/kg oraz z Morza Martwego — 636 mg/kg. Siarka w solach powiązana jest głównie z jodem siarczanowym (SO_4^{2-}).

(2) W odniesieniu do mikroelementów (Si, P, Mn, Fe i Al; zob. Tab. 1, Ryc. 3).

Krzem (Si): najwięcej Si znajduje się w atlantyckich solach morskich pochodzących z Francji oraz solach nie-morskich z Peru — odpowiednio 64,4 i 22,0 mg/kg. W pozostałych solach udział jonów Si jest porównywalny, przy czym najmniejsze ilości odnotowano w solach morskich z Morza Martwego — około 1,6 mg/kg.

Fosfor (P): występuje we wszystkich badanych solach na bardzo zbliżonym poziomie od 7,3 mg/kg w przypadku soli morskich z Francji do 1,9 mg/kg w solach kamiennych kłodawskich.

Zalecana dzienna dawka spożycia P wynosi 700 mg. Zawartość P w 5 g wszystkich typów badanych soli spożywczych wynosi poniżej 0,04 mg.

Mangan (Mn): największy udział Mn odnotowano w solach morskich z Morza Martwego, na poziomie 32,3 mg/kg. W solach morskich atlantyckich z Francji zawartość Mn wyniosła około 8,5 mg/kg, podczas gdy w solach z Portugalii — blisko 1,4 mg/kg. W pozostałych solach — soli morskiej z Włoch i soli nie-morskiej z Peru na podobnym poziomie około 2,3 mg/kg. W solach kamiennych kłodawskich zawartość Mn była poniżej granicy wykrywalności (tzn. poniżej 0,86 mg/kg).

Zalecana dzienna dawka spożycia Mn wynosi 1,8-2,3 mg. Zawartość Mn w 5 g soli z Morza Martwego wynosi około 0,16 mg. W pozostałych solach udział Mn jest dużo mniejszy.

Glin (Al): największy udział Al odnotowano w solach morskich atlantyckich z Francji — 33,0 mg/kg, następnie w solach kamiennych kłodawskich — 18,5 mg/kg, solach nie-morskich

France and Portugal - 1,940 and 2,060 mg/kg, respectively. In the rock salt from Kłodawa, 115 mg/kg of that ion was determined, and in the sea salts from Italy it was nearly 95.0 mg/kg. In the Dead Sea salts, as well as the non-sea salts from Peru, the content of K ions was below the detection limit.

The recommended daily intake of K is 3500 mg. The content of K in 5 g of Atlantic salts is about 10 mg. In other salts, the presence of K is significantly lower.

Sulfur (S): the highest content of S ions was found in the Atlantic sea salts from France and the non-sea salts from Peru - 8,450 and 8,380 mg/kg, respectively, followed by the Atlantic sea salts from Portugal - 5,450 mg/kg and the rock salt from Kłodawa - 4,030 mg/kg. The sea salts from Italy (1,690 mg/kg) and from the Dead Sea (636 mg/kg) contain the lowest amounts of S ions. The sulfur contained in the salts is mainly in the form of the sulfate ion (SO_4^{2-}).

(2) Regarding microelements (Si, P, Mn, Fe, and Al ions; see Tab. 1, Fig. 3):

Silicon (Si): the highest content of Si ions was found in the Atlantic sea salts from France and the non-sea salts from Peru - 64.4 and 22.0 mg/kg, respectively. In the other salts, the content of Si ions is comparable, with the smallest amounts recorded in the Dead Sea salts - about 1.6 mg/kg.

Phosphorus (P): P ions are found in all the salts tested at very similar levels, ranging from 7.3 mg/kg in the sea salts from France to 1.9 mg/kg in the rock salts from Kłodawa.

The recommended daily intake of P is 700 mg. The content of P in 5 g of all the types of examined edible salts is below 0.04 mg.

Manganese (Mn): the highest content of Mn ions was recorded in the Dead Sea salts, at 32.3 mg/kg. The Atlantic sea salts from France had a Mn ion content of about 8.5 mg/kg, while those from Portugal had a Mn ion content of nearly 1.4 mg/kg. In the other salts - the sea salts from Italy and the non-sea salts from Peru, it was at similar levels of about 2.3 mg/kg. The Mn content in the Kłodawa rock salts was below the detection limit.

The recommended daily intake of Mn is 1.8-2.3 mg. The content of Mn in 5 g of Dead Sea salt is approximately 0.16 mg. In other salts, the presence of Mn is much lower.

Aluminum (Al): the highest content of Al ions was found in the Atlantic sea salts from France - 33.0 mg/kg, followed by the Kłodawa rock salts - 18.5 mg/kg, the non-sea salts from Peru - 8.75 mg/kg, the Atlantic sea salts from Portugal - 4.4 mg/kg, and the sea salts from Italy - 3.6 mg/kg. In the Dead Sea salts, the content of Al ions was below the detection limit.

Iron (Fe): the content of Fe ions was determined in the Atlantic sea salts from France - at 56.0 mg/kg - and in the non-sea salts from Peru - 37.0 mg/kg. In the remaining salts, the content of Fe ions was below the detection limit.

z Peru — 8,75 mg/kg, w solach morskich atlantyckich z Portugalii — 4,4 mg/kg i solach morskich z Włoch — 3,6 mg/kg. W solach morskich z Morza Martwego zawartość Al była poniżej granicy wykrywalności (tzn. poniżej 0,5 mg/kg).

Żelazo (Fe): zawartość Fe oznaczono w solach morskich atlantyckich z Francji — na poziomie 56,0 mg/kg oraz w solach nie-morskich z Peru — 37,0 mg/kg. W pozostałych solach udział Fe był poniżej granicy wykrywalności (tzn. poniżej 7,9 mg/kg).

Zalecana dzienna dawka spożycia Fe wynosi 10-18 mg. Zawartość Fe w 5 g soli atlantyckiej z Francji wynosi 0,28 mg, a w soli z Peru — 0,19 mg.

W odniesieniu do pozostałych metali (Zn, Pb, Ni i Cr; zob. Tab. 1, Ryc. 4).

Zn oznaczono w solach nie-morskich z Peru — 3,73 mg/kg, w solach morskich atlantyckich z Francji — na poziomie około 0,11 mg/kg oraz w solach kamiennych kłodawskich — 0,05 mg/kg. W pozostałych solach udział Zn był poniżej granicy wykrywalności (tzn. poniżej 0,015 mg/kg).

Zalecana dzienna dawka spożycia Zn wynosi 8-11 mg, przy czym nie powinna przekraczać 25 mg. Zawartość Zn w 5 g soli z Peru wynosi nie więcej niż 0,02 mg. W pozostałych solach udział Zn jest znacząco mniejszy.

Ni oznaczono tylko w solach morskich atlantyckich z Francji — na poziomie około 0,18 mg/kg. Cr oznaczono jedynie w atlantyckich solach morskich pochodzących z Francji i Portugalii — odpowiednio 0,28 i 0,18 mg/kg.

Pb oznaczono tylko w solach nie-morskich z Peru — na poziomie 1,70 mg/kg; wartość ta przekracza ustalony limit dla tego pierwiastka wyznaczony na poziomie 1 mg/kg dla soli (General standard for contaminants and toxins in food and feed, revised in 2019; Contaminants Reference Table, 2022).

Udział Cu i Cd we wszystkich solach był poniżej granicy wykrywalności — odpowiednio poniżej 0,12 i 0,075 mg/kg, co oznacza, że w przypadku Cd w żadnej soli nie została przekroczona maksymalna zawartość tego pierwiastka wyznaczona na poziomie 0,5 mg/kg.

6. PODSUMOWANIE

Przebadane sole spożywcze cechują się różnorodnymi wartościami oznaczonych pierwiastków. Wysoki lub najwyższy udział pierwiastków Mg, K, S, Si, Fe, Al, Cr odnotowano w morskich solach z Francji, pozyskiwanych z wód Atlantyku. Ustępują im pod tym względem morskie sole z Portugalii, również pozyskiwane z Atlantyku, które notują wysoki udział pierwiastków Mg, K, Cr. Wyróżniają się także sole nie-morskie z Peru, które charakteryzuje wyjątkowo wysoki udział pierwiastków Ca, Zn oraz Pb i wysoki udział pierwiastków S, Si, Fe. Sole kamiennie kłodawskie na tym tle plasują się pośrodku pod względem zawartości makroelementów i wykazują zazwyczaj niskie zawartości metali lub ich zawartość jest poniżej granicy wykrywal-

He recommended daily intake of Fe is 10-18 mg. The content of Fe in 5 g of Atlantic salt from France is 0.28 mg, and in salt from Peru, it's 0.19 mg.

Regarding other metals (Zn, Pb, Ni, and Cr ions; see Tab. 1, Fig. 4):

Zn ions were determined in the non-sea salts from Peru - 3.73 mg/kg, in the Atlantic sea salts from France - at the level of about 0.11 mg/kg, and in the Kłodawa rock salts - 0.05 mg/kg. In the remaining salts, the content of Zn ions was below the detection limit.

The recommended daily intake of Zn is 8-11 mg, with an upper limit of 25 mg. The content of Zn in 5 g of salt from Peru is no more than 0.02 mg. In other salts, the presence of Zn is significantly lower.

Ni ions were determined only in the Atlantic sea salts from France, at about 0.18 mg/kg. Cr ions were determined only in the Atlantic sea salts from France and Portugal - 0.28 and about 0.18 mg/kg, respectively. Pb ions were determined only in the non-sea salts from Peru, at 1.70 mg/kg, this value exceeds the established limit for this element set at 1 mg/kg for salt (General standard for contaminants and toxins in food and feed, revised in 2019; Contaminants Reference Table, 2022).

The presence of Cu and Cd in all salts was below the detection limit, respectively below 0.12 and 0.075 mg/kg, which means that for Cd, the maximum content level of 0.5 mg/kg was not exceeded in any of the salts.

6. SUMMARY

The tested table salts are characterized by various contents of the ions determined. A high or the highest content of Mg, K, S, Si, Fe, Al, and Cr ions was recorded in the sea salts from France, which are produced from the water of the Atlantic Ocean. Inferior to them in this regard are the sea salts from Portugal, also produced from the water of the Atlantic ocean, which show a high content of Mg, K, and Cr ions. The non-sea salts from Peru also stand out, with an exceptionally high content of Ca, Zn, and Pb ions, and a high content of S, Si, and Fe ions. In comparison, the Kłodawa rock salts rank in the middle in terms of the content of macroelements and tend to have a low content of metal ions, or their metal content is below the detection limit. The biggest surprise is the very low (or below the detection limit) content of the tested ions in the Dead Sea salts, with the exception of the Mn ion.

In general, table salts (whether sea or rock salts) are primarily a fundamental source of sodium and chloride ions necessary for the proper functioning of the human body. The other macro- and microelements they contain, considering the daily salt intake level of about 5 g, do not constitute a key source of individual elements in the human diet. Table salts can only be considered as products that, in a few cases, slightly supplement the daily body requirements for certain

ności. Największym zaskoczeniem jest bardzo niski (lub poniżej granicy wykrywalności) udział badanych pierwiastków w badanych solach z Morza Martwego; wyjątkiem jest Mn.

Generalnie sole spożywcze (morskie, czy też kamienne) są przede wszystkim podstawowym źródłem jonów sodu i chloru niezbędnych dla prawidłowego funkcjonowania organizmu człowieka. Pozostałe zawarte w nich makro- i mikroelementy, uwzględniając dzienną dawkę spożycia soli na poziomie 5 g, nie stanowią kluczowego źródła poszczególnych pierwiastków w diecie ludzi. Sole spożywcze tylko w kilku przypadkach można uznać, za produkt, który w niewielkim stopniu uzupełni codzienne zapotrzebowanie organizmu na wybrane pierwiastki. Wśród badanych 6 typów soli spożywczych, wyróżniają się sole morskie pochodzenia atlantyckiego. Dzienna dawka soli morskich z Francji może dostarczyć około 10 % codziennego zapotrzebowania na Mg i około 2% — na Fe. Sole morskie z Morza Martwego mogą dostarczyć niespełna 10% codziennego zapotrzebowania na Mn. Natomiast sole z Peru uzupełnią codzienne zapotrzebowanie Ca na poziomie około 6%. Przy czym jednocześnie sole te jako jedyne wykazują wysoki udział Pb, znacznie przekraczając wyznaczony górny limit zawartości tego metalu w solach (aż o 70%).

elements. Among the 6 types of examined table salts, sea salts of Atlantic origin stand out. The daily intake of sea salt from France can provide about 10% of the daily magnesium requirement and about 2% of the iron requirement. Dead Sea salts can provide just under 10% of the daily manganese requirement. Meanwhile, salts from Peru can supplement the daily calcium requirement by approximately 6%. However, these salts also exhibit a high content of lead (Pb), significantly exceeding the established upper limit for the presence of this metal in salts (by as much as 70%).

LITERATURA/REFERENCES

- FOWLER B.A., ALEXANDER J., OSKARSSON A., 2015. Toxic Metals in Food. Handbook on the toxicology of metals, vol. 1: 123-140. Elsevier, Amsterdam.
- JAROSZ M., RYCHLIK E., STOŚ K., CHARZEWSKA J. (red.), 2020. Normy żywienia dla populacji Polski i ich zastosowanie. Narodowy Instytut Zdrowia Publicznego – Państwowy Zakład Higieny.
- LINDH U., 2012. Biological functions of the elements. *Essentials of Medical Geology*, 129-177. Springer.
- MANCIA G. i in., 2007. Guidelines for the management of arterial hypertension: The Task Force for the Management of Arterial Hypertension of the European Society of Hypertension (ESH) and of the European Society of Cardiology (ESC). *European Heart Journal*, 28 (12): 1462–1536. <https://academic.oup.com/eurheartj/article/28/12/1462/2844990#56889485>
- MANCIA G. i in., 2013. Wytyczne ESH/ESC dotyczące postępowania w nadciśnieniu tętniczym w 2013 roku. *Nadciśnienie tętnicze*, 17 (2): 69-168.
- NAFEES M., KHAN N., RUKH S., BASHIR A., 2013. Analysis of rock and sea salts for various essentials and inorganic elements. *J. Sc. & Tech. Univ. Peshawar*, 37 (1): 9-20.
- NIELSEN F.N., 2013. Ultratrace elements. *Encyclopedia of human nutrition*, vol. 4: 299-311. Elsevier.
- NORDBERG M., CHERIAN G.M., 2012. Biological Responses of Elements. *Essentials of Medical Geology*, 195-216. Springer.
- OTTEN J.J., HELLWING J.P., MEYERS L.D. (ed.), 2006. Dietary Reference Intakes. The essential guide to nutrients requirements. Institute of Medicine of National Academies. The National Academies Press, Washington, D.C.
- PATNAIK P., 2002. Handbook of Inorganic Chemicals. New York, NY: McGraw-Hill Professional.
- ROSS C., COUSINS R.J., CABALLERO B. (red.), 2014. Modern Nutrition in Health and Disease. Wolters Kluwer Health, Lippincott Williams & Wilkins.
- STRYER L., TYMOCZKO J.L., BERG J.M., 2007. Biochemia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- TITLER R.V., CURRY P., 2011. Chemical analysis of major constituents and trace contaminants of rock salt. Pennsylvania Department of Environmental Protection.
- WARREN J., 2006. Evaporites: Sediments, resources, and hydrocarbons. Springer, Berlin.
- YALÇIN S., MUTLU I.H., 2012. Structural Characterization of Some Table Salt Samples by XRD, ICP, FTIR and XRF Techniques. *Acta Physica Polonica*, 121: 50-52.
- ZHARKOV M.A., 1981. History of Paleozoic salt accumulation. Springer, Berlin.
- ZHARKOV M.A., 1984. Paleozoic salt bearing formations of the world. Springer, Berlin.
- ZORODDU M.A., AASETH J., CRISPONI G., MEDICI S., PEANA M., NURCHI V.M., 2019. The essential metals for humans: a brief overview. *Journal of Inorganic Biochemistry* 195: 120–129.
- Contaminants Reference Table, 2022. Codex maximum permitted limit (Codex ML) for Contaminants in Food and Feed. <https://www.unicef.org/supply/media/16436/file/Contaminants-List.pdf>

- General standard for contaminants and toxins in food and feed CXS 193-1995; revised in 2019) https://www.fao.org/fao-who-codex-alimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FStandards%252FCXS%2B193-1995%252FCXS_193e.pdf
- Institute of Medicine, Food and Nutrition Board, 2001. Dietary Reference Intakes for Vitamin A, Vitamin K, Arsenic, Boron, Chromium, Copper, Iodine, Iron, Manganese, Molybdenum, Nickel, Silicon, Vanadium, and Zinc. Washington, DC: National Academies Press. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25057538/>
- EFSA, 2018. Summary of Tolerable Upper Intake Levels, version 4, European Food Safety Authority. https://www.efsa.europa.eu/sites/default/files/assets/UL_Summary_tables.pdf
- WHO, 2003. Diet, nutrition and the prevention of chronic diseases. Report of a Joint FAO/WHO expert consultation. Geneva, World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/42665>
- WHO, 2012. Guideline. Sodium intake for adults and children. WHO, Geneva, World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241504836>
- <http://webmineral.com/data/Halite.shtml>
- https://nadcisnienietetnicze.pl/ptnt/wytyczne_ptnt



Skład chemiczny kłodawskich soli kamiennych – porównanie składu soli spożywczej z próbkami soli pobranymi ze złoża

Chemical composition of Kłodawa rock salts – a comparison of the composition of table salt with salt samples from the deposit

Joanna JAWORSKA¹, Przemysław NIEDZIELSKI², Wacław STASZCZAK³

¹ Instytut Geologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, ul. B. Krygowskiego 12, 61-680 Poznań; e-mail: veronika@amu.edu.pl

² Wydział Chemii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, ul. Uniwersytetu Poznańskiego 8, 61-614 Poznań; e-mail: przemyslaw.niedzielski@amu.edu.pl

³ Kopalnia Soli „KŁODAWA” S.A. 62-650 Kłodawa, Aleja 1000-lecia 2; e-mail: wstaszczak@sol-klodawa.com.pl

¹ Institute of Geology, Adam Mickiewicz University, B. Krygowskiego 12, 61-680 Poznań; e-mail: :veronika@amu.edu.pl

² Faculty of Chemistry, Adam Mickiewicz University, Uniwersytetu Poznańskiego 8, 61-614 Poznań; e-mail: przemyslaw.niedzielski@amu.edu.pl

³ „Kłodawa” Salt Mine, Aleja 1000-lecia 2, 62-650 Kłodawa; e-mail: wstaszczak@sol-klodawa.com.pl

STRESZCZENIE

Przebadano skład chemiczny soli kamienny pochodzących z Kopalni Soli „Kłodawa” S.A.: (1) jednej soli spożywczej białej zakupionej w sklepie oraz (2) pięciu próbek soli pochodzących bezpośrednio ze złoża. W badaniach soli porównano zawartość 15 pierwiastków chemicznych — 4 makroelementów: Ca, Mg, K, S oraz 11 mikroelementów: Si, P, Zn, Cd, Pb, Ni, Fe, Cr, Cu, Al, Mn. Dodatkowo uzyskane wyniki analiz chemicznych soli kamiennych porównano z dostępnymi w literaturze badaniami geochemicznymi: soli kamiennych PZ2 z Kłodawy i Mogilna oraz z soli spożywczych himalajskich (białych) i soli morskich z Francji.

Słowa kluczowe: sól kamienna, Kłodawa, makro- i mikroelementy, analiza porównawcza.

1. WSTĘP

Największym producentem soli kamiennej spożywczej na polskim rynku jest Kopalnia Soli „Kłodawa” S.A. Obecnie w swojej ofercie handlowej ma kilka typów soli proponowanych konsumentom.

Złoże kłodawskie ma formę wysadu, o skomplikowanej budowie wewnętrznej, w którym ogniwa soli najstarszych, starszych i młodszych przebijają młodsze serie solne. Po-

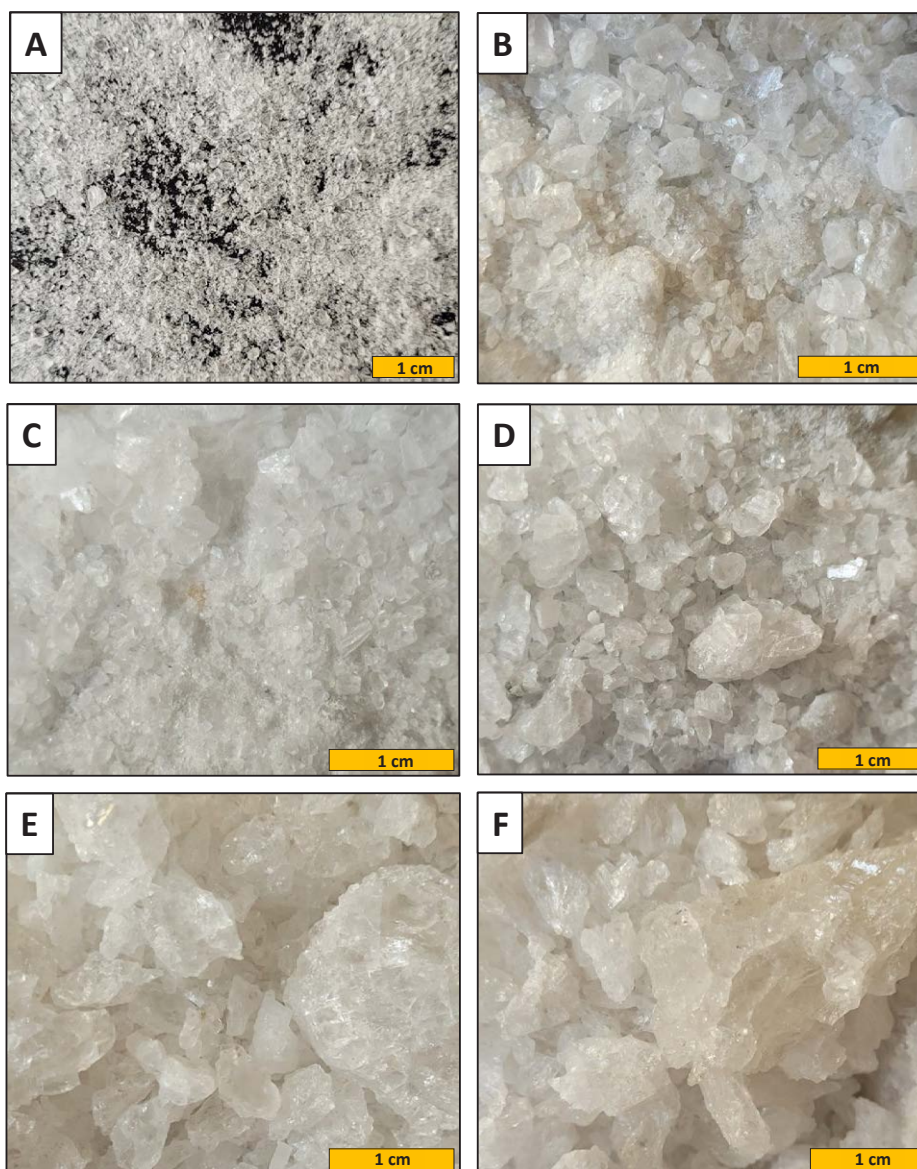
ABSTRACT

The chemical composition of rock salts from the Kłodawa Salt Mine was analyzed: (1) one white table salt bought in a store and (2) five salt samples coming directly from the deposit. The test of the salt compared the content of 15 chemical elements - 4 macroelements: Ca, Mg, K, and S, and 11 microelements: Si, P, Zn, Cd, Pb, Ni, Fe, Cr, Cu, Al, and Mn. In addition, the results obtained from the chemical analysis of rock salts have been compared with the geochemical studies available in the literature: PZ2 rock salt from Kłodawa and Mogilno, as well as white Himalayan table salt and sea salt from France.”

Key words: rock salt, Kłodawa, macro- and microelements, comparative analysis.

1. INTRODUCTION

The largest producer of table rock salt on the Polish market is the Kłodawa Salt Mine. At present it offers several types of salt to consumers. The Kłodawa salt deposit is a salt dome, with a complex internal structure in which the Oldest (Na1), the Older (Na2) and Younger Halite (Na3) beds piercing through the Youngest Halite (Na4) beds. Individual salt beds are folded, tilted at steep angles, sometimes segmented,



Ryc. 1. Próbkę soli kamiennych z Kłodawy: A – sól kamienna spożywcza (SK-SP), B – sól kamienna próbka nr 14604 (Pr. 1), C – sól kamienna próbka nr 14605 (Pr. 2), D – sól kamienna próbka nr 14606 (Pr. 3), E – sól kamienna próbka nr 14607 (Pr. 4), F – sól kamienna próbka nr 14608 (Pr. 5).

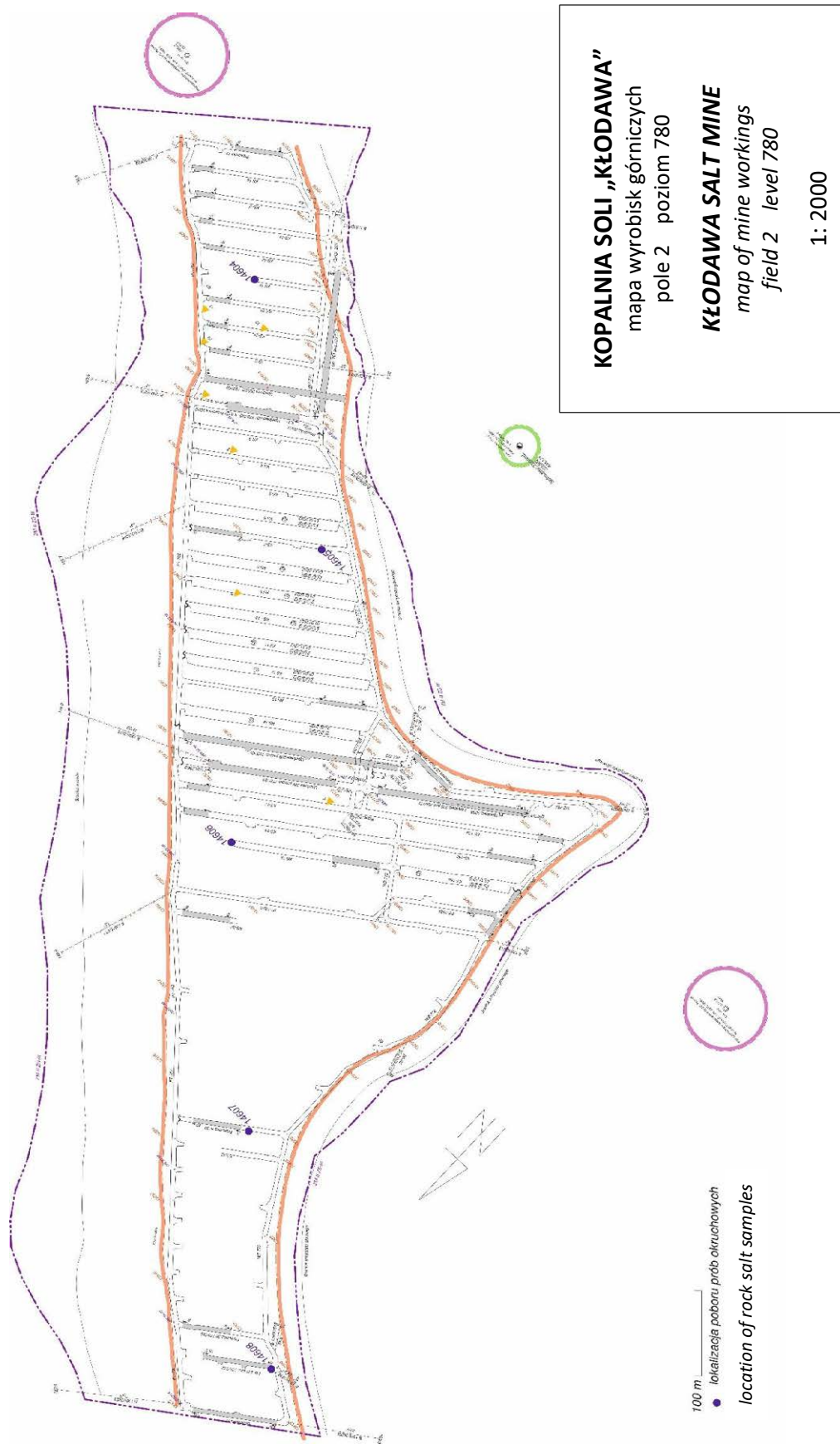
Fig. 1. Rock salt samples from Kłodawa: A – table rock salt (RS-TS), B - rock salt sample no. 14604 (RS-1), C - rock salt sample no. 14605 (RS-2), D - rock salt sample no. 14606 (RS-3), E - rock salt sample no. 14607 (RS-4), F - rock salt sample no. 14608 (RS-5).

szczególne kompleksy solne są sfałdowane, wychylone pod dużymi kątami, niekiedy rozczłonkowane, poprzecinane względem siebie lub zredukowane (np. Burliga, 1997; Czapowski i Tomassi-Morawiec, 2018; Köhsling i in., 1986; Mazurek i in, 2016; Misiek, 1997; Werner i in., 1960). Eksploatacji podlegają przede wszystkim starsze sole kamienne (Na₂) należące do cyklotemu PZ2.

Celem niniejszej pracy było: (1) porównanie składu chemicznego kłodawskiej soli kamiennych spożywczej, naturalnej (zakupionej w sklepie) i 5 próbek soli kamiennych pobranych bezpośrednio ze złoża oraz (2) wstępna ocena potencjału kopalni w Kłodawie jako producenta soli spożywczych o wysokim udziale makroelementów.

W badaniach soli uwzględniono i porównano zawartość 15 pierwiastków chemicznych: Ca, Mg, K, S, Si, P, Zn, Cd,

displaced relative to each other, or reduced (e.g., Burliga, 1997; Czapowski and Tomassi-Morawiec, 2018; Köhsling et al., 1986; Mazurek et al., 2016; Misiek, 1997; Werner et al., 1960). The primary exploitation targets are the Older Halite (Na₂) belonging to the PZ2 cyclothem. The aim of this study was: (1) to compare the chemical composition of Kłodawa table rock salt, both natural (purchased in a store) and 5 samples of rock salt taken directly from the deposit, and (2) to make an initial assessment of the potential of the Kłodawa mine as a producer of edible salts with a high content of macroelements. In the salt analyses, the content of 15 chemical elements was considered and compared: Ca, Mg, K, S, Si, P, Zn, Cd, Pb, Ni, Fe, Cr, Cu, Al, Mn. The obtained results were compared with available geochemical data in the literature: rock salts from the PZ2 formation and selected types



Ryc. 2. Lokalizacja 5 próbek soli kamiennej pobranych ze złoża.
 Fig. 2. The location of the 5 rock salt samples taken from the deposit.

Pb, Ni, Fe, Cr, Cu, Al, Mn. Uzyskane wyniki badań zestawiono z dostępnymi w literaturze danymi geochemicznymi: soli kamiennych formacji PZ2 oraz wybranych 2 typów soli spożywczych – soli himalajskiej i soli morskiej z Francji. Dla soli spożywczych ważny jest udział makroelementów (Ca, K, Mg), który decyduje o konkurencyjności produktu na rynku sprzedaży konsumenckiej. Udział mikroelementów w solach odgrywa mniejsze znaczenie i najczęściej informacja o ich zawartości jest pomijana w specyfikacji.

2. MATERIAŁ BADAWCZY

Łącznie przebadano 6 próbek soli (zob. ryc. 1), w tym:

(1) 1 próbkę soli kamiennej naturalnej, stosowanej do przetworów, spożywczą, niezawierającą w swym składzie E 536 (żelazocyjanku potasu $K_4Fe(CN)_6$), jak również jodek potasu KI (sól niejodowana). Kilogramowe opakowanie tej soli zostało zakupione w jednym z supermarketów,

(2) 5 próbek soli kamiennej, białej, reprezentujących starszą sól kamienną (Na₂). Wszystkie próbki zostały pobrane w dniu 13.03.2023 w obrębie pola eksploatacyjnego nr 2 w Kopalni Soli „Kłodawa” S.A, na głębokości 780 m p.p.t. Próbki oznaczono jako: 14604, 14605, 14606, 14607 i 14608; dokładną lokalizację 5 pobranych próbek zaprezentowano na ryc. 2.

3. METODYKA

Próbki soli rozpuszczono w wodzie wysokiej czystości uzyskanej w urządzeniu Milli-Q (Millipore, Merck, Niemcy). Otrzymane wodne roztwory analizowane były z użyciem wysokorozdzielczej optycznej spektrometrii emisyjnej ze wzbudzeniem w plazmie indukcyjnie sprzężonej (ICP hrOES). W oznaczeniach wskazanych poniżej pierwiastków zastosowano procedurę dopasowania matrycy wzorców do matrycy próbek i wzorzec wewnętrzny (itr), a w kontroli jakości zastosowano metodę dodatku wzorca.

4. WYNIKI BADAŃ

W tabeli 1 oraz na rycinach 3-5 (poniżej) przedstawiono wyniki badań chemicznych 6 próbek kłodawskich soli kamiennych. W analizach wzięto pod uwagę obecność 15 pierwiastków chemicznych — 4 makroelementów: Ca, Mg, K, S oraz 11 mikroelementów: Si, P, Zn, Cd, Pb, Ni, Fe, Cr, Cu, Al, Mn. Wartości wyrażono w mg/kg. Dodatkowo w tabeli zamieszczono wyniki analiz chemicznych średniego składu chemicznego soli kamiennej białej, które oficjalnie są prezentowane na stronie internetowej kopalni (https://sol-klodawa.com.pl/wp-content/uploads/2020/08/2019_sklad_soli_biala.pdf). Wg informacji są to uśrednione wyniki uzyskane w kilku laboratoriach (w tabeli oznaczono je jako: średni skład – wartości deklarowane — LAB).

of table salts – Himalayan salt and sea salt from France. For table salts, the content of macroelements (Ca, K, Mg) is crucial, as it determines the competitiveness of the product in the consumer market. The presence of trace elements in salts is of lesser importance, and information about their content is often omitted in specifications.

2. RESEARCH MATERIAL

A total of 6 rock salt samples were tested (Fig. 1), including:

(3) 1 sample of natural table rock salt for preparations, which did not contain E 536 (potassium ferrocyanide $K_4Fe(CN)_6$) or potassium iodide KI (non-iodized salt). A one-kilogram package of that salt was purchased at a supermarket;

(4) 5 samples of white rock salt, which represented a Zechstein (Late Permian) Older Halite; Na₂). All samples were taken on March 13, 2023 within mining field no. 2 at the Kłodawa Salt Mine, at a depth of 780 meters below sea level. The samples were designated as 14604, 14605, 14606, 14607, and 14608; the exact locations of the 5 samples taken are shown in Fig. 2.

3. METHODOLOGY

The salt samples were dissolved in high purity water obtained in a Milli-Q device (Millipore, Merck, Germany). The aqueous solutions were analyzed using high-resolution optical emission spectrometry with inductively coupled plasma excitation (ICP hrOES). In the determination of the elements indicated above, the procedure of matching the matrix of standards to the matrix of samples and the internal standard (yttrium) were used, and the standard addition method was used in quality control.

4. RESULTS

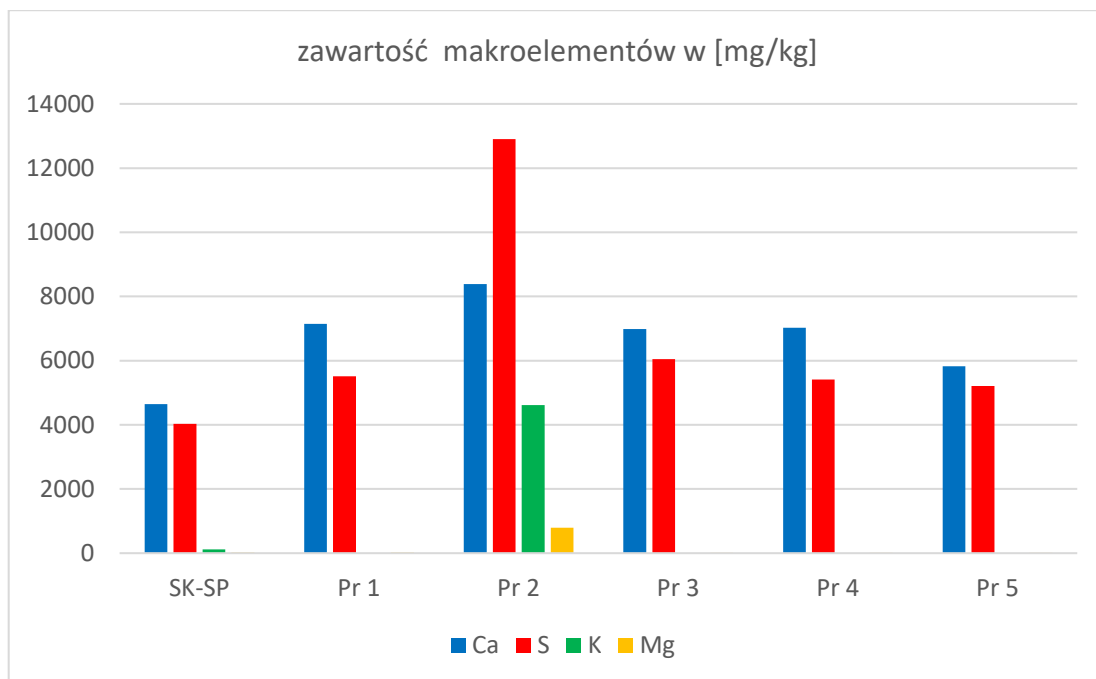
Table 1 and Figures 3-6 (below) show the results of the chemical tests performed on the 6 samples of Kłodawa rock salts. The analyses considered the presence of 15 chemical elements - 4 macroelements (Ca, Mg, K, and S) and 11 microelements (Si, P, Zn, Cd, Pb, Ni, Fe, Cr, Cu, Al, and Mn). The values are expressed in mg/kg. In addition, the table shows the results of chemical analyses of the average chemical composition of white rock salt, which are officially presented on the mine's website (https://sol-klodawa.com.pl/wp-content/uploads/2020/08/2019_sklad_soli_biala.pdf). According to the information provided, these are averaged results from several laboratories (marked in the table as average composition - declared values - LAB).

Tabela 1. Skład chemiczny 6 próbek kłodawskich soli kamiennych.
Table 1. The chemical composition of the rock salts from Kłodawa.

sól kamienna (SK) rock salt (RS)	oznaczenie próbki sample ID	wartości w [mg/kg] results in [mg/kg]														
		makroelementy macroelements						mikroelementy microelements								
		Ca	S	K	Mg	Al	Si	P	Zn	Cu	Mn	Cd	Pb	Ni	Fe	Cr
SK – sól spożywcza RS – commercial table salt	SK-SP	4640	4030	115	20.3	18.5	3.5	1.9	0.05	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
SK – Próbką nr 14604 - Na2 RS – sample no. 14604 - Na2	Pr 1	7150	5510	<DL	13.3	139	4.55	2.5	1.45	0.41	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
SK – Próbką nr 14605 - Na2 RS – sample no. 14605 - Na2	Pr 2	8390	12900	4610	797	40.7	0.6	1.9	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
SK – Próbką nr 14606 - Na2 RS – sample no. 14606 - Na2	Pr 3	6980	6050	<DL	5.7	94.8	0.6	2.7	0.63	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
SK – Próbką nr 14607 - Na2 RS – sample no. 14607 - Na2	Pr 4	7020	5410	<DL	3.7	2.1	0.6	1.85	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
granica wykrywalności detection limit	DL	48	4.0	6.3	1.1	0.5	0.47	0.81	0.015	0.12	0.86	0.075	0.29	0.09	7.9	0.15
średni skład - wartości deklarowane average composition declared values	LAB	1200	n.d.	89	1.0	1.47	1.1	n.d.	<1	<1	0.5	n.d.	n.d.	n.d.	2.16	0.16

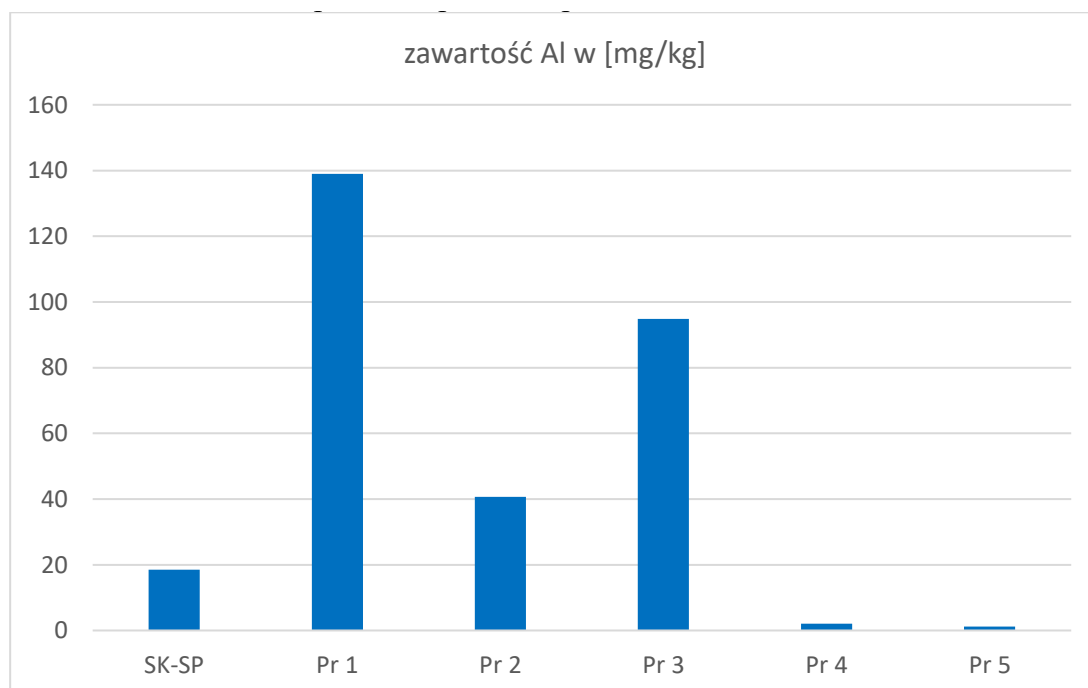
<DL – poniżej granicy wykrywalności, b.d. – brak danych

<DL – below the detection limit, n.d. – no data



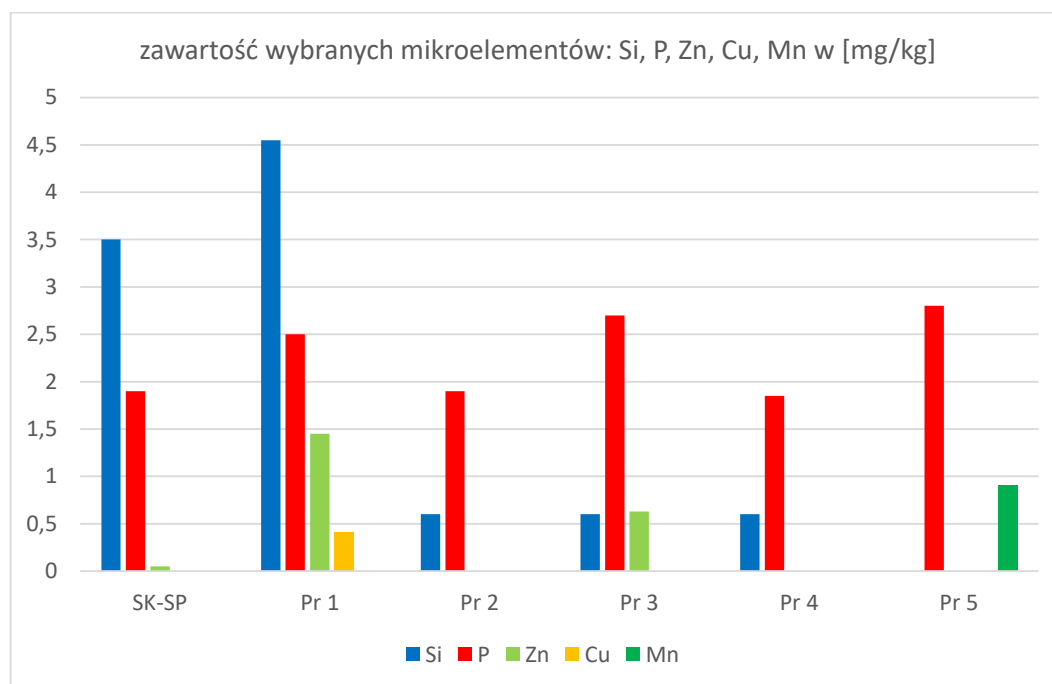
Ryc. 3. Porównanie zawartość makroelementów: Ca, S, K i Mg w [mg/kg] w badanych próbkach soli kłodawskich. Opisy próbek jak w Tab. 1.

Fig. 3. Comparison of the content of macroelements Ca, S, K, and Mg in [mg/kg] in Kłodawa rock salts samples. Sample descriptions as in Table 1.



Ryc. 4. Porównanie zawartości glinu (Al) w [mg/kg] w badanych próbkach soli kłodawskich. Opisy próbek jak w Tab. 1.

Fig. 4. Comparison of the content of Al in [mg/kg] in Kłodawa rock salts samples. Sample descriptions as in Table 1.



Ryc. 5. Porównanie zawartość wybranych mikroelementów: Si, P, Zn, Cu, Mn w [mg/kg] w badanych próbkach soli kłodawskich. Opisy próbek jak w Tab. 1.

Fig. 5. Comparison of the content of selected microelements: Si, P, Zn, Cu, and Mn in [mg/kg] in Kłodawa rock salts samples. Sample descriptions as in Table 1.

5. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Najwyższe wartości makroelementów Ca, K i Mg zanotowano w próbce 2 (Pr 2) — odpowiednio 8390, 4610 i 797 mg/kg (zob. Tab. 1 oraz Ryc. 3). Podczas gdy w próbce soli spożywczej (SK-SP) — odpowiednio: 4650, 115 i 20,3 mg/kg. W przypadku udziału mikroelementów wyróżnia się próba 1 (Pr 1), w której odnotowano najwyższy udział następujących jonów: Al (139 mg/kg), Si (4,55 mg/kg), Zn (1,45 mg/kg) i Cu (0,41 mg/kg) (zob. Tab. 1 oraz Ryc. 4 i 5). Dla porównania udział tych samych jonów w próbce soli spożywczej (SK-SP) wynosi: Al - 18,5 mg/kg, Si — 3,5 mg/kg, Zn — 0,05 mg/kg. Natomiast najwyższe udziały jonów P i Mn występują w próbce 5 (Pr 5) — odpowiednio 2,8 i 0,9 mg/kg (zob. Tab. 1 oraz Ryc. 5). W próbce soli spożywczej (SK-SP) udział jonów P wynosi 1,9 mg/kg, a jonów Mn — poniżej granicy wykrywalności (tzn. poniżej 0,86 mg/kg). Przy czym zawartość P jest bardzo zbliżona we wszystkich próbkach i mieści się w przedziale 1,85 – 2,8 mg/kg.

Poniżej granicy wykrywalności znalazły się jony Cd, Pb, Ni oraz Cr; tzn. w przypadku Cd poniżej 0,075 mg/kg, Pb – 0,29 mg/kg, Ni – 0,09 mg/kg oraz Cr – 0,15 mg/kg.

Siarka (S) w solach powiązana jest głównie z jonem siarczanowym (SO_4^{2-}) wchodzącym w skład anhydrytów, będących głównym składnikiem części nierozpuszczalnej. Jej najwyższy udział odnotowano w próbce 2 — 12900 mg/kg, a najniższą w próbce soli spożywczej — 4030 mg/kg (zob. Tab. 1 oraz Ryc. 3).

5. DISCUSSION

The highest values of macroelements Ca, K, and Mg were recorded in sample 2 (RS-2) and were equal to 8390, 4610, and 797 mg/kg, respectively (see Tab. 1 and Fig. 3). On the other hand, in the table salt sample (RS-TS), they were equal to 4650, 115, and 20.3 mg/kg, respectively. As for the content of microelements, sample 1 (RS-1) stands out, with the highest content of Al (139 mg/kg), Si (4.55 mg/kg), Zn (1.45 mg/kg), and Cu (0.41 mg/kg) ions (see Tab. 1 and Fig. 4 and 5). For the sake of comparison, the content of those ions in the table salt sample (RS-TS) is equal to 18.5 mg/kg, and the content of Si ions is 3.5 mg/kg and of Zn ions – 0.05 mg/kg. In contrast, the highest content of P and Mn ions was found in sample 5 (RS-5) and was equal to 2.8 and 0.9 mg/kg, respectively (see Tab. 1 and Fig. 5). In the table salt sample (RS-TS), the content of P ions is 1.9 mg/kg, and the content of Mn ions is below the detection limit. The content of P ions is very similar in all samples and ranges from 1.85 to 2.8 mg/kg.

The content of Cd, Pb, Ni, and Cr ions was below the detection limit (Cd ion below 0,075 mg/kg, Pb – 0,29 mg/kg, Ni – 0,09 mg/kg oraz Cr – 0,15 mg/kg).

The S ion in the salts is mainly associated with the sulfate ion (SO_4^{2-}) included in anhydrites, which are the main component of the insoluble part of the salts. Its highest proportion was recorded in sample 2 - 12900 mg/kg, and its lowest content was in the food salt sample - 4030 mg/kg (see Tab. 1 and Fig. 3).

Dodatkowo porównano uzyskane wyniki analiz z 6 próbek soli ze średnim składem wartości deklarowanych (LAB). Różnice w wypadku jonów Ca są dość znaczące, dotyczy to szczególnie próbek pobranych bezpośrednio ze złoża, gdzie zawartość wapnia (Ca) wyniosła ponad 5820 mg/kg osiągając maksymalną wartość rzędu 8390 mg/kg (Pr 2), w soli spożywczej — 4640 mg/kg, a średni skład wartości deklarowanych (LAB) — 1200 mg/kg. Duże wahania między uzyskanymi wynikami, a średnim składem wartości deklarowanych (LAB) odnotowano w przypadku jonów K, Mg i Al, szczególnie biorąc pod uwagę wspomnianą próbkę 2 (Pr 2) zob. Tab. 1.

Ponadto wyniki analiz spożywczej soli kamiennej (oznaczonej jako SK-K-SP B1) oraz próbki nr 2 kłodawskiej soli kamiennej (oznaczonej jako SK-K Na2) zestawiono z dostępnymi w literaturze danymi geochemicznymi (zob. Tab. 2). Porównano udział tych samych pierwiastków w:

(1) wcześniej zbadanej kłodawskiej soli spożywczej, białej; ten sam typ soli (oznaczonej jako SK-K-SP B2, dane: Jaworska i Siepak, 2018);

(2) soli kamiennych formacji PZ2 wysadów Kłodawa i Mogilno (dane: Garlicki i in. 1991 oraz Czapowski i in., 2022; oznaczonych odpowiednio jako SK-K-PZ2 oraz SK-KM Na2);

(3) wybranych 2 typów soli spożywczych – soli himalajskiej, białej (oznaczonej jako SK-H-SP B, dane: Jaworska i Siepak, 2018) i soli morskiej z Francji (oznaczonej jako SM-Fr-SP, dane: Jaworska i Niedzielski, 2023).

Nadmienić należy, że zestawieniu podlegały wyniki analiz próbek soli wykonanych metodą spektrometrii atomowej ale przeprowadzonych w różnym czasie, w innych laboratoriach, z wykorzystaniem różnych aparatów (o różnej czułości) i z zastosowaniem odmiennych wzorców. Stąd porównywanie prezentowanych w tabeli 2 wyników może być obciążone pewnym błędem. Niemniej jest to pierwsza próba zestawienia danych geochemicznych kłodawskich soli spożywczych oraz soli kamiennych PZ2 stanowiących dla nich złoża.

Z powyższego zestawienia wynika, że:

(1) w odniesieniu do makroelementów (Ca, Mg, K) w kłodawskich solach spożywczych (zob. Tab. 2, Ryc. 6):

zawartość Ca w próbce z 2023: SK-K-SP B1 wyniosła 4640 mg/kg a z 2018: SK-K-SP B2 11800 mg/kg. Podobnie duże różnice odnotowano w przypadku K, gdzie w próbce SK-K-SP B1 udział tego jonu oznaczono na poziomie 115 mg/kg, a w próbce SK-K-SP B2 – 1090 mg/kg. Udział Mg w obu próbkach był zbliżony – odpowiednio: 20,3 oraz 10 mg/kg.

(2) w odniesieniu do wybranych mikroelementów (Al, Mn, Zn, Fe, Cr, Ni, Pb, Cu, Cd) w kłodawskich solach kamiennych - zarówno w solach spożywczych, jak i należących ogólnie do PZ2 (zob. Tab. 2):

wahania zawartości poszczególnych pierwiastków mieszczą się w zakresie: Al – 0,8-40,7 mg/kg, Mn – 0,0-6,89 mg/kg,

In addition, when comparing the results of the analyses for the 6 salt samples with the average composition according to the declared values (LAB), it was found that the differences in the case of Ca ions were quite significant. This is especially true for samples taken directly from the deposit, where the values of Ca ions amounted to more than 5,820 mg/kg and reached the maximum value of 8,390 mg/kg (RS-2), while in the table salt it was 4,640 mg/kg, and the average composition according to the declared values (LAB) was 1,200 mg/kg. Large fluctuations between the results and the average composition according to the declared values (LAB) were noted for K, Mg, and Al ions, especially in the aforementioned sample 2 (RS-2) (see Tab. 1).

Furthermore, the results of the analysis of edible rock salt (marked as SK-K-SP B1) and sample No. 2 of Kłodawa rock salt (marked as SK-K Na2) were compared with available geochemical data in the literature (see Table 2). The distribution of the same elements was compared in:

(1) previously analyzed Kłodawa table rock salt, white; the same type of salt (designated as SK-K-SP B2, data: Jaworska and Siepak, 2018);

(2) rock salts from the PZ2 formations of the Kłodawa and Mogilno salt domes (data: Garlicki et al., 1991, and Czapowski et al., 2022; designated as SK-K-PZ2 and SK-KM Na2, respectively);

(3) selected 2 types of table salts – white Himalayan salt (designated as SK-H-SP B, data: Jaworska and Siepak, 2018) and sea salt from France (marked as SM-Fr-SP, data: Jaworska and Niedzielski, 2023).

It should be noted that the comparison involved the results of salt sample analyses conducted using atomic spectrometry but carried out at different times, in different laboratories, using various instruments (with varying sensitivity), and employing different standards. Hence, the comparison of the results presented in Table 2 may be subject to certain errors. Nonetheless, this represents the initial attempt to compare the geochemical data of Kłodawa table salts and the PZ2 rock salts that constitute their deposit.

From the above comparison, the following conclusions can be drawn:

(1) Regarding the macroelements (Ca, Mg, K) in Kłodawa table salts (see Table 2, Fig. 6):

the content of Ca in the 2023 sample, SK-K-SP B1, was 4640 mg/kg, while in the 2018 sample, SK-K-SP B2, it was 11800 mg/kg. Similarly significant differences were noted for K, with the SK-K-SP B1 sample containing 115 mg/kg of this ion, and the SK-K-SP B2 sample containing 1090 mg/kg. The content of Mg in both samples was comparable, at 20.3 and 10 mg/kg, respectively.

(2) Concerning selected trace elements (Al, Mn, Zn, Fe, Cr, Ni, Pb, Cu, Cd) in Kłodawa rock salts – both in table salts and those belonging to the PZ2 (see Table 2): Variations in

Tabela 2. Zestawienie wyników badań chemicznych kłodawskich soli kamiennych PZ2 (Na2) i wybranych soli spożywczych (w tym dane z literatury).
Table 2. A summary of the results of chemical tests of PZ2 (Na2) rock salts from Kłodawa and selected table salts (including data from the literature).

typy soli salt types	symbol symbol	wartości w [mg/kg] results in [mg/kg]														
		makroelementy macroelements						mikroelementy microelements								
		Ca	Mg	K	S	Si	P	Al	Mn	Zn	Fe	Cr	Ni	Pb	Cu	Cd
sól kamienna Na2 - Pr 2 wysad Kłodawa rock salt Na2 – RS-2 Kłodawa salt diapiir	SK-K-Na2	8390	797	4610	12900	0.6	1.9	40.7	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
sól kamienna, spożywcza biała, wysad Kłodawa rock salt, table salt white, Kłodawa salt diapiir	SK-K-SP-B1	4640	20.3	115	4030	3.5	1.9	18.5	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
granica wykrywalności detection limit	DL	48	1.1	6.3	0.4	0.47	0.81	0.5	0.86	0.015	7.9	0.15	0.09	0.29	0.12	0.075
dane z literatury data from the literature																
sól kamienna PZ2 wysad Kłodawa Garlicki i in. 1991 rock salt PZ2 Kłodawa salt diapiir Garlicki et al., 1991	SK-K-PZ1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	6.05	n.d.	83.6	2.31	52.7	n.d.	2.54	n.d.
sól kamienna Na2 wysady Kłodawa i Mogilno wartość max wartość min Czapowski i in., 2022 rock salt Na2 Kłodawa, Mogilno salt diapiirs max value min value Czapowski et al., 2022	SK-MK-Na2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	6.89 0.00	16.2 0.1	175 10.3	1.56 0.0	4.32 0.06	0.2 0.01	1.08 0.01	0.59 <0.2
sól kamienna, spożywcza, biała, wysad Kłodawa Jaworska i Siepak, 2018 rock salt, table salt white, Kłodawa salt diapiir Jaworska and Siepak, 2019/20	SK-K-SP-B2	11800	10	1090	n.d.	n.d.	n.d.	0.8	0.90	1.06	15.3	0.79	0.18	0.05	0.42	0.001

typy soli salt types	symbol symbol	wartości w [mg/kg] results in [mg/kg]														
		makroelementy macroelements						mikroelementy microelements								
		Ca	Mg	K	S	Si	P	Al	Mn	Zn	Fe	Cr	Ni	Pb	Cu	Cd
sól kamienna, spożywcza, biała, himalajska Jaworska i Siepak, 2018 rock salt, table salt white, Himalayan Jaworska and Sepak, 2019/20	SK-H-SP-B	4320	180	3180	n.d.	n.d.	n.d.	0.61	0.26	1.63	28.7	0.06	0.14	0.18	0.58	0.001
sól morską, spożywcza Francja Jaworska i Niedzielski, 2023 sea salt, table salt France Jaworska and Niedzielski, 2023	SM-Fr-SP	4680	6740	1940	8450	64.4	7.3	33.0	8.5	0.11	56.0	0.28	0.18	<DL	<DL	<DL

<DL – poniżej granicy wykrywalności, b.d. – brak danych

<DL – below the detection limit, n.d. – no data

Zn — 0,05-16,2 mg/kg, Fe — od poniżej 7,9 do 175 mg/kg, Cr — 0,0-2,31 mg/kg, Ni — 0,06-52,7 mg/kg, Pb — 0,01-0,2 mg/kg, Cu — 0,01-2,54 mg/kg, Cd – 0,001-0,59 mg/kg. Przy czym obie badane sole spożywcze (SK-K-SP B1 i B2) charakteryzują się stosunkowo niskim udziałem praktycznie wszystkich metali, w tym (co warto podkreślić) Cd i Pb. Maksymalna dopuszczalna zawartość Cd w soli wynosi 0,5 mg/kg, a Pb – 1 mg/kg (General standard for contaminants and toxins in food and feed, revised in 2019; Contaminants Reference Table, 2022). W przebadanych 2 próbkach kłodawskich soli spożywczych udział Cd był poniżej 0,075 mg/kg, a w przypadku Pb — poniżej 0,29 mg/kg, tzn. nie przekraczały granicy wykrywalności obu pierwiastków.

Ponieważ kopalnia w Kłodawie jest producentem soli spożywczych dodatkowo w powyższe zestawienie włączono wyniki badań chemicznych soli himalajskiej (białej) oraz soli morskiej z Francji. Sole himalajskie cieszą się dużą popularnością wśród konsumentów, a sole morskie z Francji, jak wykazały badania (Jaworska i Niedzielski, 2023), wykazują na tle innych soli spożywczych bardzo wysoki udział szeregu jonów.

Na ryc. 6 porównano zawartość makroelementów Ca, Mg i K w kłodawskich solach kamiennych spożywczych (SK-K-SP B1 i B2), kłodawskiej soli kamiennej (SK-K Na2), której próbka nr 2 została pobrana bezpośrednio ze złoża, a także w solach spożywczych himalajskiej (SK-H-SP B) i morskiej z Francji (SM-Fr-SP).

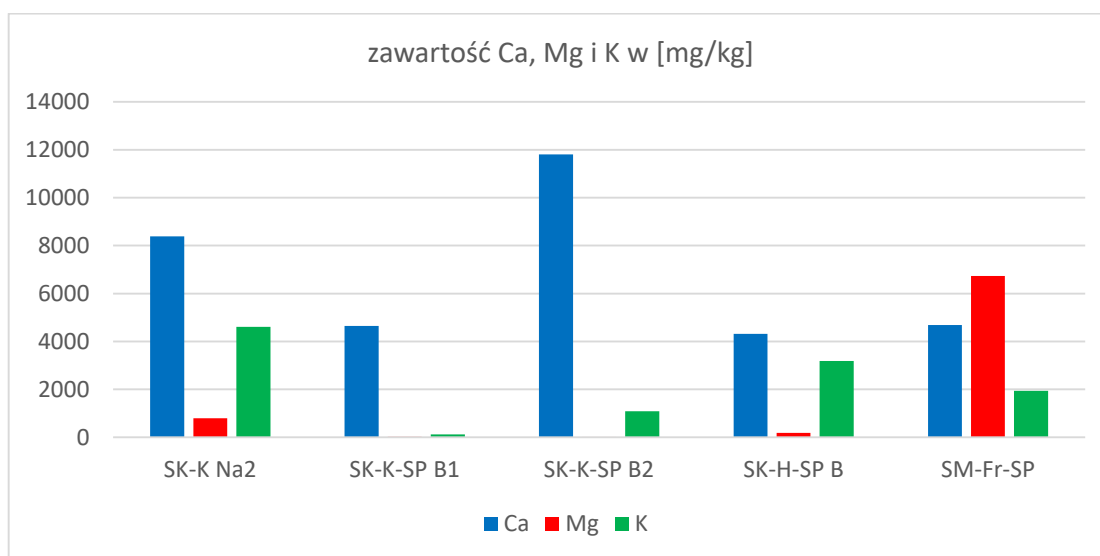
W tym ujęciu udział jonów Ca (8390 mg/kg) i K (4610 mg/kg) próbki nr 2 kłodawskiej soli kamiennej (SK-K Na2) jest wyższy niż w solach morskich z Francji oraz w solach himalajskich (odpowiednio 4320 i 3180 mg/kg). Na tym tle kłodawskie sole spożywcze wykazują bardzo duże zróżnicowanie. Dla przypomnienia, w próbce SK-K-SP B1 udział Ca

the content of individual elements fall within the ranges: Al – 0.8-40.7 mg/kg, Mn – 0.0-6.89 mg/kg, Zn – 0.05-16.2 mg/kg, Fe – below 7.9 to 175 mg/kg, Cr – 0.0-2.31 mg/kg, Ni – 0.06-52.7 mg/kg, Pb – 0.01-0.2 mg/kg, Cu – 0.01-2.54 mg/kg, Cd – 0.001-0.59 mg/kg. Both analyzed table salts (SK-K-SP B1 and B2) are characterized by relatively low levels of practically all metals, including (notably) Cd and Pb. The maximum allowable content of Cd in salt is 0.5 mg/kg, and Pb – 1 mg/kg (General standard for contaminants and toxins in food and feed, revised in 2019; Contaminants Reference Table, 2022). In the examined samples of Kłodawa table salt, the content of Cd was below 0.075 mg/kg, and for Pb – below 0.29 mg/kg, which means that the detectable limit for both elements was not exceeded.

Since the Kłodawa mine is a producer of table salts, the results of chemical analysis of white Himalayan salt and sea salt from France have also been included in the above comparison. Himalayan salts are popular among consumers, and as shown by research (Jaworska and Niedzielski, 2023), sea salts from France exhibit a very high content of several ions compared to other table salts.

In Figure 6, the content of macroelements Ca, Mg, and K in Kłodawa rock salts, both table (SK-K-SP B1 and B2) and the rock salt sample (SK-K Na2) directly taken from the deposit, is compared with Himalayan table salt (SK-H-SP B) and sea salt from France (SM-Fr-SP).

In this comparison, the proportion of Ca ions (8390 mg/kg) and K ions (4610 mg/kg) in the sample No. 2 of Kłodawa rock salt (SK-K Na2) is higher than that in sea salts from France and Himalayan salts (4320 and 3180 mg/kg, respectively). Kłodawa table salts exhibit significant variations in comparison to sea salt from France and Himalayan salt. As



Ryc. 6. Porównanie zawartość makroelementów: Ca, K i Mg w [mg/kg] w solach kłodawskich i wybranych solach spożywczych. Opisy próbek jak w Tab. 2.

Fig. 6. Comparison of the content of macroelements Ca, K, and Mg in [mg/kg] in Kłodawa rock salts and selected samples of table salts. Sample descriptions as in Table 2.

wyniósł 4640 mg/kg, a K — 115 mg/kg, podczas gdy w drugiej próbce (SK-K-SP B2) odpowiednio: Ca — aż 11800 mg/kg, a K — 1090 mg/kg. Natomiast pod względem zawartości jonów Mg — sól morską z Francji ma ich największą zawartość (6740 mg/kg), w dalszej kolejności próbka nr 2 kłodawskiej soli kamiennej (797 mg/kg) i sól himalajska (180 mg/kg), a najniższą w tych porównaniach spożywcze sole kamienne z Kłodawy (20,3 i 10 mg/kg).

6. WNIOSKI

1. Zestawienie w Tabelach 1 i 2 wyników analiz chemicznych soli kłodawskich (kamiennych i spożywczych, w tym danych dostępnych w literaturze) pokazuje jak bardzo zróżnicowana pod względem jakości – udziału poszczególnych jonów jest starsza sól kamienna (Na₂) złoża kłodawskiego.
2. Porównanie w Tabeli 2 wyników badań chemicznych soli kłodawskich i wybranych soli spożywczych wskazuje na potencjał kopalni w Kłodawie jako producenta soli spożywczych o wysokiej jakości oraz konkurencyjności na rynku polskim. Dowodzą tego analizy chemiczne próbek 2 (SK-K Na₂), w których udział jonów Ca i K jest bardzo wysoki, a Pb i Cd — niski.

7. PODSUMOWANIE

Zawartość szeregu pierwiastków w kłodawskich solach kamiennych białych, należących do formacji starszej soli kamiennej (Na₂), jest zmienna, niekiedy w bardzo szerokim zakresie. Szczególnie dotyczy to makroelementów (Ca, Mg, K). W naturalny sposób rzutuje to na wahania składu chemicznego produkowanych soli spożywczych. Mniejsze różnice są widoczne porównując skład chemiczny kłodawskich soli kamiennych spożywczych oraz średni skład chemiczny kłodawskiej soli kamiennej białej (oficjalne dane). Jest oczywistym, że różnice te wynikają ze specyfiki złoża, które wykazuje dużą zmienność, jak również większej liczby pobranych i oznaczonych prób.

Porównano także skład chemiczny kłodawskich soli kamiennych oraz 2 soli spożywczych – soli morskiej z Francji oraz białej soli himalajskiej. Powyższe badania wykazały, że niektóre partie kłodawskiego złoża soli kamiennych (np. te reprezentowane przez próbkę 2) mogą być konkurencyjne pod względem udziału Ca i K dla innych soli spożywczych. Być może celowe byłyby częstsze badania chemiczne, które pozwoliłyby wychwycić te partie złoża soli kamiennej, które wykazują wyjątkowo wysoki udział jonów (szczególnie makroelementów), i zaproponować jako oddzielny (ekskluzywny) produkt soli spożywczej na rynku.

Dodatkowo przeprowadzone badania potwierdziły, że kłodawskie sole spożywcze nie przekraczają norm zawartości Cd i Pb.

a reminder, in the SK-K-SP B1 sample, the content of Ca was 4640 mg/kg, and K was 115 mg/kg, while in the second sample (SK-K-SP B2), the values were significantly higher: Ca — 11800 mg/kg and K — 1090 mg/kg. Regarding the content of Mg ions, sea salt from France has the highest content (6740 mg/kg), followed by sample No. 2 of Kłodawa rock salt (797 mg/kg) and Himalayan salt (180 mg/kg), while the lowest values are found in the Kłodawa table salts (20.3 and 10 mg/kg).

6. CONCLUSIONS

1. The comparison of chemical analysis results for Kłodawa salts (rock salts and table salts, including literature data) presented in Tables 1 and 2 highlights the significant variation in terms of the quality and proportion of individual ions in the older rock salt (Na₂) from the Kłodawa deposit.
2. The comparison in Table 2 of chemical analysis results for Kłodawa salts and selected edible salts points to the potential of the Kłodawa mine as a producer of high-quality table salts, competitive in the Polish market. This is supported by the chemical analyses of sample No. 2 (SK-K Na₂), where the presence of Ca and K ions is notably high, while Pb and Cd are low.

7. SUMMARY

The content of a number of elements in Kłodawa white rock salts, which are an Older Halite (Na₂), is variable, sometimes in a wide range. This is especially true for macroelements (Ca, Mg, and K). Smaller differences are seen when comparing the chemical composition of table Kłodawa rock salt and the average chemical composition of white Kłodawa rock salt (official data). It is obvious that these differences are due to the specific nature of the deposit, which shows a high degree of variability, as well as to the larger number of samples taken and tested. The chemical composition of the Kłodawa rock salts and 2 table salts – sea salt from France and white Himalayan salt.

The tests described above have shown that some parts of the Kłodawa rock salt deposit (e.g., those represented by sample 2) can confidently compete with sea salts marketed as table salts. Perhaps it would be beneficial to conduct more frequent chemical analyses and tests to determine those portions of the rock salt deposit that show an unusually high content of ions, especially macroelements, and offer them on the market as a separate (exclusive) food salt product.

Additionally, the conducted research has confirmed that Kłodawa table salts do not exceed the permissible limits for the content of Cd and Pb.

LITERATURA/REFERENCES

- BURLIGA S., 1997. Ewolucja wysadu solnego Kłodawy. Materiały konferencyjne: Tektonika solna regionu kujawskiego. Uniejów, 23–25.10.1997. Wydawnictwo WIND, Wrocław: 1–14.
- CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., 2018. Twory pogranicza cyklotemów PZ1 i PZ2 cechsztynu w kłodawskim wysadzie solnym (środkowa Polska). *Przegląd Geologiczny*, 66 (5): 303 – 308.
- CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., WACHOWIAK J., 2022. Wybrane pierwiastki śladowe w górnopemskich (cechsztyń) utworach solnych i potasonośnych w Polsce – ocena złożowa. *Przegląd Geologiczny*, 70 (5): 384 – 409.
- GARLICKI A., SZYBIST A., KASPRZYK A., 1991. Badania pierwiastków śladowych w złożach soli i surowców chemicznych. *Przegląd Geologiczny*, 39 (11/12): 520–527.
- JAWORSKA J., NIEDZIELSKI P., 2023. Skład chemiczny soli spożywczych — sole kłodawskie na tle tak zwanych soli morskich. Chemical composition of commercial table salts - rock salt from Kłodawa in comparison with so-called sea salts. W tym numerze *Przeglądu Solnego*
- JAWORSKA J., SIEPAK M., 2018. Polskie sole kamienne vs sole himalajskie – analiza porównawcza wybranych składników soli spożywczych. Polish rock salts vs Himalayan salts – comparative analysis of selected components of table salts. *Przegląd Solny. Salt Review* 14: 95–104.
- KÖHSLING J., MACIEJARZ Z., POBORSKI J., ŚLIZOWSKI K., ŚMIETAŃSKI Z., URBAŃCZYK, K., WALASZCZYK, J., DUDEK, A., KUKLIŃSKA, A., POBORSKA-MŁYNARSKA, K., ŚLIZOWSKI, J. 1986. Określenie górniczo-geologicznych warunków eksploatacji w Kopalni Soli Kłodawa w aspekcie narastających w czasie zagrożeń górniczych. *Arch. Kopalni Soli Kłodawa*.
- MAZUREK S., BURLIGA S., WIŚNIEWSKI A., STASZCZAK W., MISIEK G., KURDEK D., BARTŁOMIEJCZAK G., 2016. Dodatek nr 2 do Dokumentacji geologicznej złoża soli kamienniej Kłodawa 1. Kłodawa. Narodowe Archiwum Geologiczne Państwowego Instytutu Geologicznego [3420/2017].
- MISIEK G., 1997. Stratygrafia i wykształcenie utworów cechsztynu w wysadzie solnym Kłodawy. Materiały konferencyjne: Tektonika solna regionu kujawskiego, Uniejów, 23–25.10.1997. Wydawnictwo WIND, Wrocław: 20–23.
- WERNER, Z., POBORSKI, J., ORSKA, J., BĄKOWSKI, J. 1960. Złoże solne w Kłodawie w zarysie geologiczno-górnicy. *Prace Instytutu Geologicznego*, 30: 467-512.
https://sol1-klodawa.com.pl/wp-content/uploads/2020/08/2019_sklad_soli_-biala.pdf
- Contaminants Reference Table, 2022. Codex maximum permitted limit (Codex ML) for Contaminants in Food and Feed.
<https://www.unicef.org/supply/media/16436/file/Contaminants-List.pdf>
- General standard for contaminants and toxins in food and feed CXS 193-1995; revised in 2019) https://www.fao.org/fao-who-codex-alimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FStandards%252FCXS%2B193-1995%252FCXS_193e.pdf



Sól i alchemia – Adam Schröter i jego poemat „Regni Poloniae salinarum Vielicensium descriptio carmine elegiaco” oraz jego związki z Olbrachtem Łaskim

Salt and alchemy - Adam Schröter, his poem „Regni Poloniae salinarum Vielicensium descriptio carmine elegiaco” and his ties with Olbracht Łaski

Piotr KRZYWIEC¹, Aleksandra ARNDT²

¹Institut Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk, e-mail: piotr.krzywiec@twarda.pan.pl

²Institut Filologii Klasycznej, Uniwersytet Adama Mickiewicza w Poznaniu, e-mail: a_arndt@amu.edu.pl

¹Institute of Geological Sciences, Polish Academy of Sciences, e-mail: piotr.krzywiec@twarda.pan.pl

²Classical Philology Institute, Adam Mickiewicz University, Poznań, e-mail: a_arndt@amu.edu.pl

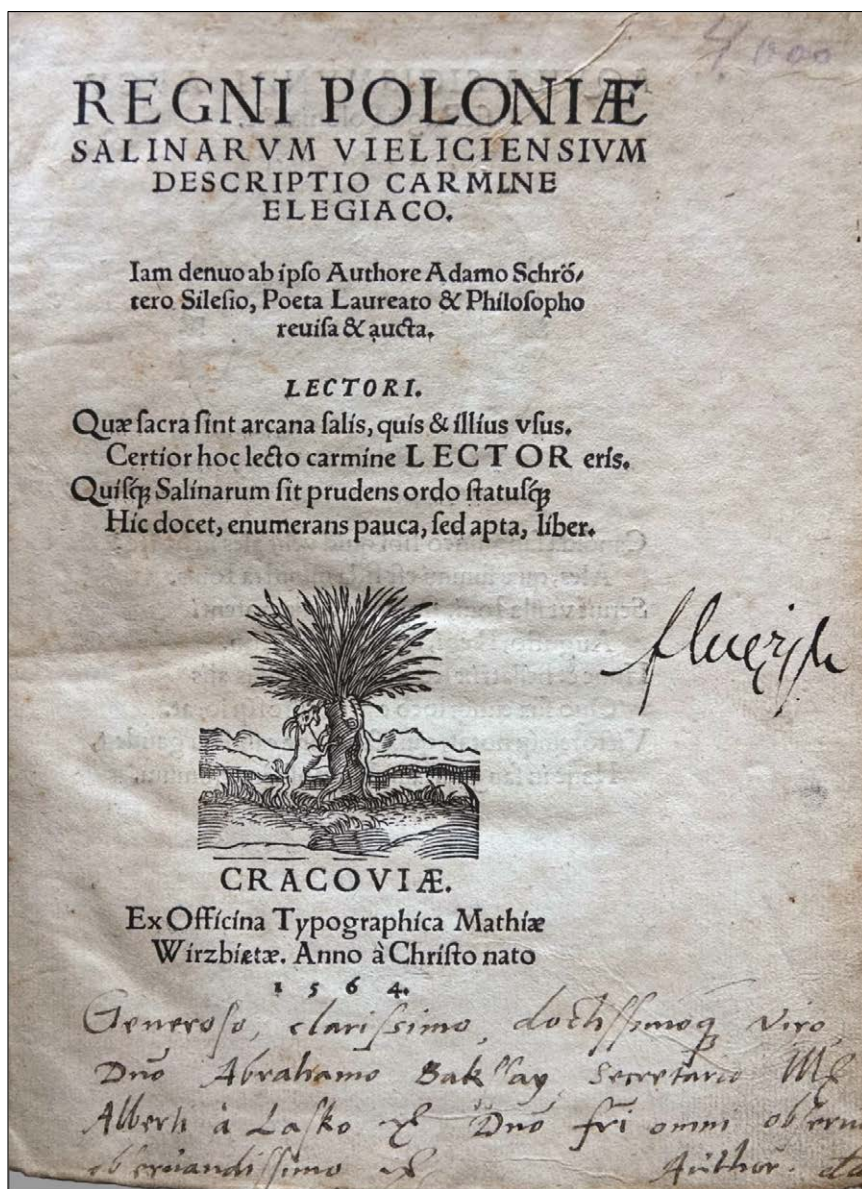
Bez większej przesady można powiedzieć, że każdy, kto interesuje się geologią złóż soli i tektoniką solną – i to nie tylko w Polsce, ale bez mała na całym świecie – słyszał o kopalni soli w Wieliczce. Dobrą ilustracją znaczenia Wieliczki jest fakt, iż został jej poświęcony osobny ilustrowany „box” umieszczony w omawiającym historyczne znaczenie złóż soli wstępie do fundamentalnego dzieła na temat tektoniki solnej, „Salt Tectonics” (Jackson i Hudec, 2017). Ze względu na swoje ogromne znaczenie ekonomiczne Wieliczka od stuleci wzbudzała wielkie zainteresowanie wśród geologów i górników (por. Poborski, 1965; Rowan et al., 2020; Rybarski, 1932). Spektakularne wnętrza kopalni wielickiej wzbudzało podziw również wśród odwiedzających ją licznych podróżników i pisarzy (por. Bugaj, 1999; Gawęda, 1958; Maślankiewicz, 1965; Keckowa, 1969). Najstarszym opisem kopalni jest pochodzący z końca XV wieku poemat słynnego humanisty i jednego z pionierów Odrodzenia Konrada Celtisa, zatytułowany *Salinaria ad Janum Terinum*, wydany drukiem mniej więcej sto lat później w dziele Pistoriusa (Celtis, 1582). W 1502 roku ukazał się w Krakowie poemat opisujący Polskę i Kraków, autorstwa Wawrzyńca Korwina, ucznia Celtisa i przyjaciela Kopernika (Korwin, 1502). To poczytne dzieło, które doczekało się aż 25 wydań, zawiera również krótkie poetyckie przedstawienie salin wielickich: *Z jej skrytych ciemni wyrastają solne | Gorzkawe skały, a na*

Without much exaggeration it could be said that everyone who is interested in geology of salt deposits and in salt tectonics – not only in Poland but world-wide – must have heard about the Wieliczka Salt Mine. Importance of this salt mine is well illustrated by the fact that it has special dedicated “box” in the landmark publication „Salt Tectonics” (Jackson i Hudec, 2017). Because of its economic importance it has always been a site of great interest to geologists and miners (cf. Poborski, 1965; Rowan et al., 2020; Rybarski, 1932). Spectacular interior of the Wieliczka Salt Mine was admired by numerous writers and travelers visiting it over the centuries (cf. Bugaj, 1999; Gawęda, 1958; Maślankiewicz, 1965; Keckowa, 1969). Poem by Conrad Celtis, renowned Renaissance pioneer, entitled *Salinaria ad Janum Terinum* written in late 15th century and published for the first time almost hundred years later (Celtis, 1582) is the oldest description of this mine. In 1502 a poem by Wawrzyniec Korwin, pupil of Celtis and friend of Copernicus, was published in Kraków (Korwin, 1502). This very popular publication, that went through 25 editions, contained detailed description of Kingdom of Poland and of Kraków, with several verses devoted to the Wieliczka Salt Mine (transl. by Łanowski, 1962). Other descriptions of this mine were published by Joachim Watt (Vadianus) (Vadianus, 1582) and by Jodok Willich (Willich, 1543). In 1553

światło dzienne | Szybko je kręcąc się ciężarem wlecze | Wielki kołowrót | Pocą się skryte tej jaskini szpary | Strugą wiecznego źródła, a ta znowu | Sól czystą ścina, kiedy ją gorącym | Ogniem podgrzewać (tłum. J. Łanowski, 1962). Kolejny, dość obszerny opis wielickiej kopalni opublikował w 1519 r. w komentarzu do opisu świata rzymskiego geograf Pomponiusz Meli (I wiek po Chr.) Szwajcar Joachim Watt (Vadianus). Opis ten, podobnie jak poemat Celtisa, również został przedrukowany w pracy Pistoriusa (Vadianus, 1582). Kolejnym autorem, który pozostawił opis wielickich salin, był przyrodnik i chemik Jodok Willich, który zwiedził je pod koniec pierwszej połowy XVI w. w towarzystwie lekarza salinarnego Anselmusa Ephorianusa (Willich, 1543). W 1553 roku opublikowany został w Krakowie poemat Adama Schrötera poświęcony salinom wielickim,

Adama Schrötera published in Kraków his landmark poem entitled *Salinarum Vieliciensium iucunda ac vera descriptio carmine elegiaco* (Schröter, 1553). It proved to be very popular and went through several editions. Its second extended and supplemented edition was published in 1564 under slightly modified title *Regni Poloniae salinarum Vieliciensium descriptio carmine elegiaco, iam denuo ab ipso authore Adamo Schrötero revisa et aucta* (Schröter, 1564). It was partly translated to Polish by Z. Węclewski (Węclewski, 1879), complete translation was published by F. Piestrak (Piestrak, 1901). Its analysis could be found in publications by Maślankiewicz (1965), Smaróń (1983), Bugaj (1999) and Döpp (2019).

Renaissance writers, contrary to common practices in Middle Ages, were frequently using national languages in



Ryc. 1. Strona tytułowa drugiego wydania poematu Adama Schrötera *Regni Poloniae salinarum Vieliciensium descriptio carmine elegiaco* (1564), z dedykacją i podpisem autora, oraz podpisem Franciszka Wężyka.

Fig. 1. Title page of second edition of Adam Schröter's poem *Regni Poloniae salinarum Vieliciensium descriptio carmine elegiaco* (1564) with his dedication and signature, and signature of Franciszek Wężyk.

zatytułowany *Salinarum Wieliciensium iucunda ac vera descriptio carmine elegiaco* (Schröter, 1553). Zdobył on ogromną popularność i doczekał się szeregu wznowień. Jego drugie, poszerzone i uzupełnione wydanie ukazało się w 1564 pod nieco zmienionym tytułem *Regni Poloniae salinarum Wieliciensium descriptio carmine elegiaco, iam denuo ab ipso authore Adamo Schrötero revisa et aucta* (Schröter, 1564). Poemat ten został częściowo przetłumaczony przez Z. Węclewskiego (Węclewski, 1879) a w całości przez F. Piestraka (Piestrak, 1901). Jego analiza znajduje się w pracach m.in. Maślankiewicza (1965), Smaronia (1983), Bugaja (1999) i Döppa (2019).

Odrodzeniowi artyści pióra, odmiennie niż miało to miejsce w średniowieczu, coraz częściej, obok łacińskiej, tworzyli swoje dzieła w mowie charakterystycznej dla ich własnego kraju, bywało jednakże, iż twórcy literaccy przedłużali niejako zwyczaje poprzedniej epoki, publikując wyłącznie po łacinie. Do takich pisarzy należał m.in. Adam Schröter. Urodził on się około 1525 r. w Żytawie na Łużycach. Odebrał wszechstronną edukację na uniwersytetach we Frankfurcie nad Odrą, Pradze i Krakowie, gdzie przybył w 1552 r. Jego patronem był wojewoda sieradzki Olbracht Łaski, w którego rezydencji w Kieżmarku przez szereg lat przebywał i gdzie zmarł około 1572 roku (Węclewski, 1879; Hajdukiewicz, 1995).

Piśmiennicza spuścizna Schrötera obejmuje tak przekłady prac alchemika i pioniera iatrochemii, Paracelsusa (z niemieckiego na łacinę), jak i poetyckie utwory własne. Wśród tych ostatnich – o treści panegirycznej czy historycznej – największe uznanie już za życia autora zdobył sobie kunsztowny poemat *Regni Poloniae Salinarum Wieliciensium iucunda et vera descriptio* ('Zabawny i prawdziwy opis należącej do Królestwa Polskiego kopalni soli w Wieliczce'). Poemat ten stanowi niejako wypadkową dwóch różnych tradycji literackich. Po pierwsze zatem, stosownie do atmosfery renesansu, czerpie inspirację z utworów antycznych. Uwidacznia się to w inwokacji do greckiego boga sztuk, Apollina, nade wszystko zaś we włożeniu merytorycznego wywodu o soli – jej właściwościach, występowaniu i zastosowaniu – w usta Muzy poezji lirycznej, Euterpe. Jeśli chodzi o drugi z nurtów, wpisuje się dzieło Schrötera w odrodzeniowe zaciekawienie Wieliczką europejskich literatów takich jak wspomniany już Konrad Celtis.

Przed napisaniem swojego poematu odbył Schröter wycieczkę po kopalni; wrażenia z pobytu autora pod ziemią składają się na drugą część dzieła. Zawiera ona legendę o początkach wielickiej saliny, a dalej – wiadomości nt. organizacji, warunków i bezpieczeństwa pracy, wreszcie pochwały ówczesnych zarządców Wieliczki. Poeta odnotowuje ponadto rozmaite fenomeny, które zaobserwował był podczas swojej podziemnej wyprawy. Zdarza mu się przy tym weryfikować interpretacje owych zjawisk, dokonywane przez „miejsowych”. I tak na przykład kwestionuje opinię sztygara, który za materiał łatwopalny uważa w kopalni saletrę, samemu opowiadając się za naftą. W tym i w innych przypadkach opiera się Schröter

their publications, although some still kept using Latin. Adam Schröter was one of such more conservative writers. He was born around 1525 in Żytawa located in Łużyce (Lusatia) region, located in SE Germany and SW Poland. Schröter was well educated having studied in Frankfurt an der Oder, Prague and finally in Kraków, where he arrived in 1552. His patron was Olbracht Łaski, voivode of Sieradz voivodeship, in whose residency in Kieżmark (now Kežmarok in Slovakia) Schröter spent several years, and where he died around 1572 (Węclewski, 1879; Hajdukiewicz, 1995).

Schröter's writings included both translated works of renowned alchemist and pioneer of iatrochemistry Paracelsus as well as his own poems. The best known and the most popular Schröter's poem is without any doubts his *Regni Poloniae Salinarum Wieliciensium iucunda et vera descriptio* ('Joyful and detailed description of salt mine located in Wieliczka and belonging to the Kingdom of Poland'). In this poem, influence and inspiration of both classic antique and Renaissance writers could be observed. First part of Schröter's poem contains legend on the beginnings of the Wieliczka Salt Mine. In its second part he provided detailed description of the mine that was based on his first-hand experience gained during his underground trip into the Wieliczka "abyss", organization of mining activities, short information on key figures from the mine, description on various technical aspects of exploitation of salt, history of mining shafts etc.

A copy of second edition of Schröter's poem from the collection of the first author of this abstract contains very interesting inscriptions on the title page: Schröter's handwritten dedication to Abraham Bakssay, secretary of Albert a Lasko, and signature of F. Wężyk (Fig. 1). Albert a Lasko refers to Olbracht Łaski (1536 – 1604), very important political figure of Kingdom of Poland, senator, voivode of Sieradz voivodeship, staroste of Lanckorona and of Marienburg, also alchemy aficionado and adventurer (Kraushar, 1882). In the age of 12 years he was sent to court of emperor Carl V and then to court of Archduke Ferdinand, later King of Germany, Bohemia, Hungary, and Croatia, and since 1556 – the Holy Roman Emperor. Łaski supported Habsburg dynasty, aspired to the throne of Moldova, was involved in wars with the Ottoman Empire. In 1569 he was one of signatories of Union of Lublin, converted from Calvinism to Catholicism and became vivid activist of the Counter-reformation. Financial troubles caused by his adventurous political and personal life prompted Łaski's interest in alchemy, especially in transmutation of sand and metals into gold. In 1583 he travelled to London where he tied close contacts with renowned alchemists John Dee and Edward Kelley. He travelled with them to Poland and then in 1585, to Prague. Łaski's interest in alchemy led to his invitation for Adam Schröter who was supposed to embark on alchemy studies in the castle of

na naukach Paracelsusa, pod którego wpływem pozostawał. W dziele zamieścił również swoje przemyślenia na temat pochodzenia soli, legendę o odkryciu złóż wielickich, charakterystykę wybitnych postaci z administracji żupnej, opisał wreszcie historię szybów oraz opis prac górniczych związanych z wydobyciem soli.

Bardzo ciekawy jest egzemplarz drugiego wydania poematu Schrötera, pochodzący ze zbiorów pierwszego autora niniejszego abstraktu. Na stronie tytułowej znajduje się tam bowiem odręczna dedykacja Schrötera o następującym brzmieniu: *Wspaniałemu, świetnemu, wielce uczonemu mężowi, Panu Abrahamowi Bakssay, Sekretarzowi Alberta a Lasko, Panu zasługującemu na wszelkie względy, Autor* (Fig. 1). Oprócz tej autorskiej dedykacji widnieje tam również podpis F. Węzyka.

Wspomniany w dedykacji Albert a Lasko to Olbracht Łaski (1536 – 1604), senator Rzeczypospolitej, wojewoda sieradzki, starosta lanckoroński, starosta marienburski, a do tego fascynat alchemii i znany awanturnik (Kraushar, 1882). Łaski w wieku 12 lat został wysłany na dwór cesarza Karola V, a następnie na dwór jego brata arcyksięcia Ferdynanda, w późniejszych latach króla Niemiec, Czech, Węgier i Chorwacji, a od 1556 roku - cesarza rzymskiego. W polityce polskiej popierał Habsburgów, aspirował do tronu mołdawskiego, brał udział w wojnach z Tatarami. Był sygnatariuszem aktu unii lubelskiej zawartej w 1569 r.; w tym samym roku przeszedł z kalwinizmu na katolicyzm i stał się gorliwym działaczem kontrreformacji. Kłopoty finansowe będące w dużej mierze efektem jego awanturniczego życia spowodowały, że zainteresował się alchemią, w szczególności możliwością transmutacji piasku i różnych metali w złoto. W 1583 r. wyjechał do Londynu gdzie rozpoczął współpracę ze znanymi alchemikami Johnem Dee i Edwardem Kelleyem, z którymi 1583 roku przybył do Polski, a w 1585 roku udał się do Pragi. Zainteresowania alchemiczne Łaskiego miały spowodować, iż do rodzinnego zamku w Kieżmarku ściągnął Adama Schrötera, zlecając mu badania alchemiczne. Można się domyślać, że takie tło kontaktów Łaskiego i Schrötera było dla tego drugiego jednym z powodów wyprawy do Wieliczki, uważanej ówczesnie za miejsce bez mała magiczne.

Dedykacja jest dla Abrahama Bakssaya – chodzi tu o Abrahama Bakschaya, sekretarza Olbrachta Łaskiego, z którym Schröter poznał się na zamku w Kieżmarku. Był on m.in. autorem historii Węgier (Bakschay, 1573), w której znalazła się m.in. mowa Łaskiego wygłoszona w trakcie jego mołdawskiej wyprawy (Puchalski J., 1997). Łaskiego, Bakschaya i Schrötera łączyły bliskie stosunki - jak pisał Teodor Jeske-Choiński (Jeske-Choiński, 1904) w swojej powieści o Łaskim: *Miał lat dwadzieścia siedm. Od wieku chłopięcego otaczali go tylko mężowie albo wielkich cnót rycerskich, albo wielkiej nauki. Pan Maciej Łobócki, jego powinowaty i opiekun, głośny z dzieł wojennych, wprawiał mu rękę do miecza i kopii; Frycz Modrzewski i Erazm Krasieński polerowali jego dowcip; śląski poeta laureatus Adam Schroeter i kronikarz węgierski Abraham Bak-*

Kieżmark. Most probably this prompted Schröter's visit in Wieliczka as it was regarded as an almost magical place.

Schröter's hand-written dedication is for Abraham Bakschay – i.e. Abraham Bakschay, secretary of Olbracht Łaski, whom Schröter met in Kieżmark. Between others he published history of Hungary (Bakschay, 1573) in which Łaski's speech given during war expedition to Moldova was included (Puchalski J., 1997). Over the years, Łaski, Bakschay and Schröter became close associates (Jeske-Choiński, 1904).

Franciszek Węzyk (1785 - 1862), whose signature is also visible on the title page of the analyzed copy of Schröter's poem (Fig. 1), was also very interesting person, although from a very different epoch. Węzyk was a playwright, writer, poet, translator, literary critic, publicist, member of Towarzystwo Warszawskie Przyjaciół Nauk “Warsaw Society of Friends of Learning”, president of Towarzystwo Naukowe Krakowskie “Kraków Scientific Society”, member of parliaments of Duchy of Warsaw and Congress Kingdom of Poland, senator, freemason. One of his best known publications is a poem that contains detailed description of Kraków and its environs. It was written in 1809-1813, first published in 1820 (Węzyk, 1820) and then in 1823, 1833 and 1869. It contains fairly extensive description of the Wieliczka Salt Mine and fire that took place in 1509. In Węzyk's poem on Wieliczka significant influence of Schröter's poem is clearly visible.

schay byli towarzyszami, przyjaciółmi jego lat młodzieńczych. (...) Nie jeden wieczór przepędził w tej cichej izbie młody magnat w towarzystwie poety Schroetera i kronikarza Bakschaya, pijąc z wiecznie świeżych ksiąg mądrość przeszłości i ogień poezji.

Ciekawą postacią choć już z zupełnie innej epoki był Franciszek Wężyk (1785–1862), którego podpis znajduje się na stronie tytułowej omawianego egzemplarza poematu Schrötera (Fig. 1). Był to polski dramatopisarz, powieściopisarz, poeta, tłumacz, krytyk literacki, publicysta, członek Towarzystwa Warszawskiego Przyjaciół Nauk, prezes Towarzystwa Naukowego Krakowskiego, poseł na Sejm Księstwa Warszawskiego i Królestwa Kongresowego, senator, wolnomularz. Jednym z jego dzieł jest wierszowany opis Krakowa i jego okolic zatytułowany „*Okolice Krakowa. Poema*”, powstały w latach 1809–1813, a po raz pierwszy wydany w roku 1820 (Wężyk, 1820), a następnie w 1823, 1833 i 1869. W poemacie Wężyka znajduje się m.in. obszerny opis salin wielickich i pożaru, który miał w nich miejsce w 1509 r. Da się tu bez wątpienia odczuć inspirację poematem Schrötera.

LITERATURA/REFERENCES

- Bakschay A., 1573, *Chronologia de Regibus Hungaricis, prius nunquam edita*. Cracoviæ
- Bugaj R., 1999, Renesansowy poemat o soli kamiennej - Adam Schröter *Salinarum Vieliciensium description*. *Kwartalnik Historii Nauki i Techniki*, 44 (2): 61-94.
- Celtis K., 1582, *Salinaria ad Janum Terinum*. [w]: Pistorius J.N., *Polonicae historiae corpus: hoc est Polonicarum rerum Latini recentiores et veteres scriptores, quotquot extant uno volumine comprehensi omnes*. Basileae, t. 1, 170.
- Döpp S., 2019, Adam Schröter - Regni Poloniae salinarum Vieliciensium descriptio / Das Salzbergwerk von Wieliczka. Wien.
- Gawęda S., 1958, Najstarsze relacje cudzoziemców o kopalni w Wieliczce. *Studia i materiały z dziejów nauki polskiej*, seria D, 1: 227-247.
- Hajdukiewicz L., 1995, Schroeter Adam. [w]: Romanowski A., (red.), *Polski Słownik Biograficzny*, 36, 3-4.
- Jackson M.P.A., Hudec M.R., 2017, *Salt Tectonics. Principles and Practice*. Cambridge University Press.
- Jeske-Choiński T., 1904, O mitrę gospodarską. *Powieść historyczna z XVI stulecia*. Warszawa-Kraków.
- Keckowa A., 1969, *Żupy krakowskie w XVI - XVIII wieku (do 1772 roku)*. Wrocław - Warszawa - Kraków.
- Korwin Wawrzyniec, 1502, *Hortulus Elegantiarum Magistri Laurentii Corvini Novoforensis. Partim ex Marci tullii Ciceronis surculis: partim ex suo germine consitus. In cuius fine describitur Cracovia Poloniae Metropolis carmine Saphico*. Cracoviæ.
- Kraushar A., 1882, *Olbracht Łaski wojewoda sieradzki. Wizerunek historyczny na tle dziejów Polski XVI wieku*. Warszawa-Kraków.
- Łanowski J., 1962, *Laurentiusa Corvina pochwala Polski i Krakowa*. *Meander*, 17 (5).
- Maślankiewicz K., 1965, *Z dziejów górnictwa solnego w Polsce*. Warszawa.
- Piastrak F., 1901, *Opis salin wielickich przez Adama Schrötera uwieńczzonego poetę*. Kraków.
- Poborski J., 1965, *Historyczny rozwój poglądów na budowę geologiczną złoża solnego Wieliczki*. *Studia i Materiały do Dziejów Żup Solnych w Polsce*, 1: 37-54.
- Puchalski J., 1997, *Polonika z obszaru niemieckojęzycznego - poza granicami Rzeczypospolitej - w XVI wieku*. Warszawa.
- Rowan M.G., Krzywiec P., Bukowski K., Przybyło J., 2020, *Nature and origin of large-scale and intrasalt deformation within the Wieliczka salt mine, Poland*. *Geological Quarterly*, 64 (4): 819–837.
- Rybarski R., 1932, *Wielickie Żupy Solne w latach 1497-1594*. Warszawa.
- Schröter A., 1553, *Salinarum Vieliciensium iucunda ac vera descriptio carmine elegiaco*. Cracoviæ.
- Schröter A. 1564, *Regni Poloniae salinarum Vieliciensium descriptio carmine elegiaco, iam denuo ab ipso authore Adamo Schrötero revisa et aucta*. Cracoviæ.
- Smaroń A., *Żupy krakowskie w poezji polsko-łacińskiej od XV do XVII wieku*. *Studia i Materiały do Dziejów Żup Solnych w Polsce*, 12: 89–108.
- Vadiani J., 1582, *Commentariolus in Pomponium Melam. De Sarmatia*. [w]: Pistorius J.N., *Polonicae historiae corpus: hoc est Polonicarum rerum Latini recentiores et veteres scriptores, quotquot extant uno volumine comprehensi omnes*. Basileae, t. 1, 158-163.
- Węclewski Z. 1879, *Szlązacy w Polsce*. *Przewodnik Naukowy i Literacki*, 7, 117 str. Lwów.
- Wężyk F., 1820, *Okolice Krakowa, poema*. Kraków.
- Willich J., 1543, *De salinis cracovianis observatio autore Jodoco Willichio Rosseliano in epistola ab Severinum Bonner de Balice Salinarum Praefectum*. Cracoviæ.



Kopalnia soli „Wieliczka” w filmie

„Wieliczka” Salt Mine in a film

Jerzy PRZYBYŁO

Kopalnia Soli „Wieliczka” S.A. Park Kingi 1, 32-020 Wieliczka, e-mail jerzy.przybylo@kopalnia.pl
„Wieliczka” Salt Mine, Park Kingi 1, 32-020 Wieliczka, e-mail jerzy.przybylo@kopalnia.pl

STRESZCZENIE

Kopalnia Soli „Wieliczka” oprócz uprzedniej funkcji zakładu wydobywczego, a obecnie obiektu turystycznego, pełni też rolę pomnika kultury narodowej. Jedną z jej postaci to od kilkudziesięciu lat plener filmowy. W Kopalni zostało zrealizowanych wiele filmów, zarówno dokumentalnych i edukacyjnych, jak i fabularnych. Filmy z tej pierwszej grupy przedstawiają dzieje kopalni i jej walory górnicze, poznawcze i przyrodnicze, fabularne zaś inspiracje czerpią z magii i tajemnic podziemi wielickich.

Filmy realizowane w kopalni niejednokrotnie były nagradzane na krajowych oraz międzynarodowych festiwalach filmowych. Pierwszym z nich był obraz „Wieliczka” Jarosława Brzozowskiego, nagrodzony w 1946 roku na festiwalu filmowym w Cannes I nagrodą w kategorii filmu dokumentalnego, oświatowego. W kopalni zrealizowano kilka znaczących w polskiej kinematografii filmów, w tym *Na Srebrnym Globie* Andrzeja Żuławskiego (1977 r.), *Seksmisję* Juliusza Machulskiego (1983 r.) czy *Młyn i Krzyż* Lecha Majewskiego (2011 r.).

Walorami ważnymi dla realizacji produkcji filmowych w kopalni są: światowa marka obiektu, bardzo dobre skomunikowanie Wieliczki z Krakowem, doświadczenie pracowników kopalni przy realizacji tego typu przedsięwzięć, gotowa scenografia, ciągły ruch zakładu, umożliwiający pracę ekip filmowych także w nocy, a ponadto możliwość do wykorzystania bazy hotelowej i gastronomicznej Wieliczki.

Słowa kluczowe: Kopalnia Soli „Wieliczka”, film fabularny, film dokumentalny, film oświatowy, serial.

ABSTRACT

Besides its previous function as saltworks and its current status as a tourist attraction, the “Wieliczka” Salt Mine also serves as a landmark of the Polish culture. It has also been used as a filmmaking location and setting for several decades. Many films have been shot in the salt mine, including documentaries, educational films, and feature films. The films from the first group depict the history of the mine and its industrial, cognitive, and natural values, while the fictional films draw inspiration from the magic and mysteries of the underground sites of “Wieliczka”.

The films made in the salt mine have often been awarded at national and international film festivals. The first awarded film was the “Wieliczka” by Jarosław Brzozowski which received the First Prize in the documentary and educational film category at the Cannes Film Festival in 1946. Several films that became significant for the Polish cinematography were shot in the salt mine, including *On the Silver Globe* by Andrzej Żuławski (1977), *Sexmission* by Juliusz Machulski (1983), and *The Mill and the Cross* by Lech Majewski (2011).

The salt mine presents important advantages for film production, including the worldwide recognition of the facility, excellent transportation connections between Wieliczka and Kraków, the experience of the mine’s employees in carrying out such projects, “ready-made” film sets, or a continuous operation of the underground facilities that allows film crews to work also at night, as well as the availability of accommodation and catering facilities in Wieliczka.

Keywords: “Wieliczka” Salt Mine, feature films, educational films, film series

ABSTRACT

The Wieliczka Salt Mine, besides its previous function as an extraction plant and its current status as a tourist attraction, also serves as a monument of national culture. One of its forms has been an open-air film set for several decades. Many films have been produced in the mine, including documentaries, educational films, and feature films. The films from the first group depict the history of the mine and its mining, cognitive, and natural values, while the fictional ones draw inspiration from the magic and mysteries of the underground in Wieliczka.

Films produced in the mine have often been awarded at national and international film festivals. The first of them was the film "Wieliczka" by Jarosław Brzozowski, which won the 1st prize in the documentary and educational film category at the Cannes Film Festival in 1946. Several significant films in Polish cinematography have been shot in the mine, including "On the Silver Globe" by Andrzej Żuławski (1977), "Sexmission" by Juliusz Machulski (1983), and "The Mill and the Cross" by Lech Majewski (2011).

The important advantages for film production in the mine include the worldwide recognition of the facility, excellent transportation connections between Wieliczka and Krakow, the experience of the mine's employees in carrying out such projects, ready-made sets, the continuous operation of the facility, which allows film crews to work at night, as well as the possibility of using the hotel and catering facilities in Wieliczka.

Keywords: Wieliczka Salt Mine, feature films, educational films, series

1. WSTĘP

Intencją artykułu jest ukazanie związku Kopalni Soli „Wieliczka” z szeroko rozumianą kinematografią, zarówno dokumentalną oraz edukacyjną, jak i fabularną. Literatura przedmiotu jest bardzo uboga, zatem korzystano z informacji zamieszczonych w internecie, zarówno z krótkich notatek, jak i filmów dokumentalnych, takich jak „Ucieczka na Srebrny Glob” Kuby Mikurdy. Bardzo pomocne okazały się rozmowy z pracownikami kopalni lub statystami spoza niej, którzy uczestniczyli w powstawaniu podziemnych filmów. Autor ma także osobiste wspomnienia z kilku obrazów, w których realizacji aktywnie brał udział lub był świadkiem pracy ekip filmowych.

Kopalnia soli „Wieliczka” jest obiektem unikatowym w skali światowej, lecz paradoksalnie stosunkowo mało znanym. Turyści poznają tylko jej mały fragment; część objęta trasą turystyczną oraz podziemną ekspozycją Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka to zaledwie około 10 % całości podziemnego labiryntu. Dosłownie labiryntu, intrygującego dla

1. INTRODUCTION

This paper is intended to present the association of the "Wieliczka" Salt Mine with broadly understood cinematography, including documentary, educational, and feature films. The literature on the subject is scarce. For that reason, it was necessary to resort to the information available in the Internet, in the form of short notes or such documentary films as the *Escape to the Silver Globe* by Kuba Mikurda. Besides, interviews with the salt mine workers and extras who had participated in underground film shooting were very helpful. The author himself cherishes personal memories of several projects in which he either actively participated or observed the activities of film crews.

The "Wieliczka" Salt Mine is a unique landmark on a global scale, although, paradoxically, it may not be known in full. The tourists learn about a small portion of the underground complex, including the tourist route and the underground Museum, covering about 10% of the whole underground labyrinth. It is literally a labyrinth, intriguing for those who can visit the sections made available to visitors and those areas that raise special interests. It is not strange that the mine's nooks attract people with open minds. The Polish writer Bolesław Prus was one of them. He wrote his description of the labyrinth in his novel "Pharaoh" right after his visit to the salt mine. Filmmakers were always enchanted by underground scenery. They were also challenged by both technical difficulties associated with underground film shooting and unusual scenery entailed by the mine's secrets.

The salt mine started its mining activities in the second half of the 13th century after the first known shaft, the Goryszowski, had been dug out. It is also possible that the Shaft on the Castle of mid-13th century was the first one. From the end of the 13th century to 1996 when mining operations were stopped, about 2,500 chambers and 250 km of corridors were dug out. However, only a small proportion of the mine's workings are presently available for exploration. Large sections of the mine's workings have been either liquidated by backfilling or they collapsed as a result of natural convergence processes. The workings that are opened for tourists or museum exhibitions, as well as the protected sections of the salt mine remain in a good technical condition and they attract filmmakers as well.

The visual values of the salt mine consist in an unusual diversity of sights, owing to the fact that salt mining continued across 700 years, with various salt mining methods, from "dry", based on mechanical rock cutting, to "wet" by leaching salt rocks with fresh water. The diversity of the geological structures of the salt deposit, situated on the forefield of the Carpathian Mountains, owes its complexity to mountain formation movements, selective salt-bed extraction, and the mastery of the ancient mine carpenters who protected the

tych, którzy mogą go przemierzać zarówno w jego udostępnionej części, jak i tej niedostępnej dla przeciętnego turysty. Nic dziwnego, że zakamarki kopalni wzbudzają zainteresowanie ludzi o otwartych umysłach. Na przykład wielickimi podziemiami zafascynował się Bolesław Prus. Fragment „Faraona”, w którym opisał egipski labirynt, powstał po wizycie pisarza w kopalni. Podobnie zauroczeni kopalnią byli filmowcy, dla których bodźcem do zmięczenia się z podziemia-
mi były zarówno trudności techniczne związane z realizacją filmów w tak nietypowej scenerii, ale i kopalniane tajemnice.

Kopalnia rozpoczęła swoje funkcjonowanie w drugiej połowie XIII wieku, kiedy to zgłębiono pierwszy znany jej szyb Goryszowski (możliwe, że w połowie trzynastego stulecia istniał szyb zwany Szybem na Zamku, ale są to tylko przypuszczenia). Od końca XIII wieku do roku 1996, kiedy to ostatecznie zaniechano eksploatacji, pod ziemią powstało około 2500 komór i około 250 kilometrów chodników. To suche liczby. Jeśli chodzi o dostępność tych wyrobisk, to tylko mniejsza część z nich jest obecnie możliwa do penetracji. Całe partie kopalni są już zlikwidowane w procesie podsadzania (wypełniania piaskiem) lub niedostępne w wyniku naturalnych procesów zaciskania pogórnich pustek. Jednak wyrobiska, które są objęte ruchem turystycznym lub ekspozycjami muzealnymi, a także część kopalni zabezpieczona lub znajdująca się w dobrym stanie technicznym może być przedmiotem zainteresowania filmowców.

Atutem wizualnym kopalni jest jej niezwykle urozmaicenie, wynikające ze zróżnicowanego czasu powstawania wyrobisk (ponad 700 lat eksploatacji), różnorodnych sposobów wydobycia soli (od metod „na sucho” polegających na mechanicznym odbijaniu bloków soli do metod „na mokro”, czyli ługowania skał solnych słodką wodą). Zróżnicowanie budowy geologicznej złoża, leżącego na przedpolu Karpat i zawdzięczającego ruchom górotwórczym swą skomplikowaną formę, selektywna eksploatacji solnych pokładów oraz mistrzostwo dawnych cieśli górniczych, którzy dla zabezpieczenia wyrobisk stworzyli imponujące podziemne konstrukcje (komory Drozdowice, Michałowice, Jezioro Piłsudskiego i inne), a także podziemne jeziora solankowe oraz szata naciekowa wtórnych soli, tworzą nastrój, który umiejętnie wykorzystany jest ozdobą filmowych produkcji.

Produkcje te z grubsza można podzielić na dwa nurty. Filmy fabularne eksploatują kopalnię na polu jej tajemnicy i magicznego nastroju. W tym przypadku ważna jest reżyserka fantazja. Twórcy filmów dokumentalnych koncentrują się zaś na fenomenie Wieliczki jako obiekcie przyrodniczym, technicznym oraz historycznym. Historia Żup Krakowskich, czyli kopalni w Wieliczce i Bochni, nierozdzielnie tożsama jest z historią Polski. Ważna jest także ich rola sakralna i kulturalna w dziejach naszego kraju.

underground workings by magnificent timber structures, still visible e.g. in the Drozdowice and Michałowice Chambers, as well as the Piłsudski’s Lake and other underground brine ponds, with their secondary infiltration coating. They all create the atmosphere that can be skilfully used to adorn film productions.

We can distinguish two types of films shot in the salt mine. The feature films use the salt mine’s mystery and magical impressions. In that case, the director’s fantasy is important. However, the documentalists concentrate rather on the phenomenon of the “Wieliczka” as a natural, technical, and historical landmark. The history of the Kraków Saltworks, composed of the “Wieliczka” and “Bochnia” Salt Mines, is inseparably associated with the history of Poland. The salt mines also played significant sacral and cultural roles in the history of the Polish nation.

2. THE FIRST MOVIES SHOT IN THE “WIELICZKA” SALT MINE

The invention of the Lumière brothers arrived in the “Wieliczka” Salt Mine in the inter-war period.¹ The first underground footage had the form of short documentaries. A short film *Wieliczka, a Pearl of the Polish Salt Mines* was produced in 1931. The documentary “*Wieliczka*” *Salt Mine* (1935), an episode of the educational film series entitled “Present-Day Poland,” was released by the Film Institute of the Museum of Industry and Agriculture. Those were purely documentary film records, produced by poor techniques, as the present-day specialists claim (Hendrykowska 2014).

Soon before World War II, a short footage was shot in the salt mine by the American Company Fox Movietone News that used to produce newsreels shown in movie theatres before main shows (Krasicka 1946).

During the period of the occupation, the Germans made a film about the salt mine. It was mentioned by Sabina Krasicka in her article in the “*Dziennik Polski*” (Krasicka 1946). The author of this paper has not been successful in finding the American or German footage.

The first professional film that showed the underground workings was produced only in 1946, or 51 years after the cinematograph had been patented. The film was shot by Jarosław Brzozowski, a former soldier of the Home Army and later a director and cameraman of documentary and educational films.

The company “Nazi Film und Propaganda Stelle” was founded during the war in Kraków. It was designed to promote the Nazi propaganda on the Generalgouvernement terri-

¹ Małgorzata Hendrykowska wrote that the film *The Pictures of Wieliczka* was shot in 1910. The film could have shown either the sites of the town, or maybe the paintings of the town by Piotr Stachiewicz, showing the underground chambers of the salt mine (Hendrykowska 2014).

2. PIERWSZE FILMY

Wynalazek braci Lumière trafił do wielickiej kopalni już w okresie międzywojennym.¹ Pierwsze ujęcia podziemnych wyrobisk miały charakter krótkich dokumentów. Z roku 1931 datowany jest film krótkometrażowy *Wieliczka – perła kopalń polskich*, a z roku 1935 dokument wyprodukowany przez Instytut Filmowy przy Muzeum Przemysłu i Rolnictwa *Kopalnia Soli w Wieliczce*, należący do serii filmów oświatowych „Polska współczesna”. Były to filmy dokumentalne, jednak, jak podają znawcy tematu, dość kiepsko zrealizowane (Hendrykowska, 2014).

Tuż przed II wojną światową powstała krótka migawka o kopalni zrealizowana przez amerykańską firmę Fox Movietone News, która produkowała filmowe kroniki wyświetlane w kinach przed seansami filmowymi (Krasicka, 1946).

Podczas okupacji, jak podaje Sabina Krasicka w swym artykule z *Dziennika Polskiego*, Niemcy nakręcili obraz o kopalni (Krasicka, 1946). Do produkcji amerykańskiej i niemieckiej nie udało się autorowi dotrzeć.

Pierwszy profesjonalny film, na którym zostały uwiecznione wielickie podziemia powstał dopiero w 1946 roku, czyli 51 lat po opatentowaniu kinematografu. Nakręcił go Jarosław Brzozowski, operator i reżyser filmów dokumentalnych i oświatowych, żołnierz AK.

Podczas okupacji w Krakowie działało przedsiębiorstwo „Nazi Film und Propaganda Stelle”, którego zadaniem było kierowanie hitlerowską propagandą na terenie Generalnej Guberni. Jego siedzibą był budynek w Krakowie zlokalizowany przy ulicy Józefitów 16 – obecna jedna z siedzib Muzeum Historii Fotografii w Krakowie. Po ucieczce Niemcy pozostawili ją wyposażoną w salę kinową, laboratorium i sprzęt.

W maju 1945 roku urodziła się inicjatywa w miarę niezależna od nowych władz filmowa inicjatywa. Były to *Warsztat Filmowy Młodych*, zorganizowany w Krakowie przez Antoniego Bohdziewiczza (reżysera i scenarzysty) i Stanisława Wohla (operatora, scenarzysty i reżysera), i jej kontynuacja - *Kurs Przynależności Filmowego*, prowadzony także przez Antoniego Bohdziewiczza, a następnie przez Stanisława Furmanika (krytyka i teoretyka literatury). Bazą techniczną i siedzibą filmowców był budynek na ulicy Józefitów. Jednym z wykładowców *Kursu...* był pochodzący z Wileńszczyzny Jarosław Brzozowski. Za namową uczestniczki kursu Sabiny Krasickiej, nauczycielki pochodzącej z Łucka, a osiadłej po wojnie w Wieliczce, podjął się trudu uwiecznienia kopalnianych podziemi (Ryc.1,2). Wyreżyserował w 1946 roku film *Wieliczka*, który na I festiwalu filmowym w Cannes w 1946 roku zdobył I nagrodę w kategorii filmu dokumentalnego, oświatowego (Albrecht, 1998, Radkie-

tory. The company was located at 16, Józefitów St. in Kraków, in the building which is presently used by the Museum of the History of Photography in Kraków. After the Germans had escaped from the city, they abandoned a fully equipped movie theatre, film laboratory, and equipment.

In May of 1945, a new film initiative was conceived, fairly independent from the Polish authorities. It was called the *Film Workshop of the Youth*, organised in Kraków by Antoni Bohdziewicz, film director and scriptwriter, and Stanisław Wohl, cameraman, director, and scriptwriter. The Workshop developed into the *Filmmaking Course*, conducted first by Antoni Bohdziewicz and later by Stanisław Furmanik, an expert on film, literary theory, and criticism. The building at the Józefitów St. remained the technical centre for the filmmakers. Jarosław Brzozowski was another instructor of the *Filmmaking Course*. He arrived in Kraków from the Vilna Region. He was persuaded by the trainee Sabina Krasicka, a teacher who came to Wieliczka from Łuck after the war, to document the salt mine's underground workings (Figs. 1 and 2). Brzozowski directed the film *Wieliczka* in 1946. The film was granted the First Prize in the documentary and educational film category at the First Film Festival in Cannes in 1946 (Albrecht 1998; Radkiewicz 2020; Hendrykowska 2018). Later, the Stalinist era entailed Poland and it was not possible to exploit the film's success. Brzozowski was arrested in 1948. He was accused of secret filming of the occupation of Lithuania, failure to reveal himself after the so-called amnesty of 1947, and illegal possession of arms. The communist court martial sentenced him to 6 years of prison (Kosturbiec 2023).

The *Wieliczka* by Jarosław Brzozowski was digitally remastered and has been available in the Internet since 2022.

Tadeusz Kallwejt, director of educational films, cameraman and scriptwriter, produced the short film *Salty Bread* (1958) reporting on the life of salt miners. The documentary was released by the Educational Film Studio (WFO) in Łódź (FilmPolski.pl 2023).

Another awarded documentary about the “Wieliczka” was the *Magnum Sal – Wieliczka* (1976). Mieczysław Vogt was its director, scriptwriter, and cameraman. The film was dedicated to the founder of the Kraków Saltworks Museum, Alfons Długosz. In 1977, the film received the prize granted by the NOT Museum of Technology *for the best film designed to shape technological culture that propagates the traditions of technology and the protection of technical landmarks, documenting national culture*. The next film by Vogt was entitled *Salt: the Rock We Eat* (1978) (FilmPolski.pl 2023).

3. 1977

Year 1977 was rich in cinematography events involving shooting of films in the salt mine. Jerzy Gościk completed a report on the Kraków Saltworks Museum, entitled simply

¹ Jak podaje Małgorzata Hendrykowska w 1910 roku został zrealizowany film *Obrazy Wieliczki*. Możliwe, że były to migawki z miasta, ale może też dosłownie – sfilmowane obrazy Piotra Stachewicza ukazujące wielickie podziemia (Hendrykowska, 2014).

wicz, 2020, Hendrykowska, 2018). Wkrótce jednak nad Polską zapadła stalinowska noc, która uniemożliwiła komercyjne wykorzystanie tego sukcesu, Brzozowski został w 1948 roku aresztowany. Oskarżono go o potajemne rejestrowanie okupacji na Litwie, nieujawnienie się po tak zwanej amnestii z 1947 roku oraz nielegalne posiadanie broni. Komunistyczny sąd wojskowy skazał go na 6 lat więzienia (Kosturbiec, 2023).

Film „Wieliczka” Jarosława Brzozowskiego po rekonstrukcji cyfrowej jest od 2022 roku dostępny w internecie.

Tadeusz Kallwejt, reżyser filmów oświatowych, operator i scenarzysta, zrealizował w 1958 roku krótki film *Słony chleb*, traktujący o pracy górników solnych. Dokument ten firmowała Wytwórnia Filmów Oświatowych w Łodzi (FilmPolski.pl, 2023).

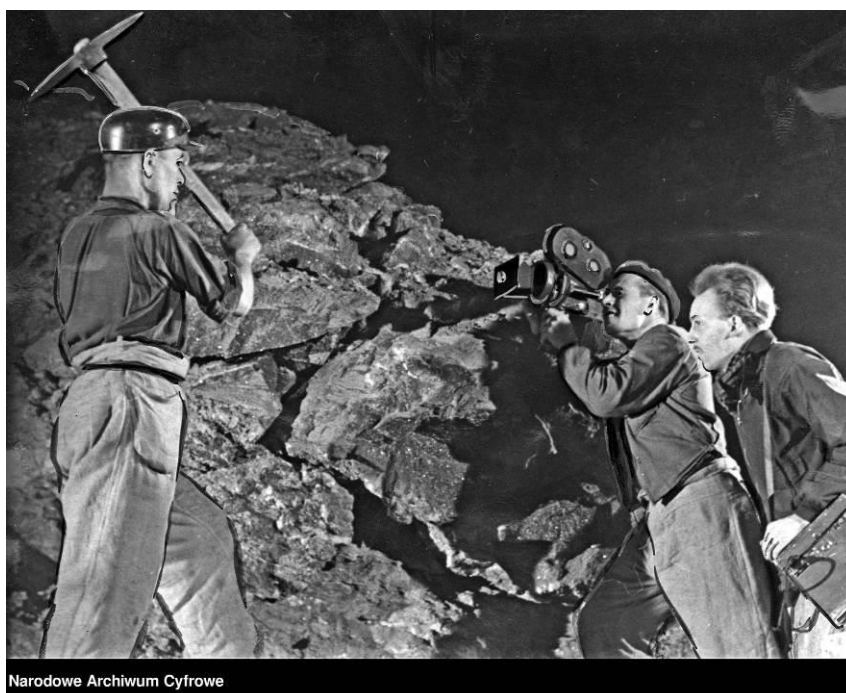
Kolejnym nagrodzonym filmem dokumentalnym o Wieliczce był nakręcony w 1976 roku obraz *Magnum Sal – Wieliczka*. Reżyserem, autorem scenariusza i jednocześnie operatorem kamery był Mieczysław Vogt. Film poświęcony został postaci twórcy Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka Alfonsowi Długoszowi. W 1977 roku otrzymał nagrodę Muzeum Techniki NOT za *najlepszy film służący kształtowaniu kultury technicznej popularyzującej tradycje techniki i ochrony jej zabytków jako dokumentu kultury narodowej*. Następny film Vogta nosił tytuł *Sól – to kamień, który jemy* i powstał w 1978 roku (FilmPolski.pl, 2023).

3. ROK 1977

Rok 1977 był bogaty w wydarzenia filmowe ekranizowane w samej kopalni. Jerzy Gościak zrealizował reportaż

Wieliczka, to the order of the National Centre for Tourist Information and Promotion (COliRT) (FilmPolski.pl 2023). In the same year, the salt mine debuted in two large feature films. One of them became a “cult movie”: *On the Golden Globe*, directed by Andrzej Żuławski who passed away in 2016. Żuławski started to shoot the *Moon Trilogy* in 1976, based on the book written by his great-uncle. The book was written in 1903–1911 and depicted a metaphysical anxiety of a man who was isolated from his natural environment. The project was unique for the socialist realities of Poland at that time and the production was interrupted by the then Minister of Culture and Art, Janusz Wilhelmi, on the pretext that the film’s budget had been exceeded. Żuławski was disliked by the authorities and some of his film colleagues. Once he was threatened with a suit concerning alleged mismanagement, he left for France where he continued his film career. Żuławski returned to Poland in 1987 and he was allowed to finish his project. Missing scenes were supplemented with voice-over comments. A mutilated work was released, as a symbol of political interference with art (Misiak 2006; Szczypiński 2023; Filmweb.pl 2023). The footage for the *On the Silver Globe* was shot in the underground Margelnik-Magdalena Chamber complex of the “Wieliczka” Salt Mine, situated at Level III, and partly at lower Level II of the salt mine, in the Wessel Lake Chamber, situated at Level III, and in the Zaleski Chamber at higher Level II.

“Szybik” type of salt, being the most precious salt mineral, with 99% salt content, was extracted in the first two chambers mentioned above in the first half of the 19th century. That section of the rock mass is characterised by very diverse tec-



Narodowe Archiwum Cyfrowe

Ryc. 1. Ekipa filmowa w wielickiej kopalni, lata 40. XX wieku. Zbiory Narodowego Archiwum Cyfrowego
Fig. 1. A film crew in a “Wieliczka” mine. 1940s. Collection of the National Digital Archive

Gdy przeszłość spotyka się z teraźniejszością

Z kamerą w salinach wielickich

Produkcja soli w Polsce służyła wczesno-płaskowskiej dobie. W podziemnych Wielickich o eksploatacji unocionionych okrągłymi drzwiami pracowali wzdory górnicy nad wydobyciem soli, ubrojeni w kłoty. Ciężki ich trud uświetniony został na terenie rycinie Hondiusa.

I oto teraz w r. 1946, w epoce nowoczesnej eksploatacji salin wielickich zaczęło się nagle w cennych kręzakach, rozświetlonych tylko górnymi karnkami, od postać błądzących jak odbywających przeszłość w labiryntach wielickiego podziemia historyczno-według Hondiusa otworzone — sylwety prawdziwych górników uwidnia się i przecuła tak, jak to było dawniej, obok nich, opodal, wra pracy — technicznych rozmachach — zawrotna. Błyskawicznie dynamizm wysadzano wala się całe szelmy solne, by zgniataćmi (czyli „stręperami”) motorowymi wzywany do wozków mineral znalazł się zagniatkami w łańcuch elektrycznego pojeździ, a przemiesłoni w ogromnych młynach wodował mieszane do oddzielnego użytku pensów i narodów całego świata za posiadaniem kółki i staków handlowych.

Cała historyczna przeszłość produkcji solnej i również całą rzeczywistość współczesną, na elektrycznych motorach eparta, odzwierca film p. t. „Wieliczka” nakręcony przez reżysera Jerzego Przybyłosa z ramienia Wytwórni „Film Polski”.

FILM HISTORYCZNY I NAUKOWY

Przyglądam się tej pracy. To nie jest to samo, co nakręcenie historycznego filmu w dostojnym do wszelkich sytuacji atelier, gdzie przy trickach technicznych powstają sceny kasetami kolejowych, samochodowych, a nawet samolotowych. Praca w gólbnie Saliny Wielickiej na 300-metrowym poziomie wygląda (naocznie). Reżyser Brzozowski bowiem chce pójść dalej niż wytwórnia Fox-Movieton-News, dla której przed wojną (jak imię poinformował dyrektor krakowskiego oddziału „Filmu Polskiego” dr S. Iapalski) nakręcono krótki dodatek do programów w kopalni wielickiej, a także jeszcze dalej niż Niemcy w czasie okupacji, którzy dysponując już całą masą technicznych urządzeń, nakręcili film nie dający zupełnie tego, o co iomiu, jako Polakowi, chodzi. Film bowiem p. t. „Wieliczka” ma w oparciu o naukowe opracowania mgr Siedleckiego odzwierciedlać całą geologiczną przeszłość wielickiego terenu — ma być historycznym przekrętem wydobycia soli poprzez pierwsze wieki do czasu, poprzedzającego „prymitywne” eksploatacji przy pomocy zbierania do fartuszek, czy też postępowania się kilofem we wczesnopłaskowskich czasach, do produkcji (dziśszej), pełnej tych samych dla górników niezobowiązujących postarów, lawin i ustawicznych grozy nagłej śmierci.

Toteż ekipa filmowa, w której Brzozowski jest „wznowicielem współwzrostu scenarzysty, od kilkunastu miesięcy wzywa się w podziemia wielickich, obserwując najcharakterystyczniejsze przedziały

pracy górniczej na najgłębszym jej poziomie i czyni wszystko, by widzowie całego świata ujrzeli na ekranie to, czego nie zobaczą nigdy, zwiędzając Wieliczka. Goscia bowiem spuszczeni widać na 65 metrow w głąb przez szary Damałowicza, lub schodzący srybtem Paderewskiego oświetlają najstarszą kapliczką św. Antoniego, krótkim chodnikiem dostają się do tzw. ograniczonej sali „balowej”, odwiecznymi schodkami udają się na poziom drugi, 90-metrowy, do kaplicy św. Księżki opędzają wspaniale żywandole, oddobyli i rzeźby w kryształach solnych, wykonane przez długi łańcuch górniczych pokoleń polskich, a następnie przez grocie Erasma, Komorę Michałowice, Kosy, Baranek, Drodzowice docierają na poziom 135-metrowej głębokości, po dziwiałą podziemne jezioro, jedno z cudów Wielickiej, że stalizmaty wokół, a wreszcie — jak to było przed wojną — zatrzymują się w grocie Sienkiewicza. I to wszystko. Natomiast z filmową kamerą w tej sali programowo-rezultator skich reżymach — jak to obserwuje przy nakręcaniu filmu „WIELICZKA” przez reżysera Brzozowskiego, dotrą miłony widzów kinowych do najmniejszych miejsc produkcji, ultra je w całym dzisiejszym rozmach i będą mogli obserwować nawet rezerwat przyrody: grocie Kryształowe, która jest miłkiem na świecie, bo zawiera tylko w istnienie kamyły soli chemicznie czyste.

LAWINA NA ZAMÓWIENIE

Ale aby postawiany sobie cel osiągnąć, trzeba nieustannie energii nie tylko samego reżysera, ale i wszystkich członków ekipy filmowej. Oto aby odzwierciedlić grocie lawin, których niebezpieczeństwa niesposob filmowców „na goraco”, trzeba było wywoływać je sztucznie. Gdy cała ekipa pracowała nad kręceniami okólnymi na 60-metrowej wysokości, zabezpieczona linami przed runięciem w przepaść skłania, wspiął się młody słuchacz i Kurat Przeskolenia Filmowe-

Kronika krakowska

Bezimienni a zasłużeni pracownicy muzeów krakowskich

W krakowskich muzeach miejskich zatrudnionym jest kilkunastu wożnych. Praca takiego wożnego w mieście muzeów, jakim jest Kraków, powinna interesować ogół, bo dotyczy jego akrobów kulturowych. Muszemu dołtera przede wszystkim fachowców-zręmalników, których praca przydatna jest przy konserwacji i wystawianiu zabytków. W miarę potrzeby pomagają oni w warsztatach muzealnych, ale w każdej chwili mogą być odwołani do innych zajęć. Są więc wśród wożnych starsi, introligtor, sluchacz, specjalista od konserwacji mebli, krawiec, zegarmistrz i inni pierwszorzędnie wykwalifikowani fachowcy. Dlatego też — podobnie

go, Spali w górę i drągłem podwiałł głazy. Ale lawina na zamówienie nie spada od razu i nie leci w kierunku dogodnym dla filmowej kamery. Widać trzeba było po wielokroć monitorować, a że tego powodu nie można zastosować całej zmontowanej dla celów filmu aparatury elektrycznej o 40000 Wata, to także nie.

Pomysłowość techniczna i ujęcie słowatki przychodzi tu z pomocą: reżyser Brzozowski ekspozuje jedną i tę samą scenę 18 razy, aby została ona, przy użyciu wszystkich reflektorów, prawidłowo nakświetlona. Kable elektryczne trzeba dźwigać setki metrów wraz z najważniejszą aparaturą techniczną, z miejsca jednej sceny do oddlego miejsca sceny następnej. Sluchacz Igo Kursu Przeskolenia Filmowego są pełni zgrozy przy widoku, że w miejscu, gdzie po głośniejszych warunkach technicznych, gdzie po de-wastacji wojennej niemieckich rebusów trzeba było zaszczędzenia energii świetlonej pracować przytymowo przed rzejciami fotograficznymi przez długie godziny w świetle górniczego kaganaka.

CELOWY WYSILEK

I dlatego opracowywany obecnie film budzi coraz większe zainteresowanie w sferach filmowych i naukowych, a na ekranach całego świata szerzyć będzie nie tylko wiedzę o produkcji soli polskiej, ale również uznanie dla narodu polskiego, który na wszystkich odcinkach zdewastowanego zawierucha wojenny życia podejmuje pracę twórczą. Toteż cięższą się możemy, za zdania w samej kopalni są na ukoronowania i prace wkracza w drugą fazę również trudnych zdjęć trickowych.

SABINA KRASICKA

Kraków nabkrybuje PPOK

Wojewódzki Urząd Ziemski Pracownicy Wojewódzkiego Urzędu Ziemskiego subskrybowali PPOK i zadakorowali kwotę 84000 złotych. Na poczet subskrybowanej kwoty wpłacili już pierwszą ratę.

szłyżeł wiadomości o tym, amornatnie, z najdłuższych stron Krakowa, przybył do muzeum i KIKAD; ciszt ciężkich skrzył w przeciągu godziny znalazł się w bezpierzynnym mieście. Okazało się, że niepotrzebne, a jednak egzakt ten zupełnie słusznie został zniesiony w kronice muzeum.

Komitet Niesienia Pomocy Jastu

Jedno z najbardziej zniszczonych miast Jasto wicez z całą okolicą wymaga jak najbliższej pomocy. Ludność Jasta mieszka w piwnicach lub tuła się po całej Polsce. Resztki ocalkalnych budynków niszczą z braku odpowiednich funduszy. Z inicjatywy Jasia przybywających na terenie Krakowa powstał Komitet, który zamie się w pierwszy rzędzie zebraniem funduszy, które by zaspokoły najpilniejsze potrzeby Jasia. Komitet ma zamiar ujęć w jedną ogólną kartotekę wszystkich Jasia przybywających na terenie Polski i poza jej granicami i przy ich pomocy utworzyć Komitet, który by dopomógł w zbieraniu funduszy. W programie przewidziano wydawnictwo które by zilustrowało tragedię Jasia i barbarzyństwo niemieckie.

Zobranie organizacyjne będzie miało miejsce w dniu 18 maja w sobotę w VIII Gimnazjum Państwowym przy ulicy Pileckiego 12 o godz. 17. Wszyscy Jasia przybywający na terenie Krakowa winni przybyć na zebranie.

Wiadomości sportowe

Zwierzyniecki wygrywa z Cracovią 2:0

Drużyna Zwierzynieckiego odniosła niedługo sukces, zwyciężając w meczu o mistrzostwo kl. A Cracovią 2:0 (1:0). Wypracowała go mimo niecelownej i najgłupszej gry słynnego Kozłaka z Ostrowskiego, cała drużyna Cracovii przetrwała przede wszystkim dzięki niezwykłej sile swej swoich napastników. Poza dwoma strzałami Sze-tych, z których mógł paść bramki, gdy tylko poprzeczki zadeceyowały, że piłka w siatce nie ugrzeża, napastnicy w ogóle do strzału nie dochodzili. Bobula pieczołowicie pilnowany nie wiele mógł zdziałać. Wliczając cały ciężar ostrych ataków Zwierzynieckiego spadł na dwójzącego się Gędikę i wspaniale bronącego Ry-tyckiego. Donosiłki nie dopuszczaniem do strzału napastników Zwierzynieckiego również trzaskuje na wyróżnienie. Lepsze momenty miał także Tomasiak. (1)

W OBIECIE NADCHODZĄCYCH UROZECZYSTOŚCI JUBILEUSZOWYCH T. S. „Witła” awansuje się na sobotę, 18 maja, godz. 20. Zdobędzie walek zabitości: saki: saku: sietycznej, naciekającej i turystycznej, ul. Retyckiej 10. Obecnieł wszystkich członków bezwzględnie 10

Ryc. 2. Artykuł Sabiny Krasickiej zamieszczony w Dzienniku Polskim nr 135 z 1946 roku Fig. 2. Article by Sabina Krasicka published in Dziennik Polski No. 135 of 1946

z Muzeum Żup Krakowskich pod prostym tytułem *Wieliczka*, który powstał na zlecenie Centralnego Ośrodka Informacji i Reklamy Turystycznej (FilmPolski.pl, 2023). W tym samym roku wielicka salina zadebiutowała również w dwóch dużych filmach fabularnych, z których jeden zyskał miano dzieła kultowego. Był to film *Na srebrnym globie* w reżyserii zmarłego w 2016 roku Andrzeja Żuławskiego. W 1976 roku podjął się on ekranizacji *Trylogii księżycowej* autorstwa swojego stryjecznego dziadka Jerzego Żuławskiego. Dzieło literackie, napisane w latach 1903–1911, pokazuje w sposób metaforyczny niepokój człowieka odciętego od swojego naturalnego otoczenia. Realizację nietypowego jak na realia PRL filmu przerwano na polecenie ówczesnego wiceministra ds. kultury i sztuki Janusza Wilhelmiego pod pretekstem przekroczenia budżetu. Żuławski, nie lubiany przez władzę oraz część rodzimego środowiska filmowego, zagrożony procesem sądowym o niegospodarność, wyjechał z Polski do Francji, gdzie zrobił karierę. W 1987 roku powrócił do kraju, a władza pozwoliła mu dokończyć film. Brakujące sceny uzupełniono komentarzem lektora. Powstało okaleczone dzieło – symbol ingerencji polityki w sztukę (Misiak, 2006, Szczypiński, 2023, Filmweb.pl, 2023). Zdjęcia do filmu *Na srebrnym globie* powstawały w zespole komór wielickiej kopalni Margelnik – Magdale-

tonic formations. Large workings were dug out there, owing to selective salt mining. The site was found to be ideal for moon-like landscapes. The main scenes of the film were shot in the Margelnik Chamber, close to the protective pillar situated in the central section of the chamber, which is seen in an impressive photograph of the time, showing two well-known Andrzej: Żuławski and Seweryn, the director and the film star, respectively. They are surrounded by a group of extras. The Zaleski Chamber that had been cut by the spraying method applied to the green salt boulder was also ideally suited for the atmosphere of the dark side of the Moon. The Wessel Lake Chamber was in ruin at the time of film shooting. It was refurbished only in the second half of the 1980's. After the film production had been interrupted, all the costumes and almost the whole of scenography were destroyed. Little was saved. The remains of the set decorations of 1977 can be still seen in the Magdalen Chamber, with the fragments of transparent or pink cast glass, pretending to be moon rocks, abandoned on the floor of the Zaleski Chamber (Fig. 3). How about the stories about filmmaking? In several scenes, the extras appeared naked. One of them was a male student of AGH University of Technology who presently is a well-known professor of geology at the Jagiellonian University.

na zlokalizowanych na III i częściowo II niższym poziomie kopalni, w komorze Jezioro Wessel leżącej na poziomie III oraz w komorze Zaleski na poziomie II wyższym. W dwóch pierwszych eksploatowano w 1. połowie XIX wieku pokład soli szybikowej. Ta partia górotworu charakteryzuje się bardzo urozmaiconą tektoniką, zatem w wyniku jej selektywnej eksploatacji powstały rozległe wyrobiska o urozmaiconej konfiguracji, idealnie pasujące do księżycowych klimatów. Główne sceny filmu powstawały w komorze Margelnik, w rejonie filara zlokalizowanego w jej centralnej części, co odzwierciedla efektowne zdjęcie z epoki pokazujące dwóch znanych Andrzejów – reżysera Żuławskiego oraz odtwórcę głównej roli – Seweryna. Otacza ich grupa statystów. Komora Zaleski, która powstała w wyniku eksploatacji metodą natryskową bryły soli zielonej, także idealnie wpasowuje się w nastrój ciemnej strony księżyca. Jezioro Wessel podczas kręcenia filmu było jeszcze zrujnowane, generalny remont komora ta przeszła dopiero w 2. połowie lat 80. XX wieku.

Po zatrzymaniu produkcji filmu zniszczono kostiumy i niemal całą scenografię. Ocalała jedynie jej znikoma część. W komorze Magdalena do dziś stoją resztki dekoracji z 1977 roku, a w komorze Zaleski na spągu leżą fragmenty bezbarwnego lub różowego lanego szkła, udające kamienie księżycowe (Ryc.3). A anegdota z podziemnego planu? W pewnych scenach część statystów występowała nago. Jednym ze statystujących był pewien znany dziś profesor geologii UJ, wówczas student AGH, któremu to nietypowe „zwiedzanie” kopalni tak bardzo zapadło w pamięć, że po latach musiał wrócić do kopalni, aby opisywać jej piękno i tajemnice. Profesor opowiada, że realizatorzy filmu zróżnicowali wynagrodzenie na wyższe dla tych nagich, a znacznie niższe dla tych występujących w ubraniu (do których się zaliczał), co według niego nie było w porządku.

Ciekawostką jest także zainteresowanie filmem organów nadzoru górniczego. Prace przygotowawcze do kręcenia obrazu były tematem inspekcji Okręgowego Urzędu Górniczego (dalej: OUG) w Krakowie 27 XII 1976 roku. Kierownik Ruchu Zakładu Górniczego wyznaczył imiennie osoby dozoru ruchu i zastępy ratownicze odpowiedzialne za bezpieczeństwo i stałą kontrolę atmosfery kopalnianej. Przeszkolono także członków ekipy filmowej w zakresie zachowania się w wyrobiskach i zagrożeń występujących w kopalni. Kolejna inspekcja dotyczyła poważnej sprawy. W jednej ze scen w podziemnych wyrobiskach aktorzy mieli biegać z otwartym ogniem – pochodniami. Na ich użycie musiał wyrazić zgodę prezes Wyższego Urzędu Górniczego, a krakowski OUG przeprowadził inspekcję w tej sprawie 4 XII 1977 roku (Wójcik, 2000).

Innym filmem, do którego sceny kręcono w wielickiej kopalni, było dzieło w reżyserii Tadeusza Kijańskiego według scenariusza Albina Siekierskiego *Okrągły tydzień*. W porównaniu z rozmachem scen *Na srebrnym globie* film ten jawi się

His unusual form of visiting the salt mine was so memorable that he went back there years after to describe the beauty and secrets of the underground world. The professor mentioned that the filmmakers paid the nude actors much more, but he did not think it was fair.

Another story concerned the interest in the film shooting expressed by the Kraków Mining Board members. Even the preparatory setting works were inspected by the board members on 27 December 1976. The Production Managers of the Salt Mine selected a team of supervisors and mine rescue workers who were responsible for safety and constant measurement of air quality underground. Also, the film crew members were trained on the conduct in the mine’s workings and underground hazards. However, another round of inspection concerned something more serious. In one of the film scenes, the actors were supposed to run with open fire, holding torches. The president of the Supreme Mining Board had to issue a special permit for that and the Kraków Board supervised the proceedings on 4 December 1977 (Wójcik 2000).

Another film shot in the salt mine was the *Entire Week* by Tadeusz Kijański, based on the script by Albin Siekierski. When you compare this film to the huge scenery of the *On the Silver Globe*, the former looks like a poetic fairy tale. The film tells a story of little Gustlik who had learned the Silesian legends told by his grandpa (Filmweb.pl 2023). The “Wieliczka” Salt Mine, including especially the Michałowice Chamber, pretended to be a Silesian Coal Mine (Fig. 4). The film was designed for teenagers, and there is a rather strange story related to the filmmaking. A local salt miner wanted to show the filmmakers in action to his son. They walked together to the Michałowice Chamber where female extras were found not to be completely dressed. The father’s good intention had to be abandoned.

4. 1980’S AND 1990’S

After those pioneering film projects, the salt mine’s film career developed very quickly. The Kraków’s “Dziennik Polski” daily published an announcement about the recruitment of female extras to play in the *Sexmission* in 1983. That sounded somewhat surrealistic in the realities of the state of emergency (discontinued on 22 July 1983), not to mention the very title of the film. The film, directed by Juliusz Machulski, with some scenes shot underground in the salt mine, was released in 1984 (FilmPolski.pl 2023). Almost immediately, it was acclaimed as a “cult film,” although it has been raising controversies among feminists until today. It seems, however, that the grievances are not fully justified because the film is primarily a mockery of a totalitarian state which Poland was in the 1980’s (Film.wp.pl, 2023).

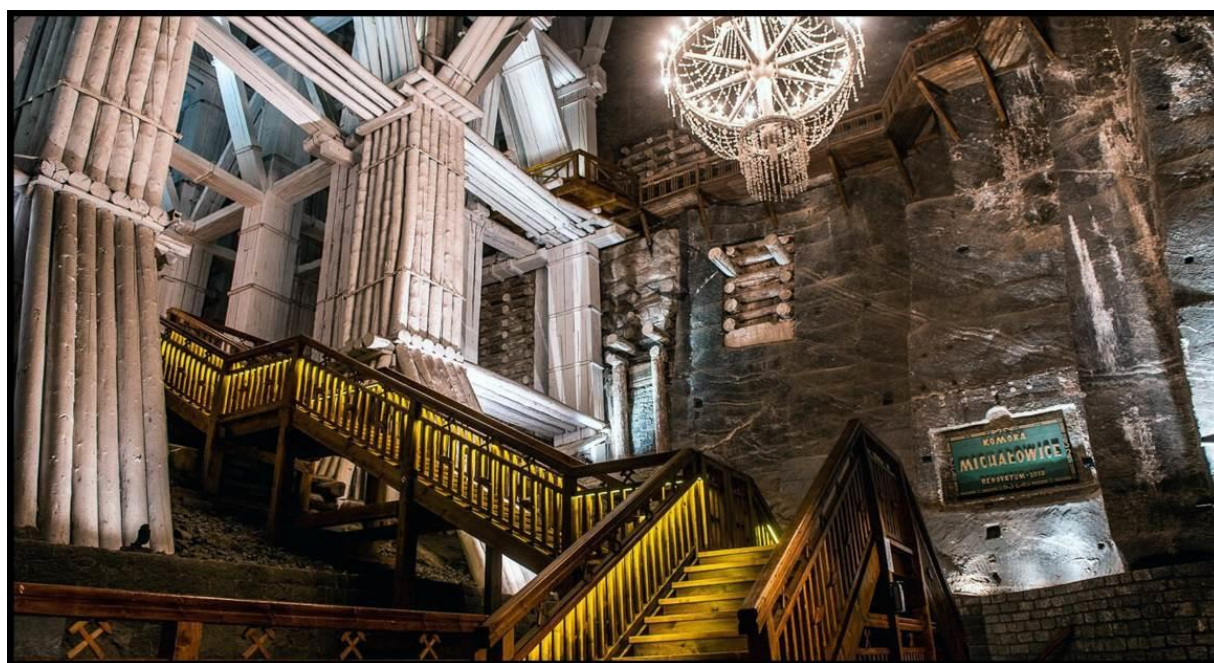
Similarly to the *On the Silver Globe*, the scenes of the *Sexmission* were shot in the Margelnik Chamber and its vicinity.



Ryc. 3. Komora Magdalena. Dekoracje do filmu *Na srebrnym globie*. Fot. Jerzy Przybyło
Fig. 3. Magdalena Chamber. Decorations for the film *On the Silver Globe*. Photo by Jerzy Przybyło

jako łagodna poetycka baśń. Jest to historia małego Gustlika, który z opowieści swojego dziadka poznaje świat śląskich legend (Filmweb.pl, 2023). Kopalnia „Wieliczka”, w szczególności zaś komora Michałowice, udają podziemia śląskiej kopalni (Ryc.4). Film przeznaczony jest dla młodzieży, zatem dziwi nieco pewna anegdota z nim związana. Pewien dołowy pracownik kopalni chciał pokazać synowi filmowców w akcji. Zawędrowali razem do komory Michałowice, w której

The Dworzec Gołuchowskiego Chamber was the other film location. In that film we can see both underground workings in their original appearance. The Dworzec Gołuchowskiego and the Margelnik Chambers were later subjected to general refurbishment. Today, we can see a different display there. In fact, one can find the traces of director Machulski's activities in the Margelnik area. In the August cross-corridor, one can notice white stripes and numbers painted on the walls to vi-



Ryc. 4. Komora Michałowice. Materiały prasowe kopalni
Fig. 4. Michalowice Chamber. Press materials of the mine

akurat kręcono scenę z niekompletnie ubranymi statystkami, co mocno pokrzyżowało ojcowskie plany.

4. LATA 80 I 90

Po tych pionierskich przedsięwzięciach filmowych filmowa kariera kopalni potoczyła się wartko. W 1983 roku w krakowskim „Dzienniku Polskim” pojawiło się ogłoszenie o naborze statystek do filmu *Seksmisja*. W realiach stanu wojennego (zniesionego 22 VII 1983 roku) brzmiało ono, jak i sam tytuł filmu, nieco surrealistycznie. Sam film, wyreżyserowany przez Juliusza Machulskiego, którego część zdjęć kręcono w podziemiach kopalni, miał swą premierę w 1984 roku (FilmPolski.pl, 2023). Niemal od razu zyskał miano kultowego, choć dziś wzbudza spore kontrowersje w kręgach feministek. Wydaje się jednak, że te pretensje są nie do końca uzasadnione, bo film jest przede wszystkim kpina z państwa totalitarnego, jakim była Polska lat 80 (Film.wp.pl, 2023)

Sceny *Seksmisji* kręcono, podobnie jak ujęcia z *Na srebrnym globie* w komorze Margelnik i jej najbliższym otoczeniu. Drugą komorą, która posłużyła za plan filmowy, był Dworzec Gołuchowskiego. Oglądając obraz, możemy zobaczyć oba wyrobiska w ich pierwotnym kształcie. Dworzec Gołuchowskiego oraz komora Margelnik przeszły później generalne remonty. Oba wyrobiska można obecnie podziwiać w nowej szacie. Do tej pory w rejonie Margelnika można znaleźć ślady po filmie Machulskiego. W poprzeczni August prowadzącej do komory pozostały namalowane na ociosach białe pasy oraz numerki, które miały ożywić plan. W zachodnim fragmencie podłużni Geramb do tej pory zalegają resztki dekoracji oraz

talise the setting. The remains of the film decorations and lettering templates used in the August cross-corridor were abandoned in the western section of the Geramb Level (Fig. 5). A whole through which the protagonists were falling during their escape from female oppressors became a regular feature of the underground landscape.

There are so many stories related to that film that a separate paper should be written. One of them involves the phrase “Our guys were here,” said by Maks after finding a rubber boot with a bottle of cheap wine hidden inside. That scene was not present in the original script but it was improvised once the actors really found such a prop in the salt mine (Machulski, Szczerba 2014). It is quite possible that the rubber boot and the bottle can be still found there.

A Canadian TV crew arrived in the salt mine in 1983. They planned to shoot one of the episodes of the film series *Le Légendes du Monde*. A 25-minute film was entitled *La dame blanche de Wieliczka* and it was directed by Jorge Fajardo (Fig. 6). The White Lady was an underground spirit feared by the miners as she might bring disasters. The story talked about a boy and a girl who were separated from a group of student visitors, got lost in the salt mine, and met the White Lady. The Polish actor Franciszek Pieczka was one of the stars in that film. The *Wieliczka* episode was awarded at the Paris Film Festival in 1984 (Białek 2023; FilmPolski.pl 2023).

In the years 1994–1995, a TV series entitled *Mission Top Secret*, directed by Marcus Cole, was produced by the Australian Grundy Television. The film was designed for teenagers and told a story of a 12-year-old girl who connected her



Ryc. 5. Do dziś w zakamarkach kopalni spotkać można pozostałości po filmie *Seksmisja*. Poniżej fot. planu z widocznymi elementami scenografii z roku 1983. Fot. Jerzy Przybyło i materiały prasowe kopalni

Fig. 5. To this day in the nooks and crannies of the mine one can find remnants of the movie *Sexmission*. Below is a photo of the set with visible elements of the set design from 1983. Photo by Jerzy Przybyło and mine press materials

szablony liter z poprzeczni August (Ryc.5). Stałym elementem podziemnego krajobrazu jest też dziura, przez którą wypadali bohaterowie filmu podczas ucieczki przed prześladowcami.

Anegdot związanych z filmem jest tak dużo, że starczyłyby ich na osobny artykuł. Jedną z nich jest sentencja „nasi tu byli”, wygłoszona przez Maksa po odkryciu gumiaka ze schowaną w nim butelką po tanim winie. Sceny tej nie było w scenariuszu, została zaimprovizowana po znalezieniu przez filmowców tych artefaktów (Machulski, Szczerba, 2014). Możliwe, że słynne gumiak i butelka w dalszym ciągu spoczywają gdzieś w zakamarkach kopalni.

W 1983 roku do Wieliczki zawitała ekipa telewizji kanadyjskiej, by zrealizować jeden z odcinków serialu fabularnego *Najpiękniejsze legendy świata*. Krótki, 25-minutowy film nosi tytuł *Biała Dama z Wieliczki*, a jego reżyserem jest Jorge Fajardo (Ryc.6). Tytułowa Biała Dama jest podziemnym duchem, którego górnicy powinni się wystrzegać, bowiem sprowadza rozmaite nieszczęścia. Fabuła opowiada o dziewczynce i chłopcu, którzy podczas zwiedzania kopalni odłączyli się od szkolnej wycieczki i błądząc po kopalni, napotkali Damę. W filmie zagrał Franciszek Pieczka. Wielicki odcinek serialu został nagrodzony w 1984 roku na festiwalu filmowym w Paryżu (, Białek, 2023, FilmPolski.pl, 2023).

W latach 1994–1995 powstawał serial telewizyjny *Mission Top Secret (Tajna misja)* realizowany przez australijską Grundy Television w reżyserii Marcusa Cole. Był on przeznaczony dla młodzieży, a opowiadał o dwunastoletniej dziewczynce, która dzięki komputerowi nawiązuje kontakt z rówieśnikami rozsianymi po całym świecie. Powstaje organizacja,

peers all around the world. The TV series was produced in co-operation with global TV networks, including the Polish TV. The Polish episode was entitled *The Secret of a Polish Foal*, and some scenes were shot in the “Wieliczka” Salt Mine (FilmPolski.pl 2023). The foal was brought underground and lived at Level III in a specially constructed barn. Some footage was shot in St. Kinga’s Chapel and the workings of Level III on the Tourist Route.

5. 21ST CENTURY

In 2003, Łukasz Barczyk, a 29-year-old director considered to be the most interesting artistic personality of his generation, produced a TV performance of *Hamlet* underground in the salt mine. The mine’s chambers and corridors provided the atmosphere of murky interiors of the Elsynor Castle (Teatr.vod.tvp.pl 2023). The play enjoyed excellent cast, with e.g. Janusz Gajos, Grażyna Szapołowska, Zbigniew Zapasiewicz, Jan Frycz, and the then young actors Kamila Baar and Łukasz Czernecki, although the final result raised controversies. Some viewers were highly impressed by the production, while others were rather disappointed. The film settings included, among others, St. Kinga’s Chapel and the neighbouring workings, as well as the Saurau and Wessel Lake Chambers (Fig. 7). Funny incidents accompanied the shooting process of the *Hamlet*. The producers liked the sound signals heard from the shaft elevators and they recorded them in their cell phones. Some artists were tremendously impressed by the chandeliers of St. Kinga’s Chapel and they considered buying them for their residences.



Ryc. 6. Płyta ze ścieżką dźwiękową filmu *Biała Dama z Wieliczki*. Fot. Jerzy Przybyło

Fig. 6. Longplay with the soundtrack of the film *White Lady of Wieliczka*. Photo by Jerzy Przybyło

która walczy z okrutnym kapitalistą Savage’em. Serial kręcony był we współpracy ze światowymi telewizjami, między innymi Telewizją Polską. Odcinek kręcony w naszym kraju nosi tytuł *Tajemnica polskiego żrebaka*, a niektóre sceny były kręcone w kopalni Wieliczka (FilmPolski.pl, 2023). Tytułowy żrebak trafił pod ziemię i mieszkał na III poziomie kopalni w specjalnie dla niego zbudowanej stajni. Zdjęcia do tego odcinka serialu powstały w kaplicy św. Kingi oraz w wyrobiskach poziomu III objętych Trasą Turystyczną.

5. WIEK XXI

W roku 2003 Łukasz Barczyk, 29-letni wówczas reżyser, uważany za najciekawszą artystyczną postać swojego pokolenia, zrealizował w wielickich podziemiach spektakl telewizyjny *Hamlet*. Komory i chodniki stworzyły atmosferę mrocznych wnętrz zamku Elsynor (Teatr.vod.tvp.pl, 2023). Spektakl miał doborową obsadę (grali w nim m.in. Janusz Gajos, Grażyna Szapołowska, Zbigniew Zapasiewicz, Jan Frycz, a z młodszego pokolenia aktorów – Kamila Baar i Łukasz Czernecki), ale końcowy efekt był dyskusyjny. Jedni widzowie byli pod ogromnym wrażeniem produkcji, inni czuli się rozczarowani. Filmowymi plenerami były między innymi kaplica św. Kingi i sąsiednie wyrobiska oraz komory Saurau i Jezioro Wessel (Ryc.7). Podczas kręcenia ujęć do *Hamleta* również nie obyło się bez zabawnych wydarzeń. Realizatorom spektaklu bardzo podobała się sygnalizacja dźwiękowa przy szybach i nagrywali sobie ją jako dzwonki do telefonów komórkowych. Olbrzymie wrażenie na niektórych artystach robiły żyrandole w kaplicy św. Kingi i chcieli je kupić do swoich rezydencji.

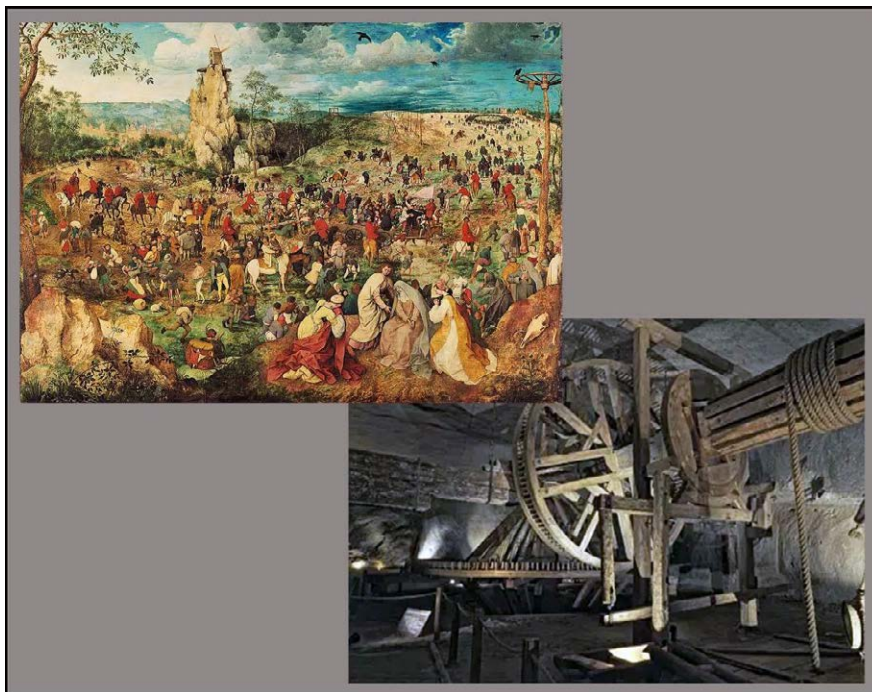
Five years later, Lech Majewski brought outstanding international actors to the salt mine, including Rutger Hauer, Michael York, or Charlotte Rampling. They acted in the film *The Mill and the Cross*, an adaptation of an essay by the American art historian entailing the analysis of the painting “The Procession to Calvary” by Pieter Bruegel the Elder (1564) (Majewski 2023). Certain scenes were shot underground in the mine’s workings that symbolised a mountain’s interior, with the Mill presented in the master’s painting. The film settings were placed e.g. in the Modena Chamber, belonging to the complex administered by the Kraków Saltworks Museum in Wieliczka (Fig. 8). The film was produced in 2008 and released in 2011. It was awarded several prizes, including two Eagles granted by the Polish Film Academy.

The Bollywood production of the *Rhythm* emerged in a slightly different convention. It was a musical directed by Vivek Kumar (IMDb.com 2023). It was shot in Poland, with several scenes staged in the “Wieliczka” Salt Mine (Fig. 9). The director visited the salt mine and was so fascinated with the sights that one musical scene was situated underground. The production continued during two nights in 2012, while the transportation of the huge quantities of the equipment underground took eight hours one way. The musical’s premiere took place in 2016. St. Kinga’s Chapel and the Michałowice Chamber appeared in the Indian production.

The “Wieliczka” Salt Mine appeared again in a short 11-minute film entitled *Salt* the following year. The film was a result of the Polish-British-Norwegian co-production and was directed by the “veteran” of dance, choreography, and theatre, Maria Lloyd. Octavia Selena Alexandru, known from



Ryc. 7. Komora Saurau. Ekipa filmowa *Hamleta* w reżyserii Łukasza Barczyka. Materiały prasowe kopalni
Fig. 7. Saurau Chamber. The film crew of the theater spectacle *Hamlet*, directed by Lukasz Barczyk. Press materials of the mine



Ryc. 8. Obraz Pieter'a Bruegel'a „Droga krzyżowa” oraz komora Modena z kieratem. Domena publiczna oraz materiały prasowe kopalni
Fig. 8. Pieter Bruegel's painting *The Procession to Calvary* and Modena Chamber with a steering wheel. Public domain and mine press materials

Pięć lat później reżyser Lech Majewski sprowadził do kopalni wybitnych światowych aktorów, takich jak Rutger Hauer, Michael York czy Charlotte Rampling. Zagrali w scenach do filmu *Młyn i Krzyż*, który był ekranizacją eseju amerykańskiego historyka sztuki pod tym samym tytułem, zawierającego analizę obrazu „Droga krzyżowa” Pietera Bruegla Starszego, powstałego w 1564 roku (Majewski, 2023). Niektóre sceny filmu kręcono w wyrobiskach kopalni, które symbolizowały wnętrze góry, gdzie stoi tytułowy młyn przedstawiony na obrazie mistrza. Wyrobiskami tymi była między innymi komora Modena, należąca do zespołu administrowanego przez Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka (Ryc.8). Zdjęcia

The Game of the Thrones, was one of the actresses (IMDb.com 2023). The film, being a dismal fairy tale, presented a girl who noticed during her adolescence that her parents were getting senile and turning into rock salt boulders. She wanted to avoid their fate herself and decide about it on her own, without living shackled by a network of conventions. The movie was dedicated by the director to each person who was able to liberate herself or himself from repeat domination. Filming took place in St. Kinga's Chapel (Fig. 10), St. Anthony's Chapel, and the Weimar Lake Chamber, as well as on the Leopold Canal, outside the Tourist Route (BBC Arts 2023).



Ryc. 9. Aktorzy filmu *Rythm* podczas próby zdjęć. Fot. Rafał Stachurski
Fig. 9. The actors of the film *Rythm* during the rehearsal of the shooting. Photo by Rafał Stachurski

w kopalni powstały w 2008 roku, ale film miał premierę dopiero w roku 2011. Zdobył kilka nagród, w tym dwa Orły przyznawane przez Polską Akademię Filmową.

Nieco dłużej rodził się film z zupełnie innej konwencji – produkcja Bollywood *Rhythm*. Był to obraz muzyczny, który wyreżyserował Vivek Kumar (IMDb.com, 2023). Powstawał on w Polsce, a kilka scen nakręcono w Kopalni „Wieliczka” (Ryc.9). Reżyser po zwiedzeniu kopalni był nią tak zafascynowany, że jedna z muzycznych partii została nakręcona pod ziemią. Realizacja zdjęć trwała dwie noce 2012 roku, ale samo zwieźenie masy sprzętu do Wieliczki zajęło osiem godzin. Musical miał premierę w roku 2016. W indyjskiej produkcji „zagrały” kaplica św. Kingi oraz komora Michałowice.

Kopalnia ponownie zagościła w zagranicznej produkcji rok po realizacji tego filmu. Tym razem w filmie krótkometrażowym, trwającym zaledwie 11 minut pod tytułem *Salt*. Film powstał w kooperacji polsko-brytyjsko-norweskiej, a wyreżyserowała go „weteranka” tańca, choreografii i teatru Maria Lloyd. Jedną z aktorek, które stanęły na jego planie, była znana z serialu *Gra o tron* Octavia Selena Alexandru (IMDb.com, 2023). Film, będący mroczną baśnią, opowiada o dziewczynce, która dorastając, zauważa, że jej rodzice powoli stają się tak skostniałi, że przyjmują postać solnych brył. Pragnęłaby uniknąć tego przeznaczenia, chce sama decydować o własnym losie, a nie żyć spętana siecią konwenansów. Obraz reżyserka zadedykowała każdemu, kto uwolnił się od cyklicznej przemocy. Zdjęcia do tej produkcji powstawały w kaplicach św. Kingi (Ryc.10) oraz św. Antoniego, Jeziorze

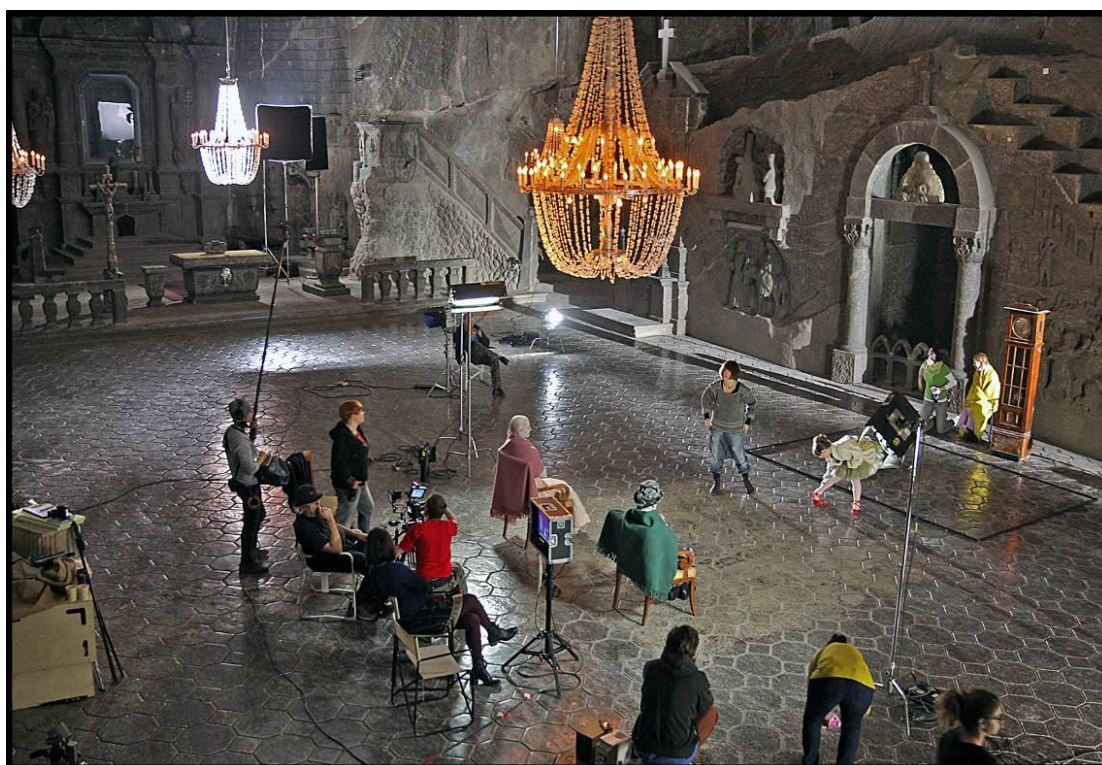
The *Umbra* was another short film in which the salt mine’s interiors played important roles. The film was directed by Urszula Nawrot (2014, with world premiere in 2015). It is a very feminine film with many allegories, without, however, a single line, similarly to the *Salt*. The viewer is impressed by the images and music. The most important are the traumatic emotions of the female protagonist (Nawrot 2023). The imaginative film, recognised with many international accolades, is often shown during therapeutic sessions designed for the persons suffering violence. Filming took place in St. Anthony’s Chapel, as well as the Baręża Lake and Michałowice Chambers (Fig. 11).

6. DOCUMENTARY AND EDUCATIONAL FILMS

In 1981, TVP Kraków shot a chamber film *A Man and a Horse* showing the work of carthorses underground. The black-and-white movie concentrated on the hard labour of the two characters and their warm bond. Arkadiusz Pilarz and Marek Zaliński were scriptwriters and directors. The scenes were shot at Level IV of the salt mine, with an underground barn situated close to the Kaczwiński cross-corridor. In 2022, the film was digitally remastered (TVP VOD 2023).

The salt mine’s artists became the protagonists of another documentary of the 1980’s. A short film on the *Wieliczka’s Sculptors*, directed by Jerzy Biały, was produced in 1986.

The salt mine hosted a number of world-famous film crews, e.g. BBC, CNN, Rai Tre, National Geographic, or



Ryc. 10. Ekipa filmowa filmu *Salt* podczas kręcenia ujęć w Kaplicy św. Kingi. Materiały prasowe kopalni
Fig. 10. The film crew of the film *Salt* during the filming of shots in the St. Kinga Chapel. Press materials of the mine



Ryc. 11. Urszula Nawrot w otoczeniu aktorów filmu *Umbra*. Fot. Rafał Stachurski
Fig. 11. Urszula Nawrot surrounded by actors of the film *Umbra*. Photo by Rafał Stachurski

Weimar, a także poza Trasą Turystyczną, w Kanale Leopolda (BBC Arts, 2023).

Kolejnym filmem krótkometrażowym, w którym ważną rolę odegrały kopalniane wnętrza była *Umbra* zrealizowana przez Urszulę Nawrot w 2014 roku (światowa premiera 2015 rok). Jest to bardzo kobiecy, pełen alegorii film, w którym nie pada (podobnie jak w filmie *Salt*) ani jedno słowo. Na widza działają obraz oraz muzyka. Najważniejsze w nim są traumatyczne emocje głównej bohaterki (Nawrot, 2023). Fotograficzny film, który doczekał się wielu międzynarodowych nagród, bardzo często jest pokazywany w ramach terapii dla osób objętych niegdyś przemocą. Zdjęcia w kopalni powstawały w kaplicy św. Antoniego, komorze Jezioro Barączka oraz w komorze Michałowice (Ryc.11).

6. FILMY DOKUMENTALNE ORAZ EDUKACYJNE

W 1981 roku TVP Kraków zrealizowała w podziemiach kopalni kameralny film *Człowiek i koń* ukazujący pracę salinarnych pociągowych zwierząt. Bohaterami są koń oraz jego opiekun, trybarz. W poetycki sposób czarno biały obraz ukazuje jak ciężko pracują i jaka ciepła jest między nimi relacja. Scenarzystami i realizatorami obrazu byli Arkadiusz Pilarz oraz Marek Zaliński. Realizowano go na poziomie IV kopalni, gdzie wówczas przy poprzeczni Kaczwiński zlokalizowana była podziemna stajnia. W 2022 roku film został zrekonstruowany cyfrowo (TVP VOD, 2023).

Bohaterami innego dokumentu z lat 80. byli kopalniani artyści. W 1986 roku powstała migawka filmowa *Rzeźbiarze wieliccy* w reżyserii Jerzego Białego.

W kopalni gościły ekipy filmowe legitymujące się znanymi markami. Kręcili tu filmowcy BBC, CNN, Rai Tree, National Geographic czy Discovery Chanel (cykl *Discovery People*, bohaterką jednego z odcinków była hydrogeolog

Discovery Channels (making the series of the *Discovery People*; the salt mine's hydrogeologist Jadwiga Stecka featured one of the episodes). Also, a Japanese TV crew arrived underground, raising admiration by their professionalism: the crew members communicated with each other without saying a word.

A number of documentaries dedicated to the underground facilities of the salt mine were produced in the past twenty years. The Kraków TV journalist Julian Rachwał produced several films dedicated to the salt mine, including a 40-minute documentary entitled *The Historic Salt Mine in Wieliczka* (2008). The Swedish director Sadrolin Tam was another professional visitor to the salt mine. In the years 2003–2005, he produced the film *Wieliczka: the Salt of the Earth*. The film lasts 26 minutes and it features those underground workings that were later subjected to various transformations. For instance, we can see St. John's Chapel in its original location at Level I, while presently, the chapel is situated at Level III on the Tourist Route. The Gospoda Chamber is shown in the film before it was refurbished in 2010. The film under the same title, but 40-minute long, was a new production, with the premiere in 2010. The film's host and guide underground was the outstanding Polish actor Jerzy Stuhr who said: *It is the Salt Mine that is the real protagonist of our film* (Fig. 12).

In 2017, TVP 3 Kraków filmed a 6-episode documentary series entitled *The Salt Treasure of UNESCO* in the salt mine. Patrycja Partridge was the film's scriptwriter and director. The title of each 8–9 min. long episode referred to the UNESCO abbreviation composed of the Polish terms, meaning the following in English: *unique, inspiring, emotional, treasure, continuity, enchantment*. [The "Wieliczka" Salt Mine was entered on the UNESCO World Heritage List]. Short films about

kopalni Pani Jadwiga Stecka), nie zabrakło też innych ekip telewizyjnych, rodzimych i zagranicznych. Na dół zjechała na przykład ekipa telewizji japońskiej, która zdumiewała swym profesjonalizmem – jej członkowie byli tak zgrani, że kręcili film, komunikując się ze sobą bez słów sposob.

W ostatnim dwudziestolecu powstało sporo obrazów dokumentujących wielickie podziemia. Jednym z ich dokumentatorów był krakowski redaktor Julian Rachwał, który poświęcił kopalni kilka swych produkcji, między innymi 40-minutowy film *The historic Salt Mine in Wieliczka* z 2008 roku. Innym dokumentatorem kopalni był szwedzki reżyser Sadrolin Tam. W latach 2003–2005 zrealizował film *Wieliczka – sól ziemi*. Film trwa 26 minut, a jego zaletą jest pokazanie tych wyrobisk kopalni, które w późniejszym okresie uległy przekształceniom. Widzimy na przykład kaplicę św. Jana w miejscu jej pierwotnej lokalizacji na poziomie I (obecnie znajduje się na poziomie III w obrębie Trasy Turystycznej) oraz komorę Gospoda przed jej remontem z 2010 roku. Film pod tym samym tytułem, już 40-minutowy i będący nową realizacją, miał swą premierę w 2010 roku, a gospodarzem wielickich podziemi jest w nim wybitny aktor Jerzy Stuhr, który powiedział: *Bohaterem tego filmu jest kopalnia* (Ryc.12).

W 2017 roku TVP 3 Kraków zrealizowała w wyrobiskach kopalni 6-odcinkowy serial dokumentalny *Solny Skarb UNESCO*. Jego scenarzystką i reżyserką była Patrycja Partridge. Tytuł każdego około 8 – 9 minutowego odcinka nawiązuje do kolejnych liter nazwy UNESCO : *Unikat, Natchnienie, Emocje, Skarb, Ciągłość, Olśnienie*. Krótkie filmy o kopalni tworzyła także firma Rumburak Produkcja Filmowa.

Ostatnim dokumentem traktującym o wielickich podziemiach jest zrealizowany przez Muzeum Żup Krakowskich

the salt mine were also produced by the Rumburak Produkcja Filmowa Company.

The last documentary about the “Wieliczka” underground salt mine was filmed by the Kraków Saltworks Museum in Wieliczka entitled *The Passion from the Depth of the Earth. Alfons Długosz and the Work of his Life*, presented on 28 July 2022. The film showed the founder of the Museum, a man of passion, who managed to complete his great project.

7. NETFLIX SERIES

The last feature film completed underground is the Netflix film series entitled *Cracow Monsters* directed by Katarzyna Adamik and Olga Chajdas. If we compare that film series to the previous movies *On the Silver Globe* or *Sexmission*, the Netflix production seems to be from a different world. The technical and financial possibilities of the recent production are beyond comparison to the previous projects. And such resources harmonised with what was good luck for the foreign filmmakers and bad luck for the Polish ones. At that time, the covid lockdown prevailed (Fig. 13). The salt mine was closed for the visitors, but the film crews could operate freely, provided that they observed certain sanitary restrictions. The scenes were filmed along the Tourist Route (Weimar Lake, Michałowice, and Haluszka III Chambers), as well as in the workings situated outside the Route, in the Zalewski Chamber, the Franciszek cross-corridor, and the Weimar fore-shaft. The props, like a symbolic tree, were subjected to computer processing. The film series referred to the Slavic myths, clearly of the fantasy genre. The production’s premiere occurred in March 2022.



Ryc. 12. Na planie filmu *Wieliczka – sól ziemi*. Materiały prasowe kopalni
 Fig. 12. On the set of the film *Wieliczka - salt of the earth*. Mine press materials

Wieliczka dokument *Pasja z głębi ziemi. Alfons Długosz i dzieło jego życia*, zaprezentowany 28 VII 2022 roku. Ukazuje on sylwetkę twórcy Muzeum, pasjonata, który swój zamiysł utworzenia placówki doprowadził do szczęśliwej realizacji.

7. SERIAL NETFLIX

Ostatnia filmowa realizacja fabularna, której część powstała pod ziemią, to serial Netflix *Krakowskie potwory* w reżyserii Katarzyny Adamik i Olgi Chajdas. W porównaniu z realizacjami *Na srebrnym globie* i *Seksmisji* serial ten jawi się jak obraz z innego świata. Możliwości techniczne i finansowe ekipy, nieporównywalne z wcześniejszymi, współgrały tu z tym, co dla filmowców było szczęśliwym trafem, a dla pozostałych Polaków było tragedią. W Polsce obowiązywał covidowy lockdown (Ryc.13). Kopalnia była zamknięta dla zwiedzających, zatem ekipa filmowa, z zachowaniem reżymu sanitarnego, działała bez przeszkód. Sceny serialu powstały w rejonie Trasy Turystycznej (komory Jezioro Weimar, komora Michałowice, komora Haluszka III), także w wyrobiskach zlokalizowanych poza Trasą – w komorze Zalewski, poprzeczni Franciszek oraz w szybiku Weimar. Rekwizyty typu symboliczne drzewo zostały poddane komputerowym transformacjom. Powstał serial nawiązujący do słowiańskich mitów, wyraźnie z gatunku fantasy. Serial miał premierę w marcu 2022 roku.

8. OPERATORZY KAMERY

Widzowie oceniając filmy najczęściej koncentrują się na ich reżyserach, zapominając o mozolnej pracy pozostałych

8. CAMERAMEN

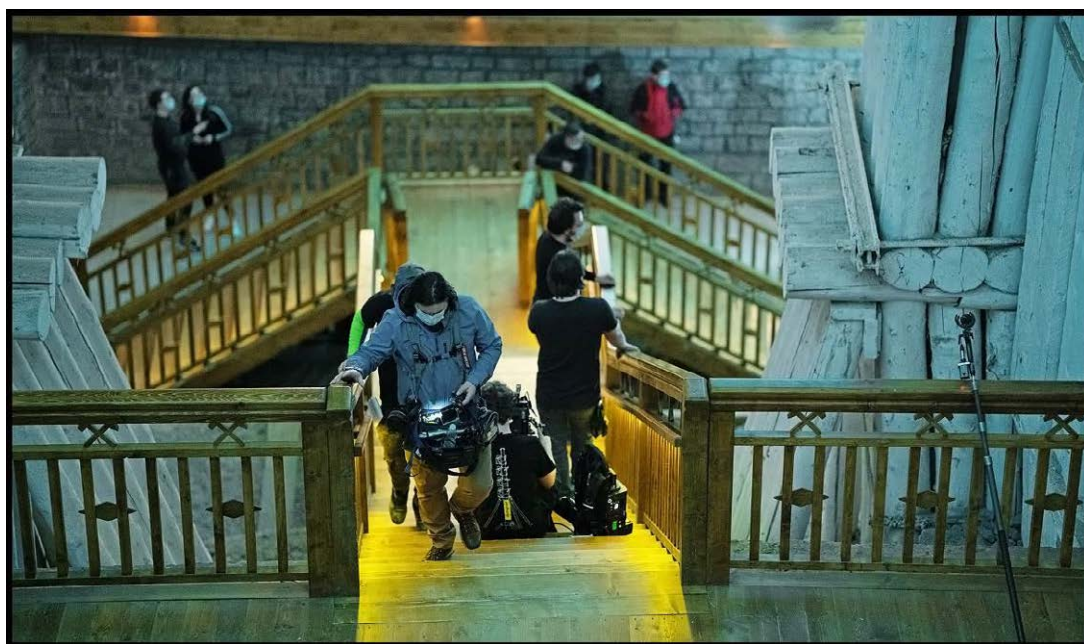
The viewers who evaluate films mostly concentrate on film directors, forgetting the arduous work of other film-crew members without whom films could not be produced. A success of a film depends on the work of many people, including primarily cameramen. Film is composed of images, recorded by specific people. In the case of the “Wieliczka” feature films, many of those cameramen were masters on an international scale.

Andrzej J. Jaroszewicz was the cameraman of Andrzej Żuławski’s movie *On the Silver Globe*. Jaroszewicz was the President of the Cameramen Association (SAZF) in 1998–2011. The Association was founded in 1994 in response to the copyright law approved in the same year. The new law degraded cameramen to the role of technical personnel supervised by film directors.

The film *Entire Week* was recorded by Krzysztof Winiewicz. The operator was known for such Polish films as *Innocent Wizards*, *Squint Luck*, or *The Passenger*.

Jerzy Łukaszewicz, a brother of one of the main film stars, Olgierd Łukaszewicz (playing Albert Starski) was responsible for shooting the scenes of the *Sexmission*. Jerzy was a research worker at the University of Silesia in Katowice and a member of the Polish Film Academy and the Association of Polish Filmmakers.

The *Hamlet* by Łukasz Barczyk was filmed by Paweł Edelman, nominated to the Oscar Award in 2003 for his footage to the *Pianist* by Roman Polański, and received the “Operator of the Year 2005” Prize in Hollywood.



Ryc. 13. Filmowcy w komorze Michałowice podczas realizacji *Krakowskich potworów*. Fot. Robert Pałka, materiały prasowe Netfliks
 Fig. 13. Filmmakers in the Michałowice Chamber during the filming of the film *Krakow Monsters*. Photo by Robert Pałka, Netflix press materials

członków ekipy realizatorskiej, bez których te obrazy by nie powstały. Sukces filmu zależy od wielu osób, w tym głównie od operatorów kamery. Film to obraz, a rejestrują go konkretni ludzie. W przypadku „wielickich” fabularnych filmów wiele z nich to mistrzowie światowego formatu.

W filmie Andrzeja Żuławskiego *Na srebrnym globie* operatorem był Andrzej J. Jaroszewicz. Był on w latach 1998 - 2011 przewodniczącym Stowarzyszenia Autorów Zdjęć Filmowych, powstałego w 1994 roku w odpowiedzi na uchwaloną w tym samym roku ustawę o prawach autorskich, która zdegradowała operatorów filmowych do roli personelu technicznego podległego reżyserom. *Okrągły tydzień* rejestrował Krzysztof Winiewicz, operator znany ze znaczących filmów dla polskiej kinematografii, takich jak *Niewinni czarodzieje*, *Zezowate szczęście*, *Pasażerka*. Za zdjęcia do *Seksmisji* odpowiedzialny był Jerzy Łukaszewicz, brat jednego z głównych bohaterów tego filmu Olgierda Łukaszewicza, który zagrał Alberta Starskiego. Jest on pracownikiem naukowym Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach, członkiem Polskiej Akademii Filmowej i Stowarzyszenia Filmowców Polskich. *Hamleta* Łukasza Barczyka rejestrował Paweł Edelman, który został nominowany w 2003 roku do Oscara za zdjęcia do *Pianisty* Romana Polańskiego, a w 2005 roku uhonorowany nagrodą „Operator roku” w Hollywood. Obrazy w filmie *Młyn i Krzyż* rejestrowali pospołu Lech Majewski i operator Adam Sikora, reżyser, scenarzysta, fotograf i malarz. Sceny z szóstego odcinka serialu *Krakowskie potwory*, w którym akcja rozgrywa się w kopalni, wyszły spod ręki Ziv’a Berkovich’a operatora kazachskiego.

9. KILKA KOMENTARZY

Pracownicy kopalni, którzy niegdyś uczestniczyli w realizacji filmów powstających na taśmie filmowej, podkreślają potworną nudę towarzyszącą filmowcom. Taśma była droga, zatem przed końcową realizacją ujęć powtarzano je w nieskończoność. Sytuacja zmieniła się po nastaniu ery filmów cyfrowych. Teraz dla filmowych ekip to czas realizacji przedsięwzięcia stał się drogocenny, a sceny realizowano metodą cyfrową. Dziś nie ma już także potrzeby monitów np. o odstępstwa w celu użycia otwartego ognia w podziemnych wyrobiskach. Ogień ten, jeśli jest potrzebny, powstaje cyfrowo, tak jak wiele elementów scenografii.

Wszystkie większe realizacje fabularne powstawały w obrębie poziomów I–III. Decydowały o tym przede wszystkim względy logistyczne i praktyczne. Poziomy te są w części centralnej kopalni przystosowane do ruchu turystycznego, są zatem bezpieczne dla ekip filmowych. Należą do części zabytkowej obiektu – są urozmaicone i atrakcyjne wizualnie (Ryc.14). Kilka wyrobisk należy już do filmowych weteranów. Są to przede wszystkim kaplica św. Kingi, komora Michałowice, kaplica św. Antoniego, w latach wcześniejszych

The scenes to *The Mill and the Cross* were filmed jointly by director Lech Majewski and cameraman Adam Sikora, also a director, scriptwriter, photographer, and painter.

The scenes for the sixth episode of the series *Cracow Monsters*, were shot by Ziv Berkovich, an operator of Kazakh origin.

9. COMMENTS

The “Wieliczka” Salt Mine workers who used to participate in films recorded originally on film stock emphasised tremendous boredom of the filmmakers. The film stock was expensive, while the scenes had to be repeated endlessly. The situation changed with the arrival of digital cameras. When digital methods arrived, it was the shooting time that became precious. And it was not necessary to use open fire in the underground salt mine any more: digital special effects were applied, similarly to a number of other scenographic components.

All the large feature film projects were shot at Levels I–III. That was primarily related to logistic and practical issues. Those salt mine Levels are adapted for tourist traffic in the central section of the salt mine and they are safe for film crews as well. Besides, they belong to the landmark section of the salt mine, being highly diverse and visually attractive (Fig. 14). Several underground workings can be called “film veterans”: St. Kinga’s and St. Anthony’s Chapels, or the Michałowice and later Margelnik Chambers. Levels I–III can be reached by three shafts called Kinga, Daniłowicz, and Regis that are suitable for equipment transportation. In addition, Level I can be reached from the Paderewski shaft used for the transportation of people.

Certain visual effects that may be perceived by the viewers as natural, were hard to generate underground, e.g. mist in the Saurau Chamber, needed for the soldiers to emerge from, in the performance of *Hamlet* by Łukasz Barczyk. As you know, the air is artificially pumped into the mine workings and artificial mist was hard to generate followed by quick removal, as the Saurau Chamber belongs to the Museum complex visited constantly by the tourists.

10. CONCLUSIONS

The underground workings of the “Wieliczka” Salt Mine turned out to be ideal locations for filming the scenes of extremely diverse themes and means of expression. One can distinguish the following types of film genres produced in the salt mine:

- documentary and educational films showing the history of the Kraków Saltworks in Wieliczka, their cognitive and natural qualities (*Wieliczka* by Jarosław Brzozowski, *Wieliczka: the Salt of the Earth* by Sadrolin Tam);

komora Margelnik. Poziomy I–III są udostępnione trzema szybami: Kinga, Daniłowicz i Regis, którymi można zwozić sprzęt filmowy. Dodatkowo do poziomu I sięga szyb Paderewski, który jest wyrobiskiem komunikacyjnym.

Pewne efekty wizualne, które widzom wydają się naturalne, z trudem tworzono pod ziemią, np. mgłę w komorze Saurau w spektaklu *Hamlet* Łukasza Barczyka, z której wylaniają się żołnierze. Pamiętajmy, że powietrze do wyrobiska kopalni dostarczane jest w sposób sztuczny, komora Saurau to wyrobisko należące do kompleksu komór Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka zwiedzanych przez turystów i tę z trudem wytworzoną mgłę należało szybko z niej usunąć.

10. PODSUMOWANIE

Podziemia Kopalni Soli „Wieliczka” okazały się idealnym miejscem do kręcenia filmowych scen dla produkcji o skrajnie różnej tematyce i środkach ekspresji, które można podzielić na kilka głównych nurtów:

- filmy dokumentalne i edukacyjne pokazujące historię żup krakowskich, ich walory poznawcze i przyrodnicze (*Wieliczka* Jarosława Brzozowskiego, *Wieliczka – sól ziemi* Sadrolina Tama);

- filmy, w których wyrobiska kopalni służą za tajemnicze podziemia, a rozgrywa się w nich sensacyjna fabuła, najczęściej typu science fiction (*Na srebrnym globie* Andrzeja Żuławskiego, *Seksmisja* Juliusza Machulskiego, australijska *Tajna misja* Marcusa Cole’a, *Krakowskie potwory* Katarzyny Adamik i Olgi Chajdas);

- filmy, w których wykorzystana jest baśniowa sceneria wielickich podziemi (*Okrągły tydzień* Tadeusza Kijańskiego, *Młyn i krzyż* Lecha Majewskiego);

- filmy, w których kopalnia jest ukazana metaforycznie, a ciemność, cisza i pustka mają znaczenie symboliczne (*Salt* Marii Lloyd, *Umbra* Urszuli Nawrot);

- filmy powstałe dla rozrywki (*Rhythm* Vívka Kumara).

Walorami ważnymi dla realizacji produkcji filmowych w kopalni są: światowa marka obiektu, bardzo dobre skomunikownie Wieliczki z Krakowem, doświadczenie pracowników kopalni przy realizacji tego typu przedsięwzięć, gotowa scenografia, bardzo zróżnicowana, jednocześnie unikatowa; ciągły ruch zakładu, umożliwiający pracę ekip filmowych także w nocy, możliwa do wykorzystania baza hotelowa i gastronomiczna Wieliczki.

Jak widać z powyższego zestawienia, podziemia Wieliczki oferują prawdziwą kopalnię możliwości, z których twórcy mogą obficie korzystać przy realizacji swych artystycznych pomysłów. Muszą je tylko mieć, w co – patrząc w filmową przeszłość „Wieliczki” – nie wątpimy.

Część wymienionych w tekście realizacji filmowych można obejrzeć w internecie.



Ryc. 14. Filmowanie szaty naciekowej w szybiku Franciszek na III poziomie kopalni. **Fig. 14.** Filming the secondary salt in the Franciszek shaft on the third level of the mine. Press materials of the mine

- the films in which the underground workings serve as a mysterious world in which sensational stories unveil, mostly of the science-fiction type (*On the Silver Globe* by Andrzej Żuławski, *Sexmission* by Juliusz Machulski, the Australian *Secret Mission* by Marcus Cole, *Cracow Monsters* by Katarzyna Adamik and Olga Chajdas);

- the films that used fairytale settings of the underground salt mine workings (*Entire Week* by Tadeusz Kijański, *The Mill and the Cross* by Lech Majewski);

- the films in which the salt mine is depicted metaphorically, where darkness, tranquillity, and emptiness carry symbolic significance (*Salt* by Maria Lloyd, *Umbra* by Urszula Nawrot);

- entertainment films (*Rhythm* by Vivek Kumar).

The values that turned out to be important for film productions included the following: prestigious global status of the salt mine, excellent transportation between Wieliczka and Kraków, the experience of the mine’s employees in carrying out film projects, “ready-made” scenography, being unique and diverse, continuous operation of the plant allowing the film crews to work at night, as well as the availability of accommodation and catering facilities in Wieliczka.

As you can judge from the film genres produced in Wieliczka, the salt mine offers a range of possibilities, to be used by the filmmakers to implement their artistic conceptions. Well, they only need to have their ideas, which we do not doubt, if we think about the film future of the “Wieliczka” Salt Mine. Some of the movies mentioned in this paper can be found in the Internet.

LITERATURA/REFERENCES

- ALBRECHT J., 1998. Prafilmówka krakowska 1945 – 1947. Nauczyciele-słuchacze-filmy. Filmotechnika – Biuro Reklamy i Drukarnia. Kraków
- BBC Arts, dostęp 27.05.23. The making of SALT. <https://www.bbc.co.uk/programmes/p04m0f3q>
- BIAŁEK J., dostęp 27.05.23. Biała Pani z Wieliczki w roli głównej. <https://dziennikpolski24.pl/biala-pani-z-wieliczki-w-roliglownej-filmowa-historia-solnych-podziemi/ar/c13-16255795>
- FILMPOLSKI.PL dostęp 27.05.23. Słony chleb. <https://filmpolski.pl/fp/index.php?film=4218802>
- FILMPOLSKI.PL dostęp 27.05.23. Magnum Sal – Wieliczka. <https://filmpolski.pl/fp/index.php?film=421681>
- FILMPOLSKI.PL dostęp 27.05.23. Wieliczka. <https://filmpolski.pl/fp/index.php?film=4210594>
- FILMPOLSKI.PL dostęp 27.05.23. La Dame Blanche de Wieliczka. <https://filmpolski.pl/fp/index.php?film=1220071>
- FILMPOLSKI.PL, dostęp 27.05.23. Seksmisja. <https://www.filmpolski.pl/fp/index.php?film=12286>
- FILMPOLSKI.PL, dostęp 27.05.23. Mission Top Secret. <https://filmpolski.pl/fp/index.php?film=127141>
- FILMWEB, dostęp 27.05.23. Ucieczka na srebrny glob. <https://www.filmweb.pl/film/Ucieczka+na+Srebrny+Glob-2021-877706>
- FILMWEB, dostęp 27.05.23. Wieliczka. <https://www.filmweb.pl/film/Okr%C4%85g%C5%82y+tydzie%C5%84-1977-8323>
- FILM.WP.PL, dostęp 27.05.23. Juliusz Machulski o zarzutach wobec “Seksmisji”. <https://film.wp.pl/juliusz-machulski-o-zarzutach-wobec-seksmisji-burza-w-szklance-wody-6898384727345920a>
- HENDRYKOWSKA M., 2014. Historia polskiego filmu dokumentalnego (1896-1944). Wydawnictwo Naukowe WAM. Poznań
- HENDRYKOWSKA M., 2018. Historia polskiego filmu dokumentalnego (1945-2014). Wydawnictwo Naukowe WAM. Poznań
- IMDb, dostęp 27.05.23. Rhythm. <https://www.imdb.com/title/tt5345728/>
- IMDb, dostęp 27.05.23. Salt. <https://www.imdb.com/title/tt3701906/>
- KOSTRURBIEC B., dostęp 27.05.23. Ocalić od zapomnienia. http://jaworzniacy.pl/index.php?option=com_content&task=view&id=224
- KRASICKA S., 1946. Z kamerą w salinach wielickich. Dziennik Polski nr 135. Kraków
- MACHULSKI J., SZCZERBA J., 2014. Naga prawda o “Seksmisji”. Wydawnictwo W.A.B. Warszawa.
- MAJEWSKI L., dostęp 27.05.23. Młyn i Krzyż. <https://lechmajewski.com/film-4/mlyn-i-krzyz/>
- MISIAK A., 2006. Kinematograf kontrolowany. Universitas. Kraków
- NAWROT. U., dostęp 27.05.23. UMBRA/Eclipse Of The Moon. https://urszulanawrotart.com/?page_id=43
- RADKIEWICZ M., dostęp 27.05.23. Krakowska Prafilmówka 1945–1946, „Pleograf. Kwartalnik Akademii Polskiego Filmu” nr 1, 2020 <https://pleograf.pl/index.php/krakowska-prafilmowka-1945-1946/>
- SZCZYPIŃSKI A., dostęp 27.05.23. Na Srebrnym Globie Andrzeja Żuławskiego (1987). <https://film.org.pl/a/na-srebrnym-globie-andrzej-zulawskiego-1987-101558>
- TEATR.VOD.TVP, dostęp 27.05.23. Hamlet, reż. Ł. Barczyk. <https://teatrvod.tvp.pl/598601/hamlet-rez-l-barczyk>
- TVP VOD, dostęp 27.05.23. Niecodzienne historie – Człowiek i koń. <https://cyfrowa.tvp.pl/video/niecodzienne-historie-czlowiek-i-kon,61000705>
- WÓJCIK J., 2000. Kwerenda materiałów archiwalnych K.S. “Wieliczka”. Archiwum Działu Mierniczo – Geologicznego Kopalni Soli “Wieliczka” S.A. Wieliczka



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

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

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

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

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

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

STRESZCZENIE

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

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

ABSTRACT

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

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

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

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

1. WSTĘP

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

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

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

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

1. INTRODUCTION

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

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



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

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

2. ZARYS HISTORII EKSPLOATACJI SOLI POTASOWO-MAGNEZOWYCH W KAŁUSZU

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

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

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

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

crucial for planning future mining projects in the Ukrainian Subcarpathians.

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

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

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

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

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

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

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

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

* - stan na 1985 r.

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

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

3. ZAPADLIŚKA POEKSPLOATACYJNE ZWIĄZANE Z DZIAŁALNOŚCIĄ KOPALNI PODZIEMNEJ W KAŁUSZU

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

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

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

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

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

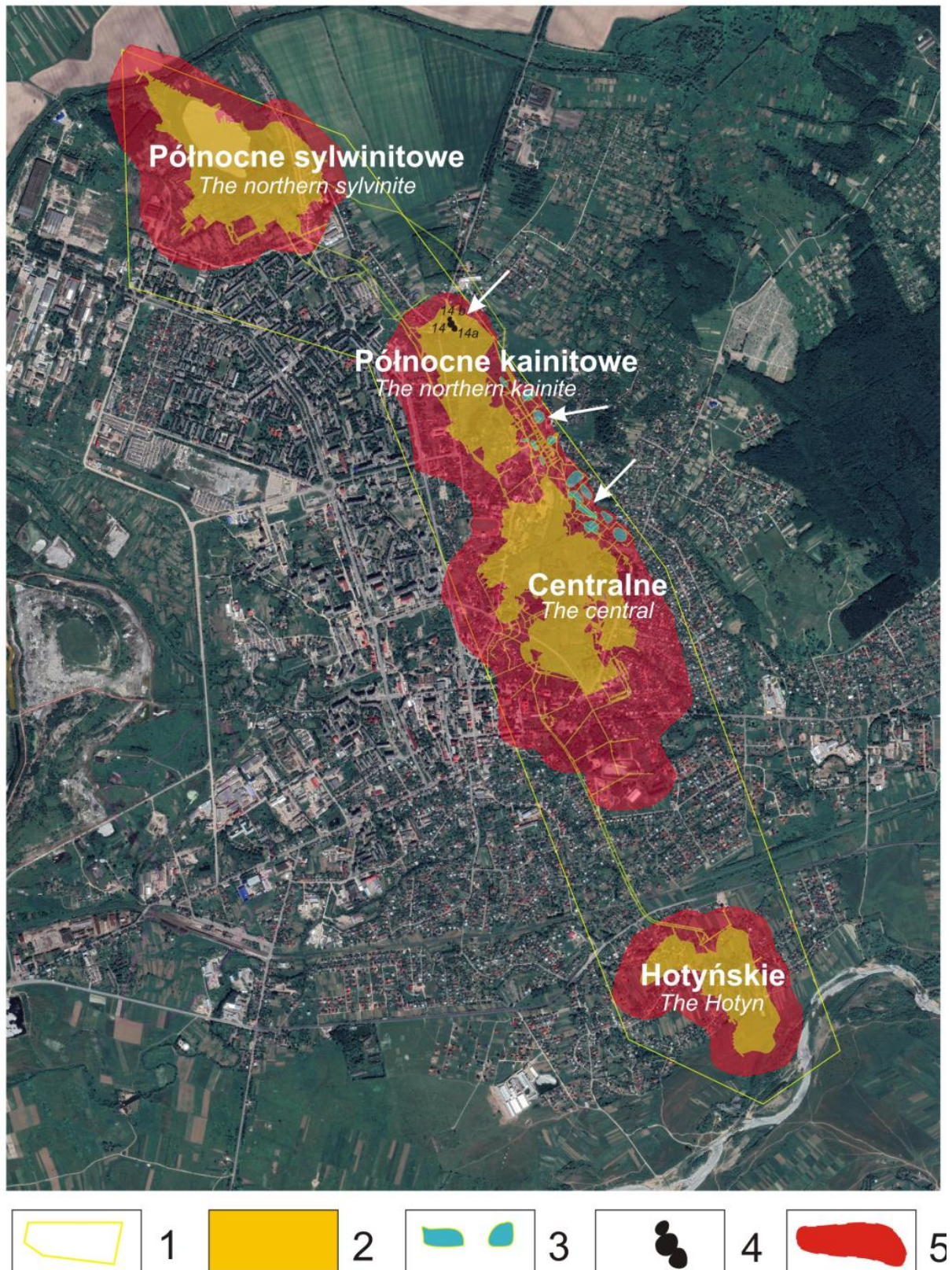
3. POST-MINING SUBSIDENCE ASSOCIATED WITH THE UNDERGROUND MINE ACTIVITY IN KALUSH

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

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

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

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



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

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



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

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

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

4. WYNIKI BADAŃ, ANALIZA PRZYCZYŃ NEGATYWNYCH ZJAWISK EKOLOGICZNYCH

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

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

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

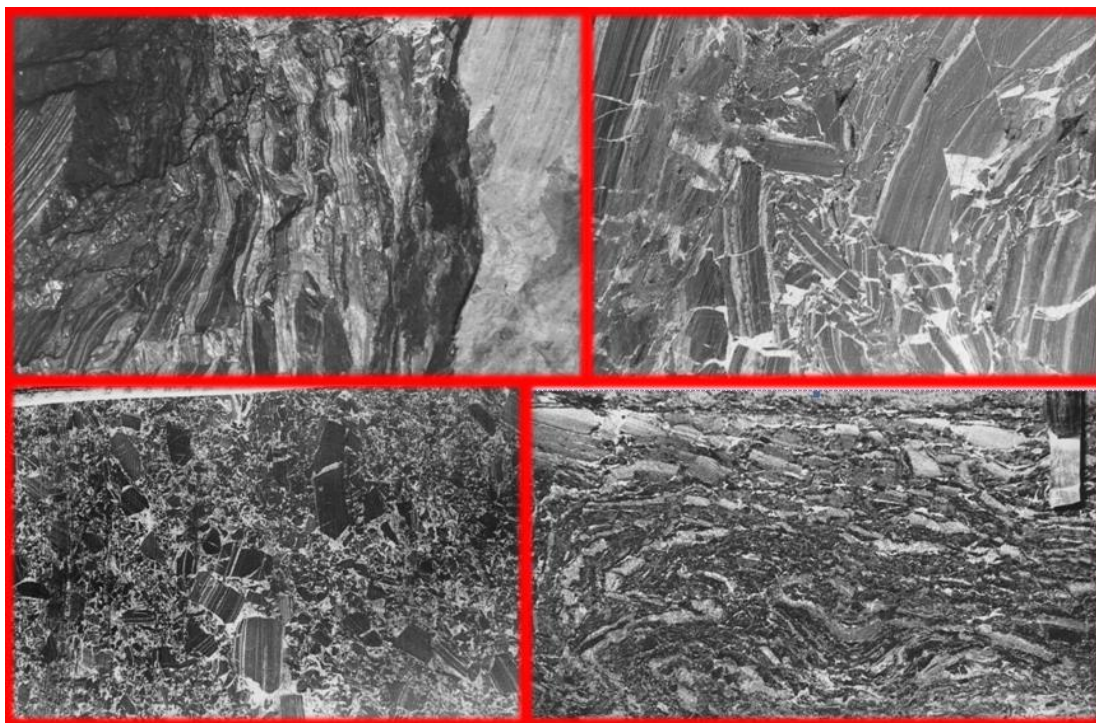
by using brines with a specific composition, balanced with the surrounding salt mass, and considered “non-aggressive” towards salt rocks, it would be possible to ensure the stability of the underground workings and inter-chamber pillars while preventing the development of karst processes (Semchuk, 1995).

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

5. WNIOSKI

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

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

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

5. CONCLUSIONS

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

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

LITERATURA / REFERENCES

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

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



Wpływ uziarnienia soli kamiennych na tempo zaciskania się kawern solnych

Correlation between the rock-salt grain size and the rate of underground cavern convergence

Michał SŁOTWIŃSKI^{1,2}, Marta ADAMUSZEK¹

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Centrum Modelowania Procesów Geologicznych,
al. Jaworowa 19, 53-122 Wrocław, mslot@pgi.gov.pl, madam@pgi.gov.pl

² Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych, ul. W. Cybulskiego 32, 50-205 Wrocław

¹ Polish Geological Institute – Polish Research Institute, al. Jaworowa 19, 53-122 Wrocław, mslot@pgi.gov.pl, madam@pgi.gov.pl

² Wrocław University, Institute of Geological Sciences, ul. W. Cybulskiego 32, 50-205 Wrocław

STRESZCZENIE

Tempo konwergencji podziemnych magazynów solnych jest jednym z parametrów warunkujących ich długotrwałą stabilność. Pełzanie dyslokacyjne jest powszechnie uważane za główny mechanizm deformacji w solach kamiennych odpowiedzialny za konwergencję kawern. Jest to związane głównie z faktem, że mechanizm ten dominuje dla deformacji związanej z dużymi naprężeniami różnicowymi, które są spodziewane podczas eksploatacji takich kawern. Przedstawiona w artykule analiza wskazuje, że dla szerokich zakresów możliwych stanów naprężeń w magazynach pełzanie dyfuzyjne może być drugim istotnym mechanizmem deformacji. Jest to szczególnie istotne dla kawern, w których magazynowane są substancje gazowe, gdyż stan naprężeń waha się istotnie w zależności od poziomu wypełnienia gazem. Analiza danych z sześciu otworów wiertniczych na terenie wyniesienia Łeby wykazała, że przy uwzględnieniu pełzania dyfuzyjnego tempa odkształcenia, a co za tym idzie, tempa zaciskania się kawerny, w niektórych częściach profilu mogą być znacznie wyższe niż w przypadku obliczeń opartych wyłącznie na zjawisku pełzania dyslokacyjnego. Różnica ta może sięgnąć nawet kilku rzędów wielkości. Szczególnie istotną cechą jest tu rozmiar uziarnienia, który ma kluczowe znaczenie dla intensywności pełzania dyfuzyjnego. Przedstawione w artykule badania wskazują, że dla prawidłowej oceny tempa zaciskania się kawern istotne jest uwzględnienie dwóch mechanizmów deformacji zarówno pełzania dyslokacyjnego jak i dyfuzyjnego

ABSTRACT

Convergence rate is one of the important parameters that influence the long-term stability of underground storage caverns situated in rock-salt deposits. Dislocation creep is generally considered to be the main deformation mechanism responsible for the cavern convergence. This is mainly related to the fact that dislocation creep dominates during the deformation process, at high differential stresses that are expected to occur around the salt cavern. However, in this paper, we present an analysis showing that, at large ranges of probable differential stresses around the caverns, diffusion creep can also become a significant deformation mechanism. That is of special importance for gas storage cavern construction, since the stress state around the cavern is highly dependent on the pressure of gas within the cavern, and the latter varies significantly throughout the gas injection-withdrawal cycle. Our analysis of the data collected from six selected boreholes located in the Łeba Elevation (northern Poland) shows that incorporation of the diffusion creep in the convergence rate calculation can lead to significantly higher values, as compared to our analysis when only dislocation creep is considered. The difference can reach several orders of magnitude. The salt grain size is especially important since it strongly influences the pressure solution creep. Our paper shows that both dislocation and diffusion creep should be employed in the study intended to obtain accurate prediction of cavern convergence rates.

Słowa kluczowe: sole kamienne, pełzanie dyfuzyjne, pełzanie dyslokacyjne, wyniesienie Łeba, kawerny magazynowe, konwergencja kawern

1. WSTĘP

W związku ze zmianami w gospodarce energetycznej wywołanymi polityką klimatyczną oraz kwestiami bezpieczeństwa energetycznego zwiększa się zarówno w skali tak globalnej jak i krajowej zapotrzebowanie na podziemne magazynowanie substancji – gazu ziemnego, ropy naftowej, sprężonego powietrza, dwutlenku węgla i wodoru. Podziemne magazynowanie substancji posiada wiele zalet w porównaniu do składowania naziemnego: niższy koszt, duża pojemność w porównaniu do zajmowanego terenu, większe bezpieczeństwo oraz szybsze tempo poboru substancji (Kłeczek i in., 2005, 2005; Kunstman i in., 2009; Caglayan i in., 2020). Jedną z korzystnych form podziemnego magazynowania substancji jest magazynowanie w kawernach solnych, które są wielkich rozmiarów komorami wytwarzanymi metodami ługowniczymi w obrębie złóż soli kamiennej. Jest to związane głównie z właściwościami soli kamiennej, która charakteryzuje się niską przepuszczalnością, oraz deformacją zdominowaną przez nietworzące nieciągłości odkształcenia lepkie, zapewniając dużą szczelność magazynu (Kunstman i in., 2009).

Na terenie Polski jedną z najbardziej perspektywicznych lokalizacji pod kątem podziemnego składowania substancji jest wyniesienie Łeba (Czapowski, 2019). W obrębie tego obszaru znajdują się trzy udokumentowane złoża soli kamiennej: Zatoka Pucka, Łeba oraz Mechelinki. W złożu Mechelinki istnieje działający obecnie podziemny magazyn gazu ziemnego KPMG Kosakowo. Zaletami obszaru jest występowanie miąższych, pokładowych złóż soli kamiennej zalegających na odpowiedniej głębokości oraz bliskość morza, ułatwiająca utylizację solanki poługowniczej (Czapowski i Tomassi-Morawiec, 1985, 2006; Czapowski, 1987, 1998, 2019). Jednakże, określenie przydatności danego obszaru do budowy magazynów kawernowych jest złożonym procesem, wymagającym oprócz określenia parametrów fizycznych i chemicznych skał także cech mechanicznych ośrodka. Te ostatnie mają kluczowe znaczenie dla szczelności i stabilności kawern, decydują bowiem zarówno o tempie lepkiego zaciskania się kawern jak i o jej podatności na deformacje kruche.

Analiza tempa zaciskania się kawern wymaga dobrania właściwego prawa pełzania, a także określenia odpowiednich parametrów materiałowych. Za główny mechanizm deformacji odpowiedzialny za zaciskanie się kawern powszechnie uważa się pełzanie dyslokacyjne. Mechanizm ten był uwzględniany jako jedyny mechanizm pełzania w zdecydowanej większości prac biorących pod uwagę lepkie odkształcenia przy modelowaniu kawern magazynowych np. Heusermann i in. (2003), Zhang i in. (2015), Böttcher i in. (2017), Cała i in. (2018), Ma-

Keywords: rock salt, diffusion creep, dislocation creep, Łeba Elevation, underground storage caverns, cavern convergence

1. INTRODUCTION

In view of the changes in energy management caused by the climate policies and the issues of energy security, the demand for the underground storage of substances (natural gas, crude oil, compressed air, carbon dioxide, or hydrogen) has been increasing nationally and internationally. Underground storage of substances presents a number of advantages in comparison to ground level facilities: lower costs, large volumes in comparison to surface area of the facility, high security, and high rate of substance withdrawal (Kłeczek et al. 2005, 2005; Kunstman et al. 2009; Caglayan et al. 2020). Substance storage in underground salt caverns is one of the most beneficial forms of storage since the salt caverns provide large volume spaces within rock salt, produced by leaching methods. The advantage lies in the rock salt properties, including low permeability and deformation dominated by viscous creep, preventing rock discontinuity and assuring good tightness of the facility (Kunstman et al. 2009).

The Łeba Elevation is one of the prospective sites for underground storage in Poland (Czapowski 2019). That area contains three documented salt deposits: the Bay of Puck, Łeba, Mechelinki. The Kosakowo Underground Gas Storage is located in the Mechelinki salt deposit. One notable benefit of the area region is the presence of reasonably thick rock salt deposits situated at appropriate depths in proximity to the Baltic Sea. The vicinity of the sea eases the brine disposal after cavern leaching (Czapowski and Tomassi-Morawiec 1985, 2006; Czapowski 1987, 1998, 2019). However, usability of a given area for the construction of underground storage facilities is a complex process that requires determination of physical and chemical parameters of rocks, as well as mechanical properties of the rock mass. The latter is of key importance for the cavern tightness and stability, as such properties are crucial for the rate of viscous convergence of caverns and their susceptibility to brittle deformations.

An analysis of the cavern convergence rate requires the selection of a proper creep law, as well as determination of proper material parameters. Dislocation creep is generally considered to be the main deformation mechanism that is responsible for cavern convergence. The majority of numerical models concerning the geomechanical behavior of salt caverns consider primarily viscous deformation, realised through dislocation creep exclusively. (e.g. Heusermann et al. 2003; Zhang et al. 2015; Böttcher et al. 2017; Cała et al. 2018; Makhmutov et al. 2020, Habibi et al. 2021). Recent studies indicate, however, that diffusion creep can be essential for viscous deformation of rock salt, in addition to di-

khmutov i in. (2020), Habibi i in. (2021). Współczesne badania wskazują jednak, że oprócz pełzania dyslokacyjnego pełzanie dyfuzyjne może mieć istotne znaczenie podczas deformacji lepkiej w solach (Marketos i in., 2016; Fokker i Breunese, 2022; Kumar i Hajibeygi, 2022). W zależności od stanu naprężenia, czy wielkości uziarnienia, prawo dyfuzyjne lub prawo dyslokacyjne może stanowić dominujący mechanizm deformacji (Urai i in., 1986, 2008; Cornet i in., 2017, 2018; Barabasch i in., 2022) which are used for energy storage and play an important role in the energy transition. Much of this deformation is at differential stresses of a few MPa. The vast majority of laboratory measurements of salt creep are at much higher differential stress and require extrapolation over many orders of magnitude. This extrapolation can be made more reliable by including microphysical information on the deformation mechanisms in the laboratory samples, integrated with microstructural analysis of samples deformed in natural laboratories at low differential stress. Rock salt can deform at widely different rates at the same temperature and deviatoric stress, depending on state variables such as grain size, solid solution- and second phase- impurities, crystallographic preferred orientation, water content and grain boundary structure. Both dislocation creep and dissolution-precipitation creep processes are common, but dissolution-precipitation creep (pressure solution).

Oprócz zmienności w uziarnieniu, istotną kwestią mającą wpływ na deformację w solach, jak również na jej wytrzymałość jest jej heterogeniczność. Obecność przewarstwień innych skał oraz domieszek innych minerałów oraz zmienna zawartość wody w solach mogą być przestrzennie zróżnicowane, nawet w niezaburzonych pokładach soli kamiennych. W konsekwencji może mieć to wyraźny wpływ na stateczność kawerny magazynowej (Urai i in., 2008; Cała i in., 2018; Kumar i Hajibeygi, 2022).

Celem tego artykułu jest analiza wpływu pełzania dyfuzyjnego na deformację soli w warunkach otoczenia kawerny magazynowej na substancję gazową, oraz roli jaką gra w tym procesie rozmiar uziarnienia. Do analizy wykorzystano dane litologiczne z wybranych sześciu otworów wiertniczych z obszaru wyniesienia Łeby, które pokazują wewnątrz zróżnicowanie pokładu soli kamiennych na tym obszarze. Na podstawie informacji dotyczącej uziarnienia soli kamiennych przeanalizowano możliwe tempa deformacji skał dla różnego wariantu wielkości naprężeń dyferencjalnych. Dla jednego otworu przeprowadzono rozszerzoną interpretację właściwości geomechanicznych soli w kontekście stabilności kawerny solnej, która mogłaby powstać na tym obszarze. Analizę oparto na dwóch wariantach, w których założono, że a) średnie lub b) minimalne uziarnienie soli kamiennych jest czynnikiem warunkującym stabilność kawern.

2. OBSZAR BADAŃ

Wyniesienie Łeby jest jednostką geologiczną w północnej Polsce, stanowiącą monoklinalne wyniesienie podłoża

slocation creep (Marketos et al. 2016; Fokker and Breunese 2022; Kumar and Hajibeygi 2022). Depending on the stress state or the grain size, either the diffusion law or the dislocation law can be a dominating deformation mechanism (Urai et al. 1986, 2008; Cornet et al. 2017, 2018; Barabasch et al. 2022).

In addition to the variety of grain sizes, salt heterogeneity is an essential issue that affects both bulk and localised mechanical properties of rock salt. The presence of interlayers containing other types of rock, or admixtures of other minerals, as well as water content in salt deposits, can vary within the rock-salt volume even if the deposit is not tectonically disturbed. Those properties may clearly affect the cavern stability (Urai et al. 2008; Cała et al. 2018; Kumar and Hajibeygi 2022).

The purpose of this paper is to analyse the impact of diffusion creep and the role of grain size, associated with this process, on the deformation rate of rock salt. Our analysis is based on lithological data collected from six selected boreholes of the Łeba Elevation that indicate an internal diversification of the local salt deposit. Based on rock salt grain size data, we analysed possible rock deformation rates for various differential stress values. For one borehole, we provided an extended interpretation of the geomechanical properties of salt, in the context of the stability of an underground salt cavern that could be designed on the site. In our analysis we assumed either (a) average or (b) minimum rock-salt grain sizes, as the factors determining cavern stability.

2. RESEARCH AREA

Łeba Elevation is a geological unit of northern Poland. It is a homoclinal structure of the Precambrian basement, dipping at ca. 10° in the SSE direction. The basement is covered by the sequence of the sediments of the older Paleozoic, the Polish Permian-Mesozoic Basin, and Cenozoic. On the southern side, the Łeba Elevation borders the Peribaltic Syncline (Pożaryski and Witkowski 1990). The rock salt deposits of the Łeba Elevation have the average thickness of ca. 150 m (from 0 to 225 m) and they belong to the unit of the oldest rock salt (NaCl) of the first cyclothem of Zechstein. The deposit is situated at the depth from ca. 500 m in the NW section of the Łeba Elevation to ca. 1,000 m in the SE section (Czapowski 2019). The beds belonging to higher cyclothem (Z2-Z3) do not contain any chloride formation in that area (Poborski 1961; Wagner 1988).

Given that the evaporitic formations are of bedded type and mostly undeformed, they represent a relatively simple geological structure (Czapowski and Tomassi-Morawiec 1985, 2006; Czapowski 1987, 1998). The faults present in the basement are believed to have been active prior to the deposition of rock salt and are unlikely to significantly impact the integrity of the salt layer. The diversity in rock-salt thickness

prekambryjskiego zapadającego około 10° w kierunku SSE. Podłoże to jest przykryte przez kolejno osady starszego paleozoiku, kompleks permsko-mezozoiczny basenu polskiego oraz osady kenozoiczne. Od południa wyniesienie Łęby graniczy z syneklizą perybałtycką (Pożaryski i Witkowski, 1990). Złoża soli kamiennej na obszarze wyniesienia Łęby mają średnią miąższość około 150 m (od 0 do 225 m) i należą do wydzielenia najstarszej soli kamiennej (Na1) pierwszego cyklotemu cechsztynu. Zalegają one na głębokości od około 500 w północno zachodniej części wyniesienia Łęby do około 1000 m w części południowo-wschodniej (Czapowski, 2019). Warstwy należące do wyższych cyklotemów (Z2-Z3) nie zawierają na tym obszarze utworów chlorkowych (Poborski, 1961; Wagner, 1988).

Utwory ewaporatowe, ze względu na pokładowy charakter i brak poważnych zaburzeń tektonicznych charakteryzują się stosunkowo prostą budową geologiczną (Czapowski i Tomassi-Morawiec, 1985, 2006; Czapowski, 1987, 1998). W podłożu cechsztynu istnieją wyraźne uskoki, ale są one pre-sedymen-tacyjne w stosunku do depozycji soli, i najprawdopodobniej nie mają wpływu na jej pokład. Zróżnicowanie miąższości soli kamiennej jest związane przede wszystkim ze zmienną morfologią jej spągu. Jest to efekt wypełnienia przez sól pierwotnej, złożonej morfologii zalegającego niżej anhydrytu dolnego (A1d) (Czapowski, 1987; Peryt, 1994; Czapowski i Tomassi-Morawiec, 2006). W górnej części wydzielenia Na1 dominuje sól grubokrystaliczna i wielkokrystaliczna (kryształowa), poniżej uziarnienie staje się bardziej nieregularne, a w dolnej części dominują sole średnio- i drobnokrystaliczne. Główne zanieczyszczenia w soli kamiennej stanowią anhydryt i sole potasowo-magnezowe, a w górnej części profilu także materiały ilaste, które występują w formie strzępków i warstewek. W części stropowej ich ilość przekracza 2%. W efekcie często stosuje się podział na fację soli czystych (Na1A) w części dolnej i soli zailonych (Na1B) w części górnej o średnim stosunku miąższości około 2:1 (Werner, 1978; Czapowski, 1998; Czapowski i in., 2009). W środkowej części wydzielenia Na1 lokalnie występuje poziom tzw. anhydrytu środkowego (A1s). Składa się on z jednego, rzadziej kilku siarczanowych przewarstwień w soli, o miąższości dochodzącej do kilkunastu metrów (Czapowski i Tomassi-Morawiec, 1985; Pizon i in., 1985). Oprócz anhydrytu, często występuje w nim polihalit. Polihalit był również dokumentowany w spągu wydzielenia, na granicy z anhydrytem dolnym (Werner, 1978). Poza poziomem A1s sól kamienna nie wykazuje innych miąższych (większych niż 50 cm) przewarstwień innych typów skał.

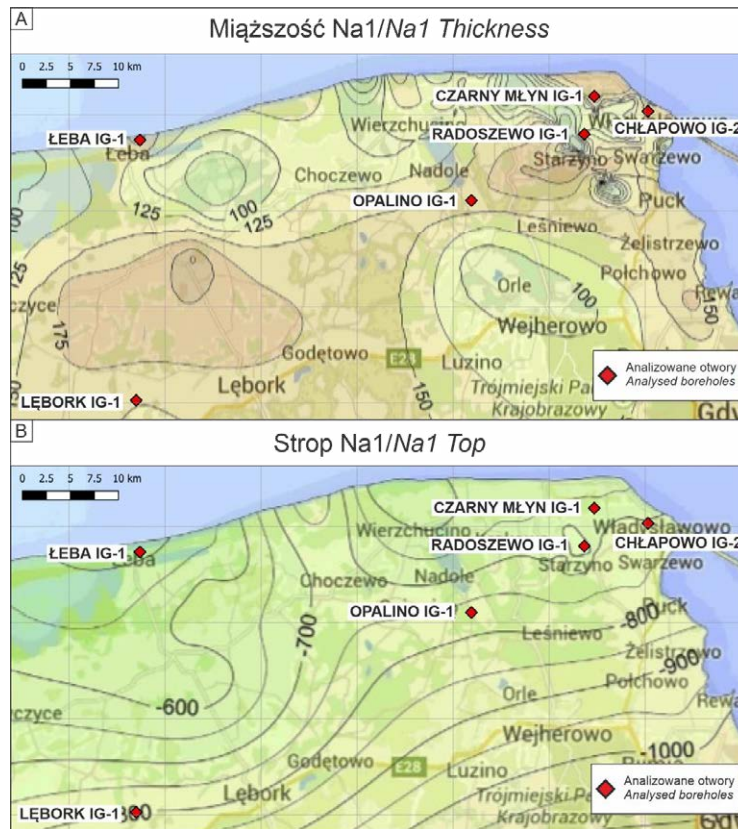
3. SELEKCJA OTWORÓW DO ANALIZY

Do analizy wybrano 6 otworów tj.: Chłapowo IG-2, Czarny Młyn IG-1, Łęba IG-1, Lębork IG-1, Opalino IG-1, oraz Radoszewo IG-1. Otwory dobrano na podstawie zróż-

is primarily associated with the variable morphology of the rock salt base, which resulted from filling in of the original complex morphology of lower anhydrite (A1d) below (Czapowski 1987; Peryt 1994; Czapowski and Tomassi-Morawiec 2006). In the upper section of the Na1 unit, coarse-grained and very coarse-grained (or crystal) salt dominates, while below, grain size becomes more irregular, with the domination of medium- and fine-grained salts in the beds below. Rock salt contains impurities, mainly anhydrite and potassium-magnesium salts. In the upper section of the profile also shows silt materials that occur in the form of shreds and thin beds. The quantity of such impurities exceeds 2% in the upper parts of the salt bed. Consequently, analysts often distinguish pure salt (Na1A) facies in the lower section and clay-bearing salt (Na1B) facies in the upper section, with the average proportion of thicknesses of ca. 2:1 (Werner 1978; Czapowski 1998; Czapowski et al. 2009). In the central section of the Na1 unit, a level of the so-called middle anhydrite (A1s) occurs locally. That is composed of either one or rarely several sulphate interlayers, with the thickness reaching up to a dozen of metres (Czapowski and Tomassi-Morawiec 1985; Pizon et al. 1985). Polyhalites occur there quite often, in addition to anhydrite. Polyhalites have also been documented in the floor of the unit, on the boundary with lower anhydrite (Werner 1978). Beside the A1s level, sulphate or clay interlayers do not exceed the thickness of 50 cm.

3. SELECTION OF BOREHOLES FOR ANALYSIS

We selected six boreholes for our analysis: Chłapowo IG-2, Czarny Młyn IG-1, Łęba IG-1, Lębork IG-1, Opalino IG-1, and Radoszewo IG-1, marked by red diamonds in Fig. 1. The boreholes were selected on the basis of their spatial distribution, rock salt depth and thickness, variation of the rock salt heterogeneity, and quality of available descriptions. The boreholes were marked with red diamonds on the maps showing Na1 thickness and depth (Fig. 1, after Ślizowski et al. 2017). Borehole Łęba IG-1, is located in the NW part of the area, where the salt layer is positioned at the most shallow depth. The top of rock salt bed is situated at the depth of ca. 500 m below the surface level and the rock salt thickness exceeds 150 m. In borehole Czarny Młyn IG-1, in the NE part of the area, the top salt level is found at the depth of ca. 650 m below the surface. In these locations, salt bed thickness reaches nearly 200 m. Boreholes Radoszewo IG-1 and Chłapowo IG-2 are situated in the eastern section of the area, where the top of rock salt bed occurs at ca. 725 and 750 m and thicknesses are ca. 125 and 150 m, respectively. Boreholes Opalino IG-1 in the southern section and Lębork IG-1 in the SW section of the area reach the Na1 salt bed at the depth of ca. 800 m below the surface. The salt-bed thickness reaches up to ca. 150 m in those boreholes.



Ryc. 1. Mapy rejonu wyniesienia Łeby przedstawiające: A - miąższość najstarszej soli kamienniej (Na1) i B – zaleganie stropu najstarszej soli kamienniej (Na1) (Ślizowski i in., 2017).

Fig. 1. Maps of the Łeba Elevation showing: A – thickness of the Oldest Halite unit (Na1) and B – depth of the Oldest Halite (Na1) top (Ślizowski et al., 2017).

nicowania ich położenia w obrębie analizowanego obszaru, miąższości soli, występowania w ich obrębie wewnętrznego zróżnicowania oraz dokładności dostępnych opisów. Otwory zaznaczono czerwonymi rombami na mapach miąższości oraz głębokości zalegania stropu Na1 (Ryc. 1, za Ślizowski i in., 2017). Otworem, w którym sól kamienna zalega najpłycej, jest znajdujący się w północno-zachodniej części obszaru otwór Łeba IG-1. Strop zlokalizowany jest tu na głębokości około 500 m p.p.t., a miąższość soli przekracza 150 m. W NE części obszaru, strop soli w otworze Czarny Młyn IG-1, znajduje się na głębokości około 650 m. Miąższość osiąga tu niemal 200 m. Otwory Radoszewo IG-1 i Chłapowo IG-2 są zlokalizowane we wschodniej części obszaru z poziomem stropu soli na głębokościach odpowiednio około 725 i 750 m i miąższościami odpowiednio około 125 i około 150 m. Otwory Opalino IG-1 w części południowej i Lębork IG-1 w części południowo-zachodniej przecinają sól Na1 na głębokości około 800 m p.p.t. Miąższość soli w tych otworach wynosi około 150 m.

4. PROFILE LITOLOGICZNE

Dane litologiczne pozyskane zostały za pośrednictwem CAG i CBDG, natomiast informacje o uziarnieniu pozyskano

4. LITHOLOGICAL PROFILES

The lithological data were obtained from the Polish CAG and CBDG database systems, and the grain size data are extracted from the work of Czapowski (1998). The borehole profile was discretised into 0.1 m intervals, for which corresponding data about lithology, lithostratigraphy and grain size data were assigned. On that basis, we developed the lithological and granulometric profiles of the analysed boreholes, presented in Fig. 2. The granulometric profiles show both average grain sizes (black line in Fig. 2.) and the ranges between the minimum and maximum grain sizes in the given interval (purple range in Fig. 2.).

Note, that the average grain size values in some cases fall beyond the range between the minimum and maximum grain size values. This is caused by the fact that the average values were determined in different intervals than those for which the minimum and maximum values were determined, the latter often being determined only in localised points

The boreholes were arranged here in accordance with the increasing top salt depth, which ranges from ca. 500 m (Łeba IG-1) to more than 800 m below the surface level (Lębork IG-1). Borehole Łeba IG-1 shows the largest average rock-salt grain size of 20 mm, occurring mainly between ca. ¼

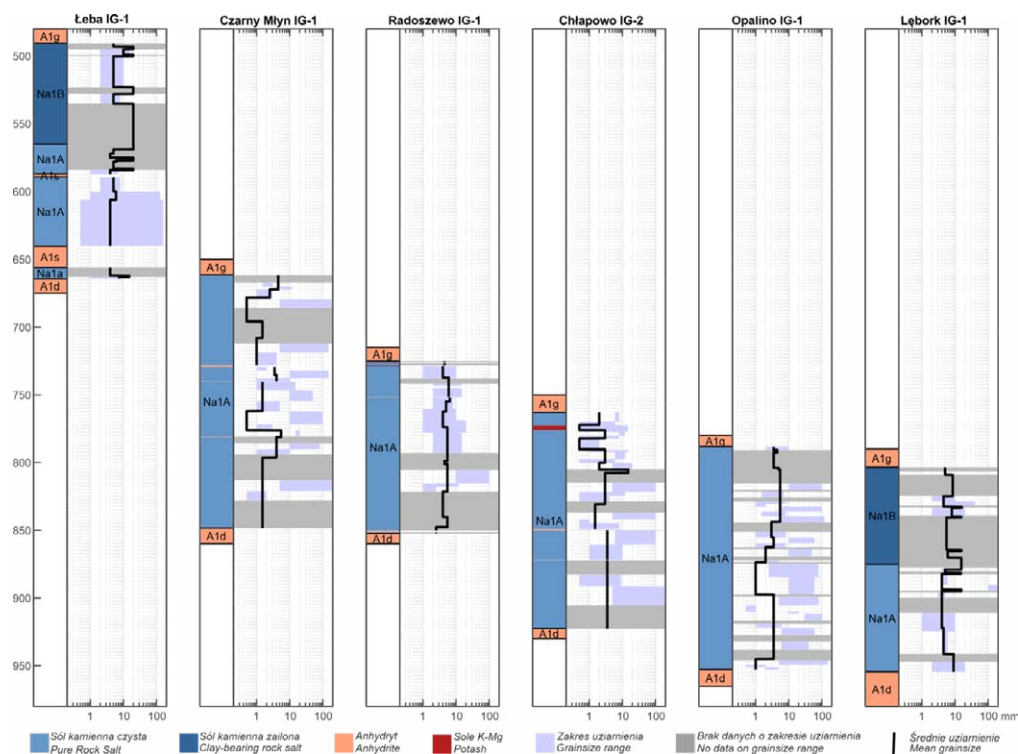
z pracy Czapowskiego (1998). Profil otworu zdyskretyzowano w interwałach 0,1 m, w których określono wydzielenia litologiczne i litostratygraficzne oraz dla Na1 dodatkowo rozmiar uziarnienia. Na tej podstawie sporządzone zostały profile lito logiczno-granulometryczne analizowanych otworów i przedstawione na Ryc. 2. Profile granulometryczne prezentują zarówno średnie uziarnienie (czarna linia na Ryc. 2.) jak i zakres między minimalną oraz maksymalną wielkością uziarnienia w danym interwale (fioletowy przedział na Ryc. 2.). W większości otworów można zauważyć, że zakresy pomiędzy minimalnym i maksymalnym uziarnieniem są w sprzeczności ze średnią. Jest to spowodowane faktem, że wartości średnie były określane dla innych interwałów niż wartości skrajne.

Otwory przedstawiono w kolejności głębokości zalegania soli, która waha się od około 500 m p.p.t. (Łeba IG-1) do ponad 800 m p.p.t. (Łębork IG-1). W otworze Łeba IG-1 najwyższe średnie uziarnienie soli kamiennej, rzędu 20 mm, występuje głównie w pomiędzy około ¼ a połową profilu soli kamiennej, licząc od jej stropu. Nieznane są tu jednak bardziej szczegółowe informacje na temat zakresu skrajnych wartości uziarnienia. Powyżej dominują sole o uziarnieniu średnim rzędu około 5 mm i względnie małym zróżnicowaniu (2-10 mm). Średnia wartość około 5 mm dominuje również w dolnej połowie otworu, natomiast zróżnicowanie jest tu znacznie większe (0.5-150 mm). Występują tu też dwa przewarstwienia anhydrytu o znacznej miąższości. Pierwsze, mniejsze występuje w centralnej części pokładu soli i ma miąższość około 2 m. Drugie ma około 16 m i znajduje się w dolnej części profilu soli.

and ½ of the length of the rock-salt profile, counting from the ceiling. However, data about grain size range are not known in that case. Above that bed, average rock salt grain size of ca. 5 mm dominates, with relatively small size diversity (2–10 mm). The average value of ca. 5 mm dominates also in the lowest section of the borehole, however the grain size range is wider here (0.5–150 mm). Besides, two considerably thick anhydrite interbeds occur there as well. The first one is smaller and appears in the central section of the salt bed, with the thickness of ca. 2 m. The other one is ca. 16 m thick and is situated in the lower section of the rock salt profile.

In borehole Czarny Młyn IG-1, the average salt grain size varies considerably within the salt profile, from 0.5 to 5 mm, and the only section with a constant grain size is located close to the salt base, with grain sizes about 1.5 mm. Sharp changes of the average grain size were visible close to anhydrite interbedding. The data regarding the range of the grain size variance is highly discontinuous but the variability is significant, often exceeding an order of magnitude within a single interval. In borehole Radoszewo IG-1, the average grain size value was relatively constant along the entire profile, smoothly oscillating between 3 and 8 mm. The ranges of grain size variability are fairly small. However, the data about grain size range are available only for ca. 60% of the rock salt profile length.

Borehole Chłapowo IG-2 is characterised by small anhydrite and potassium-magnesium salts intercalations, while the average grain size varies considerably in the upper half of the profile, from 0.5 to 10 mm, and is equal to ca. 3 mm in the



Ryc. 2. Profile poziomu solnego w analizowanych otworach, z uwzględnieniem litostratygrafii, litologii oraz wielkości uziarnienia.

Fig. 2. Profiles of oldest salt layer in the examined wells. Litostratigraphy, lithology and grain size.

W otworze Czarny Młyn IG-1 średnie uziarnienie soli zmienia się w dużym stopniu w profilu pokładu soli wahając się między 0,5 a 5 mm i jedynie w strefie spągowej jest stałe na dłuższym odcinku, gdzie osiąga wartość 1,5 mm. Wyrażone skoki w średnim uziarnieniu są widoczne w sąsiedztwie przewarstwień anhydrytu. Dane na temat uziarnienia są bardzo nieciągłe, jednak zmienność jest duża i często zakres dla pojedynczego interwału przekracza rząd wielkości.

W otworze Radoszewo IG-1 średnia wartość uziarnienia nie wykazuje dużej zmienności, osiągając wartości pomiędzy 3 a 8 mm, ze zmianami o bardzo płynnym charakterze. Zakresy pomiędzy skrajnymi wielkościami ziaren są stosunkowo małe i dostępne dla około 60% długości profilu soli kamiennej.

Otwór Chłapowo IG-2 charakteryzuje się drobnymi przewarstwieniami anhydrytu i soli potasowo-magnezowych. Uziarnienie średnie w górnej połowie profilu zmienia się dość intensywnie, pomiędzy 0,5 a 10 mm, po czym osiąga wartości około 3 mm w dolnej części. Większość profilu otworu posiada opis uziarnienia minimalnego i maksymalnego, charakteryzujący się dużym zakresem zmienności, obejmującym 2 rzędy wielkości w dolnej części otworu. Otwór Opalino IG-1 charakteryzuje się małą zmiennością uziarnienia średniego (między 3 a 7,5 mm), za to dużym rozrzutem między wartościami minimalnymi i maksymalnymi, zazwyczaj wynoszącym co najmniej jeden rząd wielkości. W otworze Lębork IG-1 sól ma charakter generalnie grubokrystaliczny. Średnie uziarnienie jest równe około 10 mm na całej długości otworu. Zakres zmienności jest stosunkowo niski, a wartości wahają się pomiędzy 1 a kilkanaście mm. Jednakże, dane o zakresie uziarnienia są dostępne tylko dla około połowy profilu soli.

5. PRAWA KONSTITUTYWNE PEŁZANIA SOLI KAMIENNEJ

Deformacja soli kamiennej może zachodzić w efekcie działania różnych mechanizmów. W geologicznej skali czasowej, w deformacji soli kamiennej dominującą rolę odgrywają odkształcenia lepkie, podczas gdy odkształcenia kruche (plastyczne) i sprężyste mają wyraźnie mniejsze znaczenie (Jackson i Hudec, 2017). Głównymi mechanizmami deformacji lepkiej są pełzanie dyslokacyjne i pełzanie dyfuzyjne (pełzanie z rozpuszczania-precypitacji) (Urai i in., 1986). Mechanizmy te charakteryzują się różną wrażliwością na czynniki takie jak stan naprężeń, temperatura czy uziarnienie. Pełzanie dyslokacyjne jest relacją typu potęgowego (nienewtonowskiego) między naprężeniem a tempem odkształcenia:

$$\dot{\epsilon} = A e^{\frac{-Q_{DC}}{RT}} \sigma_d^n \quad (1)$$

gdzie $\dot{\epsilon}$ jest tempem odkształcenia, σ_d jest naprężeniem różnicowym, R jest stałą gazową, T jest temperaturą, A jest liniowym współczynnikiem materiałowym, Q_{DC} jest energią aktywacyjną pełzania dyslokacyjnego (zależną od materiału),

lower section of the profile. The majority of the profile contains description of the grain size range, which shows large of variability, up to two orders of magnitude in the lower section of the salt profile.

Borehole Opalino IG-1 is characterised by a low variability of average grain size (between 3 and 7.5 mm), but with a large dispersion between the minimum and maximum values, usually amounting to at least one order of magnitude.

In borehole Lębork IG-1, generally coarse-grained salt dominates. The average grain size is ca. 10 mm along the whole length of the salt profile. The range of variability is relatively low, and the values vary from 1 to about a dozen of millimetres. However, the grain size range data were available only for about a half of the salt profile.

5. CONSTITUTIVE ROCK-SALT CREEP LAWS

Rock salt deformation is generally a complex process involving more than one mechanism. In a geological time scale, viscous flow dominates, while brittle (plastic) and elastic deformation is much less significant (Jackson and Hudec 2017). Dislocation creep and diffusion creep (or solution-precipitation creep) are the main mechanisms of viscous deformation (Urai et al. 1986). These mechanisms are characterised by different susceptibilities to such factors as stress state, temperature, or grain size. Dislocation creep is power-law (or non-Newtonian) relationship between stress and deformation:

$$\dot{\epsilon} = A e^{\frac{-Q_{DC}}{RT}} \sigma_d^n \quad (1)$$

where $\dot{\epsilon}$ is the deformation rate, σ_d differential stress, R gas constant, T temperature, A linear material coefficient, Q_{DC} activation energy for dislocation creep (depending on the material), and n is a material-dependent stress exponent. Diffusion creep, however, was characterised by a linear (Newtonian) correlation of stress and deformation:

$$\dot{\epsilon} = B e^{\frac{-Q_{PS}}{RT}} \cdot \frac{\sigma_d}{TD^m} \quad (2)$$

Where B is a linear material coefficient, Q_{PS} activation energy for diffusion creep (depending on the material), D grain size, and m is the exponent of the grain-size function. Parameters A , B , n , m , Q_{PS} , and Q_{DC} are the experimentally determined material parameters (Urai et al. 2008; Jackson and Hudec 2017).

Dislocation creep dominates at high values of stress in coarse-grain rocks, whereas diffusion creep is characteristic for the deformation of fine-grained rock salt subjected to low stresses. Additionally, the presence of water in the inter-grain spaces can strongly promote the diffusion creep (Urai et al. 2008). In given conditions usually one of those deformation mechanisms dominates over the other, i.e. the rate of deformation resulting from the operation of one mechanism is negligi-

a n jest materiałowym wykładnikiem funkcji naprężeń. Pełzanie dyfuzyjne natomiast charakteryzuje się zależnością liniową (newtonowską) między naprężeniem a tempem odkształcenia:

$$\dot{\epsilon} = B e^{\frac{-Q_{PS}}{RT}} \cdot \frac{\sigma_d}{TD^m} \quad (2)$$

gdzie B jest liniowym współczynnikiem materiałowym, Q_{PS} jest energią aktywacyjną pełzania dyfuzyjnego (zależną od materiału), D jest wielkością ziarna, m jest wykładnikiem funkcji uziarnienia. Parametry A , B , n , m , Q_{PS} i Q_{DC} są parametrami materiałowymi, wyznaczanymi eksperymentalnie (Urai i in., 2008; Jackson i Hudec, 2017).

Dla wysokich wartości naprężeń w skałach gruboziarnistych dominuje pełzanie dyslokacyjne. Natomiast pełzanie dyfuzyjne jest charakterystyczne dla deformacji soli drobnoziarnistej poddanej niewielkim naprężeniom. Dodatkowo, obecność wody w przestrzeniach międzyziarnowych może silnie zwiększyć tempo pełzania dyfuzyjnego (Urai i in., 2008). Dla określonych warunków deformacji i wielkości uziarnienia zwykle jeden z mechanizmów deformacji dominuje nad drugim, tj. tempa odkształcenia wynikające z działania jednego z mechanizmów są pomijalnie małe w porównaniu z działaniem drugiego mechanizmu. Istotne zmiany warunków deformacji związane ze zmianą np. wartości naprężeń różnicowych, temperatury, rekrytalizacją mogą prowadzić do zmiany dominującego mechanizmu deformacji.

Aby prawidłowo opisać dynamikę takiego systemu jakim jest m.in. eksploatacja podziemnych magazynów, konieczne jest uwzględnienie obu mechanizmów w jednym prawie konstytutywnym. W niniejszej pracy używany jest model bilinearny, gdzie tempo odkształcenia dla określonych warunków (wielkości uziarnienia, temperatury oraz wielkości naprężeń) jest wyrażone jako tempo odkształceń wynikające z działania mechanizmu dominującego:

$$\dot{\epsilon} = \begin{cases} \dot{\epsilon}_{DC}, & \text{gdy } \dot{\epsilon}_{DC} \geq \dot{\epsilon}_{PS} \\ \dot{\epsilon}_{PS}, & \text{gdy } \dot{\epsilon}_{DC} < \dot{\epsilon}_{PS} \end{cases} \quad (3)$$

6. PARAMETRY PEŁZANIA DLA SOLI KAMIENNEJ

W literaturze występuje wiele zestawów parametrów materiałowych dla soli kamiennej. Zostały one wyznaczone eksperymentalnie w różnych wariantach naprężenia, temperatury i ciśnienia dla różnych soli kamiennych (syntetycznych i naturalnych). Przykładowe zestawy wartości parametrów, wraz z warunkami (σ , P , T), w których przeprowadzony był eksperyment, zaprezentowane zostały w Tabeli 1.

Przebieg zależności naprężenia różnicowego od tempa odkształcenia dla a) różnych zestawów parametrów dla pełzania dyslokacyjnego oraz b) różnych uziarnień dla jednego zestawu parametrów dla pełzania dyfuzyjnego przedstawiono na Ryc. 2A. W pełzaniu dyfuzyjnym zaobserwować można

ble when compared to the influence of the other mechanism. Essential changes of the deformation conditions, associated with a change of e.g. differential stress values, temperature, or re-crystallisation, can lead to the change of the dominating deformation mechanism.

To describe correctly the dynamics of systems such as operation of underground storage facilities, it is necessary to take both mechanisms into account in one constitutive law. In the present study, we are using an bilinear model, where for a given conditions (grain size, temperature, and stress value) the rate of deformation is expressed as the rate of deformation of the dominating mechanism:

$$\dot{\epsilon} = \begin{cases} \dot{\epsilon}_{DC}, & \text{gdy } \dot{\epsilon}_{DC} \geq \dot{\epsilon}_{PS} \\ \dot{\epsilon}_{PS}, & \text{gdy } \dot{\epsilon}_{DC} < \dot{\epsilon}_{PS} \end{cases} \quad (3)$$

6. ROCK-SALT CREEP PARAMETERS

The literature of the subject contains a number of material parameter sets concerning rock salt. The sets were determined experimentally for a wide range of stresses, temperatures, and pressures, for various types of rock salts (synthetic and natural). Selected sets of parameter values, together with the conditions (σ , P , T), under which a given experiment was conducted, are presented in Table 1 below.

The correlations between differential stress and rate of deformation for: (a) various sets of parameters for dislocation creep and (b) various grain sizes for one set of parameters of diffusion creep is presented in Fig. 2A. In the diffusion creep, we can observe a very large dependence of the deformation rate on grain size. A decrease of grain size by an order of magnitude leads to an increase of the rate of deformation by three orders of magnitude. The majority of the sets of parameters adopted for dislocation creep presents a similar trend of dependence between differential stress and rate of deformation, with the exception of the sets adopted by Carter et al. (1993) (a) and Taheri et al. (2020) that were determined for a typically low stresses and very high impurity content, respectively. In our analysis, we decided to use BGRa parameter set for the dislocation creep, which is motivated by similar provenience of the salt used in the experiment (Zechstein Basin, in the case of BGRa, Asse Diapir)

Fig. 2B presents the boundary between domination of the diffusion and dislocation creep. The correlation is presented for various values of temperatures (10, 30, and 50°C) that are typical for a shallow Earth's crust (within the depths up to ca. 1,500 m). Experiments indicated a little influence of temperature changes, of up to about a dozen percent, on the deformation rates.

Fig. 2B also illustrates the influence of a change in stress or grain size on the possible change of the dominating deformation mechanism. For stress equal to 3 MPa, diffusion

Tabela 1. Wybrane zestawy parametrów pełzania dla soli kamiennej.
Table 1. Select creep parameter sets for rock salt.

Parametry pełzania dyslokacyjnego Dislocation creep parameters							
Źródło Source	Lokalizacja Area	A	n	Q_{DC}	σ	P	T
		MPa ⁻ⁿ /s	-	kJ/mol	MPa	MPa	°C
Heard (1972)	Próbka syntetyczna Synthetic sample	0,12 - 5	5,5	98	1,6-47	200	23-400
Heard and Ryerson (1986)	Próbka syntetyczna Synthetic sample	0,08-0.5	5,8	96	1,6-47	200	23-400
Horseman. et al. (1992)	Avery Island	$6,5 \cdot 10^{-5}$	5,9	69,7	4,7-12,6	15	50-100
Carter et al. (1993) (a)	Avery Island	$8,1 \cdot 10^{-5}$	3,4	51,6	2.5 - ~15	jednoosiowe uniaxial	50-200
Carter et al. (1993) (b)	Avery Island	$1,6 \cdot 10^{-4}$	5,3	68,1	~5 -20,7	jednoosiowe uniaxial	50-200
BGRa – (Hunsche, 1994)	Asse, Niemcy	$2.8 \cdot 10^{-6}$	5	54	10-20	20	brak danych
Ter Heege et al. (2005a)	Próbka syntetyczna Synthetic sample	10^2-10^1	5,6	80	7,2-22,4	50	75-200
Taheri et al. (2020)	Gachsaran, Iran	2,92	2	38	17,6–32,2	15	23–90
Parametry pełzania dyfuzyjnego Solution-precipitation creep parameters							
Źródło Source	Lokalizacja Area	B	m	Q_{ps}	σ	P	T
		K/mm ³	-	kJ/mol	MPa	MPa	°C
Spiers et al. (1990)	Próbka syntetyczna Synthetic sample	$3,7 \cdot 10^{-4}$	3	24,5	0,5-2,2	jednoosiowe uniaxial	20-90

bardzo dużą zależność tempa odkształcenia od wielkości uziarnienia. Zmniejszenie wielkości ziarna o rząd wielkości prowadzi do zwiększenia tempa deformacji o trzy rzędy wielkości. Większość zestawów parametrów dla pełzania dyslokacyjnego przedstawia zbliżony trend zależności między naprężeniem różnicowym i tempem odkształcenia. Wyjątkiem są zestawy wyznaczone przez Carter et al. (1993) (a) i Taheri et al. (2020), które zostały określone dla odpowiednio, stosunkowo niskich naprężeń i wysokiej zawartości zanieczyszczeń, co mocno odbiega od warunków pozostałych cytowanych eksperymentów. Do dalszej analizy wybrano tylko zestaw parametrów pełzania dyslokacyjnego tj. BGRa, który został wyznaczony dla soli cechsztyńskich (z wysadu Asse w Niemczech).

Ryc. 2B przedstawia przebieg granicy reżimów dominacji pełzania dyfuzyjnego i dyslokacyjnego. Zależność tą przedstawiono dla różnych wartości temperatur tj. 10, 30 i 50°C, które są typowe dla płytkiej skorupy ziemskiej (głębokości do około 1500 m). Badania wskazują na niewielki wpływ

creep is a dominating deformation mechanism in salt grain of <10 mm (white square in Fig. 2). With increasing differential stress, dislocation creep starts to dominate for salt with smaller grain sizes. At differential stresses reaching 20 MPa, diffusion creep dominates only in the case of salts for which grain size have not exceeded 2 mm. The range of differential stresses in rock salt on perimeter of gas storage cavern depends on the level of gas fill and the cavern depth, which gives a range of several to few dozen MPas (e.g. Cała et al. 2018; Makhmutov et al. 2020; Cyran and Kowalski 2021; Habibi et al. 2021). The rock salt grain size between 1 and 20 mm is fairly typical for natural rock salt. These ranges define the yellow area in Fig. 2B The figure illustrates that the diffusion creep dominates under many realistic conditions.

zmian temperatury (rzędu kilku-kilkunastu procent) na tempa odkształceń. Ryc. 2B ilustruje również wpływ zmiany naprężenia lub uziarnienia na możliwą zmianę dominującego mechanizmu deformacji. Dla naprężeń równych 3 MPa, pełzanie dyfuzyjne jest dominującym mechanizmem deformacji dla ziaren soli <10 mm (biały kwadrat na Ryc. 2). Wraz z rosnącymi wartościami naprężeń różnicowych, pełzanie dyslokacyjne zaczyna dominować dla soli o coraz mniejszej wielkości ziarna. Dla naprężeń różnicowych sięgających 20 MPa, pełzanie dyfuzyjne dominuje jedynie w przypadku soli, dla których wielkość uziarnienia nie przekracza 2 mm. Zakres naprężeń różnicowych charakterystyczny dla kavern solnych w zależności od ich głębokości posadowienia oraz stopnia napełnienia waha się w granicach kilku do kilkudziesięciu MPa (np. Cała i in., 2018; Makhmutov i in., 2020; Cyran i Kowalski, 2021; Habibi i in., 2021), podczas gdy uziarnienia pomiędzy 1 a 20 mm powszechnie występują w naturalnej soli kamienniej. Zakres ten jest oznaczony żółtym obszarem na Ryc. 2B, wskazując na dominację pełzania dyfuzyjnego dla znacznej części realnie możliwych warunków.

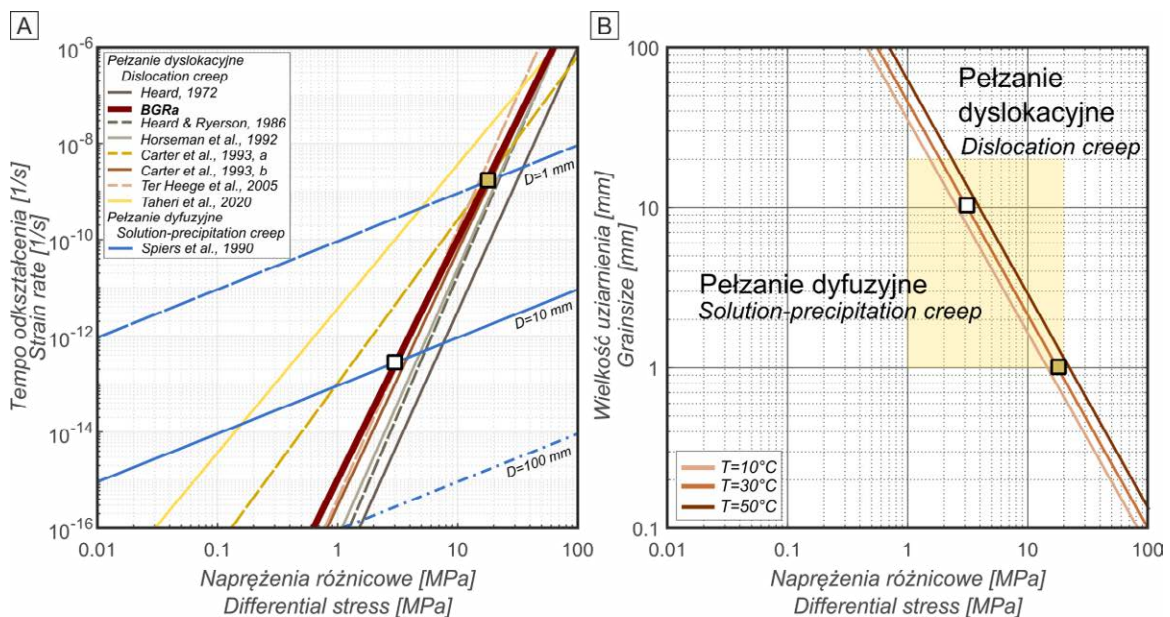
7. STAN NAPRĘŻEŃ

Dla soli kamiennych, zwłaszcza pokładowych, stan naprężeń w nienaruszonej skale zwykle przyjmuje się jako lito-

7. STRESS STATE

The stress state of pristine salt rock, especially bedded salt rock, is usually assumed to be lithostatic, unless the rock is subjected to directional tectonic stresses or the stresses resulting from differential loading by overburden (e.g. Dreyer 1982; Pudewills 1984, 2017; Wang 2003). Baumann et al. (2020) postulated that, even in the salt deposits that have not been subjected to such previous directional stresses, differential stresses may occur. Such stresses are, however, accumulated mainly around morphological steps existing in the basement, such as inactive faults, and do not exceed 0.4 MPa. Concerning stresses, Jarosiński (2009) stated, on the basis of his measurements of deformation rates in the cratonic substrates on the Łeba Elevation, that tectonic differential stresses in the salt should not exceed 1 MPa.

Assuming a non-essential role of tectonic stresses, the difference between the lithostatic pressure in the rock mass (overburden load) and the pressure of the gaseous medium stored in the underground cavern constitutes a first-order approximation of the differential stress value in the cavern walls. For the operation of the cavern, minimum and maximum allowed gas pressures are assumed. Caglayan et al. (2020) for example, specified these values as 24% and 80% of the overburden load, respectively. Gas pressure is evenly distributed



Ryc. 3. A – Zależność między naprężeniem i odkształceniem dla różnych zestawów parametrów pełzania dyslokacyjnego i dyfuzyjnego dla $T=30^{\circ}\text{C}$ i różnych rozmiarów uziarnienia; B – Granica pomiędzy dominacją reżimu pełzania dyslokacyjnego i dyfuzyjnego na wykresie zależności wielkości naprężenia różnicowego i uziarnienia dla zestawu parametrów pełzania dyslokacyjnego BGRa (Hunsche, 1994) i pełzania dyfuzyjnego (Spiers et al., 1990) dla zestawu trzech różnych temperatur ($T = 10, 30$ i 50°C). Żółtym polem oznaczono zakres warunków charakterystycznych dla kavern magazynowych.

Fig. 3. A – Stress-strain rate dependence for different dislocation creep parameter sets and pressure solution creep parameters set for $T=30^{\circ}\text{C}$ and different grainsizes; B – Dislocation creep to solution-precipitation creep transition lines in the stress and grainsize space. BGRa dislocation creep parameter set was used (Hunsche, 1994), while pressure solution creep parameters were set according to Spiers et al. (1990). Range of values typical for gas storage cavern are highlighted in yellow.

statyczny, o ile nie podlegają one kierunkowym naprężeniom tektonicznym bądź naprężeniom wynikającym z nierównomiernego obciążenia nadkładem (np. Dreyer, 1982; Pudewills, 1984, 2017; Wang, 2003). Baumann i in., (2020) postulują, że nawet w pokładach soli, nie podlegających wcześniej wymienionym kierunkowym naprężeniom, mogą występować naprężenia różnicowe. Naprężenia te są jednak zakumulowane głównie w otoczeniu progów morfologicznych w podłożu, takich jak nieaktywne uskoki, i nie przekraczają 0,4 MPa. Jeżeli chodzi o naprężenia kierunkowe, Jarosiński (2009) podaje na podstawie pomiarów tempa odkształceń w podłożu kratonicznym na obszarze wyniesienia Łeby, że tektoniczne naprężenia różnicowe w soli nie powinny przekraczać 1 MPa.

Przy założeniu braku istotnej roli naprężeń tektonicznych, za aproksymację pierwszego rzędu wartości naprężeń różnicowych na obwodzie kawerny do magazynowania substancji w stanie gazowym można uznać różnicę pomiędzy ciśnieniem w skale (ciśnieniem nadkładu) a ciśnieniem gazowego medium w kawernie. W kawernach magazynowych przyjmuje się zwykle minimalne i maksymalne ciśnienia gazu dopuszczalne podczas okresu działania kawerny. Caglayan et al. (2020) na przykład, podają wartości odpowiednio 24% i 80% ciśnienia nadkładu. Ciśnienie gazu jest równomiernie rozłożone w kawernie, podczas gdy ciśnienie nadkładu zwiększa się z głębokością i jest liczone jako

$$P_i = \sigma_{vi} = \int_0^{z_i} \rho g z dz \quad (4)$$

gdzie P_i , σ_{vi} to równoznaczne sobie ciśnienie nadkładu i wartość naprężenia pionowego na głębokości z_i , ρ to gęstość nadkładu na głębokości z , g to przyspieszenie grawitacyjne, a z to głębokość pod powierzchnią terenu. Rozkład gęstości nadkładu możliwy do pozyskania z otworowych danych geofizycznych (np. gamma-gamma) lub oszacowania z danych o litologii oraz krzywych kompaktacji. Zgodnie z powyższym modelem, najmniejsze naprężenia różnicowe występują przy stopie kawerny, a największe przy jej dnie.

8. TEMPA DEFORMACJI DLA SOLI KAMIENNYCH

Tempa deformacji dla 6 otworów z wyniesienia Łeby obliczono według modelu bilinearnego (Równanie (3)). Pełzanie dyslokacyjne opisano z użyciem prawa BGRa, gdzie $A = 2,8 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻ⁿ/s, $Q_{DC} = 54$ kJ/mol, $n = 5$. Pełzanie dyfuzyjne opisano z kolei prawem opisanym przez Spiersa et al. (1990), to jest $B = 3,7^{-4}$ K/mm³, $Q_{PS} = 24,5$ kJ/mol, $m = 3$. Dla każdego odcinka zdyskretyzowanego profilu (podobnie jak opisano profile litologiczne w rozdziale 3) obliczono naprężenie różnicowe (σ_d), które określone zostało jako różnica pomiędzy ciśnieniem nadkładu a ciśnieniem wewnętrznym w kawernie dla odpowiednio stanu maksymalnego i minimalnego składowania. Przyjęto, że ciśnienie minimalne i mak-

within a cavern, while overburden load increases with depth and is calculated as follows:

$$P_i = \sigma_{vi} = \int_0^{z_i} \rho g z dz \quad (4)$$

where P_i , σ_{vi} are equivalent overburden loads and vertical stress value at the depth of z_i , respectively, ρ overburden density as the depth of z , g gravitational acceleration, and z is the depth under the land surface. The overburden density distribution can be obtained either from the geophysical data of a borehole (e.g. gamma-gamma) or by estimation of the lithological data and compaction curves. According the above model, the lowest differential stresses occur at the cavern's ceiling and the highest ones at the cavern's floor.

8. DEFORMATION RATES IN ROCK SALT

The rates of deformation were calculated for six boreholes of the Łeba Elevation, in accordance with the bilinear model (Equation (3)). Dislocation creep was described by the BGRa law, where $A = 2,8 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻ⁿ/s, $Q_{DC} = 54$ kJ/mol, and $n = 5$. Diffusion creep was described by the law quoted by Spiers et al. (1990), i.e. $B = 3,7^{-4}$ K/mm³, $Q_{PS} = 24,5$ kJ/mol, and $m = 3$. Similarly to the description of the lithological profile of Section 3 above, for each section of discretised profile, the following were calculated: differential stress (σ_d) that was determined as the difference between the overburden load and internal pressures in the cavern, at the maximum and minimum states of gas filling, respectively. It was assumed that the minimum and maximum pressures constituted 20 and 80%, respectively of the overburden load in the cavern's ceiling situated under the top safety shelf of salt, with the thickness of 37.5 m (Caglayan et al. 2020). The said thickness should constitute 75% of the cavern's diameter, and it was assumed to be 50 m for the needs of further analyses. Overburden load was calculated on the basis of information concerning overlying rock lithology, depth, and rock porosity resulting from compaction curves (after Kim et al. 2018). For each borehole profile section, temperature was determined, in accordance with the geothermal gradient specified for borehole Lębork IG-1 (Majorowicz 1971), i.e. 2.2°C/100 m. The data concerning average grain size, described in Section 4 were used for our analyses.

The results of the analyses of the variance of the deformation rate, along the profiles of six boreholes, are presented in Fig. 4. Red colour marks those fragments of the profile where dislocation creep is a dominating mechanism during the rock salt deformation, while black colour marks the domination of diffusion creep. In the case of the minimum state of pressure in the cavern, or the state of highest differential stress, deformation rates are marked with a dashed line on the graph. For the maximum state of pressure in the cavern, associated with

symalne stanowi odpowiednio 20 i 80% ciśnienia nadkładu w stropie kawerny, która znajduje się pod półką stropową soli o miąższości 37,5 m (zgodnie z Caglayan et al., 2020) miąższość ta powinna stanowić 75% średnicy kawerny, którą na potrzeby dalszej analizy przyjęto 50 m). Ciśnienie nadkładu obliczone zostało na podstawie informacji dotyczącej litologii skał nadległych, głębokości oraz porowatości wynikającej z krzywych kompaktacji (krzywe za: Kim i in., 2018). Temperaturę dla każdego odcinka profilu otworu wyznaczono zgodnie z gradientem geotermicznym określonym dla otworu Lębork IG-1 (Majorowicz, 1971) tj. 2,2 °C/100 m. Do analizy wykorzystano dane dotyczące średniego uziarnienia opisane w rozdziale 4.

Wyniki analiz zmienności tempa odkształcenia wzdłuż profilu 6 otworów przedstawiono na Ryc. 4. Kolorem czerwonym zaznaczono fragmenty w profilu, w których dominującym mechanizmem deformacji soli jest pełzanie dyslokacyjne, natomiast kolorem czarnym zaznaczono dominację pełzania dyfuzyjnego. Dla stanu minimalnego ciśnienia w kawernie, a więc stanem skutkującym największą wartością naprężeń różnicowych tempa odkształceń oznaczono linią przerywaną, natomiast dla stanu maksymalnego ciśnienia w kawernie, związanego z minimalną wartością naprężeń różnicowych tempa te oznaczono linią ciągłą. W profilach otworów Łeba IG-1, Radoszewo IG-1 i Lębork IG-1 dla największych naprężeń różnicowych dominuje w pełni pełzanie dyslokacyjne, którego tempo zwiększa się wraz z głębokością, osiągając maksymalną wartość (około 10^{-9} s⁻¹) w dolnej części profilu soli kamiennej w otworze Lębork IG-1. W otworze Opalino IG-1 znajduje się kilka niewielkich stref, gdzie dominuje pełzanie dyfuzyjne, które zwiększa tylko nieznacznie tempo odkształceń w stosunku do oczekiwanego na podstawie pełzania dyslokacyjnego. W otworze Chłapowo IG-1 również pojawiają się tego typu strefy, tutaj jednak mogą one silnie podnieść tempo deformacji – o nawet 2 rzędy wielkości. W otworze Czarny Młyn IG-1 natomiast zdecydowanie dominuje pełzanie dyfuzyjne, z pełzaniem dyslokacyjnym uzyskującym dominację tylko na krótkich odcinkach. Zwiększa ono tempo odkształcenia o 2 rzędy wielkości w stosunku do spodziewanego pełzania dyslokacyjnego.

Dla minimalnego ciśnienia w kawernie, w otworze Łeba IG-1 (najpłytszym, a więc charakteryzującym się najmniejszymi wartościami naprężeń różnicowych) pełzanie dyfuzyjne dominuje dla większości długości profilu. Jedynie lokalnie występują strefy pełzania dyslokacyjnego, a ogólnie wartości tempa odkształceń są niskie i nie przekraczają 10^{-11} s⁻¹. Bardzo zmienne tempa deformacji w górnej części profilu między 10^{-14} a 10^{-11} s⁻¹ odwzorowują dużą zmienność w uziarnieniu. Podobnie wygląda sytuacja w najgłębszym otworze, Lębork IG-1. W otworze Radoszewo IG-1 dominuje pełzanie dyfuzyjne i prowadzi do nieco szybszego pełzania rzędu $5 \cdot 10^{-11}$ s⁻¹. Sytuacja wygląda podob-

the minimum value of the differential stress, deformation rates are marked with a continuous line.

In the profiles of boreholes Łeba IG-1, Radoszewo IG-1, and Lębork IG-1, dislocation creep dominates in the entire rock salt profile in the high-differential stress variant. The rate of deformation increases with depth, reaching its maximum value (ca. 10^{-9} s⁻¹) in the lowest part of the rock-salt profile in borehole Lębork IG-1.

In borehole Opalino IG-1 there are only several small zones where diffusion creep dominates, but the increase of rate of deformation above the levels expected from the dislocation creep is only marginal. In borehole Chłapowo IG-1, small zones of diffusion creep dominance appear as well; however, in that case, these zones increase the deformation rate strongly, even by up to two orders of magnitude. In borehole Czarny Młyn IG-1, diffusion creep definitely dominates along almost the entire rock salt profile, with dislocation creep operating only at short sections. That creep increases the deformation rate by up to two orders of magnitude, in respect to dislocation creep.

In the case of a maximum pressure in the cavern, for the borehole Łeba IG-1 (shallowest, hence with lowest differential-stress values), diffusion creep dominates in the major portion of the profile length. Only locally, dislocation creep zones appear, while, generally, the deformation rate values are low and do not exceed 10^{-11} s⁻¹. Highly variable deformation rates in the upper section of the profile, between 10^{-14} and 10^{-11} s⁻¹, reflect the high variability in the grain size.

The situation is similar in the deepest borehole, Lębork IG-1. In borehole Radoszewo IG-1, diffusion creep dominates and it leads to a bit faster creep over what would be expected from dislocation creep, of the order of $5 \cdot 10^{-11}$ s⁻¹. This is similar to borehole Opalino IG-1; here, however, diffusion creep can locally reach even higher rates of up to ca. 10^{-9} s⁻¹, or the rates similar to those of dislocation creep at the minimum cavern fill.

In borehole Chłapowo IG-2, dislocation-creep zones appear locally, although diffusion creep dominates generally. The majority of the borehole creep is much slower than that when cavern filling is at minimum, although creep can locally reach even up to $3 \cdot 10^{-9}$ s⁻¹.

In borehole Czarny Młyn diffusion creep dominates completely, reaching high rates of up to $5 \cdot 10^{-9}$ s⁻¹ in a considerable part of the borehole profile.

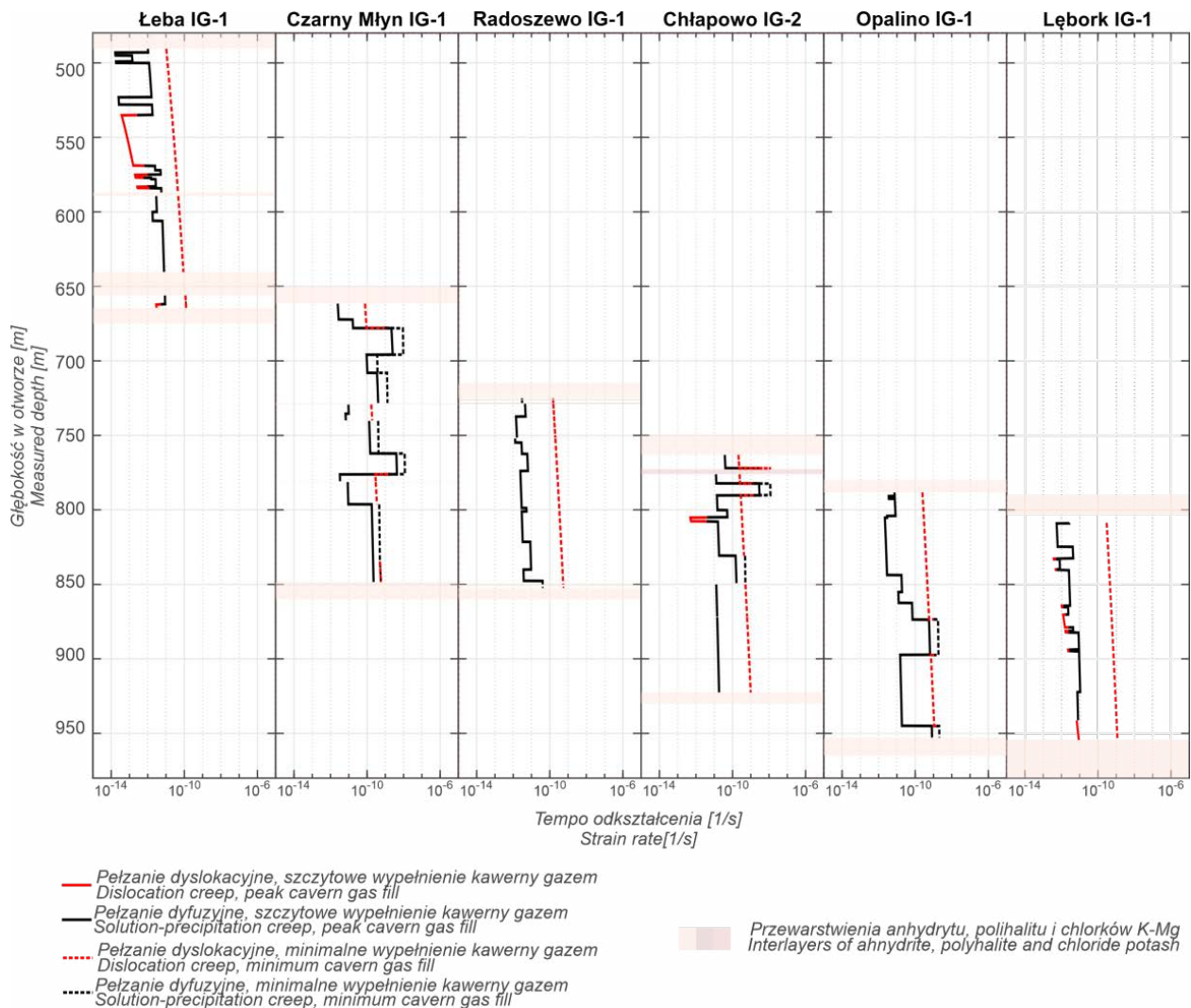
It is worth emphasising that, at both minimum and maximum cavern filling, maximum deformation rates are not always the highest in the lowest sections of the profile. That is especially well visible in boreholes Czarny Młyn IG-1 and Chłapowo IG-2, where fine-grain rock-salt interlayering, occurring in the central and/or upper sections of the profile, can locally increase deformation rates by several orders of magnitude.

nie w otworze Opalino IG-1, jednak tu pełzanie dyfuzyjne może lokalnie osiągać jeszcze wyższe tempo, do około 10^{-9} s^{-1} , czyli zbliżone do pełzania dyslokacyjnego przy minimalnym wypełnieniu. W otworze Chłapowo IG-2 lokalnie pojawiają się strefy pełzania dyslokacyjnego, ale ogólnie dominuje pełzanie dyfuzyjne. Dla większości otworu jest ono wyraźnie wolniejsze od pełzania przy wypełnieniu minimalnym, lokalnie potrafi jednak osiągnąć wartości nawet do $3 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}$. W otworze Czarny Młyn dominuje całkowicie pełzanie dyfuzyjne osiągając znaczne tempo do $5 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ w dużej części profilu otworu.

Warto podkreślić, że zarówno dla minimalnego jak i maksymalnego wypełnienia kawerny, maksymalne tempo deformacji nie zawsze są najwyższe w dolnej części profilu. Szczególne widoczne jest to w otworach Czarny Młyn IG-1 oraz Chłapowo IG-2, gdzie drobnoziarniste przewarstwienia soli kamiennych występujące w środkowej i/lub górnej części profilu lokalnie zwiększają tempo deformacji o kilka rzędów wielkości.

We calculated possible initial cavern convergence rates for the previously calculated deformation rates (Fig. 5), using the assumed cavern diameter of 50 m. We should note that since the deformation rate means a proportional (%) change of the dimension in a unit of time, the cavern's convergence rate will be decreasing together with cavern's dimensions. Our results are presented here for both minimum and maximum cavern fill. We also marked (with the vertical orange dashed line) the convergence rate level of 1 m a year, a value that can be recognised as admissible (Bérest and Brouard 2003).

In the case of the whole profile of borehole Łeba IG-1, the convergence rates are situated much below the admissible convergence rate, at the minimum and maximum states of cavern fill, with a safety buffer of one order of magnitude. In the cases of boreholes Lębork IG-1, Chłapowo IG-2, and Radoszewo IG-1, the safe value is only slightly exceeded at the minimum state of cavern fill, however, it is offset by the value remaining significantly below the admissible value at the maximum cavern fill. In the case of borehole Opalino



Ryc. 4. Przewidywane tempo odkształceń w profilach analizowanych otworów dla różnych stanów naprężeń w zależności od uziarnienia.

Fig. 4. Predicted rates of deformation in the analysed wells for different stress states and grain sizes.

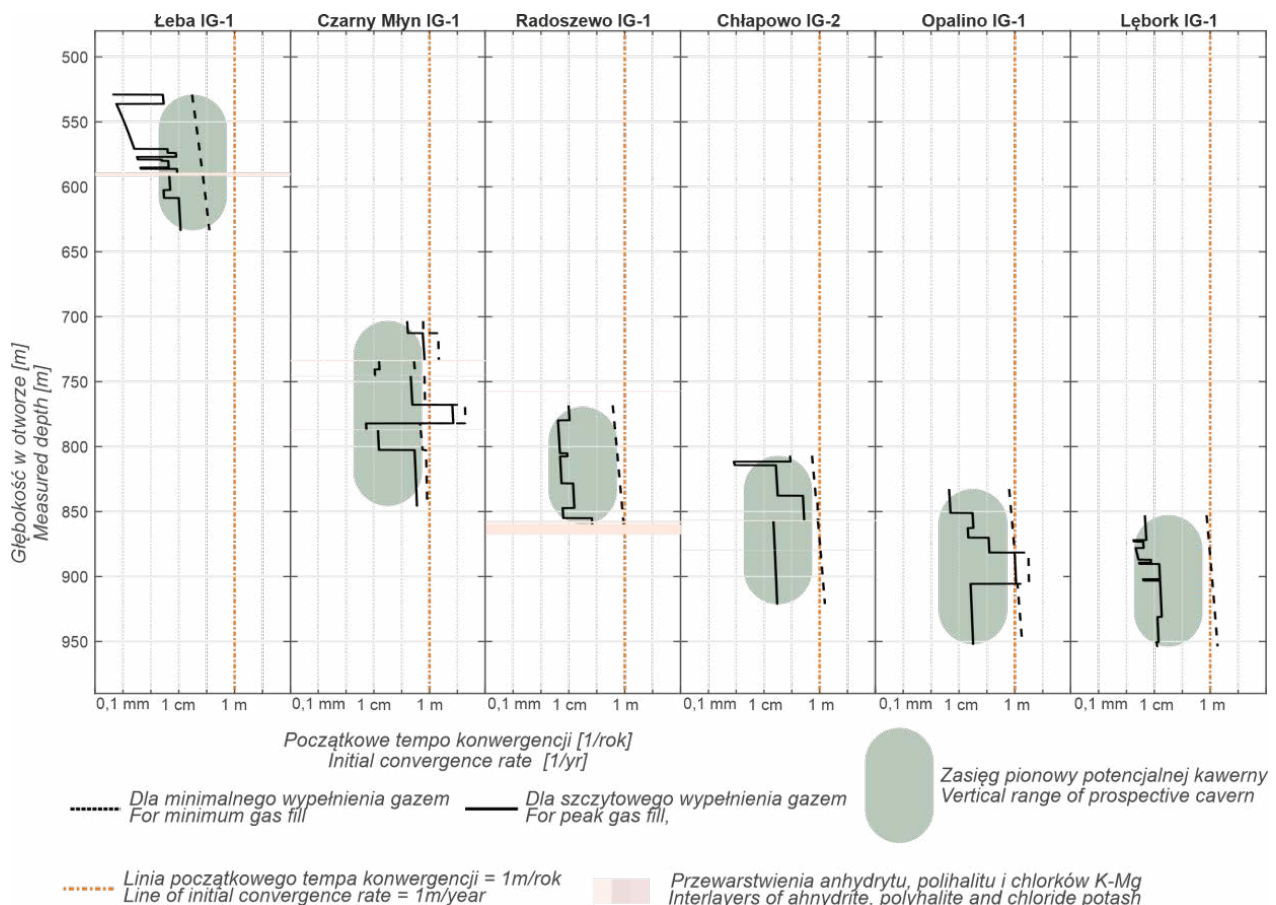
Dla obliczonych temp odkształceń wyliczone zostały możliwe początkowe tempo konwergencji kawerny (Ryc. 5) dla przykładowej średnicy kawerny równej 50 m. Należy zauważyć, że jako że tempo odkształcenia oznacza procentową zmianę wymiaru w jednostce czasu, wraz ze zmniejszaniem się wymiarów kawerny tempo konwergencji będzie maleć. Wyniki przedstawione zostały zarówno dla stanu minimalnego jak i maksymalnego wypełnienia. Zaznaczony jest również poziom tempa konwergencji 1 m rocznie, które można uznać za dopuszczalne (Bérest i Brouard, 2003) (pionowa pomarańczowa przerywana linia). Dla otworu Łeba IG-1 tempa konwergencji w całym profilu otworu mieszczą się znacznie poniżej granicznego tempa konwergencji dla minimalnego i maksymalnego stanu wypełnienia kawerny, z zapasem bezpieczeństwa jednego rzędu wielkości. W otworach Lębork IG-1, Chłapowo IG-2 i Radoszewo IG-1 wartość ta jest bardzo nieznacznie przekroczona dla stanu minimalnego napełnienia kawerny, podczas gdy w stanie maksymalnego wypełnienia mieści się w zakresie bezpieczeństwa. W otworze Opalino IG-1 tempo konwergencji lokalnie może dochodzić do 3 m na rok w stanie minimalnego wypełnienia, i nieznacznie przekraczać 1 m na rok w stanie maksymalnego wypełnienia. Sytuacja w otworze Czarny Młyn IG-1 różni się wyraźnie od pozostałych otworów,

IG-1, convergence rates can locally reach up to 3 m a year at the minimum state of cavern filling and slightly exceed 1 m a year at the maximum cavern fill.

The situation in borehole Czarny Młyn IG-1 is clearly different from that of the remaining boreholes. In addition to the zone of increased convergence in that borehole, similar to that of borehole Opalino IG-1, there is also a zone where convergence rates can reach almost 10 m a year for maximum cavern fill, or 30 m a year for minimum fill.

The above results were obtained with an assumption that the rock salt is either even-grained or uneven-grained in unstructured manner. For our experiments, we used the average grain size value; however, according to literature the median value is the most suitable a measure (Ter Heege et al. 2005b). However, since no data about median grain size were available in the analysed borehole logs, we applied the average value instead, which can constitute a certain approximation of the median.

Example photographs of the core fragments originating from borehole Chłapowo IG-2 (Fig. 6B) indicated, however, that we were locally dealing with packets of fine- and coarse-grain salt, characterised by high variability of grain size over short profile sections. In such cases, fine-grain interbeds can



Ryc. 5. Początkowe tempo konwergencji kawerny w profilach analizowanych otworów dla skrajnych stanów naprężeń i uziarnienia minimalnego.

Fig. 5. Initial cavern convergence rates in the analysed wells for different stress states and minimum grain sizes.

dla którego oprócz strefy podwyższonego tempa konwergencji podobnej do tej opisaney dla otworu Opalino IG-1, występuje tu też strefa, gdzie tempa konwergencji mogą osiągnąć wartości niemal 10 m na rok w stanie maksymalnego wypełnienia, a dla minimalnego do 30 m na rok.

Powyższe wyniki osiągnięto przy założeniu, że sól w profilu jest albo równoziarnista, albo różnoziarnista w sposób nieustrukturyzowany. W tym, podejściu użyto średniej wartości rozmiaru ziarna w interwale jako miary uziarnienia. Należy jednak zaznaczyć że wg literatury (Ter Heege i in., 2005b) najwłaściwszą wartością dla tego typu obliczeń jest mediana. Ponieważ nie dysponowaliśmy jednak informacjami o medianie dla analizowanych otworów, do badania wykorzystaliśmy wartość średnią, która może stanowić pewne przybliżenie mediany.

Przykładowe zdjęcia fragmentu rdzenia z otworu Chłapowo (Ryc. 6B) wskazują jednak, że lokalnie mamy do czynienia z pakietami warstw soli drobno- i gruboziarnistej, które charakteryzują się dużą zmiennością na niewielkich odcinkach profilu. W takim przypadku przewarstwienia soli drobnoziarnistych mogą być potencjalnie płaszczyznami odspojenia i zagrażać stabilności kawerny. W celu zbadania wpływu drobnych pakietów soli drobnoziarnistej szczegółowej analizie poddany został otwór Chłapowo IG-2. W celu analizy zmieniono w metodyce używanej w powyższych zestawieniach dwie rzeczy. Po pierwsze, zastąpiono średnią wielkość ziarna wielkością minimalną na podstawie profilu z Ryc. 2. Po drugie, w tle wykresów narysowane zostały obszary, w których wyróżniono sole równoziarniste, o uziarnieniu zróżnicowanym warstwami, uziarnieniu zróżnicowanym strefami, oraz sole różnoziarniste w sposób nieustrukturyzowany. Początkowe tempo konwergencji dla maksymalnego i minimalnego wypełnienia przedstawiono na Ryc. 6A. Trzecim wykresem jest wykres maksymalnego tempa konwergencji dla uziarnienia średniego.

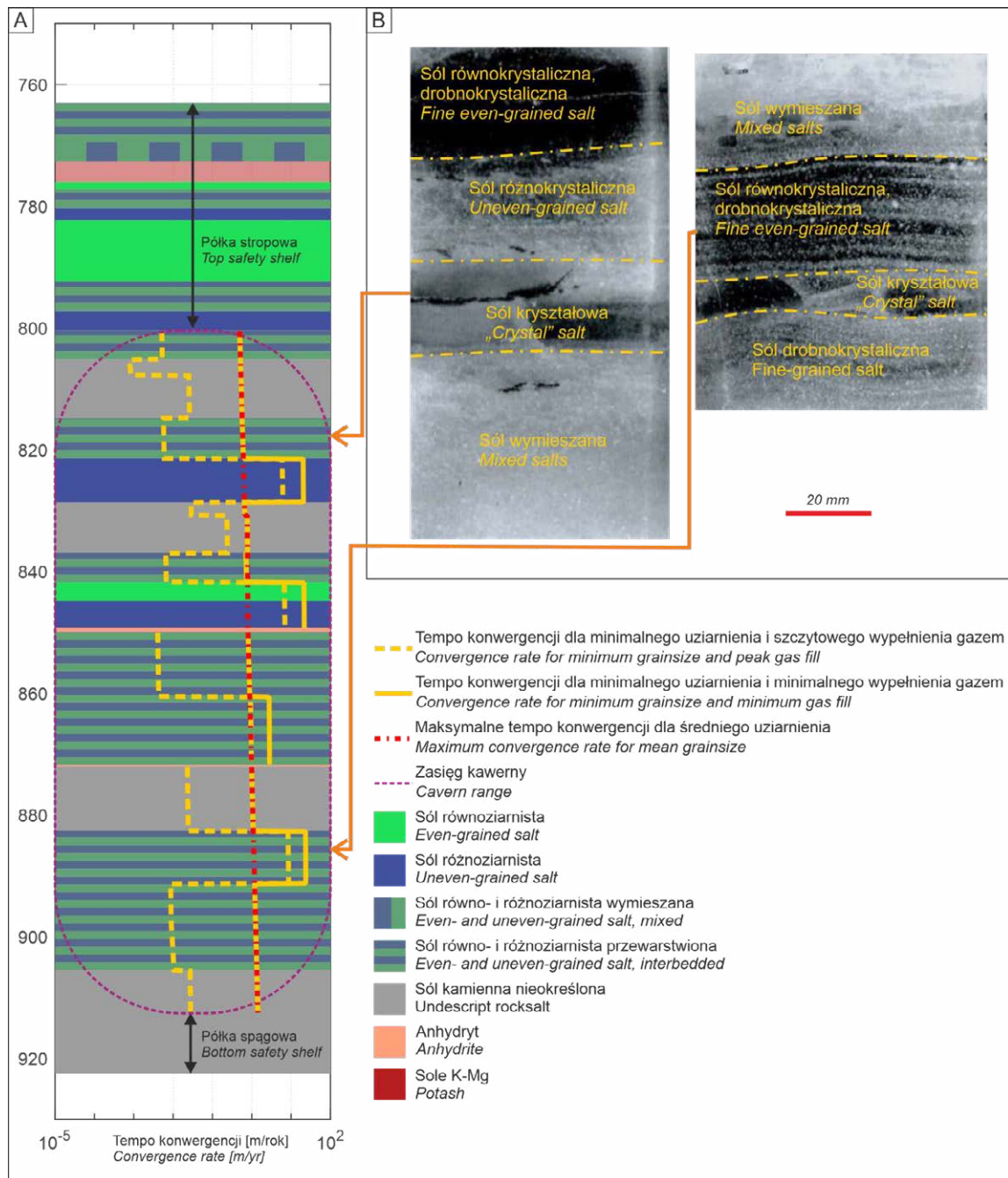
Dla średniego uziarnienia maksymalne osiągalne wartości tempa odkształceń są związane z pełzaniem dyslokacyjnym w warunkach minimalnego napełnienia kawerny. Jednak po użyciu uziarnienia minimalnego w czterech osobnych strefach wartości pełzania wzrastają o nawet ~2 rzędy wielkości w wyniku aktywacji pełzania dyfuzyjnego. W trzech z nich wartość tempa konwergencji w stanie maksymalnego wypełnienia gazem przewyższa o rząd wielkości maksymalne wartości tempa konwergencji dla uziarnienia średniego. W solach takich możemy mieć do czynienia z interwałami soli złożonych z cienkich warstewek, w obrębie których sól jest równoziarnista, ale z wielkością uziarnienia znacznie różniącą się pomiędzy poszczególnymi warstewkami. O ile dwie z tych stref podwyższonego tempa konwergencji znajdują się w mięszszych strefach soli równoziarnistych, gdzie minimalna wartość uziarnienia ma mniejsze znaczenie, to pozostałe dwie strefy znajdują się jednak w solach określonych jako przewarstwione. Wówczas dla tej części przedziału, która od-

potentially become the planes of bed sliding that presents hazard to cavern stability. To examine the influence of small fine-grain salt packets, detailed analysis was applied to borehole Chłapowo IG-2. In that analysis, two changes were applied to methodology. Firstly, the average grain size was replaced by the minimum value on the basis of the profile shown in Fig. 2. Secondly, colour patterns were plotted in the background of the chart, marking the type rock salt variability in the interval: homogeneously even-grained, variable-grained by layer, variable-grained by zone, and unstructured uneven-grained. Initial convergence rates for maximum and minimum fill are presented in Fig. 6A. The third graph presents the maximum convergence rates at average grain size values.

In the case of average grain size, the maximum deformation rate values obtained were associated with dislocation creep, in the conditions of minimum cavern fill. However, once minimum grain size was applied, in four separate zones, the creep values increased even by ~2 orders of magnitude, as a result of diffusion creep activation. In three zones, the convergence rate values, at maximum gas fill, exceeded the maximum convergence rate values predicted using average grain size values by one order of magnitude. In such intervals salt is composed of thin layers of salt that is evenly-grained within the layer, but with high contrast of grain size between the layers. Two of the zones of increased convergence rates were located in the thicker evenly-grained zones, where minimum grain-size values are of a lesser importance; however, the remaining two zones were rather situated in interbedded salt intervals. In those cases, within the fine-grain layers, it seems that it was convergence rate marked for the minimum grain size that would be the most credible for reflecting the actual course of the process.

9. DISCUSSION

In the literature on the subject, viscous properties of rock salt are described by two main deformation mechanisms: dislocation creep and diffusion creep that dominate at high and low differential stresses, respectively. Diffusion creep is, however, usually omitted when examining salt cavern stability. This is associated with the assumption that cavern operation generally causes high differential stresses, ensuring the domination of dislocation creep. However, at relatively low differential stresses within the cavern, diffusion creep can dominate in fine-grain salt beds (Fig. 3B). Numerical modes of salt-cavern behaviour that take diffusion creep into account are rather scarce in literature (e.g. Fokker and Breunese 2022; Kumar and Hajibeygi 2022). In addition, despite taking diffusion creep into account, such works do not perform detailed analysis of its influence of the process on deformation. At the same time, a number of studies appeared, with analyses of deformation in salts, e.g. around boreholes or land subsidence



Ryc. 6. A – Początkowe tempo konwergencji kawerny dla otworu Chłapowo IG-2, dla minimalnych uziarnień, na tle zmienności struktury soli kamiennej za Czapowski, 1998. B – przykłady struktur z rdzeni z otworu Chłapowo IG-2 z widoczną zmiennością soli (Czapowski, 1998).

Fig. 6. A – Initial cavern convergence rate for Chłapowo IG-2 borehole, for minimum grainsizes, with the structural differentiation of rock salt in the background, after Czapowski, 1998. B – examples of structures in the cores from Chłapowo IG-2 borehole with the variability of salt visible (Czapowski, 1998).

powiada przewarstwieniom drobnociarnistym, wydaje się, że to właśnie tempo konwergencji oznaczone dla minimalnego uziarnienia będzie najwiarygodniej oddawało rzeczywisty przebieg procesu.

9. DYSKUSJA

W literaturze własności lepkie soli kamiennej opisywane są przez dwa główne mechanizmy deformacji: pełzanie dys-

caused by the extraction of hydrocarbons, and those clearly indicate a significant role of diffusion creep in the deformation process (e.g. Marketos et al. 2016; Cornet et al. 2017, 2018).

In this paper, we employed the descriptions of six borehole profiles drilled on the Łeba Elevation area, presenting the variability within the oldest rock salt, including in particular the variability of grain size. The descriptions were used for the prediction of geomechanical behaviour of rock salt for the

lokacyjne i pełzanie dyfuzyjne, dominują dla odpowiednio wysokich i niskich naprężeń różnicowych. Pełzanie dyfuzyjne jest jednak z reguły pomijane przy badaniu stabilności kawern solnych. Związane jest to z założeniem, że działalność kawern wywołuje generalnie wysokie naprężenia różnicowe, co warunkuje dominację pełzania dyslokacyjnego. Przy stosunkowo niskich naprężeniach różnicowych w obrębie kawerny może jednak dojść do dominacji pełzania dyfuzyjnego w warstwach soli drobnoziarnistej (Ryc. 3B). Numeryczne modele zachowania się kawern solnych uwzględniające pełzanie dyfuzyjne są jednak nadal bardzo nieliczne w literaturze (np. Fokker i Breunese, 2022; Kumar i Hajibeygi, 2022). Dodatkowo, prace te mimo uwzględnienia mechanizmu pełzania dyfuzyjnego, nie analizują szczegółowo jego wpływu na deformację. Jednocześnie pojawiło się wiele prac analizujących deformację w solach, np. w otoczeniu otworów wiertniczych lub przy subsyduencji wywołanej eksploatacją węglowodorów, które wyraźnie wskazują na znaczącą rolę pełzania dyfuzyjnego w procesie deformacji (np. Marketos i in., 2016; Cornet i in., 2017, 2018).

W artykule wykorzystano opisy 6 profili otworów z obszaru Wyniesienia Łeby, przedstawiające zmienność w obrębie pokładu najstarszej soli kamiennnej, w szczególności zmienność wielkości kryształów soli. Opisy te wykorzystano do prognozy zachowania się górotworu w przypadku budowy kawern solnych na tym obszarze. Warto zaznaczyć, że dobór otworów miał na celu pokazanie zmienności w obrębie badanego obszaru a nie analizę najbardziej potencjalnych lokalizacji podziemnych magazynów. Prezentowane badania oparte zostały na analizie jednowymiarowych modeli mechanicznych, gdzie własności mechaniczne soli opisane zostały przez pełzanie dyslokacyjne i dyfuzyjne. W modelu dla przyjętych wartości naprężeń różnicowych (bezpośrednio związanych z możliwym zakresem ciśnienia wewnątrz kawerny dostosowanego do głębokości posadowienia kawerny) oraz wielkości uziarnienia w solach, określono tempo odkształcenia soli. Ryc. 4 i Ryc. 5 pokazują, iż w warstwach, gdzie występują sole drobnokrystalicznych i bardzo drobnokrystaliczne może lokalnie dojść do intensywnego pełzania dyfuzyjnego. Tempo deformacji jest tu większe o nawet dwa-trzy rzędy wielkości (w zależności od stanu wypełnienia i wielkości uziarnienia soli) w porównaniu do szacunków opartych wyłącznie na pełzaniu dyslokacyjnym (Ryc. 5, Ryc. 6A). Szybkie tempo deformacji mogą w efekcie przełożyć się na szybkie tempo konwergencji kawern. Jest to szczególnie wyraźne w stanie maksymalnego wypełnienia kawerny, gdzie ze względu na obniżone naprężenia różnicowe model oparty wyłącznie na pełzaniu dyslokacyjnym nie przewiduje znaczącej konwergencji, podczas gdy uwzględnienie pełzania dyfuzyjnego wskazuje miejscami na niebezpiecznie wysokie wartości. Warto pamiętać, że przedstawione wyniki tempa deformacji reprezentują tylko początkowe ich wartości. Wiele przykładów w literaturze opisuje początkowe szybkie zaciskanie się

salt caverns that could be located in that area. It's important to emphasize that the choice of boreholes for the analysis was driven by the goal of maximizing the diversity of their parameters. The study does not intend to identify optimal locations for the future underground storage facilities.

The studies presented here were based on the analysis of one-dimensional mechanical models, where the mechanical properties of salt had been described by the processes of dislocation and diffusion creep. In that model, the rate of deformation of rock salt was determined for the assumed differential stress values (directly associated with a possible range of pressures inside the cavern, adjusted in respect of the depth of the cavern), as well as the salt grain sizes.

Fig. 4 and Fig. 5 illustrate that intensive diffusion creep may occur locally in the salt beds containing fine-grained and very fine-grained salts. In such cases, the rate of deformation is higher even by two or three orders of magnitude (depending on the status of cavern filling and salt grain size), in comparison to the estimations based exclusively on dislocation creep (Fig. 5, Fig. 6A). Consequently, high rate of deformation may cause high cavern convergence rates. That was particularly evident at the maximum cavern fill, where, due to the reduced differential stresses, the model based exclusively on dislocation creep does not produce any considerable convergence, while admission of diffusion creep indicates dangerously high deformation values in some intervals.

It is worth mentioning that the deformation rate results discussed here represent only initial deformation values. Many examples described in literature illustrate fast initial cavern convergence which becomes stable at much lower level, with time (Bérest and Brouard 2003). Nevertheless, such areas may be associated with an increased hazard.

The results of our research have demonstrated that the coarse-grained salts are the best for obtaining stable caverns. The presence of fine-grained salts can locally significantly increase the rate of deformation and, consequently, the cavern convergence rate.

In the cases where the salt deposits contain highly diverse grain sizes in the profile, more complex mechanical numerical models should be employed to achieve a comprehensive assessment of cavern stability. Nevertheless, the models presented here indicate the necessity to apply the constitutive laws that couple the diffusion-creep and dislocation-creep mechanisms in the modelling process to avoid underestimation of the cavern convergence rates.

It is worth noting that the literature on the subject describes the cases of extremely fast convergence of underground storage facilities. The cavern situated within a salt dome in Eminence, Mississippi, USA, can be a good example here: it lost 40% of its volume within two years (Bérest and Brouard 2003). Various hypotheses appeared on the reasons of such accidents, e.g. those based on vertical distribution of tempera-

kawern, które z czasem stabilizuje się na znacznie niższym poziomie (Bérest i Brouard, 2003). Niemniej jednak obszary takie mogą być związane z podwyższonym ryzykiem.

Wyniki badań wskazują, że najkorzystniejsze pod względem stabilności kawern są sole grubokrystaliczne. Obecność soli drobnokrystalicznej może znacznie lokalnie zwiększyć tempo deformacji i tym samym tempo zaciskania się kawern. W przypadku pokładów, w których występuje znaczna zmienność wielkości uziarnienia w profilu do pełnej oceny stabilności całej kawerny powinny zostać wykorzystane bardziej złożone mechaniczne modele numeryczne. Niemniej jednak przedstawione modele wskazują na konieczność zastosowania praw konstytutywnych sprzęgających mechanizm pełzania dyfuzyjnego i dyslokacyjnego w modelowaniu, w celu uniknięcia niedoszacowań w obliczeniach tempa zaciskania się kawern. Warto zauważyć, że w literaturze znane są przypadki niezwykle szybkiego tempa zaciskania się kawern magazynowych. Przykładem może być kawerna w wydzie solnym Eminence, stan Missisipi w USA straciła 40% objętości w ciągu dwóch lat (Bérest i Brouard, 2003). Pojawiły się różne hipotezy na temat powodów tego wydarzenia, np. opartych na pionowych rozkładach temperatury i ciśnienia, nie zostało ono jednak jednoznacznie wyjaśnione. W świetle wyników analiz w tej pracy wydaje się, że nie należy wykluczać szybkiego pełzania dyfuzyjnego pełzania w obrębie drobnodziarnistej soli jako potencjalnego mechanizmu współodpowiedzialnego za takie zdarzenia.

Istotnym aspektem dla analizy stabilności kawern solnych jest właściwe określenie parametrów mechanicznych soli. Większość zestawów parametrów wyznaczana jest dla soli jednorodnych, zwykle równoziarnistych, m.in. te przedstawione w Tabeli 1. Niewiele jest jednak prac opisujących w kompleksowy sposób reologię soli różnoziarnistych. Kontrowersyjną kwestią jest również opis soli warstwowanej, która w zależności od charakteru warstw może cechować się znaczną anizotropią własności mechanicznych. Dodatkowo, wiele prac wskazuje, że wpływ na wartości parametrów materiałowych czynników, takich jak zawartość wody i domieszek mineralnych (np. anhydryt, ił), może być wysoka (Werner, 1978; Urai i in., 1986; Czapowski, 1998; Wilkosz i in., 2012; Adamuszek i in., 2021).

Istotną kwestią, której nasza praca nie porusza, jest dokładny rozkład naprężeń wokół kawerny. Nasza analiza używa przybliżenia pierwszego rzędu w formie różnicy pomiędzy ciśnieniem nadkładu a ciśnieniem gazu w kawernie. W rzeczywistości rozkład naprężeń wokół wyrobiska stanowi złożony problem, na który składa się wiele czynników m.in. kształt kawerny (np. Cyran and Kowalski, 2021; Liu et al., 2020) oraz potencjalnie znaczące regionalne naprężenia tektoniczne. W przypadku występowania naprężeń tektonicznych naprężenia różnicowe w soli mogą osiągać wyższe wartości i mieć znaczący wpływ na stateczność otworów, kawern

ture and pressure; however, the issue has not been completely clarified. In light of the results of the analyses described in our study, it seems that fast diffusion creep induced by low grain size of salt can be another possible mechanism responsible for the negative effects described above.

Proper determination of the mechanical salt parameters is an essential aspect of the salt cavern stability analysis. Usually, the sets of parameters are determined for uniform salts, being evenly grained, e.g., those presented in Table 1 above. Few studies describe comprehensively the rheology of diversely- unevenly-grained salts. Another controversy concerns the descriptions of bedded salt deposits, which, depending on the nature of seams, can be characterised by a considerable anisotropy of mechanical properties. Additionally, a number of studies indicated that material parameter values can be affected by such factors as high water and mineral admixture (e.g. anhydrite, or silt) contents (Werner 1978; Urai et al. 1986; Czapowski 1998; Wilkosz et al. 2012; Adamuszek et al. 2021).

An important issue that our work does not address is the detailed distribution of stresses around the cavern.. Our analysis uses a first-order approximation by assuming that differential stress is equal to the difference between overburden loading and gas pressure within the cavern.. In fact, the distribution of stresses around an underground working constitutes a complex issue affected by a number of additional factors, e.g. the shape of the cavern (e.g. Cyran and Kowalski 2021; Liu et al. 2020), as well as potentially considerable regional tectonic stresses. When tectonic stresses occur, the differential stresses of the salt deposit may reach high values and affect considerably the stability of boreholes, caverns, and other types of underground facilities (Cornet et al. 2017, 2018). In the case of the Łeba Elevation, Jarosiński (2009) mentioned that such stresses are relatively low (up to 1 MPa). Consequently, the assumption of the originally lithostatic state should not cause any significant underestimation of the cavern rate of deformation. However, it may not be directly applied to other regions, where regional tectonics may play much more important role. When we relate the results presented here to the preliminary evaluation of the possibility of constructing underground storage facilities on the Łeba Elevation, and if we consider exclusively the average grain size of salt, the majority of the boreholes considered here is characterised by adequate stability in the context of convergence rate. However, the influence of fine-crystalline salt interbedding should be further verified, using numerical simulations. Secondly, there exist many other factors, besides the convergence rate, both geomechanical and e.g. technical, economic, or environmental, that can affect the cavern construction and operation, and should be taken into account.

i innych wyrobisk (Cornet i in., 2017, 2018). W przypadku wyniesienia Łeby, jak wskazuje Jarosiński (2009) naprężenia te są jednak stosunkowo niewielkie (do 1 MPa). Założenie więc stanu pierwotnie litostatycznego nie powinno więc spowodować w tym wypadku znaczącego niedoszacowania tempa deformacji. Jednakże z tego względu wnioski z tej analizy nie mogą zostać bezpośrednio użyte dla innych obszarów, gdzie rola regionalnej tektoniki może być znacznie wyższa.

Odnosząc przedstawione wyniki do oceny możliwości budowy kawern magazynowych do obszaru wyniesienia Łeby, wstępnie, jeżeli brać pod uwagę wyłącznie uziarnienia średnie, większość analizowanych otworów charakteryzuje się wystarczającą stabilnością pod kątem tempa konwergencji. Jednakże, wpływ przewarstwień soli drobnoziarnistych powinna zostać zweryfikowana za pomocą symulacji numerycznych. Po drugie, poza tempem konwergencji istnieje wiele innych czynników zarówno geomechanicznych, jak i innych np. technicznych, ekonomicznych, środowiskowych, które mają wpływ na budowę i eksploatację kawerny i powinny być wzięte pod uwagę.

10. WNIOSKI

Na podstawie analiz tempa pełzania soli w wybranych otworach na wyniesieniu Łeby wskazano, iż w 4 przypadkach z 6 występujące w nich warunki geomechaniczne mogą pozwalać na budowę stabilnych kawern magazynowych. Wyjątkami są otwory Czarny Młyn IG-1 i Opalino IG-1, gdzie intensywne pełzanie dyfuzyjne związane z uziarnieniem może osiągnąć niebezpieczne tempa odkształceń, przy czym w otworze Opalino IG-1 przekroczenia są na granicy dopuszczalności. W takim wypadku o racjonalność konstrukcji kawerny w tym miejscu mogą zdecydować inne czynniki, np. ekonomiczne. W każdym wypadku jednak wymagane są jednak bardziej zaawansowane analizy, w tym modelowanie numeryczne, by wykluczyć potencjalne problemy związane z szybkim tempem zaciskania się kawern w strefach przewarstwień soli drobnokrystalicznych. Analizy wykazały bowiem, że przewarstwienia takie mogą doprowadzić do lokalnie znacznie podwyższonych temp odkształceń w wyniku działania pełzania dyfuzyjnego, do trzech rzędów wielkości wyższych niż w przypadku uwzględnienia wyłącznie pełzania dyslokacyjnego. Sól drobnokrystaliczna może pełzać z dużą prędkością pod wpływem pełzania dyfuzyjnego także dla stosunkowo niskich wartości naprężeń różnicowych. Jest to istotne z perspektywy eksploatacji substancji gazowych w kawernach solnych, gdzie układ naprężeń jest zmienny w wyniku zatłaczania i poboru gazu. Oznacza to, że pełzanie dyfuzyjne może nie tylko znacząco przyspieszyć tempo konwergencji, ale także utrzymywać je na wysokim poziomie przez całość cyklu użytkowania kawerny. Przedstawiony artykuł ilustruje, że pełzanie dyfuzyjne może być istotnym

10. CONCLUSIONS

Based on our analyses of salt creep rates in the selected boreholes of the Łeba Elevation, it was demonstrated that the geomechanical conditions occurring in four out of six boreholes allow for the construction of stable storage caverns. The two exceptions include boreholes Czarny Młyn IG-1 and Opalino IG-1, where intense diffusion creep, associated with particular grain size, can reach hazardous deformation rates. However, in the case of borehole Opalino IG-1, excessive deformation rates are on the verge of admissibility, so final decision is strongly dependent on other, e.g., economic factors. In each case, however, more advanced analyses are required, including those based on numerical modelling, to exclude potential problems associated with fast cavern convergence rates in the zones of fine-crystalline salt interbedding.

Our analyses indicated that, as a result of diffusion creep operation, such interbedding may locally lead to strongly increased deformation rates, up to three orders of magnitude higher than in the case of dislocation creep only. Fine-crystalline salt may creep at high rates under the diffusion creep process also at relatively low values of differential stress. That is essential from the prospect of gaseous substance storage in salt caverns, where stress distribution is changeable during injection and withdrawal cycles. That means that diffusion creep can not only significantly accelerate convergence rates, but also maintain the rates at a high level during the whole cavern lifetime. The paper presented here illustrates that diffusion creep may be an essential salt-cavern deformation mechanism and it should be taken into account in cavern stability analysis.

11. SUMMARY

Our analyses of creep rate in rock salt were performed on the basis of the data collected from six boreholes situated in the area of the Łeba Elevation in northern Poland. Dislocation and diffusion creep were both present at average and minimum grain sizes occurring along the borehole. Our analyses revealed that, for average grain sizes, the highest creep rates and, by extension, the cavern convergence rates, were associated with dislocation creep, at the state of minimum gas pressure in the cavern (and thus, at maximum difference between the pressure in the cavern and the maximum differential stresses in the surrounding rock). In the cases under discussion, no excessive creep rates occurred along the cavern profiles that would disqualify positioning caverns there. However, different results were obtained when the minimum grain size was applied. In that case, deformation was dominated by fast diffusion creep, which occurred at both types of pressure states and reached hazardous values implying potential convergence rates of tens of metres per year. However, the exact thickness and distribution of such fine-grained salt interlayers remains

mechanizmem deformacji kawern solnych i powinien być w uwzględniany przy analizie ich stabilności.

11. SUMMARY

Analysis of creep rate in rocks salt were performed on the basis of data from six boreholes localised in the area of Łeba Elevation (northern Poland). Dislocation and solution-precipitation creep were both included along with available data on average and minimal grain sizes occurring along the borehole. The analysis revealed that for average grainsizes, highest creep rates and, by extension, cavern convergence rates are associated with dislocation creep in the state of minimum gas pressure in the cavern (and thus, maximum pressure difference between cavern and surrounding rock/maximum differential stresses). In this case, no excessive creep rates that would disqualify the localisation occurred along the cavern profiles. However, different results occurred, when the minimum grainsize was used. Here, deformation was dominated by fast solution-precipitation creep, which occurred for both of the pressure states and reached dangerous values implying potential for convergence rates of tens of metres per year. However, the exact thickness and distribution of such fine-grained salt interlayers remains unknown, neither it is clear how a fast deformation within a thin interlayer could affect the cavern as a whole. While the first question can be only answered through more thorough study of grainsize during borehole core analyses, the latter can be potentially answered with numerical simulations.

12. PODZIĘKOWANIA

Praca została wykonana w ramach projektu nr 22.2003.2201.00.0 pod tytułem „Ocena stopnia szczelności oraz charakterystyka geologiczna i geomechaniczna wybranych struktur na potrzeby podziemnego magazynowania i składowania substancji na obszarze Niżu Polskiego”, finansowanego przez NFOŚiGW. Autorzy chcą podziękować dr hab. Grzegorzowi Czapowskiemu i mgr Marcie Tomaszczyk za pomoc zbieraniu danych do modelu. Dziękujemy również dr Katarzynie Cyran i drugiemu, anonimowemu recenzentowi za cenne uwagi, które pomogły wpłynęły na ostateczny kształt artykułu.

13. LITERATURA/REFERENCES

- Adamuszek, M., Tămaş, D.M., Barabasch, J., Urai, J.L., 2021. Rheological stratification in impure rock salt during long-term creep: morphology, microstructure, and numerical models of multilayer folds in the Ocelele Mari salt mine, Romania. *Solid Earth* 12, 2041–2065. <https://doi.org/10.5194/se-12-2041-2021>
- Barabasch, J., Schmatz, J., Klaver, J., Schwedt, A., Urai, J.L., 2022. Grain size dependent large rheology contrasts of halite at low deviatoric stress: evidence from microstructural study of naturally deformed gneissic Zechstein-2 rock salt (Kristallbrockensalz) from the Northern Netherlands. preprint. Tectonic plate interactions, magma genesis, and lithosphere deformation at all scales/ Structural geology and tectonics, paleoseismology, rock physics, experimental deformation/Structural geology. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-655>
- Baumann, T., Kaus, B., Popov, A., Urai, J., 2020. The 3D stress state within typical salt structures. EGU General Assembly.

unknown, neither is it clear how fast deformation within a thin interlayer can affect the cavern stability as a whole. While the former issue can be only answered through more thorough studies of grain sizes during borehole core analyses, the latter can be potentially resolved by numerical simulations.

12. ACKNOWLEDGEMENTS

This paper was written under Project no. 22.2003.2201.00.0 entitled “The evaluation of the degree of tightness, with geological and geomechanical descriptions of selected structures, for the needs of an underground substance storage or disposal facilities on the area of the Polish Lowlands,” financed by the NFOŚiGW. The authors wish to thank Dr. hab. Grzegorz Czapowski and Marta Tomaszczyk, M.A., for their assistance in the collection of modelling data. We also thank Dr. Katarzyna Cyran and another anonymous reviewer for their valuable remarks that were helpful for obtaining the finale version of our paper.

- Bérest, P., Brouard, B., 2003. Safety of Salt Caverns Used for Underground Storage Blow Out; Mechanical Instability; Seepage; Cavern Abandonment. *Oil & Gas Science and Technology* 58, 361–384. <https://doi.org/10.2516/ogst:2003023>
- Böttcher, N., Görke, U.-J., Kolditz, O., Nagel, T., 2017. Thermo-mechanical investigation of salt caverns for short-term hydrogen storage. *Environmental Earth Sciences* 76, 98. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6414-2>
- Caglayan, D.G., Weber, N., Heinrichs, H.U., Linßen, J., Robinius, M., Kukla, P.A., Stolten, D., 2020. Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe. *International Journal of Hydrogen Energy* 45, 6793–6805. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.161>
- Cała, M., Cyran, K., Kowalski, M., Wilkosz, P., 2018. Influence of the anhydrite interbeds on a stability of the storage caverns in the Mechelinki salt deposit (Northern Poland). *Archives of Mining Sciences* 1007–1025.
- Carter, N., Horseman, S., Russell, J., Handin, J., 1993. Rheology of rocksalt. *Journal of Structural Geology* 15, 1257–1271.
- Cornet, J., Dabrowski, M., Schmid, D.W., 2017. Long-term cavity closure in non-linear rocks. *Geophysical Journal International* 210, 1231–1243. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx227>
- Cornet, J.S., Dabrowski, M., Schmid, D.W., 2018. Long term creep closure of salt cavities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 103, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.01.025>
- Cyran, K., Kowalski, M., 2021. Shape modelling and volume optimisation of salt caverns for energy storage. *Applied Sciences* 11, 423.
- Czapowski, G., 1987. Sedimentary facies in the oldest rock salt (Na1) of the Leba elevation (Northern Poland). *The Zechstein Facies in Europe*. Springer, 207–224.
- Czapowski, G., 1998. Geneza najstarszej soli kamiennej cechsztynu w rejonie Zatoki Puckiej (studium sedymentologiczne). Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Czapowski, G., 2019. Perspektywy lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach soli kamiennych górnego permu (cechsztynu) w Polsce—ocena geologiczna. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*.
- Czapowski, G., Tomassi-Morawiec, H., 1985. Sedymentacja i geochemia najstarszej soli kamiennej w rejonie Zatoki Puckiej. *Przegląd Geologiczny* 33, 663–670.
- Czapowski, G., Tomassi-Morawiec, H., 2006. Geologia permskiego pokładowego złoża soli kamiennej w rejonie Zatoki Gdańskiej—aktualny stan wiedzy. *Przegląd Geologiczny* 54, 309–310.
- Czapowski, G., Tomassi-Morawiec, H., Peryt, T., Tomaszczyk, M., Chełmiński, J., 2009. Złoża permskiej soli kamiennej i potasowej w rejonie Zatoki Puckiej—budowa geologiczna i zasoby. *Przegląd Geologiczny* 57, 757–758.
- Dreyer, W., 1982. Underground storage of oil and gas in salt deposits and other non-hard rocks.
- Fokker, P.A., Breunese, J.N., 2022. Single-cavern convergence for an Ellis 2-branch power-law model. *The Mechanical Behavior of Salt X*. CRC Press, 384–394.
- Habibi, R., Moomivand, H., Ahmadi, M., Asgari, A., 2021. Stability analysis of complex behavior of salt cavern subjected to cyclic loading by laboratory measurement and numerical modeling using LOCAS (case study: Nasrabad gas storage salt cavern). *Environmental Earth Sciences* 80, 1–21.
- Heard, H.C., 1972. Steady-state flow in polycrystalline halite at pressure of 2 kilobars. Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series 16, 191–209.
- Heard, H.C., Ryerson, F., 1986. Effect of cation impurities on steady-state flow of salt. *Mineral and Rock Deformation: Laboratory Studies* 36, 99–115.
- Heusermann, S., Rolfs, O., Schmidt, U., 2003. Nonlinear finite-element analysis of solution mined storage caverns in rock salt using the LUBBY2 constitutive model. *Computers & Structures* 81, 629–638. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(02\)00415-7](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(02)00415-7)
- Horseman, S., Russell, J., Handin, J., Carter, N., 1992. Slow experimental deformation of Avery Island salt. *Proceedings of the Seventh International Symposium on Salt, Kyoto, Japan*. 67e74.
- Hunsche, U., 1994. Uniaxial and Triaxial Creep and Failure Tests on Rock: Experimental Technique and Interpretation. W: Cristescu, N.D., Gioda, G. (Red.), *Visco-Plastic Behaviour of Geomaterials*. Springer Vienna, Vienna, 1–53. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2710-0_1
- Jackson, M.P., Hudec, M.R., 2017. *Salt tectonics: Principles and practice*. Cambridge University Press.
- Jarosiński, M., 2009. Ocena stabilności pokładów soli cechsztyńskiej na wyniesieniu Łeby pod kątem lokalizacji magazynów paliw płynnych. *Przegląd Geologiczny* 57, 763.
- Kim, Y., Lee, C., Lee, Y., 2018. Numerical analysis of sedimentary compaction: Implications for porosity and layer thickness variation. *Journal of the Geological Society of Korea* 54, 631–640. <https://doi.org/10.14770/jgsk.2018.54.6.631>
- Kłeczek, Z., Radomski, A., Zeljaś, D., 2005. *Podziemne magazynowanie*. CMAG KOMAG, Gliwice.
- Kumar, K.R., Hajibeygi, H., 2022. Influence of pressure solution and evaporate heterogeneity on the geo-mechanical behavior of salt caverns. *The Mechanical Behavior of Salt X*. CRC Press, 407–420.
- Kunstman, A., Poborska-Młynarska, K., Urbańczyk, K., 2009. Geologiczne i górnicze aspekty budowy magazynowych kawern solnych. *Przegląd geologiczny* 57, 819–928.
- Liu, W., Zhang, Z., Fan, J., Jiang, D., Daemen, J.J.K., 2020. Research on the Stability and Treatments of Natural Gas Storage Caverns With Different Shapes in Bedded Salt Rocks. *IEEE Access* 8, 18995–19007. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2967078>
- Majorowicz, J., 1971. Przebieg wartości stopnia geotermicznego w Polsce w przedziale głębokości 200-2500. *Geological Quarterly* 15, 891–900.
- Makhmutov, A.A., Kumar, K.R., Spiers, C.J., Hajibeygi, H., 2020. Cyclic Energy Storage in Salt Caverns: nonlinear finite-element modelling of rock salt creep at reservoir scale.
- Marketos, G., Spiers, C.J., Govers, R., 2016. Impact of rock salt creep law choice on subsidence calculations for hydrocarbon reservoirs overlain by evaporite caprocks: ROCK SALT FLOW AND SUBSIDENCE OVER GAS FIELDS. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 121, 4249–4267. <https://doi.org/10.1002/2016JB012892>
- Peryt, T.M., 1994. The anatomy of a sulphate platform and adjacent basin system in the Leba sub-basin of the Lower Werra Anhydrite (Zechstein, Upper Permian), northern Poland. *Sedimentology* 41, 83–113.
- Pizon, A., Peryt, T.M., Dębski, J., 1985. Środowisko powstania poli-halitów cechsztyńskich w rejonie Zatoki Puckiej. *Przegląd Geologiczny* 33, 659–663.

- Poborski, J., 1961. System permski na tzw. wyniesieniu. Łęby i związane z nim możliwości górnicze. *Przegląd Geologiczny* 9, 346.
- Pożaryski, W., Witkowski, A., 1990. Budowa geologiczna obszaru południowobałtyckiego (bez kenozoiku). *Przegląd Geologiczny* 38, 221.
- Pudewills, A., 1984. Model calculations of stresses and deformations in rock salt in the near field of heated boreholes. Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH (Germany).
- Pudewills, A., 2017. Modeling of hydro-mechanical behavior of rock salt in the near field of repository excavations. *The Mechanical Behavior of Salt—Understanding of THMC Processes in Salt*. CRC Press, 195–200.
- Spiers, C., Schutjens, P., Brzesowsky, R., Peach, C., Liezenberg, J., Zwart, H., 1990. Experimental determination of constitutive parameters governing creep of rocksalt by pressure solution. *Geological Society, London, Special Publications* 54, 215–227.
- Ślizowski, J., Lankof, L., Urbańczyk, K., Serbin, K., 2017. Potential capacity of gas storage caverns in rock salt bedded deposits in Poland. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 43, 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.03.028>
- Taheri, S.R., Pak, A., Shad, S., Mehrgini, B., Razifar, M., 2020. Investigation of rock salt layer creep and its effects on casing collapse. *International Journal of Mining Science and Technology* 30, 357–365.
- Ter Heege, J.H., De Bresser, J., Spiers, C., 2005a. Rheological behaviour of synthetic rocksalt: the interplay between water, dynamic recrystallization and deformation mechanisms. *Journal of Structural Geology* 27, 948–963.
- Ter Heege, J.H., De Bresser, J.H.P., Spiers, C.J., 2005b. Dynamic recrystallization of wet synthetic polycrystalline halite: dependence of grain size distribution on flow stress, temperature and strain. *Tectonophysics* 396, 35–57. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.10.002>
- Urai, J., Schlöder, Z., Spiers, C., Kukla, P., 2008. Flow and transport properties of salt rocks. *Dynamics of complex intracontinental basins: The central European basin system* 277–290.
- Urai, J.L., Spiers, C.J., Zwart, H.J., Lister, G.S., 1986. Weakening of rock salt by water during long-term creep. *Nature* 324, 554–557. <https://doi.org/10.1038/324554a0>
- Wagner, R., 1988. Ewolucja basenu cechsztyńskiego w Polsce. *Geological Quarterly* 32, 33–52.
- Wang, G., 2003. Long-term deformation characters of salt rock surrounding a gas storage cavern. *CHINESE JOURNAL OF GEOTECHNICAL ENGINEERING-CHINESE EDITION-* 25, 431–435.
- Werner, Z., 1978. Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w kat. C1, w rejonie Zatoki Puckiej, województwo gdańskie.
- Wilkoosz, P., Burliga, S., Grzybowski, Ł., Kasprzyk, W., 2012. Comparison of internal structure and geomechanical properties in horizontally layered Zechstein rock salt. W: Bérest, P., Ghoreychi, M., Hadj-Hassen, F., Tijani, M. (Red.), *Mechanical Behaviour of Salt VII*. CRC Press, 103–110.
- Zhang, G., Li, Y., Daemen, J.J.K., Yang, C., Wu, Y., Zhang, K., Chen, Y., 2015. Geotechnical Feasibility Analysis of Compressed Air Energy Storage (CAES) in Bedded Salt Formations: a Case Study in Huai'an City, China. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 48, 2111–2127. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0672-z>



Współczesna mineralizacja halogenkowa w kopalniach rud miedzi na monoklinie przedsudeckiej

Modern halide mineralization in copper ore mines over the Fore-Sudetic Homocline, SW Poland

Mateusz ŚWIERK¹, Stanisław BURLIGA²

^{1,2} Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych, pl. M. Borna 9, 50-204 Wrocław,
e-mail: ¹ mateusz.swierk@uwr.edu.pl; ² stanislaw.burliga@uwr.edu.pl

^{1,2} Wrocław University, Institute of Geological Sciences, pl. M. Borna 9, 50-204 Wrocław,
e-mail: ¹ mateusz.swierk@uwr.edu.pl; ² stanislaw.burliga@uwr.edu.pl

Mineralizacja miedziowa na obszarze monokliny przedsudeckiej wykształciła się w sukcesji skał osadowych pogranicza czerwonego spągowca i cechsztynu (górnym perm). Od lat 60-tych XX wieku skały te są przedmiotem górniczej eksploatacji, a powstałe wyrobiska górnicze rozciągające serię złożową rud miedzi stanowią przestrzeń, w której wskutek cyrkulacji powietrza atmosferycznego oraz roztworów złożowych i pozazłożowych dochodzi do krystalizacji szeregu minerałów wtórnych. W pracy niniejszej przedstawiono wstępne wyniki badań prowadzonych nad rozprzestrzenieniem współczesnej mineralizacji halogenkowej na obszarze eksploatacji.

Dotychczas opisano około 30 minerałów powstałych w efekcie wietrzenia minerałów rudnych, głównie siarczków i siarkosoli Cu, Pb, Fe, Zn i Ni (Siuda i in., 2017), przy czym te młode fazy mineralne w większości zidentyfikowano w pojedynczych stanowiskach badawczych. Współczesna mineralizacja chlorkowa współwystępująca z rudami miedzi na monoklinie przedsudeckiej jest opisana w kilku pracach. Piestrzyński (2016) udokumentował obecność halitu (NaCl) i atacamitu ($\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$) wśród minerałów z obszaru kopalni ZG Polkowice-Sieroszowice (lokalizacja miejsc opróbowania nie jest znana). Z tej samej kopalni pochodziły halogenki z grupy atacamitu: atacamit, klinoatacamit ($\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$), botallackit ($\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$), oraz paratacamit ($\text{Cu}_3(\text{Cu,Zn})(\text{OH})_6\text{Cl}_2$) przeanalizowane przez Siudę i in. (2017), a parageniza ta występowała w miejscu wycieku solanek o wysokim stężeniu chlorków (3500 mg/dm^3) w obręb wyrobiska poeksploatacyjnego rud miedzi. Występowanie wyżej wymienionych minerałów oraz herbertsmithytu ($\text{Cu}_3\text{Zn}(\text{OH})_6\text{Cl}_2$), tołbaczytu (CuCl_2)

Copper mineralization over the area of the Fore-Sudetic Homocline developed in the succession of sedimentary rocks belonging to the topmost part of Rotliegend and the basal part of Zechstein (Upper Permian). Since the 1960s, these rocks have been being mined, and the mine workings, which cut through a series of copper ore deposits, constitute a space in which a number of secondary minerals could have crystallized due to the circulation of atmospheric air and mine waters. This paper presents the preliminary results of research on the distribution of modern halide mineralization over the mining area. So far, about 30 secondary minerals, originated in response to weathering and alteration of ore minerals, mainly Cu, Pb, Fe, Zn and Ni sulphides and sulphosalts (Siuda et al., 2017), have been described. The majority of these modern mineral phases was identified in singular locations and the contemporary chloride mineralization co-occurring with copper ores over the Fore-Sudetic Homocline is described only in a few publications. Piestrzyński (2016) documented the presence of halite (NaCl) and atacamite ($\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$) among the minerals from the Polkowice-Sieroszowice mine area (the location of the sampling sites is unknown).

In the same mine, the atacamite group halides: atacamite, clinoatacamite ($\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$), botallackite ($\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$), and paratacamite ($\text{Cu}_3(\text{Cu,Zn})(\text{OH})_6\text{Cl}_2$) were sampled and analysed by Siuda et al. (2017), and this mineral paragenesis occurred at the site of leakage of brines with a high concentration of chlorides (3500 mg / dm^3) into the copper ore mining drift. Occurrence of the above-mentioned minerals as well as of herbertsmithite ($\text{Cu}_3\text{Zn}(\text{OH})_6\text{Cl}_2$), tolbachite (CuCl_2) and erichalcite ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) was also confirmed in this mine

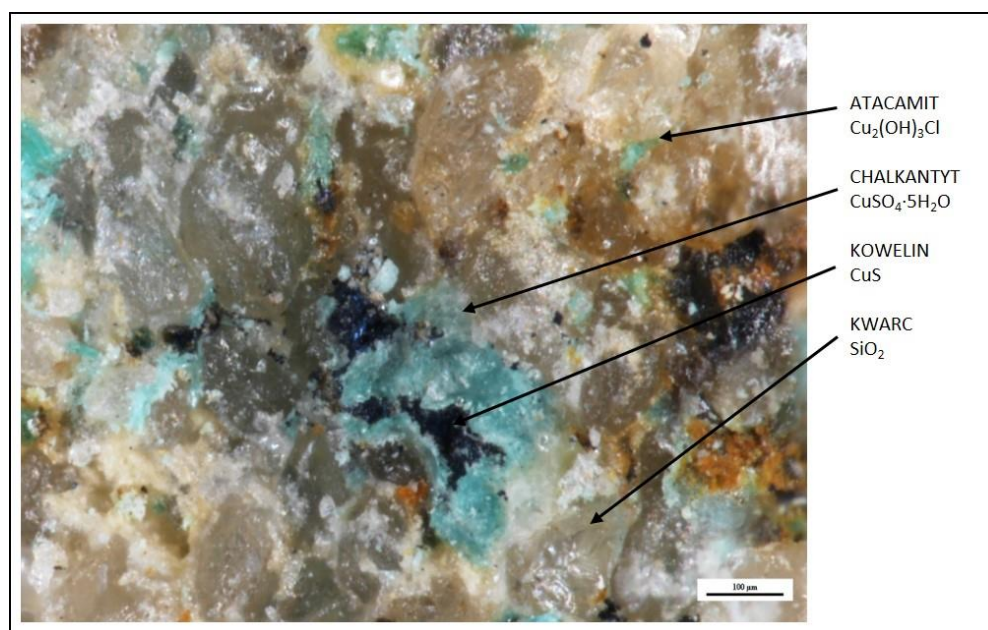
i erichalcytu ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) w tej kopalni zostało także potwierdzone przez autorów niniejszej pracy (Świerk i Burliga, 2021), a wszystkie minerały zostały zidentyfikowane za pomocą kilku metod badawczych. Preparaty analizowano w Pracowni Mikroskopii Elektronowej Instytutu Nauk Geologicznych Uniwersytetu Wrocławskiego przy użyciu (1) elektronowego mikroskopu skaningowego Jeol JSM-IT500LA z detektorem elektronów wstecznie rozproszonych (BSE) oraz spektrometrem dyspersji energii (EDS), (2) spektrometru Ramana sprzężonego z konfokalnym mikroskopem optycznym, model Renishaw inVia Qontor, z laserem diodowym o długości fali 785 nm i 532 nm oraz (3) dyfraktometru rentgenowskiego D8 ADVANCE firmy Bruker, wykorzystując do obróbki danych oprogramowanie DIFFRAC.SUITE EVA V.4. Wymienione minerały tworzą paragenезę z halitem (NaCl) w postaci wrostków i narostów na kryształach halitu, nadając im zieloną barwę. Udokumentowano je w miejscach wycieku solanek chlorkowo-sodowych o wysokim stężeniu występujących w północnej części kopalni.

W toku badań prowadzonych w roku 2022 w ZG Lubin w rejonie oddziału górniczego G-5 zlokalizowano strefę, w której w obrębie piaskowca białego spągowca okruszczonego kowelinem (CuS) w przestrzeniach międzyziarnowych wykrył drobnokrystaliczny atacamit (ryc. 1, 2 i 3). Obecnie strefa, z której pobrane zostały próby nie wykazuje objawów zawodnienia, jednakże według archiwalnych danych kopalni w latach 70-tych i 80-tych ubiegłego wieku w sąsiednich wyrobiskach występowały wycieki wód złożowych. Analizy ich składu chemicznego z lat 1976,

by the authors of this study (Świerk and Burliga, 2021), and all minerals were identified using several analytical methods. The mineral samples were analysed in the Laboratory of Electron Microscopy in the Institute of Geological Sciences of University of Wrocław using: (1) Jeol JSM-IT500LA scanning electron microscope with a backscattered electron detector (BSE) and energy-dispersive spectrometer (EDS), (2) Raman spectrometer coupled with a confocal optical microscope, Renishaw inVia Qontor model, with a diode laser with a wavelength of 785 nm and 532 nm, and (3) an X-ray ADVANCE diffractometer by Bruker, applying DIFFRAC.SUITE EVA V.4 software for data processing. The minerals listed above created paragenesis with halite (NaCl) and crystallized inside halite crystals or as overgrowths, which resulted in greenish colour of halite. They were documented in areas of leakage of high-concentration sodium-chloride brines in the northern part of the mine.

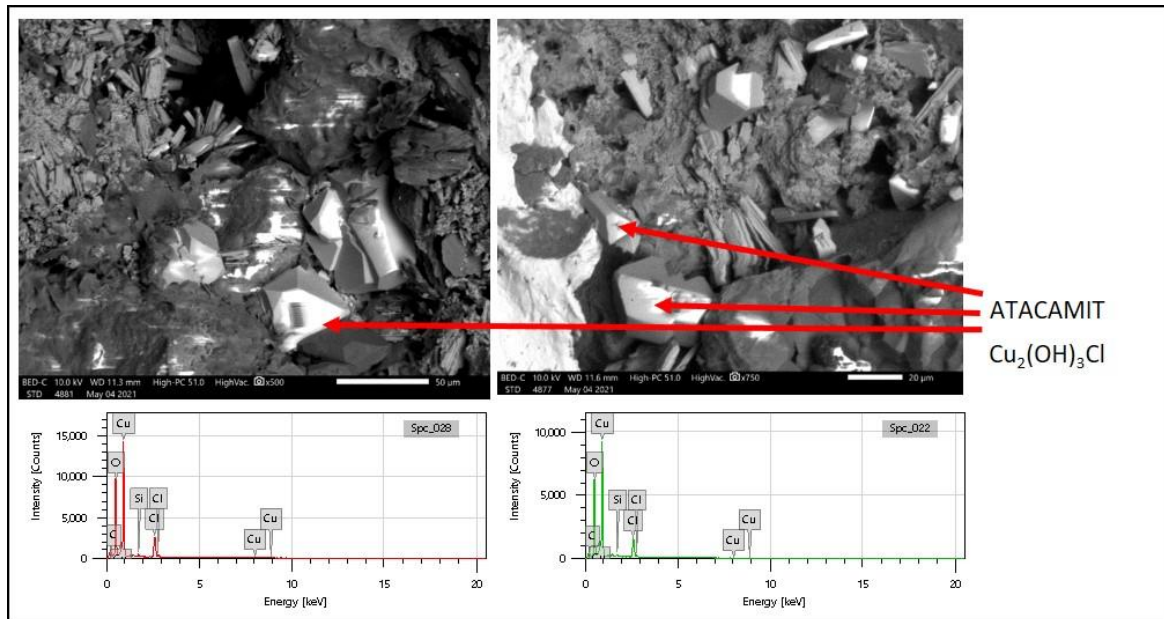
In the course of studies carried out in 2022 in ZG Lubin mine, in the area of the G-5 mining division, a zone was located in which, within the Weissliegend sandstone with covellite (CuS), fine-grained atacamite crystallized in the inter-grain spaces (Fig. 1, 2 and 3). At present, the zone from which samples were taken does not display any sign of water leakage, however, according to the archival data of the mine, leakages of mine water occurred in the neighbouring workings in the 1970s and 1980s. Analyses of chemical composition of water carried out in 1976, 1979 and 1980 show that they contained chloride ions at the level of 210-364 mg/dm^3 .

Our research and previous publications imply that contemporary chloride mineralization occurs mainly in areas



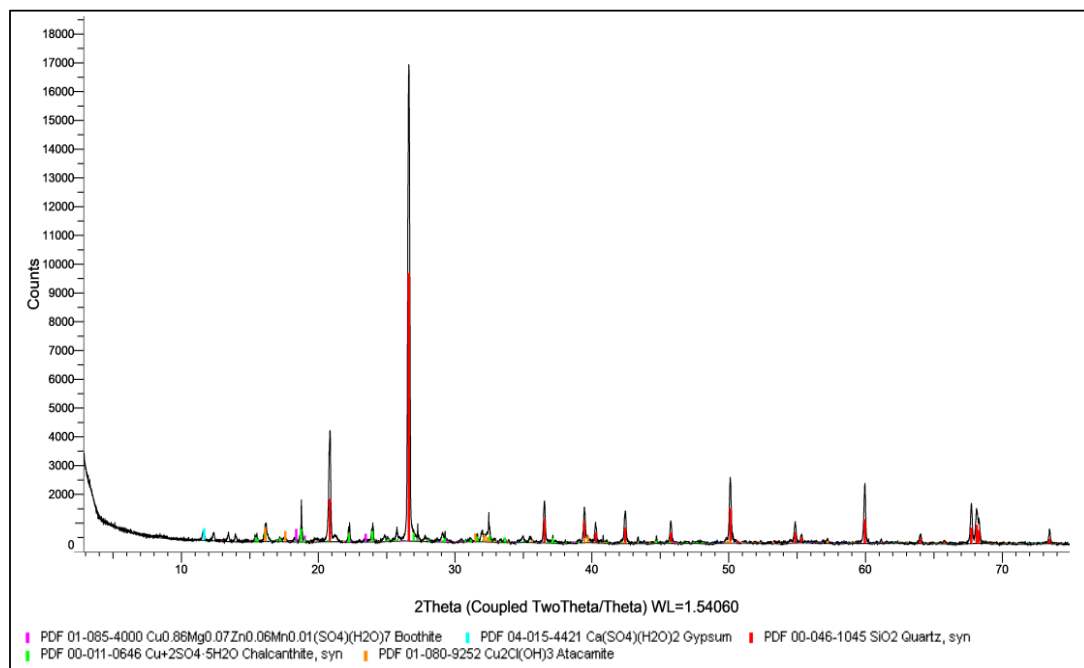
Ryc. 1. Piaskowiec białego spągowca okruszczony kowelinem z współczesną mineralizacją chlorkową (atacamit) i siarczanową (chalkantyt) w obrazie mikroskopowym.

Fig. 1. Microscopic image of Weissliegende sandstone with copper mineralization (covellite) and contemporary chloride (atacamite) and sulphate (chalcantite) mineralization.



Ryc. 2. Atacamit z ZG Lubin w obrazie BSE oraz jego widma uzyskane w badaniach EDS.

Fig. 2. BSE image of atacamite from Lubin Mine and its EDS spectra.



Ryc. 3. Dyfraktogram rentgenowski próbek piaskowca z atacamitem z ZG Lubin.

Fig. 3. X-ray powder diffractogram of the sandstone sample from the Lubin Mine.

1979 i 1980 wykazują, że zawierały one jony chlorkowe na poziomie 210-364 mg/dm³.

Badania własne oraz wcześniejsze publikacje implikują, że współczesna mineralizacja chlorkowa występuje głównie w rejonach dopływu wód zasobnych w jony chlorkowe, a większość współczesnych chlorków udokumentowano w północnej części obszaru ZG Polkowice-Sieroszowice. Oczywisty wydaje się zatem związek takich wód z obecnością pokładu najstarszej soli kamiennej (Na1) w nadkładzie serii złożowej, gdyż południowa granica zasięgu najstarszej

of leakage of waters rich in chloride ions, and most of the present-day chlorides have been documented in the northern part of the ZG Polkowice-Sieroszowice mine. Therefore, it seems obvious that such waters are related to the presence of the Oldest Halite rock salt (Na1) bed in the overburden of the deposit series, as the southern boundary of the Oldest Halite range in the Fore-Sudetic Homocline extends across the central part of ZG Polkowice-Sieroszowice mine area. As the area of the ZG Lubin mine is located south of this border, and the zone with atacamite described in the study is located

soli kamiennej na monoklinie przedsudeckiej przebiega przez środkową część obszaru tej kopalni. Ponieważ obszar kopalni ZG Lubin znajduje się na południe od tej granicy, a opisana w pracy strefa z atacamitem usytuowana jest ok. 12 km od niej, możliwa jest dwojaka interpretacja genezy tej mineralizacji chlorkowej. Dopuścić należy, iż albo wody chlorkowe miały możliwość migracji systemami spękań i uskoków na odległość co najmniej kilkunastu kilometrów na południe od południowej granicy zasięgu soli, albo pierwotny zasięg najstarszej soli kamiennej był większy, a mineralizacja chlorkowa rozwinęła się w wyniku dopływu resztkowych wód chlorkowych pozostałych w górotworze po wyługowaniu soli kamiennej ponad tą częścią złoża rud miedzi. Zanik dopływu wód wydaje się faworyzować drugą koncepcję, jednakże na obecnym etapie badań żadnej z interpretacji nie można wykluczyć.

approx. 12 km from it, it is possible to interpret the genesis of this chloride mineralization in two ways. Either chloride waters could migrate through the systems of fractures and faults to a distance of dozen kilometres south of the southern boundary of the Oldest Halite, or the original extent of the rock salt bed was larger, and chloride mineralization developed as a result of the inflow of residual chloride waters remaining in the rock salt overburden after leaching of rock salt over this part of the copper ore deposit. As the water inflow ceased, the second concept seems more likely, however, at the present stage of research, none of the interpretations can be ruled out.

LITERATURA/REFERENCES

- PIESTRZYŃSKI A., (2016). Minerale złoża miedzi na monoklinie przedsudeckiej. W: red. J. Kicki, J. Jarosz, A. Dyczko: Świat minerałów KGHM Wydaw. Fundacja dla Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków. 283 s.
- SIUDA R., ŁODZIŃSKI M., SYCZEWSKI M., KRUSZEWSKI Ł., PRŠEK J., HOFFMANN P., (2017). Pierwsze wystąpienie botallackitu w Polsce (kopalnia Polkowice-Sieroszowice). *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 469: 217-228.
- ŚWIERK M., BURLIGA S., (2022). Halit w poziomie eksploatacyjnym złóż rud miedzi na monoklinie przedsudeckiej – przykład współczesnej mineralizacji chlorkowej. *XXV Międzynarodowe Sympozjum Solne Quo Vadis Sal, Varia Sal – Wszystko o Soli*, Kraków, 68-71.



II. KOMUNIKATY / NOTICES

Morze Martwe i Jordania 2023.

XIV Wyprawa Naukowa Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego, 11–18 września 2023

The Dead Sea and Jordan 2023.

XIV Scientific Expedition of the Polish Salt Mining Society, 11–18 September 2023

Jacek WACHOWIAK

Polskie Stowarzyszenie Górnictwa Solnego / Polish Salt Mining Society
al. Mickiewicza 30/A-0/129. 30-059 Kraków
e-mail: wachowiak@agh.edu.pl

XIV Wyprawa Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego pn. „Morze Martwe i Jordania 2023” została zorganizowana w ramach działalności statutowej Stowarzyszenia. Odbyła się 11-18 września 2023 r. Była to ekspedycja naukowo-poznawcza.

Celem wyprawy były prace badawcze w rejonie Morza Martwego w Jordanii. Ponadto program wyprawy uwzględniał zapoznanie się z budową geologiczną Jordanii, jej zabytkami oraz historią od czasów biblijnych aż po współczesność.

W wyprawie wzięło udział 27 osób. Byli to członkowie Stowarzyszenia, reprezentujący jednostki naukowo-badawcze (AGH – Kraków, Uniwersytet Wrocławski, PIG-PIB Warszawa), zakłady górnicze (Kopalnia Soli „Kłodawa” S.A. IKS Solino S.A.), instytucje państwowe (Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Agencję Rozwoju Przemysłu, Wyższy Urząd Górniczy) oraz członkowie zaprzyjaźnionych stowarzyszeń (Polskiego Stowarzyszenia Geologów Górniczych i Fundacji Polska Sól), związanych z górnictwem solnym.

Prace badawcze wyprawy obejmowały:

- Zapoznanie się z warunkami i formami współczesnej akumulacji soli oraz wykształceniem osadów wzdłuż wschodniego brzegu zbiornika.
- Obserwacji jakościowej i ilościowej krystalizacji minerałów solnych bezpośrednio z solanki z Morza Martwego oraz pobieranie próbek.

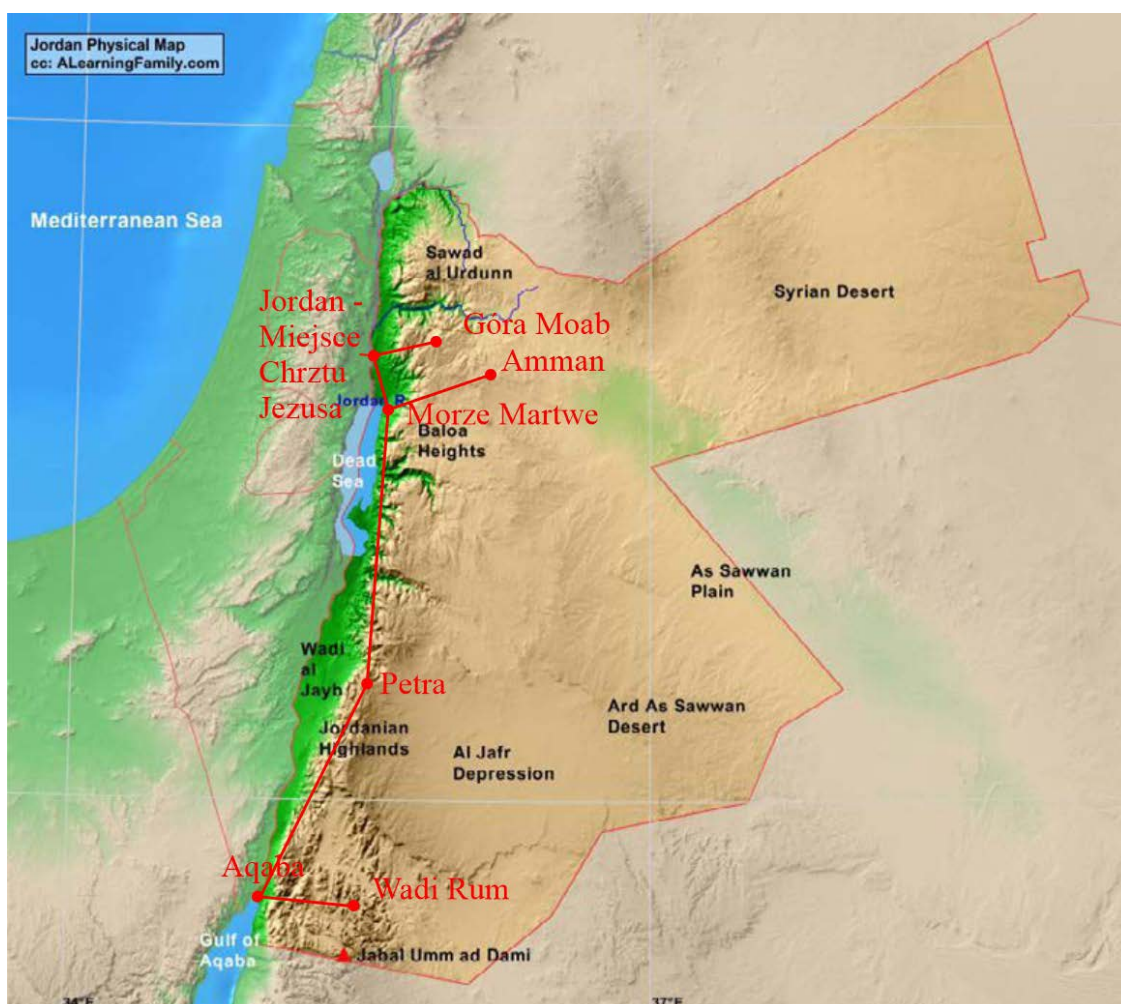
The 14th Expedition of the Polish Salt Mining Society, pursued under the slogan of “The Dead Sea and Jordan 2023”, was organised as part of the statutory activities of our Society. Our research and exploratory event took place from 11 to 18 September 2023.

The goal of our trip was to carry out certain research works in the Jordan’s Dead Sea area. Besides, we planned to study the local geological structures, as well as the country’s landmarks and history since the biblical days.

27 persons joined our Expedition. The group was composed of the members of our Society, representing Polish research and development units (AGH – Kraków, University of Wrocław, and PIG-PIB Warszawa), mining companies (“Kłodawa” Salt Mine and IKS Solino), government agencies (The Ministry of Climate and the Environment, The Industrial Development Agency, and The Supreme Mining Board), as well as some members of associated salt-mining societies (The Polish Association of Mining Geologists and The “Polish Salt” Foundation).

Our research works entailed the following:

- Learning the conditions and forms of present-day salt accumulations and deposit formations along the eastern coast of the Dead Sea.
- Observations of the qualitative and quantitative crystallisations of salt minerals, directly from brine, with sample collection.



Ryc. 1. Mapa Jordanii z trasą wyprawy.

Fig. 1. Map of Jordan with the expedition route.

- Zapoznanie się z przemysłowym pozyskiwaniem soli w procesie naturalnej ewaporacji.
- Pobranie próbek solanek i sedymentów do badań i dydaktyki.

Towarzyszący program turystyczny przewidywał:

- Przejazd przez pustynię Wadi Rum i zapoznanie się z historią geologiczną tego regionu.
- Zwiedzenie Petry.
- Zwiedzenie stolicy Jordanii Ammanu.
- Podróż nad rzekę Jordan oraz na górę Nebo.

Pierwszą bazę wyprawy założono w miejscowości Akaba, w Zatoce Akaba nad Morzem Czerwonym, w miejscu naszego przylotu i odlotu. Stąd były organizowane wycieczki fakultatywne na pustynię Wadi Rum i do Petry.

JORDANIA „W PIGULCE”

Pełna nazwa tego kraju to Haszymidzkie Królestwo Jordanii – jedno z państw Bliskiego Wschodu, należące geograficznie do Azji. Stolicą Jordanii jest Amman. Królestwo Graniczy z Izraelem, Palestyną, Syrią, Irakiem i Arabią Saudyjską. Jordania posiada bardzo wąski dostęp do Morza Czer-

- Learning the industrial salt-harvesting methods, based on natural evaporation processes.
- Collection of brine and sediment samples for future testing and lecturing.

The accompanying tourist programme included the following:

- Crossing the Wadi Rum Desert and learning the geological history of the region.
- Sightseeing of Petra.
- Sightseeing of Amman, the capital city of Jordan.
- Field trip to the Jordan River and Mount Nebo.

Our first base camp was established in Aqaba, a town on the Red Sea’s Gulf of Aqaba, which was our airport of arrival and departure. All our optional excursions to the Wadi Rum Desert and Petra started from that location.

JORDAN IN A NUTSHELL

The official name of the country is the Hashemite Kingdom of Jordan, one of the Middle East countries that geographically belongs to Asia. Amman is the capital city of Jordan. The Kingdom borders Israel, Palestine, Syria, Iraq,



Ryc. 2. Akaba – miejsce lądowania i pierwsza baza noclegowa. Fot. T. Toboła.

Fig. 2. Aqaba – landing site and first accommodation base.

wonego poprzez Zatokę Akaba. Długość wybrzeża morskiego wynosi zaledwie 26 km, ale i tak jest to bardzo ważny morski węzeł komunikacyjny dla tego kraju. Jordania jest monarchią konstytucyjną. Obecnie panującym królem jest Abdullah II, a jego żoną jest piękna Rania al-Abd Allah, z pochodzenia Palestynka.

Oficjalną walutą Jordanii jest dinar jordański (JOD). Jest on powiązany z dolarem amerykańskim sztywnym kursem walutowym o wartości USD 1 = JOD 0,7094 czyli JOD 1 = 1,41044 USD.

Jordania posiada bogate złoża fosforytów, eksploatowane w okolicach Al-Hasa i Ar-Rusajfa. Poza fosforytami wydobywa się sole potasowe z Morza Martwego, ropę naftową oraz rudy żelaza, miedzi i manganu. Dzięki temu rozwinęły się zakłady przetwórstwa ropy naftowej, hutnictwo żelaza, stali i metali nieżelaznych.

Pustynna Jordania jest krajem szczególnie atrakcyjnym pod względem kulturowym. Obecnie Jordania i Izrael są odrębnymi państwami, ale przed kilkoma tysiącami lat granice plemion semickich, zamieszkujących te tereny, były umowne i przebiegały inaczej. W starożytności mieszkaly tu plemiona Ammonitów, Moabitów i Edomitów. Następnie zwarte struktury pre-państwowe stworzył lud Nabatejczyków, przybyły

and Saudi Arabia. Jordan has a small access to the Red Sea across the Gulf of Aqaba. The sea coast is only 26 km long but it provides important marine transportation locations for the whole country. Jordan is a constitutional monarchy. Abdullah II reigns the country, and the beautiful Rania al-Abd Allah of Palestinian origin is his wife.

Jordanian dinar (JOD) is the currency of Jordan. The currency is pegged to the US dollar at the rate of 0.7094, or JOD 1 = USD 1.41044.

Jordan is rich in phosphorite deposits that are extracted in the areas of Al-Hasa and Ar-Russeifa. Potassium salts are extracted from the Dead Sea. Other minerals include crude oil and iron, copper, and manganese ores. Mining operations are accompanied by oil processing plants, iron foundries, steelworks, and non-ferrous metal plants.

The desert lands of Jordan are especially attractive in cultural terms. Presently, Jordan and Israel are separate states, although, thousands of years ago, the borders of lands occupied by Semitic tribes were rather conventional and did not match the present-day lines. The areas used to be occupied by the ancient tribes of Ammonites, Moabites, and Edomites. Integrated pre-state structures were created by the Nabateans who probably arrived there from the Arab Peninsula. It was the



Ryc. 3. Pustynne safari na Wadi Rum. Fot. J. Wachowiak.

Fig. 3. Desert safari adventure at Wadi Rum.

prawdopodobnie z Półwyspu Arabskiego. To właśnie Nabatejczycy obrali Petrę, jako swoją stolicę i uświetnili ją setkami budowli i rzeźb, podziwianych do dnia dzisiejszego. Wiele miejsc późniejszego kultu religijnego – wiary w jedyne Boga Jahwe – leżących na obecnych terytoriach Jordanii, Izraela czy Autonomii Palestyńskiej ma wspólną przeszłość duchową i są one opisywane w Starym Testamencie. Zostanie to pokazane w kolejnych odsłonach tej relacji.

WADI RUM

Pierwszym „przystankiem” w zwiedzaniu Jordanii była pustynia Wadi Rum. Pustynia ta słynie z księżycowych krajobrazów, daleko odbiegających od widoków piaszczystej, wydmowej Sahary czy zwietrzałej na powierzchni Atacamy, sprawiającej nieraz wrażenie, jakby ją ktoś pługiem przeorał. Największe wrażenie na Wadi Rum robią potężne formacje skalne, będące efektem milionów lat erozji. U stóp tych ostańców skalnych rozciąga się „morze” piasku, pochodzącego z ich powolnego wietrzenia. Piasku o przepięknej gamie barw, od jasnożółtej do ciemnobrązowej, w zależności od rejonu i „uśmiechu” słońca, czyli pory dnia. Najczęściej spotykana czerwień sprawia wrażenie, że czujemy się, jakbyśmy stąpali po planecie boga wojny – Marsie.

Jest kilka możliwości zwiedzania Wadi Rum, od kilkogodzinnego zwiedzania autokarem do całodobowego safari jeepami, z lunchem, kolacją i noclegiem u Beduinów na

Nabateans who selected Petra as their capital city and made it famous, owing to hundreds of structures and sculptures that have been admired until today. Many locations of later religious cults – believing in one God Jahweh – lying on the territories of present Jordan, Israel or Palestinian Autonomy, enjoy a common spiritual past, and they are described in the Old Testament. I will mention that later in my report.

WADI RUM

The Wadi Rum Desert was the first stop in our Jordanian excursions. The desert is famous for its lunar landscapes, much different from the views of the sands and dunes of the Sahara or weathered surfaces of the Atacama, looking as if the land was ploughed. The rock formations produced by the millions of years of erosion are the most impressive in the Wadi Rum Desert. At the feet of inselbergs, one can observe a sea of sands originating from weathering processes. The sands display various colours and hues, from bright yellow to dark brown, depending on the area and the time of the sunny day. Red is, however, the most common colour of sand, and one feels there as if walking on the planet of Mars.

There were several options of sightseeing in the Wadi Rum Desert, from a several-hour long trip by coach to a safari day travel by jeeps, with a lunch, dinner, and overnight stay with the Bedouins in the desert. Some members of our group chose the first and less tiring option, while the other option



Ryc. 4. Lunch na Wadi Rum przygotowany przez Beduinów.
Fig. 4. Lunch at Wadi Rum prepared by the Bedouins.
Fot. J. Wachowiak.



Ryc. 5. Geolodzy z PSGS podziwiają piękno natury zaklęte w skałach. Fot. M. Hodbod.
Fig. 5. Geologists from PSGS admire the beauty of nature hidden in the rocks.



Ryc. 6. Uczestnicy wyprawy pod Burdah Arch Hike.
Fot. H. Paszcza.
Fig. 6. Expedition participants under Burdah Arch Hike.



Ryc. 7. Formacje skalne na pustyni Wadi Rum. Fot. M. Canibol.

Fig. 7. Rock formations in the Wadi Rum desert.

pustyni. Część grupy wybrała pierwszy (mniej męczący) wariant a część drugi, który okazał się piękną pustynną przygodą. Przepiękne krajobrazy, monumenty skalne, zamarłe na miliony lat w geologicznych dziejach tego regionu. Lunch na pustynnej gołej ziemi, beduińskie potrawy podgrzewane na paleniskach, chrustem pozbieranym po drodze na pustyni. Kolacja jeszcze ciekawsza, bo pustynne menu było przygotowywane w dołach, wykopanych w piasku i ziemi. Rankiem budziły nas porykiwania półdzikich wielbłądów, które podchodziły w pobliże naszych namiotów. Około południa następnego dnia wróciliśmy do „cywilizacji” i kontynuowaliśmy wyprawę.

PETRA

Kolejnym celem wyprawy była Petra – starożytna stolica ludu nazywanego Nabatejczykami. Był to lud semicki, który przybył z Półwyspu Arabskiego około VI w p.n.e. Zajęli lub zdobyli oni tereny obecnej południowej Jordanii i południowego Izraela. Rosnąc w siłę, w III w. p.n.e. założyli Królestwo Nabatejskie, które przetrwało do 106 r. p.n.e., kiedy to zostało z kolei zawojowane przez legiony rzymskie, a następnie wcielone do prowincji Arabica (Arabia). To właśnie Nabatejczycy zbudowali i wyrzeźbili czy wyżłobili w skałach piaskowcowych „kamienne miasto”, które przetrwało do naszych czasów i jest uważane za jeden z cudów świata.

Wchodząc powoli wąską szczeliną, ostnioną od słońca przez potężne masywy skalne odnosimy wrażenie zanurzania się w mroki słabo znanej historii sprzed ponad dwóch tysięcy lat. Rzeźbiarzy już dawno tu nie ma, ale ich dzieła pozostały, tylko trochę nadgryzione zębem czasu. Wyłaniając się z chodu i cienia naszym oczom ukazują się monumentalne portale, ozdobione potężnymi kolumnami, wznoszącymi się na wysokość kilkunastu metrów. To rzeczywiście jeden z najpięk-

turned into a nice adventure in the desert, with beautiful landscapes and rocky landmarks standing for millions of years of the geological history of the region. Our lunch was served on the desert soil, with Bedouin meals heated in open fireplaces, burning brushwood collected in the desert. Our dinner was even more interesting as the desert menu was prepared in pits dug out in sand or soil. We were woken up the following morning by the roar of semi-wild camels that had approached our tents. We came back to “civilisation” only about the noon next day to continue our Expedition.

PETRA

Petra was the next goal of our trip. It was the ancient capital city of the Nabateans. That was a Semitic tribe who arrived from the Arab Peninsula around the 6th century BC. They occupied or conquered the territories of the present-day southern Jordan and southern Israel. Upon consolidation of their rule, they established the Nabatean Kingdom in the 3rd century BC. The Kingdom had survived until year 106 BC when it was defeated by the Roman Legions and included in the Roman Arabia Province. It was the Nabateans who built and carved the “stone city” in sandstone. It has survived until our days and is considered to be one of the wonders of the world.

When entering slowly through a narrow crevice, protected against the sunshine by huge rock mass, we had an impression of diving into the darkness of hardly known history of more than two thousand years ago. No sculptors any more, but their works remain only slightly timeworn. When emerging from chill and shadow, one can see monumental portals, decorated with huge columns rising a dozen of metres above our heads.



Ryc. 8. Petra: pałac nabatejskiego notabla. Fot. M. Mika.

Fig. 8. Petra. Palace of a Nabataean notable.



Ryc. 9. Petra: grotty mieszkalne nabatejczyków. Fot. M. Sosnowska.

Fig. 9. Petra: Nabataean habitation caves.

niejszych wytworów ludzkiej wyobraźni i pracy ludzkich rąk tamtych czasów.

Tych rzeźb, wnęk, komnat są setki, jak nie tysiące. Nawet Rzymianie pozostawili swój ślad podczas wielowiekowej okupacji, wykuwając w skałach dwa amfiteatry oraz łaźnię.

Petrę opuszczaliśmy w upalnym słońcu z głowami pełnymi wrażeń estetycznych i historycznych, ale i z pewnym smutkiem, bo w ciągu zaledwie kilku godzin tego potężnego kamiennego miasta nie da się zwiedzić i poznać. Niestety ramy czasowe wyprawy nie pozwalały na pozostanie dłużej. Wielu z nas tu wróci. Ja na pewno. Do zobaczenia, Nabatejska Petro!

No, ale czas w drogę, Jacenty, na bok sentymenty.

MORZE MARTWE

Drugą bazę wypadową założyliśmy na wybrzeżu Morza Martwego – głównego celu naszej wyprawy. Morze Martwe jest w zasadzie słonym, bezodpływowym jeziorem, położonym w tektonicznym Rowie Jordanu, jednej z największych depresji na świecie, na pograniczu Izraela, Palestyny i Jordanii. Jego długość wynosi około 50 km, a szerokość 15 km. Lustro wody znajduje się na najniższym położonym obszarze lądowym Ziemi –438,5 m p.p.m. (stan na grudzień 2023)

That is really one of the most beautiful creations of human imagination and human hands of ancient days.

And there are hundreds if not thousands of sculptures, niches, and chambers there. Even the Romans left their marks there during several centuries of occupation by cutting out two amphitheatres and a bathhouse in the rocks.

We left Petra in burning sunshine, with our minds filled with aesthetic and historical impressions, although with certain sadness as one cannot see or comprehend that huge stone city within several hours only. Unfortunately, we were pressed for time under our Expedition agenda but, certainly, many of us would go back there for sure. So, see you again, Nabatean Petra!

Well, it's high time to hit the road, Jacky, and stop being sentimental.

DEAD SEA

Our second base camp was established on the Dead Sea coast which was the main goal of our Expedition. The Dead Sea is basically a land-locked salt lake, located within the tectonic Jordan River Rift, being one of the largest depression areas in the world, situated on the borderlands of Israel, Palestine, and Jordan. The sea is about 50 km long and 15 km



Ryc. 10. Jordanijski brzeg Morza Martwego. Fot. St. Burliga.

Fig. 10. The Jordanian shore of the Dead Sea.



Ryc. 11. Uczestnicy wyprawy sprawdzają wyporność wody/solanki w M. Martwym. Fot. A. Caniboł.

Fig. 11. Testing the body displacement in the water/brine of the Dead Sea.



Ryc. 12. Niektórym sprawiało przyjemność taplanie się w leczniczym błocie.
Fig. 12. Some people enjoyed wallowing in the healing mud. Fot. K. Bukowski.

i ciągle się obniża (podczas naszej pierwszej wyprawy nad M. Martwe od strony Izraela w 2006 r. poziom wód wynosił -418 m p.p.m.).

Średnie zasolenie wód Morza Martwego wynosi 31%, co odpowiada stężeniu 310 g/l. Jest to więc silnie zmineralizowana, nasycona solanka. Jej gęstość wynosi około $1,23$ g/cm³, co umożliwia swobodne unoszenie się kąpiących na powierzchni i praktycznie uniemożliwia nurkowanie. Głównymi elementami słonej wody w Morzu Martwym są: Na, Ca, K, Mg, Cl, SO₄, Rb i Br, a ich zawartość jest zmienna, w zależności od głębokości i rejonu. Ogólna zawartość soli tych pierwiastków szacowana jest na 5 mld ton. Są to głównie chlorki magnezu (48%) i sodu (27%). Średnia zawartość chlorku potasu w solance wynosi 1%, co pozwala na jego przemysłowe pozyskiwanie poprzez odparowanie wody w panwiach solnych.

W miejscu bazy wyprawy, w hotelu, w którym zakwaterowaliśmy się, brzeg Morza Martwego był nieciekawym, udostępnionym i przygotowanym, jako atrakcja turystyczna, czyli brodzenie w solance, „leżenie” na niej i taplanie się w słonym, czarnym błocie, „pachnącym” siarkowodorem (większość solarzy-górników zna ten „piękny” zapach zgniłej kapusty i zepsutych jaj). Prawdziwą geologię, współczesną sedimentację ewaporatów nad Morzem Martwym, krystalizację różnych soli na jego brzegach odnaleźliśmy dopiero kilkanaście czy kilkadziesiąt km na północ, podczas prywatnej wycieczki fakultatywnej. Był to raj dla solarzy, setki zdjęć i dziesiątki pobranych próbek do badań.

wide. The water mirror is situated at the lowest level on the land, -438.5 m below the sea level (as at December 2023) and the level continues to drop. During our first Expedition to the Dead Sea in 2006, visited from the Israeli side, the water mirror level reached -418 m below the sea level.

The average salinity rate of the Dead Sea amounts to 31%, corresponding to the density of 310 g/l. That indicates that water is highly mineralised and saturated with salt. The brine density amounts to 1.23 g/cm³ and that allows swimmers to float on the water surface and makes diving practically impossible. The main elements contained in the Dead Sea include Na, Ca, K, Mg, Cl, SO₄, Rb, and Br, with changing proportions of content, depending on the area and water depth. The general contents of the elements' salts are estimated at 5 billion metric tons. Magnesium and sodium chlorides (48 and 27%, respectively) are main salts occurring there. The average potassium chloride content amounts to 1% in brine, which proportion allows for industrial salt harvesting by evaporation in salt pans.

The Dead Sea coast was not much interesting at the location of our base hotel. The coast was made available and prepared for visitors, as a tourist attraction consisting in wading and lying in brine or wallowing in salty mud, smelling with hydrogen sulphide (the majority of our salt miners knew that “beautiful” smell of rotten cabbage and eggs). However, true geological formations, with present-day sedimentation of evaporites and crystallisation of various types of salts, could be found on the sea coast several dozens of kilometres north



Ryc. 13a, b, c, d. Krystalizacja minerałów solnych na brzegu Morza Martwego. Fot. M Hodbod.
Fig. 13a, b, c, d. Crystallization of salt minerals on the shore of the Dead Sea.





Ryc. 14. Amfiteatr rzymski w Ammanie (II w. n.e.), na tle miasta. Fot. M. Sosnowska.
Fig. 14. Roman amphitheater in Amman (2nd century AD), with the city in the background.

AMMAN

Po dwóch dniach prac badawczych nad Morzem Martwym, część ekipy kontynuowała badania lub raczyła się leczniczymi kąpielami solankowo-błotnymi, a część pojechała zwiedzić stolicę Jordanii – Amman. Miasto położone jest w północnej części królestwa, po wschodniej stronie rowu ryftowego Jordanu (i rzeki Jordan). Liczba ludności wynosi około 2,4 mln, z dużym udziałem uchodźców Palestyńskich.

Historia Ammanu sięga kilku tysięcy lat, a miasto jest wymieniane w Starym Testamencie pod nazwą Rabbat Ammon. Amman był stolicą Ammonitów. Podczas wieloletnich wojen plemion semickich Amman został zdobyty przez wojska króla Izraelitów Dawida (około 1100 r. p.n.e., ale data jest niepewna), który nawet przybrał tytuł „króla Ammonitów”. W III w. p.n.e. miasto wraz z podległymi ziemiami zostało podbite przez władcę Egiptu – Ptolemeusza II Filadelfosa. Na cześć tego faraona nazwę miasta zmieniono na Filadelfię. Pod tą nazwą Amman funkcjonował w czasach

during our optional tour. That was a real paradise for salt researchers who took hundreds of pictures and collected dozens of samples for subsequent studies.

AMMAN

After two days of research conducted on the Dead Sea, some analysts continued their studies or enjoyed the medicinal salt-and-mud baths, while the others decided to travel to Amman, the capital city of Jordan. The city is located in the northern part of the Kingdom, on the eastern side of the Jordan River Rift. The city is inhabited by ca. 2.4 million people, with a large proportion of the Palestinian refugees.

The history of Amman counts several thousands of years, and the city is mentioned in the Old Testament under the name of Rabbat Ammon. Amman was a capital of ancient Ammonites. After years of wars between the Semitic tribes, Amman was conquered by the armies of David, the King of Israelites (ca.1100 BC, although the date is not certain). King David even assumed the second title of the “King of Ammonites”.



Ryc. 15a. Część uczestników wyprawy na tle amfiteatru. Fot. K. Bukowski.
Fig. 15a. Some of the expedition participants with the amphitheater in the background.



Ryc. 15b. Polska flaga w amfiteatrze rzymskim w Ammanie. Fot. A. Sadowski.
Fig. 15b. Polish flag in the Roman amphitheater in Amman.



Ryc. 16. Ruiny świątyni Herkulesa w Ammanie, II w. n.e. Fot. M. Hobdod.
Fig. 16. Ruins of the Temple of Hercules in Amman, 2nd century AD.

rzymskich i bizantyńskich. W 635 r. miasto zostało zajęte przez Arabów, a w XVI w. przez Turków. Potem zostało całkowicie opuszczone i odbudowane dopiero w XIX w. przez Czerkiesów, przybyłych z Azji. W 1921 r. Amman został stolicą Emiratu Transjordanii, a od 1946 r. jest stolicą niepodległego Królestwa Jordanii.

Współczesny Amman nie zachwyca swym urokiem. Po prostu duże arabskie miasto, trochę przeludnione, bogate w centrum, ubogie na obrzeżach. Oczywiście turystom podoba się olbrzymi targ w centrum miasta. Nas jednak zachwyciły zabytki z początków naszej ery:

- Piękny, dobrze zachowany amfiteatr rzymski z II w. n.e., mogący pomieścić 6000 osób.
- Ruiny wielkiej świątyni Herkulesa, zbudowanej za panowania Marka Aureliusza, również z II w. n.e. Niestety została zniszczona podczas trzęsienia ziemi w 749 r. Opoдал świątyni zwiedziliśmy bardzo ciekawe Muzeum Archeologiczne, w którym eksponowane są zabytki z całego obszaru Jordanii, w tym część zwojów z Qumran oraz zabytki z Petry i Jerycha.

In the 3rd century BC, the city and the region were conquered by the ruler of Egypt, Ptolemy II Philadelphus. To honour the ruler, the name of the city was renamed Philadelphia. Amman used that name during Roman and Byzantine times. The city was occupied by the Arabs in 635, followed by the Turks in the 16th century. Later, it had become completely abandoned and rebuilt only in the 19th century by the Circassians who arrived from Asia. Amman became the capital of the Emirate of Transjordan in 1921, and the capital of the independent Kingdom of Jordan in 1946.

I did not find Amman attractive. It was just a large Arab city, somewhat overpopulated, rich in its centre and poor on its outskirts. Obviously, the tourists liked a huge bazaar in the city centre. We were rather enchanted by the landmarks originating from the beginning of our times:

- A beautiful and well-preserved Roman amphitheatre for 6.000 viewers of the 2nd century AD.
- Ruins of a large Temple of Hercules, erected under the rule of Marcus Aurelius, also from the 2nd century AD. Unfortunately, the temple was destroyed by an earthquake



Ryc. 17. Widok z góry Nebo na Ziemię Obiecaną czyli dolinę Jordanu. Mojżesz ujrzał ją stąd, ale nigdy nie dotknął. Fot. J. Wachowiak.

Fig. 17. A view on the Holy Land in the Jordan Valley from Mount Nebo. Moses saw that view but never entered the Promised Land.

JORDAN I GÓRA NEBO

W przedostatnim dniu naszej solnej przygody z żalem opuszczaliśmy piękny hotel na wybrzeżu i uroki Morza Martwego. Wracaliśmy do Akaby, aby kolejnego dnia odlecieć do Polski. Przed nami został jeszcze do odwiedzenia skrawek biblijnej historii sprzed tysięcy lat. To Betania, leżąca nad rzeką Jordan, gdzie ochrzczony został Jezus Chrystus oraz Góra Nebo, gdzie według biblii Mojżesz przyprowadził Izraelitów i ukazał im Ziemię Obiecaną.

Miejsce chrztu Jezusa jest obecnie nieco oddalone od rzeki Jordan, ale to nie przypadek ani błąd. Z badań archeologicznych wynika bowiem, że 2000 lat temu nurt rzeki Jordan biegł właśnie w tym miejscu. Największe ciekawostki tego miejsca czekały nas jednak w drodze do obecnego biegu rzeki. Najpierw zśliśmy niecierpliwie podnieceni, aby ujrzeć tę piękną, wielką biblijną rzekę, rozdzielającą od wieków Izrael od Jordanii. Schodząc jednak w jej dolinę nie było widać żadnej wody, tylko same zarośla. Po dotarciu na miejsce okazało się, że jest to mała, wąska rzeczka o szerokości kilku metrów z mętłą, żółto-zieloną wodą. Dlaczego? Bo większość jej wód

in 749. We also visited a nearby Archaeological Museum, with the landmarks collected from the whole country, including some scrolls from Qumran and exhibits from Petra i Jericho.

JORDAN I GÓRA NEBO

The day before our departure, we were sorry to leave our nice hotel situated at the beautiful coast of the Dead Sea. We went back to Aqaba to leave for Poland the day after. We could still visit small bits of biblical history: Bethany, situated on the Jordan River, where Jesus Christ was baptised, and Mount Nebo, the place where Moses brought the Israelites and showed them the Promised Land.

The place of baptism is presently situated away from the Jordan River, which is neither an accident nor error. Archaeological studies proved that the riverbed was in a different place 2,000 years ago. The most fascinating events awaited us on our way to the present riverbed. We were walking in excitement expecting a beautiful and large biblical river that has been separating Israel and Jordan for ages. However, when



Ryc. 18. Inskrybcja naskalna ku pamięci Mojżesza na górze Nebo. Fot. G. Czapowski.

Fig. 18. Rock inscription in memory of Moses on Mount Nebo.

zużywają w trakcie jej biegu Żydzi i Arabowie, mieszkający po obu jej brzegach. Stąd też tak mało wody z Jordanu wpływa do Morza Martwego, co przyspiesza jego wysychanie.

Kolejną ciekawostkę ujrzeliśmy w samej rzece. Mianowicie odnowienie chrztu. Tysiące ludzi z całego świata przyjeżdżają nad Jordan, aby zanurzyć się w białych, rytualnych szatach w jego wodach i odnowić chrzest tak, jak to uczynił Jan Jezusowi ponad 2 tys. lat temu. I tu znów zdziwienie; po naszej, jordańskiej stronie był tylko wąski dostęp do Jordanu,

we were walking down to the valley, we found that water was not visible, only bushes. We noticed rather a narrow stream, several metres wide, with turbid yellow-green water. Why so? Most of the water is collected in the upper sections of the river by the Jews and the Arabs living on the opposite river banks. Little water flows down to the Dead Sea and, as a result, the sea drying process is accelerated.

Another interesting event was observed by us on the Jordan River: baptismal renewal. Thousands of people arrive



Ryc. 19. Miejsce chrztu Jezusa wg badań archeologicznych. Fot. R. Stoicki.

Fig. 19. The place of Jesus' baptism according to archaeological research.

niewielki pomost i kilka osób zanurzających się w wodzie. Po stronie izraelskiej ceremonię odnowienia chrztu kultywowały setki wiernych, a infrastruktura przygotowana dla pielgrzymów była podobna do tej z polskich sanktuariów czy innych miejsc kultu religijnego na świecie.

Wielu z nas miało pretensje do naszego przewodnika, że nam nie powiedział wcześniej o tej ceremonii w Jordanii. Chętnie byśmy też odnowili chrzest, z czystej duchowej fascynacji mistycznym urokiem tego miejsca, ale nie mieliśmy odpowiednich strojów rytualnych, ani nawet zwykłych kąpielówek.

Znad Jordanu wspięliśmy się autokarem na górę Nebo. To właśnie do tego biblijnego miejsca Mojżesz przyprowadził swój lud około 1250 r. p.n.e., po ucieczce z egipskiej niewoli i 40-letniej tułaczce po pustyni. Stąd pokazał Izraelitom ziemię obiecaną im przez Boga – zieloną i kwitnącą dolinę Jordanu. Tu też, zgodnie z proroctwem, zakończył swoją misję i „odszedł” do Pana.

To już koniec naszej geologiczno-solnej wyprawy. Piękną przygodę na pustyniach Jordanii, wśród skał sprzed setek

there from the whole world to dive in the Jordan River in white ritual gowns to renew baptismal vows, just as St. John did with Jesus more than two thousand years ago. To our surprise, only a narrow access route was leading to the river on our Jordanian side, with a small landing and several people diving in the river. On the Israeli side, however, the baptismal renewal ceremonies were cultivated by hundreds of believers. The local infrastructure was well developed for the pilgrims there, similarly to the Polish religious shrines or other places of religious cults around the world.

Many people of our group complained to our guide that he had not mentioned the baptismal ceremonies taking place on the Jordan River in advance. We would be willing to participate for pure spiritual fascination with the charm of the place, but we had no proper robes or even regular bathing suits.

We left the Jordan River banks and took our coach to Mount Nebo. That is where Moses brought his people about 1250 BC after escape from the Egyptian slavery and a 40-year long wandering on the desert. Standing on Mount Nebo, Moses showed the land promised by God to the Israel-



Ryc. 20. Widok z góry na rzekę (strumyk) Jordan. Fot. J. Wachowiak.
Fig. 20. View from above of the Jordan River (stream).



Ryc. 21. Odnowienie chrztu w Jordanie po stronie izraelskiej. Na ten akt zjeżdżają chrześcijanie z całego świata. Granica pomiędzy Jordanią a Izraelem biegnie przez środek rzeki. Fot. K. Bukowski.

Fig. 21. Renewal of Baptismal Vows in the Jordan River on the Israeli side. Christians from all around the world arrive there to celebrate. The border between Jordan and Israel runs in the middle of the river.



Ryc. 22. Członkowie wyprawy żegnają czytelników na tle zabytków Jordanii. Fot. T. Tobiła
Fig. 22. The expedition members bid farewell to the readers in front of the Jordanian landmarks.

milionów lat, budowli sprzed tysięcy lat, solnych ewaporatów Morza Martwego i jego słono-gorzkiej wody. W przeciwieństwie do solanki z Morza Martwego nasze wrażenia są słodkie, radosne i słoneczne i takie z nami pozostaną na zawsze.

Do spotkania na kolejnej wyprawie!

Jacek Wachowiak
Organizator i uczestnik wyprawy

ites: a green and blooming Jordan River Valley. According to prophesy, Moses completed his mission and died there.

That was the end of our exploration of geological and salt formations in Jordan. It was rather a pleasant adventure on the deserts of Jordan, among the rocks surviving for millions of years and landmarks erected thousands of years ago, as well as enjoying salt evaporites and salty and bitter waters. In opposition to the Dead Sea brine, our memories will remain sweet, joyful, and serene forever.

See you at our next Expedition!

Jacek Wachowiak
Organiser and Participant

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 KOWALSKI¹, Jacek NOWAK², Iwona ROŚ²
3. Afiliacje autorów czcionką Times New Roman 11, np.:
¹IKS Solino S.A. ul. Św. Ducha 26a, 88-100 Inowrocław.
E-mail: m.kowal@wp.pl
²Akademia 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 rycina (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*)

Zbiorczy 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

Zbiorczy 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 sztyńskie piętro soli młodszych w regionie kujawskim. *Prace Geologiczne*, 75: 7-67.

CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., MISIEK G., 2007. Podział i występowanie górnopemskich 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. Dodatkowe wzorce można zaczerpnąć z opublikowanych w tomie artykułów.

GUIDELINES FOR AUTHORS

The papers received by the *Salt Review* Editors will be published in the following sections:

I. Papers

II. Notices, Reports, and Opinions

I. Papers – Composed in MS Word, font: Times New Roman

1. Title in Polish and English (font: Times New Roman 14)
2. Full first names and surnames of all the authors (Times New Roman 12)
3. Names and addresses of the institutions employing the authors (Times New Roman 11)
4. Body of the Paper should contain:
 - a. Abstract and Key Words in Polish and English
 - b. Content in Polish and English
 - c. Summary in Polish and English
 - d. References
 - e. Captions of Figures
 - f. Captions of Tables

Examples and rules of quotes used in the body of the paper:

- ...should be counted as original inclusions (Roedder, 1984)...
- ...important role in arc magma generation (e.g. Ulmer & Trommsdorff, 1995; Scambelluri et al., 2004) by feeding...

5. Figures. A Figure can be composed of one or several elements, either black-and-white or in colour, either inserted into the text and enclosed below, saved in Corel Draw, version up to X5, in TIF, BMP, PDF or JPG formats, with the min. resolution of 300 dpi.

Captions in Polish and English (in *italic*), e.g.:

Ryc. 2. Profil litostratygraficzny.....

Fig. 2. Lithostratigraphic profile.....

List of Figures should be placed at the end of the body of the paper.

6. Tables. A Table can be either inserted into the body of the text and enclosed below (preferred format: MS Excel). Tables should be numbered with Arabic numerals.

Captions in Polish and English (in *italic*), e.g.:

Tabela 1. Rozkład granulometryczny.....

Table 1. Grain size distribution.....

Phrases within the Tables should use fonts that remain readable after possible reduction.

List of Tables should be placed at the end of the body of the paper.

7. References. The list of References may include exclusively the works quoted in the body of the paper. Each item should contain: The surnames and initials of the first names of all the authors, year of publication, title, journal (in *italic*), volume number, issue number (in parentheses), page numbers. In the case of archival issues, give the name of the library and the archive number.

LITERATURA / REFERENCES

BURNS P.C., CARPENTER M.A., 1997. Phase transition in the series boracite-trembathite-congolite.... *Canadian Mineralogist*, 35: 189-202.

WACHOWIAK J., PAWLIKOWSKI M., 2011. Mineralogical and petrographic studies of the Zechstein evaporites in the Mogilno salt diapir. *Investgas S.A. Archives*, 4/2011: 1-65.

II. Notices, Reports, and Opinions

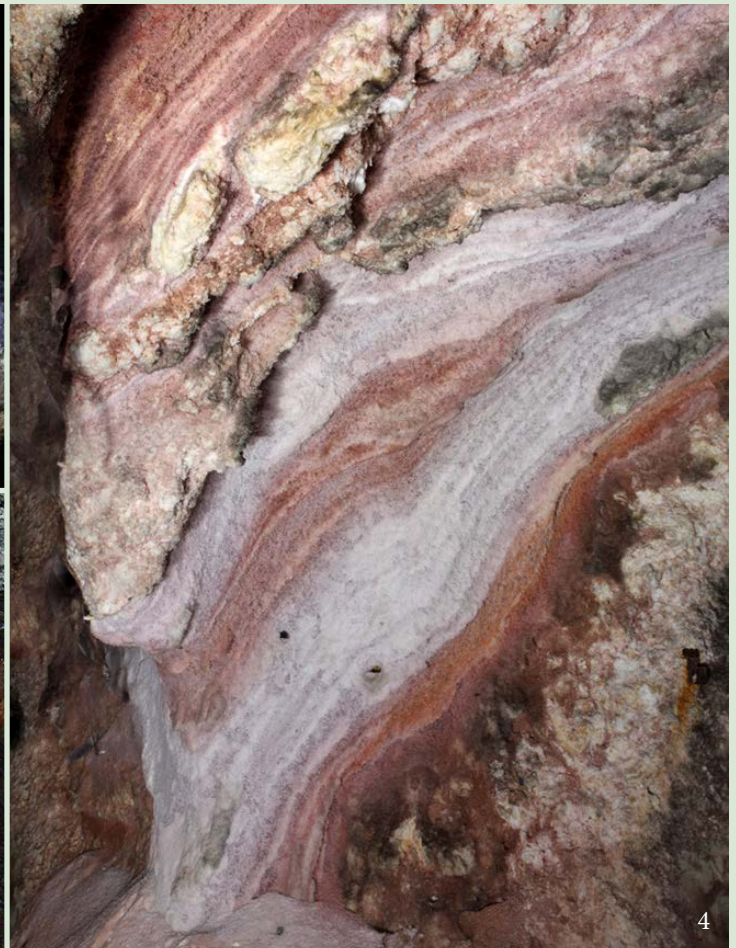
The contents placed in this section will refer to the events taking place in salt mining in Poland and abroad (conferences, expeditions, field trips, biographic notes, short reviews etc.). The paper structure (e.g. introduction or key words) is not required here. Text format will be the same as for the body of a paper.

Remarks

The *Salt Review* Editors request the authors to observe the rules strictly. Additional examples can be found in previous *Salt Review* volumes.

SKARBY SOLNYCH PODZIEMI – KOPALNIA SOLI KŁODAWA

KŁODAWA SALT MINE: THE TREASURES OF UNDERGROUND WORKINGS



1. Bryła żółtego karnalitu.
A chunk of yellow carnallite. Photo by Janina Wrzak
2. Żyła epigenetyczna niebieskiego halitu, sylwinu i polihalitu.
Epigenetic veins of blue halite, sylvine, and polyhalite. Photo by Janina Wrzak
3. Kryształ halitu niebieskiego.
A sample of blue halite. Coll. J. Wachowiak (1987). Photo by Janina Wrzak
4. „Wodospad” soli potasowych (wietrzejąca warstwa karnalitowca kizerytowego).
A potassium salt cascade of weathering kieserite carnallite layers. Photo by Janina Wrzak
5. Idealny sześcienny kryształ halitu z ciekło-gazowymi inkluzjami.
An ideal cubical crystal of halite, with liquid-gaseous inclusions. Coll. J. Wachowiak (1985). Photo by Janina Wrzak