

# PRZEGLĄD SOLNY

---

## SALT REVIEW

TOM XVI

2021/2022

ROCZNIK POLSKIEGO STOWARZYSZENIA Górnictwa Solnego

YEARBOOK OF POLISH SALT MINING ASSOCIATION



Kraków

---

**RADA NAUKOWA / EDITORIAL ADVISORY BOARD**

---

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

---

**ZESPÓŁ REDAKCYJNY / EDITORIAL COMMITTEE**

---

**Jacek Wachowiak**, 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, 2022

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

Jacek Wachowiak / Artur Kozioł

**Fotografia na okładce / Cover photo**

Wysad Jashak, Iran. Fot. S. Burliga (podczas wyprawy Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego do Iranu w 2018 r.).  
*Jashak Salt Dome, Iran. Photo by S. Burliga (during the Polish Salt Mining Association's expedition to Iran in 2018).*

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

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

**ISSN 2300-9349**

**Nakład: 70 egz.**

**SPONSORZY:**



KGHM METRACO



uponor



## OD REDAKCJI / INTRODUCTION

*Szanowni Czytelnicy!*

Oddajemy w Państwa ręce 16 tom *Przeglądu Solnego*.

*Przegląd Solny* jest rocznikiem wydawanym przez Polskie Stowarzyszenie Górnictwa Solnego. Publikowane w nim prace dotyczą zagadnień polskiego i światowego solnictwa z zakresu geologii, górnictwa, przemysłu solnego i dyscyplin pokrewnych. Zamieszczone artykuły zostały opracowane w języku polskim i angielskim. Wszystkie prace zostały poddane ocenie dwóch recenzentów.

Większość zagadnień opublikowanych w niniejszym tomie była przedmiotem prezentacji podczas XXV i XXVI Międzynarodowego Sympozjum Solnego *Quo Vadis Sal* 2021 i 2022.

Recenzentami artykułów zamieszczonych w Tomie 16 byli: Krzysztof Bukowski (AGH Kraków), Katarzyna Cyran (AGH Kraków), Czapowski Grzegorz (PIG-PIB Warszawa), Piotr Kuciałka (CBW Engineering Kanada), Agnieszka Maj (IMGPAN Kraków), Katarzyna Poborska-Młynarska (AGH Kraków), Tomasz Tobała (AGH Kraków), Kazimierz Urbańczyk, Jacek Wachowiak (Geosalt).

W imieniu Redakcji *Przeglądu Solnego* serdecznie dziękuję autorom, recenzentom i wszystkim osobom współpracującym za poświęcony czas i pracę włożoną w przygotowanie niniejszego tomu.

Serdecznie dziękuję naszym Partnerom i sponsorom: **KGHM Polska Miedź S.A., Kopalnia Soli Kłodawa S.A., Kopalnia Soli Wieliczka S.A., KGHM Metraco S.A., Uponor Infra Sp. z o.o., UOS Drilling S.A., Sandvik Polska Sp. z o.o.** za udostępnienie materiałów do publikacji oraz wsparcie logistyczne, merytoryczne i finansowe organizacji XXV Międzynarodowego Sympozjum Solnego „Quo Vadis Sal”, którego elementem było opracowanie i wydanie 16 tomu *Przeglądu Solnego*.

Jestem przekonany, że nasza działalność przyniesie realne korzyści polskiemu górnictwu solnemu a potomnym pozostawi cenną informację naukowo-techniczną.

*Dear Readers,*

We are passing to you the sixteenth volume of the *Salt Review*, which is the year book published by the Polish Salt Mining Association.

The works contributed to the *Salt Review* concern the issues relating to salt mining in Poland and abroad, with the concentration on geology, mining, industry, and the associated fields. The papers are printed either in Polish and English versions. All the works have been appraised by two peer reviewers.

Most of the topics published in this volume were presented at the XXV and XXVI *Quo Vadis Sal* International Salt Symposium 2021 and 2022.

The following were the Reviewers of the papers published in the 16 Volume: Krzysztof Bukowski (AGH Kraków), Katarzyna Cyran (AGH Kraków), Czapowski Grzegorz (PIG-PIB Warszawa), Piotr Kuciałka (CBW Engineering Kanada), Agnieszka Maj (IMGPAN Kraków), Katarzyna Poborska-Młynarska (AGH Kraków), Tomasz Tobała (AGH Kraków), Kazimierz Urbańczyk, Jacek Wachowiak (Geosalt).

On behalf of the *Salt Review* editors, I wish to thank cordially all the Authors, Reviewers, and other Associates for their sincere dedication to the preparation of the present volume.

I also take this opportunity to thank our Partners and Sponsors: **KGHM Polska Miedź S.A., Kopalnia Soli Kłodawa S.A., Kopalnia Soli Wieliczka S.A., KGHM Metraco S.A., Uponor Infra Sp. z o.o., UOS Drilling S.A., Sandvik Polska Sp. z o.o.** for their assistance in the process of data collection by the Authors and making materials available for research publications, as well as logistic, substantive, and financial support offered for the operations conducted by the Polish Salt Mining Association.

I am convinced that our activities will bring measurable benefits to the Polish salt mining business and supply valuable scholarly and technological information.

Jacek Wachowiak

*Redaktor Naczelny / Editor-in-Chief*



## SPIS TREŚCI / CONTENTS

## I. ARTYKUŁY / PAPERS

- 5** Grzegorz CZAPOWSKI  
Lokalizacja kavern magazynowych w utworach solnych w Polsce – stare i nowe opcje  
*Selection of sites for underground storage facilities, within the salt deposits in Poland: previous and new proposals*
- 20** Józef BIENIASZ, Jakub PIETRAS,  
Jolanta MARCOLA-SADOWSKA, Damian KURDEK  
Zmienność zjawiska zaciskania wyrobisk komorowych w przestrzeni pola nr 2 w Kopalni Soli „Kłodawa”  
*Variability of the convergence phenomenon in the post-exploitation voids of the mining areas in Field 2 of the “Kłodawa” Salt Mine*
- 29** Leszek LANKOF, Radosław TARKOWSKI  
Potencjał magazynowy wodoru w permskich złożach soli kamiennej w Polsce  
*Hydrogen storage potential in Permian rock salts in Poland*
- 43** Grzegorz CZAPOWSKI, Hanna TOMASSI-MORAWIEC,  
Jacek WACHOWIAK  
Wybrane pierwiastki śladowe w górnopermskich (cechsztyńskich) utworach potasonośnych w Polsce – czy warto je stąd pozyskiwać?  
*Selected trace elements in the Upper Permian (Zechstein) potash-bearing deposits in Poland – is their exploitation from salts economically plausible?*
- 67** Kazimierz URBAŃCZYK  
Ługowanie w złożach małej miąższości – kawerny poziome i ich modelowanie (Proces ługowania kavern solnych, część V)  
*Leaching caverns in thin-bedded deposits: horizontal cavern modelling (Salt-cavern leaching process, Part V)*
- 92** Justyna NOWIŃSKA-JARZĘBIŃSKA,  
Natalia WALCZAK-TORBA  
Badania mineralogiczno-petrograficzne i ługownicze prób soli ze złoża Sorkol (Kazachstan)  
*Mineralogical-petrographic and leaching tests of rock salt samples from the Sorkol deposit (Kazakhstan)*
- 104** Jerzy PRZYBYŁO  
Fotografia w wielickiej kopalni – od zdjęć Awita Szuberta do skaningu laserowego (na przykładzie prywatnej kolekcji Jerzego Przybyły)  
*Photographs of the “Wieliczka” Salt Mine: from the photographs taken by Awit Szubert to laser scanning images (Based on the private collections of Jerzy Przybyły)*
- 141** Marta HODBOD  
Sole potasowo-magnezowe – polskie zasoby na tle gospodarki światowej  
*Potassium-magnesium salts – Polish deposits in global economy*
- 148** Małgorzata GIEREK, Andrzej GARDELA,  
Aleksandra BASIURA, Paulina CYRAN  
Monitoring ekologiczny zagrożeń gazowych dla obszarów objętych działalnością związaną z magazynowaniem mieszaniny gazu ziemnego, wodoru i biometanu oraz czystego wodoru  
*Ecological monitoring of gas hazards on the areas of mining activities related to the storage of the mixtures of natural gas, hydrogen, and biomethane, or of pure hydrogen*
- 153** Kajetan D’OBYRN, Waclaw ANDRUSIKIEWICZ,  
Katarzyna CYRAN, Waldemar STASZCZAK  
Ograniczenie zagrożenia wodnego w Kopalni Soli „Kłodawa” S.A. poprzez likwidację wyrobisk poza filarem brzeżnym w Polu nr 1 na poz. 600 m  
*Reduction of water hazard in the “Kłodawa” S.A. Salt Mine by liquidation of the workings outside the salt dome’s border pillar in Field 1, Level 600 m*
- 163** Grzegorz CZAPOWSKI, Zbigniew MAŁOLEPSZY,  
Ewa SZYNKARUK, Jacek CHEŁMIŃSKI, Łukasz NOWACKI  
Paleofacie i paleogeografia górnopermskich (cechsztyńskich) basenów ewaporatowych w rejonie Gorzowa Wielkopolskiego (Zachodnia Polska)  
*Palaeofacies and palaeogeography of Upper Permian (Zechstein) evaporite basins in the Gorzów Wielkopolski area (western Poland)*
- 168** Mateusz ŚWIERK, Stanisław BURLIGA  
Halit w poziomie eksploatacyjnym złóż rud miedzi na monoklinie przedsudeckiej – przykład współczesnej mineralizacji chlorkowej  
*Halite in mine drifts in copper ore deposits over the Fore-Sudetic Homocline: an example of modern chloride mineralization*
- 171** Yurij V. SADOVYI, Anatolij R. GALAMAY,  
Krzysztof BUKOWSKI  
Problemy środowiskowe i społeczno-gospodarcze spowodowane działalnością odkrywki Dombrowski zakładu potasowo-magnezowego Kałusz oraz sposoby ich rozwiązania w kontekście odrodzenia przemysłu potasowego na Podkarpackiu ukraińskim  
*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*
- 176** Krzysztof BUKOWSKI, Hubert KIERSNOWSKI  
Przykłady współczesnego diapiryzmu związanego z eokambryjską formacją solonośną Ara w Omanie – miejsce rekomendowane dla przyszłych badań Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego  
*Examples of recent diapirism related to the Eocambrian Ara Salt Formation in Oman – site recommended for future study by the Polish Salt Mining Association*

## II. KOMUNIKATY / NOTICES

- 181** Profesor Volodymyr Mychailovych Kovalevych (1941–2021)





## I. ARTYKUŁY / PAPERS

# Lokalizacja kavern magazynowych w utworach solnych w Polsce – stare i nowe opcje

## Selection of sites for underground storage facilities, within the salt deposits in Poland: previous and new proposals

Grzegorz CZAPOWSKI

Państwowy Instytut Geologiczny-Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; grzegorz.czapowski@pgi.gov.pl  
The Polish Geological Institute - National Research Institute, Rakowiecka 4, 00-975 Warsaw, grzegorz.czapowski@pgi.gov.pl

### STRESZCZENIE

Niepewna światowa sytuacja geopolityczna, niestabilne dostawy surowców energetycznych i wojna w Ukrainie zmusza do myślenia o zabezpieczeniu istniejących i przyszłych zapasów węglowodorów energetycznych (gaz, ropa naftowa) poprzez gromadzenie ich w podziemnych magazynach. Najbardziej efektywnymi (szybki i bez strat odbiór) magazynami są kaverny solne zaś Polska dysponuje wysokim potencjałem budowy takich magazynów w kompleksach soli kamiennych cechsztynu, występujących na 2/3 obszaru kraju.

Potencjalne miejsca lokalizacji magazynów kavernowych występują w pokładowych wystąpieniach soli kamiennej w północnej Polsce (5 obszarów, 3 udokumentowane złoża soli i 18 pojedynczych otworów wiertniczych) w południowo-zachodniej części kraju (11 obszarów, jedno udokumentowane złożo soli i 9 pojedynczych otworów wiertniczych). Z kolei jako potencjalne lokalizacje wytypowano 7 struktur wysadowych występujących w regionie szczecińskim w NW Polsce, a na terenie Polski centralnej – 4 wysady. Pokłady i wysady solne, położone nad Bałtykiem mogą korzystać z wody morskiej do ługowania kavern i zrzucać wytworzoną solankę do otwartego morza. Niski stopień geotermiczny tych terenów sprzyja wydłużeniu czasu funkcjonowania kavern. Pozostałe wskazane obiekty muszą korzystać z ograniczonych zasobów wód powierzchniowych zaś solanka wymaga zutylizowania w istniejących lub zbudowanych warzelniach.

**Słowa kluczowe:** kaverny magazynowe, obszary potencjalne, sole kamienne, Polska

### ABSTRACT

Unstable geopolitical situation and uncertain deliveries of energy hydrocarbons (gas and crude oil), as well as the war in Ukraine, force us to consider the options of the assurance of own current and future media reserves by storing media in the underground facilities. The most effective storage facilities are provided by salt caverns (with easy injection and extraction of media, without losses). Salt caverns are leached within the Zechstein rock salt formations, occurring on the 2/3 of the territory of Poland. Potential sites of future cavern storage facility placement have been identified within the rock salt seams occurring in northern Poland (5 areas, 3 documented salt deposits, and 18 boreholes) and in the south-western Poland (11 areas, a single documented salt deposit, and 9 boreholes). Other selected sites include 7 salt domes in the Szczecin region in NW Poland and 4 other ones in central Poland. During the construction of underground facilities close to the Baltic coast, sea water can be used for cavern leaching purposes, with brine dumping directly into the open sea. A low geothermal gradient of those areas will allow for long periods of facility operation. Facilities located on other geological sites will have to use leaching liquids collected from limited resources of surface waters, with brine to be utilised either in the existing or newly built salt-works.

**Key words:** underground storage facilities, prospective sites, rock salts, Poland

## WSTĘP

Bezpieczne magazynowanie mediów energetycznych (węglowodory ciekłe i gazowe, wodór) jest kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego każdego państwa. Media te magazynuje się w zbiornikach powierzchniowych bądź w naturalnych lub sztucznych podziemnych pustkach skalnych (np. Czapowski, 2006; Karnkowski, Czapowski, 2007; Reinisch, 2000). Te ostatnie zapewniają większe bezpieczeństwo zachowania zgromadzonych zapasów w sytuacji naturalnych katastrof (np. pożary czy powódzie) oraz konfliktów zbrojnych. Z tego względu optymalnym typem podziemnych magazynów są kwerny, wyługowane w masywach soli kamiennych. Magazyny te pozwalają przechowywać media energetyczne ciekłe i gazowe, cechują się wysoką efektywnością (szybkie zatłaczanie i odzysk niemal w całości gromadzonego medium – np. Brańka, 2009) choć ich objętość operacyjna jest znacznie mniejsza niż użytkowanych jako magazyny gazu szczerpanych złóż węglowodorów i poziomów wodonośnych (np. Reinisch, 2000). Kawernowe magazyny świetnie funkcjonują jako magazyny operacyjne, szybko i bez strat dostarczające gromadzony produkt zależnie od potrzeb.

Dyskusja o celowości budowy takich magazynów w Polsce trwa od ponad pół wieku, owocując licznymi publikacjami i opracowaniami eksperckimi (np. Brańka, 2008; Brańka i in., 1978; Chromik, 2016; Czapowski, 2019; Czapowski, Tarkowski, 2018; Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2012; Garlicki, 1999; Gąska i in., 2012; Grabania, 1992; Jasiński, 2004; Kaliski i in., 2013; Kaliski, Sikora, 2013; Kłeczek i in., 2005; Lankof, 2018; Lankof i in., 2016; Laskowska i in., 2009; Maciejewski, 2008; Reinisch, 2000; Stopa i in., 2007; Ślizowski i in., 2006, 2010; Ślizowski, Urbańczyk, 2011; Zejlaś, 2020).

Dotychczas powstały 3 magazyny typu kawernowego (Ryc. 1): Kawernowy Podziemny Magazyn Gazu (KPMG) Mogilno w wydzie solnym Mogilno (np. Drogowski, Tadych, 2006; Gąska, 2000; Gąska i in., 2012), Podziemny Magazyn Gazu (PMG) Kosakowo w pokładowym złożu soli kamiennej Mechelinki (np. Gąska, 2000; Gąska i in., 2012; Laskowska i in., 2009) oraz Podziemny Magazyn Ropy i Paliw (PMRiP) Góra w zaadoptowanych na magazyny kawernach eksploatacyjnych w wydzie solnym Góra (np. Drogowski i Tadych, 2006; Gąska i in., 2012; Kunstman i in., 2002).

Obecna niepewna sytuacja geopolityczna, tocząca się wojna w sąsiedniej Ukrainie i brak gwarancji zapewnienia stałości dostaw węglowodorów (gazu, ropy) zmusza do myślenia o zabezpieczeniu posiadanych i przyszłych ich zapasów. Takimi rozwiązaniem jest budowa kolejnych magazynów kawernowych, dla lokalizacji których Polska ma dość sprzyjające warunki geologiczne (np. Czapowski, Bukowski, 2010; Czapowski i in., 2020). Wystarczy bowiem jedna konwencjonalna rakieta o większym zasięgu by powierzchniowe

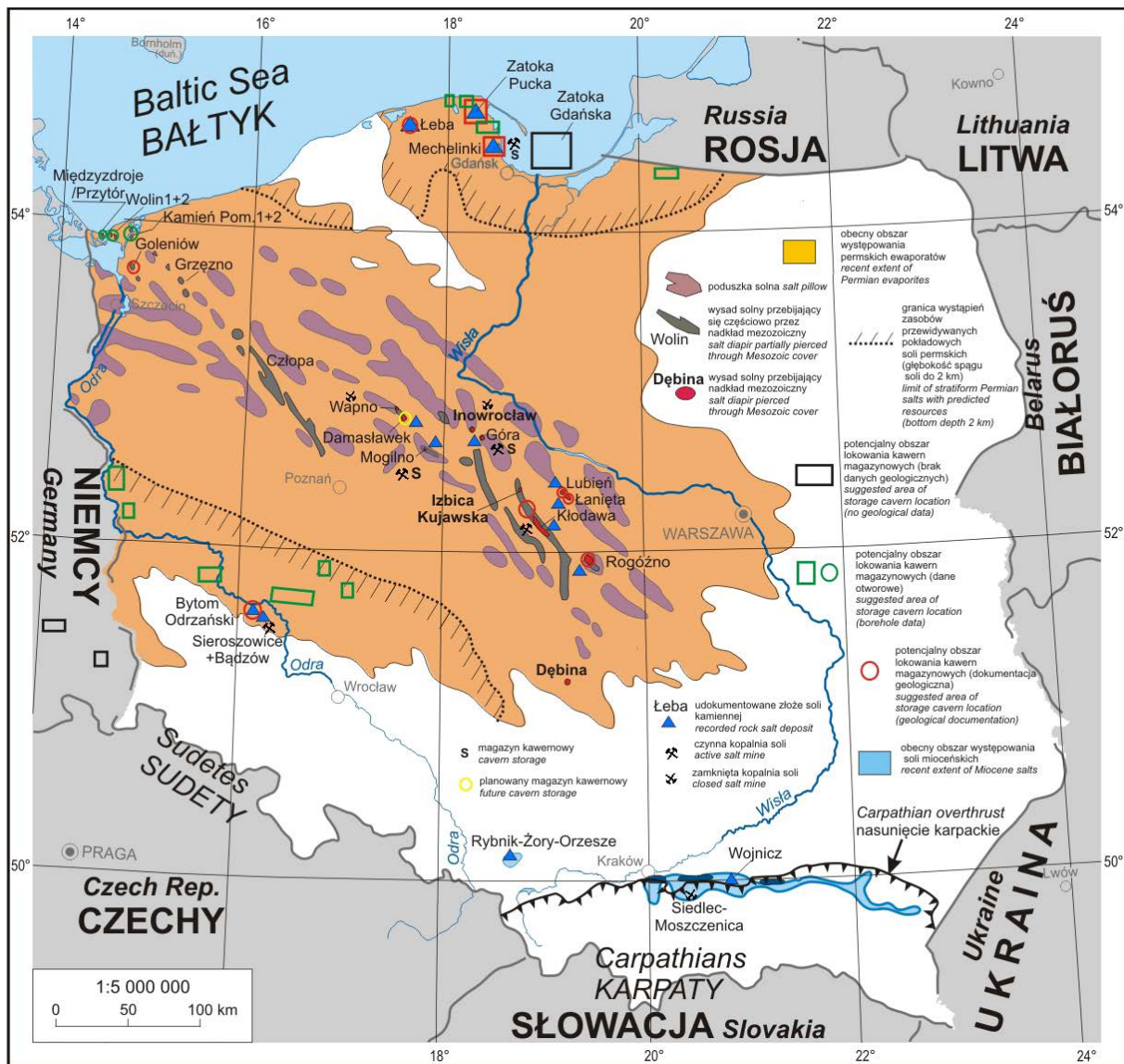
## INTRODUCTION

Safe storage of energy media (liquid and gaseous hydrocarbons and hydrogen) is of key importance for the assurance of energy security in each country. Such media are stored either in surface tanks or natural and artificial underground rock voids (e.g. Czapowski 2006; Karnkowski, Czapowski 2007; Reinisch 2000). Natural or artificial caverns assure safety of media in case of disasters (fire or flood) or armed conflicts. For that reason, the best choice is to construct underground storage facilities in the caverns leached in salt rock formations. Such facilities allow for safekeeping of liquid and gaseous media with high effectiveness, owing to easy injection and extraction of nearly the whole volume of the medium (e.g. Brańka 2009), although the operating volume is much lower than that of the storages located within depleted hydrocarbon or aquifer reservoirs (e.g. Reinisch 2000). Cavern storages are efficient as operating facilities, providing media quickly and without losses, depending on needs.

The discussion on the necessity to construct underground storage facilities in Poland has continued for more than half a century, bringing a number of publications and expert studies (e.g. Brańka 2008; Brańka et al. 1978; Chromik 2016; Czapowski 2019; Czapowski, Tarkowski 2018; Czapowski, Tomassi-Morawiec 2012; Garlicki 1999; Gąska et al. 2012; Grabania 1992; Jasiński 2004; Kaliski et al. 2013; Kaliski, Sikora 2013; Kłeczek et al. 2005; Lankof 2018; Lankof et al. 2016; Laskowska et al. 2009; Maciejewski 2008; Reinisch 2000; Stopa et al. 2007; Ślizowski et al. 2006, 2010; Ślizowski, Urbańczyk 2011; Zejlaś 2020).

By now, three underground cavern storage facilities have been constructed in Poland (Fig. 1): KPMG Mogilno, within the Mogilno salt dome (e.g. Drogowski, Tadych 2006; Gąska 2000; Gąska et al. 2012), PMG Kosakowo, within the stratiform rock salt deposit of Mechelinki (e.g. Gąska 2000; Gąska et al. 2012; Laskowska et al. 2009), and the PMRiP Góra within the extracted salt caverns adapted for storage purposes, within the Góra salt dome (e.g. Drogowski and Tadych 2006; Gąska et al. 2012; Kunstman et al. 2002).

The current uncertain geopolitical situation, with the war raging in neighbouring Ukraine and discontinued deliveries of hydrocarbons (natural gas and crude oil) forces us to think about assuring both current and future energy media reserves. The construction of new underground facilities is a solution to the current problems. Poland enjoys quite favourable geological conditions for the selection of storage sites (e.g. Czapowski, Bukowski 2010; Czapowski et al. 2020). Unfortunately, one conventional long-range missile would be enough to destroy surface tanks, e.g. those in the Świnoujście gas terminal, resulting in a huge humanitarian and ecological catastrophe. However, in the case of the underground facilities, only the surface infrastructure would



Ryc. 1. Potencjalne miejsca lokowania kawern magazynowych w utworach soli kamiennych w Polsce.

Fig. 1. Suggested sites for underground storage facilities, within rock salt formations in Poland.

magazyny, np. w gazoporcie w Świnoujściu, przestały istnieć, powodując olbrzymią katastrofę humanitarną i ekologiczną. W przypadku podziemnych magazynów zniszczeniu ulega jedynie stosunkowo niewielka infrastruktura powierzchniowa, magazynowane medium pozostaje nietknięte.

## GEOLOGIA I KWERNY SOLNE

Wybór miejsca budowy kawern magazynowych w obrębie górotworu solnego wymaga dobrej znajomości jego budowy wewnętrznej. Kawerny muszą być ulokowane w miarę jednorodnym masywie soli kamienniej, z jak najmniejszym udziałem domieszek i przewarstwień skał, utrudniających ługowanie pustek, takich jak węglany, siarczany, sole potasowo-magnezowe (K-Mg) i skały silikoklastyczne (np. Cała i in., 2018; Cyran, 2020, 2021; Kalaga, Rałowicz, 1994; Kunstman i in., 2002, 2009; Ślizowski i in., 2011). Na obszarze Polski dogodne warunki do takiej lokalizacji oferują miąższe

be destroyed to some extent, without damage to the media stored underground.

## GEOLOGICAL CONSIDERATIONS FOR SALT CAVERN SITE SELECTION

The selection of the sites for the construction of the underground storage facilities, within the rock salt masses, requires good knowledge of the internal rock structure. A cavern must be leached within a fairly uniform rock salt formation, representing the lowest possible proportion of admixtures and limited rock interbeds, involving carbonates, sulphates, potassium and magnesium salts (K-Mg), or siliciclastic rocks, that would make the cavern leaching process difficult (e.g. Cała et al. 2018; Cyran 2020, 2021; Kalaga, Rałowicz 1994; Kunstman et al. 2002, 2009; Ślizowski et al. 2011). Favourable conditions for cavern siting in Poland are offered by thick Zechstein (Upper Permian) rock salt beds of cyclothem PZ1, PZ2,



wystąpienia cechszczyńskich (górnym perm) cyklotemów PZ1, PZ2 i PZ3, występujące na blisko 2/3 terytorium Polski w formie pokładów, poduszek i wysadów solnych (np. Czapowski, 2019; Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2012; Czapowski, Tarkowski, 2018, 2020; Lankof, Tarkowski, 2020; Ślizowski, Urbańczyk 2011; Tarkowski, Czapowski, 2018, 2019). Szereg z tych wystąpień zostało udokumentowane jako złoża soli kamiennej i częściowo zagospodarowane (np. Szuflicki i in., 2021; Ryc. 1), w przypadku innych dokonano wstępnego oszacowania zasobów (np. Czapowski i in., 2020).

Trudności w wyborze lokalizacji kawern zależnie od stopnia komplikacji budowy geologicznej górotworu solnego ilustruje rycina 2.

Różna podatność skał na ługowanie – bardzo wysoka w przypadku chlorkowych soli K-Mg, wysoka dla soli kamiennej i brak ługowalności węglanów, siarczanów i klastyków – powoduje, że operatorzy otworów ługowniczych muszą staranie omijać tym procesem wspomniane przewarstwienia aby otrzymać zaplanowany optymalny kształt kawern magazynowych. W przypadku wystąpień pokładowych soli kamiennej projektowane kawerny lokuje się w pokładzie tej soli z pominięciem możliwych przewarstwień soli K-Mg i skał niesolnych, zachowując ochronne półki i filary pomiędzy wyrobiskami (Ryc. 2A). Prosta budowa takich złóż umożliwia wykonanie licznych kawern lecz o wysokości (a zarazem pojemności) limitowanej miąższością dostępnego pokładu soli kamiennej (w warunkach polskich jest to zwykle do 300 m – np. Czapowski, 2019).

Trudniejsze warunki występują w poduszkach solnych, których budowa wewnętrzna jest bardziej skomplikowana możliwymi powtórzeniami i deformacjami warstw soli K-Mg i skał niesolnych, zaś stopień jej rozpoznania jest trudniejszy. Rekompensuje to częściowo większa lokalnie miąższość dostępnego pokładu soli kamiennej, umożliwiającą wykonanie kawern o większej wysokości i pojemności (Ryc. 2B).

Największe wyzwanie dla konstruktorów kawern stanowią wysady solne o wyjątkowo skomplikowanej budowie wewnętrznej, praktycznie nieznaną bez wykonania szeregu

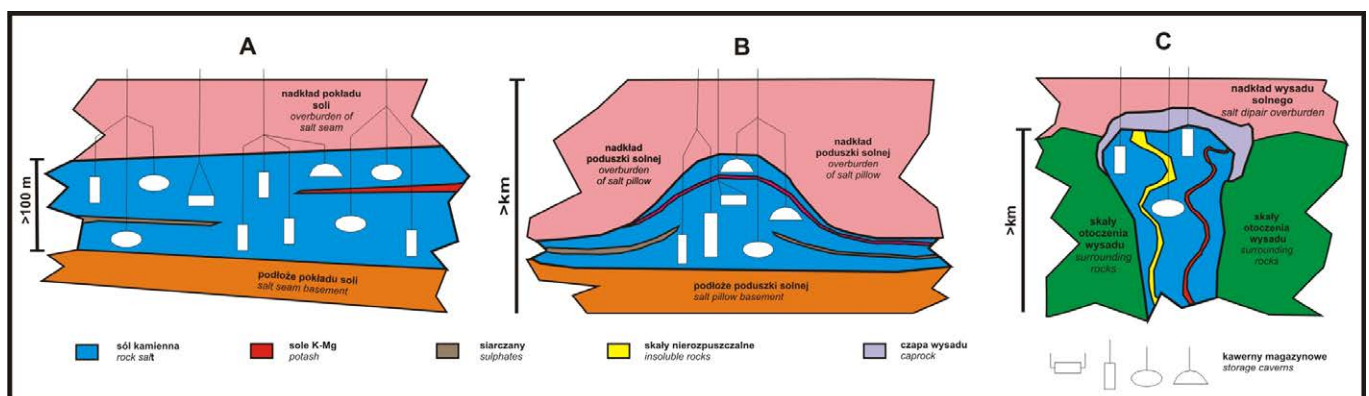
and PZ3, occurring on nearly 2/3 of the territory of Poland, in the form of beds, pillows, or salt domes (e.g. Czapowski 2019; Czapowski, Tomassi-Morawiec 2012; Czapowski, Tarkowski 2018, 2020; Lankof, Tarkowski 2020; Ślizowski, Urbańczyk 2011; Tarkowski, Czapowski 2018, 2019). A number of such rock salt deposits have been documented and partly subjected to extraction (e.g. Szuflicki et al. 2021; Fig. 1). In other locations, preliminary salt resource estimations have been completed (e.g. Czapowski et al. 2020).

The difficulties related to cavern siting, depending on the complexity of the geological structure of rock mass, are illustrated in Fig. 2.

Various degrees of susceptibility of salt rock to leaching, being very high in the case of chloride K-Mg salts, high in rock salts, or none in carbonate, sulphate, or clastic rocks, cause that that leaching process operators have to carefully avoid specific interbeds to obtain the planned cavern shape. In the case of stratiform salt rocks, the designed caverns are sited within a salt seam, avoiding K-Mg and non-salt interbedding, while preserving protective shelves and pillars between the workings (Fig. 2A). A simple structure of stratiform rock salt deposits allows for leaching a number of caverns; however, with the height and volume limited by the thickness of the available rock salt deposit. The cavern height would usually reach up to 300 m in the Polish geological conditions (e.g. Czapowski 2019).

More difficult conditions occur in the salt pillows whose internal structure is more complex, owing to possible repetitions and deformations of K-Mg salt and non-salt interbeds. Besides, it is more difficult to fully recognise such structures. However, such difficulties are partly compensated by large local thickness of the available rock salt bed and that allows for leaching high and voluminous caverns (Fig. 2B).

Salt domes with complex internal structures present a challenge to the cavern designers. Salt dome structure can be recognised only by drilling a number of boreholes or cutting underground workings. Cavern leaching follows drilling a borehole to the planned depth, ascertaining the cavern



Ryc. 2. Rozmieszczenie kawern magazynowych w trzech typach wystąpień solnych: A – pokład solny, B – poduszka solna, C – wysad solny.

Fig. 2. Locations of storage caverns, within three types of salt rock structures: A – salt seam, B – salt pillow, C – salt dome.

otworów wiertniczych lub podziemnych wyrobisk. Ulokowanie kawerny jest wówczas możliwe po odwierceniu otworu do planowanej głębokości posadowienia spągu kawerny i potwierdzeniu występowania w nim miększej i w miarę jednolitej serii soli kamiennej. Oprócz licznych wystąpień soli K-Mg, siarczanów i węglanów dodatkowe wyzwanie stanowi także konieczność ominięcia warstw iłowców i zubrów, stanowiących komponenty sukcesji cyklotemowych górnego permu (np. Wagner, 1995), które ługowane mogą zanieczyścić kawerny pelitem ilastym. Korzystną cechą wysadów jest możliwość występowania takich ciał solnych, zajmujących znaczną część słupa solnego, co umożliwi wykonanie bardzo pojemnych kawern o wysokości kilkuset metrów jak np. w wysadach Mogilno i Góra (np. Brańka, Wawarzyniak, 1994; Gąska, 2000; Gąska i in., 2012; Jasiński, 2000, 2004) i na różnych głębokościach (Ryc. 2C).

Proces ługowania kawern magazynowych jest obecnie ułatwiony poprzez wykonywanie kierunkowych otworów wiertniczych, wykonywanych często z jednego wspólnego węzła np. kawerny magazynowe w PMG Kosakowo (np. Gąska, 2000; Laskowska i in., 2009). Testuje się też wykonywanie poziomych kawern cylindrycznych, szczególnie w pokładach solnych o niewielkiej miąższości (np. Urbańczyk, 2021).

Występujące w południowej Polsce mioceńskie sole kamienne (formacja z Wieliczki; Ryc. 1) nie zawierają przewartwień soli K-Mg ale występują w nich liczne wkładki siarczanów i skał klastycznych (np. Bukowski, 2011; Garlicki, 1979), utrudniające ługowanie kawern.

#### POTENCJALNE MIEJSCA LOKOWANIA KAWERN MAGAZYNOWYCH W UTWORACH SOLNYCH

Ostatnie lata przyniosły pełniejszą ocenę geologiczną możliwości lokowania kawern magazynowych w różnego typu wystąpieniach soli kamiennej: w poduszkach i wysadach solnych (np. Czapowski, 2019; Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2012; Czapowski, Tarkowski, 2018; Tarkowski, Czapowski, 2018, 2019) i wystąpieniach pokładowych (np. Czapowski, 2017, 2019; Lankof, Tarkowski, 2020; Tarkowski, Czapowski, 2019). W rozważaniach pominięto jako miejsca perspektywiczne poduszki solne, położone zwykle zbyt głęboko i słabo rozpoznane geologicznie. Poniżej przedstawiono krótkie omówienie stanu rozpoznania wyróżnionych miejsc potencjalnej lokalizacji kawern magazynowych (Tab. 1) z wstępną oceną możliwości tej formy ich zagospodarowania (Tab. 2).

#### WYSTĄPIENIA POKŁADOWE

Wytypowane wystąpienia pokładowe (do głębokości spągu pokładu soli kamiennej ustalonej na 2 km, miąższość pokładu  $\geq 100$  m; Tab. 1, Ryc. 1 i 3) obejmują zarówno dobrze udokumentowane złoża soli kamiennej np. złożo Łeba, Za-

bottom, and confirming the occurrence of a fairly thick and uniform rock salt series. In addition to frequent occurrence of K-Mg salts, sulphates, and carbonates, other challenges include avoidance of claystone and zuber rock beds that belong to the successions of the Upper Permian cyclothems (e.g. Wagner 1995). When such formations are leached, the cavern can be soiled by clay pelite. Salt domes are advantageous because salt occupies a high proportion of the dome and that is why caverns can be voluminous, reaching the height several hundred metres at various depths, as it is the case of the Mogilno and Góra salt domes (e.g. Brańka, Wawarzyniak 1994; Gąska 2000; Gąska et al. 2012; Jasiński 2000, 2004) (Fig. 2C).

The cavern leaching process is currently made easier, owing to the application of the directional drilling method, where multiple drilling often starts from a common node, as in the case of e.g. the PMG Kosakowo caverns (e.g. Gąska 2000; Laskowska et al. 2009). Horizontal cylindrical cavern drilling operations are also tested, especially within thin rock salt beds (e.g. Urbańczyk 2021).

The Miocene salt rocks occurring in southern Poland (the Wieliczka formation; Fig. 1) do not contain any K-Mg salt interbedding, although various types of sulphate and clastic rock inserts are found there (e.g. Bukowski 2011; Garlicki 1979), and those make cavern leaching operations difficult.

#### POTENTIAL SITES FOR UNDERGROUND STORAGE FACILITIES WITHIN SALT FORMATIONS

Recent years brought a better geological insight into the options of cavern placement within salt rock formations in the form of salt pillows and salt domes (e.g. Czapowski 2019; Czapowski, Tomassi-Morawiec 2012; Czapowski, Tarkowski 2018; Tarkowski, Czapowski 2018, 2019), as well as within stratiform deposits (e.g. Czapowski 2017, 2019; Lankof, Tarkowski 2020; Tarkowski, Czapowski 2019). In our considerations, the salt pillows have been omitted as possible cavern locations since those are located at large depths and have not been well recognised in geological terms. Below, was presented a short discussion of the recognition status of specific locations contemplated for underground storage facilities (Table 1), with a preliminary assessment of such form of their management (Table 2).

#### STRATIFORM ROCK SALT DEPOSITS

The above identified stratiform salt rock deposits (down to the bed bottom depth of 2 km below the land surface, with the bed thickness of  $\geq 100$  m; Table 1, Figs. 1 and 3) include both well documented deposits, e.g. those of Łeba, the Bay of Puck, and Mechelinki, and the areas determined by the sets of boreholes and single boreholes. The status of the geologi-

**Tab. 1.** Rozpoznanie geologiczne miejsc możliwej lokalizacji kavern magazynowych w utworach solnych cechsztynu (górnym perm) w Polsce.

POTENCJALNE MIEJSCA LOKOWANIA KAWERN MAGAZYNOWYCH	TYP WYSTĄPIENIA SOLI KAMIENNEJ	DANE GEOLOGICZNE	MATERIAŁY DOKUMENTACYJNE	STOPIEŃ ROZPOZNIANIA GEOLOGICZNEGO		
Międzyzdroje/Przytór,	wysad solny	otwory wiertnicze	dokumentacje otworowe; Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2012	niski		
Wolin 1 i 2						
Wicko-Wapnica		dokumentacje geologiczne	Czochal, 2013	dobry		
Kamień Pomorski 1 i 2			Pisiewicz, 2018	średni		
Goleniów			Parecka, 1980	dobry		
Lubień			Mazurek i in., 2016	średni		
Łanięta			Dębski i in., 1963	średni		
Kłodawa-Izbica Kujawska			otwory wiertnicze	dokumentacje otworowe; Czapowski, 2019	średni	
Rogóżno					niski	
obszar Białogóra-Dębki-Żarnowiec	pokład solny PZ1 (Na1), Polska północna	otwory wiertnicze	dokumentacje otworowe; Czapowski, 1998	brak		
obszar Darżlubie-Puck-Żelistrzewo				otworowe; Czapowski, 2019	niski	
obszar Karwia				Werner, 1979	dobry	
obszar Zatoka Gdańska		dokumentacje geologiczne	Korol, Derdowski, 2008	dobry		
obszar Gałajny-Basze					Kornowska, 1980	
19 otworów wiertniczych						
złoże soli kamiennej Zatoka Pucka		Polska południowo-zachodnia	otwory wiertnicze	dokumentacje otworowe; Czapowski, 2017, 2019	niski	
złoże soli kamiennej Mechelinki					średni	
złoże soli kamiennej Łeba					dobry	
obszar Chęciny-Nowa Rola	pokład solny PZ1 (Na1)				niski	
obszar Garki-Uciechów						średni
obszar Nowa Sól-Kiełcz						dobry
obszar Wilków-Żuchłów-Załęcze-Słupia	pokład solny PZ2 (Na2)				niski	
7 otworów wiertniczych						
3 obszary	pokład solny PZ3 (Na3)				niski	
1 otwór wiertniczy						
obszar Nowa Sól						
obszar Przyborowice-Kaniów						
obszar Strużka-Niwiska						
obszar Załęcze						
obszar Grąbkowo-Rogożewo						
obszar Nowa Sól-Konradowo						
obszar Rybaki						
obszar Sękowice-Nowa Wioska	pokłady solne PZ1-PZ3 (Na1, Na2 i Na3)	dokumentacje geologiczne	Gruszecki, 2008; Neumann, 1995	dobry		
1 otwór wiertniczy						
złoże soli kamiennej Bytom Odrzański						

**Table 1.** Geological recognition of prospective sites for underground storage facility locations, within the Zechstein (Upper Permian) salt deposits in Poland.

PROSPECTIVE SITES OF CAVERN LOCATIONS	TYPE OF ROCK SALT OCCURRENCE	GEOLOGICAL DATA	REFERENCES	DEGREE OF GEOLOGICAL RECOGNITION	
Międzyzdroje/Przytór	salt dome	boreholes	borehole documentation; Czapowski, Tomassi-Morawiec 2012	low	
Wolin 1 and 2					
Wicko-Wapnica					
Kamień Pomorski 1 and 2					
Goleniów		geological documentation	Czochal 2013	good	
Lubień			Pisiewicz 2018		
Łanięta			Parecka 1980	medium	
Kłodawa-Izbica Kujawska			Mazurek et al. 2016	good	
Rogóżno			Dębski et al. 1963	medium	
Białogóra-Dębki-Żarnowiec Area	PZ1 (Na1) bed, northern Poland	boreholes	borehole documentation; Czapowski 2019	medium	
Darżlubie-Puck-Żelistrzewo Area				low	
Karwia Area			borehole documentation; Czapowski 1998	none	
Bay of Gdańsk Area				low	
Gałąjny-Basze Area		geological documentation	borehole documentation; Czapowski 2019	good	
19 boreholes					
rock salt deposits in the Bay of Puck					
rock salt deposits at Mechelinki					
rock salt deposits at Łeba		Kornowska 1980			
Chęciny-Nowa Rola Area	boreholes		borehole documentation; Czapowski 2017, 2019	low	
Garki-Uciechów Area		medium			
Nowa Sól-Kielcz Area		good			
Wilków-Żuchlów-Załęcze-Stupia Area		low			
7 boreholes					
3 Areas					
1 borehole					
Nowa Sól Area		PZ3 (Na3) bed		boreholes	low
Przyborowice-Kaniów Area					
Strużka-Niwiska Area					
Załęcze Area					
Grąbkowo-Rogożewo Area					
Nowa Sól-Konradowo Area					
Rybaki Area	PZ1-PZ3 (Na1, Na2, and Na3) beds	geological documentation	good		
Sękowice-Nowa Wioska Area					
1 borehole					
rock salt deposits at Bytom Odrzański			Gruszecki 2008; Neumann 1995	good	



toka Pucka i Mechelinki, jak i obszary wytyczone otworami wiertniczymi oraz pojedyncze otwory wiertnicze. Stan rozpoznania geologicznego obszarów i otoczenia pojedynczych otworów oceniono jako niski do średniego, zależnie od ilości wykonanych odwiertów.

Na terenie północnej Polski wyróżnione lokalizacje odnoszą się do pokładu najstarszej soli kamiennej (Na1), częściowo już zagospodarowanego pod kawernowy magazyn gazu Kosakowo, z możliwościami jego dalszej rozbudowy. W rejonie Zatoki Gdańskiej wskazano 3 udokumentowane złoża oraz 4 obszary - w tym nowo wytypowany obszar Zatoka Gdańska (Ryc. 3) – oraz 18 pojedynczych otworów wiertniczych (Czapowski, 2019). Atutem tych obiektów jest ich położenie nad Bałtykiem, co umożliwia wykorzystanie wody morskiej – wody Bałtyku cechuje bardzo niskie zasolenie od 2 do 20‰, średnio 7‰ zaś zasolenie wód Morza Śródziemnego to 39‰ – jako cieczy lęgającej i bezpośredni zrzut wytworzonej solanki do otwartego morza bez istotnych szkód środowiskowych i konieczności budowy specjalnej warzelni (Tab. 2).

Interesującym nowo wytypowanym obszarem jest teren Zatoki Gdańskiej, gdzie planowana jest budowa pływającego gazoportu. Brak jednak rozpoznania geologicznego tego obszaru choć dane z sąsiadujących otworów wiertniczych sugerują, że występujący tu pokład soli kamiennej może osiągać miąższość 100-150 m i zalegać na głębokości 1-1,5 km (Ryc. 3). W celu jego rozpoznania konieczne jest wykonanie kilku przekrojów sejsmicznych i w wytypowanych miejscach – odwiertów zaplanowanych już jako otwory lęgownicze.

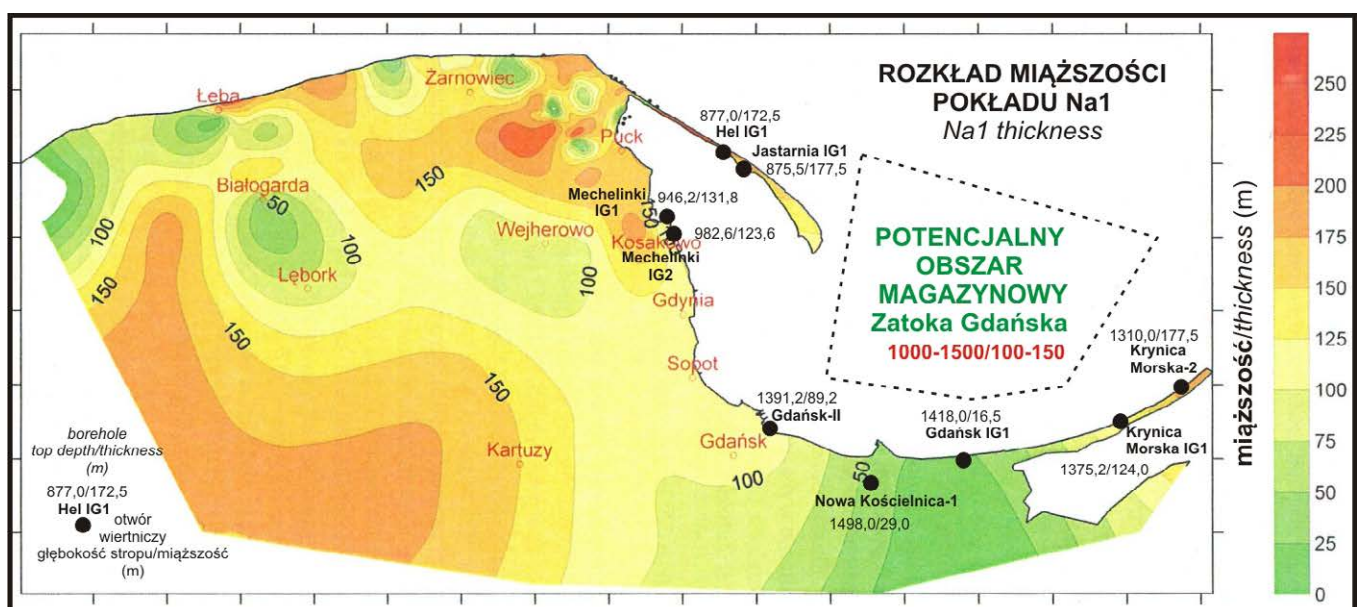
W północno-wschodniej Polsce (Ryc. 1) wskazano jeden potencjalny obszar Gałajny-Basze i pojedynczy otwór wiertniczy (Czapowski, 2019), jednak budowa tam kawernowego

cal recognition of the areas and the surroundings of single boreholes was assessed as low to medium, depending on the number of boreholes.

The locations specified in northern Poland concern the beds of the Oldest Halite (Na1), partly used by the Kosakowo underground storage facility, with the option of further expansion. Three documented deposits and four areas were identified around the Bay of Gdańsk, including the newly identified area there (Fig. 3), together with 18 separate boreholes (Czapowski 2019). The location of that area on the Baltic coast is an advantage because it is possible to use sea water for cavern leaching, with brine dumping directly to the sea. The Baltic waters are characterised by low salinity, from 2 to 20‰, or 7‰ on the average, while the salinity of the Mediterranean Sea is estimated at 39‰. Brine dumping directly to the open sea will not cause any essential environmental pollution or damage and that is why it is not necessary to construct new salt-works to process brine there (Table 2).

The Bay of Gdańsk is another interesting and newly identified area to plan the construction of a floating gas terminal. However, there is no geological documentation of the area available, although the data collected from the neighbouring boreholes suggest that the local rock salt seam may reach the thicknesses of 100–150 m at the depths of 1–1.5 km (Fig. 3). It is necessary to provide several seismic cross-sections of specific locations, as well as drill boreholes, planned to be leaching wells in the future, to recognise the geological structure of the area.

One potential area, contemplated for the future underground storage facility, has been identified in north-eastern Poland (Fig. 1), the Gałajny-Basze area, together with a sin-



Ryc. 3. Potencjalny obszar magazynowy Zatoka Gdańska w utworach najstarszej soli kamiennej (Na1). Rozkład miąższości soli wg Urbańczyk i in. 2011.

Fig. 3. Potential area of underground storage facility placement around the Bay of Gdańsk, within the Oldest Halite (Na1) deposits. Salt bed thickness distribution after Urbańczyk et al. 2011.

magazynu wymaga do łągowania wykorzystania zasobów wód powierzchniowych i budowy warzelni w celu zagospodarowania wytworzonej solanki, gdyż jej bezpośredni zrzut do Zatoki Gdańskiej wymagałby budowy ponad 150 km rurociągu.

Atutem wymienionych lokalizacji jest też niski stopień geotermiczny na głębokości posadowienia kawern, wydłużający ich żywotność (Czapowski, 2019).

Potencjalne lokalizacje wskazane na obszarze Polski południowo-zachodniej odnoszą się do pokładów (Ryc. 1, Tab. 1):

- a) najstarszej soli kamiennej (Na1) – 4 obszary i 7 pojedynczych otworów wiertniczych, stan rozpoznania geologicznego od niskiego do dobrego;
- b) starszej soli kamiennej (Na2) – 3 obszary i jeden pojedynczy otwór wiertniczy, stan rozpoznania geologicznego niski;
- c) młodszej soli kamiennej (Na3) - 8 obszarów i jeden pojedynczy otwór wiertniczy, stan rozpoznania geologicznego niski.

Dodatkowo wskazano ostatnio jako potencjalne miejsce budowy kawern (Zejlaś, 2020) obszar pokładowego wystąpienia soli kamiennej Bytom Odrzański, położonego na NW od eksploatowanego złoża soli Bądźów. Sól kamienna, występująca w złożu jako kopalina towarzysząca złożu rud miedzi, reprezentuje chlorki cyklotemów od PZ1 do PZ3 cechsztynu i jej szacunkowe zasoby wynoszą 37,7 mld Mg (Neumann, 1995; Gruszecki, 2008).

Mankamentem wskazanych lokalizacji jest konieczność czerpania w procesie łągowania z zasobów wód powierzchniowych i budowy warzelni w celu zagospodarowania wytworzonej solanki. Również stopień geotermiczny na głębokości posadowienia planowanych kawern jest wyższy niż w północnej Polsce co może skutkować krótszym okresem ich funkcjonowania (Czapowski, 2019).

W opisanych wystąpieniach pokładowych możliwe jest zbudowanie kawern o różnym kształcie, ale stosunkowo niewielkiej pojemności np. 170 tys. m<sup>3</sup> w PMG Kosakowo (Gąska i in., 2012). Sumaryczna pojemność takiego kawernowego magazynu może być bardzo duża dzięki wykonaniu licznych kawern, gdyż ich rozmieszczenie ogranicza jedynie miąższość i rozciągłość pokładu soli.

## WYSADY SOLNE

Kawerny magazynowe wyługowane w wysadach solnych są stosunkowo nieliczne (ograniczeniem jest zmienna budowa geologiczna i wielkość wysadu) ale cechuje je bardzo duża objętość np. ok. 400 tys. m<sup>3</sup> w KPMG Mogilno w wysadzie solnym Mogilno (Kunstman i in., 2002).

Śród wysadów solnych w Polsce sprzyjające warunki do lokowania kawern dotyczą 7 wysadów położonych w regionie szczecińskim (Ryc. 1, Tab. 1). Ich stopień rozpoznania

gle borehole (Czapowski 2019). However, the construction of such a facility there would require the use of surface waters for leaching and the provision of salt-works to process the brine produced in the leaching process since brine dumping to the Bay of Gdańsk would require the construction of a 150 km long pipeline.

A low geothermal gradient occurring at the bottom of contemplated caverns, identified in those locations, is an advantage there, as that gradient would extend the cavern operating period (Czapowski 2019).

Potential cavern locations identified in south-western Poland concern the following types of salt deposits (Fig. 1, Table 1):

- a) Oldest Halite (Na1): 4 areas and 7 single boreholes; status of geological recognition: from low to good;
- b) Older Halite (Na2): 3 areas and 1 borehole; status of geological recognition: low;
- c) Younger Halite (Na3): 8 areas and 1 borehole; status of geological recognition: low.

Recently, another potential area was indicated by Zejlaś 2020: a stratiform salt deposit of Bytom Odrzański, NW of the currently mined Bądźów salt deposit. Rock salt occurring there, as a resource accompanying the copper ore, contains chlorides belonging to PZ1–PZ3 Zechstein cyclothems, with the estimated quantity of 37.7 billion Mg (Neumann 1995; Gruszecki 2008).

However, the necessity to use surface waters and construct salt-works to process brine is the drawback of those locations. Also, the geothermal gradient at the depth of the contemplated cavern bottom is higher than that of northern Poland. Consequently, a shorter period of cavern operation may be expected (Czapowski 2019).

It is possible to leach caverns with various shapes, within the above described salt deposits, although the caverns would have fairly low volumes, e.g. 170,000 m<sup>3</sup> as in the case of the PMG Kosakowo (Gąska et al. 2012). The total volume of the underground storage facility could be large if a complex of caverns is leached, since the cavern distribution would be limited only by the salt deposit thickness and extent.

## SALT DOMES

There are few caverns leached within salt domes since such caverns are restricted by the changeable geological structures and dome sizes, but they are characterised by large volumes of e.g. ca. 400,000 m<sup>3</sup> each, in the case of KPMG Mogilno, located within the Mogilno salt dome (Kunstman et al. 2002).

Advantageous conditions for cavern leaching within the Polish salt domes exist in 7 sites situated in the Szczecin Region (Fig. 1, Table 1). The degree of geological structure

geologicznego jest ogólnie niski (nieliczne otwory wiertnicze nawiercające wysad np. Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2012; Czapowski, Tarkowski, 2018; Tarkowski, Czapowski, 2018) oprócz wysadu Goleniów, dla którego wykonano dokumentację geologiczną złoża soli kamiennej (Czochal, 2013). Wysad ten, badany przez PGNiG z założeniem późniejszego zagospodarowania jako magazyn kawernowy, ze względu na położenie w pobliżu granicy polsko-niemieckiej świetnie by się sprawdzał jako magazyn operacyjny, gromadzący zapasy gazu z tranzytu z Niemiec bądź z gazociągu Baltic Pipe. Podobną rolę mogą pełnić potencjalne magazyny kawernowe w 6 pozostałych wysadach (Międzyzdroje/Przytór, Wolin 1 i 2, Wicko-Wapnica, Kamień Pomorski 1 i 2) zaś ich położenie nad Bałtykiem pozwala na wykorzystanie wody morskiej do ługowania i bezpośredni zrzut do otwartego morza wytworzonej solanki. Zabezpieczyłyby też ilości gazu przesyłanego przez Baltic Pipe oraz gromadzonego w zbiornikach powierzchniowych w świnoujskim gazoporcie gazu skroplonego.

Niezagospodarowane dotychczas wysady solne ulokowane w środkowej części Polski (Ryc. 1) posiadają dokumentację geologiczną i ich budowa wewnętrzna jest względnie dobrze poznana (tab. 1). Wskazano jako potencjalne obiekty magazynowe 4 wysady: Lubień i sąsiednie Łanięta, Rogóźno i obszar położony pomiędzy wysadami Izbica Kujawska i Kłodawa. Obszar ten, ulokowany w obrębie największej struktury solnej Izbica Kujawska-Kłodawa-Łęczycza, ma dobrze rozpoznaną budowę geologiczną do głębokości blisko 900 m dzięki wyrobiskom podziemnym Kopalni Soli „Kłodawa” S.A. w wysadzie Kłodawa (np. Burliga, 2018; Mazurek i in., 2016; Poborska-Młynarska, 2022; Ślizowski, Saługa, 1996). Dzięki temu w miarę trafne byłoby ulokowanie kawern magazynowych w strukturze wysadowej poza obszarem górniczym Kopalni.

Pominięto we wskazaniach wysad solny Damasławek (Ryc. 1), gdyż wykonane ostatnio jego badania i finalna dokumentacja geologiczna (Pisiewicz, 2020) mają służyć zaprojektowaniu tu magazynu kawernowego. Wysad Dębina ze względu na położenie w centrum eksploatowanego złoża węgla brunatnego „Bełchatów” (Ryc. 1) również nie jest brany pod uwagę m. in. ze względu na uruchomienie mobilności wysadu przez odciążenie jego otoczenia, spowodowane głębokimi wyrobiskami odkrywkowej kopalni węgla (np. Cała i in., 2017; 2020).

Budowa kawern magazynowych w wytypowanych wysadach w centralnej Polsce wymaga wykorzystania limitowanych w sytuacji zmian klimatycznych zasobów wód powierzchniowych. Zagospodarowanie wytworzonej solanki jest możliwe w 2 warzelniach w rejonie Inowrocławia (Mątwy i Janikowo) o ile opłacalna byłaby budowa rurociągu. Alternatywą jest wybudowanie warzelni w Kłodawie: obsługiwałaby ona ewentualny magazyn w okolicy Kłodawy

recognition is generally low there, as only a few boreholes were drilled in those salt domes (e.g. Czapowski, Tomassi-Morawiec 2012; Czapowski, Tarkowski 2018; Tarkowski, Czapowski 2018), except for the Goleniów salt dome for which the geological documentation has been provided (Czochal 2013). That salt dome, examined by the PGNiG Company, with the intention of building an underground storage facility there, would be much desired as an operational facility to store gas reserves transported either from Germany or from the Baltic Pipe, owing to its location close to the Polish-German border. Similar role could be assumed by the potential underground storage facilities located within the remaining six salt domes (Międzyzdroje/Przytór, Wolin 1 and 2, Wicko-Wapnica, Kamień Pomorski 1 and 2), while their locations close to the Baltic Sea would allow for using sea water for leaching, followed by brine dumping directly to open sea. The underground storage facilities could ensure storing of the gas transported through the Baltic Pipe and that collected in the surface tanks of the Świnoujście liquefied gas terminal.

Unused salt domes situated in central Poland (Fig. 1) are furnished with geological documentation and their internal structures are quite well recognised (Table 1). Four salt domes have been identified as potential sites for underground storage facilities: Lubień and neighbouring Łanięta, Rogóźno and the area situated between the Izbica Kujawska and Kłodawa salt domes. The whole region situated within the largest salt structure of Izbica Kujawska-Kłodawa-Łęczycza is furnished with well recognised geological structure documentation down to the depth of nearly 900 m, owing to the underground workings of the active “Kłodawa” S.A. Salt Mine operating on the Kłodawa salt dome (e.g. Burliga 2018; Mazurek et al. 2016; Poborska-Młynarska 2022; Ślizowski, Saługa 1996). Consequently, it would be recommended to leach the caverns within that salt dome structure, outside the Salt Mine’s mining fields.

The Damasławek salt dome (Fig. 1) has been omitted here as a potential site because recent examinations and the final geological documentation (Pisiewicz 2020) have been provided for designing an underground storage facility there. The Dębina salt dome is not considered here either, owing to the fact that it is situated in the centre of the currently exploited “Bełchatów” lignite deposit (Fig. 1). Another reason is that the salt dome may be subjected to mobility owing to the unloads caused by deep workings of the open-pit lignite mine (e.g. Cała et al. 2017, 2020).

The construction of underground storage facilities within the selected salt domes in central Poland will require the use of the surface water resources that are under control, owing to current climatic changes. Processing of the brine produced as a result of cavern leaching will be possible in the salt-works situated at Mątwy and Janikowo, in the area of Inowrocław, provided that the construction of a pipeline is feasible. The construction of salt-works in Kłodawa is an alternative. That



**Tab. 2.** Uwarunkowania i ocena możliwości budowy kawern magazynowych w utworach solnych cechsztynu (górnym perm) w Polsce.

SPÓSOB WYSTĘPOWANIA SOLI KAMIENNEJ		POTENCJALNE OBSZARY MAGAZYNOWE	MOŻLIWOŚĆ LOKOWANIA KAWERN MAGAZYNOWYCH	WYBRANE UWARUNKOWANIA BUDOWY KAWERN MAGAZYNOWYCH		
				Zasoby wodne do ługowania	Zagospodarowanie solanki	Ocena
Wysady solne	wysady nadmorskie	<b>7 wysadów:</b> Międzyzdroje-je/ Przytór, Wolin 1 i 2, Wicko-Wapnica, Kamień Pomorski 1 i 2, Goleniów (?)	nieliczne kawerny cylindryczne o dużej pojemności, lokalizacja ściśle uwarunkowana budową geologiczną (stopień rozpoznania budowy wewnętrznej)	woda morską, zasoby wodne nieograniczone, (?) pobór wód z Zalewu Szczecińskiego	zrzut rozcieńczonej solanki do morza, (?) zrzut solanki u ujścia Zalewu Szczecińskiego	średnia, zależna od stopnia rozpoznania geologicznego
	wysady polskie centralnej	<b>4 wysady:</b> Lubień, Łanięta, Kłodawa- Izbica Kujawska, Rogóźno		pobór wód z jezior i rzek, zasoby wodne ograniczone	konieczna budowa lub wykorzystanie istniejącej warzelni	
Wystąpienia pokładowe	pokłady nadmorskie (sole PZ1)	<b>4 obszary+3 złoża +17 otworów</b>	liczne kawerny o średniej i małej pojemności i o różnym kształcie	woda morską, zasoby wodne nieograniczone	zrzut rozcieńczonej solanki do morza	pozytywna
	pokłady w SW Polsce (+1 złożo soli kamiennej)	<b>sole PZ1:</b> 4 obszary + 7 otworów		pobór wód z jezior i rzek, zasoby wodne ograniczone	konieczna budowa lub wykorzystanie istniejącej warzelni	średnia, zależna od stopnia rozpoznania geologicznego
		<b>sole PZ2:</b> 3 obszary+1 otwór				
	pokłady w NE Polsce (sole PZ1)	<b>sole PZ3:</b> 8 obszarów + 1 otwór		pobór wód z jezior i rzek, zasoby wodne ograniczone		
		<b>1 obszar + 1 otwór</b>				

**Table 2.** Local conditions and assessment of underground storage facility construction, within the Zechstein (Upper Permian) salt deposits in Poland.

Types of rock salt deposits		Facility sites	Possible cavern locations	Selected factors of salt cavern leaching		
				Leaching water resources	Brine disposal	Assessment
Salt domes	coastal salt domes	<b>7 salt domes:</b> Międzyzdroje-Przytór; Wolin 1 and 2, Wicko-Wapnica, Kamień Pomorski 1 and 2, Goleniów (?)	few cylindrical large-volume caverns, sites depend on geological structure and the degree of internal structure recognition	sea water; unlimited water resources; collection of water from the Szczecin Lagoon (?)	diluted brine dumping into the sea, brine dumping into the Szczecin Lagoon	medium, depending on the degree of geological recognition
	central Poland salt domes	<b>4 salt domes:</b> Lubień, Łanięta, Kłodawa-Izbica Kujawska, Rogóźno		collection of water from lakes and rivers; limited water resources	necessary construction of new salt-works or using existing ones	
Stratiform deposits	coastal salt beds (PZ1)	<b>4 areas + 3 deposits + 17 boreholes</b>	many caverns of medium and small volumes and diverse shapes	sea water; unlimited water resources	diluted brine dumping into the sea	positive
	salt beds in SW Poland (+1 rock salt deposit)	<b>PZ1:</b> 4 areas + 7 boreholes		collection of water from lakes and rivers; limited water resources	necessary construction of new salt-works or using existing ones	medium, depending on the degree of geological recognition
		<b>PZ2:</b> 3 areas + 1 borehole				
		<b>PZ3:</b> 8 areas + 1 borehole		collection of water from lakes and rivers; limited water resources		
	salt beds in NE Poland (PZ1)	<b>1 area + 1 borehole</b>		collection of water from lakes and rivers; limited water resources		

i w wysadach Lubień i Łanięta, zaś po ocenie ekonomicznej opłacalności (koszt rurociągu) również magazyn w wysadzie Rogóźno.

Wystąpienia mioceńskiej soli kamiennej w południowej Polsce (Ryc. 1) nie były zasadniczo rozpatrywane jako miejsca lokalizacji kawernowych magazynów. W końcu lat 90. ubiegłego wieku planowano (<https://dziennikpolski24.pl/siedlec-pod-mlotek/ar/c3-2212638>) wykorzystanie podziemnych wyrobisk likwidowanej kopalni soli kamiennej Siedlec-Moszczenica na podziemny magazyn gazu o pojemności 10 mln m<sup>3</sup> (Stecka, Włodarczyk-Żurek, 2018). Dwa inne udokumentowane złoża soli kamiennej: Rybnik-Żory-Orzesze (złożo pokładowe; Majewski, Listkowski, 1969) i Wojnicz (złożo fałdowe; Makowska, 1982), charakteryzuje zmienny i miejscami wysoki udział skał płonnych (siarczany i klastyki), utrudniający wykonanie kawern.

## PODSUMOWANIE

Niepewna światowa sytuacja geopolityczna, niestabilne dostawy surowców energetycznych, toczący się konflikt zbrojny w sąsiednim kraju i niesprzyjające stosunki z dwoma wschodnimi sąsiadami zmuszają do pojęcia szybkich decyzji o zapewnieniu bezpieczeństwa energetycznego kraju poprzez m. in. zabezpieczenie istniejących i przyszłych zapasów węglowodorów energetycznych (gaz, ropa naftowa). Gromadzone w większości w naziemnych zbiornikach są one najbardziej narażone na zniszczenie, powodując zarazem wielkie straty humanitarne i ekologiczne.

Najbardziej skutecznym sposobem przechowywania tych produktów jest ich podziemne magazynowanie (w przypadku awarii czy katastrofy zniszczeniu ulega infrastruktura powierzchniowa takiego magazynu, zgromadzone media pozostają nienaruszone). Najbardziej wydajnymi magazynami są kawerny solne, oddające zmagazynowane media szybko i bez strat. Polska dysponuje wysokim potencjałem budowy takich magazynów w kompleksach soli kamiennych cechsztynu, występujących na 2/3 obszaru kraju.

Potencjalne miejsca lokalizacji magazynów kawernowych występują w pokładowych wystąpieniach soli kamiennej w północnej Polsce (5 obszarów, 3 udokumentowane złoża soli i 18 pojedynczych otworów wiertniczych) i w południowo-zachodniej części kraju (11 obszarów, jedno udokumentowane złożo soli i 9 pojedynczych otworów wiertniczych). Z kolei jako potencjalne lokalizacje wytypowano 7 struktur wysadowych występujących w regionie szczecińskim w NW Polsce, a na terenie Polski centralnej – 4 wysady. Atutem wystąpień pokładowych i wysadowych, położonych nad Bałtykiem jest możliwość wykorzystania wody morskiej do ługowania kawern i bezpośredniego zrzutu wytworzonej solanki do otwartego morza. Także niski stopień geotermiczny na tych terenach sprzyja wydłużeniu czasu funkcjonowania ka-

salt-works could receive brine from the contemplated facilities to be situated in the area of Kłodawa, as well as within the Lubień and Łanięta salt domes, followed by the Rogóźno salt dome, if economically feasible, as it would be necessary to construct a pipeline there.

The occurrences of Miocene rock salt in southern Poland (Fig. 1) were not basically considered as the sites for underground storage facilities. By the end of the 1990's, the workings of the liquidated Siedlec-Moszczenica Salt Mine were contemplated to be used as a storage facility (<https://dziennikpolski24.pl/siedlec-pod-mlotek/ar/c3-2212638>), with the volume of 10 million m<sup>3</sup> (Stecka, Włodarczyk-Żurek 2018). Two other documented rock salt deposits, Rybnik-Żory-Orzesze (stratiform deposit; Majewski, Listkowski 1969) and Wojnicz (folded deposit; Makowska 1982), are characterised by changeable and locally high proportion of gangue (sulphates and clastics) that would make such projects difficult to build.

## SUMMARY

Uncertain geopolitical situation, unstable energy material supplies, the war ranging in a neighbouring country, and unfavourable relations with two other eastern neighbouring countries force Poland to make quick decisions to assure energy security, e.g. through the establishment of the current and future energy hydrocarbon reserves (natural gas and crude oil). Such reserves are usually kept in surface tanks that are exposed to destruction, resulting in large humanitarian and ecological disasters.

Underground storage facilities are the most effective methods of energy material safekeeping. In the case of a failure or disaster only the surface infrastructure would be destroyed, without threat to the stored media. The best solution in that respect is provided by salt caverns. Media can be easily injected and extracted from such storages, without losses. Poland enjoys a high potential of the construction of underground storage facilities, within Zechstein rock salt formations that exist on the 2/3 of the country's territory.

Potential sites for the placement of underground storage facilities have been identified in stratiform rock salt deposits in northern Poland (5 areas, 3 documented deposits, and 18 boreholes) and in the south-western Poland (11 areas, one documented deposit, and 9 boreholes). Besides, 7 salt domes were identified as potential locations of the future underground storage facilities in the area of Szczecin, NW Poland, as well as 4 salt domes in central Poland. The stratiform and salt-dome deposits situated on the Baltic coast are convenient because sea water can be used for cavern leaching and brine can be dumped directly to open sea. In addition, a low geothermal gradient occurring on those areas is favourable for an extended period of cavern operation.

wern. Pozostałe obiekty wymagają korzystania z ograniczonych zasobów wód powierzchniowych zaś solanka musi być zutyliżowana w istniejących lub zbudowanych warzelniach. Możliwe jest też wykorzystanie kawern solnych do magazynowania innych gazów np. wodoru, powietrza, jako nośników energii. Ponieważ cykl budowy magazynów kawernowych wynosi 5-10 lat stąd konieczność podjęcia jak najszybszych decyzji o rozbudowie już istniejących magazynów (2 magazyny gazu i jeden magazyn paliw) i konstrukcji nowych.

Other suggested locations require the use of limited surface waters, while brine would have to be processed either in the existing or in newly constructed salt-works. It will also be possible to use salt caverns for storing other gases, e.g. hydrogen or air, as energy media. Since the period of an underground storage facility construction amounts to 5–10 years, it is necessary to make prompt decisions about the expansion of the existing facilities (2 gas and one fuel facility), as well as the construction of new ones.

## LITERATURA/REFERENCES

- BURLIGA S., 2018. Wysad solny Kłodawy – aktualny stan rozpoznania budowy geologicznej. Tom konferencyjny: XXII Międzynarodowe Sympozjum Solne QUO VADIS SAL pt. Sól skarbem Kujaw i Wielkopolski, Kopalnia Soli Kłodawa - Uniejów, 10-13. X 2018: 12-13. PSGS, Kraków.
- BRĄKA S., CHARYSZ W., GARLICKI A., WERNER Z., ZIĄBKAZA Z., 1978. Podziemne magazynowanie węglowodorów oraz innych substancji w złożach soli w Polsce jako nowy kierunek ich wykorzystania dla gospodarki narodowej. *Prz. Geol.*, 26(2): 90-96.
- BRĄKA S., 2008. Analiza potrzeb magazynowych gazu ziemnego w Polsce. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 34 (3/2): 25-38.
- BRĄKA S., 2009. Ekonomiczne uwarunkowania lokalizacji podziemnych magazynów gazu na przykładzie Polski. *Geologia*, 35(3): 447-459.
- BRĄKA S., WAWRZYŃIAK E., 1994. Specyfika projektowania i budowy podziemnych magazynów gazu w wysadach solnych na przykładzie KPMG „Mogilno”. *Prz. Gór.*, 50 (10): 15-17.
- BUKOWSKI K., 2011. Badeńska sedimentacja salinarna na obszarze między Rybnikiem a Dębica w świetle badań geochemicznych, izotopowych i radiometrycznych. *Rozprawy i Monografie AGH*, 236: 1-184.
- CAŁA M., CYRAN K., JAKÓBCZYK J., KOWALSKI M., 2020. The challenges of open-pit mining in the vicinity of the salt dome (Belchatów lignite deposit, Poland. *Energies*, 13: 1-23.
- 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*, 63(4):1007–1025.
- CAŁA M., JAKÓBCZYK J., CYRAN K., 2017 - Application of geotechnical monitoring tools for deformation analysis in the vicinity of the Dębina salt dome (Belchatów mine, Poland. *Engineering Geology*, 230: 130–141.
- CHROMIK M., 2016. Koncepcja magazynowania nadwyżek energii elektrycznej w postaci wodoru w kawernach w złożach soli kamiennej w Polsce – wstępne informacje. *Przegląd Solny*, 12: 11-18.
- CYRAN K., 2020. Insight into a shape of salt storage caverns. *Archives of Mining Sciences*, 65(2): 363-398.
- CYRAN K., 2021. The influence of impurities and fabrics on mechanical properties of rock salt for underground storage in salt caverns – a review. *Archives of Mining Sciences*, 66(2): 155-179.
- CZAPOWSKI G., 1998. Geneza najstarszej soli kamiennej cechsztynu w rejonie Zatoki Puckiej (studium sedimentologiczne). Praca doktorska: 1-114. NAG PIG nr 696/99, Warszawa.
- CZAPOWSKI G., 2006. Możliwości bezpiecznego podziemnego magazynowania węglowodorów (paliw) w strukturach geologicznych na obszarze Polski. *Prz. Geol.*, 54(8): 658-659.
- CZAPOWSKI G., 2017. Potencjał zasobowy soli kamiennej i soli potasowo-magnezowych obszaru przedsubdeckiego. *Biuletyn PIG*, 469:105-128.
- CZAPOWSKI G., 2019. Perspektywy lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach soli kamiennych górnego permu (cechsztyt) w Polsce - ocena geologiczna. *Biuletyn PIG*, 477: 21-54.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., 2010. Geology and resources of salt deposits in Poland: the state of the art. *Geological Quarterly*, 54 (4): 509-518.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., MAZUREK S., 2020. Sól kamienna i sole potasowo-magnezowe. W: K. Szamałek, M. Szufflicki, W. Mizerski (red.) Bilans perspektywicznych zasobów kopalni Polski: 218-232. PIG-PIB, Warszawa.
- CZAPOWSKI G., TARKOWSKI R., 2018. Uwarunkowania geologiczne wybranych wysadów solnych w Polsce i ich przydatność dla budowy kawern do magazynowania wodoru. *Biuletyn PIG*, 472: 53-82.
- CZAPOWSKI G., TARKOWSKI R., 2020. Ocena geologicznych możliwości lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach soli kamiennych górnego permu (cechsztyt) w Polsce. *Przegląd Solny*, 15: 22-24.
- CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., 2012. Stan rozpoznania geologicznego struktur solnych regionu szczecińskiego pod kątem oceny możliwości budowy w ich obrębie kawernowych magazynów i składowisk. *Biuletyn PIG*, 448 (1): 145-156.
- CZOCHAL S., 2013. Dokumentacja geologiczna złoża wysadowego soli kamiennej „Goleniów” w kat. D w miejsc. Zielonczyn gm. Stepnica, Goleniów, woj. zachodniopomorskie: 1-23. NAG PIG-PIB nr 271/2014, Warszawa.
- DĘBSKI J., PODEMSKI M., SZANIAWSKI H., 1963. Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w wysadzie solnym w Rogoźnie, woj. łódzkie, pow. łęczycki, m. Rogoźno: 1-151. NAG PIG-PIB nr 4129/381, Warszawa.
- DROGOWSKI J., TADYCH J., 2006. Budowa geologiczna i zagospodarowanie wysadów solnych “Mogilno I” i “Góra” – stan aktualny i perspektywy. *Prz. Geol.*, 54(4): 306. Warszawa.
- GARLICKI A., 1979. Sedymentacja soli miocenkich w Polsce. *Prace geol. PAN, Oddz. w Krakowie*, 119: 1-67.
- GARLICKI A., 1999. Salt deposits in Poland and possibilities of their utilization/Złoża soli w Polsce i perspektywy ich wykorzystania. *Prace nuk. Uniw. Śląskiego*, 1809: 67-75.

- GAŚKA K., 2000. Kawernowy Podziemny Magazyn Gazu „Mogilno”. *Tech. Posz. Geol., Geosynopt. i Geotermia*, 42(223): 33-35.
- GAŚKA K., HOSZOWSKI A., GMIŃSKI Z., KUREK A., 2012. Monografia podziemnych magazynów gazu w Polsce: 1-304. Stow. Inżynierów i Techników Przemysłu naftowego i Gazowniczego, Oddział Warszawa II.
- GRABANIA A., 1992. Ocena polskich złóż soli w aspekcie budowy podziemnych magazynów ciekłych węglowodorów. Materiały konf. PSGS nt. Niekonwencjonalne wykorzystanie złóż soli. 5-6.11.1992, Zakopane; 49-60.
- GRUSZECKI J., 2008. Dodatek nr 4 do dokumentacji geologicznej złoża rud miedzi „Bytom Odrzański” w kat. C1+C2. NAG PIG-PIB nr 4512/2009, Warszawa.
- JASIŃSKI Zb. 2000. Podziemny system magazynowania paliw w kawernach solnych na przykładzie kopalni „Góra”. *Tech. Posz. Geol., Geosynopt. i Geotermia*, 42 (223): 37-44.
- JASIŃSKI Z., 2004. Podziemny system magazynowania paliw w kawernach solnych. *Górnictwo Odkrywkowe*, 3-4: 62-69.
- KALAGA M., RAŁOWICZ B., 1994. Wpływ własności i budowy złoża na deformację kształtu komór ługowniczych. *Przegląd Górn.*, 50 (10): 62-66.
- KALISKI M., GROSS-GOŁACKA E., JANUSZ P., SZURLEJ A., 2013. Magazynowanie gazu ziemnego w strukturach solnych, stan obecny, perspektywy rozwoju. *Przegląd Solny*, 9: 7-19.
- KALISKI M., SIKORA A., 2013. Wodór a podziemne magazynowanie energii w strukturach solnych. *Przegląd Solny*, 9: 26-32.
- KARNKOWSKI P. H., CZAPOWSKI G., 2007. Underground hydrocarbons storages in Poland: actual investments and prospects. *Prz. Geol.*, 55(12/1): 1068-1074.
- KŁECZEK Z., RADOMSKI A., ZEJLAŚ D., 2005. Podziemne magazynowanie. *CMG KOMAG, Prace Naukowe-Monografie*, 9: 1-98.
- KORNOWSKA I., 1980. Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej „Łeba” woj. śląskie, kat. rozpoznania C2: 1-94. NAG PIG-PIB nr 13333 CUG, Warszawa.
- KOROL K., DERDOWSKI R., 2008. Dodatek nr 1 do dokumentacji geologicznej złoża soli kamiennej MECHELINKI w kat. C1:1-33. NAG PIG-PIB nr 4283/2008, Warszawa.
- KUNSTMAN A., POBORSKA-MŁYNARSKA K., URBAŃCZYK K., 2002. Zarys otworowego ługownictwa solnego. Aktualne kierunki rozwoju. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AHG: 1-145. Kraków.
- KUNSTMAN A., POBORSKA-MŁYNARSKA K., URBAŃCZYK K., 2009. Geologiczne i górnicze aspekty budowy magazynowych kawern solnych. *Prz. Geol.*, 57(9): 819-828.
- LANKOF L., 2018. Klasyfikacja polskich złóż soli kamiennej w aspekcie magazynowania i składowania substancji, *Studia, Rozprawy, Monografie*, 209: 1-117.
- LANKOF L., POLAŃSKI K., ŚLIZOWSKI J., TOMASZEWSKA B., 2016. Possibility of Energy Storage in Salt Caverns, *AGH Drilling, Oil, Gas*, 33 (2): 405-415, doi:10.7494/drill.2016.33.2.405.
- LANKOF L., TARKOWSKI R., 2020. Assessment of the potential for underground hydrogen storage in bedded salt formation. *Hydrogen Energy*, 45 (38): 19479-19492. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.024.
- LASKOWSKA T., SZCZEBYŁO J., GAŚKA K., WILKOSZ P., 2009. Polskie magazyny gazu ziemnego – od Mogilna do Kosakowa. *Prz. Geol.*, 57 (9): 755-756.
- MACIEJEWSKI A., 2008. Podziemne magazynowanie paliw płynnych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 34(3/2): 39-53.
- MAJEWSKI J., LISTKOWSKI W., 1969. Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w kat. C2 w rejonie Rybnik-Żory-Orzesze, pow. Rybnik, woj. katowickie. NAG PIG-PIB nr 4827/430, 4344, 8774 CUG, Warszawa.
- MAKOWSKA J., 1982. Dokumentacja geologiczna zasobów złoża soli kamiennej w kat. C2 w rejonie WOJNICZA (woj. Tarnów, gmina Wojnicz): 1-81. NAG PIG-PIB nr 4932/250, Warszawa.
- MAZUREK S., BURLIGA S., WIŚNIEWSKI A., STASZCZAK W., MISIEK Ł., KURDEK D., BARTŁOMIEJCZAK G., 2016. Dodatek nr 2 do Dokumentacji geologicznej złoża soli kamiennej „Kłodawa 1”: 1-52. NAG PIG-PIB nr 3420/2017, Warszawa.
- NEUMANN U., 1995. Dodatek nr 1 do dokumentacji geologicznej złoża rud miedzi „Bytom Odrzański” w kat. C1+C2. NAG PIG-PIB nr 2596/96, Warszawa.
- PARECKA K., 1980. Dokumentacja geologiczna w kat. C1 złoża soli kamiennej w wydzie solnym ŁANIĘTA. Kombinat Geolog.-Pół., Warszawa: 1-87. NAG PIG-PIB nr 13772, Warszawa
- PISIEWICZ T., 2018. Dodatek nr 1 do dokumentacji geologicznej złoża soli kamiennej Lubień, miejsc. Lubień Kujawski, Wola Olszowa, Świerna, Czaple, Nowa Wieś, gmin. Lubień Kujawski, pow. włocławski, woj. kujawsko-pomorskie: 1-85. NAG PIG-PIB nr 6748/2018, Warszawa.
- PISIEWICZ T., 2020. Dodatek nr 1 do dokumentacji geologicznej złoża soli kamiennej „Damasławek”, miejsc. Sielec, Podobowice, Uścikowo, Ustaszewo, Świątkowo, Bogdarka, gm. Żnin, Janowiec Wielkopolski, pow. żniński, woj. kujawsko-pomorskie:1-1164. NAG PIG-PIB nr 7190/2020, Warszawa.
- POBORSKA-MŁYNARSKA K., 2022. Geologiczno-górniczne warunki eksploatacji w kopalniach podziemnych w wydach solnych Polski środkowej: 1-213. Wyd. AGH, Kraków.
- REINISCH R., 2000. Wybrane, istotne aspekty podziemnych magazynów gazu (u progu XXI wieku): 1-301. Wydaw. PLJ, Warszawa.
- STECKA J., WŁODARCZYK-ŻUREK E., 2018. Wybrane zagadnienia z zakresu geologii - kurs przewodnicki: 1-82. Kopalnia Soli „Wieliczka”.
- STOPA J., RYCHLIICKI ST., KOSOWSKI P., 2007. Rola podziemnego magazynowania gazu w kawernach solnych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 34(3/2):11-23.
- ŚLIZOWSKI K., BRAŃKA S., JAWOR E., LANKOF L., ŚLIZOWSKI J., MACIEJEWSKI A., MAZUR M., NEY R., PISIEWICZ T., ROGOWSKA E., URBAŃCZYK K. & WIŚNIEWSKA M. 2006. Ocena możliwości magazynowania substancji w złożach soli kamiennej. IGSMiE PAN Kraków: 1-286. NAG PIG-PIB nr 715/2006, Warszawa.
- ŚLIZOWSKI K., SAŁUGA P., 1996. Surowce mineralne Polski. Surowce chemiczne - sól kamienna: 1-178. Wyd. Centrum PPG-SMiE PAN, Kraków.
- ŚLIZOWSKI J., SERBIN K., WIŚNIEWSKA M., 2010. Efektywna pojemność komór magazynowych gazu w pokładowych złożach soli kamiennej. *Geologia*, 36 (3): 407-417.
- ŚLIZOWSKI J., URBAŃCZYK K., (red.), 2011. Możliwości magazynowania gazu ziemnego w polskich złożach soli kamiennej w zależności od warunków geologiczno-górnicznych: 1-132. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- ŚLIZOWSKI J., URBAŃCZYK K., LANKOF L., SERBIN K., 2011. Analiza zmienności polskich pokładów soli kamiennej w aspekcie magazynowania gazu, *Wiertnictwo Nafta Gaz*, 28 (1-2): 431-442.



- SZUFLICKI M., MALON A., TYMIŃSKI M. (red.), 2021. Bilans zasobów kopalin i wód podziemnych Polsce wg stanu na 31.XII.2020 r.: 1-508. PIG-PIB, Warszawa.
- TARKOWSKI R., CZAPOWSKI G., 2018. Salt domes in Poland – potential sites for hydrogen storage in caverns. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43: 21414-21427.
- TARKOWSKI R., CZAPOWSKI G., 2019. Geological possibility of hydrogen storage caverns location in the Upper Permian (Zechstein) stratiform rock salts and salt domes in Poland. *European Workshop on Underground Energy Storage*, 7-8 November 2019, Paris, France. <http://www.energnet.eu/european-workshop-underground-energy-storage-presentations>.
- URBAŃCZYK K., 2021. Ługowanie w złożach o małej miąższości (proces ługowania kawern solnych cz. V). XXV Międzynarodowe Sympozjum Solne QUO VADIS SAL, VARIA SAL- -WSZYSTKO O SOLI. 30.09-1.10.2021, AGH Kraków: 34-37.
- URBAŃCZYK K., CZAPOWSKI G., LANKOF L., ŚLIZOWSKI K., TOMASZCZYK M., 2011. Analiza zdolności magazynowej wybranych pokładów soli. W: J. Ślizowski, K. Urbańczyk (red.), *Możliwości magazynowania gazu ziemnego w polskich złożach soli kamiennej w zależności od warunków geologiczno-górnictwowych*: 49-89. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- WAGNER R., 1995. Stratygrafia i rozwój basenu cechsztyńskiego na Niżu Polskim. *Prace PIG*, 146: 1-71.
- WERNER Z., 1979. Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w kat. C1 w rejonie Zatoki Puckiej: 1-183. NAG PIG-PIB nr 13050 CUG, Warszawa.
- ZEJLAŚ D., 2020. Magazyny gazu ziemnego w cechsztyńskich formacjach solnych elementem bezpieczeństwa energetycznego Polski. *Prz. Geol.*, 68 (11): 824-832.



## Zmienność zjawiska zaciskania wyrobisk komorowych w przestrzeni pola nr 2 w Kopalni Soli „Kłodawa”

### Variability of the convergence phenomenon in the post-exploitation voids of the mining areas in Field 2 of the “Kłodawa” Salt Mine

Józef BIENIASZ<sup>1</sup>, Jakub PIETRAS<sup>1</sup>, Jolanta MARCOLA-SADOWSKA<sup>2</sup>, Damian KURDEK<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Kopalnia Soli „KŁODAWA” S.A. 62-650 Kłodawa, Aleja 1000-lecia 2; e-mail: jmarcola@sol-klodawa.com.pl, dkurdek@sol-klodawa.com.pl

<sup>1</sup> The Research and Development Centre for Mining of Chemical Raw Materials “CHEMKOP” Ltd., Jozefa Wybickiego 7, 31-261 Cracow; e-mail: jozef.bieniasz@chemkop.pl, jakub.pietras@chemkop.pl

<sup>2</sup> “Kłodawa” Salt Mine, Aleja 1000-lecia 2, 62-650 Kłodawa; e-mail: jmarcola@sol-klodawa.com.pl, dkurdek@sol-klodawa.com.pl

#### STRESZCZENIE

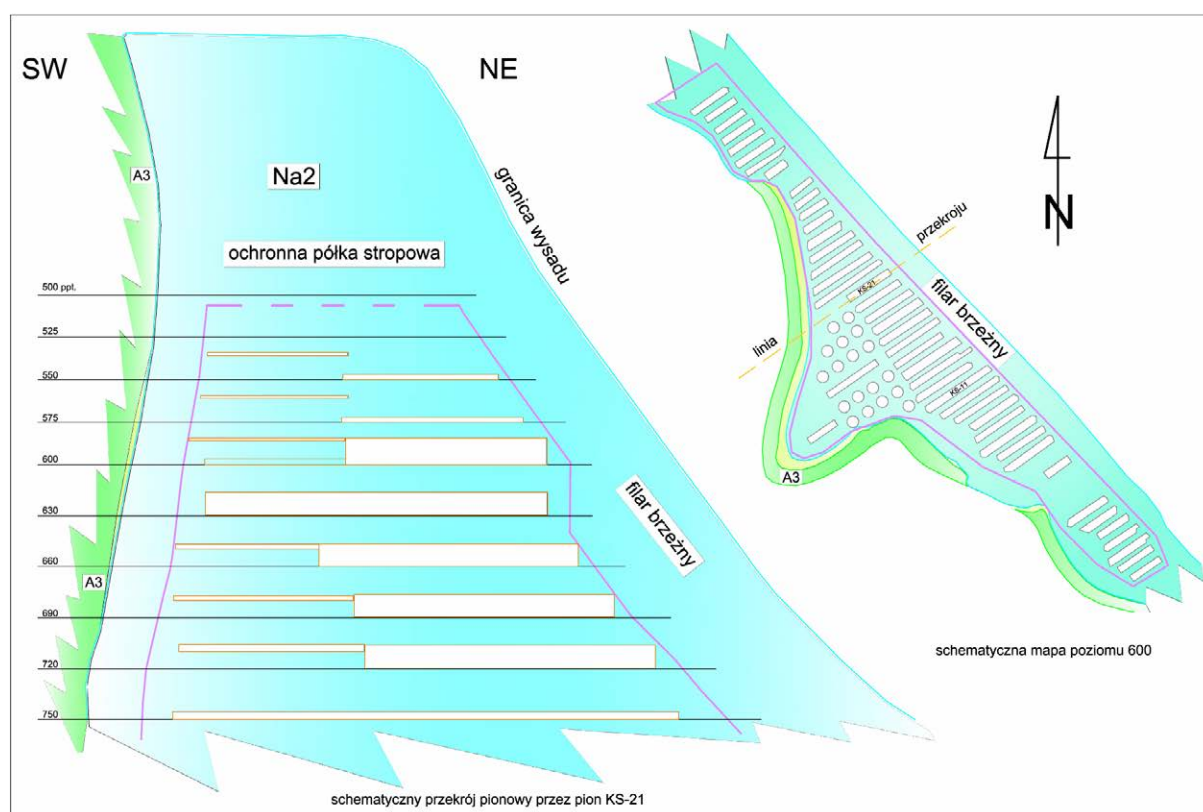
Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych „Chemkop” Sp. z o.o. od ponad 40 lat wykonuje pomiary zjawisk deformacji poeksploatacyjnych w Kopalni Soli „Kłodawa” S.A., stosując własne, oryginalne rozwiązania pomiarowe. W ostatnich kilkunastu latach systematycznie rozbudowywano sieć monitoringu zjawisk deformacyjnych w wyrobiskach kopalni. Dotyczy to także pola nr 2 będącego rejonem najbardziej skoncentrowanej eksploatacji złoża solnego w wysadzie. Rozbudowa sieci pomiarowej, podążająca za schodzącą coraz głębiej eksploatacją, objęła zarówno rejon centralny pola nr 2 jak i jego obszary peryferyjne.

Zgromadzone dane pomiarowe pozwalają po raz pierwszy na próbę opisanie obserwowanej zmienności zjawiska zaciskania pustek poeksploatacyjnych w całej przestrzeni eksploatacyjnej pola nr 2. Obliczone wartości parametru względnej szybkości zaciskania pionowego komór skorelowano z ich lokalizacją w strukturze wyrobisk pola eksploatacji, analizując rozkład parametru w przekrojach podłużnym i poprzecznym pola.

Otrzymano generalny obraz pokazujący niewielkie szybkości zaciskania pionowego charakterystyczne dla peryferyjnych rejonów pola rozumianych jako strefy przygranicz-

#### ABSTRACT

The workers of the “Chemkop” Research and Development Centre for Mining of Chemical Materials Ltd. have been surveying the deformation phenomena in the post-exploitation voids of the “Kłodawa” Salt Mine S.A. for over forty years, using original in-house measurement methods. In the last dozen of years, the deformation monitoring network was regularly expanded in the workings of entire mine. The network also covered Field 2: the area of the most concentrated mining operations conducted in the salt-dome deposit. The expansion of the measurement network followed the deep mining operations and covered both central and peripheral areas of Field 2. The measurement data collected in the mine allow for the first time for an attempt at describing the observable variability of the convergence phenomena occurring in the post-exploitation voids of the entire mining space of Field 2. The calculated values of the relative vertical chamber convergence rate parameter were correlated with the chamber locations, within the structure of the mining Field excavations, by analysing the parameter distribution in longitudinal and transverse cross-sections. The research results show low vertical convergence rates that are characteristic for the peripheral regions of the Field, understood as border zones of the mining space, with



Ryc. 1. Lokalizacja wyrobisk w złożu soli kamiennej białej i przestrzeni pola nr 2

Fig. 1. Locations of the workings, within the white rock salt deposit, Field 2.

ochronna półka stropowa: protective ceiling shelf; granica wysadu: salt dome boundary; filar brzeżny: edge pillar; linia przekroju: cross-section line; schematyczna mapa poziomu 600: schematic map of Level 600

ne przestrzeni eksploatacji, oraz strefę większych wartości szybkości zaciskania w centralnej części pola i rejonie środka przestrzeni strefy eksploatacji.

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

## 1. WSTĘP

Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych „Chemkop” Sp. z o.o. od ponad 40 lat wykonuje pomiary zjawisk deformacji poeksploatacyjnych w Kopalni Soli „Kłodawa” S.A., stosując własne, oryginalne rozwiązania pomiarowe. Uzupełniają one obserwacje prowadzone standardowo przez służby miernicze Kopalni. W ostatnich kilkunastu latach systematycznie rozbudowywano sieć monitoringu zjawisk deformacyjnych w wyrobiskach całej kopalni. Obecnie obejmuje ona wszystkie znaczące pola eksploatacyjne i pozwala na rejestrowanie przejawów deformacji w miejscach i rejonach istotnych ze względu na bezpieczeństwo Kopalni.

Pole nr 2 (ryc. 1) jest rejonem najbardziej skoncentrowanej eksploatacji złoża solnego w wysadzie. Wykonana w ostatnich latach rozbudowa przestrzenna sieci konwergen-

cy jest to strefa wyższych wartości szybkości zaciskania w centralnej części pola i w rejonie środka przestrzeni strefy eksploatacji.

**Key words:** post-exploitation deformations, “Kłodawa” Salt Mine, deformation monitoring, convergence

## 1. INTRODUCTION

The workers of the “Chemkop” Research and Development Centre for Mining of Chemical Materials Ltd. have been surveying the deformation phenomena in the post-exploitation voids of the “Kłodawa” Salt Mine S.A. for over forty years, using original in-house measurement methods. The works complement the standard observations conducted by the Salt Mine surveyors. In the last dozen of years, the deformation monitoring network was regularly expanded in the workings of entire mine. Presently, the network covers all essential mining fields and it allows for keeping records of deformation events in the locations and areas that are essential for the Salt Mine’s safety.

Field 2 (Fig. 1) is the area of the most concentrated mining operations conducted in the salt dome deposit. The expansion of the convergence monitoring network completed in recent years allows for observation of the deformation phenomena within the whole depth profile of the Field, including its cen-

cyjnej umożliwia obecnie obserwację zjawisk w całym profilu głębokościowym pola, zarówno w jego części centralnej, jak też w rejonach peryferyjnych, przy granicach eksploatacji.

Zgromadzone dane pomiarowe pozwalają po raz pierwszy na próbę opisanie obserwowanej zmienności zjawiska zaciśnięcia pustek poeksploatacyjnych w całej przestrzeni eksploatacyjnej pola nr 2.

## 2. CHARAKTERYSTYKA POLA EKSPLOATACJI NR 2

Cechsztyńskie złożo kłodawskie składa się z warstw soli kamiennych czystych oraz w różnym stopniu zanieczyszczonych, a także z występujących lokalnie warstw soli potasowo-magnezowych i anhydrytów. Ilościowo w wysadzie zdecydowanie przeważają, nieposiadające znaczenia przemysłowego, utwory płonne tj. sole ilaste, zubry, ilowce oraz anhydryty. Z tych powodów wybieranie złoża prowadzone jest w kilku odrębnych polach eksploatacji i ogranicza się do soli o najlepszych parametrach użytkowych.

Pole nr 2 starszej soli kamiennej białej (Na<sub>2</sub>) leży przy NE granicy wysadu. Od strony wnętrza wysadu SW białe sole pola przechodzą stopniowo w potasonośne warstwy przejściowe, kończące cyklotem PZ2, kontaktujące się z szarym iłem solnym i anhydrytem głównym cyklotemu PZ3 (PZZ 2018).

Parametry wytrzymałościowe soli białej jako ośrodka skalnego, w którym zachodzą zjawiska deformacyjne, zależne są od jego miejscowych cech fizycznych oraz metodyki ich wyznaczania. Wytrzymałość doraźna na ściskanie jednoosiowe  $R_c$  wynosi od ok. 25 do 40 MPa w zależności od ziarnistości badanej próbki (Bieniasz i in. 2008; Flisiak 2008). Wyznaczone numerycznie moduły odkształceń i sprężystości na podstawie badań obciążeniowo-odkształceniowych próbek soli białej wynoszą;  $E_o$  od 5,2 do 6,5 GPa i  $E_s$  od 6,2 do 8,1 GPa.

W polu nr 2, od 1964 roku do chwili obecnej, eksploatowana jest sól biała na głębokościach od 500 do 750 m. Pole ma kształt nieregularny (ryc. 1), o długości ok. 1,5 km oraz największej szerokości (w części środkowej) wynoszącej ok. 0,5 km i malejącej do kilkudziesięciu metrów (przy granicach SE i NW). Złożo wybierane jest w większości systemem komór niskich (prostokątnych), z wyjątkiem fragmentu rozszerzonej części centralnej, gdzie w przedziale głębokości 500-600 m ppt. zastosowano układ komór cylindrycznych o średnicach ok. 24 m.

Na każdym z 10-ciu istniejących między poziomów w polu wybrano ok. 50 komór prostokątnych o długościach od kilkudziesięciu do niemal 300 m. Według stanu na koniec 2020 roku, wybranych zostało łącznie ponad 400 komór, a sumaryczna objętość pustek wynosi ok. 9,5 mln m<sup>3</sup>, co stanowi 48% objętości pustek w kopalni. Obecnie trwają prace przy udostępnianiu nowych poziomów eksploatacyjnych na głębokościach 780 i 810 m ppt.

tral and peripheral areas, close to the mining area's boundaries.

The measurement data collected in the mine allow for the first time for an attempt at describing the observable variability of the convergence phenomena occurring in the post-exploitation voids of the entire mining space of Field 2.

## 2. DESCRIPTION OF MINING FIELD 2

The Zechstein salt deposit of the "Kłodawa" Salt Mine is composed of both pure and impure rock salt layers, as well local layers of potassium-magnesium salts and anhydrites. In quantitative terms, the salt dome is highly dominated by gangue deposits without industrial application, e.g. silt salts, zubers, mudstone, or anhydrites. For that reason, the deposit is mined within several separate Mining Fields and is limited to the salts representing the best performance parameters.

Field 2 of the older white rock salt (Na<sub>2</sub>) is situated NE of the salt dome's boundary. SW of the salt dome's centre, white rock salt is gradually changing in nature to transition potassium layers, concluded by cyclothem PZ2, being in contact with grey salty mudstone and main anhydrite of cyclothem PZ3 (PZZ 2018).

The strength parameters of white rock salt, as a rock medium in which deformation phenomena occur, depend on local physical properties and the strength determination methods applied. Temporary uniaxial compression strength  $R_c$  ranges from ca. 25 to 40 MPa, depending on the sample's granularity (Bieniasz et al. 2008; Flisiak 2008). The deformation and elasticity moduli, determined numerically on the basis of load and deformation tests conducted on white rock salt samples, were as follows:  $E_o$  from 5.2 to 6.5 GPa and  $E_s$  from 6.2 to 8.1 GPa.

White rock salt has been mined at the depths of 500–700 m in Field 2 since 1964. The Field has an irregular shape (Fig. 1), with the length of ca. 1.5 km and the largest width in its central section of ca. 0.5 km, decreasing to about a dozen of metres (close to SE and NW boundaries). The deposit is mined mostly by the low rectangular chamber method, with the exception of a wider section in the central area, where cylindrical chambers were cut out, with the diameter of ca. 24 m, at the depth of 500–600 m under the surface level.

At each of the ten inter-levels of the Field, ca. 50 rectangular chambers were cut out, with the lengths from a dozen to nearly 300 m. According to the status at the end of 2020, more than 400 chambers were cut out in total, with the total volume of voids amounting to ca. 9.5 mio. m<sup>3</sup>, equivalent to 48% of the total Salt Mine's void volume. Presently, the works concentrate on making new mining levels available at the depths of 780 and 810 m under the surface level.

### 3. SIEĆ POMIAROWA I TECHNIKI OBSERWACJI

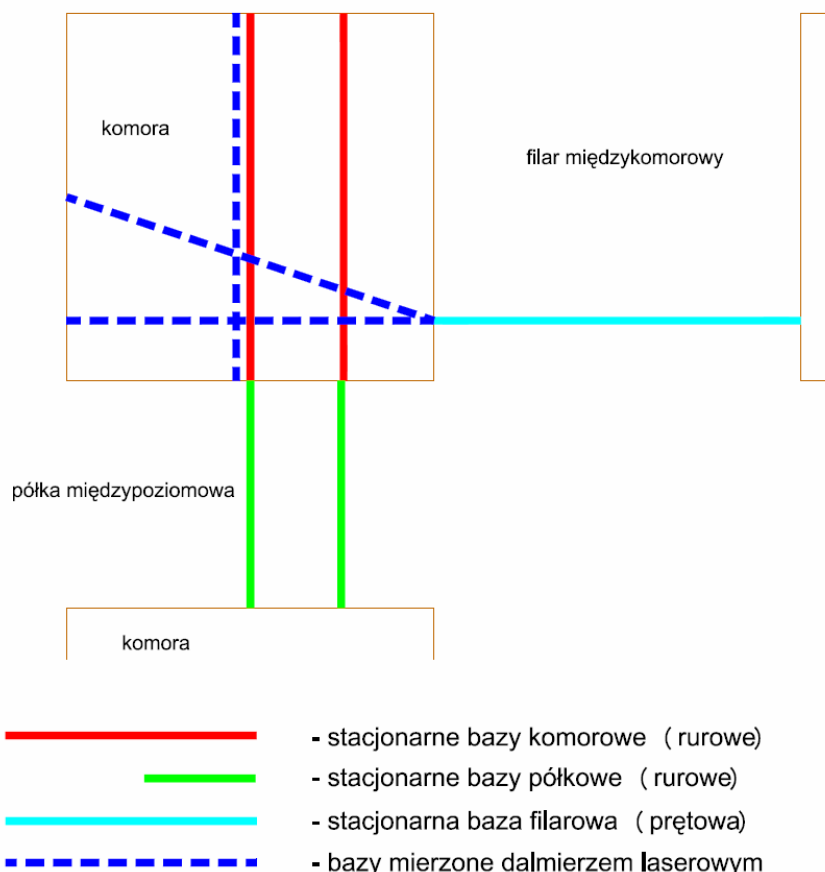
Systematyczne, cykliczne pomiary deformacji komorowych pustek poeksploatacyjnych, filarów i półek w polu nr 2 rozpoczęto w 1980 roku, w pionie KS-11, instalując bazy stacjonarnych urządzeń pomiarowych. Stanowiły je wiszące kolumny rur stalowych zakotwionych w stropie komory i sięgające do jej spągu, w którym zamocowano indeks odczytowy. W przypadku półek międzypoziomowych i filarów międzykomorowych ciągi rurowe lub prętowe zainstalowano w otworach przewiercających te calizny. Dokładność odczytu zmian długości tych baz wynosi ok. 1 mm. Po ponad 40 latach stosowania tej technologii można stwierdzić, że to rozwiązanie pomiarowe jest trwałe i nadal skuteczne, jednakże ze względu na koszty i trudności techniczne nie może być stosowane na szeroką skalę.

Typowe, kilkubazowe stanowisko pomiarowe lokalizowano w okolicach środka geometrycznego komory na danym poziomie (ryc. 2). W tym samym czasie rozpoczęto obserwacje zaciskania wyrobisk chodnikowych na dwóch ciągach wielobazowych stanowisk, zlokalizowanych w pionach KS-0 i KS-21, od strony filara brzeżnego.

### 3. MONITORING NETWORK AND OBSERVATION TECHNIQUES

Regular measurements of post-exploitation void, pillar, and protective shelf deformations were initiated in Field 2 in 1980. Measurement stations were installed in Vertical Section KS-11. Hanging steel pipe columns were anchored in the chamber ceilings, reaching down to the chamber floors where reading panels were mounted. In the cases of inter-level shelves and inter-chamber pillars, the pipe or rod station sets were installed in the boreholes drilled within virgin rock. The pipe or rod length changeability accuracy was ca. 1 mm. After more than 40 years of using that measurement technology, we concluded that the solution applied there had been durable and effective. However, the method cannot be applied on a wide scale due to high costs and certain technical difficulties.

A typical surveying position, composed of several measurement stations, was installed near the geometric chamber centre at the selected Level (Fig. 2). At the same time, corridor convergence observations were initiated at two multi-station series, situated in Section KS-0 and KS-21, on the edge pillar's side.



Ryc. 2. Schemat lokalizacji baz pomiarowych w przekroju poprzecznym komory i calizn otaczających

Fig. 2. Locations of the measurement stations, within the transverse cross-section of the chamber and the surrounding virgin rock  
 komora: chamber; filary międzykomorowy: inter-chamber pillar; półka międzypoziomowa: inter-level protective shelf; stacjonarne bazy komorowe: stationary chamber stations; stacjonarne bazy półkowe: stationary shelf stations; stacjonarna baza filarowa: stationary pillar station; (rurowe): (pipe); (prętowa): (rod); bazy mierzone dalmierzem laserowym: stations measured by a laser range finder



W latach 90-tych ubiegłego wieku wdrożono tańszą technikę pomiarową wykorzystującą baz dalmierz laserowy do pomiaru długości baz (Bieniasz i in. 2003). Bazy pomiarowe sygnalizowane są specjalnymi znakami, niemal dowolnie rozmieszczanymi na caliznach wyrobiska. Tworzą one układ baz poziomych, pionowych i ukośnych pozwalających pomiarowo uchwycić zaciskanie przekroju komory (ryc. 2). Dokładność pomiaru zmian długości baz wynosi ok. 1 mm. Rozwiązanie to pozwoliło na wzbogacenie tradycyjnego układu baz na dolnych poziomach w pionie KS-11. Rozszerzono także zakres pomiaru konwergencji o rejon zjawisk wodnych nr 30, 31 i 32 w chodniku WZ619/2 w SE skrzydle pola nr 2, a także o komory sąsiednie do komory KS-20/600 wybieranej na zasadzie odstępstwa od generalnego kierunku eksploatacji.

Pierwotną, lokalną sieć monitoringu wybierania komory KS-20/600, obejmującą poziomy 575, 600 i 630, rozbudowano na cały rejon pionu KS-21, na poziomach od 660 do 750, a następnie uzupełniono o bazy zainstalowane na poziomach 525 i 550, jako element kontroli stropowej półki ochronnej nad polem nr 2. Cechą charakterystyczną tego fragmentu sieci konwergencyjnej było lokalizowanie kilku stanowisk pomiarowych w jednej, długiej komorze lub w ciągu współosiowych komór.

W chwili obecnej system kontroli zjawisk poeksploatacyjnych zachodzących wewnątrz górotworu w polu nr 2 obejmuje:

- ciąg urządzeń pomiarowych w pionie KS-11 na poziomach 525-750 (pomiar deformacji komór, filarów i półek w rejonie centrum pola),
- ciąg urządzeń pomiarowych w pionie KS-21 na poziomach 525-750 (pomiar deformacji komór, sporadycznie filarów i półek w rejonie centrum pola),
- ciąg baz pomiarowych w rejonie tzw. „komór literowych” w SE części pola na poziomach 500-720, (pomiar zaciskania pionowego komór w rejonie peryferyjnym pola),
- bazy w 9-ciu komorach najwyższych poziomów eksploatacyjnych pod półką ochronną na poziomach 500-550 (pomiar zaciskania pionowego w przystropowym rejonie peryferyjnym pola),
- ciąg baz pomiarowych na skrzyżowaniach chodników pionów KS-0 i KS-21 z chodnikiem przyfilarowym na międzypoziomach w przedziale głębokości 500-780 (pomiar zaciskania pionowego i poziomego wyrobisk chodnikowych),
- sieć pomiaru globalnych przemieszczeń pionowych i poziomych górotworu pod półką ochronną na poziomach 487-500-525 (w tym pomiar zaciskania pionowego wyrobisk chodnikowych na 25-ciu stanowiskach).

W ujęciu statystycznym, w polu nr 2 obserwowane są obecnie 162 bazy rejestrujące zaciskanie 41 komór, 11 filarów międzykomorowych i 10 półek międzypoziomowych oraz ok. 100 baz monitorujących zaciskanie chodników. Obecnie

A less expensive technology was implemented in the 1990's, using laser range finders at the stations to measure the pipe or rod lengths (Bieniasz et al. 2003). The stations are marked with special benchmarks, almost freely distributed on the virgin rock in the workings. Those marks constitute a system of horizontal, vertical and perpendicular benchmarks that allow for chamber convergence measurements (Fig. 2). The station length variability accuracy is ca. 1 mm. That solution expanded the traditional station distribution system at the lower levels in Section KS-11. The measurement stations were also mounted in the areas of Water Hazards No. 30, 31, and 32 of Corridor WZ619/2 in the SE wing of Field 2, as well as in the chambers adjacent to Chamber KS-20/600 cut out outside the general direction of mining operations.

The original local monitoring network of the mining operations in Chamber KS-20/600, conducted at Levels 575, 600, and 630, was expanded to cover the whole area of Section KS-21, at Levels from 660 to 750, followed by adding measurement stations installed at Levels 525 and 550, as the components of the ceiling protective shelf monitoring system over Field 2. The installation of several measurement stations in one long chamber, within a series of coaxial chambers, was a significant feature of that fragment of the convergence measurement network.

Presently, the post-exploitation phenomena monitoring system inside the rock mass of Field 2 includes the following:

- A series of measurement stations in Section KS-11, Levels 525-750 (deformation measurements of chambers, pillars, and protective shelves in the centre of the Field).
- A series of measurement stations in Section KS-21, Levels 525-750 (deformation measurements of chambers, including sometimes pillars and protective shelves, in the centre of the Field).
- A series of measurement stations in the area of the so-called “Letter-numbered chambers,” in the SE section of the Field, Levels 500-720 (vertical convergence measurements in chambers, in the peripheral zones of the Field).
- Measurement stations in nine chambers at the highest Mining Levels under the ceiling protective shelf, Levels 500-550 (vertical convergence measurements in the ceiling of the peripheral zones of the Field).
- A series of measurement stations at the intersections of the corridors of Sections KS-0 and KS-21, with the pillar corridor, Sublevels 500-780 (vertical and horizontal convergence measurements in the corridors).
- A measurement network for global vertical and horizontal relocation measurements of the rock mass under the protective shelf, Levels 487-500-525 (including the vertical convergence measurements of corridors at 25 stations).

Statistically, Field 2 contains presently 162 stations that measure and record convergence in 41 chambers, 11 inter-chamber pillars, 10 inter-level protective shelves, plus ca.

pomiary wykonywane są w interwale rocznym, a ich wyniki gromadzone w komputerowych bazach danych. Obliczenia parametrów deformacji wykonywane są z wykorzystaniem własnego oprogramowania i prezentowane w formie graficznej w technice CAD. Dzięki tak rozbudowanej sieci monitoringu, pochodzący z corocznych, systematycznych obserwacji obszerny materiał pomiarowy pozwala na wstępną charakterystykę zmienności zjawisk deformacyjnych zachodzących w całej przestrzeni pola nr 2.

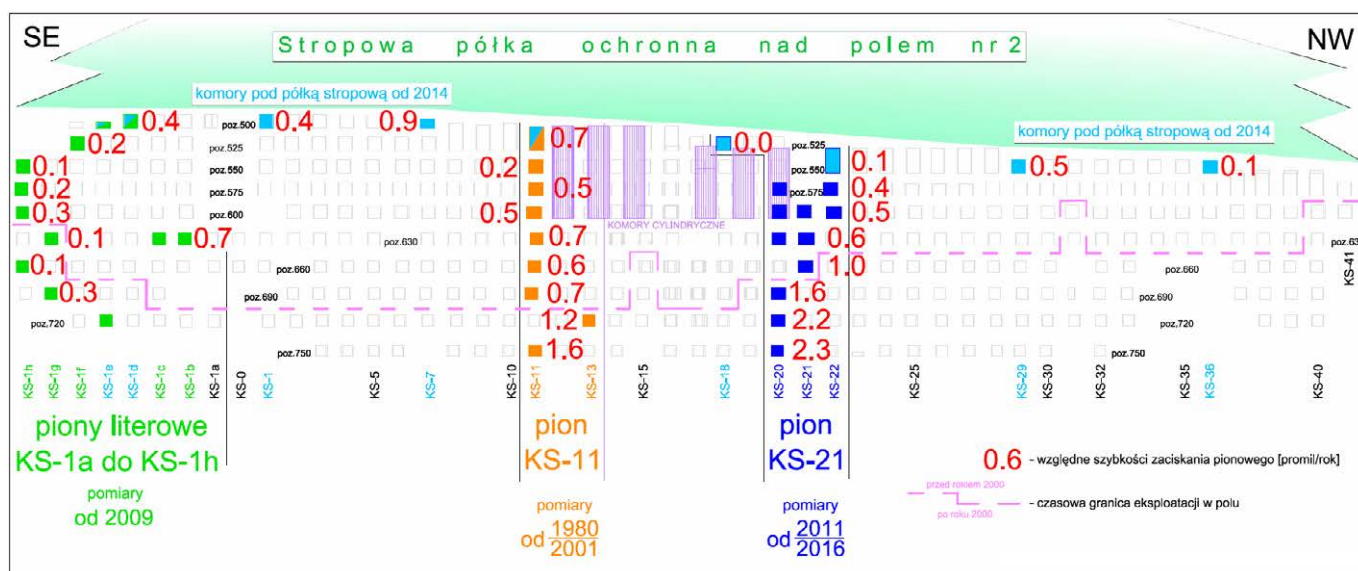
#### 4. ANALIZA WYNIKÓW OBSERWACJI ZACISKANIA KOMÓR W POLU NR 2 DLA USTALENIA PRZESTRZENNEJ ZMIENNOŚCI ZJAWISKA

Cykliczne pomiary sieci konwergencyjnej w polu nr 2 pozwoliły zgromadzić stosunkowo bogaty materiał pomiarowy, dający podstawę do interpretacji w ujęciu statystycznym. Dla celów analizy wykorzystano wyniki pomiarów zaciskania pionowego komór prostopadłościennych z ostatnich 4 lat, czyli okresu, kiedy sieć pomiarowa w polu była już dobrze rozwinięta w sensie przestrzennym. Umożliwia to porównanie rejestrowanego zaciskania pionowego w różnych częściach pola nr 2, tj. w rejonach centralnych pionów KS-11 i KS-21, w rejonach peryferyjnych, czyli, tzw. „komór literowych” (KS-1a do KS-1h) oraz w strefie przystopowej. Otrzymane wartości średniej szybkości względnej zaciskania pionowego z lat 2016–2020, na tle przekroju podłużnego pola nr 2, pokazano na rycinie 3.

100 stations monitoring convergence in the mine’s corridors. Currently, the measurements are taken yearly and their results are collected in computer databases. The deformation parameter calculations are conducted with the use of the Chemkop’s in-house software and presented in the CAD graphic form. Owing to the expanded monitoring network, the large measurement database collected yearly allows for providing a preliminary description of the variability of the deformation phenomena occurring in the entire space of Field 2.

#### 4. ANALYSIS OF THE CHAMBER CONVERGENCE OBSERVATION RESULTS IN FIELD 2 TO ESTABLISH THE SPATIAL VARIABILITY OF THE CONVERGENCE PHENOMENA

Our regular convergence measurements conducted in Field 2 provided us with a fairly reach database allowing for statistical data interpretation. We used for our analysis the vertical convergence data collected in rectangular chambers in the past four years, or the period in which the measurement network was well developed spatially. Consequently, it is possible to make comparisons of vertical convergence rates in various sections of Field 2, i.e. the central areas of Sections KS–11 and KS–21, the peripheral section or the so-called “Letter-numbered chambers” (KS–1a to KS–1h), and in the ceiling zones. The average vertical convergence rate values of 2016–2020 are presented in Fig. 3 on the layout of the longitudinal cross-section of Field 2.



Ryc. 3. Względna szybkość zaciskania pionowego komór w przekroju podłużnym pola nr 2

Fig. 3. Relative vertical convergence rates in the mine chambers, presented on the longitudinal cross-section of Field 2. stropowa półka ochronna nad polem nr 2: ceiling protective shelf over Field 2; komory pod półką stropową od 2014: chambers under the ceiling protective shelf since 2014; pion literowe KS-1a do KS-1h, pomiary od 2009: “Letter-numbered sections” (KS-1a to KS-1h), measurements since 2009; pion KS-11, pomiary 1980–2009: Section KS-11, measurements of 1980–2009; pion KS-21, pomiary 2011–2016: Section KS-21, measurements of 2011–2016; względne szybkości zaciskania pionowego [promil/rok]: relative vertical convergence rates [per mil/year]; czasowa granica eksploatacji w polu przed rokiem 2000, po roku 2000: time limit of the mining operations in the Field before and after year 2000; poz.: Level



Generalnie konwergencja pionowa komór w rejonach pionów KS-11 i KS-21 na poziomach od 525 do 630 jest na zbliżonym poziomie wielkości, dla porównywalnych głębokości i porównywalnego wieku komór. Można ją uznać za charakterystyczną dla górnej, centralnej części pola nr 2 i typową dla komór w wieku 35-50 lat. Na poziomach niższych obecnie rejestrowane są wyższe wartości szybkości zaciskania w pionie KS-21 w porównaniu z pionem KS-11. Wynika to z młodszego średnio o ok. 5 lat wieku komór i wygasającego wpływu robót eksploatacyjnych, prowadzonych na najniższych poziomach w tym rejonie i zakończonych niespełna 3-4 lata temu. Ogólnie wartości szybkości zaciskania pionowego w rejonie centralnym pola są średnio kilkakrotnie wyższe niż notowane w peryferyjnych komorach KS-1g i KS-1h, na ekwiwalentnych głębokościach. W tym peryferyjnym rejonie pola nie obserwuje się praktycznie zmienności szybkości zaciskania w funkcji głębokości.

Podjęto także próbę określenia charakteru narastania szybkości zaciskania w funkcji odległości od brzegu pola. W tym celu wykorzystano interesujący rozkład pomierzonych wartości zaciskania na poziomie 630 w rejonie SE. W tym przypadku widoczny jest wzrost szybkości zaciskania: od wartości 0,1 promila/rok w peryferyjnej komorze KS-1g, do wartości 0,7 promila/rok w komorze KS-1b, charakterystycznej raczej dla centrum pola. Komora KS-1b jest odległa od SE granicy eksploatacji jedynie o 150 m. Może to wskazywać, że rejestrowane, niewielkie szybkości zaciskania dotyczą jedynie komór zlokalizowanych bezpośrednio przy granicy eksploatacji.

Pierwsze obserwacje (z lat 2011-15) pierwotnej sieci na poziomach 575-630, w otoczeniu komory KS-21/600, pozwoliły uchwycić nowe, ciekawe zjawisko, polegające na występowaniu wyraźnej zmienności wartości zaciskania pionowego w stosunkowo niewielkiej przestrzeni górotworu, często nawet w tym samym wyrobisku komorowym. Było to możliwe dzięki rozmieszczeniu w jednej komorze (na danym poziomie) kilku stanowisk pomiarowych. Wcześniej typowe było lokalizowanie tylko jednego stanowiska pomiarowego, zwykle w rejonie środka geometrycznego komory.

Znana jest, potwierdzona wieloma pomiarami zależność szybkości zaciskania pustek poeksploatacyjnych od ich głębokości w górotworze i wieku wyrobiska. Dlatego zrozumiałym wydaje się występowanie niskich wartości konwergencji pionowej (rzędu dziesiątych części promila/rok) na najwyższych poziomach eksploatacyjnych, gdzie znajdują się najstarsze komory liczące ponad 40 lat. Natomiast najwyższe, zanotowane szybkości zaciskania (przekraczające 2 promile/rok) są charakterystyczne dla najniższych poziomów eksploatacyjnych, gdzie wiek komór wynosi jedynie kilka lat.

Dysponując wynikami pomiarowymi z całego profilu eksploatacji, sporządzono szkic pokazujący schematyczny rozkład szybkości zaciskania pionowego w pionowym prze-

Generally, the vertical convergence rates of the chambers situated in Sections KS-11 and KS-21, Levels from 525 to 630, are similar at comparable depths and chamber ages. We can recognize that the rates are typical for the top and central sections of Field 2 and typical for the chambers aged 35-50 years. However, we are recording presently higher convergence rate values at lower levels of Section KS-21, in comparison to those of Section KS-11. That fact results from the younger age of ca. 5 years of the chambers in question and the decreasing impact of the mining operations conducted at the mine's lowest levels in those areas which works were concluded only 3-4 years ago. Generally, the vertical convergence rates recorded in the central section of the Field are several times higher on the average than those recorded in peripheral Chambers KS-1g and KS-1h, considering equivalent depths. Practically, we have not observed any variability of the vertical convergence rates in the function of depth in that peripheral section of the Field.

An attempt at describing the nature of increasing convergence rates in the function of distance from the Field's edge was made. An interesting distribution of the measured convergence values at Level 630, SE area, was used for that purpose. In that case, we observed the increase of the convergence rates, from 0.1 per mil/year in the peripheral Chamber KS-1g to 0.7 per mil/year in Chamber KS-1b, which is rather typical for the centre of the Field. Chamber KS-1b is only 150 m away SE of the mining field's border. That can indicate that the low convergence rates recorded there concerned only the chambers situated close to the mining field's border.

The first data of 2011-2015, collected at the original station network at Levels 575-630, around Chamber KS-21/600, allowed for identification of new and interesting phenomenon consisting in the occurrence of clear changeability of vertical convergence rates, within a relatively small rock-mass space, often even within the same chamber working. That was possible to record owing to the distribution of several measurement stations in one chamber (at the given level). Earlier, only one measurement station was usually situated, mostly in the geometric centre of the chamber.

The dependence of the convergence rate of the post-exploitation voids on the chamber depth within the rock mass and the working age has been known and confirmed by many measurements. For that reason, it seems to be understandable why low vertical convergence values occurred (in the order of the tenth parts of per mil/year) at the highest mining levels where the oldest chambers are situated. Those chambers are more than 40 years old. However, the highest recorded convergence rates (exceeding 2 per mil/year) are typical for the lowest mining levels where the chamber ages amount to only several years each.

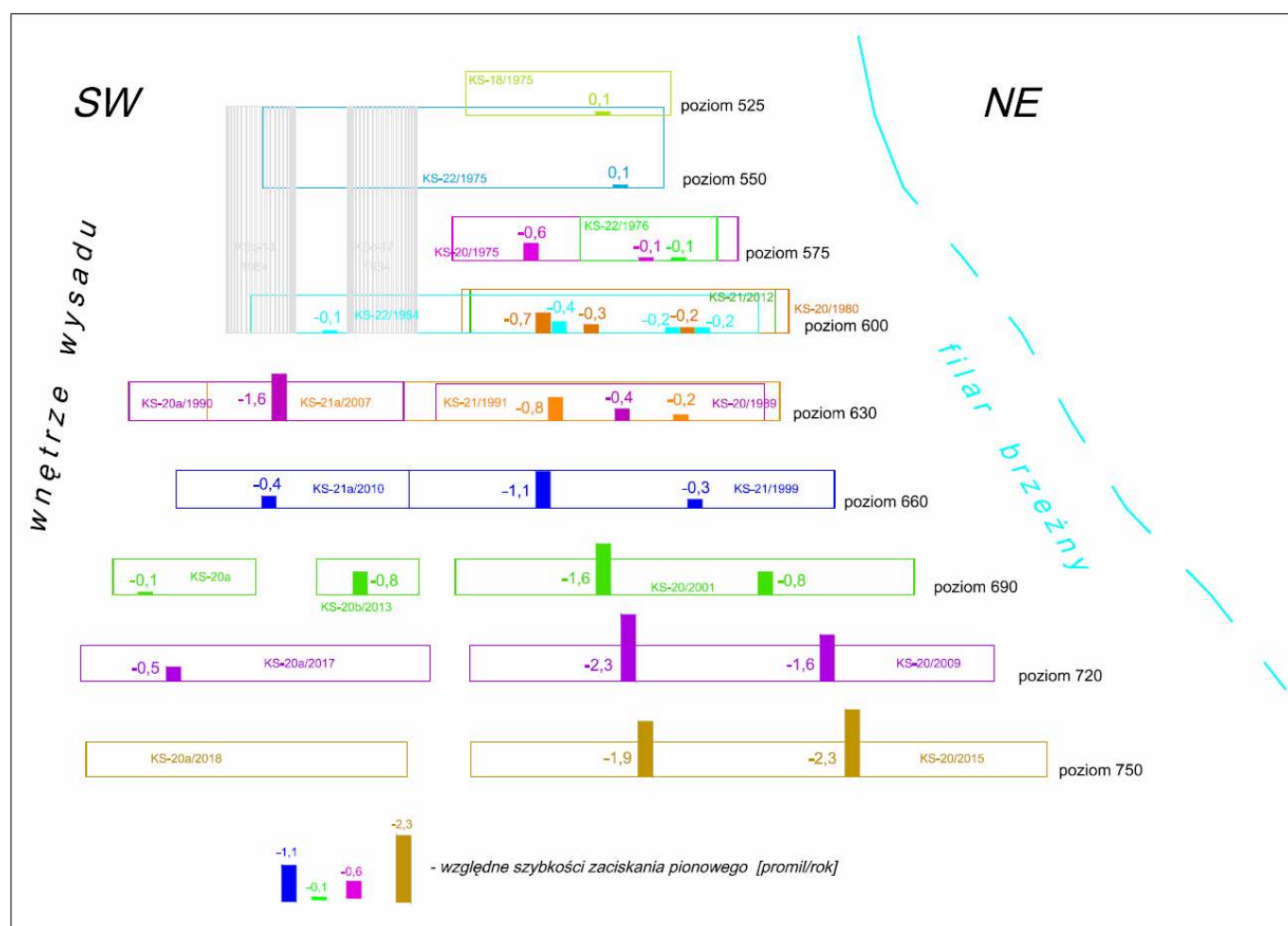
Once we obtained the measurement results from the whole mining field profile, we drafted a diagram showing the distri-

kroju poprzecznym centralnej części pola nr 2, tj. w rejonie pionu KS-21 (ryc. 4). Stanowi on wstępną odpowiedź odnośnie przyczyn obserwowanej, przestrzennej zmienności zjawiska. Dla każdego horyzontu głębokościowego (poziomu) charakterystyczne jest występowanie większych wartości zaciskania w centralnej części strefy eksploatacji, malejących w miarę podążania ku krawędziom eksploatacji. Generalnie, rozkład szybkości zaciskania w przekroju poprzecznym pola pokazuje występowanie większych wartości parametru w centralnym i przyspągowym obszarze strefy eksploatacji. Natomiast w rejonach od strony filara brzeżnego i przeciwległej, od strony wnętrza wysadu szybkości zaciskania są wyraźnie niższe.

Te wstępne wyniki pokazują, że szybkość zaciskania pustek poeksploatacyjnych w polu jest funkcją nie tylko znanych dotychczas czynników, tj. głębokości i wieku wyrobiska, ale także jego lokalizacji w przestrzeni pola. Czynnik ten powinien być uwzględniany w analizach stateczności górotworu dotyczących całych pól eksploatacji.

bution of the vertical convergence rates in the transverse vertical cross-section of the Field 2 centre, i.e. the area of Section KS-21 (Fig. 4). The diagram gives a preliminary presentation of the reasons of the observable spatial variability of convergence. For each depth horizon (or Level), the occurrence of higher convergence rates in the central mining area was typical, with the rate decrease towards the edges of the mining field. Generally, the distribution of convergence rates in the transverse cross-section of the mining field indicated the occurrence of higher values of the parameters in the central and bottom zones of the mining field. However, the convergence rates were clearly lower in the areas on the side of edge pillar and opposite, on the side of the interior of the salt dome.

Our preliminary results demonstrate that the convergence rates of the post-exploitation voids in the mining field are the function of not only previously known factors, i.e. working's depth and age, but also of the working's location, within the mining field's space. The latter factor should be taken into consideration when analysing the rock mass stability referring to entire mining fields.



Ryc. 4. Zmienność szybkości zaciskania pionowego komór w poprzecznym przekroju pionowym centrum pola nr 2

Fig. 4. Variability of vertical convergence rates in chambers, in the transverse vertical cross-section of Field 2 centre.

wnętrze wysadu: salt-dome interior; poziom: Level; filar brzeżny: edge pillar; względne szybkości zaciskania pionowego [promil/rok]: relative vertical convergence rates [per mil/year]

Wyniki kolejnych, cyklicznych pomiarów pozwolą na zweryfikowanie tych wstępnych spostrzeżeń, tym bardziej, że stosunkowo krótki, trzyletni okres obserwacji baz na dolnych poziomach nie pozwala obecnie na szerszą interpretację.

## 5. PODSUMOWANIE

Od ok. 5-ciu lat w polu nr 2 kopalni kłodawskiej funkcjonuje rozbudowana, sieć pomiaru konwergencji wyrobisk solnych, obejmująca całą przestrzeń eksploatacji soli białej na głębokościach od 500 do 750 m. Wyniki systematycznych pomiarów zaciskania komorowych pustek poeksploatacyjnych pozwoliły na uchwycenie zmienności względnej szybkości zaciskania, w zależności od głębokości, wieku i po raz pierwszy, od lokalizacji w przestrzeni górotworu pola. Niewielkie szybkości zaciskania (poniżej 0,5 promila/rok) notowane są w peryferyjnych rejonach pola, traktowanych jako strefy przygraniczne przestrzeni eksploatacji. Większe wartości (dochodzące do 2 promil/rok) są charakterystyczne dla centralnej części pola i rejonu środka przestrzeni strefy eksploatacji. Taki rozkład szybkości konwergencji pionowej w polu został zaobserwowany w jego przekrojach podłużnym i poprzecznym, pomimo widocznego wpływu czynnika głębokości i wieku komór (charakteryzującego się dużą zmiennością od kilku do ponad 50 lat).

The results of subsequent regular measurements will be used to verify our preliminary observations. The more so because a fairly short monitoring period of three years at the measurement stations located at the lowest mining levels is not a good basis for general interpretations.

## 5. CONCLUSION

An expanded underground void convergence measurement network has been operating in Mining Field 2 of the "Kłodawa" Salt Mine for about five years. The network covers the entire rock salt mining space at the depths from 500 to 750 m. The results of regular post-exploitation void convergence measurements allowed for the identification of the variability of relative convergence rates, depending on chamber depth, age, and, for the first time ever, location, within the mining field's rock mass. Low convergence rates (below 0.5 per mil/year) were recorded in the peripheral areas of the mining field, being the border zones of the entire mining area. Higher values (reaching 2 per mil/year) were typical for the central section of the mining field and the areas of the centre of the entire mining zone. Such a distribution of the vertical convergence rates in Field 2 was observed in the longitudinal and transverse cross-sections of the Field, despite the visible impact of the chamber depth and age factors (the chamber age ranged from several to more than 50 years).

## LITERATURA/REFERENCES

- BIENIASZ J., KURDEK D., MARCOLA-SADOWSKA J. 2016. System kontroli deformacji poeksploatacyjnych górotworu nad polami eksploatacji w KS Kłodawa. *Przegląd Solny*, 12: 28-35.
- BIENIASZ J., PIETRAS J. 2018. Deformacje górotworu wywołane eksploatacją pola nr 2 w Kopalni Soli „Kłodawa” S.A., *Przegląd Solny*, 14: 15-20.
- KURDEK D. 2019. Pomiary konwergencji wyrobisk chodnikowych w Kopalni Soli „Kłodawa” S.A. *Przegląd Solny*, 15: 56-61.
- BIENIASZ J., PIETRAS J. 2020. 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.
- BIENIASZ J., CIĄGŁO W., WOJNAR W. 2003. Nowa metoda pomiarów deformacji solnej struktury filarowo-komorowej wykorzystująca dalmierz laserowy. *Geodezja. Półrocznik AGH*, 9, (2/1): 187-193
- BIENIASZ J., WOJNAR W. 2008. Analiza porównawcza deformacji poeksploatacyjnych kłodawskiego systemu komorowo-filarowego przy pionowym i ukośnym układzie wyrobisk. *Przegląd Solny*, 24, (3/2): 111-123
- FISIAK D. 2008. Laboratoryjne badania właściwości geotechnicznych soli kamiennej z wybranych złóż cechsztyńskich. *Przegląd Solny*, 24, (3/2): 121-140
- PAŃSTWOWY INSTYTUT GEOLOGICZNY. 2018. Projekt Zagospodarowania Złoża Kłodawa. Warszawa



# Potencjał magazynowy wodoru w permjskich złożach soli kamiennej w Polsce

## Hydrogen storage potential in Permian rock salts in Poland

Leszek LANKOF<sup>1</sup>, Radosław TARKOWSKI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN; lankof@min-pan.krakow.pl

<sup>2</sup> Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN; tarkowski@min-pan.krakow.pl

<sup>1</sup> Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences; lankof@min-pan.krakow.pl

<sup>2</sup> Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences; tarkowski@min-pan.krakow.pl

### ABSTRAKT

W artykule przedstawiono wyniki oceny potencjału podziemnego magazynowania wodoru dla pokładowych i wysadowych permjskich złóż soli kamiennej w Polsce. Przeprowadzono ją w oparciu o metodykę uwzględniającą uwarunkowania górniczo-geologiczne oraz specyficzne właściwości wodoru. Szczególną uwagę zwrócono na parametry, wpływające na ocenę potencjału magazynowania wodoru w kawernach solnych ulokowanych w permjskich pokładowych i wysadowych złożach soli w różnych częściach Polski. Zestawienie wyników oceny potencjału podziemnego magazynowania wodoru w złożach soli kamiennej z wynikami analiz zapotrzebowania na przestrzeń magazynową wskazują, że istniejący potencjał magazynowy wodoru w pokładowych wystąpieniach soli kamiennej i wysadach solnych kilkadziesiąt razy przewyższa zapotrzebowanie, nawet w przypadku założenia systemów energetycznych opartych w przeważającej części na wodorze jako nośniku energii.

**Słowa kluczowe:** podziemne magazynowanie wodoru, kawerny solne, wysady solne, pokłady soli kamiennej, potencjał magazynowy

### WSTĘP

Większość wykorzystywanej dzisiaj energii pochodzi z paliw kopalnych, których zasoby są ograniczone, a ich rozmieszczenie na świecie jest nierównomierne. Nie bez znaczenia jest negatywny wpływ ich spalania na środowisko i klimat. Stąd potrzeba wykorzystania odnawialnych źródeł energii oraz ma-

### ABSTRACT

The article presents the results of the assessment of the underground hydrogen storage potential for Permian stratiform salt formations and salt domes in Poland. The research was carried out based on the methodology considering mining and geological conditions and specific properties of hydrogen. Particular attention was paid to the parameters that affect the assessment of the hydrogen storage potential in salt caverns in Permian stratiform rock salts and salt domes, depending on their location. Comparing the assessment results with the demand for storage space shows that the existing hydrogen storage potential in salt caverns in Poland is dozens of times higher than the demand, even in the case of energy systems based mainly on hydrogen as an energy carrier.

**Keywords:** underground hydrogen storage (UHS), salt caverns, salt domes, stratiform formation, storage potential

### INTRODUCTION

Most of the energy used today comes from fossil fuels, which are limited and unevenly occur worldwide. The negative impact of their combustion on the environment and climate is not without significance. Hence the need to use renewable energy sources and store surplus energy. The use of hydrogen as an energy carrier, produced by electrolysis from RES, is currently under consideration. Hydrogen use allows moving away from fossil fuels and toward a CO<sub>2</sub> - neutral economy. Today, hydrogen is one of the most environmentally friendly fuels and the most promising clean energy carrier



gazynowania nadwyżek energii. Wykorzystanie wodoru jako nośnika energii, wyprodukowanego drogą elektrolizy z OZE jest dzisiaj przedmiotem rozważań. Wodór pozwala na odejście od paliw kopalnych oraz na przejście na gospodarkę neutralną pod względem emisji CO<sub>2</sub>. Wskazuje się go dziś za jedno z najbardziej przyjaznych dla środowiska paliw, za najbardziej obiecujący nośnik czystej energii (np. Abdin i in., 2020; Osman i in., 2022). Rozważa się różne opcje podziemnego magazynowania wodoru, z których najważniejsze to kawerny wyługowane w złożach soli kamiennych, głębokie struktury wodonośne oraz szcerpane złoża gazu ziemnego (np. Crotofino, Schneider, Evans, 2018; Olabi i in., 2021; Zivar, Kumar, Foroozesh, 2021; Muhammed i in., 2022). Własności soli kamiennych sprzyjają budowaniu w złożach soli kawern dla magazynowania gazów oraz innych substancji. Sól kamienna jest technicznie gazoszczelna oraz obojętna chemicznie względem większości magazynowanych substancji. Jej wytrzymałość oraz własności reologiczne zapewniają stabilność kawern na określonych głębokościach i w odpowiednim reżimie ciśnień magazynowania. Magazyny w kawernach solnych, ze względu na stosunkowo dużą prędkość zatłaczania i poboru magazynowanego gazu, charakteryzują się dużą elastycznością. Mogą spełniać rolę magazynów szczytowych, sezonowych oraz strategicznych. Zakres ciśnienia magazynowego oraz uwarunkowania techniczne zapewniają możliwość zatłoczenia i odebrania gazu w ilości odpowiadającej 10-12 krotności pojemności magazynowej kawerny (np. Kunstman, Poborska-Młynarska, Urbańczyk, 2009; Tarkowski, 2019). Kawerny solne ługowane są do głębokości ok. 2000 m. Osiągają wysokość 50 – 500 m, średnice 50 – 100 m, a objętość do ok. 1 mln m<sup>3</sup> (np. Warren, 2006; Horvath i in., 2018; Hévin, 2019).

#### PODZIEMNE MAGAZYNOWANIE WODORU

Ważnym aspektem podziemnego magazynowania wodoru jest ocena możliwości oraz potencjału magazynowania wodoru, w różnej skali. W przypadku kawern solnych, będzie ona wymagała między innymi przeprowadzenia analizy kształtu, wielkości i ilości kawern, głębokości ich posadowienia, czy wpływu konwergencji na pojemność kawern (np. Bérest i in., 2015; Ślizowski i in., 2017; Wang i in., 2019). Nieliczne są przykłady publikacji, gdzie przedstawiono wartości pojemności wodoru dla kawern wyługowanych w złożach soli oraz prezentujących metodyczne podejście do oceny potencjału podziemnego magazynowania wodoru w kawernach solnych (Simon i in., 2015; Evans, Shaw, 2018; Juez-Larré i in., 2019; Caglayan i in. 2020; Evans, Shaw, 2021; Williams i in., 2022). Stąd wynikają różne, dyskusyjne często wyniki oszacowań, prowadzone w różnej skali: regionalnej, danego kraju, czy też konkretnej lokalizacji. Publikacja prezentująca teoretyczny potencjał kawern solnych do magazynowania wodoru w Europie (Caglayan i in., 2020) jest jedną z ważniejszych w tym

(e.g. Abdin et al., 2020; Osman et al., 2022). Various options for underground hydrogen storage are being considered, the most important of which are rock salt caverns, deep aquifers, and depleted natural gas deposits (e.g. Crotofino et al., 2018; Olabi et al., 2021; Zivar et al., 2021; Muhammed et al., 2022). The properties of rock salt favor the construction of caverns in the salt deposits to store gases and other substances. Rock salt is technically gas-tight and chemically neutral to most stored substances. Its strength and rheological properties ensure the stability of caverns at specific depths and in an appropriate storage pressure regime.

Because of the relatively high injection and withdrawal rate, storage facilities in salt caverns are characterized by high flexibility. They can be used as peak, seasonal and strategic storage facilities. The range of storage pressure and technical conditions ensure the possibility of injecting and withdrawing hydrogen in an amount corresponding to 10-12 times the storage capacity of the cavern (e.g. Kunstman et al., 2009; Tarkowski, 2019). The salt caverns are constructed to a depth of 2000 m. They reach a height of 50 – 500 m, diameters of 50 – 100 m, and a volume of up to 1 million cubic meters (e.g. Warren, 2006; Horvath et al., 2018; Hévin, 2019).

#### UNDERGROUND HYDROGEN STORAGE

An important aspect of underground hydrogen storage is assessing hydrogen storage potential on a different scale. In the case of salt caverns, it will require, among others, an analysis of the shape, size, and number of caverns, the depth of their foundation, or the impact of convergence on cavern capacity (e.g. Bérest et al., 2015; Ślizowski et al., 2017; Wang et al., 2019). A few examples of publications discuss the capacity of hydrogen storage caverns and a methodological approach assessing the potential of underground hydrogen storage in salt caverns (Simon et al., 2015; Evans, Shaw, 2021; Juez-Larré et al., 2019; Caglayan et al. 2020; Williams et al., 2022). Hence, different, often controversial, estimates result, carried out on a different scale: regional, country, or a specific location. The publication presenting the theoretical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe (Caglayan et al., 2020) is one of the most important in this regard. The research results presented in this article estimate the storage potential of rock salt deposits in Europe (both onshore and offshore) at 84.8 PWhH<sub>2</sub>. The most significant potential was indicated for the area of Germany, approx. 12.5 PWhH<sub>2</sub>. In the case of Poland, it was estimated at around 7 PWhH<sub>2</sub>.

The hydrogen storage issue in Polish rock salt deposits has been discussed in many publications. The economic aspects of hydrogen storage in salt caverns are discussed by Kunstman and Urbańczyk (Kunstman and Urbańczyk, 2013). The concept of storing electricity excess in the form of hydrogen in caverns in salt deposits in Poland was presented by Chro-

zakresie. Wyniki badań przedstawione w tym artykule oceniają potencjał magazynowy złóż soli w Europie (zarówno na lądzie i morzu) na 84,8 PWhH<sub>2</sub>. Największy potencjał wskazano dla obszaru Niemiec ok. 12,5 PWhH<sub>2</sub>. W przypadku Polski oceniono go na około 7 PWhH<sub>2</sub>.

Problematyka magazynowania wodoru w soli kamiennej w Polsce poruszana była w licznych publikacjach. Aspekty ekonomiczne magazynowania wodoru w kawernach solnych zostały omówione w pracy Kunstmana i Urbańczyka (Kunstman, Urbańczyk, 2013). Koncepcję magazynowania nadwyżek energii elektrycznej w postaci wodoru w kawernach solnych w Polsce przedstawił Chromik (Chromik, 2015, 2016). Dalsze, bardziej szczegółowe badania prezentowały wybrane aspekty termodynamiczne magazynowania wodoru w kawernach solnych (Urbańczyk, 2016), badania szczelności soli kamiennej w aspekcie magazynowania wodoru (Ślizowski i in., 2017) oraz badania pojemności kawern magazynowych dla gazu ziemnego i wodoru, dla pokładowych złóż soli kamiennej w północnej Polsce (Ślizowski i in., 2017). Tarkowski i Czapowski (Czapowski, Tarkowski, 2018, 2019; Tarkowski, Czapowski, 2018) jako najbardziej obiecujące do podziemnego magazynowania wodoru zaproponowali siedem niezagospodarowanych wysadów solnych w Polsce oraz dokonali oceny geologicznych możliwości lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach soli kamiennych górnego permu w Polsce. Przeprowadzono również badania dotyczące modelowania kształtu i optymalizacji objętości kawern solnych do magazynowania energii (Cyran, Kowalski, 2021). W najnowszych pracach (Lankof, Tarkowski, 2020; Lankof i in., 2022) została przeprowadzona ocena potencjału podziemnego magazynowania wodoru dla pokładowych wystąpień soli na monoklinie przedsudeckiej oraz w wysadach solnych.

## CEL BADAŃ

Problemem badawczym prezentowanym w artykule jest pojemność magazynowa wodoru dla kawern wyługowanych w permskich wystąpieniach pokładowych oraz wysadach solnych w Polsce. Celem rozważań jest pokazanie szacunkowych wielkości pojemności magazynowania wodoru jakie oferują kawerny solne w różnych typach struktur solnych, w odniesieniu do zapotrzebowania i pokazanie istotności wpływu rozważanych parametrów geologicznych dla oceny pojemności magazynowej. Wyniki takich analiz są ważne w dyskusji dotyczącej celowości i możliwości podziemnego magazynowania wodoru w Polsce.

## 1. GEOLOGIA PERMSKICH WYSTĄPIEŃ SOLI KAMIENNEJ W POLSCE W ASPEKcie PODZIEMNEGO MAGAZYNOWANIA

Permskie złoża soli kamiennej w Polsce związane są z cechsztyńską formacją solonośną, uformowaną w obrębie basenu permskiego, rozciągającego się od Wielkiej Brytanii

mik (Chromik, 2015, 2016). Further, more detailed research discussed selected thermodynamic aspects of hydrogen storage in salt caverns (Urbańczyk, 2016), rock salt tightness tests in terms of hydrogen storage (Ślizowski, Smulski, et al., 2017) and the capacity of storage caverns for natural gas and hydrogen, for stratiform rock salt in North Poland (Ślizowski, Urbańczyk, et al., 2017). Tarkowski and Czapowski (Czapowski and Tarkowski, 2018, 2019; Tarkowski and Czapowski, 2018) as the most promising for underground hydrogen storage, proposed seven undeveloped salt domes in Poland and assessed the geological possibilities of siting hydrogen storage caverns in stratiform rock salts of Upper Permian in Poland. Research on shape modeling and volume optimization of salt caverns for energy storage was also carried out by (Cyran and Kowalski, 2021). The latest studies (Lankof and Tarkowski, 2020; Lankof et al., 2022) assessed the underground hydrogen storage potential for stratiform rock salts in the Fore-Sudetic Monocline and selected salt domes.

## PURPOSE OF RESEARCH

The research problem presented in the article is the hydrogen storage capacity for caverns leached in Permian rock salt deposits in Poland. The considerations aim is to show the estimated values of the hydrogen storage capacity offered by salt caverns in various types of salt structures versus the demand for hydrogen storage capacities in the future. Additionally, the paper aims to show the significance of the influence of the considered geological parameters for assessing storage capacity. The results of such analyzes are important in the discussion on the validity and possibility of underground hydrogen storage in Poland.

## 1. GEOLOGY OF PERMIAN ROCK SALT IN POLAND IN TERMS OF UNDERGROUND STORAGE

Permian rock salt deposits in Poland are associated with the Zechstein salt formation, formed within the Permian Basin, stretching from Great Britain through the North Sea, the Netherlands, Denmark, and Germany to Poland and Lithuania (Poborski, 1976; Wagner, Peryt 1976; Gillhaus et al. in. 2006). This formation covers over half of the territory of Poland. In most of the Polish part of the Zechstein Basin, the salt formation is deposited horizontally at depths of 5 - 7 km. At lower depths, salt formation occurs as salt structures, such as salt domes or salt pillows (Poborski, 1976; Ślizowski, 1983; Czapowski, 2019), while in the marginal parts of the sedimentation basin in the form of stratiform deposits. The salt-bearing Zechstein formation is formed by an alternating set of evaporite (rock salts, potassium-magnesium salts, sulphates) and non-evaporite (carbonates and clastic rocks) formations representing 4 cyclothems (Wagner and Peryt, 1997).

przez Morze Północne, Holandię, Danię Niemcy aż po Polskę i Litwę (Poborski, 1976; Wagner, Peryt 1976; Gillhaus i in. 2006). Formacja ta pokrywa ponad połowę powierzchni Polski. Na przeważającym obszarze polskiej części basenu cechsztyńskiego, seria solna zalega w normalnym ułożeniu, na głębokościach dochodzących do ok. 5 – 7 km. Na mniejszych głębokościach utwory solone budują szereg struktur solnych, takich jak wysady czy poduszki solne (Poborski, 1976; Ślizowski, 1983; Czapowski, 2019), natomiast w brzeżnych częściach basenu sedimentacyjnego występują w formie pokładowej. Solonością formację cechsztyńską tworzy naprzemianległy zespół utworów ewaporatowych (sole kamienne, sole potasowo-magnezowe, siarczany) i nieewaporatowych, (węglany, i skały klastyczne) reprezentujących 4 cyklotemy (Wagner, Peryt, 1997).

### 1.1. Pokładowe wystąpienia soli kamiennej

Pokładowe złoża soli górnego permu w Polsce, występują w północnej części polskiego basenu cechsztyńskiego oraz na monoklinie przedsudeckiej. W Polsce północnej, sól kamienna występuje w postaci jednego pokładu wydzielenia najstarszej soli kamiennej (Na1). Strop soli kamiennej zalega na głębokości od 550 m p.p.t. w okolicach Łeby do ponad 1100 m p.p.t. w południowej części tego rejonu. Miąższość pokładu jest zróżnicowana i wynosi od kilku do ponad 220 m (Czapowski, 2019).

Na monoklinie przedsudeckiej, sól kamienna występuje w postaci trzech wydzieleni litostratygraficznych (Na1, Na2, Na3), uformowanych w trzech cyklotemach. Miąższość pokładów soli jest bardzo zróżnicowana i sięga od kilku do stu kilkudziesięciu metrów w północnej części, lokalnie przekraczając 300 m. Strop pokładu najstarszej soli kamiennej (Na1), o największym potencjale magazynowym, zalega na głębokości od ok. 700 m p.p.t. do ponad 2000 m p.p.t. i zapada łagodnie w kierunku NE (Wagner, 1994; Garlicki i in., 1996; Deczkowski, Gajewska, 1997).

### 1.2. Wysadowe struktury solne

W centralnej części polskiego basenu cechsztyńskiego występują liczne wyniesione struktury solne, w postaci poduszek i wysadów solnych, często wydłużonych w kierunku NW-SE. Wśród tych struktur występują wysady solne przebijające częściowo lub całkowicie nadkład skał mezozoicznych. Przedmiotem rozważań są niezagospodarowane wysady solne środkowej Polski: Damasławek, Dębina, Kłodawa (poza obszarem górniczym Kopalni Soli Kłodawa), Izbica Kujawska, Lubień, Łanięta i Rogoźno. Zwierciadło solne w analizowanych wysadach zalega na zróżnicowanych głębokościach od ok. 170 do 550 m p.p.t. Powierzchnia tych wysadów wynosi od 0,5 km<sup>2</sup> (wysad Dębina) do 21 km<sup>2</sup> (wysad Rogoźno) (Czapowski, Tarkowski, 2018; Tarkowski, Czapowski, 2018). Na ryc. 1 przedstawiono występowanie ana-

### 1.1. Stratiform rock salt

The Upper Permian stratiform rock salts in Poland occur in the northern part of the Polish Zechstein Basin and the Fore-Sudetic Monocline. In North Poland, rock salt occurs in the form of one unit of the oldest rock salt, Na1. The rock salt seam top occurs at a depth of 550 m below ground level (bgl) in the vicinity of Łeba to over 1100 m bgl in the southern part of this area. The oldest rock salt thickness varies and ranges from a few to around 220 m (Czapowski, 2019). In the Fore-Sudetic Monocline, rock salt occurs in the form of three units (Na1, Na2, Na3), formed in three following cyclothems. The salt beds' thickness varies and ranges from a few to a hundred and several dozen meters in the northern part, locally exceeding 300 m. The top of the oldest rock salt (Na1) seam, with the most outstanding storage potential, occurs at a depth of 700 m bgl up to over 2000 m bgl and dips gently towards NE. (Wagner, 1994; Garlicki et al., 1996; Deczkowski and Gajewska, 1997).

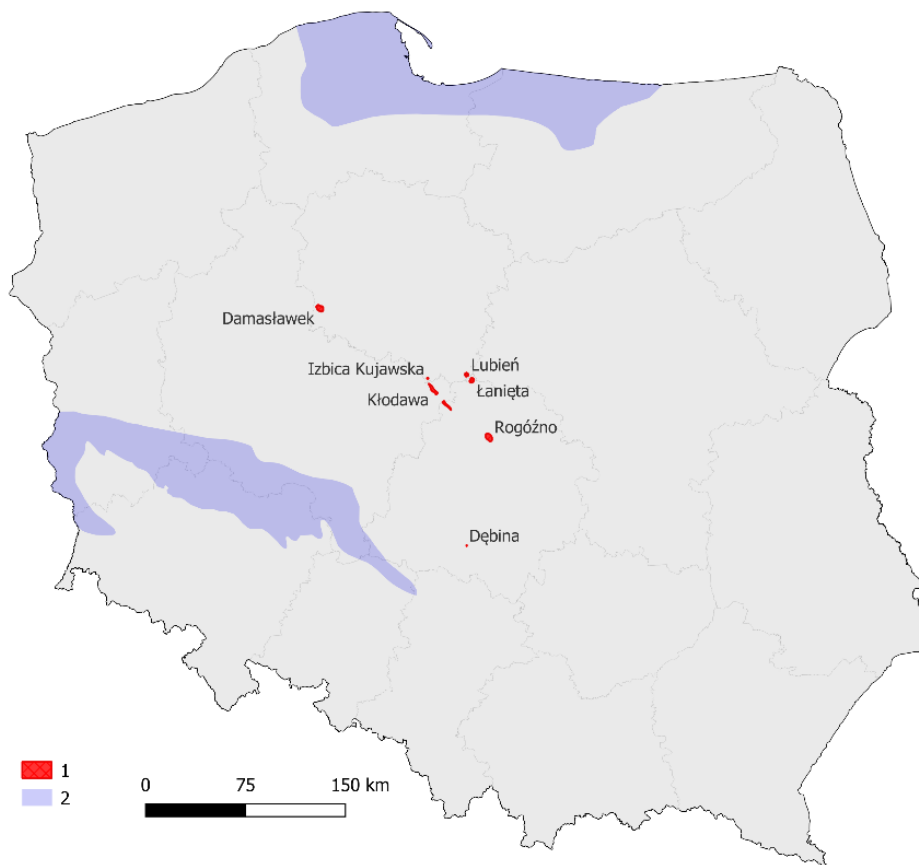
### 1.2. Salt domes

In the central part of the Polish Zechstein Basin, there are numerous elevated salt structures in the form of salt pillows and salt domes, often extended NW-SE. Some of these structures entirely or partially pierce the Mesozoic rocks. The subject of consideration is the undeveloped salt domes of central Poland: Damasławek, Dębina, Kłodawa (outside the mining area of the Kłodawa Salt Mine), Izbica Kujawska, Lubień, Łanięta, and Rogoźno. The salt mirrors (top of the rock salt) in the analyzed domes occur at different depths, from 170 to 550 m bgl. The surface areas of these salt domes ranges from 0.5 km<sup>2</sup> (Dębina dome) to 21 km<sup>2</sup> (Rogoźno dome) (Czapowski and Tarkowski, 2018a; Tarkowski and Czapowski, 2018). Fig. 1 shows the occurrence of the salt dome analyzed in the article and the approximate range of stratiform rock salts, the top of which is up to a depth of 1800 m bgl.

## 2. METHODOLOGY FOR ASSESSING HYDROGEN STORAGE CAPACITY IN ROCK SALT DEPOSITS

Estimating the hydrogen storage potential in rock salt deposits requires determining the shape and dimensions of salt caverns, determining the storage pressure, and considering the convergence of caverns resulting from the rheological properties of rock salt. While these parameters are determined similarly in the case of stratiform rock salts and salt domes, estimating their capacity requires a different approach. In the case of stratiform rock salts, structural (top) and seam thickness maps were used to develop maps of hydrogen storage capacity. In the case of salt domes, the average cavern size and the average cavern depth were determined, resulting from the statistical analysis of the depth and cavern dimensions of Underground Gas Storage (UGS) Mogilno and the geological structure of individual salt domes.





**Ryc. 1.** Lokalizacja wysadowych i pokładowych wystąpień soli kamiennej analizowanych pod kątem potencjału magazynowego wodoru (1 – wysady solne, 2 – pokłady solne występujące do głębokości 1800 m p.p.t.).

**Fig. 1.** Location of salt domes and stratiform rock salts analyzed in terms of the hydrogen storage potential (1 - salt domes, 2 - stratiform rock salt formations to a depth of 1800 m bgl).

lizowanych w artykule wysadów solnych oraz przybliżony zasięg pokładów soli kamiennej, których strop występuje do głębokości 1800 m p.p.t.

## 2. METODYKA OCENY POJEMNOŚCI MAGAZYNOWEJ WODORU W ZŁOŻACH SOLI KAMIENNEJ

Oszacowanie potencjału magazynowego wodoru w złożach soli kamiennej wymaga określenia kształtu i wymiarów kawern solnych, określenia ciśnienia magazynowania oraz uwzględnienia konwergencji kawern, wynikającej z właściwości reologicznych soli kamiennej. O ile te parametry określa się podobnie w przypadku pokładowych i wysadowych złóż soli kamiennej, to metody szacowania pojemności wymagają opracowania odrębnego podejścia. W przypadku pokładowych złóż soli kamiennej, w celu opracowania map pojemności magazynowej wodoru wykorzystano mapy strukturalne (stropu) i miąższości pokładu. W przypadku wysadów solnych zostały wyznaczone średnie wielkości kawern oraz średnie głębokości posadowienia kawern, wynikające z analizy statystycznej głębokości i wielkości kawern istniejącego Kawernowego Podziemnego Magazynu Gazu (KPMG) Mogilno oraz budowy geologicznej poszczególnych wysadów.

### 2.1. Estimation of the hydrogen storage potential in stratiform rock salt

The assessment of the underground hydrogen storage potential in the stratiform rock salt consisted in determining its storage capacity depending on the volume and spacing of caverns and the range of storage pressure versus the area of surface assigned to one cavern. The storage potential of the rock seam was thus presented in the form of the storage capacity of a single salt cavern, converted to the area assigned to this cavern. In estimations, a typical design was adopted, assuming the main cavern's part as a cylinder with the target diameter  $D_{max}$ , a conical sump with a height of about  $1/6 D_{max}$ , and the cavern dome as a cone with a height of about  $1/3 D_{max}$ . In addition, the calculations of the cavern storage capacity took into account such parameters as the thickness of protective rock salt left over and below a salt cavern, cavern neck length, maximum diameter, cavern spacing, storage pressures, and the impact of convergence. The values of the parameters and methods of their determination are presented in the publications (Lankof and Tarkowski, 2020; Lankof et al., 2022).

The methodology used allowed for developing maps of hydrogen storage capacity in rock salt seams. When constructing the maps, the minimum thickness of the seam, in

## 2.1. Oszacowanie zdolności magazynowania wodoru w pokładach soli kamiennnej

Ocena potencjału podziemnego magazynowania wodoru w pokładzie soli kamiennnej polegała na określeniu jego pojemności magazynowej, zależnej od objętości i rozstawu kawern oraz zakresu ciśnienia magazynowania, w stosunku do powierzchni terenu przypisanego do jednej kawerny. Potencjał magazynowy pokładu soli kamiennnej został zatem przedstawiony w postaci pojemności magazynowej pojedynczej kawerny solnej, w przeliczeniu na powierzchnię przypisaną do tej kawerny. W celu obliczenia pojemności magazynowej pojedynczej kawerny solnej przyjęto typowy projekt kawerny magazynowej zakładający, że główną część kawerny stanowi wałek o średnicy docelowej  $D_{max}$ , dolną część kawerny zajmuje stożkowy wrąb, o wysokości ok.  $1/6 D_{max}$ , a górną część kawerny zajmuje kopuła, którą można przybliżyć stożkiem o wysokości ok.  $1/3 D_{max}$ . Ponadto w obliczeniach pojemności magazynowej kawerny uwzględniono takie parametry jak: wymiary filarów ochronnych, długość szyi kawerny, maksymalną średnicę, rozstaw kawern, wartości ciśnień magazynowania, oraz wpływ konwergencji. Wartości parametrów i metody ich wyznaczania przedstawiono w pracach (Lankof, Tarkowski, 2020; Lankof i in. 2022).

Zastosowana metodyka pozwoliła na opracowanie map pojemności magazynowej wodoru w pokładach soli kamiennnej. Przy konstrukcji map, za minimalną miąższość pokładu, w którym opłacalna jest budowa kawern przyjęto 150 m. Jako maksymalną głębokość stropu pokładu soli przyjęto 1800 m p.p.t. Za punkt wyjścia do sporządzenia map pojemności magazynowej wodoru przyjęto rastrowe mapy głębokości stropu pokładu soli oraz jego miąższości. Stosując wbudowane funkcje programu Surfer, przeprowadzono obliczenia pojemności magazynowej w każdym z punktów poszczególnych rastrów. W wyniku obliczeń otrzymano raster pojemności magazynowej wodoru obrazujący ilość zmagazynowanego wodoru w przeliczeniu na powierzchnię.

## 2.2. Oszacowanie pojemności magazynowej wysadów solnych

Kawerny magazynowe w złożach soli kamiennnej lokalizowane są najczęściej w przedziale głębokości 500 – 1800 m p.p.t. (Horvath i in., 2018). Biorąc pod uwagę skomplikowaną budowę geologiczną wysadów i występowanie w nich warstw soli potasowych oraz anhydrytu, analizie poddano te niezagospodarowane wysady, których zwierciadło solne nie zalega głębiej niż 1500 m p.p.t. Przyjęte kryterium głębokości lokalizacji kawern pozwala na zastosowanie prezentowanej metodyki oceny pojemności magazynowej do struktur wysadowych przedstawionych w tabeli 1.

which the construction of caverns is profitable, was assumed to be 150 m. The depth of 1800 m bgl was assumed as the maximum depth of the salt seam top. Raster maps of the salt bed top's depth and thickness were adopted as the starting point for developing maps of hydrogen storage capacity. Using the built-in functions of the Surfer program, calculations of the storage capacity were carried out at each point of the individual rasters. As a result of the calculations, a raster of hydrogen storage capacity was obtained, showing the amount of stored hydrogen per area.

## 2.2. Estimation of the storage capacity of salt domes

Storage caverns in rock salt domes are often located in the depth range of 500 - 1800 m below sea level. (Horvath et al., 2018). The article examines those undeveloped salt domes where the salt mirror does not lie deeper than 1500 m bgl, considering their complicated geological structure of salt domes and the presence of potassium salt and anhydrite layers. The adopted criterion of cavern location depth allows the application of the presented methodology for assessing storage capacity to the dome structures shown in Table 1.

**Table 1.** Zechstein salt domes selected for the assessment of hydrogen storage capacity

Salt dome	Surface area [km <sup>2</sup> ]	Salt mirror depth [m p.p.t.]
Damasławek	13,0	446,0 – 497,0
Dębina	0,5	169,3 – 215,0
Izbica	4,0	327,7 – 354,5
Kłodawa (excluding mininig area)	21,0	227,5 – 532,2
Lubień	5,9	303,0 – 441,6
Łanięta	9,5	235,4 – 303,8
Rogóżno	21,0	320,9 – 372,8

The storage potential of the selected salt domes in Poland was assessed based on the data from the UGS Mogilno. It included:

- the statistical analysis aimed at determining the probability of siting hydrogen storage cavern at a given depth and with a specific volume in the Mogilno salt dome,
- generalization of the coefficients determining the expected values (depths and volumes of caverns) for the remaining salt domes,
- calculations of the capacity of selected salt domes in Poland based on the methodology presented in the paper (Lankof et al., 2022).

**Tabela 1.** Cechsztyńskie wysady solne wybrane do oceny pojemności magazynowej wodoru.

Nazwa	Powierzchnia wysadu [km <sup>2</sup> ]	Głębokość zwierciadła solnego [m p.p.t.]
Damaśławek	13,0	446,0 – 497,0
Dębina	0,5	169,3 – 215,0
Izbica	4,0	327,7 – 354,5
Kłodawa (poza Kopalnię)	21,0	227,5 – 532,2
Lubień	5,9	303,0 – 441,6
Łanięta	9,5	235,4 – 303,8
Rogóżno	21,0	320,9 – 372,8

Ocena potencjału magazynowego wytypowanych wysadów solnych w Polsce została przeprowadzona w oparciu o istniejące dane z KPMG Mogilno. Obejmowała ona:

- analizę statystyczną mającą na celu wyznaczenie prawdopodobieństwa wyługowania kawerny magazynowej wodoru na danej głębokości oraz o określonej objętości w wysadzie solnym Mogilno,
- uogólnienie współczynników określających wartości oczekiwane (głębokości i objętości kawern) na pozostałe wysady solne,
- obliczenia pojemności wybranych wysadów w Polsce na podstawie wcześniej przedstawionej metodyki (Lankof i in., 2022).

### 3. POJEMNOŚĆ MAGAZYNOWA POKŁADÓW SOLI KAMIENNEJ

#### 3.1. Monoklina przedsudecka

Wyniki przeprowadzonych obliczeń zostały przedstawione na mapach pojemności magazynowej wodoru oraz na mapach pochodnych – wartości opałowych i wartości ener-

## 3. STRATIFORM ROCK SALT STORAGE CAPACITY

### 3.1. Fore-Sudetic Monocline

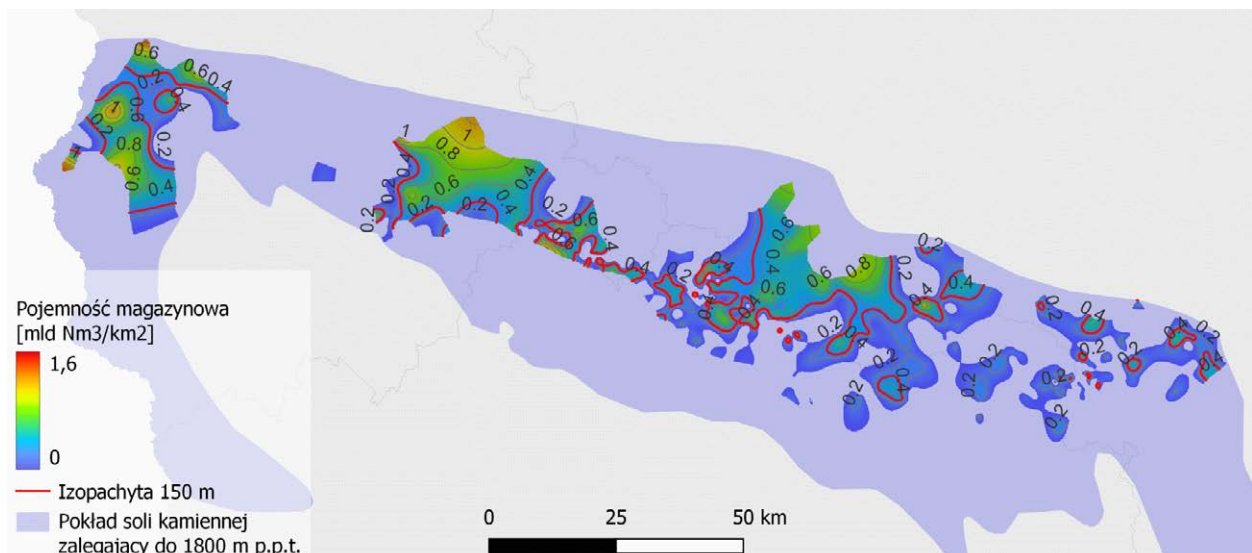
The results of the calculations were presented on the maps of the storage capacity of hydrogen and the derived map of energy values of the stored hydrogen in the oldest rock salt Na1. The analysis of structural and the depth of rock salt top maps of cyclothem (PZ1, PZ2, PZ3) confirmed that in cyclothem PZ1, there is the most promising rock salt seam that thickness exceeds 150 m up to the top depth not exceeding 1800 m bgl. Therefore, maps of hydrogen storage capacity were presented only for the Oldest Halite (Na1) seam. (Fig. 2).

Based on the rasters of the initial hydrogen storage capacity, the energy value of the stored hydrogen was calculated, assuming the energy value of hydrogen of 3 kWh per cubic meter to determine the energy potential of the stored hydrogen. Calculations allowed for the presentation of a map of the energy value of hydrogen stored within the seam of the Oldest Halite (Na1) expressed in TWh / km<sup>2</sup> (Fig. 3).

The analysis of the unique values of the raster of the energy value of the stored hydrogen shows that the total storage potential of the analyzed area, with a rock salt thickness of more than 150 m, may reach approximately 2300 TWh.

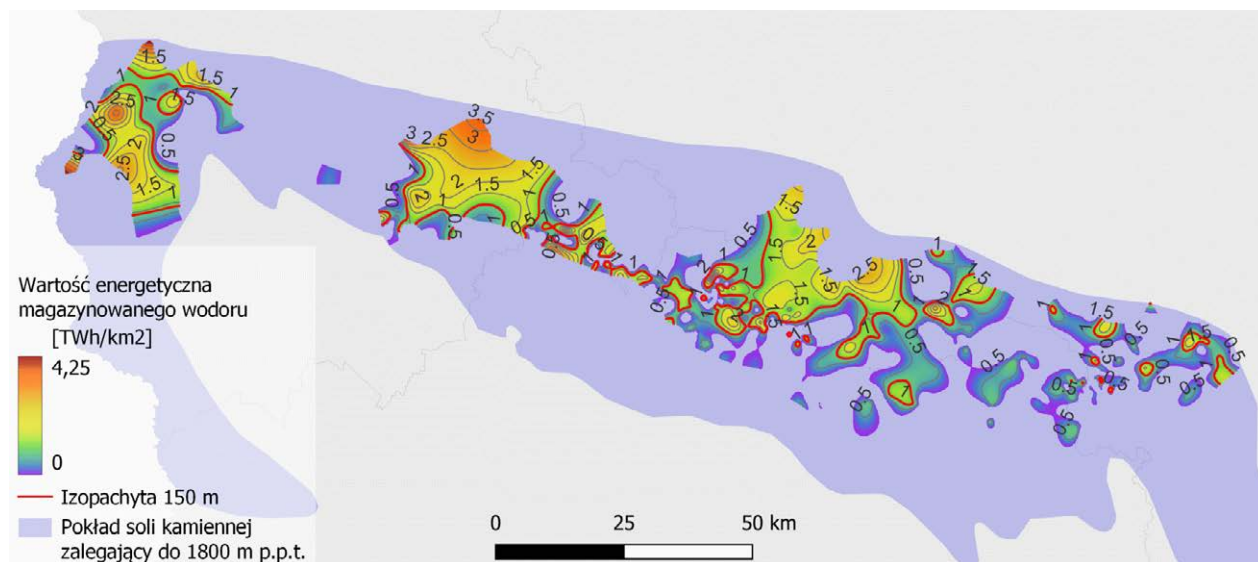
### 3.2. Leba Elevation

Based on the research by (Ślizowski et al., 2017) aimed at a comparative analysis of the storage capacity of hydrogen and natural gas in the rock salt seam within the best-explored fragment of the rock salt in North Poland, maps of the storage capacity and energy value of stored hydrogen were developed (Fig. 4, Fig. 5). Because of the convergence, the determined values concerned the state of cavern capacity after 15 years of cavern exploitation.



**Ryc. 2.** Mapa pojemności magazynowej wodoru dla pokładu najstarszej soli kamiennej (Na1) na monoklinie przedsudeckiej.

**Fig. 2.** The hydrogen storage capacity map in the Oldest Halite seam (Na1) the Fore-Sudetic Monocline.



Ryc. 3. Mapa wartości energetycznej wodoru dla pokładu najstarszej soli kamiennej (Na1) na monoklinie przedsudeckiej.

Fig. 3. The energy value map of hydrogen stored in the Oldest Halite seam (Na1) the Fore-Sudetic Monocline.

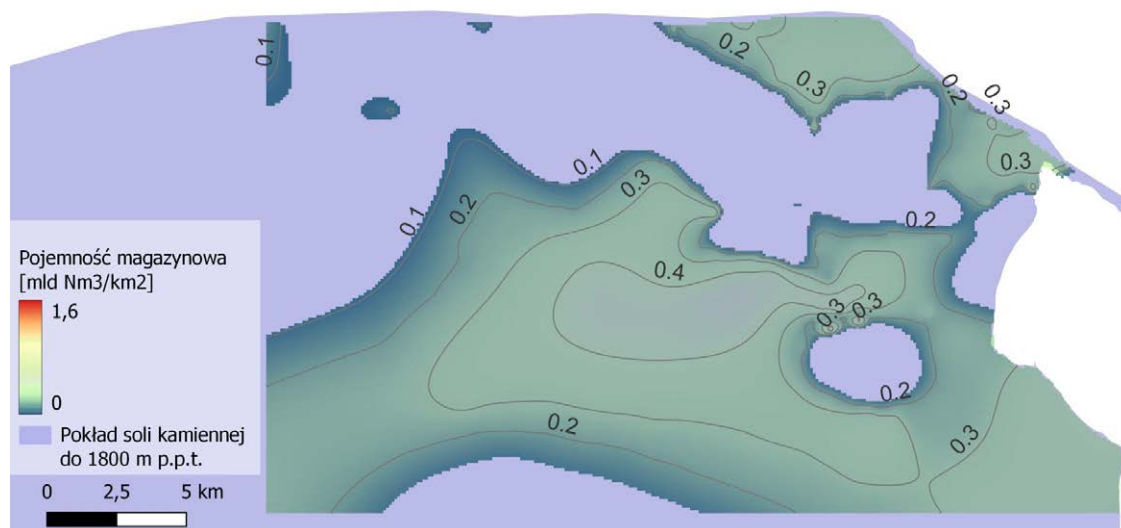
getycznych zmagazynowanego wodoru w najstarszej soli kamiennej (Na1). Przeprowadzona analiza map strukturalnych oraz map głębokości zalegania stropu warstw soli kamiennej, reprezentujących poszczególne cyklotemy (PZ1, PZ2, PZ3), potwierdziła, że w obrębie cyklotemu PZ1 występują największe obszary, gdzie miąższość pokładu soli kamiennej przekracza przyjętą w analizie wartość 150 m do głębokości stropu nie przekraczającej wartości 1800 m p.p.t. W związku z tym, tylko dla pokładu najstarszej soli kamiennej (Na1) przedstawiono mapy pojemności magazynowej wodoru (ryc. 2).

W celu określenia potencjału energetycznego zmagazynowanego wodoru, na podstawie rastrów początkowej pojemności magazynowej wodoru, obliczono wartość energetyczną zmagazynowanego wodoru, przyjmując wartość energetyczną wodoru na poziomie  $3 \text{ kWh/m}^3$ . Pozwoliło to na przedstawienie mapy wartości energetycznej wodoru zmagazyno-

The calculations show that the maximum amount of energy stored in the case of hydrogen is about  $1.2 \text{ TWh/km}^2$ , corresponding to a value of over 400 million  $\text{Nm}^3/\text{km}^2$ . The analysis of the unique values of the raster shows that the total storage potential of the analyzed area (after 15 years of cavern exploitation) is approximately 250 TWh.

#### 4. SALT DOMES STORAGE CAPACITY

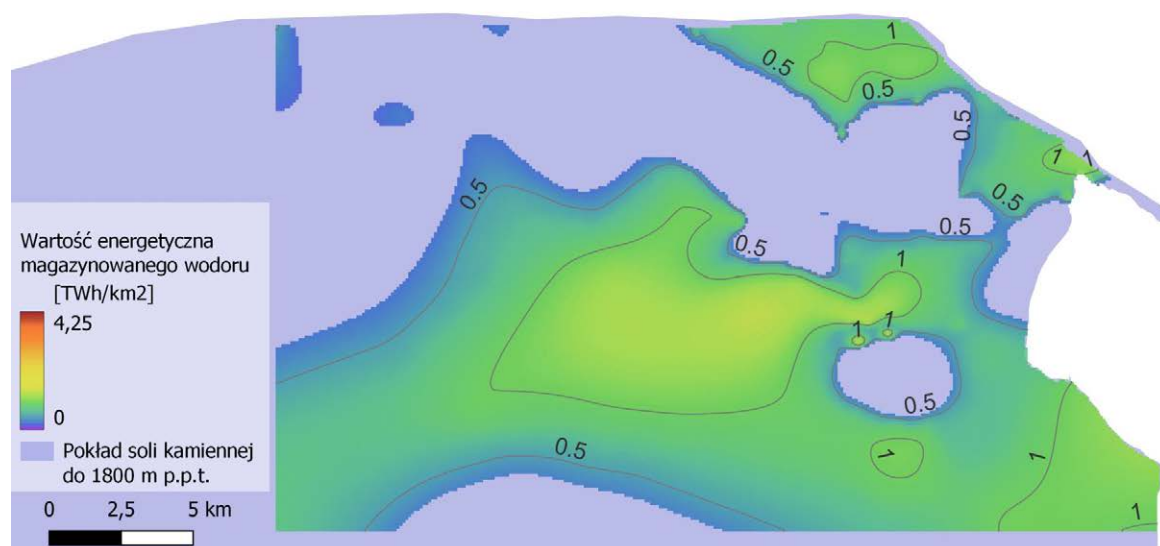
The storage capacity of salt domes was presented in the form of stored hydrogen energy (TWh). The calculations were based on the assumption presented in the methodology (Lankof et al., 2022). When calculating the storage capacity, a linear temperature increase in the rock mass and a pessimistic variant of convergence were adopted, determined based on experiments and calculations conducted by (Ślizowski et al., 2011).



Ryc. 4. Mapa pojemności magazynowej wodoru w pokładzie najstarszej soli kamiennej (Na1) w rejonie Zatoki Gdańskiej.

Fig. 4. The hydrogen storage capacity map in the Oldest Halite seam (Na1) Gdansk Bay region.





Ryc. 5. Mapa wartości energetycznej wodoru dla fragmentu pokładu najstarszej soli kamiennej (Na1) w rejonie Zatoki Gdańskiej.  
Fig. 5. The energy value map of hydrogen stored in the Oldest Halite seam (Na1) Gdańsk Bay region.

wanej w obrębie pokładu najstarszej soli kamiennej (Na1) wyrażonej w TWh/km<sup>2</sup> (ryc. 3).

Analiza wartości unikalnych rastra pojemności magazynowej w postaci wartości energetycznej zmagazynowanego wodoru wskazuje, że całkowity potencjał magazynowy analizowanego obszaru wynosi około 2300 TWh.

### 3.2. Wyniesienie Łeby

Na podstawie przeprowadzonych w 2017 r. prac (Ślizowski i in., 2017), mających na celu analizę porównawczą pojemności magazynowej wodoru i gazu ziemnego w pokładzie soli kamiennej w obrębie najlepiej rozpoznanego fragmentu pokładu soli kamiennej, opracowano mapy pojemności magazynowej oraz energetycznej zmagazynowanego wodoru w przeliczeniu na jednostkę powierzchni (ryc. 4 i 5). Ze względu na konwergencję wyznaczone wartości dotyczyły stanu pojemności kawern po 15 latach eksploatacji kawerny.

Table 2 shows the average volumes and depths of caverns resulting from the statistical analysis, the calculation results covering the average capacity of individual caverns in each analyzed salt dome, and the average storage capacity of the dome expressed in TWh.

The projected capacity of each salt dome was converted into the energy of stored hydrogen in TWh. Fig. 6 shows the changes in salt domes' average storage capacity, expressed as the energy of stored hydrogen over 30 years from the first filling.

The analysis shows that the Rogóżno salt dome has the most significant storage capacity (from 34.27 TWh after the first filling to 24.94 TWh after 30 years. These values are because of the dome's large size and the cavern's depth, ensuring moderate cavern convergence. In the case of the Kłodawa salt dome with a similar area as the Rogóżno dome, we can observe a much lower storage capacity (from 22.98 TWh af-

Tabela 2. Rezultaty obliczeń pojemności magazynowej analizowanych wysadów.

Wysad	Objętość średnia kawerny [tys.m <sup>3</sup> ]	Głębokość średnia [m p.p.t.]	Pojemność średnia kawerny [tys. Nm <sup>3</sup> ]	Pojemność średnia wysadu [TWh]w czasie [lata]		
				0	15	30
Mogilno	354,0	1161	32 300,9	13.4	12.28	11.29
Damaśławek	295,5	1409	27 619,8	25.20	20.73	17.05
Kłodawa	263,9	1705	19 797,3	22.98	14.34	8.95
Izbica Kujawska	450,5	1200	43 801,4	9.59	8.36	7.29
Lubień	409,1	1200	39 776,1	13.01	11.34	9.89
Łanięta	370,1	1200	35 984,2	18.89	16.47	14.36
Rogóżno	302,3	1345	29 522,0	34.27	29.24	24.94
Dębina	673,5	1200	65 483,3	1.77	1.54	1.34



Jak wynika z obliczeń maksymalna ilość energii, jaką można zmagazynować w przypadku wodoru wynosi ok. 1,2 TWh/km<sup>2</sup>, co odpowiada wartości ponad 400 mln Nm<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>. Analiza wartości unikalnych rastra wskazuje, że całkowity potencjał magazynowy analizowanego obszaru (po 15 latach eksploatacji kawern) wynosi około 250 TWh.

#### 4. POJEMNOŚĆ MAGAZYNOWA WYSADÓW SOLNYCH

Potencjał magazynowy wysadów solnych został przedstawiony w postaci energii zmagazynowanego wodoru (TWh). W obliczeniach przyjęto założenie przedstawione w metodycie (Lankof i in. 2022). Przy obliczeniach potencjału magazynowego przyjęto liniowy przyrost temperatury w górotworze oraz pesymistyczny wariant konwergencji określony na podstawie eksperymentów i obliczeń prowadzonych przez (Ślizowski i in., 2011).

W tabeli 2 przedstawiono średnie objętości i głębokości posadowienia kawern wynikające z analizy statystycznej oraz wyniki obliczeń, obejmujące średnią pojemność pojedynczych kawern w poszczególnych wysadach oraz średnią pojemność magazynową wysadów wyrażoną w TWh.

Prognozowana pojemność poszczególnych wysadów została przeliczona na energię zmagazynowanego wodoru w TWh. Na ryc. 6 przedstawiono zmiany średniej zdolności magazynowej wysadów wyrażoną w postaci energii zmagazynowanego wodoru na przestrzeni 30 lat od pierwszego napełniania.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że największą zdolność magazynową osiąga wysad solny Rogóżna (od 34,27 TWh po pierwszym napełnianiu do 24,94 TWh po 30 latach). Wynika to zarówno z dużych rozmiarów wysadu jak również głębokości posadowienia kawerny zapewniającej umiarkowaną konwergencję kawern. W przypadku części wysadu Kłodawy, o podobnej powierzchni jak wysad Rogóżno, obserwujemy znacznie mniejszą zdolność magazynową (od 22,98 TWh po pierwszym napełnianiu do zaledwie 9,95 TWh

ter the first filling to only 9.95 TWh after 30 years) which is caused by the deeper location of salt caverns. Fig. 7 shows the forecast of the total storage capacity of the analyzed salt domes over time.

According to the forecast, the total storage capacity in individual years ranges from 125.7 TWh after the first filling to 83.8 TWh after 30 years of caverns exploitation.

#### 5. ROCK SALT STORAGE POTENTIAL IN TERMS OF HYDROGEN DEMAND

Research carried out under the EU Hystories grant for underground hydrogen storage included, i.a., an estimation of the demand for hydrogen storage capacities in the European Union countries. The demand was identified in eight scenarios, considering different configurations of hydrogen energy systems. Research indicates that in the case of Poland, the expected storage space will have to ensure hydrogen storage with an energy value of 2.2 to 55.5 depending on the accepted scenario TWh per year (Michalski et al., 2021).

The results of the research indicated that the storage potential of the analyzed stratiform rock salts should be estimated at 2550 TWh and the analyzed salt domes at about 125 TWh after the first filling. Moreover, it should be remembered that the average salt cavern can be filled and emptied 10-12 times a year. Assuming that most of the underground hydrogen storage facilities will be used as the peak demand facilities, it can be assumed that the annual storage potential of the analyzed salt domes may be about ten times higher. The values shown indicate that the existing potential disproportionately exceeds the demand for storage space even in the scenario assuming the highest share of hydrogen in the future energy system. The demand for storage capacity can be shown in the form of the number of caverns covering this demand, knowing the values of the average cavern capacity in individual salt domes resulting from the presented esti-

**Table 2.** Results of calculations of the storage capacity of the analyzed salt domes.

Salt dome	Cavern's average volume [thousand m <sup>3</sup> ]	Cavern's average depth [m bgl]	Cavern's average capacity [thousand Nm <sup>3</sup> ]	Salt dome's average capacity [TWh] in time [years]		
				0	15	30
Mogilno	354,0	1161	32 300,9	13.37	12.28	11.29
Damaśławek	295,5	1409	27 619,8	25.20	20.73	17.05
Kłodawa	263,9	1705	19 797,3	22.98	14.34	8.95
Izbica Kujawska	450,5	1200	43 801,4	9.59	8.36	7.29
Lubień	409,1	1200	39 776,1	13.01	11.34	9.89
Łanięta	370,1	1200	35 984,2	18.89	16.47	14.36
Rogóżno	302,3	1345	29 522,0	34.27	29.24	24.94
Dębina	673,5	1200	65 483,3	1.77	1.54	1.34

po 30 latach). Przyczyną jest znacznie głębsze (o ponad 350 m) posadowienia kawern. Na ryc. 7 przedstawiono prognozę łącznej pojemności magazynowej analizowanych wysadów w czasie.

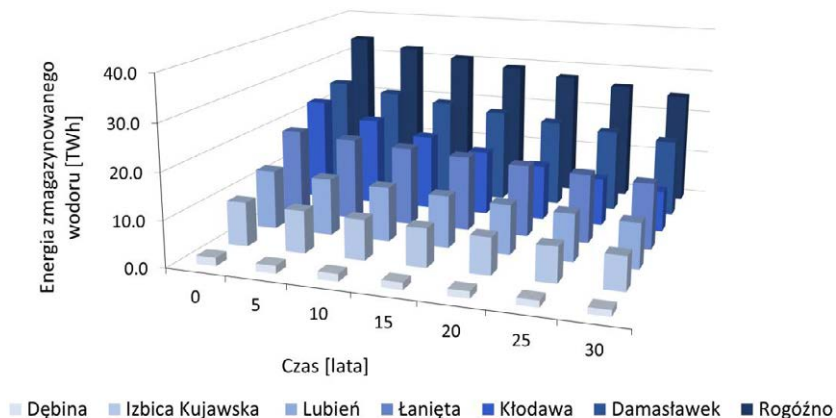
Według prognozy łączna zdolność magazynowa w poszczególnych latach wynosi od 125,7 TWh po pierwszym napełnieniu do ok. 83,8 TWh po 30 latach eksploatacji kawern.

## 5. POTENCJAŁ MAGAZYNOWY ZŁÓŻ SOLI KAMIENNEJ W ASPEKCIE ZAPOTRZEBOWANIA NA WODÓR

Badania prowadzone w ramach grantu UE Hystories, dotyczącego podziemnego magazynowania wodoru, obejmowały m.in. oszacowanie zapotrzebowania na pojemności magazynowe wodoru w krajach Unii Europejskiej. Zapotrzebowanie zostało określone w zależności od ośmiu scenariuszy, uwzględniających różne konfiguracje systemów energetycznych wykorzystujących wodór. Badania wskazują, że w przypadku Polski przewidywana przestrzeń magazynowa będzie musiała zapewnić zmagazynowanie wodoru o wartości energetycznej od ok. 2,2 do 55,5 TWh w cyklu rocznym (Michalski i in., 2021).

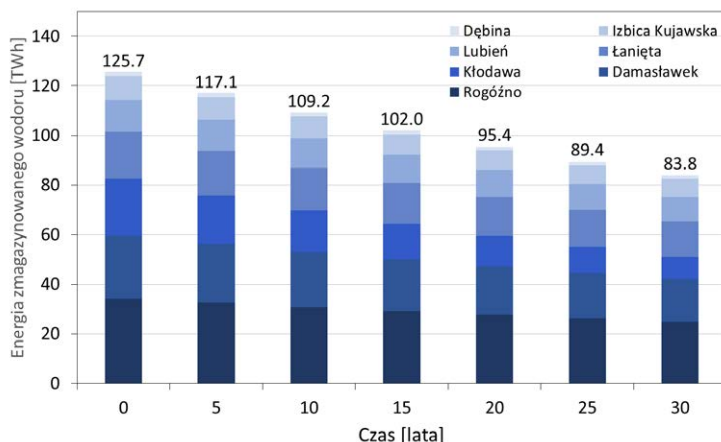
Przedstawione powyżej wyniki badań pojemności magazynowej złóż soli kamiennej w Polsce wskazują, że potencjał magazynowy analizowanych pokładów należy szacować na około 2550 TWh, a analizowanych wysadów na około 125 TWh po pierwszym napełnieniu. Ponadto należy pamiętać, że przeciętna kawerna solna może być w ciągu roku napełniana i opróżniana 10 – 12 razy. Przy założeniu, że większość podziemnych magazynów wodoru będzie miało charakter magazynów wyrównujących szczytowe zapotrzebowanie na energię, można przyjąć, że roczny potencjał magazynowy analizowanych struktur może być około dziesięciokrotnie wyższy od początkowo określonej pojemności. Przedstawione wartości wskazują, że istniejący potencjał niewspółmiernie przekracza zapotrzebowanie na przestrzeń magazynową nawet w przypadku scenariusza zakładającego największy udział wodoru w przyszłym systemie energetycznym.

Znając wartości średniej pojemności kawern w poszczególnych wysadach, wynikające z prezentowanych szacunków, zapotrzebowanie na pojemność magazynową można przedstawić w postaci ilości kawern w poszczególnych wysadach. W przypadku wysadów solnych ilości kawern potrzebnych do zaspokojenia zapotrzebowania na przestrzeń magazynową w minimalnym i maksymalnym scenariuszu przedstawia ryc. 8.



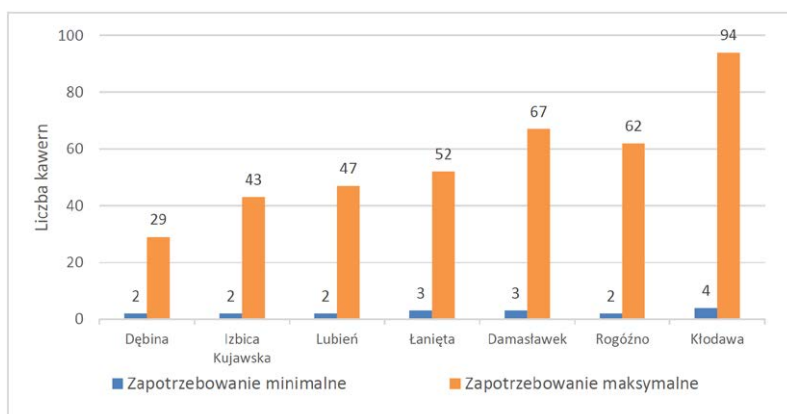
Ryc. 6. Średnia wartość energii wodoru zmagazynowanego w analizowanych wysadach solnych.

Fig. 6 Average value of hydrogen energy stored in analyzed salt domes.



Ryc. 7. Prognoza średniej łącznej pojemności magazynowej analizowanych wysadów.

Fig. 7. The forecast of the total storage capacity of the analyzed salt domes over time.



Ryc. 8. Porównanie zapotrzebowanie na przestrzeń magazynową w wybranych wysadach solnych.

Fig. 8. Comparison of the storage space demand in selected salt domes.

Wyniki szacunków wskazują, że najkorzystniejsze warunki ze względu na pokrycie zapotrzebowania magazynowego, występują w mniejszych wysadach, które teoretycznie zapewniają możliwość wybudowania kawern o dużych rozmiarach, na głębokościach zapewniających uzyskanie dużej pojemności. W przypadku dużych wysadów takich jak Damasławek czy Kłodawa, panujące warunki geologiczno-górnictwa wymuszają budowę kawern o mniejszej pojemności. Prowadzi to do sytuacji, w której na pokrycie tego samego zapotrzebowania potrzeba do 4 razy więcej kawern niż w przypadku pozostałych wysadów. Duże wysady zapewniają z kolei większy potencjał odnośnie wyboru dogodnej lokalizacji podziemnych magazynów.

Analizując możliwości pokrycia zapotrzebowania na ilość kawern można zauważyć, że w przypadku wysadów solnych rozpiętość zapotrzebowania na kawerny magazynowe waha się w granicach od 2 do 94 kawern, w zależności od przyjętego scenariusza zapotrzebowania i rozważanego wysadu. Szacunki przeprowadzone w analizie pojemności magazynowej wysadów wskazują, że przy założeniu rozstawu kawern co 250 m można teoretycznie zbudować około 1100 kawern w analizowanych wysadach, co wskazuje, że 10% ich powierzchni może zabezpieczyć maksymalne potrzeby magazynowe.

## 6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W oparciu o przedstawioną metodykę badawczą, zaprezentowano wyniki oszacowań pojemności wodoru dla kawern solnych w pokładzie najstarszej soli kamiennej na monoklinie przedsudeckiej, w obrębie najlepiej rozpoznanego fragmentu pokładu najstarszej soli kamiennej w rejonie Zatoki Gdańskiej oraz dla siedmiu niezagospodarowanych wysadów środkowej Polski. W przypadku pokładów solnych wyniki szacunków przedstawiono w postaci map pojemności magazynowej oraz w postaci map wartości energetycznej zmagazynowanego wodoru. Analiza unikalnych wartości rastrów pojemności magazynowej pozwoliła na określenie całkowitego potencjału magazynowego pokładów. W przypadku wysadów solnych szacunki pojemności magazynowej oparto na analizie statystycznej pozwalającej określić średnie wielkości i głębokości posadowienia kawern w poszczególnych wysadach.

Wyniki przeprowadzonej analizy wskazują, że potencjał magazynowy analizowanych pokładów wynosi ok. 2550 TWh, natomiast wysadów ok. 125 TWh. Łączny potencjał magazynowy analizowanych wystąpień soli kamiennej przewyższa w znaczący sposób zapotrzebowanie na przestrzeń magazynową, bez względu na przyjęty scenariusz określonego zapotrzebowania. Przy założeniu, że większość podziemnych magazynów wodoru będzie miało charakter magazynów wyrównujących szczytowe zapotrzebowanie na energię, można przyjąć, że do pokrycia rocznego zapotrzebowania na przestrzeń magazynową wystarczą kawerny o pojemności dziesięciokrotnie niższej niż roczne zapotrzebowanie magazynowe. Spowodowane jest dużą elastycznością magazynową kawern solnych,

mates. The number of caverns needed to meet the demand for storage space in the minimum and maximum scenarios is shown in Fig. 8.

The results of the estimates indicate that the most favorable conditions in terms of covering the storage demand are found in smaller salt domes, which theoretically provide the possibility of building large caverns at depths ensuring high capacity. In the case of large salt domes such as Damasławek or Kłodawa, the prevailing geological and mining conditions force the construction of caverns with a smaller capacity. This leads to a situation where up to 4 times more caverns are needed to cover the same demand than in the case of the remaining salt domes. In turn, they provide convenient site selection for underground storage facilities.

When analyzing the possibilities of covering the demand for the number of caverns, it can be noticed that in the case of salt domes, the demand for storage caverns ranges from 2 to 94, depending on the adopted demand scenario and the considered salt dome. Estimates in the analysis indicate that assuming a cavern spacing of 250 m, theoretically, about 1100 caverns can be constructed in analyzed salt domes.

## 6. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Based on the presented research methodology, the results of the estimation of hydrogen capacity for salt caverns are presented for the oldest rock salt seam in the Fore-Sudetic Monocline, the best-recognized part of the oldest rock salt seam in the Gulf of Gdańsk region, and seven undeveloped salt domes of central Poland. In the case of stratiform rock salts, the results of the estimates were presented on the maps of storage capacity and energy value of the stored hydrogen. Analyzing the unique values of the storage capacity rasters allowed us to determine the total storage capacity of the analyzed salt seams. In the case of salt domes, the storage capacity estimates were based on a statistical analysis that allows for determining the average size and depth of caverns in individual salt domes.

The analysis results show that the stored potential of the analyzed stratiform rock salts is about 2550 TWh, while the storage potential of salt domes is about 125 TWh. The total storage potential of the analyzed rock salt deposits significantly exceeds the demand for storage space, regardless of the adopted scenario of storage demand. Assuming that most of the underground hydrogen storage facilities will work as peak energy demand facilities, it can be assumed that caverns with a capacity ten times lower than the annual storage demand will be sufficient to cover the yearly demand for storage space. It is caused by the high flexibility of storage caverns ensuring the yearly flow of working gas in the amount corresponding to 10-12 times the cavern capacity.

It should be noted that the presented assessment of the storage potential does not consider the factors that exclude

zapewniającą roczny przepływ gazu roboczego w ilości odpowiadającej 10-12 krotnej pojemności kawerny.

Należy zwrócić uwagę, że przedstawiona ocena potencjału magazynowego nie uwzględnia czynników wykluczających dostęp do istniejących pokładów i struktur solnych, takich jak formy ochrony przyrody czy zagospodarowanie terenu. Czynniki te mogą znacząco wpływać na ostateczną ocenę możliwości budowy podziemnych magazynów wodoru. Z drugiej strony nie zostały uwzględnione w analizie słabo rozpoznane struktury w obrębie niecki szczecińskiej takie jak Goleniów, Przytór, Wickowo i Wapnica pokłady młodszej i najmłodszej soli kamiennej na monoklinie przedsudeckiej oraz znaczna część pokładu soli kamiennej na północy Polski, które mogą również zapewnić dodatkową, znaczną przestrzeń magazynową.

Wykorzystana metodyka badawcza, upoważnia do przeprowadzenia podobnych oszacowań na innych obszarach, przy uwzględnieniu wymaganych danych geologicznych i górniczych. Przedstawione wyniki badań mogą być pomocne dla decydentów/inwestorów w podjęciu decyzji wykorzystania wystąpień soli w Polsce do budowy kawern solnych w celu magazynowania wodoru, w celach strategicznych lub sezonowych.

access to stratiform rock salts and structures, such as forms of nature protection or land use. These factors can significantly influence the final assessment of the feasibility of constructing underground hydrogen storage facilities. On the other hand, poorly explored structures within the Szczecin basin, such as Goleniów, Przytór, Wickowo, and Wapnica, the part of the rock salt seam in North Poland and the older (PZ2) and younger (PZ3) salt seams in the Fore-Sudetic Monocline, which may also provide additional storage space, were not included in the analysis.

The research methodology allows for similar assessments in other areas, considering the required geological and mining data. The presented research results may be helpful for decision-makers and investors in Poland for underground hydrogen storage.

#### LITERATURA/REFERENCES

- ABDIN Z., ZAFARANLOO A., RAFIEE A., MÉRIDA W., LIPÍŃSKI W., KHALILPOUR, K.R., 2020. Hydrogen as an energy vector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 120: 109620.
- BÉREST P., BROUARD B., FAVRET F., HÉVIN G., KARIMI-JAFARI M., 2015. Maximum Pressure in Gas Storage Caverns. SMRI Spring 2015 Technical Conference, Rochester New York, USA.
- CAGLAYAN D.G., WEBER N., HEINRICHS H.U., LINBEN 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(11): 6793–6805.
- CHROMIK M., 2015. Możliwości magazynowania energii elektrycznej w soli kamiennej w postaci wodoru w regionie nadbałtyckim. *Przegląd Solny* (11): 44–50.
- CHROMIK M., 2016. Koncepcja magazynowania nadwyżek energii elektrycznej w postaci wodoru w kawernach w złożach soli kamiennej w Polsce – wstępne informacje. *Przegląd Solny* (12): 11–18.
- CROTOGINO F., SCHNEIDER G.S., EVANS D.J., (2018). Renewable energy storage in geological formations. *Journal of Power and Energy* 232(1): 100–114.
- CYRAN K., KOWALSKI M., 2021. Shape Modelling and Volume Optimisation of Salt Caverns for Energy Storage. *Applied Sciences* 11(423): 1–24.
- CZAPOWSKI G., (2019). Perspektywy lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach soli kamiennych górnego permu (cechsztyń) w Polsce – ocena geologiczna Prospects of Hydrogen Storage Caverns Location in the Upper Permian (Zechstein). *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* (477): 21–54.
- CZAPOWSKI G., TARKOWSKI R., 2018a. Geology of selected salt domes in Poland and their usefulness in constructing hydrogen storage caverns. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* (472): 53–82.
- CZAPOWSKI G., TARKOWSKI R., 2019. Ocena geologicznych możliwości lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach soli kamiennych górnego permu (cechsztyń) w Polsce. XXIV International Salt Symposium Quo Vadis Sal, 60–64.
- DECZKOWSKI Z., GAJEWSKA I., 1997. Charakterystyka starokimeryjskich i laramijskich struktur blokowych monokliny przedsudeckiej. *Kwartalnik Geologiczny* 23(1): 467–481.
- EVANS J., SHAW T., 2021. Storage of Hydrogen in Solution Mined Salt Caverns for Long Duration Energy Storage. SMRI Spring 2021 Virtual Technical Conference. Solution Mining Research Institute.
- GARLICKI A., KJIEWSKI P., SZYBIST A. 1996. Sól kamienna na obszarze przedsudeckim. Lubin: KGHM Polska Miedź S.A.
- GILLHAUS A., CROTOGINO F., ALBES D. VAN SAMBEEK L., 2006. Compilation and evaluation of bedded salt deposit and bedded salt cavern characteristics important to successful cavern sealing and abandonment.- SMRI Research Report No. 2006-2-SMRI, 131 p., Clarks Summit (PA), USA.
- HÉVIN G., 2019. Underground storage of Hydrogen in salt caverns. European Workshop on Underground Energy Storage. November 2019, Paris.
- HORVATH P.L., MIRAU S., SCHNEIDER G., HEIKE B., WEILER C., BÖDEKER J., WIPPICH M., TANGERMANN T., RATIGAN J., 2018. Update of SMRI's Compilation of Worldwide Salt Deposits and Salt Cavern Fields. Solution Mining Research Institute Report.
- JUEZ-LARRÉ J., GESSEL S. VAN, DALMAN R., REMMELTS G., GROENENBERG R., 2019. Assessment of underground energy storage potential to support the energy transition in the Netherlands. *First Break* (37): 57–66.



- KUNSTMAN A., POBORSKA-MŁYNARSKA K., URBAŃCZYK K., 2009. Geologiczne i górnicze aspekty budowy magazynowych kawern solnych. *Przegląd Geologiczny* 57(9): 819–828.
- KUNSTMAN A., URBAŃCZYK K., 2013. Podziemne magazynowanie energii: wodór w kawernach solnych – aspekty ekonomiczne. *Przegląd Solny* (9): 20–25.
- LANKOF L., TARKOWSKI R., 2020. Assessment of the potential for underground hydrogen storage in bedded salt formation. *International Journal of Hydrogen Energy* 45(38): 19479–19492.
- LANKOF L., URBAŃCZYK K., TARKOWSKI R., 2022. Assessment of the potential for underground hydrogen storage in salt domes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (160): 112309.
- MICHALSKI J., ZERHUSEN J., BUNGER U., 2021. Histories - Expected techno-economic requirements for underground renewable hydrogen storage. Deliverable D5.2 31.
- MUHAMMED N.S., HAQ B., AL SHEHRI D., AL-AHMED A., RAHMAN M.M., ZAMAN E., 2022. A review on underground hydrogen storage: Insight into geological sites, influencing factors and future outlook. *Energy Reports* (8): 461–499.
- OLABI A.G., BAHRI A. SALEH ABDELGHAFAR A.A., BAROUTAJI A., SAYED E.T., ALAMI A.H., REZK, H., ABDELKAREEM, M.A., 2021. Large-scale hydrogen production and storage technologies: Current status and future directions. *International Journal of Hydrogen Energy* 46(45): 23498–23528.
- OSMAN A.I., MEHTA N., ELGARAHY A.M., HEFNY M., AL-HINAI A., AL-MUHTASEB A.H., ROONEY D.W., 2022. Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. *Environmental Chemistry Letters* 20(1): 153–188.
- POBORSKI J., 1976. Nowa mapa stosunków litofacjalnych w zagłębiu cechsztyńskim w Polsce. *Przegląd Geologiczny* (24): 255–257.
- SIMON J., FERRIZ A.M., CORREAS L.C., 2015. HyUnder - Hydrogen underground storage at large scale: Case study Spain. *Energy Procedia* (73): 136–144.
- 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.
- ŚLIZOWSKI J., SMULSKI R., NAGY S., BURLIGA S., POLAŃSKI K., 2017. Tightness of Hydrogen Storage Caverns in Salt Deposits. *AGH DRILLING, OIL, GAS* 34(2): 397–409.
- ŚLIZOWSKI J., URBAŃCZYK K., CZAPOWSKI G., LANKOF L., SERBIN K., ŚLIZOWSKI K., TOMASZCZYK M., 2011. Możliwości magazynowania gazu ziemnego w polskich złożach soli kamiennej w zależności od warunków geologiczno-górniczych. Wydawnictwo IGSMiE PAN.
- ŚLIZOWSKI J., URBAŃCZYK K., ŁACIAK M., LANKOF L., SERBIN K., 2017. Efektywność magazynowania gazu ziemnego i wodoru w kawernach solnych. Effectiveness of natural gas and hydrogen storage in salt caverns. *Przemysł Chemiczny* 96(5): 994–998.
- ŚLIZOWSKI K., 1983. Warunki geologiczno-górnicze w cechsztyńskich złożach soli w Polsce dla wykonywania podziemnych zbiorników cieczy i gazu. Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo, 121.
- TARKOWSKI R., 2019. Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (105): 86–94.
- TARKOWSKI R., CZAPOWSKI G., 2018. Salt domes in Poland – Potential sites for hydrogen storage in caverns. *International Journal of Hydrogen Energy* 43(46): 21414–21427.
- URBAŃCZYK K., 2016. Wybrane aspekty termodynamiczne magazynowania wodoru w kawernach solnych. *Przegląd Solny* (12): 92–97.
- WAGNER R., 1994. Stratygrafia osadów i rozwój basenu cechsztyńskiego na Niżu Polskim. *Prace PIG* (146). Wydawnictwo PIG.
- WAGNER R., PERYT T. M., 1997. Possibility of sequence stratigraphic subdivision of the Zechstein in the Polish Basin. *Geological Quarterly* 41(4): 457–474.
- WANG T., LI J., JING G., ZHANG Q., YANG C., DAEMEN J.J.K., 2019. Determination of the maximum allowable gas pressure for an underground gas storage salt cavern – A case study of Jintan, China. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 11(2): 251–262.
- WARREN J. K., 2006. *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- WILLIAMS J.D.O., WILLIAMSON J.P., PARKES D., EVANS D.J., KIRK K.L., SUNNY N., HOUGH E., VOSPER H., AKHURST M. C. 2022. Does the United Kingdom have sufficient geological storage capacity to support a hydrogen economy? Estimating the salt cavern storage potential of bedded halite formations. *Journal of Energy Storage* (53):105109.
- ZIVAR D., KUMAR S., FOROOZESH J., 2021. Underground hydrogen storage: A comprehensive review. *International Journal of Hydrogen Energy* 46(45): 23436–23462.



# Wybrane pierwiastki śladowe w górnopermskich (cechsztyn) utworach potasonośnych w Polsce – czy warto je stąd pozyskiwać?

## Selected trace elements in the Upper Permian (Zechstein) potash-bearing deposits in Poland – is their exploitation from salts economically plausible?

Grzegorz CZAPOWSKI<sup>1</sup>, Hanna TOMASSI-MORAWIEC<sup>1</sup>, Jacek WACHOWIAK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny-Państwowy Instytut Badawczy, ul Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; grzegorz.czapowski@pgi.gov.pl

<sup>2</sup> Geosalt, ul. Rzepichy 42, 30-240 Kraków: [geosalt@wp.pl](mailto:geosalt@wp.pl)

### STRESZCZENIE

Przedstawiono aktualną charakterystykę zawartości wybranych pierwiastków śladowych (Ag, As, Ba, Be, Br, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Ga, J, La, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Se, Sn, Sr, Ti, Tl, U, V i Zn) w utworach potasonośnych cyklotemów PZ1, PZ2 i PZ3 cechsztynu (tab. 1) w Polsce, opartą o analizę wyników badań geochemicznych (archiwalnych i publikowanych) 307 próbek skał (tab. 2). Większość danych dotyczy 4 wysadów solnych z centralnej Polski (ryc. 1): Damasławek (14 próbek), Góra (5 próbek), Kłodawa (266 próbek) i Mogilno (13 próbek). Najwięcej danych uzyskano dla utworów potasonośnych cyklotemu PZ3 (207 próbek), dwukrotnie mniej (91 próbek) dla serii potasonośnej cyklotemu PZ2. Skąpe dane (9 próbek) dotyczą siarczanowych soli K-Mg (polihality) cyklotemu PZ1 w północnej Polsce (tab. 2).

Średni udział większości wymienionych pierwiastków w tych utworach jest niski, nie przekracza zwykle 1-4 mg/kg (tab. 3-5). Opisane serie potasonośne nie stanowią zatem ekonomicznie opłacalnego źródła pozyskiwania pożądanych rzadkich pierwiastków śladowych takich jak np. lit, bor, stron czy cez.

**Słowa kluczowe:** pierwiastki śladowe, utwory potasonośne, cechsztyn, Polska

### ABSTRACT

Content analysis was conducted on selected trace elements (Ag, As, Ba, Be, Br, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Ga, J, La, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Se, Sn, Sr, Ti, Tl, U, V, and Zn) of the Upper Permian (Zechstein) potash-bearing deposits of cyclothem PZ1 to PZ3 in Poland, based on both archival and published geochemical data concerning 307 rock samples (Table 1). Most of the samples (296) were collected from four salt domes, located in central Poland (Fig. 1): Damasławek (14 samples), Góra (5 samples), Kłodawa (266 samples), and Mogilno (13 samples). Dominant data (207 samples) represented the potash-bearing series of cyclothem PZ3 (Transitional Beds, Na<sub>2</sub>+K<sub>2</sub>, and Older Potash units; Table 2), fewer data (91 samples) characterised the potash-bearing deposits of cyclothem PZ2 (Transitional Beds, Na<sub>3</sub>+K<sub>3</sub>, and Younger Potash unit; Table 2). Only a few samples (9) were taken from sulphate potassium-magnesium salts (polyhalites) of PZ1 cyclothem from northern Poland (Fig. 1). An average content of most often detected trace elements was low in the studied deposits, usually not higher than 1–4 mg/kg (Tables 3–5); therefore, those Zechstein potash-bearing rocks are not economic sources of many marketable trace elements, e.g. lithium, boron, strontium or caesium.

**Key words:** trace elements, potash-bearing deposits, Zechstein, Poland

## WSTĘP

Nowoczesne techniki materiałowe wymagają zastosowania szeregu pierwiastków śladowych i pierwiastków ziem rzadkich, uznanych obecnie za surowce krytyczne dla Unii Europejskiej jak np. metale ziem rzadkich, lit, stron, bor, kobalt czy gal i jako surowce strategiczne i krytyczne dla Polski jak np. pierwiastki ziem rzadkich (Mazurek i in., 2021). Do pożądanych pierwiastków należy np. lit (Li) niezbędny do produkcji wydajnych ogniw energetycznych, stront (Sr), rubid (Rb), bor (B) i cez (Cs). Pierwiastki te wchodzi w skład szeregu minerałów, w tym również tych występujących w utworach solnych (sole kamienne, sole potasowo-magnezowe i siarczany), stąd też zainteresowanie złożowymi wystąpieniami tych osadów i współczesnymi środowiskami ich nagromadzenia.

Obecnie duże ilości litu pozyskuje się z przetwarzania solanek i utworów solnych kontynentalnych jeziorzysk solnych jak np. gigantyczne Salar de Uyuni (powierzchnia ok. 5,5 tys. km<sup>2</sup>, zasoby soli szacowane na ok. 10 mld ton) i Salar de Coipasa w Boliwii, w których zasoby litu oceniane są na 5,4 mln ton co stanowi blisko połowę jego zasobów światowych (Urbańczyk, 2011). Solanki o ponad połowę mniejszego (2,4 tys. km<sup>2</sup>) Salaru de Atacama w Chile w 2017 r. stanowiły w 27% światowych zasobów litu przy jego zawartości sięgającej 0,27% ([https://en.wikipedia.org/wiki/Salar\\_de\\_Atacama](https://en.wikipedia.org/wiki/Salar_de_Atacama)). Solanki jezior solnych na terenie Altiplano w Argentynie zawierają znaczne ilości litu do 8,9 g/l i boru do 10,8 g/l (Gozalvez, 2018). Bor można też pozyskać z solanek jeziora solnego Quarham w basenie Quaidam (zachodnie Chiny), które zawierają od 51,6 do 138,4 mg/l boru (Du i in., 2019). Z kolei skoncentrowane w sztucznych panwiach solanki Morza Martwego są źródłem pozyskiwania bromu (zawierają 11-12% Br) w ilości blisko 200 tys. ton/rok (Warren, 2006).

Polska posiada ogromne udokumentowane i przewidywane zasoby soli – głównie górnopermskiej (Czapowski i in., 2020a) – stąd potrzeba oceny czy utwory te nie mogą stać się istotnym źródłem pozyskania poszukiwanych pierwiastków. Dotychczasowe badania składu utworów solnych ograniczały się do oznaczenia zawartości pierwiastków głównych jak sód, wapń, potas, magnez, chlor, brom czy jod, ważnych dla oceny przydatności skały jako kopaliny do produkcji soli drogowej, spożywczej, solanki dla celów przemysłowych czy nawozów. Pierwsze badania zawartości wybranych pierwiastków śladowych (Br, B, J, Li, Cs, Co, Cr, Fe, Mn, Ni, Rb, Sr, V, Cu) przeprowadzono u schyłku lat 80-tych ubiegłego wieku w różnych typach ewaporatów permskich i miocénskich z obszaru Polski (Garlicki, Szybist, 1991; Garlicki i in., 1991). Późniejsze tego typu badania geochemiczne (np. Wachowiak, 1998, 2015, 2016; Tomassi-Morawiec i in., 2008) prowadzono na niektórych wydzieleniach górnopermskich skał solnych w wybranych strukturach solnych.

## INTRODUCTION

Modern materials-science techniques require the consumption of a number of trace elements and rare-earth elements that have been presently recognised as critical raw materials in the European Union, e.g. lithium, strontium, boron, cobalt, or gallium, or strategic and critical elements in Poland, e.g. all the rare-earth elements (Mazurek et al. 2021). For example, lithium (Li) belongs to the most sought-after elements as it is indispensable for the production of efficient fuel cells, similarly to strontium (Sr), rubidium (Rb), boron (B), and caesium (Cs). Those elements occur in a number of minerals, including those found in salt formations (rock salts, potassium-magnesium salts, or sulphates). For that reason, the relevant deposits and present-day mineral concentration environments are the object of interest.

Large quantities of lithium are extracted by processing of brines and salt formations of the continental lake salinas, as e.g. the gigantic Salar de Uyuni (with the surface area of ca. 5,500 km<sup>2</sup> and the salt resources estimated at ca. 10 billion tons), or the Salar de Coipasa in Bolivia whose lithium deposit is estimated at 5.4 mio. tons, amounting to nearly a half of the global resources (Urbańczyk 2011). The brines of the Salar de Atacama in Chile, whose surface area amounts to a half of the previous salina (2,400 km<sup>2</sup>), contains 27% of the global lithium resources, with its proportion reaching 0.27% (2017) ([https://en.wikipedia.org/wiki/Salar\\_de\\_Atacama](https://en.wikipedia.org/wiki/Salar_de_Atacama)). The brines of the salt-water lakes located at the Altiplano in Argentina contain considerable quantities of lithium (up to 8.9 g/l) and boron (up to 10.8 g/l) (Gozalvez 2018). Boron can also be obtained from the brines of the Quarham salt-water lake located in the Quaidam Basin (western China), containing from 51.6 to 138.4 mg/l of boron (Du et al. 2019). Besides, the Dead Sea brines, concentrated in artificial salt pans, are the sources of bromine extraction (containing 11–12% of bromine), in the quantity of ca. 200,000 ton/year (Warren 2006).

Poland possesses large documented and prospective salt deposits, mainly of Upper Permian origin (Czapowski et al. 2020a). For that reason, it is necessary to appraise whether the relevant formations may become essential sources of mining those much sought-after elements. Previous research on the composition of salt formations was limited to the determination of the main element contents of e.g. sodium, calcium, potassium, magnesium, chlorine, bromine or iodine, being important for the appraisal of the usefulness of rocks as raw material for the production of road maintenance salt, table salt, brine for industrial purposes, or fertilisers. The initial research on the contents of selected trace elements (Br, B, J, Li, Cs, Co, Cr, Fe, Mn, Ni, Rb, Sr, V, and Cu) was conducted on various types of Permian and Miocene evaporites by the end of the 1980's (Garlicki, Szybist 1991; Garlicki et al. 1991). Later similar geochemical tests (e.g. Wachowiak 1998, 2015,

Potrzeba aktualizacji stanu wiedzy o udziale w utworach solnych pożądanych pierwiastków śladowych skłoniła do przeprowadzenia systematycznej analizy ich zawartości w górnopermskich (cechsztyń) utworach potasonośnych w Polsce, dostępnych opróbowaniu. Prezentowana praca zawiera rezultaty badań geochemicznych, wykonanych w latach 2017-2019 w ramach projektu, wspierającego działania Głównego Geologa Kraju w zakresie prowadzenia Polityki Surowcowej Państwa (PSP) i finansowanego przez Ministerstwo Środowiska (Czapowski i in., 2020b). W opracowaniu uwzględniono też wyniki oznaczeń, zawarte we wcześniejszych pracach o ile zawierały dokładną lokalizację przebadanych próbek skał.

### HISTORIA DOTYCHCZASOWYCH BADAŃ GEOCHEMICZNYCH UTWORÓW POTASONOŚNYCH W POLSCE

Historię badań geochemicznych utworów potasonośnych w Polsce przedstawiono odnosząc je do badanych skał przypisanych kolejnym cyklotomom cechsztyń.

#### **Sole siarczanowe (polihality) i chlorkowe K-Mg w utworach cyklotemu PZ1 (północna Polska)**

Podczas dokumentowania złóż soli kamiennej i polihality na Pomorzu Gdańskim określono zawartość bromu (370–2175 mg/kg) w lokalnych, kilku-kilkunastometrowej grubości, przewarstwieniach chlorkowych (karnalit) soli K-Mg (Werner, 1979). M. Stępniewski (1973) wykonał oznaczenia zawartości niektórych pierwiastków śladowych (Br, Sr, B) w utworach najstarszej soli kamiennej (Na1) i w występujących w niej przewarstwieniach siarczanowych (anhydryty i polihality) oraz wspomnianych karnalitach w profilach 14 otworów wiertniczych. W polihalitych zawartość boru wynosi 1-110 mg/kg, strontu 0,9-2,3%, w karnalitach udział boru to 240 mg/kg i bromu - 2000 mg/kg zaś średnia zawartość bromu w sąsiadującej soli kamiennej zmienia się od 80 mg/kg do 166 mg/kg. Później (Peryt i in., 1984) określono zawartość strontu (600-900 mg/kg) i boru (10 do >500 mg/kg) w przewarstwieniach polihalitych w podścielających pokład najstarszej soli kamiennej utworach anhydrytu dolnego (A1d).

#### **Sole potasowo-magnezowe cyklotemów PZ2 i PZ3 w wysadach solnych na obszarze Niżu Polskiego**

W wysadach solnych na obszarze Niżu Polskiego występuje w utworach cyklotemu PZ2 seria potasonośna, złożona z tzw. utworów przejściowych Na<sub>2</sub>+K<sub>2</sub>, zbudowanych z przewarstwień soli kamiennej i soli K-Mg oraz „właściwego” wydzielenia starszej soli potasowej (K<sub>2</sub>), gdzie dominują chlorkowe i siarczanowe sole K-Mg (tab.1). Podobna sytuacja jest w przypadku serii potasonośnej w cyklotemie PZ3,

2016; Tomassi-Morawiec et al. 2008) were performed on selected Upper Permian salt rock formations.

The need of updated knowledge on the quantities of trace elements in salt formations made researchers conduct regular analyses of Upper Permian (Zechstein) potash-bearing formations in Poland, from which samples could be collected. This paper presents the results of the geochemical tests, completed in 2017–2019 as part of the project designed to support the efforts of the Chief National Geologist implementing the National Raw Materials Policy (PSP), financed by the Ministry of the Environment (Czapowski et al. 2020b). This paper also takes into account the results of the determinations published in earlier works provided that they contained detailed locations of the tested salt rock samples.

### A HISTORY OF PREVIOUS GEOCHEMICAL TESTS OF POTASH-BEARING FORMATIONS IN POLAND

The research history is presented here with reference to the specific rocks assigned to the subsequent Zechstein cyclothem.

#### **Sulphate salts (polyhalites) and K-Mg chloride salts found in cyclothem PZ1 formations in northern Poland**

When the rock salt and polyhalite deposits were documented in the region of Pomorze Gdańskie, the bromine content was determined at 370–2,175 mg/kg in the local chloride (carnalite) beds of K-Mg salts, several to about a dozen of centimetres thick each (Werner 1979). M. Stępniewski (1973) determined the contents of selected trace elements (Br, Sr, and B) in the Oldest Halite (Na1) formation and the sulphate interbeds within (anhydrites and polyhalites), as well as in carnalities, using 14 borehole profiles. The boron content amounted to 1–110 mg/kg and that of strontium to 0,9–2,3% in polyhalites; however, the contents of the same elements in carnalities amounted to 240 mg/kg and 2,000 mg/kg, respectively, with the average bromide content found in neighbouring salt rock, ranging from 80 mg/kg to 166 mg/kg. Later, (Peryt et al. 1984) determined the strontium (600–900 mg/kg) and boron (10 to >500 mg/kg) contents in polyhalites interbedding under the layer of the Oldest Halite of the Lower Anhydrite formation (A1d).

#### **Potassium-magnesium salts of cyclothem PZ2 and PZ3 in the salt domes situated on the area of the Polish Lowlands**

A potash-bearing series, composed of the so-called Na<sub>2</sub>+K<sub>2</sub> Transitional Beds, made up of rock salt and K-Mg salt interbeds, as well as the “proper” units of the Older Potash unit (K<sub>2</sub>) occurs within cyclothem PZ2 formations in the salt domes of the Polish Lowlands. The series is dominated by K-Mg chloride and sulphate salts (Table 1). A similar situation occurs in the potash-bearing series of cyclothem PZ3,



gdzie wyróżnia się tzw. utwory przejściowe (Na<sub>3</sub>+K<sub>3</sub>) oraz „właściwe” wydzielenie młodszej soli potasowej (K<sub>3</sub>).

Dokumentacje złożowe, wykonane dla *wysadu solnego Kłodawa* (Werner, 1958, 1962; Mazurek i in., 2016), podają dla warstw soli K-Mg w obrębie cyklotemu PZ2 zmienne zawartości takich pierwiastków śladowych jak: Br, B, Mn, Cs, Li, i Sr. Dla serii potasonośnej cyklotemu PZ3 określono zawartość bromu (160-1050 mg/kg; Werner, 1962), zaś w Dodatku nr 2 do dokumentacji geologicznej... (Mazurek i in., 2016) podano oznaczoną zawartość Br, B, Li, Rb i Sr. W całej tej serii w tym ostatnim opracowaniu stwierdzono podwyższone zawartości boru (75,6 mg/kg), bromu (1232 mg/kg), litu (5,6 mg/kg), rubidu (8,1 mg/kg) i strontu (16,1 mg/kg), zaś w jednej próbce - wysoką zawartość boru (438 mg/kg). Niezależne badania zespołu niemieckiego w latach 2005-2007 (por. Tomassi-Morawiec i in., 2008, 2009) serii potasonośnej cyklotemu PZ2 ustaliły udział bromu od 77 do 1840 mg/kg, zaś w serii potasonośnej cyklotemu PZ3 - od 273 do 376 mg/kg.

Opracowania o charakterze naukowym (np. Wachowiak, 1998; Tomassi-Morawiec i in., 2008), prowadzone w tym wy-sadzie, określały zawartość takich pierwiastków śladowych jak: Fe, Ni, Co, Cr, Cu, Mn, Zn, Pb, Cd, Br, J, As i Se (Wachowiak, 1998) i Br, Rb i Sr (Tomassi-Morawiec i in., 2008).

Badania prowadzone na wymienionych seriach potasonośnych obu cyklotemów w oparciu o materiał rdzeniowy z otworów wiertniczych z wysadu solnego Góra (Czapowski i in., 2009) skoncentrowały się na oznaczeniu zawartości bromu. Jego udział w serii potasonośnej cyklotemu PZ2 zmienia się od 59 do 651 mg/kg, zaś w serii potasonośnej cyklotemu PZ3 - od 234 mg/kg do 649 mg/kg.

Szereg badań geochemicznych wykonano na materiale rdzeniowym z obu serii potasonośnych w otworach wiertniczych z wysadu solnego Mogilno, określając zawartość niektórych pierwiastków śladowych jak np. bromu (Schramm, Bornemann, 2006; Wachowiak, 2015) oraz Br, Al, Fe, Zn, Ni, As, Li, J i Cd (Wachowiak, 2016). Badania zespołu niemieckiego (Schramm, Bornemann, 2006) wykazały w profilu warstw przejściowych Na<sub>2</sub>+K<sub>2</sub> w otworze wiertniczym M-24 zawartość bromu 70-232 mg/kg (średnia: 139 mg/kg), w starszej soli potasowej (K<sub>2</sub>) udział bromu wyniósł 69-238 mg/kg (średnia: 164 mg/kg), zaś w skałach młodszej soli potasowej (K<sub>3</sub>) - od 146 do 308 mg/kg (średnia: 226 mg/kg). Z kolei badania J. Wachowiaka (2015) ustaliły udział bromu w profilu starszej soli potasowej (K<sub>2</sub>) w otworze wiertniczym M-29 na 69,4-148,7 mg/kg.

Wyniki wcześniejszych oznaczeń, zawarte w wybranych opracowaniach (Tomassi-Morawiec i in., 2008; Wachowiak, 1998, 2015, 2016), uwzględniono w zestawieniach (Czapowski i in., 2020b) analiz zawartości pierwiastków śladowych obu serii potasonośnych, służących obliczeniu zaprezentowanych poniżej parametrów statystycznych (tabele 3 i 4).

where one can distinguish the so-called Transitional Beds (Na<sub>3</sub>+K<sub>3</sub>) and “proper” units of the Younger Potash unit (K<sub>3</sub>).

The deposit documentation, drafted for the Kłodawa Salt Dome (Werner 1958, 1962; Mazurek et al. 2016), specified changeable values of such trace elements as Br, B, Mn, Cs, Li, and Sr, within the K-Mg beds of cyclothem PZ2. The bromine content was determined for the potash-bearing series of cyclothem PZ3 (160–1,050 mg/kg) (Werner 1962), while Annex 2 of the Geological Documentation... (Mazurek et al. 2016) specified the determined contents of Br, B, Li, Rb, and Sr. The latter study determined increased contents in that series as follows: boron (75.6 mg/kg), bromine (1,232 mg/kg), lithium (5.6 mg/kg), rubidium (8.1 mg/kg), and strontium (16.1 mg/kg). However, one sample displayed high boron contents (438 mg/kg). Independent studies, conducted by a German research team in 2005–2007 (cf. Tomassi-Morawiec et al. 2008, 2009) on the potash-bearing series of cyclothem PZ2, established the bromine content ranging from 77 to 1,840 mg/kg, while that of cyclothem PZ3 ranging from 273 to 376 mg/kg.

Other research studies (e.g. Wachowiak 1998; Tomassi-Morawiec et al. 2008), also conducted on the Kłodawa Salt Dome, determined the contents of such trace elements as Fe, Ni, Co, Cr, Cu, Mn, Zn, Pb, Cd, Br, J, As, and Se (Wachowiak 1998) or Br, Rb, and Sr (Tomassi-Morawiec et al. 2008).

The studies conducted on the above-mentioned potash-bearing series of both cyclothem, based on the cores collected from the boreholes drilled in the Góra Salt Dome (Czapowski et al. 2009), concentrated on the determination of the bromine content. Bromine quantities in the potash-bearing series of cyclothem PZ2 ranged from 59 to 651 mg/kg, while those of cyclothem PZ3 from 234 mg/kg to 649 mg/kg.

A number of geochemical tests were conducted on the cores collected from the potash-bearing series of the Mogilno Salt Dome, with the determination of certain trace element contents: bromine (Schramm, Bornemann 2006; Wachowiak 2015) and Br, Al, Fe, Zn, Ni, As, Li, J, and Cd (Wachowiak 2016). The studies, conducted by a German research team (Schramm, Bornemann 2006) on the Na<sub>2</sub>+K<sub>2</sub> Transitional Beds of borehole M-24, estimated the bromine content at 70–232 mg/kg (or 139 mg/kg on average), with the bromine quantity of 69–238 mg/kg (or 164 mg/kg on average), within the Older Potash unit (K<sub>2</sub>), while that in the Younger Potash unit (K<sub>3</sub>) ranged from 146 to 308 mg/kg (or 226 mg/kg on average). Other studies by J. Wachowiak (2015) determined the bromine content, within the Older Potash unit (K<sub>2</sub>) of borehole M-29 at 69.4–148.7 mg/kg.

The results of previous determinations, presented in selected studies (Tomassi-Morawiec et al. 2008; Wachowiak 1998, 2015, 2016), were taken into account in our Tables (Czapowski et al. 2020b), showing the analyses of the trace element contents, within both potash-bearing series, so that the data

W latach 50. ubiegłego wieku podczas dokumentowania złoża soli w wysadzie solnym Kłodawa oznaczono zawartość boru i bromu w solach K-Mg (bez zdefiniowania ich wieku) przewierconych 9 otworami z powierzchni (Werner, 1954). Udział boru wahał się od 0,01 do 0,092% zaś bromu sięgał 0,2%.

Wspomniane wcześniej opracowania z lat 90. (Garlicki, Szybist, 1991; Garlicki i in., 1991) wykazały w przypadku utworów młodszej soli potasowej (K3) w wysadzie Kłodawa zawartość rubidu w przedziale 0,9–5915 ppm i bromu od 110 do 4500 ppm. W wysadzie solnym Łanięta osady te charakteryzuje znacznie niższy udział rubidu (17–33,7 ppm) i bromu (181–210 ppm). Udział innych pierwiastków w tych utworach przedstawia się następująco: J, Li i V: 0,1–1,2 mg/kg, Mn, Cr i Cu: 2,5–7,2 mg/kg, B, Sr, Cs, Co i Ni: 25–60 mg/kg oraz Fe >100 mg/kg.

### **Sole K-Mg w utworach cyklotemów PZ2 i PZ3 na obszarze przedsudeckim**

Na obszarze przedsudeckim prowadzono w latach 60.–70. ub. wieku prace wiertnicze w celu rozpoznania złożowych wystąpień soli K-Mg (np. Dawidowski, 1976; Podemski, 1966, 1972a,b, 1973a,b, 1974a,b, 1975; Werner, Dawidowski, 1976). Opróbowaniu poddano utwory starszej (K2) i młodszej (K3) soli potasowej, dla których oprócz oznaczeń zawartości składników głównych określono wówczas jedynie udział bromu w celu obliczenia tzw. wskaźnika bromo-chlorowego (Br/Cl). Jego wartość dla utworów starszej soli potasowej wyniosła 0,22–0,46, dla młodszej soli potasowej – 0,19–1,2 (Czapowski i in., 2012).

## **PRZEDMIOT, ZAKRES I METODYKA WYKONANYCH BADAŃ**

### **Przedmiot i zakres wykonanych badań**

Przedmiotem badań geochemicznych były dostępne opróbowaniu wymienione wystąpienia utworów górnego permu (cechsztyń), zawierające sole K-Mg, zarówno typu chlorkowego (główne minerały to biszofit, karnalit, sylwin i tachyhydrit) jak i siarczanowego (główne minerały to: bledyt, epsomit, heksahydryt, kainit, kizeryt, langbeinit, leweit, leonardyt, leonit, pikromeryt, polihalit i syngenit – Czapowski i in., 2020b).

Pozycję stratygraficzną utworów cechsztyń, zawierających głównie pierwotne i wczesnodiagenetyczne wystąpienia wspomnianych soli K-Mg, ukazuje tabela 1.

could be used for the calculation of the statistical parameters shown below (Tables 3 and 4).

During the process of documentation drafting for the Kłodawa Salt Dome in the 1950's, the boron and bromine contents were determined in K-Mg salts (without age definition) upon drilling 9 boreholes from land surface (Werner 1954). The boron content ranged from 0.01 to 0.092%, while that of bromine reached 0.2%.

The previous studies of the 1990's, mentioned above (Garlicki, Szybist 1991; Garlicki et al. 1991), indicated the rubidium content of 0.9–5915 ppm and that of bromine from 110 to 4,500 ppm, within the Younger Potash formations (K3) of the Kłodawa Salt Dome. However, in the case of the Łanięta Salt Dome, the sediments were characterised by a much lower contents of rubidium (17–33.7 ppm) and bromine (181–210 ppm). The contents of other elements found in those formations were estimated as follows: J, Li, and V: 0.1–1.2 mg/kg; Mn, Cr, and Cu: 2.5–7.2 mg/kg; B, Sr, Cs, Co, and Ni: 25–60 mg/kg; and Fe >100 mg/kg.

### **K-Mg salts in the cyclothem PZ2 and PZ3 formations of the Fore-Sudeten Area**

Drilling works were conducted in the Fore-Sudeten Area in the 1960's and 1970's, in search of the K-Mg salt deposits (e.g. Dawidowski 1976; Podemski 1966, 1972a, b, 1973a, b, 1974a, b, 1975; Werner, Dawidowski 1976). Samples were collected from the Older (K2) and Younger Potash (K3) formations. In addition to main element content determinations, only bromine content was established to calculate the so-called bromine-chlorine (Br/Cl) index. The index value was estimated at 0.22–0.46 for Older Potash and at 0.19–1.2 for Younger Potash unit (Czapowski et al. 2012).

## **OBJECT, SCOPE, AND METHODOLOGY OF RESEARCH**

### **Object and scope of completed research**

The object of our geochemical research consisted in the analysis of the available samples of Upper Permian (Zechstein) formations, containing the K-Mg salts of both types: chloride salts (mainly bischofite, carnalite, sylvite, and tachyhydrite) and sulphate salts (mainly: bledite, epsomite, hexahydrite, kainite, kiezerite, langbeinite, leveite, leonardite, leonite, picromerite, polyhalites, and syngenite) (Czapowski et al. 2020b).

The stratigraphic positions of the Zechstein formations, containing mainly the primary and early diagenetic occurrences of K-Mg salts, are shown in Table 1.

**Tabela 1.** Stratygrafia badanych utworów potasonośnych cechsztynu (wg Wagner, 1995; zmienione)

<b>BADANE WYDZIELENIA LITOSTRATYGRAFICZNE UTWORÓW POTASONOŚNYCH CECHSZTYNU W POLSCE</b> <i>Studied Zechstein lithostratigraphic potash-bearing units in Poland</i>	
<b>Wydziazenia: nazwa i symbol</b> <i>Name and symbol of unit</i>	<b>Cyklotemy</b> <i>Cyclothem</i>
młodsza sól potasowa (K3) <i>Younger Potash</i>	PZ3
utwory przejściowe Na3+K3 <i>Transitional beds Na3+K3</i>	
starsza sól potasowa (K2) <i>Older Potash</i>	PZ2
utwory przejściowe Na2+K2 <i>Transitional beds Na2+K2</i>	
anhydryt dolny (A1d) <i>utwory z polihalitem</i> <i>Lower Anhydrite (with polyhalite)</i>	PZ1

Głównym obiektem badań – ze względu na dostępność opróbowaniu w wyrobiskach kopalnianych i rdzeniach z otworów wiertniczych - były **dwie serie potasonośne**, występujące w sukcesji cyklotemów PZ2 i PZ3 cechsztynu w Polsce i najlepiej udokumentowane w obrębie wysadów solnych. Są to:

- seria potasonośna cyklotemu PZ2, na którą składają się 2 wydziazenia litologiczne: tzw. utwory przejściowe Na2+K2 (zbudowane z przewarstwień soli kamiennej i soli K-Mg) oraz wydziazenie starszej soli potasowej (K2), zdominowane przez sole K-Mg,
- seria potasonośna cyklotemu PZ3, którą tworzą też 2 wydziazenia litologiczne: tzw. utwory przejściowe Na3+K3 (zbudowane z przewarstwień soli kamiennej i soli K-Mg) oraz wydziazenie młodszej soli potasowej (K3), zdominowane przez sole K-Mg.

Ponadto wycinkowo przebadano wystąpienia soli K-Mg typu siarczanowego, pojawiające się w profilu utworów anhydrytu dolnego (A1d) w rejonie Zatoki Puckiej w północnej Polsce, dzięki udostępnieniu do opróbowania rdzenia z niedawno odwierconego otworu Mioszyno M-9.

Zakres wykonanych badań w latach 2017-2019 (Czapowski i in., 2020b) obejmował oznaczenia zawartości wybranych pierwiastków śladowych w wytypowanych próbkach skał: Br, J, Li, Ce, Co, Cr, Ga, La, Ni, Rb, Sr, Se, V, Zn, Pb, Cu. Wyniki tych oznaczeń uzupełniono o dane, uzyskane z wcześniejszych badań tych utworów (np. Wachowiak, 1998; 2015, 2016; Tomassi-Morawiec i in., 2008) o ile można było ustalić dokładną lokalizację przebadanych próbek.

Ilość przebadanych próbek z rozdziałem na poszczególne serie potasonośne i miejsca pobrania ukazuje tabela 2.

**Table 1.** Stratigraphy of the examined Polish Zechstein potash-bearing formations (after Wagner 1995; modified).

<b>Lithostratigraphic potash-bearing Zechstein units in Poland</b>	
<i>Units' names and symbols</i>	<i>Cyclothem</i>
Younger Potash (K3) Na3+K3 Transitional Beds	PZ3
Older Potash (K2) Na2+K2 Transitional Beds	
Lower Anhydrite (A1d) (with polyhalite)	PZ1

**Two potash-bearing salt formations**, occurring within the Polish Zechstein salt domes of cyclothem PZ2 and PZ3 and best documented as yet, became the main objects of study, owing to the availability of samples collected either from underground mines or from cores. The following formations were studied:

- Potash-bearing series of cyclothem PZ2, composed of 2 lithological units, or the so-called Na2+K2 Transitional Beds (made up of rock salt and K-Mg salt interbedding), with the Older Potash (K2) unit, dominated by the K-Mg salts,
- Potash-bearing series of cyclothem PZ3, also composed of 2 lithological units: the so-called Na3+K3 Transitional Beds (made up of rock salt and K-Mg salt interbedding) and the Younger Potash (K3) unit, dominated by the K-Mg salts.

In addition, the occurrences of K-Mg sulphate salts, occurring in the Lower Anhydrite (A1d) formation of the Puck Bay in northern Poland, were tested. Those studies were based on the sampled core from the recently drilled borehole of Mioszyno M-9.

The scope of our studies completed in 2017–2019 (Czapowski et al. 2020b) covered the determination of the selected trace element contents occurring in rock samples: Br, J, Li, Ce, Co, Cr, Ga, La, Ni, Rb, Sr, Se, V, Zn, Pb, and Cu. The results of those determinations were supplemented with the data obtained from previous studies conducted on those formations (e.g. Wachowiak 1998, 2015, 2016; Tomassi-Morawiec et al. 2008) provided that it was possible to determine detailed locations of samples.

The numbers of tested samples, with subdivision into particular potash-bearing series and locations, are presented in Table 2.

Nine rock samples of sulphate K-Mg (polyhalites) salts, belonging to Lower Anhydrite (A1d) series of the Puck Bay, collected from borehole Mioszyno M-9, were tested.

Z siarczanowych soli K-Mg (polihality) w obrębie utworów anhidrytu dolnego (A1d) z rejonu Zatoki Puckiej przebadano 9 próbek skalnych, pobranych z rdzenia z otworu wiertniczego Mieroszyno M-9.

Zwartość pierwiastków śladowych w utworach potasonośnych cyklotemu PZ2 scharakteryzowano w oparciu o analizę 91 próbek pobranych:

- a) w profilach podziemnych wyrobisk w Kopalni Soli Kłodawa S.A. w wysadzie solnym Kłodawa – 73 próbki,
- b) z rdzenia z otworu wiertniczego G-41 z wysadu solnego Góra – 1 próbka,
- c) z rdzenia z otworów wiertniczych Damasławek A i Damasławek B z wysadu solnego Damasławek – 10 próbek,
- d) z rdzenia z otworów wiertniczych M-33 i M-35 z wysadu solnego Mogilno – 7 próbek.

Podobną charakterystykę serii potasonośnej cyklotemu PZ3 przedstawiono w oparciu o wyniki oznaczeń w 207 próbkach, pobranych w:

- a) profilach podziemnych wyrobisk w Kopalni Soli Kłodawa S.A. w wysadzie solnym Kłodawa – 193 próbki,
- b) z rdzenia z otworu wiertniczego G-41 z wysadu solnego Góra – 4 próbki,
- c) z rdzenia z otworu wiertniczego Damasławek A z wysadu solnego Damasławek – 4 próbki,
- d) z rdzenia z otworów wiertniczych M-33 i M-35 z wysadu solnego Mogilno – 6 próbek

Łącznie uwzględniono wyniki oznaczeń w 307 próbkach skał, pochodzących z wymienionych utworów potasonośnych cechsztyń w Polsce. Ten stosunkowo skąpy materiał badawczy, z dominacją próbek pobranych w podziemnych wyrobiskach w Kopalni Soli Kłodawa S.A. w wysadzie solnym Kłodawa, wynikał z faktu iż jedynie tam dostępny jest ogląd i możliwość selektywnego opróbowania (w oparciu o zmienność litologiczną) profili serii potasonośnych cyklotemów PZ2 i PZ3, natomiast w pozostałych rejonach dostępne są jedynie materiały rdzeniowe z wykonanych otworów wiertniczych. Sole K-Mg są w nich stosunkowo rzadko rdzeniowane, rdzenie w przypadku otworów eksploatacyjnych rzadko dłużej przechowywane, zaś same sole bardzo szybko ulegają przemianom i rozkładowi bez odpowiedniego zabezpieczenia. Stąd też niewielka ilość próbek z innych wysadów solnych natomiast z zarejestrowanych w profilach otworów wiertniczych wystąpień pokładowych soli K-Mg w Polsce północnej i południowo-wschodniej brak jest zachowanego materiału rdzeniowego.

The trace element contents of the potash-bearing of cyclothem PZ2 were described on the basis of 91 samples collected from the following:

- a) Underground workings of the Kłodawa Salt Mine, Kłodawa Salt Dome: 73 samples,
- b) Borehole G-41 core, Góra Salt Dome: 1 sample,
- c) Boreholes Damasławek A and Damasławek B cores, Damasławek Salt Dome: 10 samples,
- d) Boreholes M-33 and M-35 cores, Mogilno Salt Dome: 7 samples.

A similar description of the potash-bearing series of cyclothem PZ3 was presented based on the results of the determinations of 207 samples collected from the following:

- a) Underground workings of the Kłodawa Salt Mine, Kłodawa Salt Dome: 193 samples,
- b) Borehole G-41 core, Góra Salt Dome: 4 samples,
- c) Boreholes Damasławek A and Damasławek B cores, Damasławek Salt Dome: 4 samples,
- d) Boreholes M-33 and M-35 cores, Mogilno Salt Dome: 6 samples.

In total, the test results of 307 samples, collected from the above-mentioned Zechstein potash-bearing formations were presented. The test materials were rather limited and dominated by the samples collected from the underground salt dome workings of the Kłodawa Salt Mine due to the fact that the Kłodawa Salt Mine was the only site available for observation and selective sampling, based on lithological changeability of potash-bearing series of cyclothem PZ2 and PZ3. However, the remaining sites possessed only core materials originating from boreholes. The K-Mg salts were drilled rather rarely. The cores of mining boreholes were rarely stored in longer periods. Core salts were quickly transformed and decomposed, without application of proper protection measures. Consequently, few samples were collected at other salt domes than the Kłodawa Salt Dome. No cores were available for the documented boreholes drilled in the bedded K-Mg deposits of northern and south-eastern Poland.

Locations of sample collection sites are shown in Fig. 1.

## METHODOLOGY OF GEOCHEMICAL STUDIES

Below, we discuss the research techniques and equipment applied in the geochemical studies of the K-Mg salts.

The geochemical studies of potash-bearing series of cyclothem PZ2 and PZ3, occurring in the Kłodawa Salt Dome,



**Tabela. 2.** Zestawienie ilości analizowanych próbek z utworów potasonośnych cechsztynu w Polsce

WYDZIELENIE LITOSTRATYGRAFICZNE SOLI K-Mg CECHSZTYNU <i>Zechstein lithostratigraphic units</i>	LICZBA PRÓBEK/ <i>Number of samples</i>					LICZBA PRÓBEK <i>Number of samples</i>
	Rejon Zatoki Puckiej <i>Puck Bay surroundings</i>	Wysad solny Góra <i>Góra salt dome</i>	Wysad solny Damasławek <i>Damasławek salt dome</i>	Wysad solny Mogilno <i>Mogilno salt dome</i>	Wysad solny Kłodawa <i>Kłodawa salt dome</i>	
Polihality w A1d	9	-	-	-	-	9
Na <sub>2</sub> +K <sub>2</sub> , K <sub>2</sub>	-	1	10	7	73	91
Na <sub>3</sub> +K <sub>3</sub> , K <sub>3</sub>	-	4	4	6	193	207
<b>LICZBA PRÓBEK</b> <i>Number of samples</i>	9	5	14	13	266	307

**Table 2.** Locations and numbers of analysed samples of the Polish Zechstein potash-bearing deposits.

K-Mg Zechstein lithostratigraphic units	Numbers of samples					Total
	<i>The Bay of Puck Area</i>	<i>Góra Salt Dome</i>	<i>Damasławek Salt Dome</i>	<i>Mogilno Salt Dome</i>	<i>Kłodawa Salt Dome</i>	
Polyhalite in A1d	9	-	-	-	-	9
Na <sub>2</sub> +K <sub>2</sub> , K <sub>2</sub>	-	1	10	7	73	91
Na <sub>3</sub> +K <sub>3</sub> , K <sub>3</sub>	-	4	4	6	193	207
<i>Numbers of samples</i>	9	5	14	13	266	307

Lokalizację miejsc pobrania próbek ukazuje rycina 1.

#### METODYKA WYKONANYCH BADAŃ GEOCHEMICZNYCH

Poniżej omówiono techniki badawcze i aparaturę, wykorzystaną w badaniach geochemicznych soli K-Mg.

Prowadzone w latach 2017-2019 (Czapowski i in. 2020b) badania geochemiczne serii potasonośnych cyklotemów PZ2 i PZ3, występujących w wysadzie solnym Kłodawa, wykorzystano próbki proszkowe, pobrane podczas profilowań tych wystąpień w ociosach wyrobisk podziemnych Kopalni Soli Kłodawa S.A. w latach 2005-2007, gdy wyrobiska te były w stosunkowo dobrym stanie (Tomassi i in., 2008). Próbkę pochodziły z trzech profili serii potasonośnej cyklotemu PZ2 (profil Z-2/1 na poziomie 600 m, profile Z-2/2 i Z-2/3 - na poziomie 750 m) oraz dwu profili serii potasonośnej cyklotemu PZ3 (profil Z-3/1 na poziomie 750 m oraz profil Z-3/2 na poziomie 600 m). Opróbowanie tych profili przeprowadzono zwykle w odstępach 1 m, a w przypadku dużej zmienności litologicznej – gęściej.

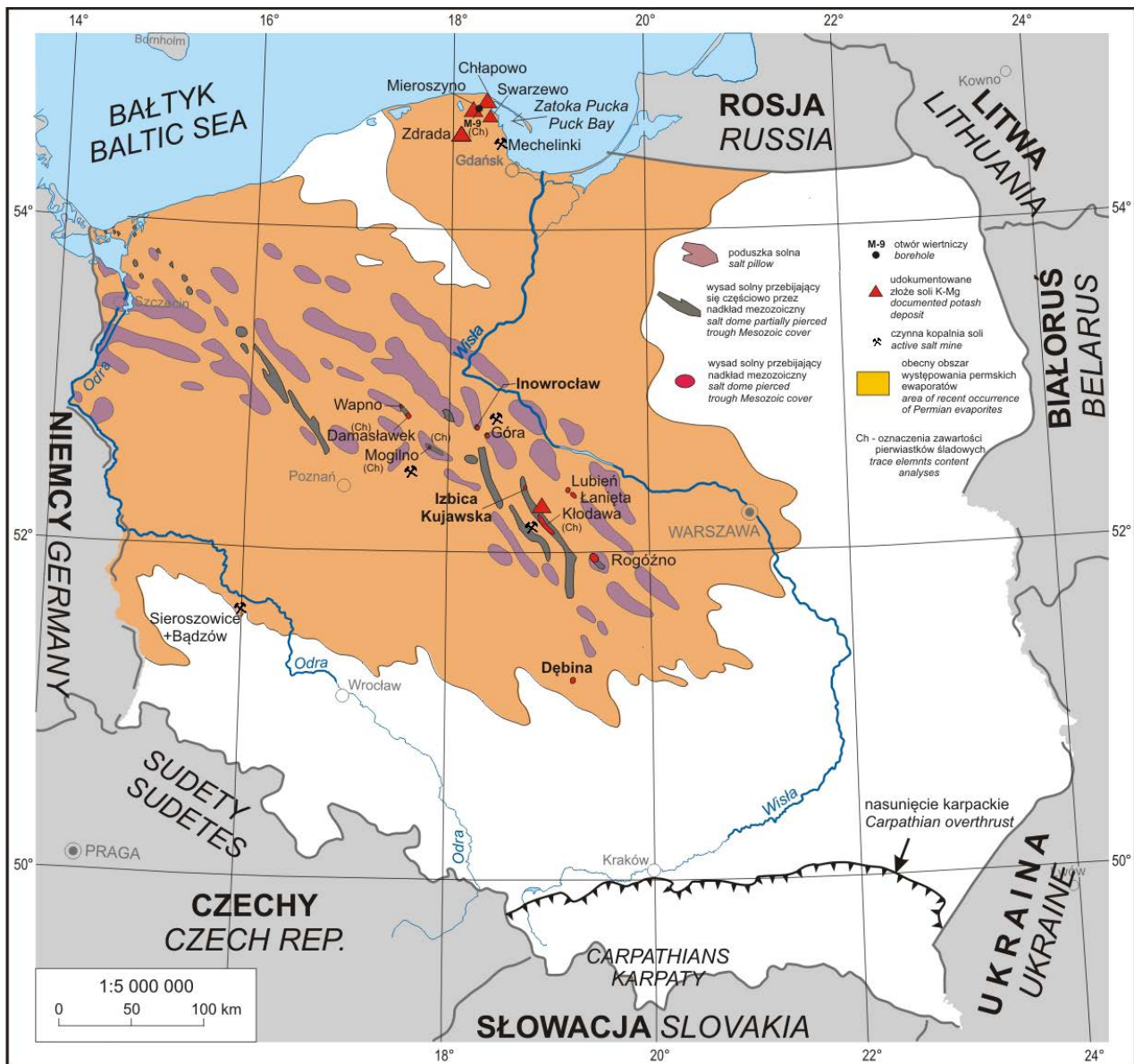
W przypadku trzech innych wysadów solnych (Damasławek, Góra i Mogilno) próbki skał z wymienionych powyżej serii potasonośnych pobrano z materiału rdzeniowego z otworów wiertniczych: Damasławek A i Damasławek B, G-41 i M-33).

conducted in 2017–2019 (Czapowski et al. 2020b), concerned the powdered samples, collected from the walls of underground workings of the Kłodawa Salt Mine, during deposit profiling in 2005–2007, when the workings were in a fairly good condition (Tomassi et al. 2008). The samples originated from three potash-bearing series profiles of cyclothem PZ2 (profile Z-2/1, Level 600 m and profiles Z-2/2 and Z-2/3, Level 750 m), as well as two potash-bearing series profiles of cyclothem PZ3 (profile Z-3/1, Level 750 m and profile Z-3/2, Level 600 m). Profile sampling was conducted usually either every 1 m or less in case of high lithological changeability.

In the remaining three salt domes (Damasławek, Góra, and Mogilno), the rock samples from the respective potash-bearing series were collected from the cores of Damasławek A and Damasławek B, boreholes G-41 and M-33, respectively).

The tests concerning the K-Mg sulphate salts (polyhalites) occurring within the Lower Anhydrite (A1d) formation of the Puck Bay were based on 9 rock samples (10 cm core sections), collected from the core of borehole Mioszyno M-9, made available to us from the core collection of the National Geological Archives (NAG) by permission obtained from the Ministry of the Environment.

The determination of the chemical composition of the majority of core samples, regarding trace elements in particular,



Ryc. 1. Lokalizacja miejsc omawianych badań geochemicznych utworów potasonośnych cechsztyń w Polsce  
 Fig. 1. Location of commented geochemical studies of Zechstein potash-bearing deposits in Poland

Z kolei do badań siarczanowych soli K-Mg (polihality), występujących w obrębie utworów anhidrytu dolnego (A1d) z rejonu Zatoki Puckiej, wykorzystano 9 próbek (wycinki rdzenia dł. do 10 cm) skalnych, pobranych z rdzenia z otworu wiertniczego Miosroszyno M-9, udostępnionego za zgodą Ministerstwa Środowiska z zasobów rdzeniowych Narodowego Archiwum Geologicznego (NAG).

Oznaczenia składu chemicznego – a szczególnie zawartości pierwiastków śladowych – większości próbek wykonano w Centralnym Laboratorium Chemicznym PIG-PIB w Warszawie.

Próbki stałe, będące fragmentami rdzeni wiertniczych, zostały utarte w moździerzach agatowych do frakcji <1mm. Wszystkie próbki przed analizą chemiczną były suszone, a następnie poddane pełnemu rozkładowi kwasowemu (1 g próbki do końcowej masy 50 g roztworu). Dla celów ozna-

was conducted at the Central Chemical Laboratory of PIG-PIB in Warsaw.

Solid samples, being fragments of cores, were ground in agate mortars down to the fraction of <1mm. Before chemical analysis, all the samples were dried and subjected to complete acid decomposition (1 g samples to the target mass of 50 g of the solution). The rock material was diluted in hot water to determine the Br and J contents.

The contents of particular trace elements were determined by the following analytical methods:

- Ba, Cr, Cu, Fe, Mn, Sr, Ti, V, and Zn: inductively coupled plasma optic emission spectrometry (ICP-OES);
- Ag, As, Be, Ce, Cd, Co, Cs, Ga, La, Li, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Se, Sn, Tl, and U: inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS);
- Br and J: ion chromatography (IC).

czeń zawartości pierwiastków Br i J materiał skalny był przetwarzany na gorąco w wodzie.

Zawartość poszczególnych pierwiastków śladowych oznaczono następującymi metodami analitycznymi:

- Ba, Cr, Cu, Fe, Mn, Sr, Ti, V i Zn – metodą emisyjnej spektrometrii atomowej ze wzbudzeniem w plazmie indukcyjnie sprzężonej (ICP-OES);
- Ag, As, Be, Ce, Cd, Co, Cs, Ga, La, Li, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Se, Sn, Tl i U – metodą spektrometrii mas z jonizacją w plazmie indukcyjnie sprzężonej (ICP-MS);
- Br i J – metodą chromatografii jonowej (IC).

Pełny rozkład kwasowy umożliwił oznaczenie pierwiastków śladowych także w residuum nierozpuszczalnym w wodzie.

Część oznaczeń składu chemicznego dla niektórych próbek pobranych z rdzeni wiertniczych z wysadów Góra, Damasławek i Mogilno wykonało Laboratorium Hydrogeochemiczne Katedry Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej AGH w Krakowie.

Pobrane próbki z rdzeni, po oczyszczeniu na sucho sprężonym powietrzem zostały rozdrobnione na frakcje około 10 – 50 mm. Następnie z każdej próbki metodą kwatrowania zostało wydzielone 200 g reprezentatywnego materiału do dalszych badań. Każda z 200 g próbek została utarta w młynku agatowym do frakcji 0,1 do 1 mm. Po dokładnym wymieszaniu rozartych próbek z każdej próbki odważono 10 g materiału w celu oznaczenia zawartości chlorków, bromków, pierwiastków głównych i pierwiastków śladowych.

Chlorki i bromki oznaczano tam z wyciągu wodnego (ok. 5 g próbki na 100 ml H<sub>2</sub>O destylowanej). Chlorki oznaczono metodą argentometryczną wg normy: PN-ISO 9297: 1994.

Brom oraz pierwiastki śladowe oznaczono metodą spektrometrii masowej, wg norm: PN-EN ISO 17924-1: 2007 i PN-EN ISO 17924-2: 2006, przy zastosowaniu spektrometru ICP MS „Elan 6100”, z plazmą wzbudzaną indukcyjnie, firmy Perkin-Elmer.

Pierwiastki główne: Na, Al, Ca, Fe, Mg, S, K, oznaczono metodą spektrometrii optycznej, wg normy PN-EN ISO 15011885: 2009, przy zastosowaniu spektrometru ICP OES „Optima 7300 DV”, firmy Perkin-Elmer.

Próbki do oznaczeń pierwiastków (poza Br i Cl) rozkładano metodą mineralizacji mikrofalowej; naważkę ok. 0,3 g rozpuszczano w mieszaninie kwasów: azotowego i solnego w proporcji 1:3, w temperaturze 230°C i przy ciśnieniu 35 atm. SiO<sub>2</sub> oznaczano wagowo, jako nierozpuszczalną w kwasach pozostałość. CO<sub>2</sub> oznaczano metodą pośrednią (rozpuszczanie węglanu Ca i Mg w 10% roztworze HCl).

## GEOLOGIA BADANYCH UTWORÓW POTASONOŚNYCH

Poniżej omówiono ogólne wykształcenie badanych utworów potasonośnych cechsztynu.

A complete acid decomposition allowed for the determination of trace elements also in the water insoluble residuum.

Some of the chemical composition determinations established for certain samples collected from the cores of the Góra, Damasławek, and Mogilno Salt Domes were made by the Hydrogeochemical Laboratory of the Department of Hydrogeology and Engineering Geology of the AGH University of Technology in Kraków.

The samples collected from cores were dry cleaned with compressed air and ground down to the fractions of ca. 10–50 mm. Next, 200 g of representative material was taken from each sample by the quartering method for further analysis. Each 200 g sample was ground in an agate mortar down to the fraction of 0.1–1 mm. After careful mixing of each of the ground samples, 10 g of material was collected from each sample to determine the contents of chlorides and bromides, as well as those of main and trace elements.

Chlorides and bromides were determined from a water solution (ca. 5 g samples per 100 ml of distilled H<sub>2</sub>O). Chlorides were determined by the argentometric method, according to Polish Standard PN-ISO 9297:1994.

Bromine and trace elements were determined by the mass spectrometry method, according to Polish Standards PN-EN ISO 17924-1:2007 and PN-EN ISO 17924-2:2006, with the use of a Perkin-Elmer ICP MS “Elan 6100” spectrometer, with inductively coupled plasma.

Main elements: Na, Al, Ca, Fe, Mg, S, and K, were determined by the optical spectrometry methods, according to Polish Standard PN-EN ISO 15011885:2009, with the use of a Perkin-Elmer ICP OES “Optima 7300 DV” spectrometer.

The samples used for the determination of other elements, except for Br and Cl, were decomposed by the microwave mineralisation method; the weight of ca. 0.3 g was dissolved in the mixture of nitric and hydrochloric acids in the proportion of 1:3, in the temperature of 230°C and at the pressure of 35 atm. SiO<sub>2</sub> was determined by weight as the acid insoluble residue. CO<sub>2</sub> was determined by an indirect method (by dissolving Ca and Mg carbonate in a 10% HCl solution).

## GEOLOGY OF THE TESTED POTASH-BEARING FORMATIONS

We will discuss below the formation of the tested Zechstein potash-bearing beds.

### Potash-bearing series of cyclothem PZ2

The potash-bearing series of cyclothem PZ2 is composed of the so-called Na<sub>2</sub>+K<sub>2</sub> Transitional Beds and the Older Potash unit (K<sub>2</sub>). Usually, the floor of the potash-bearing series matches the ceiling of the Older Halite (Na<sub>2</sub>) unit, while the ceiling of the former matches either the floor of the Screening Older Halite (Na<sub>2</sub>r), or directly the floor of the Screening Anhydrite unit (A<sub>2</sub>r). Researchers found the following mine-



## Seria potasonośna cyklotemu PZ2

Na serię potasonośną cyklotemu PZ2 składają się tzw. utwory przejściowe Na<sub>2</sub>+K<sub>2</sub> i starsza sól potasowa (K<sub>2</sub>). Zwykle spąg serii potasonośnej stanowi strop wydzielenia starszej soli kamiennej (Na<sub>2</sub>), zaś strop – spąg utworów starszej soli kamiennej kryjącej (Na<sub>2</sub>r) lub bezpośrednio spąg wydzielenia anhydrytu kryjącego (A<sub>2</sub>r). W warstwach przejściowych Na<sub>2</sub>+K<sub>2</sub> stwierdzono obecność następujących minerałów: halit, anhydryt i sylwin (jako minerały pierwotne) oraz kizeryt, polihalit i kwarc (jako minerały wtórne). Z kolei w utworach starszej soli potasowej (K<sub>2</sub>) oznaczono (Czapowski i in., 2020b) halit, anhydryt, karnalit, sylwin, langbeint, i loweit (jako minerały pierwotne) oraz bledyt, kizeryt, kainit, kronstedyt, kwarc, leonit i polihalit (jako minerały wtórne). Rzadko napotkano takie minerały jak nantokit, starkeit, spodumen, magnezyt i pikromeryt (op. cit.).

Wyniki oznaczeń zawartości pierwiastków śladowych, wykorzystane do analizy statystycznej, odnoszą się do 91 próbek soli, pobranych z czterech wysadów solnych: Damasławek, Góra, Kłodawa i Mogilno (ryc. 1).

W wysadzie solnym Kłodawa miąższość tych utworów jest szacowana na 11-17 m, w tym utwory przejściowe to ok. 5 m (Burliga i in., 1995). Warstwy przejściowe Na<sub>2</sub>+K<sub>2</sub>, płynnie przechodzące w spąg w utwory starszej soli kamiennej, buduje sól kamienna grubokrystaliczna, białoszara z domieszkami ilu, laminowana anhydrytem, która w stropowej części zawiera skupienia i mniej lub bardziej regularne przerosty soli K-Mg (tzw. rytmy halitowo-karnalitowe), zdominowane przez kizeryt, polihalit, karnalit i sylwin (Misiek, 1997). Z kolei serie starszej soli potasowej (K<sub>2</sub>) tworzy sól potasowa twarda, anhydrytowo-sytlwinitowo-polihalitowa, która w dolnej partii zawiera domieszki karnalitu i kizerytu (op. cit.) oraz langbeinitu, bischofitu i kainitu (Czapowski i in., 2020b).

Pobrane przez J. Wachowiaka (1998) trzy próbki skał pochodzą z przekopów GPT 1a i 1b w przecince III na poziomie eksploatacyjnym 750 m Kopalni Soli Kłodawa S.A. Kolejne 70 próbek pobrano z 3 profili (Tomassi-Morawiec i in. 2008):

- a) profilu Z-2/1 zlokalizowanym na poziomie 600 m w przekopie 62 o przebiegu SW-NE (29 próbek),
- b) profilu Z-2/2 usytuowanym na poziomie 750 m w przekopie GPT IIA (19 próbek),
- c) profilu Z-2/3 zlokalizowanym na poziomie 750 m w przekopie GPT IIB (22 próbki).

Serię potasonośną cyklotemu PZ2 w wysadzie solnym Damasławek tworzą powtarzające się wielokrotnie utwory starszej soli potasowej (K<sub>2</sub>) o miąższości szacowanej na ok. 1,5 metra (Czapowski i in., 2020b). Utwory te buduje głównie tzw. sól twarda, różnokrystaliczna, biało-szaro-czerwona, kizerytowa, z nieznaczną domieszką kainitu oraz anhydrytu i substancji ilastej w postaci lamin i wrostków. Z tych utwo-

rals in the Na<sub>2</sub>+K<sub>2</sub> Transitional Beds: halite, anhydrite, and sylvite (as primary minerals) and kiezzerite, polyhalite, and quartz (as secondary minerals). As to deposits of the Older Potash unit (K<sub>2</sub>), the following were determined (Czapowski et al. 2020b): halite, anhydrite, carnalite, sylvite, langbeinite, and loveite (as primary minerals) and bledite, kiezzerite, kainite, cronstedite, quartz, leonite, and polyhalite (as secondary minerals). Such minerals as nantokit, starkeyite, spodumene, magnesite, and picromerite were rather rare (op. cit.).

The results of the trace element content determinations, used for statistical analysis purposes, were based on 91 salt samples collected from four salt domes: Damasławek, Góra, Kłodawa, and Mogilno (Fig. 1).

In the Kłodawa Salt Dome, the thickness of the relevant formations was estimated at 11–17 m, including that of the transitional formations at ca. 5 m (Burliga et al. 1995). The Na<sub>2</sub>+K<sub>2</sub> Transitional Beds, smoothly changing into the Older Halite formation at the bed bottom, were made up of coarse-crystalline, white-greyish (with silt admixtures), anhydrite laminated rock salt that contained concentrations and more or less regular K-Mg salt overgrowths in the top sections (or the so-called halite-carnalite rhythms), dominated by kiezzerite, polyhalite, carnalite, and sylvite (Misiek 1997). The Older Potash (K<sub>2</sub>) series was formed by hard potassium anhydrite-sylvite-polyhalite rock, with the admixtures of carnalite and kieserite in the lower bed sections (op. cit.), as well as those of langbeinite, bischofite and kainite (Czapowski et al. 2020b).

Three rock samples collected by J. Wachowiak (1998) originated from Excavations GPT 1a and 1b in Cross-cut III at the Mining Level 750 m in the Kłodawa Salt Mine. The remaining 70 samples were collected from 3 profiles (Tomassi-Morawiec et al. 2008):

- a) Profile Z-2/1, Level 600 m, Excavation 62, SW-NE (29 samples),
- b) Profile Z-2/2, Level 750 m, Excavation GPT IIA (19 samples),
- c) Profile Z-2/3, Level 750 m, Excavation GPT IIB (22 samples).

The potash-bearing series of cyclothem PZ2 was formed in the Damasławek Salt Dome by multiple repetitions of Older Potash (K<sub>2</sub>) unit with the thickness estimated at ca. 1.5 m (Czapowski et al. 2020b). Those deposits were made up mainly of the so-called hard salt, with diverse crystals, white-grey-reddish salt or kiezzerite salt, with some admixtures of kainite, anhydrite, and silt substance, in the forms of laminae and in-growths. Seven in Damasławek A and three in Damasławek B borehole cores were collected.

The potash-bearing series of the Góra Salt Dome was made up multiplied layers of Older Potash unit (K<sub>2</sub>), composed of thin layers and laminae, strongly transformed and tectonically reduced. Their thicknesses were changing from



rów pozyskano 7 próbek rdzenia z otworu wiertniczego Damasławek A i 3 próby z otworu wiertniczego Damasławek B.

W wysadzie solnym Góra omawianą serią potasonośną budują powtarzające się wielokrotnie w kompleksie starszej soli kamiennej (Na<sub>2</sub>) utwory starszej soli potasowej (K<sub>2</sub>), złożone z cienkich warstw i lamin, silnie zmienione i zredukowane tektonicznie. Ich miąższość zmienia się od kilku do kilkudziesięciu centymetrów. Struktura soli K-Mg jest średnio- i grubokrystaliczna, zaś tekstura słabo czytelna warstwowa. Utwory te reprezentuje jedna próbka rdzenia z otworu G-41 (Czapowski i in., 2020b).

Utwory starszej soli potasowej (K<sub>2</sub>) w wysadzie solnym Mogilno, stwierdzone otworami wiertniczymi, mają grubość kilkudziesięciu cm (Wachowiak, 2016). Tworzą je sole o barwie białoszaro-czerwonej i strukturze średnio- i grubokrystalicznej oraz teksturze warstwowej, utworzonej przez naprzemianległe warstwy kizerytowo-halitowe (białoszare) i sylwinowo-halitowe (czerwone). Z utworów tych pobrano 4 próbki rdzenia z otworu wiertniczego M-33 (Czapowski i in., 2020b) i 3 próbki rdzenia z otworu wiertniczego M-35 (Wachowiak, 2016).

### Seria potasonośna cyklotemu PZ3

Na serię potasonośną cyklotemu PZ2 składają się tzw. utwory przejściowe Na<sub>3</sub>+K<sub>3</sub> i młodsza sól potasowa (K<sub>3</sub>). Zwykle spąg tej serii stanowi strop wydzielenia młodszej soli kamiennej (Na<sub>3</sub>), zaś strop – ewentualnie spąg utworów młodszej soli kamiennej górnej (Na<sub>3</sub>b – przypadek wysadu solnego Kłodawa) lub bezpośrednio spąg wydzielenia zuba brunatnego (Na<sub>3</sub>t).

Badania składu mineralnego (Czapowski i in., 2020b) pozwoliły oznaczyć w warstwach przejściowych Na<sub>3</sub>+K<sub>3</sub> następujące minerały: halit, anhydryt, kainit, karnalit i biszofit (minerały pierwotne) oraz kizeryt (minerał wtórny), rzadko napotkano magnezyt i kalcyt. Z kolei w skałach młodszej soli potasowej (K<sub>3</sub>) stwierdzono (op. cit.) obecność halitu, anhydrytu, karnalitu, sylwinu, biszofitu, langbeintu i loweitu (minerały pierwotne) oraz bledytu, kainitu, kizerytu, polihalitu i kwarcu (minerały wtórne). Sporadycznie napotkano takie minerały jak: berlinit, heksahydryt, heksahydroborit, leonit, nantokit, spodumen, treworit i starkeyit.

Analizie statystycznej poddano wyniki oznaczeń zawartości pierwiastków śladowych w 207 próbkach soli, pobranych z czterech wysadów solnych: Damasławek, Góra, Kłodawa i Mogilno (ryc. 1).

W wysadzie solnym Kłodawa tzw. warstwy przejściowe Na<sub>3</sub>+K<sub>3</sub> występują w ciągłości z utworami młodszej soli kamiennej dolnej (Na<sub>3</sub>a) i mają miąższość ok. 14,7 m. Buduje je sól kamienna drobnokrystaliczna, szara, laminowana rytmicznie warstewkami karnalitowa kizerytowego, z kilkoma warstwami karnalitowca kizerytowego, białego z różowymi smugami, grubości pozornej 0,3-5,3 m. Z kolei utwory

several centimetres to several dozens of centimetres. The structure of K-Mg salt was medium- and coarse-crystalline and its texture was unclearly bedded. Those formations were represented by one core sample collected from borehole G-41 (Czapowski et al. 2020b).

The rocks of the Older Potash (K<sub>2</sub>) of the Mogilno Salt Dome, identified by borehole drilling, had the thickness of several dozens of centimetres (Wachowiak 2016). The deposits were composed of white-grey-reddish salt, with the medium- and coarse-crystalline structure and the bedded texture, formed by alternating layers of kieserite-halite (white-greyish) and sylvite-halite (red) salts. As to those rocks, four borehole M-33 core samples (Czapowski et al. 2020b) and three from borehole M-35 core (Wachowiak, 2016) were collected.

### Potash-bearing series of cyclothem PZ3

The potash-bearing series of cyclothem PZ2 is composed of the so-called Na<sub>3</sub>+K<sub>3</sub> Transitional Beds and the Younger Potash unit (K<sub>3</sub>). Usually, the bottom of that series matches the top of the Younger Halite (Na<sub>3</sub>) unit, while the top of the former either matches possibly the bottom of the Upper Younger Halite unit (Na<sub>3</sub>b in the case of the Kłodawa Salt Dome), or directly the bottom of the Brown Zuber unit (Na<sub>3</sub>t).

The mineral composition test (Czapowski et al. 2020b) allowed for the determination of the following minerals in the Na<sub>3</sub>+K<sub>3</sub> Transitional Beds: halite, anhydrite, kainite, carnalite, and bischofite (as primary minerals), and kieserite (as a secondary mineral). Magnesite and calcite were rather rare. In the Younger Potash (K<sub>3</sub>) rocks, the following were found (op. cit.); halite, anhydrite, carnalite, sylvite, bischofite, langbeinite, and loveite (as primary minerals), and bledite, kainite, kieserite, polyhalites, and quartz (as secondary minerals). The following minerals occurred sporadically: berlinite, hexahydrite, hexahydroborite, leonite, nantokite, spodumene, trevorite, and starkeyite.

Statistical analysis was applied to all the results of the determinations concerning the trace element contents found in 207 salt samples, collected from the following four Salt Domes: Damasławek, Góra, Kłodawa, and Mogilno (Fig. 1).

As to the Kłodawa Salt Dome, the so-called Na<sub>3</sub>+K<sub>3</sub> Transitional Beds occurred jointly with the Lower Younger Halite unit (Na<sub>3</sub>a), with the thickness of ca. 14.7 m. The layers were made up of fine-crystalline, grey salt, rhythmically laminated by carnalite-kieserite laminae, with several layers of kieserite-carnalite, being white with pink smudges and the apparent thickness of 0.3–5.3 m. The Younger Potash (K<sub>3</sub>) rocks were 20–120 m thick (Misiek, 1997) and composed of alternating medium- and fine-crystalline rock salt, interlaid with silt substance and anhydrite, with carnalite-kieserite laminae and nests, as well as carnalite-kieserite beds containing the nests of coarse-crystalline, crystalline, and evenly-crystalline halite (Czapowski et al. 2020b). The 15–45 m carnalite

młodszej soli potasowej (K3) ma grubość 20-120 m (Misiak, 1997) i tworzy je przemienne sól kamienna średnio- i drobnokrystaliczna, warstwowana substancją ilastą i anhydrytem, z laminami i gniazdami karnalitu z kizerytem oraz warstwy karnalitowca kizerytowego z gniazdami grubokrystalicznego i kryształowego halitu równokrystalicznego (Czapowski i in., 2020b). Zbudowana z karnalitowca seria solna grubości 15-45 m, wyróżniana jako tzw. pokład przemysłowy, występuje w środkowej części wydzielenia (Misiak, 1997).

Opisane utwory reprezentuje 193 próbek, pobranych z wyrobisk Kopalni Soli Kłodawa S.A, w tym 6 próbek pobranych przez J. Wachowiaka (1998) oraz 187 próbek z dwu profili (Tomassi-Morawiec i in. 2008):

- a) profilu Z-3/1 zlokalizowanego na poziomie 750 m w przekopie GPT IIA o przebiegu generalnie SW-NE (109 próbek),
- b) profilu Z-3/2 usytuowanego na poziomie 600 m w przekopie NE V (33) o przebiegu generalnie SW-NE (78 próbek).

Serię potasonośną cyklotemu PZ3 w otworze wiertniczym Damasławek A (4 próbki) z wysadu solnego Damasławek budują powtarzające się dwukrotnie w profilu otworów utwory młodszej soli potasowej (K3), o miąższości rzeczywistej szacowanej na ok. 8,5-10,0 metra (Czapowski i in., 2020b). Poniżej i powyżej młodszej soli potasowej występuje wydzielenie starszej soli kamiennej (Na2) lub wydzielenie anhydrytu głównego (A3).

Omawiane utwory tworzy głównie szaroczerwona średniokrystaliczna sól kamienna z sylwinem, bezteksturalna i smugowana skupieniami anhydrytu i substancji ilastej. Pojedyncze gniazda i smużki kizerytu pokryte są białym nalotem epsomitu, w niewielkich ilościach pojawia się też kainit (op. cit.).

W wysadzie solnym Góra osady potasonośne cyklotemu PZ3 to głównie powtarzające się wielokrotnie w profilach wykonanych otworów wiertniczych utwory przypisane wydzieleniu młodszej soli potasowej (K3). Budują je warstwy soli kamiennej i soli K-Mg o miąższości pozornej od kilku centymetrów do ponad 5 m. Opróbowane (4 próbki) odcinki rdzenia z otworu wiertniczego G-41 reprezentują tzw. sól twardą kizerytowo-langbeinitową, zbudowaną z naprzemianległych warstewek szarej soli K-Mg i szaro-pomarańczowej soli kamiennej. Sól ta jest średniokrystaliczna, rzadziej drobnokrystaliczna, zawiera rozproszony anhydryt, halit, kizeryt, sylwin, langbeinit i bituminy (op. cit.).

Serię potasonośną cyklotemu PZ3 w otworze wiertniczym M-33 (4 próbki) z wysadu solnego Mogilno budują powtarzające się czterokrotnie w profilu wydzielenia starszej soli kamiennej (Na2) utwory młodszej soli potasowej (K3) o miąższości pozornej szacowanej na ponad 16 m (Czapowski i in., 2020b). Z kolei w profilu otworu M-35 (2 próbki) odnotowano 5 powtórzeń tzw. warstw przejściowych Na3+K3

salt series, distinguished as the so-called mining bed, occurred in the central section of the unit (Misiak 1997).

The formations described above were represented by 193 samples, collected from the workings of the Kłodawa Salt Mine, including 6 samples collected by J. Wachowiak (1998) and 187 samples originating from the following two profiles (Tomassi-Morawiec et al. 2008):

- a) Profile Z-3/1, Level 750 m, Excavation GPT IIA, generally SW-NE (109 samples),
- b) Profile Z-3/2, Level 600 m, Excavation NE V (33), generally SW-NE (78 samples).

The potash-bearing series of cyclothem PZ3 of borehole Damasławek A (4 samples) in the Damasławek Salt Dome was made up of the twice repeating profiles of Younger Potash (K3) unit, with the actual thickness estimated at ca. 8.5–10.0 m (Czapowski et al. 2020b). Below and above the Younger Potash, there was either a unit of the Older Halite (Na2) or of Main Anhydrite (A3).

The formations under discussion were made up mainly of grey-reddish medium-crystalline rock salt with sylvite, non-textured and smudged, with some concentrations of anhydrite and silt substance. Separated kieserite nests and smudges are covered with white epsomite deposit, with small quantities of kainite (op. cit.).

In the Góra Salt Dome, the potash-bearing sediments of cyclothem PZ3 mainly consist in the multiple repeating formations, assigned to the Younger Potash (K3) unit, visible in borehole profiles. They were made up of rock salt and K-Mg salt beds, with the apparent thickness ranging from several centimetres to more than 5 m. The sampled sections of the core (4 samples), collected from borehole G-41, represented the so-called hard kieserite-langbeinite salt, made up of alternating laminae of grey K-Mg salt and grey-orange rock salt. Those salts were medium-crystalline, or rarely fine-crystalline, with dispersed anhydrite, halite, kieserite, sylvite, langbeinite, and bitumen (op. cit.).

The potash-bearing series of cyclothem PZ3, found in borehole M-33 (4 samples) of the Mogilno Salt Dome were made up of the Younger Potash (K3) unit, repeating four times within the Older Halite (Na2) formation, with the apparent thickness estimated at more than 16 m (Czapowski et al. 2020b). In the profile of borehole M-35 (2 samples), 5 repetitions of the so-called Na3+K3 Transitional Beds, several metres thick, and one bed of the Younger Potash (K3), ca. 3 m thick (Wachowiak, 2016) were recorded.

The sampled sections of the core represented the type of the so-called hard kieserite salt, composed of light-orange to dark-orange to brown medium-crystalline rock salt, with small concentrations and large fragments of anhydrite and silt substance. The salt texture was well ordered, bedded, and made up of alternating white-greyish kieserite, dark grey ha-

kilkumetrowej grubości oraz jedno przewarstwienie młodszej soli potasowej (K3) miąższości ok. 3 m (Wachowiak, 2016).

Opróbowane odcinki rdzenia reprezentują typ tzw. soli twardej kizerytowej, złożonej z soli kamiennej jasno- do ciemnopomarańczowej i brązowej, średniokrystalicznej, z drobnymi skupieniami i większymi fragmentami anhydrytu oraz substancją ilastą. Tekstura soli jest uporządkowana, warstwowa, tworzą ją naprzemianległe biało-szare warstewki kizerytowe, ciemnoszare halitowe i szaropomarańczowe - halitowo-sylwinowe (Czapowski i in., 2020b).

### Siarczanowe sole K-Mg

Badane siarczanowe wczesnodiagenetyczne sole K-Mg (polihality) na Pomorzu Gdańskim (okolice Zatoki Puckiej – ryc. 1) tworzą skupienia w formie od jednej do 3 warstw grubości 1,9-73 m (Czapowski i in., 2008; Peryt i in., 1998, 2005). Występują one w górnej części profilu wydzielenia anhydrytu dolnego (A1d), którego miąższość na tym obszarze zmienia się od 19,5 m do 173,6 m (Peryt, 1991, 1994).

Opróbowane polihality w udostępnionym rdzeniu z otworu wiertniczego Mioszyno M-9, tworzą dwa przewarstwienia anhydrytowo-polihalitowe na głębokościach 767,7-782,8 m i 809,0-811,4 m, wykształcone jako szary anhydryt mikro- do drobnokrystalicznego, z żółto-oliwkowymi skupieniami, smugami i przerostami polihalitu i węglanów, lekko bitumiczny. Przewarstwienia te występują w obrębie utworów anhydrytu dolnego (A1d).

Skład mineralny polihalitów (2 próbki) obejmuje anhydryt i magnezyt (minerały pierwotne) oraz polihalit i gips (minerały wtórne; Czapowski i in., 2020b).

## GEOCHEMIA BADANYCH UTWORÓW POTASONOŚNYCH

Szczegółowe dane odnośnie zawartości wybranych pierwiastków śladowych w seriach potasonośnych cyklotemów PZ1, PZ2 i PZ3 cechsztynu w Polsce zawierają opracowania archiwalne (Czapowski i in., 2020b; Tomassi i in., 2008; Wachowiak, 1998) oraz publikacja J. Wachowiaka (2016).

Przedstawienie oceny zawartości tych pierwiastków w celu określenia przydatności badanych utworów do pozyskiwania pożądanego pierwiastków wymagało wykorzystania wszystkich dostępnych i wiarygodnych wyników, pomimo zastrzeżeń wynikających z zastosowanych różnych technik analitycznych oraz czasem ograniczenia oznaczeń do wybranych pierwiastków (np. Wachowiak, 1998, 2015). W ocenie uwzględniono wyniki 307 próbek skalnych, dla których obliczono główne parametry statystyczne: wartości minimalną i maksymalną, średnią arytmetyczną i geometryczną oraz medianę.

lite, and grey-orange halite-sylvite laminae (Czapowski et al. 2020b).

### K-Mg sulphate salts

The early-diagenetic K-Mg sulphate salts (polyhalites) of the Pomorze Gdańskie Region (the Puck Bay area (Fig. 1) created concentrations in the form of 1–3 layers, 1.9–73 m thick (Czapowski et al. 2008; Peryt et al. 1998, 2005). They occurred in the upper section of the Lower Anhydrite unit profile (A1d), whose thickness was changing in that area from 19.5 to 173.6 m (Peryt 1991, 1994).

The sampled polyhalites of the borehole Mioszyno M-9 core, created two anhydrite-polyhalite interlayers at the depths of 767.7–782.8 m and 809.0–811.4 m, in the form of grey micro- to fine-crystalline anhydrite, with yellow-olive concentrations and smudges, as well as overgrowths of polyhalites and slightly bituminous carbonates. Interlayers occurred within the Lower Anhydrite unit (A1d).

The mineral composition of polyhalites (2 samples) contained anhydrite and magnesite (as primary minerals) and polyhalites and gypsum (as secondary minerals) (Czapowski et al. 2020b).

## GEOCHEMISTRY OF THE EXAMINED POTASH-BEARING FORMATIONS

Detailed parameters concerning the quantities of the selected trace elements, contained in the potash-bearing series of the Polish Zechstein cyclothem PZ1, PZ2, and PZ3, can be found in archival studies (Czapowski et al. 2020b; Tomassi et al. 2008; Wachowiak 1998) and in the paper by J. Wachowiak (2016).

The appraisals of the quantities of the selected trace elements, intended to determine the usefulness of the studied formations for mining purposes, required to analyse all the available and credible research results, despite some reservations concerning the use of various analytical techniques or the research limitation to only selected elements (e.g. Wachowiak 1998, 2015). In our appraisal, we considered the results of 307 rock sample analyses for which we calculated main statistical parameters: minimum and maximum, arithmetic and geometric mean, and median values.

### Potash-bearing formations of cyclothem PZ2

The statistical parameters of the selected trace element contents, established in the analysed potash-bearing formations of cyclothem PZ2 (91 samples), can be found in Table 3.

## Utwory potasonośne cyklotemu PZ2

Parametry statystyczne zawartości wybranych pierwiastków śladowych w przebadanych utworach potasonośnych cyklotemu PZ2 (91 próbek) zamieszczono w tabeli 3.

**Tabela 3.** Parametry statystyczne zawartości pierwiastków śladowych w utworach potasonośnych cyklotemu PZ2 cechsztyń w Polsce  
**Table 3.** Statistic parameters of trace elements content in the potash-bearing deposits of Zechstein PZ2 cyclothem in Poland

Zawartość pierwiastków śladowych Trace elements content		Ag	As	Ba	Be	Br	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Ga	J	La	Li	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Se	Sn	Sr	Ti	Tl	U	V	Zn	Części nierozpuszczalne Insoluble residue
		mg/kg																														%
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	28	29	30	31	32	33
Parametry statystyczne Statistic parameters	n	89	86	86	86	92	89	86	89	89	86	89	89	86	87	86	86	88	86	89	89	86	89	86	89	84	86	86	86	86	89	70
	min.	<0,01	<1	<1	<0,3	25	<0,05	<0,05	<0,05	<1	<0,1	<0,01	13	<0,1	<50	<0,05	<0,5	<0,1	<0,5	<0,05	<0,01	<0,5	<0,01	<0,5	2	<1	<0,1	<0,05	<1	<1	0,01	
	maks. max.	<0,1	19	30	<0,3	2280	0,59	2,87	2,52	4	0,6	10	750	0,7	0,30	1,63	12,8	13	0,43	19,3	3,0	60,6	0,89	<2	<0,5	1925	90	0,5	0,28	3	131	33,93
	śr. arytm. arithm. mean	<0,1	4	5	<0,3	259	0,14	0,47	0,23	2	0,2	3	146	0,3	0,21	0,26	2,7	3	0,13	1,9	0,4	6,7	0,15	<2	<0,5	218	24	0,2	0,11	1	6	1,71
	śr. geom. geometr. mean	<0,1	3	3	<0,3	153	0,11	0,26	0,13	1,4	0,2	2	98	0,2	0,20	0,16	2,0	3	0,11	1,4	0,3	3,6	0,13	<2	<0,5	83	13	0,2	0,10	1	3	0,65
mediana median	<0,1	3	3	<0,3	119	0,09	0,25	0,09	2	0,2	2	100	0,2	0,22	0,13	1,8	2	0,11	1,3	0,3	4,0	0,13	<2	<0,5	76	15	0,2	0,09	1	3	0,78	

n - ilość przebadanych próbek/ number of analyzed samples

Zwartość takich pierwiastków jak: Ag, Be, Se i Sn jest na ich granicy oznaczalności (<0,01 do <2,0 mg/kg).

Bardzo niskie i niskie zawartości cechują następujące pierwiastki:

Cd: minimalna - <0,05 mg/kg, maksymalna – 0,59 mg/kg, średnia arytmetyczna – 0,14 mg/kg, średnia geometryczna – 0,11 mg/kg, mediana – 0,09 mg/kg,

Ce: minimalna - <0,05 mg/kg, maksymalna – 2,87 mg/kg, średnia arytmetyczna – 0,47 mg/kg, średnia geometryczna – 0,26 mg/kg, mediana – 0,25 mg/kg,

Co: minimalna - <0,05 mg/kg, maksymalna – 2,52 mg/kg, średnia arytmetyczna – 0,23 mg/kg, średnia geometryczna – 0,13 mg/kg, mediana – 0,09 mg/kg,

Cs: minimalna - <0,1 mg/kg, maksymalna – 0,6 mg/kg, średnia arytmetyczna – 0,2 mg/kg, średnia geometryczna – 0,2 mg/kg, mediana – 0,2 mg/kg,

Ga: minimalna - <0,1 mg/kg, maksymalna – 0,7 mg/kg, średnia arytmetyczna – 0,3 mg/kg, średnia geometryczna – 0,2 mg/kg, mediana – 0,2 mg/kg,

J: minimalna - <50 mg/kg, maksymalna – 0,30 mg/kg, średnia arytmetyczna – 0,21 mg/kg, średnia geometryczna – 0,20 mg/kg, mediana – 0,22 mg/kg,

La: minimalna - <0,05 mg/kg, maksymalna – 1,63 mg/kg, średnia arytmetyczna – 0,26 mg/kg, średnia geometryczna – 0,16 mg/kg, mediana – 0,13 mg/kg,

Mo: minimalna - <0,05 mg/kg, maksymalna – 0,43 mg/kg, średnia arytmetyczna – 0,13 mg/kg, średnia geometryczna – 0,11 mg/kg, mediana – 0,11 mg/kg,

Pb: minimalna - <0,1 mg/kg, maksymalna – 3,0 mg/kg, średnia arytmetyczna – 0,4 mg/kg, średnia geometryczna – 0,3 mg/kg, mediana – 0,3 mg/kg,

Sb: minimalna - <0,05 mg/kg, maksymalna – 0,89 mg/kg, średnia arytmetyczna – 0,15 mg/kg, średnia geometryczna – 0,13 mg/kg, mediana – 0,13 mg/kg,

The contents of such elements as Ag, Be, Se, and Sn were at the limit of quantification (<0.01 to <2.0 mg/kg).

The following elements displayed very low or low contents:  
Cd: min. <0.05 mg/kg, max. 0.59 mg/kg, arithmetic mean: 0.14 mg/kg, geometric mean: 0.11 mg/kg, median: 0.09 mg/kg,

Ce: min. <0.05 mg/kg, max. 2.87 mg/kg, arithmetic mean: 0.47 mg/kg, geometric mean: 0.26 mg/kg, median: 0.25 mg/kg,

Co: min. <0.05 mg/kg, max. 2.52 mg/kg, arithmetic mean: 0.23 mg/kg, geometric mean: 0.13 mg/kg, median: 0.09 mg/kg,

Cs: min. <0.1 mg/kg, max. 0.6 mg/kg, arithmetic mean: 0.2 mg/kg, geometric mean: 0.2 mg/kg, median: 0.2 mg/kg,

Ga: min. <0.1 mg/kg, max. 0.7 mg/kg, arithmetic mean: 0.3 mg/kg, geometric mean: 0.2 mg/kg, median: 0.2 mg/kg,

J: min. <50 mg/kg, max. 0.30 mg/kg, arithmetic mean: 0.21 mg/kg, geometric mean: 0.20 mg/kg, median: 0.22 mg/kg,

La: min. <0.05 mg/kg, max. 1.63 mg/kg, arithmetic mean: 0.26 mg/kg, geometric mean: 0.16 mg/kg, median: 0.13 mg/kg,

Mo: min. <0.05 mg/kg, max. 0.43 mg/kg, arithmetic mean: 0.13 mg/kg, geometric mean: 0.11 mg/kg, median: 0.11 mg/kg,

Pb: min. <0.1 mg/kg, max. 3.0 mg/kg, arithmetic mean: 0.4 mg/kg, geometric mean: 0.3 mg/kg, median: 0.3 mg/kg,

Sb: min. <0.05 mg/kg, max. 0.89 mg/kg, arithmetic mean: 0.15 mg/kg, geometric mean: 0.13 mg/kg, median: 0.13 mg/kg,

Tl: min. <0.1 mg/kg, max. 0.5 mg/kg, arithmetic mean: 0.2 mg/kg, geometric mean: 0.2 mg/kg, median: 0.2 mg/kg,

U: min. <0.05 mg/kg, max. 0.28 mg/kg, arithmetic mean: 0.11 mg/kg, geometric mean: 0.10 mg/kg, median: 0.09 mg/kg.

Higher values were displayed by the following 8 elements (Table 3):

As: min. <1.0 mg/kg, max. 19.0 mg/kg, arithmetic mean: 4.0 mg/kg, geometric mean: 3.0 mg/kg, median: 3.0 mg/kg,

Ba: min. <1.0 mg/kg, max. 30.0 mg/kg, arithmetic mean: 5.0 mg/kg, geometric mean: 3.0 mg/kg, median: 3.0 mg/kg,

Cr: min. <1.0 mg/kg, max. 4.0 mg/kg, arithmetic mean: 2.0 mg/kg, geometric mean: 1.4 mg/kg, median: 2.0 mg/kg,

Cu: min. <0.01 mg/kg, max. 10.0 mg/kg, arithmetic mean: 3.0 mg/kg, geometric mean: 2.0 mg/kg, median: 2.0 mg/kg,



Tl: minimalna - <0,1 mg/kg, maksymalna - 0,5 mg/kg, średnia arytmetyczna - 0,2 mg/kg, średnia geometryczna - 0,2 mg/kg, mediana - 0,2 mg/kg,

U: minimalna - <0,05 mg/kg, maksymalna - 0,28 mg/kg, średnia arytmetyczna - 0,11 mg/kg, średnia geometryczna - 0,10 mg/kg, mediana - 0,09 mg/kg.

Wyższy udział odnotowano w przypadku 8 pierwiastków (tab. 3):

As: minimalna - <1,0 mg/kg, maksymalna - 19,0 mg/kg, średnia arytmetyczna - 4,0 mg/kg, średnia geometryczna - 3,0 mg/kg, mediana - 3,0 mg/kg,

Ba: minimalna - <1,0 mg/kg, maksymalna - 30,0 mg/kg, średnia arytmetyczna - 5,0 mg/kg, średnia geometryczna - 3,0 mg/kg, mediana - 3,0 mg/kg,

Cr: minimalna - <1,0 mg/kg, maksymalna - 4,0 mg/kg, średnia arytmetyczna - 2,0 mg/kg, średnia geometryczna - 1,4 mg/kg, mediana - 2,0 mg/kg,

Cu: minimalna - <0,01 mg/kg, maksymalna - 10,0 mg/kg, średnia arytmetyczna - 3,0 mg/kg, średnia geometryczna - 2,0 mg/kg, mediana - 2,0 mg/kg,

Li: minimalna - <0,5 mg/kg, maksymalna - 12,8 mg/kg, średnia arytmetyczna - 2,7 mg/kg, średnia geometryczna - 2,0 mg/kg, mediana - 1,8 mg/kg,

Mn: minimalna - <1,0 mg/kg, maksymalna - 13,0 mg/kg, średnia arytmetyczna - 3,0 mg/kg, średnia geometryczna - 3,0 mg/kg, mediana - 2,0 mg/kg,

Ni: minimalna - <0,5 mg/kg, maksymalna - 19,3 mg/kg, średnia arytmetyczna - 1,9 mg/kg, średnia geometryczna - 1,4 mg/kg, mediana - 1,3 mg/kg,

V: minimalna - <1,0 mg/kg, maksymalna - 3,0 mg/kg, średnia arytmetyczna - 1,0 mg/kg, średnia geometryczna - 1,0 mg/kg, mediana - 1,0 mg/kg.

Wyższą zawartość odnotowano w przypadku trzech pierwiastków (tab. 3):

Rb: minimalna - <0,5 mg/kg, maksymalna - 60,6 mg/kg, średnia arytmetyczna - 6,7 mg/kg, średnia geometryczna - 3,6 mg/kg, mediana - 4,0 mg/kg,

Ti: minimalna - <1,0 mg/kg, maksymalna - 90,0 mg/kg, średnia arytmetyczna - 24,0 mg/kg, średnia geometryczna - 13,0 mg/kg, mediana - 15,0 mg/kg,

Zn: minimalna - <1,0 mg/kg, maksymalna - 131,0 mg/kg, średnia arytmetyczna - 6,0 mg/kg, średnia geometryczna - 3,0 mg/kg, mediana - 3,0 mg/kg.

Największy udział cechuje trzy pierwiastki (tab. 3):

Br: minimalna - 24,0 mg/kg, maksymalna - 2280,0 mg/kg, średnia arytmetyczna - 259,0 mg/kg, średnia geometryczna - 153,0 mg/kg, mediana - 119,0 mg/kg,

Fe: minimalna - 13,0 mg/kg, maksymalna - 750,0 mg/kg, średnia arytmetyczna - 146,0 mg/kg, średnia geometryczna - 98,0 mg/kg, mediana - 100,0 mg/kg,

Sr: minimalna - 2,0 mg/kg, maksymalna - 1925,0 mg/kg, średnia arytmetyczna - 218,0 mg/kg, średnia geometryczna - 83,0 mg/kg, mediana - 76,0 mg/kg.

Li: min. <0.5 mg/kg, max. 12.8 mg/kg, arithmetic mean: 2.7 mg/kg, geometric mean: 2.0 mg/kg, median: 1.8 mg/kg,

Mn: min. <1.0 mg/kg, max. 13.0 mg/kg, arithmetic mean: 3.0 mg/kg, geometric mean: 3.0 mg/kg, median: 2.0 mg/kg,

Ni: min. <0.5 mg/kg, max. 19.3 mg/kg, arithmetic mean: 1.9 mg/kg, geometric mean: 1.4 mg/kg, median: 1.3 mg/kg,

V: min. <1.0 mg/kg, max. 3.0 mg/kg, arithmetic mean: 1.0 mg/kg, geometric mean: 1.0 mg/kg, median: 1.0 mg/kg.

Higher values were also found in the following three elements (Table 3):

Rb: min. <0.5 mg/kg, max. 60.6 mg/kg, arithmetic mean: 6.7 mg/kg, geometric mean: 3.6 mg/kg, median: 4.0 mg/kg,

Ti: min. <1.0 mg/kg, max. 90.0 mg/kg, arithmetic mean: 24.0 mg/kg, geometric mean: 13.0 mg/kg, median: 15.0 mg/kg,

Zn: min. <1.0 mg/kg, max. 131.0 mg/kg, arithmetic mean: 6.0 mg/kg, geometric mean: 3.0 mg/kg, median: 3.0 mg/kg.

Higher values were displayed by the following three elements (Table 3):

Br: min. 24.0 mg/kg, max. 2280.0 mg/kg, arithmetic mean: 259.0 mg/kg, geometric mean: 153.0 mg/kg, median: 119.0 mg/kg,

Fe: min. 13.0 mg/kg, max. 750.0 mg/kg, arithmetic mean: 146.0 mg/kg, geometric mean: 98.0 mg/kg, median: 100.0 mg/kg,

Sr: min. 2.0 mg/kg, max. 1925.0 mg/kg, arithmetic mean: 218.0 mg/kg, geometric mean: 83.0 mg/kg, median: 76.0 mg/kg.

The proportions of water insoluble parts were as follows: min. 0.1%, max. 33.93%, arithmetic mean: 1.71%, geometric mean: 0.65%, median: 0.78%.

In summary, we should mention that the results of studies on the selected trace element contents in the potash-bearing formations of cyclothem PZ2 of four salt domes (Kłodawa, Góra, Mogilno, and Damasławek) were dominated by abundant analytical materials from Kłodawa (73 samples), while the results concerning the remaining salt domes were based on 4 to 10 samples (Table 2).

When appraising the usability of the discussed potash-bearing formations for industrial mining of the selected trace elements, the following parameters were important: arithmetic and geometric means and the median values of the given element.

As we mentioned above, it was not possible to determine the quantities of Ag, Be, Se, or Sn, as their quantities were probably below the quantification levels of the analytical methods applied (<2.0 mg/kg). The contents of Cd, Ce, Co, Cs, Ga, J, La, Mo, Pb, Sb, Tl, and U did not exceed 1.0 mg/kg each, while those of As, Ba, Cr, Cu, Li, Mn, Ni, and V ranged from 1.0 to 5.0 mg/kg. A bit higher quantities were displayed by Rb, Ti, and Zn: 6.0–24.0 mg/kg in the studied formations, with the highest ones displayed by Br, Fe, and Sr: up to 259 mg/kg in the case of Br. We should emphasise here

**Tabela 4.** Parametry statystyczne zawartości pierwiastków śladowych w utworach potasonośnych cyklotemu PZ3 cechsztyń w Polsce  
**Table 4.** Statistic parameters of trace elements content in the potash-bearing deposits of Zechstein PZ3 cyclothem in Poland

Zawartość pierwiastków śladowych Trace elements content		Ag	As	Ba	Be	Br	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Ga	J	La	Li	Mn	Mo	Ni	Pb	Rb	Sb	Se	Sn	Sr	Ti	Tl	U	V	Zn		
		ng/kg																															
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	28	29	30	31	32		
Parametry statystyczne Statistic parameters	n	195	195	195	195	189	201	195	200	195	195	195	200	195	190	195	195	200	195	200	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	200		
	min.	<0,1	<1	<1	<0,3	<50	<0,05	<0,05	<0,05	<1	<0,1	<1	6,06	<0,1	<50,0	<0,05	<0,5	<1	<0,05	<0,5	<0,1	<0,5	<0,05	<2	<0,5	1,00	<1	<0,1	<0,05	<1	<1		
	maks. max	0,10	10,00	28,69	<0,3	1850,00	0,60	2,23	2,50	3,77	1,40	6,50	8455,00	0,60	<50,0	1,11	16,80	180,00	5,27	10,80	1,50	98,60	0,42	<2	<0,5	972,50	531,00	<0,1	0,19	5,00	7,00		
	śr. arytym. arithm. mean	0,10	3,91	4,71	<0,3	308,48	0,23	0,38	0,28	1,76	0,45	3,98	230,55	0,26	<50,0	0,25	3,13	13,57	0,15	1,50	0,20	10,93	0,13	<2	<0,5	102,03	24,66	<0,1	0,10	2,02	2,12		
	śr. geom. geometr. mean	0,10	3,12	2,94	<0,3	195,52	0,16	0,20	0,15	1,65	0,31	3,74	52,15	0,22	<50,0	0,16	2,66	5,88	0,10	1,14	0,18	4,60	0,11	<2	<0,5	40,34	10,66	<0,1	0,09	1,81	1,82		
mediana median	0,10	3,00	2,20	<0,3	151,00	0,12	0,16	0,10	1,59	0,25	3,88	31,40	0,20	<50,0	0,14	2,90	3,64	0,09	1,00	0,20	4,20	0,11	<2	<0,5	40,43	7,80	<0,1	0,09	1,62	1,58			

n - ilość przebadanych próbek/ number of analyzed samples

Udział części nierozpuszczalnych w wodzie wynosi odpowiednio: minimalny - 0,1%, maksymalny – 33,93%, średnia arytmetyczna – 1,71%, średnia geometryczna – 0,65%, mediana – 0,78%.

Podsumowując wyniki badań zawartości wybranych pierwiastków śladowych w utworach potasonośnych cyklotemu PZ2 w czterech wysadach solnych (Kłodawa, Góra, Mogilno i Damasławek) należy zaznaczyć, że dominował tu obfity materiał wynikowy z wysadu Kłodawa (73 próbki) zaś rezultaty badań dla pozostałych wysadów odnoszą się do zaledwie 4 do 10 próbek (tab. 2).

Przy ocenie przydatności omawianych utworów potasonośnych do przemysłowego pozyskiwania wybranych pierwiastków śladowych istotne są takie parametry jak średnia (arytmetyczna i geometryczna) oraz mediana zawartości danego pierwiastka.

Jak wykazano udziału Ag, Be, Se i Sn nie sposób określić bo jest on zapewne niższy niż granica oznaczalności użytych metod analitycznych (<2,0 mg/kg). Zawartość Cd, Ce, Co, Cs, Ga, J, La, Mo, Pb, Sb, Tl i U nie przekracza 1,0 mg/kg, udział As, Ba, Cr, Cu, Li, Mn, Ni i V mieści się w granicach 1,0-5,0 mg/kg. Nieco więcej badane utwory zawierają Rb, Ti i Zn – 6,0-24,0 mg/kg, zaś najwięcej Br, Fe i Sr – do 259 mg/kg w przypadku Br. Należy tu podkreślić, że wartość mediany zawartości wymienionych pierwiastków jest zwykle niższa w przypadku większej ilości próbek. Zwiększony udział Rb, Ti, Fe i Zn można wiązać z obecnością rozproszonej substancji ilastej, zaś Sr – z domieszką anhydrytu. Wysoka zawartość bromu jest naturalna w solach K-Mg.

Przedstawione wielkości parametrów wskazują, że przemysłowe pozyskiwanie z przebadanych utworów potasonośnych cyklotemu PZ2 szeregu pożądaných pierwiastków jak np. As, B, Ce, Co, Cs, Ga, J, La, Li czy Tl, przy ich przeciętnej zawartości w skale zwykle w granicach 1,0-4,0 mg/kg, jest całkowicie nieopłacalne.

### Utwory potasonośne cyklotemu PZ3

Parametry statystyczne zawartości wybranych pierwiastków śladowych w przebadanych utworach potasonośnych cyklotemu PZ3 (207 próbek) zamieszczono w tabeli 4.

that the median values of the specified elements were always lower when a higher number of samples was available. The increased quantities of Rb, Ti, Fe, and Zn could be associated with the presence of dispersed silt substance, while those of Sr with the admixture of anhydrite. High bromine contents are natural for the K-Mg salts.

The values presented above indicated that the industrial extraction of a number of such sought-after elements as e.g. As, B, Ce, Co, Cs, Ga, J, La, Li, or Tl from the studied potash-bearing formations of cyclothem PZ2 would be completely unprofitable, owing to the low average contents thereof in rocks, ranging from 1.0 to 4.0 mg/kg.

### Potash-bearing formations of cyclothem PZ3

The statistical parameters of the selected trace element contents, established in the analysed potash-bearing formations of cyclothem PZ3 (207 samples), can be found in Table 4.

The contents of such elements as Be, J, Se, Sn, and Tl were at the limit of quantification (<0.3 to <50.0 mg/kg).

The following elements displayed very low or low contents:

Ag: min. <0.1 mg/kg, max. 0.1 mg/kg, arithmetic mean: 0.1 mg/kg, geometric mean: 0.1 mg/kg, median: 0.1 mg/kg,  
 Cd: min. <0.05 mg/kg, max. 0.60 mg/kg, arithmetic mean: 0.23 mg/kg, geometric mean: 0.16 mg/kg, median: 0.12 mg/kg,  
 Ce: min. <0.05 mg/kg, max. 2.23 mg/kg, arithmetic mean: 0.38 mg/kg, geometric mean: 0.2 mg/kg, median: 0.16 mg/kg,  
 Co: min. <0.05 mg/kg, max. 2.5 mg/kg, arithmetic mean: 0.28 mg/kg, geometric mean: 0.15 mg/kg, median: 0.1 mg/kg,  
 Cs: min. <0.1 mg/kg, max. 1.4 mg/kg, arithmetic mean: 0.45 mg/kg, geometric mean: 0.31 mg/kg, median: 0.25 mg/kg,  
 Ga: min. <0.1 mg/kg, max. 0.6 mg/kg, arithmetic mean: 0.26 mg/kg, geometric mean: 0.22 mg/kg, median: 0.2 mg/kg,  
 La: min. <0.05 mg/kg, max. 1.11 mg/kg, arithmetic mean: 0.25 mg/kg, geometric mean: 0.16 mg/kg, median: 0.14 mg/kg,  
 Mo: min. <0.05 mg/kg, max. 5.27 mg/kg, arithmetic mean: 0.15 mg/kg, geometric mean: 0.10 mg/kg, median: 0.09 mg/kg,

Zwartość takich pierwiastków jak: Be, J, Se, Sn i Tl jest na ich granicy oznaczalności (<0,3 do <50,0 mg/kg).

Bardzo niskie i niskie zawartości cechują następujące pierwiastki:

Ag: minimalna - <0,1 mg/kg, maksymalna - 0,1 mg/kg, średnia arytmetyczna - 0,1 mg/kg, średnia geometryczna - 0,1 mg/kg, mediana - 0,1 mg/kg,

Cd: minimalna - <0,05 mg/kg, maksymalna - 0,60 mg/kg, średnia arytmetyczna - 0,23 mg/kg, średnia geometryczna - 0,16 mg/kg, mediana - 0,12 mg/kg,

Ce: minimalna - <0,05 mg/kg, maksymalna - 2,23 mg/kg, średnia arytmetyczna - 0,38 mg/kg, średnia geometryczna - 0,2 mg/kg, mediana - 0,16 mg/kg,

Co: minimalna - <0,05 mg/kg, maksymalna - 2,5 mg/kg, średnia arytmetyczna - 0,28 mg/kg, średnia geometryczna - 0,15 mg/kg, mediana - 0,1 mg/kg,

Cs: minimalna - <0,1 mg/kg, maksymalna - 1,4 mg/kg, średnia arytmetyczna - 0,45 mg/kg, średnia geometryczna - 0,31 mg/kg, mediana - 0,25 mg/kg,

Ga: minimalna - <0,1 mg/kg, maksymalna - 0,6 mg/kg, średnia arytmetyczna - 0,26 mg/kg, średnia geometryczna - 0,22 mg/kg, mediana - 0,2 mg/kg,

La: minimalna - <0,05 mg/kg, maksymalna - 1,11 mg/kg, średnia arytmetyczna - 0,25 mg/kg, średnia geometryczna - 0,16 mg/kg, mediana - 0,14 mg/kg,

Mo: minimalna - <0,05 mg/kg, maksymalna - 5,27 mg/kg, średnia arytmetyczna - 0,15 mg/kg, średnia geometryczna - 0,10 mg/kg, mediana - 0,09 mg/kg,

Pb: minimalna - <0,1 mg/kg, maksymalna - 1,5 mg/kg, średnia arytmetyczna - 0,2 mg/kg, średnia geometryczna - 0,18 mg/kg, mediana - 0,2 mg/kg,

Sb: minimalna - <0,05 mg/kg, maksymalna - 0,42 mg/kg, średnia arytmetyczna - 0,13 mg/kg, średnia geometryczna - 0,11 mg/kg, mediana - 0,11 mg/kg,

U: minimalna - <0,05 mg/kg, maksymalna - 0,19 mg/kg, średnia arytmetyczna - 0,1 mg/kg, średnia geometryczna - 0,09 mg/kg, mediana - 0,09 mg/kg.

Wyższy udział odnotowano w przypadku 8 pierwiastków (tab. 3):

As: minimalna - <1,0 mg/kg, maksymalna - 10,0 mg/kg, średnia arytmetyczna - 3,91 mg/kg, średnia geometryczna - 3,12 mg/kg, mediana - 3,0 mg/kg,

Ba: minimalna - <1,0 mg/kg, maksymalna - 28,69 mg/kg, średnia arytmetyczna - 4,71 mg/kg, średnia geometryczna - 2,94 mg/kg, mediana - 2,20 mg/kg,

Cr: minimalna - <1,0 mg/kg, maksymalna - 3,77 mg/kg, średnia arytmetyczna - 1,76 mg/kg, średnia geometryczna - 1,65 mg/kg, mediana - 1,59 mg/kg,

Cu: minimalna - <1,0 mg/kg, maksymalna - 6,5 mg/kg, średnia arytmetyczna - 3,98 mg/kg, średnia geometryczna - 3,74 mg/kg, mediana - 3,88 mg/kg,

Pb: min. <0.1 mg/kg, max. 1.5 mg/kg, arithmetic mean: 0.2 mg/kg, geometric mean: 0.18 mg/kg, median: 0.2 mg/kg,

Sb: min. <0.05 mg/kg, max. 0.42 mg/kg, arithmetic mean: 0.13 mg/kg, geometric mean: 0.11 mg/kg, median: 0.11 mg/kg,

U: min. <0.05 mg/kg, max. 0.19 mg/kg, arithmetic mean: 0.1 mg/kg, geometric mean: 0.09 mg/kg, median: 0.09 mg/kg.

Higher values were displayed by the following 8 elements (Table 3):

As: min. <1.0 mg/kg, max. 10.0 mg/kg, arithmetic mean: 3.91 mg/kg, geometric mean: 3.12 mg/kg, median: 3.0 mg/kg,

Ba: min. <1.0 mg/kg, max. 28.69 mg/kg, arithmetic mean: 4.71 mg/kg, geometric mean: 2.94 mg/kg, median: 2.20 mg/kg,

Cr: min. <1.0 mg/kg, max. 3.77 mg/kg, arithmetic mean: 1.76 mg/kg, geometric mean: 1.65 mg/kg, median: 1.59 mg/kg,

Cu: min. <1.0 mg/kg, max. 6.5 mg/kg, arithmetic mean: 3.98 mg/kg, geometric mean: 3.74 mg/kg, median: 3.88 mg/kg,

Li: min. <0.5 mg/kg, max. 16.8 mg/kg, arithmetic mean: 3.13 mg/kg, geometric mean: 2.66 mg/kg, median: 2.9 mg/kg,

Ni: min. <0.5 mg/kg, max. 10.8 mg/kg, arithmetic mean: 1.5 mg/kg, geometric mean: 1.14 mg/kg, median: 1.0 mg/kg,

V: min. <1.0 mg/kg, max. 5.0 mg/kg, arithmetic mean: 2.02 mg/kg, geometric mean: 1.81 mg/kg, median: 1.62 mg/kg,

Zn: min. <1.0 mg/kg, max. 7.0 mg/kg, arithmetic mean: 2.12 mg/kg, geometric mean: 1.82 mg/kg, median: 1.58 mg/kg.

Higher values were also found in two elements (Table 3):

Mn: min. <1.0 mg/kg, max. 180.0 mg/kg, arithmetic mean: 13.57 mg/kg, geometric mean: 5.88 mg/kg, median: 3.64 mg/kg,

Rb: min. <0.5 mg/kg, max. 98.6 mg/kg, arithmetic mean: 10.93 mg/kg, geometric mean: 4.6 mg/kg, median: 4.2 mg/kg.

Higher values were displayed by the following four elements (Table 3):

Br: min. <50.0 mg/kg, max. 1850.0 mg/kg, arithmetic mean: 308.48 mg/kg, geometric mean: 195.52 mg/kg, median: 151.0 mg/kg,

Fe: min. 6.06 mg/kg, max. 8455.0 mg/kg, arithmetic mean: 230.55 mg/kg, geometric mean: 52.15 mg/kg, median: 31.4 mg/kg,

Sr: min. 1.0 mg/kg, max. 972.5 mg/kg, arithmetic mean: 102.03 mg/kg, geometric mean: 40.34 mg/kg, median: 40.43 mg/kg,

Li: minimalna - <0,5 mg/kg, maksymalna – 16,8 mg/kg, średnia arytmetyczna – 3,13 mg/kg, średnia geometryczna – 2,66 mg/kg, mediana – 2,9 mg/kg,

Ni: minimalna - <0,5 mg/kg, maksymalna – 10,8 mg/kg, średnia arytmetyczna – 1,5 mg/kg, średnia geometryczna – 1,14 mg/kg, mediana – 1,0 mg/kg,

V: minimalna - <1,0 mg/kg, maksymalna – 5,0 mg/kg, średnia arytmetyczna – 2,02 mg/kg, średnia geometryczna – 1,81 mg/kg, mediana – 1,62 mg/kg,

Zn: minimalna - <1,0 mg/kg, maksymalna – 7,0 mg/kg, średnia arytmetyczna – 2,12 mg/kg, średnia geometryczna – 1,82 mg/kg, mediana – 1,58 mg/kg.

Wyższą zawartość odnotowano w przypadku dwu pierwiastków (tab. 3):

Mn: minimalna - <1,0 mg/kg, maksymalna – 180,0 mg/kg, średnia arytmetyczna – 13,57 mg/kg, średnia geometryczna – 5,88 mg/kg, mediana – 3,64 mg/kg,

Rb: minimalna - <0,5 mg/kg, maksymalna – 98,6 mg/kg, średnia arytmetyczna – 10,93 mg/kg, średnia geometryczna – 4,6 mg/kg, mediana – 4,2 mg/kg.

Największy udział cechuje cztery pierwiastki (tab. 3):

Br: minimalna – <50,0 mg/kg, maksymalna – 1850,0 mg/kg, średnia arytmetyczna – 308,48 mg/kg, średnia geometryczna – 195,52 mg/kg, mediana – 151,0 mg/kg,

Fe: minimalna – 6,06 mg/kg, maksymalna – 8455,0 mg/kg, średnia arytmetyczna – 230,55 mg/kg, średnia geometryczna – 52,15 mg/kg, mediana – 31,4 mg/kg,

Sr: minimalna – 1,0 mg/kg, maksymalna – 972,5 mg/kg, średnia arytmetyczna – 102,03 mg/kg, średnia geometryczna – 40,34 mg/kg, mediana – 40,43 mg/kg,

Ti: minimalna - <1,0 mg/kg, maksymalna – 531,0 mg/kg, średnia arytmetyczna – 24,66 mg/kg, średnia geometryczna – 10,66 mg/kg, mediana – 7,8 mg/kg.

Podsumowując wyniki badań zawartości wybranych pierwiastków śladowych w utworach potasonośnych cyklotemu PZ3 w czterech wysadach solnych (Kłodawa, Góra, Mogilno i Damasławek) należy zaznaczyć, że dominowały tu obficie dane z wysadu Kłodawa (193 próbki) w porównaniu z nieznacznie (4 do 6 próbek) rezultatami badań dla pozostałych trzech wysadów (tab. 2).

Podobnie jak w przypadku utworów potasonośnych cyklotemu PZ2 przy ocenie przydatności omawianych utworów potasonośnych cyklotemu PZ3 do przemysłowego pozyskiwania wybranych pierwiastków śladowych wykorzystano średnie arytmetyczną i geometryczną oraz medianę zawartości danego pierwiastka.

Udziału Be, J, Se, Sn i Tl nie sposób określić bo jest on zapewne niższy niż granica oznaczalności użytych metod analitycznych (<0,3 do <50,0 mg/kg w zależności od pierwiastka).

Zawartość Ag, Cd, Ce, Co, Cs, Ga, J, La, Mo, Pb, Sb i U nie przekracza 1,0 mg/kg, udział As, Ba, Cr, Cu, Li, Ni,

Ti: min. <1.0 mg/kg, max. 531.0 mg/kg, arithmetic mean: 24.66 mg/kg, geometric mean: 10.66 mg/kg, median: 7.8 mg/kg.

In summary, we should mention that the results of studies on the selected trace element contents in the potash-bearing formations of cyclothem PZ3 of four salt domes (Kłodawa, Góra, Mogilno, and Damasławek) were dominated by abundant analytical materials from Kłodawa (193 samples), in comparison to a few results, based on 4 to 6 samples, related to the remaining three salt domes (Table 2).

Similarly to the potash-bearing formations of cyclothem PZ2, when appraising the usability of the discussed potash-bearing formations of cyclothem PZ3 for industrial mining of the selected trace elements, the following parameters were considered: arithmetic and geometric means and the median values of the given element.

It was not possible to determine the quantities of Be, J, Se, Sn, or Tl, as their quantities were probably below the quantification levels of the analytical methods applied (<0.3 to <50.0 mg/kg, depending in the element).

The contents of Ag, Cd, Ce, Co, Cs, Ga, J, La, Mo, Pb, Sb, or U did not exceed 1.0 mg/kg, while those of As, Ba, Cr, Cu, Li, Ni, V or Zn ranged from 1.5 to 4.7 mg/kg. The formations under discussion contained a bit more of Mn and Rb: 10.9–13.6 mg/kg, with the highest quantities displayed by Br, Fe, Sr, and Ti: up to 308 mg/kg in the case of Br. We should emphasise here that the median values of the specified elements were always lower when a higher number of samples was available. Similarly to the formations of cyclothem PZ2, the increased quantities of Ti and Fe could be associated with the presence of dispersed silt substance, while those of Sr with the admixture of anhydrite. High bromine contents are natural for the K-Mg salts.

Our analysis of the average contents of the determined trace elements indicated that, similarly to the above discussed formations of cyclothem PZ2, the industrial extraction of a number of studied elements of cyclothem PZ3, would be completely unprofitable, owing to the low average contents thereof in rocks, reaching up to ca. 5 mg/kg.

### K-Mg sulphate salts

The statistical parameters of the selected trace element contents of the sulphate potash-bearing formations of cyclothem PZ1 (9 samples) can be found in Table 5.

The contents of such elements as Ag, Be, Cd, Co, Cs, Ga, As, Sb, Se, Sn, La, or Tl were at the limit of quantification (<0.05 to <2 mg/kg; Table 5).

Low values were displayed by the following elements (Table 5):



V i Zn mieści się w granicach 1,5-4,7 mg/kg. Nieco więcej badane utwory zawierają Mn i Rb – 10,9-13,6 mg/kg, zaś najwięcej Br, Fe, Sr i Ti – do ponad 308 mg/kg w przypadku Br. Należy tu podkreślić, że wartość mediany zawartości wymienionych pierwiastków jest często niższa w przypadku większej ilości próbek. Podobne jak w utworach cyklotemu PZ2 zwiększony udział Ti i Fe można wiązać z obecnością rozproszonej substancji ilastej, zaś Sr – z domieszką anhydrytu. Wysoka zawartość bromu jest naturalna w solach K-Mg.

Analiza średnich zawartości oznaczonych pierwiastków śladowych wskazuje, że podobnie jak dla wcześniej omówionych utworów cyklotemu PZ2 przemysłowe pozyskiwanie z przebadanych utworów cyklotemu PZ3 pożądanych pierwiastków, przy ich przeciętnej niskiej zawartości (do ok. 5 mg/kg), jest nieopłacalne.

### Siarczanowe sole K-Mg

Parametry statystyczne zawartości wybranych pierwiastków śladowych w siarczanowych utworach potasonośnych cyklotemu PZ1 (9 próbek) zamieszczono w tabeli 5.

Zwartość takich pierwiastków jak: Ag, Be, Cd, Co, Cs, Ga, As, Sb, Se, Sn, La i Tl jest na ich granicy oznaczalności (<0,05 do <2 mg/kg; tab. 5).

Niskie zawartości cechują następujące pierwiastki (tab. 5):

Ni: minimalna – 1,1 mg/kg, maksymalna – 3,5 mg/kg, średnia arytmetyczna – 1,9 mg/kg, średnia geometryczna – 1,8 mg/kg, mediana – 1,6 mg/kg,

Rb: minimalna – <0,5 mg/kg, maksymalna – 2,1 mg/kg, średnia arytmetyczna – 1,4 mg/kg, średnia geometryczna – 1,4 mg/kg, mediana – 1,6 mg/kg,

Mo: minimalna – 0,07 mg/kg, maksymalna – 1,62 mg/kg, średnia arytmetyczna – 0,43 mg/kg, średnia geometryczna – 0,28 mg/kg, mediana – 0,29 mg/kg,

Ce: minimalna – <0,05 mg/kg, maksymalna – 0,13 mg/kg, średnia arytmetyczna – 0,07 mg/kg, średnia geometryczna – 0,07 mg/kg, mediana – 0,07 mg/kg,

Ni: min. 1.1 mg/kg, max. 3.5 mg/kg, arithmetic mean: 1.9 mg/kg, geometric mean: 1.8 mg/kg, median: 1.6 mg/kg,  
 Rb: min. <0.5 mg/kg, max. 2.1 mg/kg, arithmetic mean: 1.4 mg/kg, geometric mean: 1.4 mg/kg, median: 1.6 mg/kg,  
 Mo: min. 0.07 mg/kg, max. 1.62 mg/kg, arithmetic mean: 0.43 mg/kg, geometric mean: 0.28 mg/kg, median: 0.29 mg/kg,  
 Ce: min. <0.05 mg/kg, max. 0.13 mg/kg, arithmetic mean: 0.07 mg/kg, geometric mean: 0.07 mg/kg, median: 0.07 mg/kg,  
 Pb: min. <0.1 mg/kg, max. 1.3 mg/kg, arithmetic mean: 0.3 mg/kg, geometric mean: 0.2 mg/kg, median: 0.2 mg/kg,  
 V: min. <1.0 mg/kg, max. 2.0 mg/kg, arithmetic mean: 2.0 mg/kg, geometric mean: 2.0 mg/kg, median: 2.0 mg/kg,  
 U: min. 0.07 mg/kg, max. 1.02 mg/kg, arithmetic mean: 0.33 mg/kg, geometric mean: 0.25 mg/kg, median: 0.2 mg/kg.

Higher values were displayed by the following elements (Table 5):

Ba: min. 1.0 mg/kg, max. 10.0 mg/kg, arithmetic mean: 5.0 mg/kg, geometric mean: 4.0 mg/kg, median: 4.0 mg/kg,  
 Cu: min. 4.0 mg/kg, max. 17.0 mg/kg, arithmetic mean: 12.0 mg/kg, geometric mean: 11.0 mg/kg, median: 13.0 mg/kg,  
 Mn: min. 2.0 mg/kg, max. 14.0 mg/kg, arithmetic mean: 5.0 mg/kg, geometric mean: 4.0 mg/kg, median: 3.0 mg/kg,  
 Ti: min. 6.0 mg/kg, max. 10.0 mg/kg, arithmetic mean: 7.0 mg/kg, geometric mean: 7.0 mg/kg, median: 7.0 mg/kg,  
 Zn: min. 3.0 mg/kg, max. 13.0 mg/kg, arithmetic mean: 9.0 mg/kg, geometric mean: 9.0 mg/kg, median: 10.0 mg/kg.

Much higher values were also found in iron (Fe): min. 12.0 mg/kg, max. 51.0 mg/kg, arithmetic mean: 33.0 mg/kg, geometric mean: 30.0 mg/kg, median: 29.0 mg/kg.

**Tabela 5.** Parametry statystyczne zawartości pierwiastków śladowych w siarczanowych utworach potasonośnych (polihality) cyklotemu PZ1 cechsztynu w Polsce

Table 5. Statistic parameters of trace elements content in the sulphate potash-bearing deposits (polyhalites) of Zechstein PZ1 cyclothem in Poland

Zawartość pierwiastków śladowych Trace elements content		Li	Be	Co	Ni	Ga	As	Se	Rb	Mo	Ag	Cd	Sn	Sb	Cs	La	Ce	Tl	Pb	U	Ba	Cu	Fe	Mn	Sr	Ti	V	Zn	
		mg/kg																											
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	28	29	
Parametry statystyczne Statistic parameters	n	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	
	min.	15,1	<0,3	<0,05	1,1	<0,1	<1	<2	<0,5	0,07	<0,1	<0,05	<0,5	<0,05	<0,1	<0,05	<0,05	<0,1	<0,1	0,07	1	4	12	2	454	6	<1	3	
	maks. max.	59,6	<0,3	<0,05	3,5	<0,1	<1	<2	2,1	1,62	<0,1	<0,05	<0,5	<0,05	<0,1	<0,05	0,13	<0,1	1,3	1,02	10	17	51	14	2378	10	2	13	
	śr. arytmet. arithmetic mean	26,3	<0,3	<0,05	1,9	<0,1	<1	<2	1,4	0,43	<0,1	<0,05	<0,5	<0,05	<0,1	<0,05	0,07	<0,1	0,3	0,33	5	12	33	5	1075	7	2	9	
	sr. geom. geometric mean	23,7	<0,3	<0,05	1,8	<0,1	<1	<2	1,4	0,28	<0,1	<0,05	<0,5	<0,05	<0,1	<0,05	0,07	<0,1	0,2	0,25	4	11	30	4	888	7	2	9	
mediana median	20,6	<0,3	<0,05	1,6	<0,1	<1	<2	1,6	0,29	<0,1	<0,05	<0,5	<0,05	<0,1	<0,05	0,07	<0,1	0,2	0,20	4	13	29	3	723	7	2	10		

n - ilość przebadanych próbek/ number of analyzed samples

Pb: minimalna – <0,1 mg/kg, maksymalna – 1,3 mg/kg, średnia arytmetyczna – 0,3 mg/kg, średnia geometryczna – 0,2 mg/kg, mediana – 0,2 mg/kg,

V: minimalna – <1,0 mg/kg, maksymalna – 2,0 mg/kg, średnia arytmetyczna – 2,0 mg/kg, średnia geometryczna – 2,0 mg/kg, mediana – 2,0 mg/kg,

U: minimalna – 0,07 mg/kg, maksymalna – 1,02 mg/kg, średnia arytmetyczna – 0,33 mg/kg, średnia geometryczna – 0,25 mg/kg, mediana – 0,2 mg/kg.

Wyższy udział odnotowano w przypadku następujących pierwiastków (tab. 5):

Ba: minimalna – 1,0 mg/kg, maksymalna – 10,0 mg/kg, średnia arytmetyczna – 5,0 mg/kg, średnia geometryczna – 4,0 mg/kg, mediana – 4,0 mg/kg,

Cu: minimalna – 4,0 mg/kg, maksymalna – 17,0 mg/kg, średnia arytmetyczna – 12,0 mg/kg, średnia geometryczna – 11,0 mg/kg, mediana – 13,0 mg/kg,

Mn: minimalna – 2,0 mg/kg, maksymalna – 14,0 mg/kg, średnia arytmetyczna – 5,0 mg/kg, średnia geometryczna – 4,0 mg/kg, mediana – 3,0 mg/kg,

Ti: minimalna – 6,0 mg/kg, maksymalna – 10,0 mg/kg, średnia arytmetyczna – 7,0 mg/kg, średnia geometryczna – 7,0 mg/kg, mediana – 7,0 mg/kg,

Zn: minimalna – 3,0 mg/kg, maksymalna – 13,0 mg/kg, średnia arytmetyczna – 9,0 mg/kg, średnia geometryczna – 9,0 mg/kg, mediana – 10,0 mg/kg.

Znacznie wyższą zawartość odnotowano w przypadku żelaza (Fe): wartość minimalna – 12,0 mg/kg, maksymalna – 51,0 mg/kg, średnia arytmetyczna – 33,0 mg/kg, średnia geometryczna – 30,0 mg/kg, mediana – 29,0 mg/kg.

Największy udział cechuje stront (Sr): wartość minimalna to 454,0 mg/kg, maksymalna – 2378,0 mg/kg, średnia arytmetyczna – 1075,0 mg/kg, średnia geometryczna – 888,0 mg/kg, mediana – 723,0 mg/kg. Przyczyną jest skład próbek skalnych, zdominowany przez siarczan potasowo-magnezowy (polihalit) i siarczan wapnia (anhydryt i gips; Czapowski i in., 2020b).

Niewielka ilość dostępnego badaniom materiału (rdzeń jednego otworu wiertniczego, 9 próbek) nie pozwala rzetelnie ocenić czy wystąpienia siarczanowych soli K-Mg w obrębie wydzielenia anhydrytu dolnego (A1d) w rejonie Mioszyna mają jakąś wartość ekonomiczną ze względu na występujące w nich pierwiastki śladowe.

#### OCENA POTENCJAŁU SUROWCOWEGO BADANYCH UTWORÓW POTASONOŚNYCH CECHSZTYNU W POLSCE POD KĄTEM POZYSKIWANIA WYBRANYCH PIERWIASTKÓW ŚLADOWYCH

Przedstawiona powyżej analiza zawartości wybranych pierwiastków śladowych w utworach potasonośnych cechsztynu w Polsce, bazująca na archiwalnych i publikowanych

Higher values were displayed by the following: strontium (Sr): min. 454.0 mg/kg, max. 2378.0 mg/kg, arithmetic mean: 1075.0 mg/kg, geometric mean: 888.0 mg/kg, median: 723.0 mg/kg. That was related to the composition of rock samples, dominated by potassium-magnesium sulphate (polyhalite) and calcium sulphate (anhydrite and gypsum) (Czapowski et al. 2020b).

Small quantities of the available research material (a core from one borehole, with 9 samples collected) did not allow for a reliable appraisal whether the occurrences of K-Mg sulphate salts within the lower anhydrite unit (A1d) of the Mioszyna area had any economic value, as regards trace elements.

#### APPRAISAL OF THE RAW-MATERIAL AVAILABILITY FROM THE EXAMINED POLISH ZECHSTEIN POTASH- BEARING FORMATIONS, IN RESPECT OF SELECTED TRACE ELEMENT MINING

The trace element content analysis presented above, in the context of the Polish Zechstein potash-bearing formations, based on both archival and published results of geochemical analyses, indicated that the main potash-bearing series, occurring in the profiles of cyclothem PZ2 and PZ3, could not be the sources of the industrial extraction of sought-after elements.

The average quantities of such elements as e.g. As, B, Ce, Co, Cs, Ga, J, La, Li, or Tl found in those formations, usually not exceeding 1.0–4.0 mg/kg, could ensure the extraction of only 1–4 g of the given element upon processing of 1 ton of potash-bearing rocks. Such quantities are not competitive in comparison to the production from the salinas mentioned in this paper above where the quantity of e.g. lithium reaches 8.9 g/l in brine, while that of boron up to 138.4 mg/l.

Owing to small quantities of the available data (9 samples), it was hard to appraise the usability of the K-Mg sulphate salts (polyhalites), occurring in the formations of cyclothem PZ1 in the Pomorze Gdańskie region. The quantities of the majority of the above specified elements did not exceed 2 mg/kg, while those of other elements, e.g. Ba, Cu, Mn, Ti, Zn, Fe, or Sr were higher (from >5 mg/kg to ca. 1,000 mg/kg in the case of Sr). In fact, such quantities could be successfully obtained from the natural deposits of metal sulphides and oxides, or from such sulphates as gypsum and anhydrites.

wynikach analiz geochemicznych, wykazała że główne serie potasonośne, występujące w profilach cyklotemów PZ2 i PZ3, nie mogą stanowić źródła przemysłowego pozyskiwania pożądaných pierwiastków.

Średni udział takich pierwiastków jak np. As, B, Ce, Co, Cs, Ga, J, La, Li czy Tl w tych utworach, zwykle nie przekraczający 1,0-4,0 mg/kg, może zapewnić pozyskanie jedynie 1-4 g danego pierwiastka w przypadku przeróbki 1 tony skał potasonośnych. Nie są to ilości konkurencyjne w porównaniu opisanymi we wstępie solniskami, w których udział np. litu w solankach sięga 8,9 g/l zaś boru do 138,4 mg/l.

Trudno ocenić w oparciu o niewielką ilość dostępnych danych (analiza 9 próbek) przydatność siarczanowych soli K-Mg (polihalitów), występujących w utworach cyklotemu PZ1 na Pomorzu Gdańskim. Udział większości wymienionych pierwiastków nie przekracza w 2 mg/kg, natomiast inne jak Ba, Cu, Mn, Ti, Zn, Fe i Sr, których zawartość jest wyższa (>5 mg/kg do ok. 1000 mg/kg w przypadku Sr), można z powodzeniem pozyskać z naturalnych złóż siarczków i tlenków metali czy siarczanów np. gipsy i anhydryty.

#### PODSUMOWANIE

Analiza wyników badań geochemicznych 307 próbek skał (dane archiwalne i publikowane), pobranych z utworów potasonośnych cyklotemów PZ1, PZ2 i PZ3 cechsztynu w Polsce, umożliwiła przedstawienie aktualnej charakterystyki zawartości pierwiastków śladowych w tych utworach. Oznaczono zawartości następujących pierwiastków: Ag, As, Ba, Be, Br, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Ga, J, La, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Se, Sn, Sr, Ti, Tl, U, V i Zn.

Materiał analityczny stanowiły dane dotyczące próbek pozyskanych z 4 wysadów solnych z centralnej Polski: Damasławek (14 próbek), Góra (5 próbek), Kłodawa (266 próbek) i Mogilno (13 próbek). Najwięcej danych uzyskano dla utworów potasonośnych cyklotemu PZ3 (207 próbek), dwukrotnie mniej dla serii potasonośnej cyklotemu PZ2. Skąpe dane (9 próbek) dotyczą siarczanowych soli K-Mg (polihalitów) cyklotemu PZ1 w północnej Polsce.

Średni udział większości wymienionych pierwiastków w tych utworach jest niski, nie przekracza zwykle 1-4 mg/kg. Tym samym opisane serie potasonośne nie stanowią ekonomicznie opłacalnego źródła pozyskiwania pożądaných rzadkich pierwiastków śladowych. Szereg z nich można pozyskać w większych ilościach ze współczesnych solnisk i złóż siarczków, tlenków metali oraz siarczanów.

#### SUMMARY

Our analysis of the geochemical tests of 307 rock samples (available in archives and published literature), collected from the potash-bearing formations of cyclothem PZ1, PZ2, and PZ3 of the Polish Zechstein, allowed for presentation of a current description of trace element contents in those formations. The contents of the following elements were determined: Ag, As, Ba, Be, Br, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Ga, J, La, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Se, Sn, Sr, Ti, Tl, U, V, and Zn.

Our analytical material consisted of the data concerning the samples obtained from 4 salt domes of central Poland: Damasławek (14 samples), Góra (5 samples), Kłodawa (266 samples), and Mogilno (13 samples). The largest number of data were obtained for the potash-bearing formations of cyclothem PZ3 (207 samples) and twice fewer for the potash-bearing series of cyclothem PZ2. Scarce data (9 samples) concerned the K-Mg sulphate salts (polyhalites) of cyclothem PZ1 from northern Poland.

The average quantities of the majority of elements under discussion, contained in those formations, were low and usually did not exceed 1-4 mg/kg. Consequently, the potash-bearing series described here did not present economically profitable sources of extracting sought-after trace elements. Some of such elements can be extracted in higher quantities from natural salinas and the deposits of metal sulphides and oxides, or sulphates.

## LITERATURA/REFERENCES

- BURLIGA S., KOLONKO P., MISIEK G., CZAPOWSKI G., 1995. Kłodawa Salt Mine. Upper Permian (Zechstein) profile from basin center, salt tectonics, mineral transformations, salt mining problems. XIII International Congress on Carboniferous-Permian Guide to Excursion A3: 45-54. Wyd. PIG, Warszawa.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., MAZUREK S., 2020a. Sól kamienna i sole potasowo-magnezowe. W: K. Szamałek, M. Szufflicki, W. Mizerski (red.) *BILANS PERSPEKTYWICZNYCH ZASOBÓW KOPALIN POLSKI*: 218-232. PIG-PIB, Warszawa ISBN 978-83-66509-92-4.
- CZAPOWSKI G., PERYT T. M., TOMASSI-MORAWIEC H., HANDKE B., WACHOWIAK J., 2020b. Ocena zawartości niektórych pierwiastków śladowych w solach K-Mg. Raport końcowy realizacji podzadania w ramach zadania pt. „Wsparcie działań Głównego Geologa Kraju w zakresie prowadzenia Polityki Surowcowej Państwa”. 1-41, PIG-PIB, Warszawa.
- CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., CHEŁMIŃSKI J., TOMASZCZYK M., 2008. Stopień rozpoznania i perspektywy zagospodarowania cechsztyńskich złóż soli w rejonie Zatoki Gdańskiej. *Górnictwo Odkrywkowe*, XLX/II (2-3): 47-55.
- CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., TADYCH J., GRZYBOWSKI Ł., SZTYRAK T., 2009. Geochemia bromu i wykształcenie utworów solnych cechsztynu w wybranych otworach wiertniczych w wysadzie solnym Góra koło Inowrocławia. *Geologia (Przegląd Solny 2009)*, 35 (3): 287-305.
- 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 (Przegląd Solny 2012)*, 38 (2): 153-188.
- DAWIDOWSKI S., 1976. Obecne rozpoznanie koncentracji soli potasowych młodszych (K3) w okolicy Nowej Soli i perspektywy ich gospodarczego zastosowania. *Prz. Geol.*, 24 (9): 545-546.
- DU Y., FAN Q., GAO D., WEI H., SHAN F., LI B., ZHANG X., YUAN Q., QIN Z., REN Q., TENG X., 2019. Evaluation of boron isotopes in halite as an indicator of the salinity of Qarham paleolake water in the eastern Qaidam Basin, western China. *Geoscience Frontiers*, 10 (1): 253-262.
- GARLICKI A., SZYBIST A., 1991. Pierwiastki śladowe w solach kopalni kłodawskiej. *Prace Specj. Pol. Tow. Min.*, 1: 71-76.
- GARLICKI A., SZYBIST A., KASPRZYK A., 1991. Badania pierwiastków śladowych w złożach soli i surowców chemicznych. *Prz. Geol.*, 39 (11-12): 520-527.
- GOZALVEZ M., 2018. Li-rich salt lakes and borates in the Argentine Puna. 15th Quadrennial International Association on the Genesis of Ore Deposits Symposium. Field Trip 3. Salta, Argentina, 01 to 03 September 2018.
- MAZUREK S., BURLIGA S., WIŚNIEWSKI A., STASZCZAK W., MISIEK Ł., KURDEK D., BARTŁOMIEJCZAK G., 2016. Dodatek nr 2 do Dokumentacji geologicznej złoża soli kamiennej „Kłodawa 1”. 1-52, NAG nr 3420/2017. PIG-PIB, Warszawa.
- MAZUREK S., ROSZKOWSKA-REMIN J., SZAMAŁEK K., TYMIŃSKI M., MALON A., 2021. Surowce mineralne deficytowe dla polskiej gospodarki – propozycja nowego podejścia do surowców strategicznych i krytycznych. *Prz. Geol.*, 69 (5): 273-286.
- MISIEK G., 1997. Stratygrafia i wykształcenie utworów cechsztynu w wysadzie solnym Kłodawy. Mat. konf. pt. Tektonika solna regionu kujawskiego, Uniejów 23-25.10.1997: 20-23. WIND, Wrocław.
- PERYT T. M., 1991. Lower and Upper Werra Anhydrite in Leba Elevation area (northern Poland). Lithofacies and paleogeography. *Zb. Geol. Paläont.*, I (4): 1189-1200.
- 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 (1): 83-113.
- PERYT T. M., CZAPOWSKI G., DĘBSKI J., GAŚIEWICZ A., HERBICH E., PIZON A., 1984. Poszukiwania złóż soli cechsztyńskich polihalitu na wyniesieniu Łeby. Część I. Analiza geologicznych warunków występowania i genezy polihalitu i soli cechsztyńskich na wyniesieniu Łeby. 1-100, NAG nr 33716, 33/177. PIG-PIB, Warszawa.
- PERYT T. M., PIERRE C., GRYNIV S. P., 1998. Origin of polyhalite deposits in the Zechstein (Upper Permian) Zdrada platform (northern Poland). *Sedimentology*, 45: 565-578.
- PERYT T. M., TOMASSI-MORAWIEC H., CZAPOWSKI G., HRYNIV S. P., PUEYO J. J., EASTOE C. J., VOVNYUK S., 2005. Polyhalite occurrence in the Werra (Zechstein, Upper Permian) Peribaltic Basin of Poland and Russia: evaporite facies constraints. *Carbonates and Evaporites*, 20: 182-194.
- PODEMSKI M., 1966. Sole potasowe cechsztyńskiego poziomu starszej soli potasowej (K2) z okolicy Nowej Soli. 1-290, NAG nr 4121/191. PIG-PIB Warszawa.
- PODEMSKI M., 1972a. Cechsztyńskie sole kamienne i potasowe cyklotomów Z2, Z3 w okolicach Nowej Soli. *Biul. IG*, 260 (2): 5-62.
- PODEMSKI M., 1972b. Poziom soli potasowej starszej w rejonie Zielonej Góry. 1-184, NAG nr 4121/401, PIG-PIB Warszawa.
- PODEMSKI M., 1973a. Podsumowanie wyników dotychczasowych badań geofizycznych i geologicznych zachodniej części niecki północno-sudeckiej w aspekcie poszukiwań złóż soli kamiennej i potasowej. 1-43, NAG nr DS/259. PIG-PIB, Warszawa.
- PODEMSKI M., 1973b. Sedymentacja cechsztyńska zachodniej części monokliny przedsudeckiej na przykładzie okolic Nowej Soli. *Pr. Inst. Geol.*, 71: 1-101.
- PODEMSKI M., 1974a. Stratygrafia utworów cechsztyńskich zachodniej części niecki północno-sudeckiej. *Kwart. Geol.*, 18 (4): 729-748.
- PODEMSKI M., 1974b. Wyniki dotychczasowych badań soli potasowych w strefie przedsudeckiej. *Prz. Geol.*, 21 (1): 7-12.
- PODEMSKI M., 1975. Sole cechsztyńskie w rejonie struktury Rybaki. *Biul. IG*, 286 (III): 5- 63.
- SCHRAMM M., BORNEMANN O., 2006. Profil bromowy i badania stratygraficzne w obrębie otworu Mogilno M-24 (tłum. z ang.). Raport z badań, Archiwum IKS SOLINO.
- STĘPNIEWSKI M., 1973. Niektóre pierwiastki śladowe w cechsztyńskich minerałach solnych z rejonu Zatoki Puckiej. *Biul. IG*, 272 (10): 7-68.
- TOMASSI-MORAWIEC H., CZAPOWSKI G., TOBOŁA T., IWAŚIŃSKA-BUDZYK I., NARKIEWICZ W., MISIEK G., JANIÓW S., CHĘCIŃSKI R., 2008. Wzorcowe profile bromowe jako obiektywne narzędzie dla ustalenia wieku i podziału wewnętrznego ogniw solnych cechsztynu z obszaru Polski. Opracowanie merytoryczne z realizacji projektu badawczego. Grant KBN nr 4T12B 002 29. NAG PIG-PIB, Warszawa.



- TOMASSI-MORAWIEC H., CZAPOWSKI G., BORNEMANN O., SCHRAMM M., MISIEK G., 2009. Wzorcowe profile bromowe dla solnych utworów cechsztynu w Polsce. *Gosp. Sur. Min.*, 25 (2): 75-143.
- URBAŃCZYK K., 2011. "Salary Ameryki Południowej" – sprawozdanie z wyprawy naukowej PSGS. *Geologia*, 37 (2): 323-334.
- WACHOWIAK J., 1998. Studium mineralogiczne skał chemicznych i silikoklastycznych wysadu solnego Kłodawa. Praca doktorska, 1-171. AGH, Kraków.
- WACHOWIAK J., 2015. Lithostratigraphic and Bromine Profile of the Zechstein Salt Series In the Area of Borehole M-29 of the Mogilno Salt Dome. *Przegląd Solny*, 11: 91-97.
- WACHOWIAK J., 2016. Litostratygrafia i geochemia cechsztyńskiej serii solnej przewierconej otworem M-35 w wysadzie solnym Mogilno. *Przegląd Solny*, 12:114-126.
- WAGNER R., 1995. Stratygrafia i rozwój basenu cechsztyńskiego na Niżu Polskim. *Prace PIG*, 146: 1-71.
- WARREN J. K., 2006. *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. 1-1035. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- WERNER Zb., 1958. Dokumentacja geologiczna złoża soli potasowo-magnezowych i soli kamiennej w Kłodawie. Instytut Geologiczny, Zakład Złóż Ropy i Soli, Warszawa. 1-58, NAG nr 3928/370,13226. PIG-PIB, Warszawa
- WERNER Zb., 1954. Badanie zawartości boru w cechsztynie solnym oraz badanie zawartości bromu w solach potasowych. 1-58, NAG nr 3928/239. PIG-PIB, Warszawa.
- WERNER Zb., 1962. Dokumentacja geologiczna złoża soli potasowo-magnezowych i soli kamiennej w kłodawskim wysadzie solnym. 1-58. NAG nr 3927/209, 1919. Warszawa.
- WERNER Zb., 1979. Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w kat. C1 w rejonie Zatoki Puckiej. 1-183, NAG nr 13050 CUG. PIG, PIG-PIB, 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. 1-47, NAG nr 4121/140, PIG-PIB, Warszawa.



# Ługowanie w złożach małej miąższości – kawerny poziome i ich modelowanie (Proces ługowania kawern solnych, część V)

## Leaching caverns in thin-bedded deposits: horizontal cavern modelling (Salt-cavern leaching process, Part V)

Kazimierz URBAŃCZYK

ul. Kanadyjska 34, 32-087 Zielonki; e-mail: kazeku@poczta.onet.pl

### STRESZCZENIE

W artykule została omówiona metoda ługowania kawern poziomych, stosowana w złożach o małej miąższości. Przedstawiono bazę empiryczną ługowania kawern poziomych, a następnie opis matematyczny procesu i model komputerowy, opracowany na jego podstawie, a także przykładowe wyniki, uzyskane przy testowaniu modelu.

**Słowa kluczowe:** kawerna solna, kawerna pozioma, modelowanie procesu ługowania

### 1. WSTĘP

Niniejszy tekst jest piątym z serii poświęconej procesowi ługowania, ukazującej się na łamach *Przeglądu Solnego*. Zamierzeniem autora jest podsumowanie wiedzy na ten temat. Poprzednie teksty omawiające bazę empiryczną (Urbańczyk, 2015), opis matematyczno-fizyczny (Urbańczyk 2017), model komputerowy procesu (Urbańczyk 2018) i jego praktyczne zastosowanie (Urbańczyk 2019/2020) dotyczyły kawern ługowanych z pojedynczego pionowego otworu. Aby ługowanie takich kawern było opłacalne, złożo powinno mieć odpowiednią miąższość.

Czy zatem złoża małej miąższości są w ogóle nieprzydatne do eksploatacji ługowniczej? I one są ługowane, gdy w danym rejonie brak innych złóż soli, a jest zapotrzebowanie na solankę, lub przestrzeń magazynową. Stosuje się jednak nieco inne metody, tworzy się **kawerny połączone** (z otworów pionowych) lub wykonuje z otworów poziomych **kawer-**

### ABSTRACT

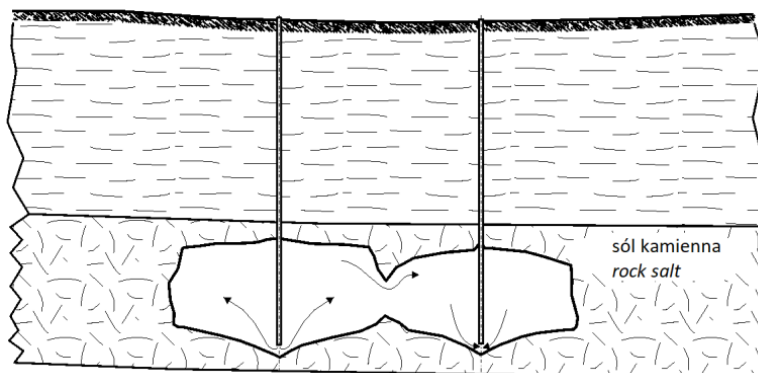
The method of horizontal cavern leaching, applied in thin-bedded deposits, is discussed in this paper. An empirical basis for horizontal cavern leaching is presented here, followed by a mathematical description of the process and of a computer model development, based on the description of the process, with selected model-testing results.

**Key words:** salt cavern, horizontal cavern, leaching process modelling

### 1. INTRODUCTION

This paper is the fifth in the series dedicated to the leaching process, published in the *Salt Review*. The author's intention here is to summarise the knowledge on the subject matter. Previous papers discussed the empirical sources of our knowledge (Urbańczyk 2015), the mathematical and physical descriptions (Urbańczyk 2017), a computer model of the process (Urbańczyk 2018), and the practical application of the model (Urbańczyk 2019/2020). Those papers concerned the caverns leached from a single vertical well. However, the salt deposit should have adequate thickness for vertical cavern leaching to be profitable.

Are, therefore, thin-bedded salt deposits useful for leaching operations at all? Such deposits are exploited by solution mining when no other salt deposits exist on the area, but still there is demand for brine or underground storage facilities. However, a different leaching technology should be applied



Ryc. 1. Ługowanie w systemie kawern połączonych.

Fig. 1. Coupled cavern leaching system (Kunstman et al. 2002).

ny poziome (tunelowe). Literatura na ten temat jest bardzo skąpa i niekompletna. Firmy ługujące złoża małej miąższości strzegą swych doświadczeń.

W metodzie kawern połączonych wykonuje się dwa lub więcej otworów w szeregu i po wylugowaniu w nich niskich wrębów, łączy się je hydraulicznie poprzez szczelinowanie lub torpedowanie hydrauliczne. Następnie jednym (skrajnym) otworem podaje się wodę, a drugim otworem odbiera się solankę. Ilustruje to ryc. 1.

Eksploatacja tą metodą jest łatwa do kontrolowania. Przez każdy z otworów można wprowadzać medium izolujące strop, można też mierzyć kształt przy użyciu echosondy. Pewną wadą tej metody jest to, że dno kawern nachylone jest pod granicznym kątem ługowania i przez to łączą się one sporo ponad spągami złoża. Sól poniżej połączenia jest „zarnowana”, nie do wydobycia. Stąd zainteresowanie alternatywną metodą ługowania kawerny z otworu poziomego. Temu tematowi poświęcona jest główna część niniejszego tekstu.

W metodzie ługowania kawerny poziomej otwór wierceny z powierzchni zakrzywia się w trakcie wiercenia tak, by w złożu biegł prawie poziomo, blisko spągu złoża. Zwykle (choć nie zawsze) przed odwierceniem otworu poziomego, wykonuje się w przyspągowej części złoża niewielką kawernę, tzw. kawernę inicjalną, do której musi trafić otwór główny. Kawerna pozioma ługowana jest z otworu poziomego, w którym jest podawane wodę. Solanka odbierana jest z kawerny inicjalnej, w której solanka się dosyca do stężenia przemysłowego (Ryc. 2.).

Rozwój kawerny odbywa się w sposób niekontrolowany, o ile nie wykona się ponad pierwszym tworem poziomym drugiego otworu, tam gdzie planuje się strop kawerny. Gdy kawerna doługuje się do tego otworu, zaczyna się podawać nim medium izolujące.

Innym wariantem tej technologii jest zapuszczenie do otworu poziomego pęku równoległych rur, różnej długości, którymi w kilku miejscach podaje się wodę tak sterując wydajnościami, aby strop ługował się równomiernie (Russo, 1995).

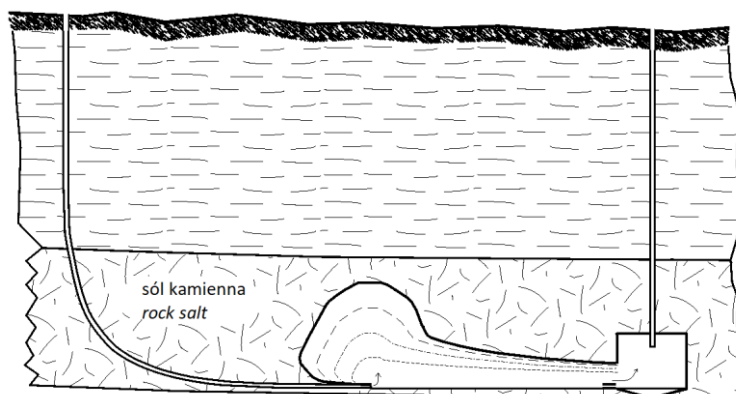
in such cases, involving either **coupled caverns** leached from vertical wells (multi-well system), or **horizontal caverns** (tunnel caverns), leached from horizontal wells. Presently, literature on the subject matter is in fact scarce and incomplete. The leaching companies operating on thin-bedded deposits protect their expertise.

Two or more wells are drilled in a row under the coupled cavern method and, once short notches have been made, the wells become interconnected by the hydraulic fracturing or torpedoing method. Next, one outermost well is used to inject water and the opposite well to collect brine. That method is illustrated in Fig. 1.

That brine production method is easy to control. Each well can be fed with the blanket protecting the cavern roof, and the cavern shape can be surveyed, with the use of a sonar. However, the disadvantage consists in the fact that the bottoms of the caverns are sloped at the limiting angle of leaching and, consequently, the caverns become connected somewhere above the floor of the deposit. Salt at the cavern bottom is “lost” and cannot be extracted. That is why an alternative cavern leaching method, from a horizontal well, was considered. The main portion of this paper is dedicated to horizontal cavern leaching.

Under the horizontal cavern leaching method, the borehole drilled from the surface becomes bent at some point during drilling and then the borehole starts to run almost horizontally close to the floor of the salt deposit. Usually, although not always, before horizontal well is drilled, a small cavern is leached, called the initial cavern, close to the floor of the deposit. The initial cavern becomes the target for the main well. A horizontal cavern is leached from the horizontal well to which water is supplied. Brine is collected from the initial cavern where brine concentration rises up to the industrial saturation level (Fig. 2.).

The cavern development proceeds in an uncontrolled manner, unless another well is drilled above the first horizontal well, wherever the cavern roof is planned. Once the cavern shape reaches the top well, the blanket medium starts to be supplied.



**Ryc. 2.** Kawerna horyzontalna, ługowana z otworu biegnącego horyzontalnie, solanka odbierana jest poprzez dodatkową, niewielką kawernę.  
**Fig. 2.** A horizontal cavern, leached by injecting water into the horizontal well, and producing the brine from an additional, vertical cavern (Kunstman et al. 2002).

Kontrola rozwoju kształtu kawerny ługowanej z otworu poziomego, przy użyciu echosondy, jest możliwa tylko wtedy, gdy kawernę udostępni się dodatkowym otworem pionowym.

Pierwsza licząca się publikacja o kawernach ługowanych z otworu poziomego pojawiła się w 1993 roku (Thoms i Gehle, 1993). Jednak stwierdzono w niej, że „niewiele wiadomo na temat kształtów kawern powstałych w wyniku horyzontalnego ługowania, dlatego też tutaj przedstawiono wyidealizowany kształt [...]” oraz „[...] zastrzeżony charakter danych związanych z ługowaniem kawern rozciągniętych wzdłuż złoża, oznacza, że prawdopodobnie dokonano postępów w tej technologii, które wykraczają poza zakres tego studium wykonalności [...]”.

W latach 90. badania w tej dziedzinie prowadził Gaz de France ze współpracującymi firmami, m.in. Chemkopem. Niektóre wyniki były prezentowane na zjeździe SMRI w San Antonio w 1995 roku (Kunstman i Urbańczyk, 1995, Saberian, 1995, Russo, 1995).

W ostatnich latach na temat komór poziomych publikują głównie (a może i jedynie) Chińczycy (Liu i inni, 2014; Xing i inni, 2015; Li i inni, 2020, Zhang i inni, 2020). Opisują badania laboratoryjne, rzeczywiste kawerny oraz model użyty do symulacji ługowania.

W dalszej części omówione zostaną kolejno: baza empiryczna na temat kawern poziomych, opis matematyczno-fizyczny procesu ich ługowania, algorytm modelu opartego na aproksymacji różnicowej oraz przedstawiony będzie przykład wyników uzyskanych w trakcie testowania modelu.

## 2. ŹRÓDŁA WIEDZY O ŁUGOWANIU KAWERN POZIOMYCH

Wiedza o ługowaniu kawern poziomych pochodzi z czterech źródeł:

- kawerny poziome ługowane z wyrobisk kopalń podziemnych,
- kawerny poziome ługowane z powierzchni,

Another version of that technology consists in setting of a bundle of pipes of various lengths into the horizontal well. Then, water is supplied to several places at a time, with water volumes being controlled so that the cavern roof is leached out evenly (Russo 1995).

Sonar control of the cavern shape development from the horizontal well is possible only when the cavern is accessed by an additional vertical well drilled to the cavern roof.

The first essential publication on the caverns leached from a horizontal well appeared in 1993 (Thoms and Gehle 1993). However, it was stated there that “Little appears known about cavern shapes resulting from horizontal solutioning, and so an idealized shape is depicted here [...]” and [...] “The proprietary nature of data related to solution mining of SACs [Strata aligned caverns] implies that advancements have likely been made in this technology that are beyond the scope of this “feasibility” paper.”

In the 1990’s, the relevant studies were conducted by the Gaz de France Company, jointly with the co-operating companies, including the Polish Chemkop. Certain study results were presented at the SMRI Meeting in San Antonio in 1995 (Kunstman and Urbańczyk 1995; Saberian 1995; Russo 1995).

In recent years, horizontal caverns were discussed mainly (or exclusively) by the Chinese (Liu et al. 2014; Xing et al. 2015; Li et al. 2020; Zhang et al. 2020). The authors described laboratory tests, actual caverns, and a model used in leaching simulations.

Our discussion below will concern the following: the empirical base regarding horizontal caverns, mathematical and physical descriptions of the horizontal cavern leaching process, an algorithm of the model based on differential approximation, and sample results obtained during the model testing.

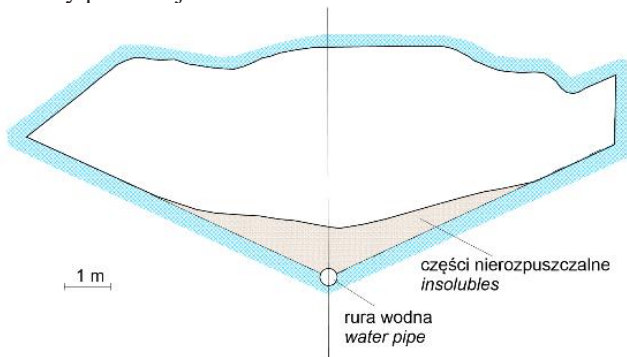
## 2. SOURCES OF KNOWLEDGE ON HORIZONTAL CAVERN LEACHING

The knowledge on horizontal cavern leaching is derived from four processes:



- kawerny pionowe ługowane bez medium izolującego strop,
- eksperymenty laboratoryjne.

Kawerny ługowanych z podziemnych wyrobisk kopalniowych nie trzeba daleko szukać. Tego typu kawerny ługowane w Polsce. Po ukończeniu ługowania solanka była z nich spuszczone i można było wykonać wewnątrz pomiary geodezyjne. Przykładem może być komora Leona Pieprzyka w Wieliczce (Woyciechowski, 1956; Pieprzyk i Radomski, 1960). Schematyczne przekroje takiej kawerny przedstawiają Ryc. 3. i Ryc. 4. Były one ługowane z izolacją stropu poprzez poduszkę powietrzną, więc o rozwoju stropu kawerny horyzontalnych ługowanych bez medium izolacyjnego nie mówią nic, można za to stwierdzić, jak rozwijają się boczne ściany kawerny poziomej.



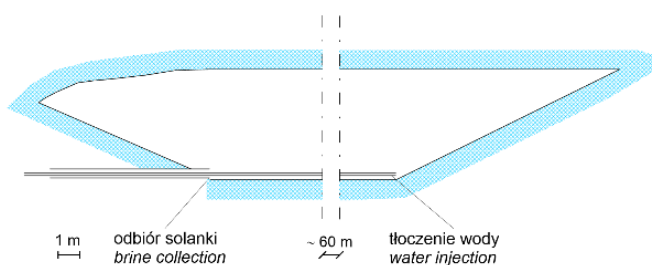
Ryc. 3. Schematyczny przekrój poprzeczny przez kawernę poziomą w kopalni Wieliczka.

Fig. 3. A schematic transverse cross-section of the horizontal cavern in the “Wieliczka” Salt Mine.

Na podstawie obserwacji tych komór można stwierdzić następujące cechy kawern poziomych:

- Nie zachodzi ługowanie w dół, blokuje je osiadanie na dnie części nierozpuszczalnych.
- Na poprzecznym przekroju przez taką kawernę widać po obu stronach od otworu początkowego, nachylenie spągu kawerny pod kątem 20–30°, związane z granicznym kątem ługowania (ryc. 3.). Podobne efekty można zaobserwować w osiowo symetrycznych kawernach „pionowych”.
- Na podłużnym przekroju przez kawernę widać z przodu i z tyłu podobne nachylenie o kącie granicznym (por. Ryc. 4.)

W pobliżu wlotu wody i odbioru solanki kształt kawerny jest z grubszy (półcylindryczny).



Ryc. 4. Schematyczny przekrój podłużny przez kawernę poziomą w kopalni Wieliczka.

Fig. 4. A schematic longitudinal cross-section of the horizontal cavern in the “Wieliczka” Salt Mine.

- horizontal caverns leached from underground mines,
- horizontal caverns leached from the surface,
- vertical caverns leached without blanked medium, and
- laboratory experiments.

The caverns leached from underground chambers can be found nearby. They were leached in Poland. After the completion of the leaching process, brine was drained and survey measurements could be conducted inside the caverns. The Leon Pieprzyk Chamber in the “Wieliczka” Salt Mine can be an example here (Woyciechowski 1956; Pieprzyk and Radomski 1960). Schematic cross-sections of that type of cavern are presented in Figs. 3 and 4. The caverns were leached with roof protection, using an air pad. Consequently, nothing can be said about the development of the horizontal cavern roof, when no blanked medium applied, although we can say how horizontal cavern walls are developing.

Based on cavern observations, one can establish the following properties of horizontal caverns:

- Downward leaching does not occur, as it is blocked by the sedimentation of insolubles at the cavern bottom.
- A transverse cross-section of the cavern shows cavern bottom sloped at the angle of 20–30°, at both sides of the initial borehole, associated with the limiting dissolution angle (Fig. 3.). Similar effects can be observed in the axisymmetrical vertical caverns.
- A longitudinal cross-section of the cavern shows similar slope at the limiting angle of leaching, both in the front and in the rear of the cavern (see Fig. 4.).

Close to the water injection and brine collection points, the cavern shape is approximately semi-cylindrical.

Even when blanket is not intentionally applied to protect the cavern roof (as it was in the case of the Leon Pieprzyk Chamber), gases contained in salt are released and they isolate the roof partially. Consequently, the main differences between caverns leached from underground excavations and those leached from the surface should be expected to occur in the shapes of the cavern roof. The caverns leached from the surface usually have a naked roof.

Classic vertical caverns leached without roof blanketing can provide us with the missing information about roof development in horizontal caverns leached from the surface. The top zone of such a cavern has a shape of an ellipsoidal dome whose proportions depend on the ratio between the vertical and the horizontal leaching rates (Kunstman and Urbańczyk 1990). In addition, the cavern roof shape can be influenced by the course of geological layers and differentiation of their leaching properties.

As to other observations carried out in the caverns leached from the surface, we can mention Cavern HA4-5 in Huai’an (China), surveyed by sonar in July 2017 (Li et al. 2020). The sonar measurements were taken through the pipes in the bent well (HA-5) and within the initial cavern (HA-4). The

W komorach kopalnianych (np. w komorze Leona Pieprzyka), wydzielają się gazy zawarte w soli i częściowo izolują strop. Główną różnicą pomiędzy kawernami wykonywanymi z wyrobisk podziemnych a kawernami wykonywanymi z powierzchni należy więc oczekiwać w kształcie stropu. Kawerny ługowane z powierzchni najczęściej nie mają izolacji stropu.

Brakującą informację o kształcie stropu kawern poziomych, ługowanych z powierzchni bez izolacji stropu, mogą dostarczyć kawerny pionowe ługowane bez medium izolacyjnego. Górna strefa takiej kawerny ma kształt elipsoidalnej kopuły, której proporcje zależą od stosunku między stropowym i bocznym współczynnikiem szybkości ługowania (Kunstman i Urbańczyk, 1990). Dodatkowo na kształt stropu może wpłynąć przebieg warstw geologicznych oraz zróżnicowanie ich własności ługowniczych.

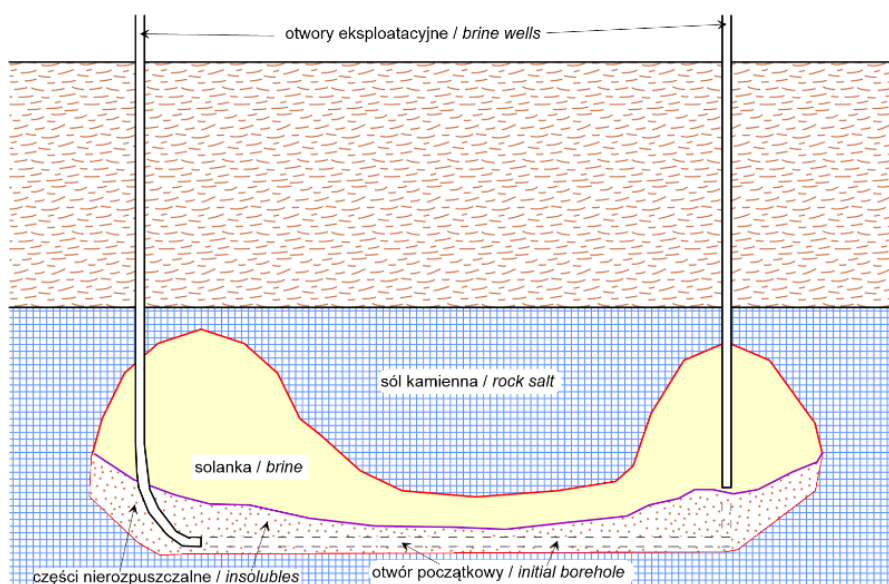
Jeżeli idzie o obserwacje w kawernach ługowanych z powierzchni, należy wspomnieć o kawernie HA4-5 w Huai'an (Chiny) mierzonej echosondą w lipcu 2017 (Li i inni, 2020). Echosonda mierzyła poprzez rury w otworze krzywionym (HA-5) i otworze kawerny inicjalnej (HA-4). Kawerna przypominała dużą literę „U”, dla echosondy dostępne były tylko jej górne odcinki. Dolne części i cała część środkowa nie były dostępne (udział części nierozpuszczalnych wynosił 45%). W celu zbadania środkowej części kawerny trzeba było odwiercić dodatkowy otwór. A zatem kawerna pozioma rozwija się przede wszystkim nad punktem podawania wody. Jeśli odwraca się obieg medium ługującego, otrzymuje się taki kształt podobny do „U”.

Ryc. 5. przedstawia schematyczny przekrój przez kawernę tego typu. Jeśli idzie o rzeczywistą kawernę HA4-5, to „ramiona” były węższe i wyższe oraz w 70% wypełnione częściami nierozpuszczalnymi, niezasypane były jedynie „czubki” kawerny oraz niewielka część pod stropem „łącznika”.

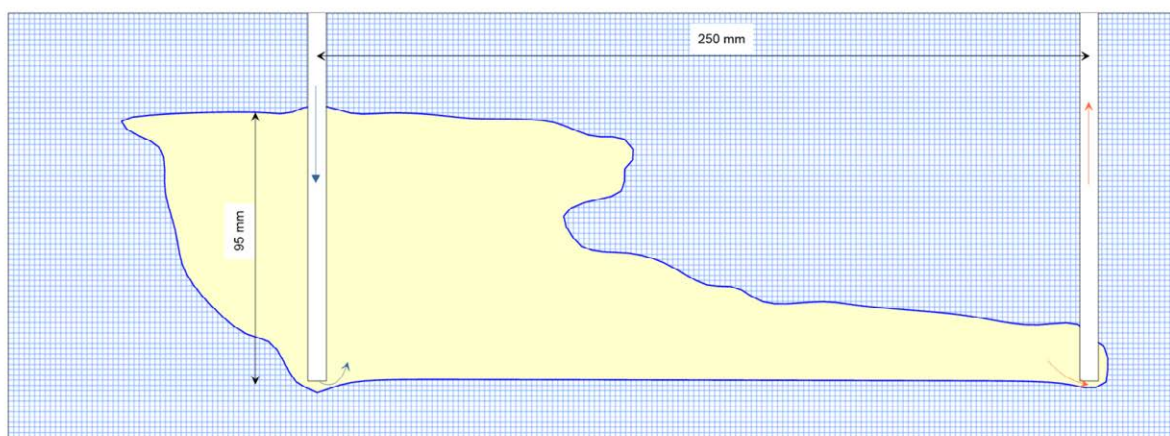
cavern was almost U-shaped. Only the top sections of both “arms” were accessible to the sonar. The lower sections and the whole central section were not accessible. The insolubles content amounted to 45%. It was necessary to drill another well to survey the central section of the cavern. Therefore, the horizontal cavern was leached primarily above the water injection point. Once the circulation of the leaching medium is reversed, leaching can produce a U-shaped cavern.

Fig. 5. presents a schematic cross-section of a horizontal cavern. As to actual Cavern HA4-5, its “arms” were narrow and high and filled with insolubles in 70%. Only the top sections of the cavern were not covered with any material, similarly to a small area under the roof of the “connector.”

Little useful information can be obtained from the previous laboratory experiments by Saberian (Saberian 1977; Saberian 1978). The only really essential information consists in the fact that the height of the cavern is decreasing in the section running from the water injection point to the brine collection point. Therefore, during cavern leaching, there occurs a significant horizontal gradient of brine concentration. Similarly to the caverns leached from underground mine excavations, the cavern roof shapes were influenced by the emission of air from water and of gases from rock salt. Besides, it was not possible to observe experimentally the development of a cavern in front of the water injection point or behind the brine collection point, which was possible in an underground salt mine. Owing to the size of a laboratory model, the influence of insolubles could not be revealed and no slope of cavern bottom with limiting angle of leaching, was visible, although those items are of key importance in the determination of the shape of the lower zone of a cavern.



Ryc. 5. Schematyczny przekrój podłużny przez kawernę poziomą w Huai'an (na podstawie Li i in. 2020).  
Fig. 5. A schematic longitudinal cross-section of the horizontal cavern in Huai'an (based on Li et al. 2020).



**Ryc. 6.** Kształt poziomej mini-kawerny w bloku solnym (na podstawie Li i in. 2020).

**Fig. 6.** Shape of the horizontal mini-cavern leached in a rock-salt block (based on Li et al. 2020).

Niewiele użytecznej informacji wynika z dawnych eksperymentów laboratoryjnych Saberiana (1977, 1978). Jediną naprawdę istotną informacją, jakiej dostarczyły jest, na pozór oczywisty fakt, że wysokość kawerny znacznie maleje na odcinku od wlotu wody do poboru solanki. Istnieje zatem w kawernie, podczas jej ługowania, poziomy gradient stężenia. Podobnie jak w przypadku komór ługowanych z wyrobisk kopalnianych, na kształt stropu kawerny wpływało wydzielenie się powietrza z wody i gazów ze skały solnej. Dodatkowo w eksperymentach nie było możliwe obserwowania rozwoju kawerny przed wlotem wody ani za poborem solanki (co dało się obserwować w kopalniach). Z uwagi na rozmiary laboratoryjnego modelu wpływ części nierozpuszczalnych nie zdążył się ujawnić i nie pojawiło się nachylenie spągu o kącie granicznym, a przecież jest to jeden z kluczowych elementów determinujących kształt dolnej części kawerny.

Znacznie lepiej były zaplanowane eksperymenty chińskie, wykorzystujące już zgromadzoną wiedzę (Li i inni, 2020). Użyto bloku solnego o rozmiarach  $450 \times 250 \times 320$  mm. Było w nim 1,5% części nierozpuszczalnych. Bok  $450 \times 320$  mm wygładzono, wyżłobiono w nim „otwory wiertnicze” i zaklejono szybą, która odpowiadała rzeczywistej płaszczyźnie symetrii kawerny. Przez 26 godzin zatłaczano wodę z wydajnością  $2 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Nad miejscem podawania wody strop szybko powędrował do góry (o 95 mm) aż powietrze wydzielające się z wody zaczęło go izolować. Nad punktem odbioru solanki strop podniósł się zupełnie nieznacznie (Ryc. 6.). Zaobserwowano też nachylenia spągu pod kątem granicznym oraz półobrotowy kształt kawerny z tyłu punktu podawania wody.

### Podsumowanie

Kawerna pozioma powinna charakteryzować się następującymi cechami:

- zwierciadlana symetria (względem pionowej płaszczyzny przechodzącej przez wlot wody i pobór solanki),

Chinese experiments were much better planned, as they were based on the knowledge accumulated so far (Li et al. 2020). A rock-salt block, with the dimensions of  $450 \times 250 \times 320$  mm was used in the experiment. The block contained 1.5% of insolubles. The  $450 \times 320$  side of the block was grinded, provided with “wells” and sealed with glass corresponding to the plane of symmetry of the actual cavern. Water was injected with the rate of  $2 \text{ cm}^3/\text{min}$ . during 26 hours. The roof quickly moved up by 95 mm over the water injection point until the air separated from water started to isolate the roof. The roof was rising in a different manner over the brine collection point (Fig. 6.). Besides, it was observed that the cavern bottom was sloped at the limiting angle of leaching, together with a semi-rotational shape of the cavern in the back of the water injection point.

### Summary

A horizontal cavern should be characterised by the following properties:

- mirror symmetry, in respect of the vertical plane, cutting through the water injection point and the brine collection point,
- no leaching below the water injection point and the brine collection point,
- limiting angle of leaching, resulting from the sliding angle of the insolubles, determining the slope of the cavern bottom,
- leaching of the cavern roof mainly over the water injection point when blanket medium is not applied, or when an insoluble layer is not reached by the cavern roof,
- cavern front extends before water injection point while cavern back extends behind brine collection point (both cavern sections are semi-cylindrical).



- brak ługowania poniżej poziomu wlotu wody i poboru solanki,
- graniczny kąt ługowania (wynikający z kąta zsypania części nierozpuszczalnych) określający nachylenie spągu kawerny,
- ługowanie stropu głównie nad miejscem podawania wody, o ile nie stosuje się medium izolacyjnego, lub strop nie trafia na warstwy nierozpuszczalne,
- przed wlotem wody ługuje się przód kawerny, a za poborem solanki tył (obydwa o kształtach półobrotowych).

## 2.1. OPIS MATEMATYCZNO-FIZYCZNY PROCESU ŁUGOWANIA KAWERN POZIOMYCH

Matematyczno-fizyczny opis procesu, który podał (Urbańczyk, 2017) stosuje się, jeśli idzie o postać ogólną również do kawern poziomych. Różnica pojawi się dopiero przy przejściu do jednowymiarowego modelu, który dla komór poziomych jest bardziej skomplikowany. Dlatego podstawowe równania opisujące proces zostaną poniżej wypisane bez ich dyskusji.

### Szybkość ługowania

Stosują się tu wzory (13), (14) i (17) ze wspomnianej pracy:

$$\omega(C, T, \psi) = k(\psi)(1 + \beta(T - T_0)) \left( \frac{C_N(T) - C}{C_N(T_0)} \right)^\alpha \left( \frac{C_N(T)}{C_N(T_0)} \right)^{2-\alpha} \quad (1)$$

gdzie:

$\omega(C, T, \psi)$  – szybkość ługowania jako funkcja stężenia, temperatury i kąta nachylenia ługowanej powierzchni względem poziomu [mm/h],

$k(\psi)$  – współczynnik szybkości ługowania zależny od kąta nachylenia ługowanej powierzchni względem poziomu [mm/h],

$C$  – stężenie ługującego medium [kg/m<sup>3</sup>],

$C_N$  – stężenie solanki nasyconej [kg/m<sup>3</sup>],

$T$  – temperatura ośrodka rozpuszczającego [°C],

$T_0$  – temperatura odniesienia [°C],

$\beta$  – współczynnik temperaturowy [1/°C], o wartości zależnej od  $T_0$ ,

$\alpha$  – wykładnik z przedziału <1,2>.

Przyjmując wartości współczynników:  $\alpha = 1,5$ ;  $\beta = 0,0262$ , a  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  otrzymuje się:

$$\omega = k(\psi)[1 + 0,0262(T - 20^\circ)] \frac{(C_N - C)^{1,5} C_N^{0,5}}{(C_N(20^\circ))^2} \quad (2)$$

$$k(\psi) = \begin{cases} 0 & \text{dla } 0 \leq \psi \leq \psi_B \\ k_h \frac{\sin^2 \psi - \sin^2 \psi_B}{1 - \sin^2 \psi_B} & \text{dla } \psi_B \leq \psi \leq \pi/2 \\ k_h \sin^2 \psi + k_v \cos^2 \psi & \text{dla } \pi/2 \leq \psi \leq \pi \end{cases} \quad (3)$$

gdzie:

$k_h$  – współczynnik ługowania bocznego ( $\psi = \pi/2$ ),

$k_v$  – współczynnik ługowania stropowego ( $\psi = \pi$ ),

## 2.1. MATHEMATICAL AND PHYSICAL DESCRIPTIONS OF THE HORIZONTAL CAVERN LEACHING PROCESS

The mathematical and physical descriptions of the process specified in (Urbańczyk 2017) are applied in general, also in the case of horizontal caverns. In case of the horizontal ones, the difference appears only when switching to a unidimensional model which is more complex in respect of the horizontal caverns. For that reason, the basic equations describing the process will be specified below, without any discussion.

### Leaching rate

Formulas (13), (14), and (17), originating from my paper mentioned above, are applied:

$$\omega(C, T, \psi) = k(\psi)(1 + \beta(T - T_0)) \left( \frac{C_N(T) - C}{C_N(T_0)} \right)^\alpha \left( \frac{C_N(T)}{C_N(T_0)} \right)^{2-\alpha} \quad (1)$$

Where:

$\omega(C, T, \psi)$  – leaching rate, as a function of salt concentration, temperature, and the inclination angle of the surface being leached, in respect of the level [mm/h],

$k(\psi)$  – leaching rate coefficient, depending on the inclination angle of the surface being leached, in respect of the level [mm/h],

$C$  – concentration of the leaching medium [kg/m<sup>3</sup>],

$C_N$  – concentration of the saturated brine [kg/m<sup>3</sup>],

$T$  – temperature of the dissolution medium [°C],

$T_0$  – reference temperature [°C],

$\beta$  – temperature coefficient [1/°C], with the value depending on  $T_0$ ,

$\alpha$  – exponent from the range of <1, 2>.

Assuming the following coefficient values:  $\alpha=1.5$ ;  $\beta=0.0262$  at  $T_0=20^\circ\text{C}$ , we obtain the following:

$$\omega = k(\psi)[1 + 0,0262(T - 20^\circ)] \frac{(C_N - C)^{1,5} C_N^{0,5}}{(C_N(20^\circ))^2} \quad (2)$$

$$k(\psi) = \begin{cases} 0 & \text{dla } 0 \leq \psi \leq \psi_B \\ k_h \frac{\sin^2 \psi - \sin^2 \psi_B}{1 - \sin^2 \psi_B} & \text{dla } \psi_B \leq \psi \leq \pi/2 \\ k_h \sin^2 \psi + k_v \cos^2 \psi & \text{dla } \pi/2 \leq \psi \leq \pi \end{cases} \quad (3)$$

Where:

$k_h$  – horizontal leaching coefficient ( $\psi=\pi/2$ ),

$k_v$  – vertical leaching coefficient ( $\psi=\pi$ ),

$\psi_B$  – limit angle of leaching; leaching ceases at small angles.

It is necessary to mention that the study (Li at al. 2020), referring to (Wu at al. 1992), described the leaching rate in a different way:

$$\omega = \begin{cases} \omega_h(1 - C/C_N) \ln \frac{T^{0,44}}{e} (\sin \psi)^{0,25} & (\psi < \pi/2) \\ \omega_h(1 - C/C_N) \ln \frac{T^{0,44}}{e} \frac{\psi}{\pi/2} & (\psi > \pi/2) \end{cases}$$



$\psi_B$  – graniczny kąt ługowania, dla kątów mniejszych ługowanie ustaje.

Trzeba wspomnieć, że w pracy (Li i in. 2020) powołując się na (Wu i in. 1992) szybkość ługowania opisana została inaczej:

$$\omega = \begin{cases} \omega_h(1 - C/C_N) \ln \frac{T^{0,44}}{e} (\sin \psi)^{0,25} & (\psi < \pi/2) \\ \omega_h(1 - C/C_N) \ln \frac{T^{0,44}}{e} \frac{\psi}{\pi/2} & (\psi > \pi/2) \end{cases}$$

Wzór ten musi budzić zdziwienie. Nie podano w jakich jednostkach ma być temperatura  $T$ . Jeśli w stopniach Celsjusza, to w niskich temperaturach (np. 5°C) szybkość ługowania jest ujemna, jeśli zaś jest to temperatura bezwzględna, to zależność od temperatury jest prawie żadna. Także dla skali Fahrenheita zmienność jest nieznaczna. Wykluczone jest też, by rzeczywista zależność od stężenia była liniowa. Wątpliwa jest również linowa zależność od kąta, dla kątów powyżej  $\pi/2$ . Na dodatek nie podano dla jakiej temperatury wyznacza się  $\omega_h$  – horyzontalną szybkość ługowania w czystej wodzie. Szybkość ługowania stropowego jest dwukrotnie wyższa niż szybkość ługowania bocznego.

## 2.2. TRANSPORT SOLI W KAWERNIE

Prawo to w postaci globalnej, która jest najogólniejsza, wygląda następująco:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V C dV = - \oint_{\Gamma} (C \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS + \oint_{\Gamma} (D_T \nabla C \cdot \mathbf{n}) dS + \int_V (q_w C_w) dV + \int_A (p_s \rho_{zl} \omega) dA - \int_B (\omega_n (w_r - 1)) dB \quad (4)$$

gdzie:

$A$  – fragment powierzchni  $\Gamma$  będący powierzchnią graniczną kawerny ze skałą solną [ $m^2$ ] (może być zerowy, jeśli cała objętość  $V$  zawarta jest wewnątrz kawerny),

$B$  – fragment powierzchni  $\Gamma$  będący dnem kawerny [ $m^2$ ],

$C$  – stężenie solanki [ $kg/m^3$ ],

$C_w$  – stężenie źródeł zewnętrznych (zatłaczanej wody i odbieranej solanki) [ $kg/m^3$ ],

$D_T$  – współczynnik dyfuzji turbulentnej [ $m^2/s$ ],

$\mathbf{n}$  – wektor normalny do powierzchni  $\Gamma$  skierowany na zewnątrz,

$p_s$  – zawartość soli rozpuszczalnej w skałe solnej,

$q_w$  – wydajność źródeł zewnętrznych na jednostkę objętości [ $1/s$ ],

$t$  – czas [ $s$ ],

$\mathbf{v}$  – lokalna średnia prędkość przepływu przez solankę [ $m/s$ ],

$w_r$  – współczynnik rozluźnienia części nierozpuszczalnych w zasypie [-],

$V$  – rozpatrywana objętość [ $m^3$ ] (należy zwrócić uwagę, że może ona być zmienna w czasie, jeśli obejmuje rozpuszczany ocios kawerny, lub zasypywane dno,

$\Gamma$  – zamknięta powierzchnia brzegowa objętości  $V$  [ $m^2$ ],

$\rho_{zl}$  – gęstość skały solnej [ $kg/m^3$ ],

That formula must raise astonishment. No units of the temperature  $T$  were given. If in Celsius, the leaching rate will be negative at low temperature (e.g. 5°C). If, however, absolute temperature is meant, the dependence on temperature is next to none. Insignificant temperature also occurs in the case of the Fahrenheit scale. Real linear dependence on brine concentration is impossible. Besides, linear dependence on the angle, for the angles exceeding  $\pi/2$ , is also doubtful. In addition, no temperature was specified for the determination of  $\omega_h$  – horizontal leaching rate in fresh water. The vertical leaching rate is twice as high as the horizontal leaching rate.

## 2.2. SALT TRANSPORT IN THE CAVERN

The law is the following in its most general global form:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V C dV = - \oint_{\Gamma} (C \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS + \oint_{\Gamma} (D_T \nabla C \cdot \mathbf{n}) dS + \int_V (q_w C_w) dV + \int_A (p_s \rho_{zl} \omega) dA - \int_B (\omega_n (w_r - 1)) dB \quad (4)$$

Where:

$A$  – a fragment of surface  $\Gamma$ , being the cavern boundary surface, with the rock salt [ $m^2$ ] (can be equal to zero for the volume  $V$  entirely contained within the cavern),

$B$  – a fragment of surface  $\Gamma$ , being the cavern bottom (sump roof) [ $m^2$ ],

$C$  – concentration of brine [ $kg/m^3$ ],

$C_w$  – concentration of external sources (injected water and collected brine) [ $kg/m^3$ ],

$D_T$  – turbulent diffusion coefficient [ $m^2/s$ ],

$\mathbf{n}$  – versor normal to surface  $\Gamma$ , directed outside,

$p_s$  – soluble content in rock salt,

$q_w$  – capacity of external sources per unit of volume [ $1/s$ ],

$t$  – time [ $s$ ],

$\mathbf{v}$  – local average rate of flow in brine [ $m/s$ ],

$w_r$  – loosening coefficient (bulking factor) for the insolubles deposited in the sump [-],

$V$  – considered volume [ $m^3$ ] (note that the volume can change in time if it entails the cavern wall being leached or the cavern bottom covered with insolubles,

$\Gamma$  – closed boundary surface of the volume  $V$  [ $m^2$ ],

$\rho_{zl}$  – rock salt density [ $kg/m^3$ ],

$\omega$  – leaching rate [ $m/s$ ],

$\omega_n$  – rate of sump level increase [ $m/s$ ].

$\int_V q_w dV = Q_{WE}$  (water injection capacity) if the water pipe's outlet is placed within the volume  $V$ ; otherwise, it equals to zero,

$\int_V q_w dV = -Q_{WY}$  (brine collection capacity) if the brine pipe's outlet is placed within the volume  $V$ ; otherwise, it equals to zero.

$\omega$  – szybkość lugowania [m/s],

$\omega_n$  – szybkość narastania zasypu [m/s].

$\int_V q_w dV = Q_{WE}$  (wydajność zatłaczania wody), jeżeli wylot rury wodnej znajduje się wewnątrz objętości  $V$ , inaczej jest zerowa

$\int_V q_w dV = -Q_{WY}$  (wydajność odbioru solanki), jeżeli wylot rury solankowej znajduje się wewnątrz objętości  $V$ , inaczej jest zerowa.

### 2.3. POLE PRZEPLYWU WEWNĄTRZ KAWERNY

Pole przepływu w kawernie jest opisane równaniem zachowania pędu, które w postaci globalnej ogólnie ma postać (równanie (24) w Urbańczyk, 2017):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \mathbf{v} dV + \oint_r \rho \mathbf{v} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = \int_V \rho \mathbf{G} dV + \oint_r \mathbf{\Pi} \cdot \mathbf{n} dS + \int_V \mathbf{a}_w dV \quad (5)$$

gdzie:

$\mathbf{a}_w$  – wydajność źródeł pędu z zewnątrz [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^2$ ] (związana z tłoczeniem wody i odbiorem solanki),

$\mathbf{G}$  – pole grawitacyjne [ $\text{m}/\text{s}^2$ ],

$p$  – ciśnienie w kawernie [Pa],

$\mathbf{v}$  – lokalna średnia prędkość przepływu solanki [m/s],

$\mathbf{\Pi}$  – tensor naprężeń (turbulentnych) [Pa],

$\rho$  – lokalna średnia gęstość solanki [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$\int_V \mathbf{a}_w dV = \rho_{WE} v_{WE} Q_{WE}$  wydajność dopływu pędu wody, jeżeli wylot rury wodnej znajduje się wewnątrz objętości  $V$ ,

$\int_V \mathbf{a}_w dV = -\rho_{WY} v_{WY} Q_{WY}$  wydajność odpływu pędu solanki, jeżeli wylot rury solankowej znajduje się wewnątrz objętości  $V$ .

### 2.4. RÓWNANIE CIĄGŁOŚCI

W przypadku cieczy mało ściśliwej, niejednorodnej, gdy pojawia się kontrakcja towarzysząca przechodzeniu soli z fazy stałej do roztworu, ogólna postać tego równania powinna być następująca:

$$-\oint_r (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS = \int_A \left( p_s \omega \left( 1 - \frac{\rho_{zl}}{\rho_{sr}} \right) \right) dA + \int_V q_w dV \quad (6)$$

gdzie:

$\rho_{zl}$  – efektywna gęstość soli w roztworze (solance) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ], pozostałe oznaczenia jak we wzorze (4).

Sformułowany powyżej model nie jest kompletny bez opisu turbulencji, podobnie jak dla kawern pionowych. O ile w kawernach pionowych grawitacja jest skierowana równoległe (bądź antyrównoległe) do kierunku przepływu, o tyle w przypadku kawern poziomych grawitacja jest prostopadła do głównego kierunku przepływu. Nie można więc zakładać, że dochodzi do pełnego wymieszania solanki. Jednak ogólne opisu takiej turbulencji do tej pory brak.

### 2.3. FIELD OF FLOW WITHIN THE CAVERN

The field of flow within the cavern is described by the momentum preservation equation whose general global form is as follows (Equation (24) in (Urbańczyk 2017)):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \mathbf{v} dV + \oint_r \rho \mathbf{v} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = \int_V \rho \mathbf{G} dV + \oint_r \mathbf{\Pi} \cdot \mathbf{n} dS + \int_V \mathbf{a}_w dV \quad (5)$$

Where:

$\mathbf{a}_w$  – capacity of the outside momentum source [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^2$ ] (associated with water injection and brine collection),

$\mathbf{G}$  – gravity field [ $\text{m}/\text{s}^2$ ],

$p$  – pressure in the cavern [Pa],

$\mathbf{v}$  – local average brine flow rate [m/s],

$\mathbf{\Pi}$  – tensor of turbulent stresses [Pa],

$\rho$  – local average brine density [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$\int_V \mathbf{a}_w dV = \rho_{WE} v_{WE} Q_{WE}$  the capacity of water momentum inflow if the water pipe outlet is placed within the volume  $V$ ,

$\int_V \mathbf{a}_w dV = -\rho_{WY} v_{WY} Q_{WY}$  the capacity of brine momentum outflow if the brine pipe outlet is placed within the volume  $V$ .

### 2.4. CONTINUITY EQUATION

In the case of hardly compressible and heterogeneous liquids, where contraction appears accompanying the transition of salt from the solid phase to solution, the general form of this equation should be as follows:

$$-\oint_r (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS = \int_A \left( p_s \omega \left( 1 - \frac{\rho_{zl}}{\rho_{sr}} \right) \right) dA + \int_V q_w dV \quad (6)$$

Where:

$\rho_{zl}$  – effective density of salt dissolved in brine [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

The meanings of the remaining symbols are the same as those in Formula (4).

The horizontal cavern model formulated above is not complete without a description of turbulence, analogously to the case of vertical caverns. Gravitation is directed parallel (or anti-parallel) to the direction of flow in vertical caverns; however, in the case of horizontal caverns, gravitation is perpendicular to the main direction of flow. Therefore, we may not assume that brine becomes fully mixed. A general description of such turbulence is not available yet.

### 2.5. SUMMARY

In the case of the horizontal cavern, the description of the leaching process is composed of the same equations as in the case of the vertical cavern, including the equations for leaching rate, salt transport, flow rate, and continuity with bound-

## 2.5. PODSUMOWANIE

W przypadku kawerny poziomej na opis procesu ługowania składają się te same równania, co w przypadku kawerny pionowej: wzór na szybkość ługowania, równanie transportu, równanie przepływu, równanie ciągłości z warunkami brzegowymi, do których powinno się dołączyć równania opisujące turbulencję. Niestety, brak do tej pory ogólnego opisu turbulencji dla przypadku ługowania soli.

## 3. PRZYJMOWANE PRZYBLIŻENIA

W kawernie poziomej można wyróżnić trzy strefy: strefę ługowania nad punktem podawania medium ługującego (wody), kawernę dosycającą, lub w razie jej braku strefę poza punktem odbioru solanki oraz położoną pomiędzy nimi strefę przepływu poziomego.

Nad punktem podawania wody rozwój kawerny odbywa się podobnie, jak w przypadku ługowania w prawym obiegu kawerny pionowej. Również w kawernie dosycającej ługowanie odbywa się, jak w przypadku kawerny pionowej. Obszar między punktem podawania wody a punktem odbioru solanki, dzieli się krokiem równomiernym na bloki aproksymacyjne. Wstecz, przed punktem podawania wody, wystarczy jeden blok półobrotowy. Podobnie poza punktem odbioru solanki, gdy brak kawerny dosycającej. Jednak ługowanie ponad wylotem rury wodnej przebiega na tyle szybko, że można rozpatrywać tę część kawerny, jako osiowo-symetryczną kawernę i w miarę wzrostu jej średnicy, zagarnięte przez nią bloki aproksymacyjne eliminować z modelu. Ilustrują to ryc. 7 i ryc. 8. Należy jednak w bilansie uwzględnić dodatkową objętość bloków zagarniętych niecałkowicie przez blok osiowo-symetryczny. Określenie zasięgu tego bloku, jego objętości oraz powierzchni podlegającej ługowaniu jest najtrudniejszym elementem uproszczonego modelu.

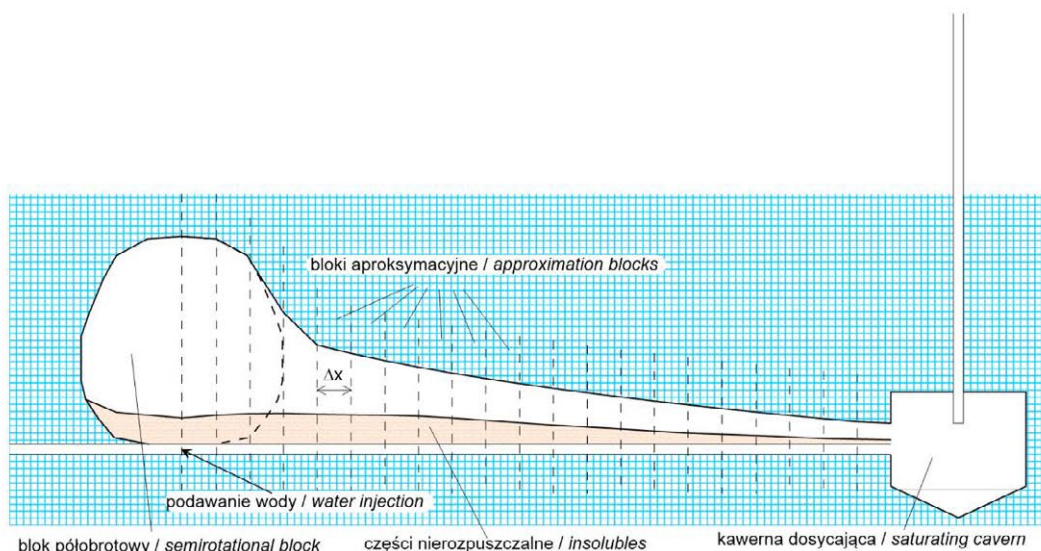
ary conditions, supplemented with the turbulence equations. Unfortunately, no general turbulence description is available for salt leaching.

## 3. ASSUMED APPROXIMATIONS

We can distinguish three zones in the horizontal cavern: the leaching zone above the leaching medium (water) injection point, the saturating cavern, or, when it is absent, the zone outside the brine collection point, and the horizontal flow zone situated between the previous two zones.

Above the water injection point, the cavern development process runs similarly to that of vertical cavern leaching with the direct circulation. Also in the saturation cavern, the leaching process is similar to that of the vertical cavern. The area between the water injection point and the brine collection point is subdivided into approximation blocks in even steps. In front of the water injection point, one semi-rotational block is sufficient. Similarly, behind the brine collection point when there is no saturation cavern. However, the leaching process runs fast enough above the water injection outlet and we can treat that section of the cavern as an axially symmetrical block. With the increase of the cavern diameter, the approximation blocks occupied by that section can be eliminated from our model. That is illustrated in Figs. 7 and 8. In our balance, we need to take into account additional volumes of the blocks only partially occupied by the axially symmetrical block. The determinations of the extent of that block, its volume, and surface subjected to the leaching process belong to the most demanding components of the simplified model.

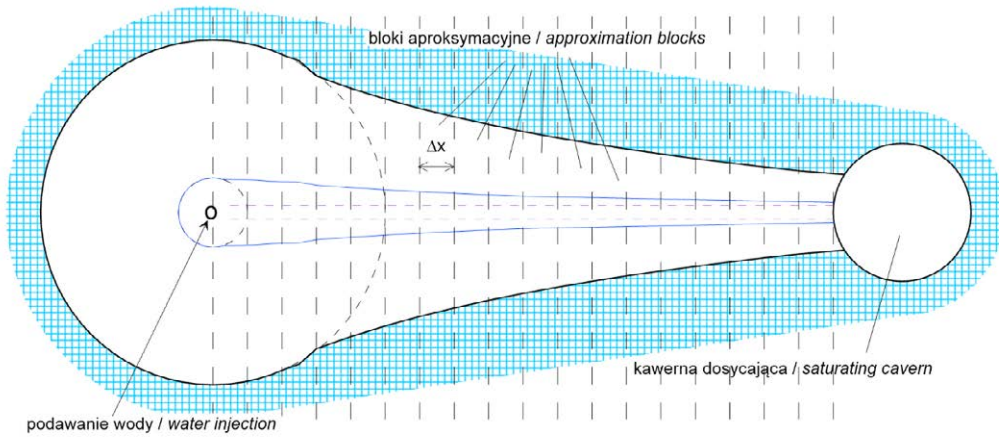
The boundary of each block is approximated with a broken line (polyline), similarly to the case of the vertical cavern (Kunzman and Urbańczyk 2018). In each of the blocks, the boundary contour is displaced in accordance with the rules given there.



Ryc. 7. Schematyczny przekrój wzdłuż kawerny poziomej ze schematem aproksymacyjnym.

Fig. 7. A schematic longitudinal cross-section of a horizontal cavern, with an approximation scheme.





**Ryc. 8.** Schematyczny przekrój poziomy kawerny poziomej ze schematem aproksymacyjnym.  
**Fig. 8.** A schematic horizontal cross-section of a horizontal cavern, with an approximation scheme.

Brzeg w każdym z bloków aproksymuje się łamaną, podobnie jak w kawernie pionowej (Kunstman i Urbańczyk, 2018). W każdym z bloków przemieszcza się kontur brzegu zgodnie z regułami tam podanymi.

W osiowo-symetrycznym bloku nad wylotem rury wodnej, można uśrednić stężenie, tak jak przy obiegu prawym w kawernie pionowej. Model osiowo-symetrycznego bloku nad wylotem rury wodnej będzie więc uproszczonym modelem kawerny pionowej, podobnie otoczenie miejsca poboru solanki. Model taki przedstawiony został w poprzednich tekstach. Pozostaje do opisu model przepływu poziomego. Jako pierwsze przybliżenie można przyjąć, że w każdym z takich bloków stężenie jest jednakowe. Wtedy równania znacznie się upraszczają, podobnie jak w jednowymiarowym modelu kawerny pionowej.

Równanie transportu soli otrzymuje postać:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{x_1}^{x_2} S(x, t) C(x, t) dx = S(x_2, t) \left( v(x_2, t) C(x_2, t) - D(x_2, t) \frac{\partial C(x_2, t)}{\partial x} \right) - S(x_1, t) \left( v(x_1, t) C(x_1, t) - D(x_1, t) \frac{\partial C(x_1, t)}{\partial x} \right) + \int_{x_1}^{x_2} \mathcal{A}(x, t) dx - \int_{x_1}^{x_2} \mathcal{B}(x, t) dx \quad (7)$$

gdzie:

$\mathcal{A}(x, t)$  – liniowa gęstość dopływu soli w efekcie ługowania ścian kawerny na odległości  $x$  w chwili  $t$  [kg/m s],

$\mathcal{B}(x, t)$  – liniowa gęstość pozostawiania soli w solance wypełniającej pory zasypu na dnie kawerny na odległości  $x$  w chwili  $t$  [kg/m s],

$C(x, t)$  – stężenie solanki na odległości  $x$ , w chwili  $t$  [kg/m<sup>3</sup>],

$D(x, t)$  – współczynnik dyfuzji turbulentnej na odległości  $x$ , w chwili  $t$  [m<sup>2</sup>/s],

$S(x, t)$  – pole przekroju kawerny (bez zasypu) na odległości  $x$ , w chwili  $t$  [m<sup>2</sup>],

$v(x, t)$  – prędkość średniego przepływu przez kawernę na odległości  $x$ , w chwili  $t$  [m/s].

$x_1, x_2$  – granice odcinka, w którym równanie bilansuje masę soli [m],  $x \in (x_1, x_2)$ .

$$\mathcal{A}(x, t) = \int_{\Lambda} \frac{\omega(x, l, t) p_s(l) \rho_{z1}}{\cos \zeta} dl \quad (8)$$

$$\mathcal{B}(x, t) = C(x, t) (w_r - 1) \int_{\Lambda} \frac{\omega(x, l, t) p_n(l)}{\cos \zeta} dl \quad (9)$$

In the axially symmetrical block above the water pipe's outlet, salt concentration can be averaged, just like in the case of the direct circulation in the vertical cavern. The model of the axially symmetrical block above the water pipe outlet will thus present a simplified model of the vertical cavern, and the same concerns the surrounding area of the brine collection point. Such a model was presented in the Author's previous papers. What is required here is a description of the horizontal flow model. We can assume, as the first approximation, that salt concentration is uniform in each of the blocks. In that case, the equations become much simplified, similarly to the case of the unidimensional model of the vertical cavern.

The salt transport equation will assume the following form:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{x_1}^{x_2} S(x, t) C(x, t) dx = S(x_2, t) \left( v(x_2, t) C(x_2, t) - D(x_2, t) \frac{\partial C(x_2, t)}{\partial x} \right) - S(x_1, t) \left( v(x_1, t) C(x_1, t) - D(x_1, t) \frac{\partial C(x_1, t)}{\partial x} \right) + \int_{x_1}^{x_2} \mathcal{A}(x, t) dx - \int_{x_1}^{x_2} \mathcal{B}(x, t) dx \quad (7)$$

Where:

$\mathcal{A}(x, t)$  – linear density of salt inflow, as a result of cavern wall leaching, at the distance of  $x$  and at the time of  $t$  [kg/m s],

$\mathcal{B}(x, t)$  – linear density of salt remaining in brine that fills the sump pores on the cavern bottom, at the distance of  $x$  and at the time of  $t$  [kg/m s],

$C(x, t)$  – concentration of brine at the distance of  $x$  and the time of  $t$  [kg/m<sup>3</sup>],

$D(x, t)$  – turbulent diffusion coefficient at the distance of  $x$  and the time of  $t$  [m<sup>2</sup>/s],

$S(x, t)$  – area of cavern cross-section (without sump) at the distance of  $x$  and the time of  $t$  [m<sup>2</sup>],

$v(x, t)$  – average flow rate across the cavern at the distance of  $x$  and the time of  $t$  [m/s].

$x_1, x_2$  – boundaries of the section in which the equation balances the salt weight [m],  $x \in (x_1, x_2)$ .

$$\mathcal{A}(x, t) = \int_{\Lambda} \frac{\omega(x, l, t) p_s(l) \rho_{z1}}{\cos \zeta} dl \quad (8)$$

$$\mathcal{B}(x, t) = C(x, t) (w_r - 1) \int_{\Lambda} \frac{\omega(x, l, t) p_n(l)}{\cos \zeta} dl \quad (9)$$



gdzie:

$l$  – długość mierzona wzdłuż konturu rozpatrywanego przekroju [m],

$p_n$  – udział części nierozpuszczalnych w skale solnej [-],

$p_s$  – udział soli rozpuszczalnych w skale solnej [-],

$w_r$  – współczynnik rozluźnienia części nierozpuszczalnych w zasypie [-],

$\zeta$  – kąt między przecięciem płaszczyzny XZ z konturem a osią X [-],

$\Lambda$  – kontur rozpatrywanego poprzecznego przekroju [m],

$\rho_{zI}$  – gęstość skały solnej [kg/m<sup>3</sup>],

$\omega(x, l, t)$  – szybkość ługowania na odległości  $x$ , w chwili  $t$ , na współrzędnej konturu  $l$  [m/s].

Ocios kawerny można opisać jako powierzchnię  $Y(x, h, t)$ , wyrażając szerokość na danej odległości, na danej głębokości, zmieniającą się w czasie. Wtedy można wyrazić szybkość ługowania poprzez pochodne cząstkowe powierzchni  $Y(x, h, t)$  po czasie. Tak samo można wyrazić kąty, czy parametr  $l$ . Zależności są jednak nie tylko skomplikowane, ale też, jak dotąd, bez praktycznego zastosowania.

Jako równanie przepływu przez kawernę w przypadku jednowymiarowym wystarczy równanie ciągłości. Sprawdzają się one do bilansu objętości, w którym zaniedbuje się, jako nieistotne, zmiany objętości wywołane ściślnością solanki oraz zmianami jej temperatury, pozostaje natomiast defekt objętości wywołany kontrakcją towarzyszącą przechodzeniu soli z krystalicznej skały solnej do roztworu.

Sprowadza się to do następującego równania:

$$\frac{\partial}{\partial x}(S(x, t)v(x, t)) = - \int_{\Lambda} \omega(x, l, t)p_s(l) \left(1 - \frac{\rho_{zI}}{\rho_{sr}}\right) dl \quad (10)$$

gdzie:

$S(x, t)$  - powierzchnia przekroju poprzecznego kawerny [m<sup>2</sup>],

$v(x, t)$  - prędkość średniego przepływu przez kawernę [m/s],

$\omega(x, y, h, t)$  - szybkość ługowania skały solnej [m/s],

$p_s(z)$  - udział soli rozpuszczalnych w skale solnej [-],

$\rho_{zI}$  - gęstość skały solnej [kg/m<sup>3</sup>],

$\rho_{sr}$  - gęstość soli rozpuszczonej w solance, po kontrakcji (masa soli na różnicę objętości solanki i czystej wody) [kg/m<sup>3</sup>],

$\Lambda(x, t)$  - kontur przekroju poprzecznego kawerny [m].

Jeśli założyć, że części nierozpuszczalne nie są unoszone z wodą, ale opadają na dno, plus minus w przedziale, z którego się wzięły, to przyrost objętości zasypu na dnie, będzie wyrażał się wzorem:

$$\frac{\partial}{\partial t}(V_z) = \int_{\Lambda} \omega(x, l, t)p_n(l)w_r dl \quad (11)$$

gdzie oznaczenia jak we wzorach (8-9).

Warunki brzegowe stanowią blok podawania wody i blok odbioru solanki. W bloku podawania wody strumień dopływającej soli jest niezerowy tylko wtedy, gdy woda zastąpiona jest półsolanką:

$$\frac{d(V_C)}{dt} = Q_0C_0 - S(x_2, t)(v(x_2, t)C(x_2, t) - D(x_2, t)\frac{\partial C(x_2, t)}{\partial x}) + \frac{dV}{dt}(\rho_{zI}p_s - Cp_n(w_r - 1)) \quad (12)$$

Where:

$l$  – length measured along the contour of the cross-section under consideration [m],

$p_n$  – insolubles content in rock salt [-],

$p_s$  – soluble content in rock salt [-],

$w_r$  – loosening coefficient (bulking factor) for the insolubles deposited in sump [-],

$\zeta$  – the angle between the crossing line of plane XZ with contour and axes X [-],

$\Lambda$  – contour of the cross-section under consideration [m],

$\rho_{zI}$  – rock salt density [kg/m<sup>3</sup>],

$\omega(x, l, t)$  – leaching rate at the distance of  $x$  and the time of  $t$ , on the coordinate of contour  $l$  [m/s].

The cavern wall can be described as the surface  $Y(x, h, t)$ , changing in time, expressing the cavern width at the given distance and at the given depth. Then, it is possible to express the leaching rate by partial derivatives of the surface  $Y(x, h, t)$  over time. Angles or the parameter  $l$  can be expressed in the same way. However, the dependences are complicated and moreover, they have not found any practical application as yet.

The continuation equation is sufficient, as the equation of the flow in the cavern, in the unidimensional case. That equation is reduced to the volume balance where the changes in volume, caused by the compressibility of brine and the changes in brine temperature, can be neglected as non-essential. However, what remains is the volume defect, caused by the contraction accompanying the transition of salt from the crystalline phase to solution.

The process is reduced to the following equation:

$$\frac{\partial}{\partial x}(S(x, t)v(x, t)) = - \int_{\Lambda} \omega(x, l, t)p_s(l) \left(1 - \frac{\rho_{zI}}{\rho_{sr}}\right) dl \quad (10)$$

Where:

$S(x, t)$  – cavern transverse cross-section surface area [m<sup>2</sup>],

$v(x, t)$  – average flow rate across the cavern [m/s],

$\omega(x, y, h, t)$  – leaching rate of rock salt [m/s],

$p_s(z)$  – soluble content in rock salt [-],

$\rho_{zI}$  – rock salt density [kg/m<sup>3</sup>],

$\rho_{sr}$  – density of salt dissolved in brine after contraction (salt mass per the difference in the volume of brine and fresh water) [kg/m<sup>3</sup>],

$\Lambda(x, t)$  – contour of the cavern cross-section [m].

If we assume that insolubles are not removed by water, but are deposited on the cavern bottom, more or less within the block from which they originated, the increase of the sump volume can be expressed by the following equation:

$$\frac{\partial}{\partial t}(V_z) = \int_{\Lambda} \omega(x, l, t)p_n(l)w_r dl \quad (11)$$

The meanings of the symbols are the same as those in formulas (8) and (9).

W bloku odbioru, strumień odpływającej soli równy jest wydajności odbioru solanki przemnożonej przez jej stężenie.

$$\frac{d(VC)}{dt} = QC + S(x_1, t) \left( v(x_1, t)C(x_1, t) - D(x_1, t) \frac{\partial C(x_1, t)}{\partial x} \right) + \frac{dV}{dt} (\rho_{zl} p_s - Cp_n (w_r - 1)) \quad (13)$$

gdzie:

$C_0$  – stężenie medium ługującego, dla wody zero [kg/m<sup>3</sup>],

$C(x, t)$  – stężenie solanki na odległości  $x$ , w chwili  $t$  [kg/m<sup>3</sup>],

$D(x, t)$  – współczynnik dyfuzji turbulentnej na odległości  $x$ , w chwili  $t$  [m<sup>2</sup>/s],

$p_n$  – udział części nierozpuszczalnych w skale solnej [-],

$p_s$  – udział soli rozpuszczalnych w skale solnej [-],

$Q_0$  – wydajność zatłaczania medium ługującego (wody) [m<sup>3</sup>/s],

$Q$  – wydajność odbioru solanki [m<sup>3</sup>/s],

$S(x, t)$  – pole przekroju kawerny (bez zasypu) na odległości  $x$ , w chwili  $t$  [m<sup>2</sup>],

$v(x, t)$  – prędkość średniego przepływu przez kawernę na odległości  $x$ , w chwili  $t$  [m/s],

$V$  – objętość bloku brzegowego [m<sup>3</sup>] (dla każdego z bloków inna),

$w_r$  – współczynnik rozluźnienia części nierozpuszczalnych w zasypie [-],

$x_2$  – współrzędna przekroju graniczącego z pierwszym blokiem liniowym [m],

$x_1$  – współrzędna przekroju graniczącego z ostatnim blokiem liniowym [m],

$\rho_{zl}$  – gęstość skały solnej [kg/m<sup>3</sup>].

Strumień objętości jest równy wydajności odbioru solanki ze znakiem ujemnym. Różnica między obiema wydajnościami jest równa całkowitej kontrakcji soli przechodzącej ze skały solnej do solanki.

Aby model był kompletny, trzeba przyjąć jakiś współczynnik dyfuzji. Wydaje się, że nie powinno się jej pomijać, z uwagi na występowanie poziomego gradientu stężenia. Jedyną znaną autorowi propozycją w tej materii model dyfuzji turbulentnej zastosowany przez Sandia National Laboratories w modelu Sansmic (Russo, 1981; 1983). Oparty jest on na analizie niestabilności grawitacyjnych w (Morton i inni, 1956) oraz (Plesset i Whipple, 1974) ze współczynnikami empirycznymi dobranymi na podstawie obserwacji transportu soli w otworze wiertniczym i wnikania solanki do warstw wodonośnych (Knapp i Podio 1979, Russo 1983):

Zaproponowany tam współczynnik dyfuzji turbulentnej jest następujący:

$$D_{tur} = D_0 \left( \frac{1}{\rho_w} \frac{d\rho}{dx} \right)^{1/2} \min(y^2, l^2) \quad (14)$$

gdzie:

$D_0$  – stała empiryczna, wynosząca ok. 17,5 m<sup>2</sup>/s (31,7 ft<sup>2</sup>/s),

$\rho_w$  – gęstość wody, ok. 1000 kg/m<sup>3</sup>,

$y$  – lokalna pół-szerokość kawerny [m],

The boundary conditions constitute the water injection block and the brine collection block. In the water injection block, the stream of inflowing salt is not equal to zero only when water has been replaced by semi-brine:

$$\frac{d(VC)}{dt} = Q_0 C_0 - S(x_2, t) \left( v(x_2, t)C(x_2, t) - D(x_2, t) \frac{\partial C(x_2, t)}{\partial x} \right) + \frac{dV}{dt} (\rho_{zl} p_s - Cp_n (w_r - 1)) \quad (12)$$

In the brine collection block, the stream of outflowing salt is equal to the capacity of brine collection multiplied by brine concentration.

$$\frac{d(VC)}{dt} = QC + S(x_1, t) \left( v(x_1, t)C(x_1, t) - D(x_1, t) \frac{\partial C(x_1, t)}{\partial x} \right) + \frac{dV}{dt} (\rho_{zl} p_s - Cp_n (w_r - 1)) \quad (13)$$

Where:

$C_0$  – concentration of leaching medium; zero for water [kg/m<sup>3</sup>],

$C(x, t)$  – concentration of brine at the distance of  $x$  and the time of  $t$  [kg/m<sup>3</sup>],

$D(x, t)$  – turbulent diffusion coefficient at the distance of  $x$  and the time of  $t$  [m<sup>2</sup>/s],

$p_n$  – insolubles content in rock salt [-],

$p_s$  – soluble content in rock salt [-],

$Q_0$  – injection capacity of leaching medium (water) [m<sup>3</sup>/s],

$Q$  – brine collection capacity [m<sup>3</sup>/s],

$S(x, t)$  – area of the cavern cross-section (without sump) at the distance of  $x$  and the time of  $t$  [m<sup>2</sup>],

$v(x, t)$  – average flow rate through the cavern at the distance of  $x$  and the time of  $t$  [m/s],

$V$  – boundary block volume [m<sup>3</sup>] (different for each block),

$w_r$  – loosening coefficient (bulking factor) for the insolubles deposited in the sump [-],

$x_2$  – coordinate of the cross-section adjacent to the first linear block [m],

$x_1$  – coordinate of the cross-section adjacent to the last linear block [m],

$\rho_{zl}$  – rock salt density [kg/m<sup>3</sup>].

The stream of volume is equal to the capacity of brine collection, but with the negative sign. The difference between both capacities is equal to the total contraction of salt, passing from rock salt to brine.

For our model to be complete, it is necessary to assume a diffusion coefficient. It seems that diffusion should not be omitted, owing to the occurrence of a horizontal gradient of salt concentration. The only relevant proposal known to the Author is the turbulent diffusion model applied by the Sandia National Laboratories in the Sansmic Model (Russo 1981, 1983). That model is based on the analysis of gravitational instabilities of (Morton et al. 1956) and (Plesset and Whipple 1974), with the empirical coefficients selected on the basis of the investigation of salt transport in vertical boreholes and brine inflow into fresh water aquifers (Knapp and Podio 1979, Russo 1983):

$l$  – lokalny zasięg turbulencji [m], określony poniższym wzorem:

$$l = \left(\frac{6\pi}{\alpha}\right)^{3/4} \left(\frac{2v^2\rho}{g\frac{d\rho}{dx}}\right)^{1/4} \quad (15)$$

gdzie:

$\alpha$  – współczynnik empiryczny przyjęty dla Sansmic jako równy 0,064, z zastrzeżeniem, że bywa też podawany jako bliski 0,08,

$g$  – przyspieszenie ziemskie [m/s<sup>2</sup>],

$v$  – kinematyczna lepkość solanki w kawernie [m<sup>2</sup>/s].

W warunkach panujących w kawernie poziomej, lokalny zasięg turbulencji wyliczony wzorem (15) jest rzędu 10-20 cm, czyli jest stale mniejszy od pół-szerokości kawerny. Można więc wzór (14) uprościć następująco:

$$D_{tur} = D_0 v \left(\left(\frac{6\pi}{\alpha}\right)^3 \frac{2\rho}{g\rho_w}\right)^{1/2} \quad (16)$$

Wyliczone w ten sposób wartości są rzędu 0,06 m<sup>2</sup>/s, a więc znacznie wyższe, niż stała dyfuzji molekularnej. Czy jednak wzór (14) jest stosowalny w warunkach przepływu poziomego? Intuicyjnie się wydaje, że turbulencja wywołana gradientem stężenia powinna mieć większe znaczenie niż pochodząca od burzliwości przepływu. Współczynnik dany wzorem (16) jest niemal stały. W praktyce efekt jego działania wydaje się taki, jakby przepływ soli odbywał się z nieco niższą prędkością niż przepływ wody. Może więc rola dyfuzji turbulentnej mimo wszystko nie jest aż tak istotna?

Należy ostrzec, że w pracy (Li i inni, 2020) podano równanie transportu w następującej postaci:

$$C_{i-1}Q_{i-1} - C_iQ_i + \rho \frac{dV_i}{dt}(1 - u_i) = \frac{d(C_iQ_i)}{dt}$$

gdzie:

$C$  – stężenie [kg/m<sup>3</sup>],

$Q$  – przepływ [m<sup>3</sup>/s],

$u$  – udział części nierozpuszczalnych ( $p_n$ ) [-]

$V$  – objętość plastra kawerny (łącznie z zasypem) [m<sup>3</sup>],

$\rho$  – gęstość skały solnej [kg/m<sup>3</sup>],

wskaźnik  $i-1$  odnosi się do solanki wpływającej z poprzedniego plastra, wskaźnik  $i$  dotyczy bieżącego plastra.

Wzór jest ewidentnie błędny, choćby z uwagi na niezgodność jednostek prawej i lewej strony równania. Powinno się go poprawić, zastępując po prawej stronie pochodną  $Q_i$  przez  $V_i$ . Warto zauważyć, że dyfuzja turbulentna jest w nim pominięta.

Błędna jest również podana tam formuła dla brzegowego bloku z zatłaczaniem:

$$\frac{\partial(V_{in}C_{in})}{\partial t} = QC_0 + \rho \frac{\partial V_{in}}{\partial t}(1 - u_{in}) - \left(Q - \frac{\partial V_{in}}{\partial t}\right)C_{in}$$

gdzie:

$V_{in}, C_{in}$  – objętość i stężenie w brzegowym bloku zatłaczania,

$Q, C_0$  – wydajność i stężenie zatłaczanego medium ługującego,

The turbulent diffusion coefficient proposed by Russo is the following:

$$D_{tur} = D_0 \left(\frac{1}{\rho_w} \frac{d\rho}{dx}\right)^{1/2} \min(y^2, l^2) \quad (14)$$

Where:

$D_0$  – empirical constant, amounting to ca. 17.5 m<sup>2</sup>/s (31.7 ft<sup>2</sup>/s),

$\rho_w$  – water density, ca. 1,000 kg/m<sup>3</sup>,

$y$  – local semi-width of the cavern [m],

$l$  – local length of turbulent mixing [m], determined by the following formula:

$$l = \left(\frac{6\pi}{\alpha}\right)^{3/4} \left(\frac{2v^2\rho}{g\frac{d\rho}{dx}}\right)^{1/4} \quad (15)$$

Where:

$\alpha$  – empirical coefficient assumed for the Sansmic Model, equal to 0.064, with the reservation that some authors claim that it is rather close to 0.08,

$g$  – gravity acceleration [m/s<sup>2</sup>],

$v$  – kinematic viscosity of brine in the cavern [m<sup>2</sup>/s].

In the conditions existing in the horizontal cavern, a local length of turbulence, calculated by Formula (15) amounts to the order of 10-20 cm, so it is constantly shorter than a half width of the cavern, maybe except for the initial moments of leaching. Thus, Formula (14) can be simplified as follows:

$$D_{tur} = D_0 v \left(\left(\frac{6\pi}{\alpha}\right)^3 \frac{2\rho}{g\rho_w}\right)^{1/2} \quad (16)$$

The values calculated in that way amount to the order of 0.06 m<sup>2</sup>/s, so they are much higher than the value of the molecular diffusion constant. Is, however, Formula (14) applicable in the conditions of horizontal flow? It seems intuitively that turbulence evoked by the salt concentration gradient should be more significant than that originating from flow turbulence. The coefficient described by Formula (16) is almost constant. In practice, however, the effect of its operation seems to be such as if salt flow was running at a slightly lower rate than the water flow rate. So maybe, the role of turbulent diffusion is not that essential, after all?

We should warn the readers here that (Li at al. 2020) quoted the transport equation in the following form:

$$C_{i-1}Q_{i-1} - C_iQ_i + \rho \frac{dV_i}{dt}(1 - u_i) = \frac{d(C_iQ_i)}{dt}$$

Where:

$C$  – salt concentration [kg/m<sup>3</sup>],

$Q$  – flow rate [m<sup>3</sup>/s],

$u$  – insolubles content ( $p_n$ ) [-]

$V$  – cavern block (“slice”) volume (including sump) [m<sup>3</sup>],

$\rho$  – rock salt density [kg/m<sup>3</sup>],

$i-1$  – refers to brine outflowing from the previous cavern slice, while  $i$  concerns the current slice.

The above formula is obviously wrong, at least owing to the inconsistency of the units on both sides of the equation. The formula should be corrected by the replacement of  $Q_i$  by

$u_m$  – udział części nierozpuszczalnych [-],  
 $\rho$  – gęstość skały solnej [kg/m<sup>3</sup>].

Główny błąd polega na nieprzemnożeniu pochodnej w ostatnim wyrazie przez współczynnik kontrakcji, w efekcie kontrakcja jest 1, czyli 100%. Prócz tego i tutaj dyfuzja turbulentna jest pominięta, zaś pochodne powinny być zwyczajne, a nie cząstkowe.

#### **Podsumowanie:**

W modelu jednowymiarowym równania się znacznie upraszczają. W każdym bloku aproksymacyjnym obowiązują dwa równania: równanie transportu, z którego wynika stężenie w bloku i równanie ciągłości, z którego wynika wydajność odpływu z bloku.

W modelu zaniedbano transport części nierozpuszczalnych wzdłuż kawerny.

Aproksymacyjne bloki są liniowe, z wyjątkiem brzegowych bloków.

Blok brzegowy nad punktem podawania wody jest sumą osiowo-symetrycznego bloku z dodatkową objętością pochodzącą z plastrów rozługowanych zanim je zagarnęła część osiowo-symetryczna.

Blok brzegowy nad punktem odbioru solanki, o ile nie jest to kawerna dosycająca, jest na ogół blokiem półobrotowym, rozługowuje się wolniej, niż przylegające do niego plastry.

Otwarta pozostaje rola dyfuzji turbulentnej, jak też formuł ją opisujących.

#### 4. ALGORYTM MODELU KAWERNY POZIOMEJ

Kawerna składa się z bloków aproksymacyjnych. Poza blokami brzegowymi są to pionowe bloki płaskie („plastry”) o jednakowej grubości określonej przez krok aproksymacyjny  $Dx$ . Kontur każdego takiego bloku, a ściślej dwa półkontury, aproksymuje się linią łamaną, podobnie jak półkontur kawerny pionowej. Bloki brzegowe są częściowo półobrotowe, w części zaś są kombinacją bloków płaskich z blokiem półobrotowym.

Rozwój kawerny odbywa się w krokach czasowych. Krok czasowy musi spełniać dwa warunki stabilności. Pierwszy z nich to typowy warunek Couranta-Friedrichsa-Lewy’ego:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{v_i} = \frac{V_i}{Q_i} \quad (17)$$

gdzie:

$\Delta t$  - krok czasu,

$\Delta x$  - krok długości,

$v_i$  - prędkość przepływu w  $i$ -tym plastrze,

$V_i$  - objętość  $i$ -tego plastra,

$Q_i$  - natężenie przepływu przez  $i$ -ty plaster.

Drugi warunek to warunek stabilności szybkości ługowania w pojedynczym kroku czasowym. Wymaga on ograniczenia zmienności stężenia. Można go zapisać następująco:

$V_i$  on the right hand side under the derivative. It is worth noticing that turbulent diffusion is missing in that formula.

Besides, the formula of the boundary block, with water injection, is also wrong in the paper in question:

$$\frac{\partial(V_{in}C_{in})}{\partial t} = QC_0 + \rho \frac{\partial V_{in}}{\partial t} (1 - u_{in}) - \left(Q - \frac{\partial V_{in}}{\partial t}\right) C_{in}$$

Where:

$V_{in}, C_{in}$  – volume and concentration in the boundary block of water injection,

$Q, C_0$  – capacity and concentration of the injected leaching medium,

$u_m$  – insolubles content [-],

$\rho$  – rock salt density [kg/m<sup>3</sup>].

The main error there consists in the failure to multiply the derivative of the last term by the contraction coefficient, and, as a result, contraction equals to 1, or 100%. In addition, also here, turbulent diffusion was omitted, while derivatives should be ordinary, not partial.

#### **Summary**

In the unidimensional model, equations are considerably simplified. Two equations apply to each approximation block: salt transport equation, from which salt concentration in the block results, and continuity equation, from which the capacity of the outflow from the block results.

In the model under discussion, transport of insolubles along the cavern has been neglected.

Approximation blocks are linear, with the exception of boundary blocks.

The boundary block situated above the water injection point is a total of axially symmetrical block, plus the additional volume originating from the linear blocks (slices) leached before the blocks have been covered by the axially symmetrical portion.

The boundary block situated above the brine collection point is generally a semi-rotational block if it is not the saturating cavern. Leaching there is slower than in the adjacent slices.

The role of turbulent diffusion remains open, similarly to the relevant formulas.

#### 4. HORIZONTAL CAVERN MODEL ALGORITHM

The horizontal cavern model is composed of approximation blocks. In addition to the boundary blocks, there are also linear blocks (slices) of uniform thickness, determined by the approximation step  $Dx$ . The contour of each such block, or to be exact: two semi-contours, is approximated by the broken line (polyline), similarly to the situation in the semi-contour of the vertical cavern. The boundary blocks are partly semi-rotational and partly a combination of linear and semi-rotational block.

The development of the cavern takes place in time steps. Each time step must satisfy two stability conditions. The first one is a typical Courant-Friedrichs-Lewy condition:



$$\alpha (C_N - C) \leq (C_N - C') \leq (C_N - \alpha C) \quad (18)$$

gdzie:

$C_N$  – stężenie solanki nasyconej [kg/m<sup>3</sup>],

$C, C'$  – stężenie na początku i na końcu kroku czasowego  $\Delta t$  w plastrze zawierającym but rury wodnej [kg/m<sup>3</sup>],

$\alpha$  – współczynnik ograniczający, pomiędzy zero a jeden, blisko zera ograniczenie jest słabe, blisko jedynki bardzo silne; w algorytmie UBRO zastosowano 0,5.

Prawa nierówność jest praktycznie zawsze spełniona, jeśli spełniony jest warunek (17). Lewa nierówność daje istotne ograniczenie, zwłaszcza gdy przepływ przez kawernę jest niewielki lub go brak (przerwa w zatłaczaniu). Ponieważ  $C'$  nie jest znane a priori, trzeba posłużyć się przybliżeniem. Warunek (18) wystarczy zbadać w bloku brzegowym. Jeśli zaniedbać przepływ przez kawernę i dyfuzję turbulentną, otrzyma się przybliżenie:

$$C' \approx \frac{C + \frac{\Delta V}{V}(\rho_{z1}p_s - p_n C(w_r - 1))}{1 + \frac{\Delta V}{V}(1 - w_r p_n)} \quad (19)$$

gdzie oznaczenia, jak we wzorach (9-13).

Lewa nierówność z (18) przy podstawieniu (19) prowadzi do warunku:

$$\Delta t \leq \frac{V}{\omega S} \frac{(C_N - C)(1 - \alpha)}{(\rho_{z1}p_s - p_n C(w_r - 1) - C_N(1 - \alpha)(1 - w_r p_n) - \alpha C(1 - w_r p_n))} \quad (20)$$

gdzie:

$\omega$  – szybkość ługowania w kierunku stropowym, przy stężeniu  $C$  [m/s],

$S$  – powierzchnia podlegająca ługowaniu [m<sup>2</sup>].

Ponieważ dokładne wyznaczenie  $S$  jest w praktyce uciążliwe, dla ograniczenia kroku czasowego od góry, można zastosować:

$$\frac{H}{8} \leq \frac{V}{S} \quad (21)$$

gdzie:

$H$  – wysokość kawerny w bloku brzegowym (zatłaczania) [m].

Kolejne ograniczenie na krok czasowy wynika ze schematu aproksymacyjnego dyfuzji. Ma ono postać:

$$\Delta t < \frac{\Delta x^2}{2 D_{tur}} \quad (22)$$

Jak się okazuje, dla komór poziomych, zastosowanie wzoru (16) na współczynnik dyfuzji, prowadzi do decydującej roli warunku (22), a kroki czasowe, do jakich prowadzi są zwykle poniżej minuty (choć zależy to od wielkości kroku przestrzennego). Warunek (17) najczęściej dopuszcza kroki czasowe rzędu kilkunastu minut (choć zależy to od wydajności i rozmiarów kawerny). Natomiast rozpatrywanie warunku (20) chyba można pominąć, jego ograniczenia są od pół godziny do kilku godzin.

W każdym kroku czasowym, w każdym z plastrów i bloków brzegowych, najpierw wyznacza się przemieszczenie

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{v_i} = \frac{V_i}{Q_i} \quad (17)$$

Where:

$\Delta t$  – time step,

$\Delta x$  – length step,

$v_i$  – flow rate at the  $i$ -th slice,

$V_i$  – volume of the  $i$ -th slice,

$Q_i$  – rate of flow through the  $i$ -th slice.

The second condition consists in the stability of leaching rate, in a single time step. The condition imposes a limitation on the concentration change over a time step. It can be written down as follows: follows:

$$\alpha (C_N - C) \leq (C_N - C') \leq (C_N - \alpha C) \quad (18)$$

Where:

$C_N$  – concentration of the saturated brine [kg/m<sup>3</sup>],

$C, C'$  – concentration at the beginning and at the end of the time step  $\Delta t$  in the slice containing the water pipe shoe [kg/m<sup>3</sup>],

$\alpha$  – limiting coefficient between zero and one; if the coefficient is close to zero, the limitation is poor; if the coefficient is close to one, the limitation is strong; the UBRO algorithm uses the value of 0.5.

The right hand side inequality is practically almost always satisfied provided that condition (17) has been satisfied. The left hand side inequality provides an essential limitation, especially when the rate of flow through the cavern is low, or none (interrupted water injection). Since  $C'$  is not known a priori, an approximation is required. It is sufficient to check condition (18) in the boundary block. If we neglect the rate of flow through the cavern and turbulent diffusion, we can obtain the following approximation:

$$C' \approx \frac{C + \frac{\Delta V}{V}(\rho_{z1}p_s - p_n C(w_r - 1))}{1 + \frac{\Delta V}{V}(1 - w_r p_n)} \quad (19)$$

Where the symbols are the same as those in Formulas (9)–(13).

Upon substitution of formula (19), the left hand side inequality of formula (18) leads to the condition:

$$\Delta t \leq \frac{V}{\omega S} \frac{(C_N - C)(1 - \alpha)}{(\rho_{z1}p_s - p_n C(w_r - 1) - C_N(1 - \alpha)(1 - w_r p_n) - \alpha C(1 - w_r p_n))} \quad (20)$$

Where:

$\omega$  – leaching rate directed towards the cavern roof, at the concentration of  $C$  [m/s],

$S$  – surface area subjected to leaching [m<sup>2</sup>].

Since an exact determination of  $S$  is practically hard to attain, the following can be applied for an upper limit of the time step:

$$\frac{H}{8} \leq \frac{V}{S} \quad (21)$$

Where:

$H$  – cavern height in the boundary block of the injection side [m].

konturów kawerny. Jest to procedura identyczna, jak w przypadku kawerny osiowo-symetrycznej, szczegółowo omówiona w (Urbańczyk, 2018).

Kolejną procedurą w kroku czasowym jest bilans objętości. Wykonuje się go dla każdego z plastrów kawerny oddzielnie. Dla bloków brzegowych przebiega on podobnie, jak dla kawerny osiowo-symetrycznej. W innym przypadku, objętość plastra, wylicza się mnożąc pole powierzchni poprzecznej plastra  $S$  przez jego grubość  $Dx$ .

Zaproksymowany pojedynczy przekrój poprzeczny kawerny składa się z szeregu trapezów złączonych podstawami jeden nad drugim.

Pole każdego trapezu liczy się wzorem:

$$S_i = (Y_i + Y_{i+1})(H_{i+1} - H_i) \quad (23)$$

gdzie:

$H_i, Y_i$  – współrzędne (głębokość i półszerokość) górnej krawędzi trapezu

$H_{i+1}, Y_{i+1}$  – współrzędne dolnej krawędzi trapezu

$S_i$  – pole powierzchni tego trapezu

Ponieważ w profilu pionowym kawerny dopuszcza się zaleganie warstw soli o różnej zawartości części nierozpuszczalnych, dla umożliwienia właściwego bilansu tych części trzeba znać przyrosty objętości kawerny w poszczególnych warstwach solnych (na każdym profilu). Z tego powodu najlepiej w momencie obliczania objętości plastrów, uzupełnić łamaną  $\{H(i), Y(i)\}$  punktami leżącymi na przecięciu się tej łamanej z granicami warstw solnych.

Przyrosty objętości poszczególnych plastrów liczone będą wzorem:

$$\Delta V_j = V'_j - V_j = \Delta x (\sum_{i=1}^{M'} S'_i - \sum_{i=1}^M S_i) \quad (24)$$

gdzie:

$V_j$  - objętość przekroju  $j$  w chwili  $t$ ,

$V'_j$  - objętość przekroju  $j$  w chwili  $t + \Delta t$ ,

$S_j$  - pole  $i$ -tego trapezu w przekroju  $j$  w chwili  $t$ ,

$S'_i$  - pole  $i$ -tego trapezu w przekroju  $j$  w chwili  $t + \Delta t$ ,

$M$  - ilość odcinków łamanej aproksymującej kontur  $j$  (trapezów) w chwili  $t$ , powiększona o dodane punkty  $(h_a, y_a)$ ,

$M'$  - ilość odcinków łamanej aproksymującej kontur  $j$  (trapezów) w chwili powiększona o dodane punkty  $(h_a, y_a)$ ,

Całkowita objętość kawerny wyrazi się wzorem:

$$V = V_{in} + \sum_{j=2}^{N-1} V_j + V_{out} \quad (25)$$

gdzie:

$V_j$  - objętość przekroju  $j$  w chwili  $t$ ,

$V_{in}$  - objętość pierwszego plastra (liczona inaczej),

$V_{out}$  - objętość ostatniego plastra (liczona inaczej),

$N$  - ilość plastrów aproksymujących kawernę.

Aby rozwiązanie równań zaproksymowanych było zbliżone ze ścisłym rozwiązaniem, potrzeba, aby dodatkowo schemat aproksymacji był zachowawczy, tzn. by prawa zachowa-

Another limitation imposed on the time step results from the approximation scheme of diffusion. Its form is the following:

$$\Delta t < \frac{\Delta x^2}{2 D_{tur}} \quad (22)$$

It turns out that if formula (16) of the diffusion coefficient was applied in the case of horizontal caverns, condition (22) would usually play a decisive part, with consequential time steps amounting to less than one minute usually (although that would depend on the size of the spatial step as well). Condition (17) usually allows for time steps of the order of a dozen of minutes (although that would depend on the cavern capacity and size). However, consideration of condition (20) may probably be omitted, as its limitation ranges from half an hour to several hours.

First, the displacement of cavern contours is determined in each time step, for all slices, and boundary blocks. That procedure is the same as in the case of the axially symmetrical cavern, discussed in detail in (Urbańczyk 2018).

The volume balance is the next procedure performed in the time step. That is carried out for each of the cavern slices separately. In the case of boundary blocks, the procedure is similar to that in the case of the axially symmetrical cavern. Otherwise, the slice volume is calculated by multiplying the area  $S$  of the transverse surface of slice by its thickness  $Dx$ .

A single approximated transverse cross-section of the cavern is composed of a series of trapezoids, connected with their bases, one on top of the other.

The field of each trapezoid is calculated by the following formula:

$$S_i = (Y_i + Y_{i+1})(H_{i+1} - H_i) \quad (23)$$

Where:

$H_i, Y_i$  – coordinates of the upper edge of the trapezoid (depth and semi-width),

$H_{i+1}, Y_{i+1}$  – coordinates of the lower edge of the trapezoid,

$S_i$  – area of the trapezoid surface,

Since it is admissible for the vertical profile of the cavern to contain salt layers with various content of insolubles, to obtain a proper balance of those parts, one must know the cavern volume increases in particular salt layers, in each profile. For that reason, it is the best to supplement the broken line (polyline)  $\{H(i), Y(i)\}$  with the points lying on the intersection of the polyline with the salt layer boundaries.

The volume increases of the particular slices are calculated by the following formula:

$$\Delta V_j = V'_j - V_j = \Delta x (\sum_{i=1}^{M'} S'_i - \sum_{i=1}^M S_i) \quad (24)$$

Where:

$V_j$  – volume of the cross-section  $j$  at the moment  $t$ ,

$V'_j$  – volume of the cross-section  $j$  at the moment  $t + \Delta t$ ,

$S_i$  – area of the  $i$ -th trapezoid in the cross-section  $j$  at the moment  $t$ ,

$S'_i$  – area of the  $i$ -th trapezoid in the cross-section  $j$  at the moment  $t + \Delta t$ ,

wania masy i objętości były po aproksymowaniu spełnione równie ściśle jak przed nią. Stąd zaproksymowane równania muszą stanowić odpowiednie bilanse soli i natężenia przepływu.

Równanie (7) prowadzi do następującego bilansu masy soli:

$$C'_j(V_j + \Delta V_j) = C_j V_j + (Q_{j-1} C_{j-1} - Q_j C_j) \Delta t + DV_j \Delta t \frac{C_{j-1} - 2C_j + C_{j+1}}{\Delta x^2} + \sum_{k=1}^L \rho_{zL,k} \Delta V_{kj} (1 - p_{n,k}) \quad (26)$$

gdzie:

$C'_j$  – stężenie w plastrze  $j$  w chwili  $t + \Delta t$ ,

$C_j$  – stężenie w plastrze  $j$  w chwili  $t$ ,

$V_j$  – objętość plastra  $j$  w chwili  $t$ ,

$\Delta V_j$  – przyrost objętości plastra  $j$  w kroku czasowym  $\Delta t$ ,

$Q_j$  – natężenie przepływu z plastra  $j$  do plastra  $j+1$ ,

$D$  – współczynnik dyfuzji turbulentnej,

$p_{n,k}$  – zawartość części nierozpuszczalnych w skale solnej w warstwie  $k$ ,

$\rho_{zL,k}$  – gęstość skały solnej w warstwie  $k$ ,

$\Delta V_{kj}$  – przyrost objętości  $j$ -go plastra kawerny w obrębie  $k$ -tej warstwy solnej,

$j$  – wskaźnik numerujący plastry kawerny (ilość -  $N$ ),

$k$  – wskaźnik numerujący warstwy solne (ilość -  $L$ ),

Równanie (10) prowadzi do następującego bilansu natężenia przepływu:

$$Q_j = Q_{j-1} - \frac{1}{\Delta t} \sum_{k=1}^L \Delta V_{kj} (1 - p_{n,k}) \left(1 - \frac{\rho_{zL,k}}{\rho_{sr}}\right) \quad (27)$$

gdzie:

$\rho_{sr}$  – gęstość soli rozpuszczonej w solance (masa soli na różnicę objętości solanki i czystej wody).

W każdym kroku czasowym z wyługowanej w obrębie danego plastra kawerny skały solnej uwalniane są również części nierozpuszczalne. Części te, jeżeli nie założy się inaczej, odkładają się na dnie kawerny, w tym samym plastrze, z pewnym rozluźnieniem. Zanedbuje się przy tym ich transport poziomy.

Objętość części nierozpuszczalnych odkładających się na dnie plastra  $j$ , w kroku czasowym można wyrazić wzorem:

$$\Delta V_{N,j} = w_r \sum_{k=1}^L \Delta V_{kj} p_{n,k} \quad (28)$$

gdzie oznaczenia jak w poprzednim wzorze.

Na podstawie tej objętości, w każdym kroku czasowym wyliczać się będzie w poszczególnych plastrach aktualny poziom zasypu.

W oparciu o powyższe równania opracowano algorytm obliczeń, działający wg następującego schematu:

- 1° określa się początkowy kształt kawerny (otwór wiertniczy lub kawernę już nieco rozługowaną),
- 2° określa zasięg modelu, zadaje się krok aproksymacji długości i tym samym dzieli model na „plastry”, a także krok

$M$  – number of the sections of the polyline that approximates the contour  $j$  of the trapezoids at the moment  $t$ , increased by added points  $(h_a, y_a)$ ,

$M'$  – number of the sections of the polyline that approximates the contour  $j$  of the trapezoids at the moment, increased by added points  $(h_a, y_a)$ ,

The total volume of the cavern is expressed by the following formula:

$$V = V_{in} + \sum_{j=2}^{N-1} V_j + V_{out} \quad (25)$$

Where:

$C'_j$  – concentration in the slice  $j$  at the moment  $t + \Delta t$ ,

$C_j$  – concentration in the slice  $j$  at the moment  $t$ ,

$V_j$  – volume of the slice  $j$  at the moment  $t$ ,

$\Delta V_j$  – volume growth of the slice  $j$  at the time step  $\Delta t$ ,

$Q_j$  – flow intensity from the slice  $j$  to the slice  $j+1$ ,

$D$  – turbulent diffusion coefficient,

$p_{n,k}$  – insolubles content in rock salt in the layer  $k$ ,

$\rho_{zL,k}$  – rock salt density in the layer  $k$ ,

$\Delta V_{kj}$  – volume increase of the  $j$ -th cavern slice, within the  $k$ -th salt layer,

$j$  – index numbering the cavern slices (quantity:  $N$ ),

$k$  – index numbering the salt layers (quantity:  $L$ ),

Equation (10) leads to the following flow intensity balance:

$$Q_j = Q_{j-1} - \frac{1}{\Delta t} \sum_{k=1}^L \Delta V_{kj} (1 - p_{n,k}) \left(1 - \frac{\rho_{zL,k}}{\rho_{sr}}\right) \quad (27)$$

Where:

$\rho_{sr}$  – density of salt dissolved in brine (salt mass per the difference of brine volume minus fresh water volume).

In each time step, insolubles are released out of rock salt of the cavern being leached, within the given slice. When no other assumption is made, the insolubles are deposited on the cavern bottom, within the same slice, with a certain loosening. Thus, horizontal transport of the insolubles between slices is neglected here.

The volume of insolubles, deposited on the bottom of the slice  $j$ , at the time step, can be expressed by the following formula:

$$\Delta V_{N,j} = w_r \sum_{k=1}^L \Delta V_{kj} p_{n,k} \quad (28)$$

The meanings of the symbols are the same as those in the previous formula.

Based on this volume, a current level of the sump filed with the insolubles will be calculated in each slice and at each time step.

Based on the equations given above, a calculation algorithm was developed. It works in accordance with the following scheme:

1° Determine the initial cavern shape (the well or the cavern being partially leached).

2° Determine the range of the model; select the step for length approximation, and thus divide the model into slices;

aproxymacji wysokości, w którym zróżnicowane mogą być własności soli,

- 3° zadaje się początkowy rozkład stężenia (w przypadku startu od otworu jest on mało istotny),
- 4° zadaje się własności ługownicze skały solnej i związane z nimi parametry, jak temperatura, gęstość skały solnej, udział części nierozpuszczalnych oraz współczynnik ich rozluźnienia podczas depozycji na dnie kawerny,
- 5° zadaje się dodatkowe parametry empiryczne modelu,
- 6° wprowadza się parametry etapu ługowania: wydajność tłoczenia medium ługującego, jego stężenie, ew. położenie punktu tłoczenia wody, oraz warunek określający długość etapu ługowania,
- 7° wykonuje się wielokrotnie, aż do spełnienia warunku długości etapu następujące kroki:
  - 7.1 wyznacza się długość kroku czasowego spełniającego warunki (17) i (22), nie przekraczającego jednak zadanego z góry maksimum,
  - 7.2 wyznacza się przemieszczenie brzegu kawerny w danym kroku czasowym, na podstawie stężenia sprzed danego kroku czasowego, stosując reguły opisane w cz. III (Kunzman, Urbańczyk, 2018),
  - 7.3 wykonuje się bilans objętości i ustala objętości wyługowane w poszczególnych segmentach plastrów kawerny w ciągu danego kroku czasowego, wg (24),
  - 7.4 wykonuje się bilans soli i części nierozpuszczalnych, wg (26)–(28) w poszczególnych plastrach kawerny i na tej podstawie ustala rozkład stężenia wzdłuż kawerny panujący po danym kroku czasowym,
- 8° punkty 6° i 7° powtarza się w miarę potrzeby, aż cały proces ługowania zostanie zasymulowany.

#### Podsumowanie

Aproxymacja prowadzi do bilansów masy soli, objętości solanki i części nierozpuszczalnych.

Bilanse są podobne, jak w przypadku kawerny osiowo symetrycznej, jest ich jednak więcej, objętości typowych plastrów składają się z szeregu segmentów o konturze trapezu i grubości kroku aproxymacyjnego.

Kolejność bilansów w kroku czasowym jest podobna, jak dla kawerny osiowo-symetrycznej. Występują podobne ograniczenia na długość kroku czasowego.

select the step for height approximation, where rock salt properties can be diversified.

3° Determine the initial distribution of salt concentration (it is not important if the initial shape is the well).

4° Determine the leaching properties of rock salt and the related parameters, e.g. temperature, rock salt density, insoluble content, and the loosening coefficient for insolubles deposition in the sump.

5° Determine the additional empirical parameters of the model.

6° Introduce the leaching stage parameters: leaching medium injection capacity, leaching medium concentration, possibly the location of the water injection point, and the condition determining the leaching stage duration.

7° Perform the following steps repeatedly until the leaching stage duration condition has been satisfied:

7.1 Determine the time-step duration that satisfies conditions (17) and (22); however, not exceeding the predetermined maximum value.

7.2 Determine the displacement of the cavern contours in the given time step, on the basis of salt concentration preceding that time step, applying the rules described in Part III of the paper (Kunzman and Urbańczyk 2018).

7.3 Complete the volume balance and determine the volumes leached in particular slice segments during the given time step, in accordance with formula (24),

7.4 Complete the balance of salt and of insolubles, in accordance with formulae (26)–(28) in particular slices of the cavern, and, on that basis, determine the distribution of concentration along the cavern, after the given time step.

8° Repeat Items 6° and 7° as necessary until the entire leaching process has been fully simulated.

#### Summary

Approximation leads to obtaining the balances of salt mass and of brine, as well as of insolubles volumes.

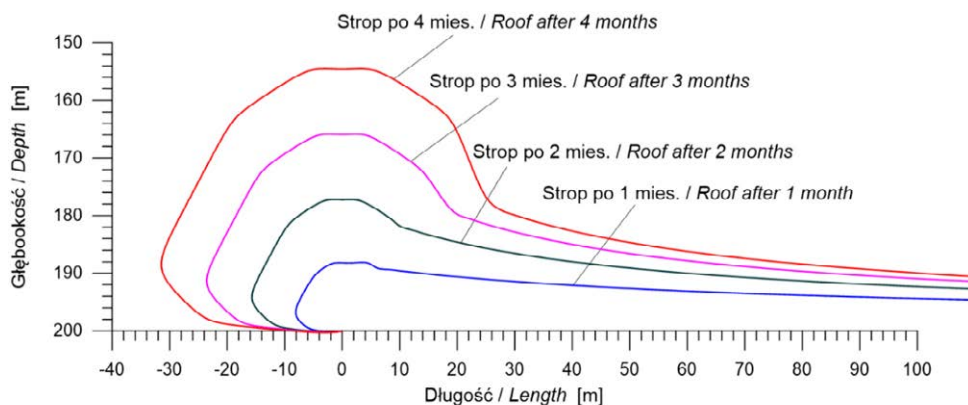
The balances are similar to those of the axially symmetrical cavern; however, there are more of them here since the volumes of typical slices are composed of a number of segments, with trapezoidal contour, and the thickness of the approximation step.

The sequence of balances in a time step is similar to that of the axially symmetrical cavern. Similar limitations of the time step duration also apply here.

#### 5. SELECTED RESULTS OF THE HORIZONTAL CAVERN LEACHING ACCORDING TO THE HORSALT MODEL

The model described above is called the HORSALT model. To learn how it operated, the model was practically implemented in 2004. However, it was not possible to compare the model prediction with an actual leaching process, since hori-





Ryc. 9. Przekrój wzdłuż kawerny poziomej dla 4 chwil wg modelu HORSALT.

Fig. 9. Longitudinal cross-section of the horizontal cavern, for 4 moments of leaching, according to the Horsalt model.

## 5. PRZYKŁADOWE WYNIKI ŁUGOWANIA KAWERNY HORYZONTALNEJ WG MODELU HORSALT

Opisany powyżej model nazwano HORSALT. Dla zorientowania się, jak model działa, wykonano w 2004 roku roboczą implementację modelu. Nie było możliwości porównania przewidywań modelu z rzeczywistym ługowaniem, gdyż nie wykonuje się w Polsce kawern poziomych. Z tego też powodu zaniechano wówczas dalszych prac.

Poniżej będą pokazane wyniki jednego z testów modelu.

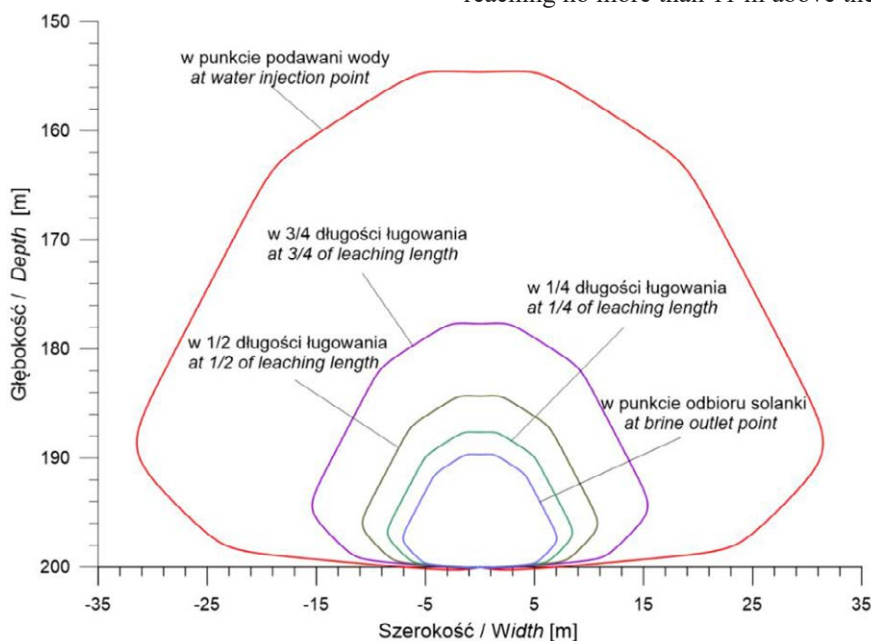
Przyjęto, że wysokość kawerny nie może przekraczać 50 m, zaś ługowany odcinek poziomego otworu będzie miał długość 100 m. Zastosowano aproksymacyjny krok 2 m wzdłuż osi poziomej kawerny. Przyjęto również, że pokład soli ma jednorodne własności ługownicze, przy czym nominalna szybkość ługowania w kierunku poziomym wynosi 8 mm/h, zaś w kierunku pionowym - 12 mm/h. Udział części

zonalnej kawerny nie było leżonej w Polsce w tym czasie. W związku z tym, dalsze prace zostały przerwane.

Wyniki jednego z testów modelu są przedstawione poniżej.

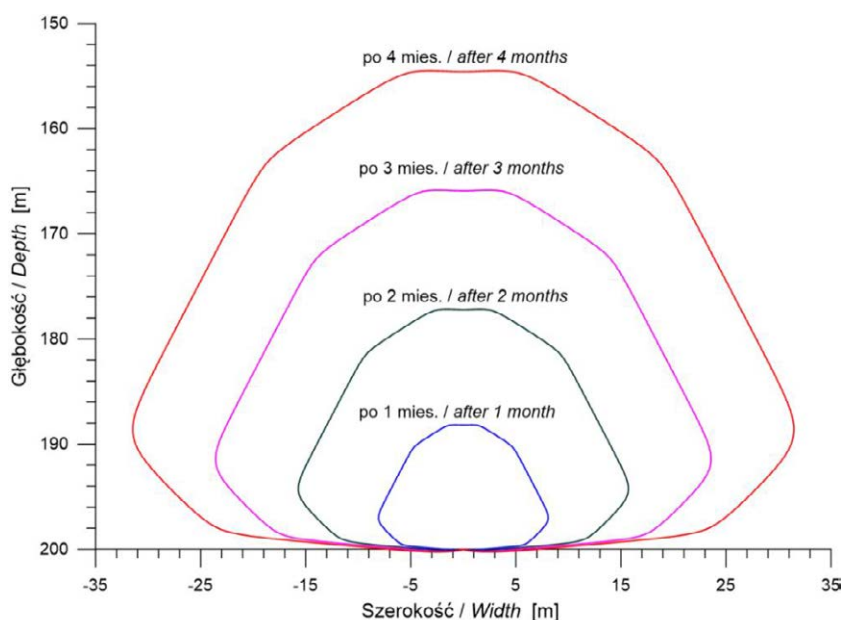
Przyjęto, że wysokość kawerny nie może przekraczać 50 m, zaś ługowany odcinek poziomego otworu będzie miał długość 100 m. Zastosowano aproksymacyjny krok 2 m wzdłuż osi poziomej kawerny. Przyjęto również, że pokład soli ma jednorodne własności ługownicze, przy czym nominalna szybkość ługowania w kierunku poziomym wynosi 8 mm/h, zaś w kierunku pionowym - 12 mm/h. Udział części

Wodę wtryskiwano do modelu z pojemnością 120 m<sup>3</sup>/h. Wykazało się, że dach kawerny osiągnął 50 m wysokości po tylko 142 dniach, chociaż powyżej punktu wtrysku wody. Dalej, dach kawerny opadał szybko, nie osiągając więcej niż 11 m nad punktem zbioru soli.



Ryc. 10. Dysproporcja rozwoju kawerny poziomej. Przekroje poprzeczne w różnych odległościach od podawania wody po 120 dniach ługowania, wg modelu HORSALT.

Fig. 10. Disproportions in the horizontal cavern development. Transverse cross-sections at several distances from the water injection point after 120 days of leaching, according to the HORSALT model.



Ryc. 11. Rozwój kawerny poziomej w przekroju poprzecznym przez położenie punktu podawania wody wg modelu HORSALT.

Fig. 11. Horizontal cavern development in the cross-section through the water injection point, according to the HORSALT model.

nirozpuszczalnych w skale solnej przyjęto za 2%. Dyfuzję turbulentną w tym teście, dla uproszczenia, pominięto.

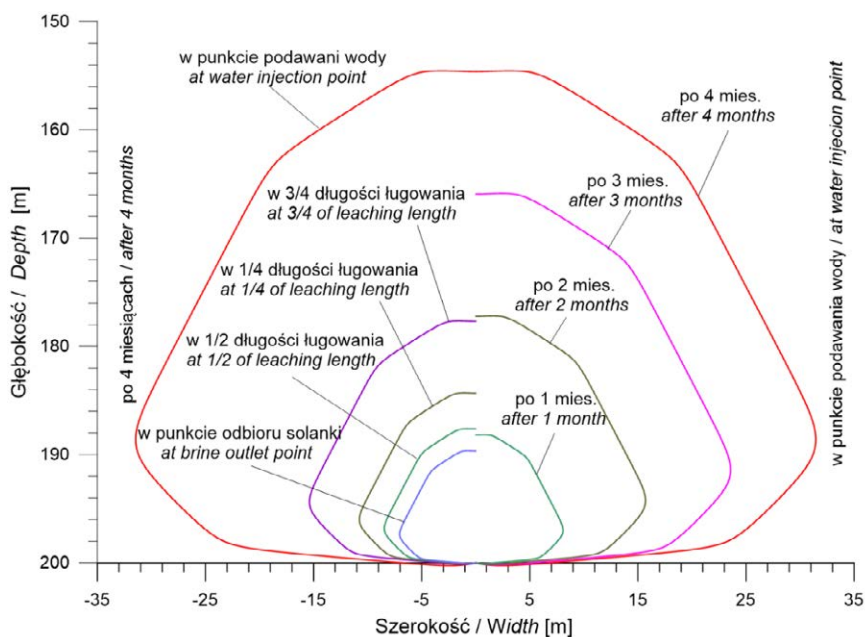
Zamodelowano tłoczenie wody z wydajnością 120 m<sup>3</sup>/h. Okazało się, że strop już po 142 dniach osiągnął 50 m, ale jedynie ponad punktem podawania wody. Dalej strop dość szybko opada, a nad miejscem poboru solanki kawerna ma wysokość jedynie 11 m. Widać to na Ryc. 9, przedstawiającej przekrój wzdłuż kawerny w wybranych chwilach lugowania.

Widać, że model numeryczny oddaje (co najmniej jakościowo) nierównomierność rozwoju kształtu kawerny, jaka jest w praktyce obserwowana i która jest głównym problemem przy lugowaniu komór poziomych, o czym wiadomo

That can be noticed in Fig. 9, presenting the longitudinal cross-section of the cavern at the selected moments of leaching.

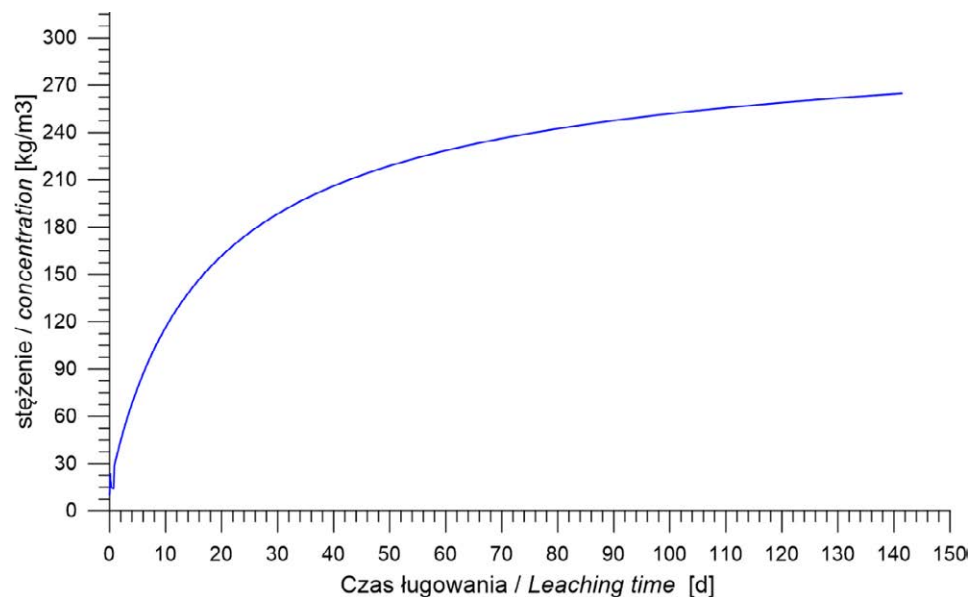
It can be noticed that the numerical model reflects the uneven development of the cavern shape (at least qualitatively), which is also observed in real leaching and that presents the main problem in horizontal cavern leaching of which we know from private communications with the representatives of the companies that have attempted to leach such a type of cavern.

The disproportions in the horizontal cavern development are even more distinct in the next figure (Fig. 10), presenting the transverse cross-sections of the cavern, projected on one



Ryc. 12. Porównanie: rozwój kawerny wzdłuż a rozwój w czasie.

Fig. 12. Comparison: longitudinal cavern development vs. development in time.



Ryc. 13. Stężenie solanki otrzymywanej z kawerny horyzontalnej wg modelu HORSALT.

Fig. 13. Concentration of brine obtained from the horizontal cavern leaching, according to the HORSALT model.

z nieoficjalnych rozmów z przedstawicielami firm próbujących ługować takie kawerny.

Jeszcze wyraźniej można dysproporcję rozwoju kawerny zaobserwować na kolejnym rysunku (Ryc. 10) przedstawiającym w rzucie na jedną płaszczyznę przekroje poprzeczne przez kawernę w czterech miejscach: przez punkt podawania wody, w 1/4 długości ługowania, w połowie długości ługowania, w trzech czwartych długości ługowania i w punkcie odbioru solanki.

Natomiast ogólny kształt poszczególnych konturów jest typowy i nie odbiega od tego, jakiego należałoby oczekiwać w jednorodnym złożu soli. Warto też zauważyć, że w konkretnym przekroju poprzecznym kawerna przyrasta w czasie dość równomiernie, co pokazuje ryc. 11.

Różnice między rozwojem kawerny w czasie, widać najlepiej, gdy zestawia się półprofile obu rozwojów obok siebie (ryc. 12). Widać, że po czterech miesiącach ługowania, rozmiary kawerny w jej końcowej części są mniejsze, niż w strefie podawania wody po miesiącu.

Stężenie solanki otrzymywanej z kawerny poziomej narasta w czasie, jak pokazano na ryc. 13. Ogólnie w dalszej części kawerny jest ono zbyt wysokie, by wyrównać dysproporcję kawerny, ale też nie dosyca się do stężenia przemysłowego, gdyż powierzchnia kawerny w dalszych sektorach jest zbyt mała.

Wyniki obliczeń zgadzają się jakościowo z tym, co wiadomo na temat ługowania kawern poziomych. Zgodności ilościowej autor nie jest w stanie określić, nie dysponując danymi empirycznymi z przebiegu ługowania konkretnych kawern.

plane, at four places: across the water injection point, at 1/4 of the leaching length, in the middle of the leaching length, at 3/4 of the leaching length, and at the brine collection point.

The shape of contour is typical and does not differ from that which could be expected to develop in a uniform salt deposit. It is worthwhile mentioning that the cavern grows quite evenly in time on a particular transverse cross-section, as visible in Fig. 11.

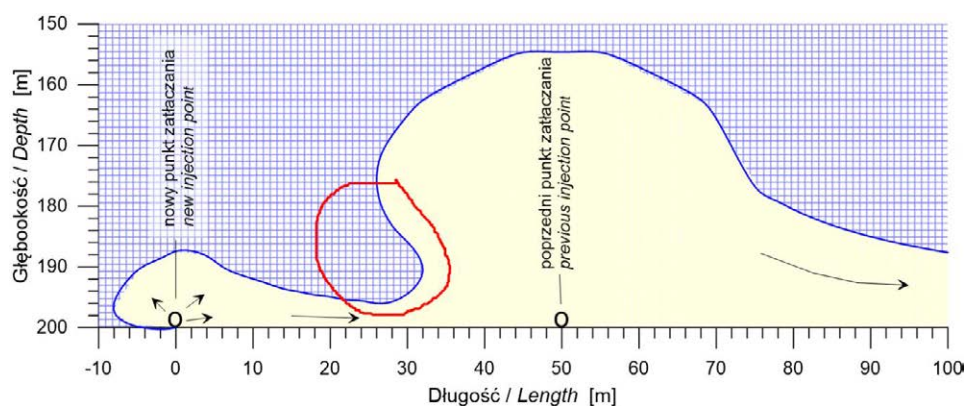
Such differences between the longitudinal cavern development and the cavern development in time can be seen the best when we juxtapose the semi-profiles of both types of development (Fig. 12). One can see that the size of the cavern in its rear section after four months of leaching is smaller than the cavern size at the water injection point after a month of leaching.

The concentration of brine, obtained from the horizontal cavern, grows in time, as shown in Fig. 13. Generally, the concentration is too high in the rear sections of the cavern to equalise the cavern shape disproportions, although the saturation does not reach the industrial salt concentration level because the cavern surface area is too small in its rear sections.

The results of our calculations comply, in respect of quality, with our knowledge about horizontal cavern leaching. The Author is unable to determine the quantitative compliance, without obtaining empirical data concerning the course of leaching in specific caverns.

## Summary

Our model reflects properly the properties of horizontal caverns, especially the strong upward development above the water injection point.



Ryc. 14. Sytuacja, której nie da się zamodelować modelem HORSALT.

Fig. 14. The case that cannot be modelled with the HORSALT model.

### Podsumowanie:

Model oddaje we właściwy sposób cechy kawern poziomych, zwłaszcza silny rozwój kawerny w górę, ponad miejscem podawania wody.

Do stwierdzenia ilościowej zgodności z przebiegiem ługowania kawern rzeczywistych, konieczne są dane empiryczne z ługowania kawern poziomych.

## 6. OGRANICZENIA OPISANEGO MODELU

Niewielkie są możliwości manewrowania rurami ługowniczymi poziomo-leżącymi, gdyż zostają one przysypane częściami nierozpuszczalnymi. Można próbować odwracania obiegu, a także w wariacie z kawerną dosycającą, cofania rury podającej wodę. Przez stopniowe cofanie buta rur wodnych można uzyskać bardziej równomierny strop kawerny.

Opisany tu model natrafi jednak na problemy, przy próbie użycia go do tego typu przypadków. Ilustruje to ryc. 14. Poza blokami półobrotowymi/obrotowymi, czyli pierwszym i ostatnim, strop kawerny ma być funkcją długości, nie może tej samej wartości współrzędnej odpowiadać parę wartości wysokości stropu. Na Ryc. 14. niedopuszczalne miejsce oznaczono czerwoną pętlą.

Prócz tego, podobnie jak w modelu kawerny ługowanej w otworze pionowym, w każdym z plasterów aproksymacyjnych półkontur musi być jednoznaczna funkcją głębokości (wysokości). Nie mogą w nim pojawiać się kominy ani kieszenie (por. Ryc.1. Urbańczyk, 2018).

## 7. UWAGI KOŃCOWE

Technologia ługowania kawerny poziomej nie jest jeszcze do końca rozpracowana.

Śledzenie rozwoju kawerny z użyciem echosondy najprawdopodobniej wymaga odwiercenia co najmniej jednego dodatkowego otworu.

Kontrola stropu kawerny przy użyciu medium izolacyjnego również wymaga dodatkowego otworu.

Empirical data concerning the course of actual horizontal cavern leaching are required to identify the quantitative compliance of the leaching process.

## 6. LIMITATIONS OF THE DESCRIBED MODEL

There is a limited possibility to handle the freely-lying leaching pipes because the pipes are covered by the insolubles. One can try to reverse the circulation, or withdraw the water injection pipe, in the option with a saturating cavern. A more even cavern roof can be obtained by gradual retraction of the water pipe shoe.

The model described here may, however, face certain problems when an attempt is made at applying it to the cases mentioned above. That is illustrated in Fig. 14. Apart from the semi-rotational/rotational blocks, i.e. the first and the last blocks, the cavern roof is to be a function of length. Several values of the roof height may not correspond to the same value of the coordinate. An inadmissible area is marked with red line in Fig 14.

Besides, similarly to the model of the vertically leached cavern, in each of the approximation slices, the semi-contour must represent a definitive function of depth (or height). No “chimneys” or “pockets” may appear there (cf. Fig. 1. in (Urbanczyk 2018)).

## 7. FINAL REMARKS

The horizontal cavern leaching technology has not been fully developed.

Cavern development monitoring by sonar will most probably require drilling at least one more well.

Cavern roof monitoring, with the use of blanket medium, also requires an additional well.

The cavern development process can be modelled with computer software, although to a limited degree as yet.

It is not clear to what extent it is necessary to take into account turbulent diffusion in a model, or what formulas should be used to describe such diffusion.



Tab. 1. Porównanie kawern pionowych i poziomych.

TYP KAWERNY	PIONOWA	POZIOMA
Kierunek sił ciężkości	równoległy do osi rozługowywanego otworu	prostopadły do osi rozługowywanego otworu
Rozwój kawerny	we wszystkich kierunkach wokół otworu, stanowiącego środek kawerny	jedynie w górę, otwór początkowy tworzy dno kawerny, szybko ulga zasypaniu przez części nierozpuszczalne
Symetria kawerny w złożu jednorodnym	osiowa	jedynie lustrzana
Dostęp do kawerny	od góry	z boku, na poziomie spągu
Manewry rurami	rury wolnowiszzące mogą być podnoszone lub opuszczane	rury "wolno-leżące", w razie przysypania można je jedynie cofnąć
Medium izolacyjne	można je dowolnie dotłaczać i spuszczać	na ogół można je dodać, ale nie można upuścić
Typy obiegu	obieg prawy lub lewy, zależnie którejdy tłoczy się wodę	jeden typ obiegu
Rozkład stężenia	gradient stężenia skierowany w dół, w obiegu lewym rzadzi nim adwekcja	zarówna pionowa jak i pozioma składowa jest możliwa
Części nierozpuszczalne	osadzają się na dnie	mogą być unoszone i przemieszczane w poziomie
Pomiary echosondą	łatwe	trudne, o ile w ogóle możliwe

Tab. 2. Porównanie modeli kawern pionowych i poziomych

TYP KAWERNY	PIONOWA	POZIOMA
Współrzędne przestrzenne	$r$ - promień $\varphi$ - azymut $z$ - wysokość	$x$ - długość $y$ - szerokość $z$ - wysokość
Ograniczenie	$r \geq 0$	
W przypadku symetrii	$\varphi$ - bez znaczenia	$y \geq 0$
Kształt opisany jest przez	$r = R(z)$ pojedyncza funkcja dla danego czasu	$y_i = Y_i(z)$ szereg funkcji, w każdym przekroju dla danego czasu inna
Odcięta funkcji kształtu	równoległa do kierunku przepływu	normalna do kierunku przepływu
Współrzędna aproksymowana	$z$	$x$
Blok aproksymacyjny jest opisany przez	fragment konturu (czasem pojedynczy promień)	pełny kontur w danym przekroju
Kształt bloku	obrotowy	Translacyjny, pierwszy blok pół-obrotowy
Adwekcja jest istotna	tylko przy lewym obiegu	zawsze
Dyfuzja turbulentna	ukryta w regułach mieszania	w jawnej formule?

Tab. 1. Similarities and differences of vertical and horizontal caverns

CAVERN TYPE:	VERTICAL	HORIZONTAL
Direction of gravitational forces	parallel to axis of original well	perpendicular to axis of original well
Cavern development	in all directions around original well in its geometrical centre	upward only, with original well at cavern bottom, later covered by insolubles
Cavern symmetry in homogeneous deposits	axial	mirror image only
Access to cavern	from cavern top	from cavern side at bottom level
Pipe handling	free-hanging pipes, i.e. raised and lowered at will	"free-lying" pipes, i.e. once under sump, they can be withdrawn only
Blanket medium	can be added and removed at will	can be added only, but not removed
Circulation type possible	both direct and reverse (depending on reciprocal injection and production pipe positioning)	one type only
Concentration distribution	in reverse circulation, governed by advection	both vertical and horizontal gradient components possible, governed by turbulent diffusion
Insoluble part transport	falling down and settling	can be transported horizontally
Temperature diversification	practically nonexistent	temperature gradient possible
Sonar surveying	easy	difficult or hardly feasible

Tab. 2. Different features of both cavern type models

CAVERN TYPE:	VERTICAL	HORIZONTAL
Spatial coordinates	$r$ - radius $\varphi$ - azimuth $z$ - height	$x$ - length $y$ - width $z$ - height
Boundaries, limitation	$r \geq 0$	
In case of symmetry	$\varphi$ - insignificant	$y \geq 0$
Shape described by	$r = R(z)$ single function for the given time	$y_i = Y_i(z)$ different function in any cross-section for the given time
Abscissa of shape function	parallel to flow direction	normal to flow direction
Finite-difference coordinate	$z$	$x$
Block described by	contour fragment (sometimes a single radius)	complete contour of the given cross-section
Block shape	rotational	translational front block semi-rotational
Advection is essential	in reverse circulation only	always
Turbulent diffusion	hidden in mixing rules	in an explicit formula

Proces rozwoju kawerny można modelować komputerowo, choć, jak na razie w ograniczonym zakresie.

Nie jest wyjaśnione, w jakim stopniu należy w modelu uwzględniać dyfuzję turbulentną i jakimi wzorami ją opisać.

Zarówno sam proces ługowania, jak i jego model dla kawern poziomych są bardziej skomplikowane niż dla kawern pionowych. Najlepiej ilustrują to dwie tablice, przytoczone za (Kunstman, Urbańczyk, 1995)

The horizontal cavern leaching process and its model are more complex in comparison to the leaching process and model of the vertical cavern, respectively. That is illustrated in the best way by two Tables quoted here after (Kunstman and Urbańczyk 1995).

## LITERATURA/REFERENCES

- KNAPP R.M., PODIO A.L. 1979. Investigation of Salt Transport in Vertical Boreholes and Brine Invasion into Fresh Water Aquifers. Report ONWI-77.
- KUNSTMAN A. S., URBAŃCZYK K. M., 1990. UBRO A Computer Model for Designing Salt Caverns Leaching Process Developed at CHEMKOP, SMRI Meeting Paper, Paris 15-18 X 1990
- KUNSTMAN A. S., URBAŃCZYK K. M., 1995. Modelling of horizontal cavern leaching: main aspects and perspectives. SMRI Meeting Paper, San Antonio, 22-25 X 1995
- KUNSTMAN A., POBORSKA-MŁYŃNARSKA K., URBAŃCZYK K., 2002. Zarys otworowego ługownictwa solnego. AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków. Eng. Ed. 2007.
- LI J.L., YANG C.H., SHI X.L., Xu W.J., Li Y.P., DAEMEN J.J.K., 2020. Construction modeling and shape prediction of horizontal salt caverns for gas/oil storage in bedded salt. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 190, 107058.
- LIU J., JIANG D., CHEN J., et al. 2014. Similar experiments of the flow field in cavity construction of underground saliferous rock horizontal petroleum gas storage. *Environment, Energy and Sustainable Development – Sung, Kao & Chem (eds) Taylor & Francis Group, London.*
- MORTON B. R., TAYLOR G. I., TURNER J. S., 1956. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. *Proc. R. Soc. Lond. A* 234:1–23.
- PIEPRZYK L., RADOMSKI A. 1960. *Ługowanie złoża soli w Wieliczce otworami wierconymi z wyrobisk podziemnych. Przegląd Górniczy* 16 (2):90-94.
- PLESSET M.S., Whipple C.G., 1974. Viscous Effects in Rayleigh-Taylor Instability. *Phys. Fluids* 17 (1):1-7.
- RUSSO A. J., 1981. A solution mining code for studying axisymmetric salt cavern formation. Sandia Report SAND81-1231, 1-32.
- RUSSO A. J., 1983. Solution Mining Calculations for Strategic Petroleum Reserve Caverns. *Proc. Sixth Salt Symposium* Toronto 1983, Vol. II, 101-109.
- RUSSO A. J., 1995. HORSMIC Solution Mining Code for Horizontal Caverns. SMRI Meeting Paper, San Antonio, 22-25 X 1995,
- SABERIAN A., 1977. Salt Dissolution in Horizontal Conduits, SMRI File No. 77-0005-SMRI (A. Saberian & Associates report no. 773)
- SABERIAN A., 1978. Experimental Studies of Salt Dissolution in Horizontal Fractures, SMRI File No. 78-0007-SMRI (A. Saberian & Associates report no. 7879-1)
- SABERIAN A., 1995. A Preliminary Model for Horizontal Well Leaching. SMRI Meeting Paper, San Antonio, 22-25 X 1995
- THOMS R. L., GEHLE R. M., 1993. Feasibility of Controlled Solution Mining from Horizontal Wells, SMRI Meeting Paper, Lafayette, October 24-27, 1993
- URBAŃCZYK K., 2015. Źródła wiedzy o procesie ługowania kawern solnych (Proces ługowania kawern solnych cz. I). *Przegląd Solny*, 11: 32–43
- URBAŃCZYK K., 2017. Matematyczno-fizyczny opis procesu ługowania (Proces ługowania kawern solnych cz. II). *Przegląd Solny*, 13: 47-66.
- URBAŃCZYK K., 2018. Model numeryczny procesu ługowania (Proces ługowania kawern solnych cz. III). *Przegląd Solny*, 14: 54-69.
- URBAŃCZYK K., 2019/2020. Między teorią a praktyką (Proces ługowania kawern solnych cz. IV). *Przegląd Solny*, 15: 75-85
- WU G., XIAO C. F., QIU X. D., 1992. Study on the dissolution rate of rock salt (po chińsku / in Chinese). *Chem. Min. Tech.* 01, 19-22 (1992).
- WOYCIECHOWSKI J., 1956. Komora ługownicza Leona Pieprzyka. *Przegląd Górniczy* 12 (7-8): 308-313
- XING W., ZHAO J., HOU Z. et al. 2015. Horizontal natural gas caverns in thin-bedded rock salt formations. *Environ Earth Sci* 73: 6973–6985.
- ZHANG G., WANG Z., LIU J. et al. 2020. Stability of the bedded key roof above abandoned horizontal salt cavern used for underground gas storage. *Bull Eng Geol Environ*, 79: 4205–4219.



# Badania mineralogiczno-petrograficzne i ługownicze prób soli ze złoża Sorkol (Kazachstan)

## Mineralogical-petrographic and leaching tests of rock salt samples from the Sorkol deposit (Kazakhstan)

Justyna NOWIŃSKA-JARZĘBIŃSKA<sup>1,2</sup>, Natalia WALCZAK-TORBA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych "CHEMKOP" sp. z o.o., ul. J. Wybickiego 7,31-261 Kraków;

<sup>2</sup>Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
e-mail: justyna.k.nowinska@gmail.com, natalia.walczak91@gmail.com

<sup>1</sup>The Research and Development Centre for Mining of Chemical Raw Materials "CHEMKOP" Sp. z o.o., ul. J. Wybickiego 7,31-261 Cracow;

<sup>2</sup> AGH University of Science and Technology in Cracow, Faculty of Geology, Geophysics and Environmental Protection, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Cracow  
e-mail: justyna.k.nowinska@gmail.com, natalia.walczak91@gmail.com

### STRESZCZENIE

Złoże soli kamiennej Sorkol znajduje się w południowo-wschodniej części Republiki Kazachstanu, w obwodzie żambylskim, w rejonie Sarysu. Obszar ten charakteryzuje się klimatem umiarkowanym, suchym, skrajnie kontynentalnym, o dużych amplitudach temperatur dobowych. Tak niekorzystne warunki klimatyczne doprowadziły do pustynienia tego obszaru i znacząco przyspieszyły ewaporację płytkich zbiorników zasilanych przez wysoko zmineralizowane wody. Wszystko to poskutkowało powstaniem lokalnych salin na powierzchni. Badane sole znajdują się w basenie sedymentacyjnym Chu-Sarysu, w serii permjskich ewaporatów na głębokości ok. 240 do ok. 520 m p.p.t., a ich łączna miąższość wynosi około 280 m. W skład tej serii wchodzi sól drobnokrystaliczna, po grubokrystaliczną, a cały profil jest mocno zanieczyszczony skonsolidowanymi minerałami ilastymi, nazywanymi lokalnie argillitem oraz wodorotlenkami żelaza, które znacząco wpłyną na eksploatację otworową tych soli. Sole ze złoża Sorkol posiadają zupełnie odmienne cechy fizyko-chemiczne niż dotychczas opisywane w literaturze polskiej sole ze złóż europejskich wieku permjskiego.

**Słowa kluczowe:** złożo soli kamiennej Sorkol, argillit, badania mineralogiczno-petrograficzne, badania chemiczne, minerały ilaste

### ABSTRACT

The Sorkol rock salt deposit is located in the south-eastern part of the Republic of Kazakhstan, in the *Żambyl* district, the Sarysu region. This area is characterized by a temperate, dry, extremely continental climate with large diurnal temperature variations. Such extreme and unfavorable climatic conditions led to the desertification of this area and significantly accelerated the evaporation of shallow reservoirs fed by highly mineralized waters, which resulted in the formation of local salines. Analysed salts are located in the Chu-Sarysu sedimentary basin in a series of Permian evaporites at a depth of approx. 240 to approx. 520 m below sea level and the total thickness about 280 m. This series includes fine-crystalline salt to coarse-crystalline salt, but the whole salt series is heavily contaminated with consolidated clay minerals locally called argillite and also iron hydroxides, which will significantly affect the efficient exploitation of this deposit in the future. Salts from the Sorkol deposit have completely different features than the salts from European (Permian) deposits described so far in Polish literature.

**Keywords:** Sorkol rock salt deposit, argillite, mineralogical-petrographic analysis, chemical analysis, clay minerals

## 1. WSTĘP

Złoże soli kamiennej Sorkol znajduje się w południowo-wschodniej części Republiki Kazachstanu, w obwodzie żambylskim, którego stolicą jest miasto Taraz. Obwód żambylski jest podzielony na rejony, a omawiane złożo leży w obrębie rejonu Sarysu (Ryc. 1).

Klimat w tej części Kazachstanu można scharakteryzować jako umiarkowany, lecz suchy, skrajnie kontynentalny, o dużych amplitudach temperatur dobowych (Salnikov i inni, 2014). Takie warunki klimatyczne wpływają na wzmożoną ewaporację i postępujący proces pustynnienia, które prowadzą do okresowego zanikania jezior i powstawania lokalnych salin (profil geologiczny w rejonie złoża Sorkol rozpoczyna się od 40 cm soli, która jest podścielona łem czerwonym wstępującym naprzemiennie z piaskowcami - Ryc. 3). Zazwyczaj barwa takich zbiorników jest seledynowo-zielonkawa, co wskazuje na obecność w solance dużej ilości jonów  $Fe^{2+}$  (Ryc. 1). W większości przypadków są to płytkie, wysychające okresowo zbiorniki zasilane przez wysoko zmineralizowane wody (od 0,45–0,75 g/l przy wysokim stanie wody do 5,5 g/l) rzeki Sarysu (Сарысу) oraz inne, lokalne dopływy (Pospelov, 2001). Rzeka Sarysu jest nazywana żółtą rzeką ze względu na dużą ilość transportowanego materiału terygenicznego pochodzenia górskiego jak i pustynnego.

## 2. CHARAKTERYSTYKA GEOLOGICZNA REJONU ZŁOŻA

Geologicznie jest to obszar zasięgu basenu sedymentacyjnego Chu-Sarysu, który jest drugim co do wielkości basenem sedymentacyjnym w Kazachstanie o przebiegu NW-SE, i powierzchni 160 000 km<sup>2</sup>. Basen Chu-Sarysu wykazuje cechy basenu przedgórskiego (Abuov i inni, 2020). Basen pogłębia

## 1. INTRODUCTION

The Sorkol rock salt deposit is located in the south-eastern part of the Republic of Kazakhstan, in the Žambyl district, the capital of which is the Taraz city. The Žambyl district is divided into several regions, and the deposit lies in the Sarysu region (Fig. 1).

The climate in this part of Kazakhstan can be characterized as moderate, but dry, extremely continental, with large changes in the diurnal range of temperatures (Salnikov et al., 2014). Such climatic conditions contribute to increased evaporation and the progressive process of desertification, which lead to the periodic evaporation of lakes and which lead to form local salins (the geological profile in the Sorkol deposit begins with 40 cm of salt, which is lined with red clay ascending alternately with sandstones - Fig. 3). Typically, the colour of such basins is aquamarine-greenish, which indicates the presence of large amount of  $Fe^{2+}$  ions in the brine (Fig. 1). In most cases, these are shallow, periodically drying reservoirs fed by highly mineralized waters (from 0.45–0.75 g/l at high water level to 5.5 g/l) of the Sarysu River (Сарысу) and other local tributaries (Pospelov, 2001). The Sarysu river is called the yellow river due to a large amount of transported terrigenous material of mountain and desert origin.

## 2. GEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE DEPOSIT AREA

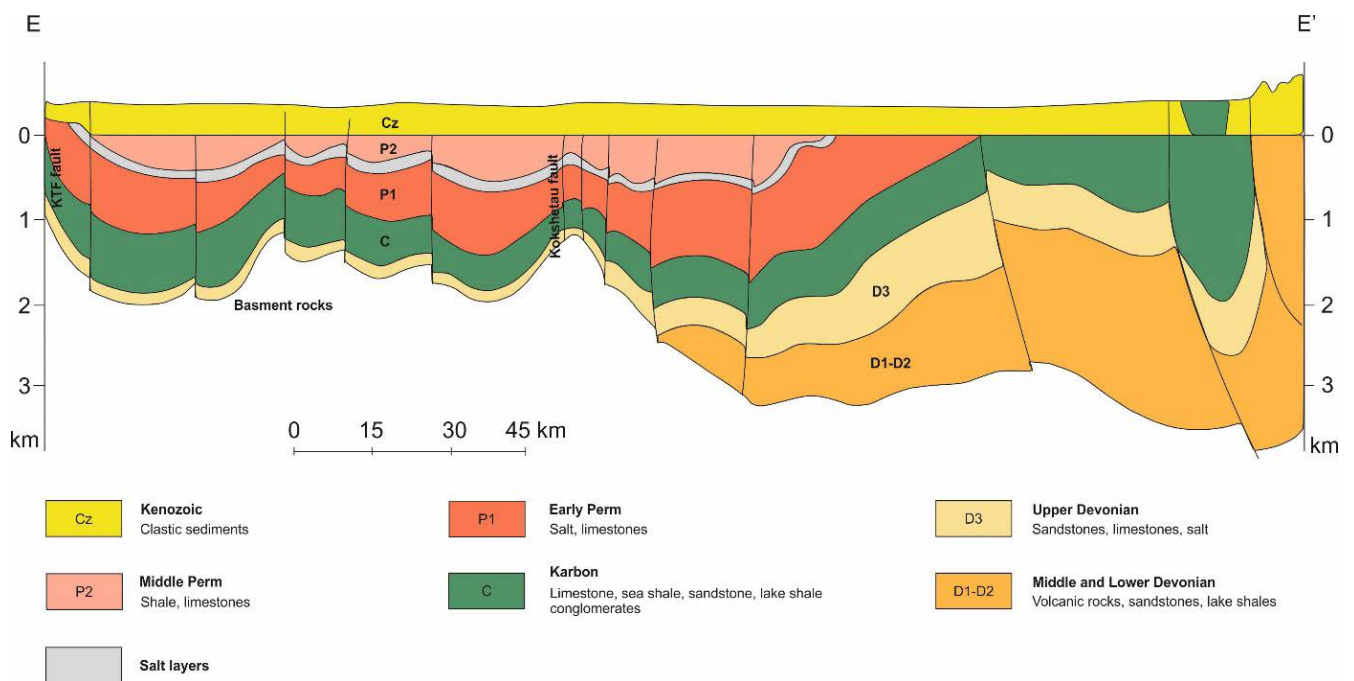
Geologically, it is an area of the Chu-Sarysu sedimentary basin, which is the second largest sedimentary basin in Kazakhstan, with a course of NW-SE, and an area of 160,000 km<sup>2</sup>. The Chu-Sarysu basin shows the features of the pre-mountain basin (Abuov et al., 2020). The basin deepens towards the Karatau mountain massif and is filled with 5 km of



**Ryc. 1.** Lokalizacja basenu sedymentacyjnego Chu-Sarysu z uwzględnieniem podziału administracyjnego rejonu jego występowania (opracowanie autorskie) oraz zdjęcie satelitarne rejonu złoża Sorkol z widocznymi, okresowo wysychającymi jeziorami (źródło: GoogleMaps).

**Fig. 1.** Location of the Chu-Sarysu sedimentary basin, with the administrative division of the area (author's work) and a satellite image of the Sorkol deposit area with visible, periodically drying lakes (source: GoogleMaps).





Ryc. 2. Przekrój geologiczny przez basen sedimentacyjny Chu-Sarysu (Bykadorov i inni, 2003, w: Abuovi i inni, 2020 - zmieniony).

Fig. 2. Geological cross-section through the Chu-Sarysu sedimentation basin (Bykadorov et al., 2003, in Abuovi et al., 2020 - modified).

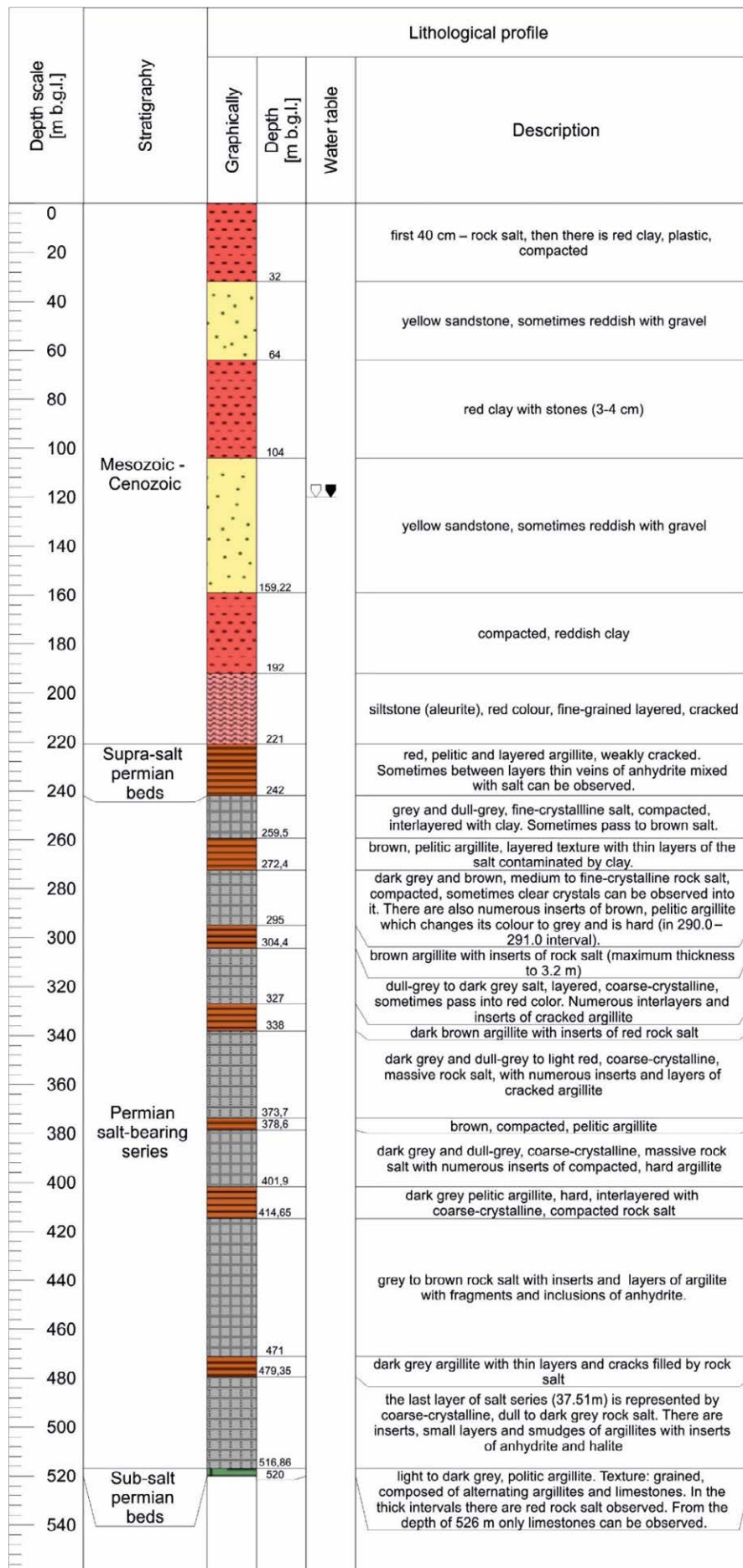
się w kierunku masywu górskiego Karatau, a wypełniają go paleozoiczne osady o miąższości 5 km, które można podzielić na 3 sekwencje depozycyjne: lagunowe i marginalno-morskie warstwy solonośne famenu i wczesnego karbonu (od 500 do 800 m miąższości), węglonośne warstwy paraliczne i płytko-morskie wczesnego karbonu (od 500 do 2000 m miąższości) oraz aluwialno-jeziorne osady typu „red beds” środkowego karbonu do permu o miąższości 2,5 km., zawierające ponad 500 m permskich ewaporatów (Ryc. 2), które stanowią przedmiot niniejszych badań mineralogiczno-petrograficznych, chemicznych i ługowniczych (Bykadorov i inni, 2003).

Profil osadów tego rejonu (Ryc. 3), jak już wspomniano, rozpoczyna się od naskorupień soli kamiennej o miąższości 40 cm, którą podściela il plastyczny i zwięzły. Następnie występują piaskowce żółte, czasem z czerwonym żwirem. Taka seria przewarstwiających się osadów terygenicznych piaskowcowo-żwirowo-iłowcowych ma miąższość ok. 200 m. Bezpośrednio nad permскими warstwami nadsolnymi zalega mułowiec (aleuryt) barwy czerwonej o strukturze drobnoziarnistej, warstwowany. Warstwy nadsolne permu są wykształcone jako czerwony, warstwowany, pelityczny argilit z cienkimi żyłkami anhydrytu wymieszanego z solą. Permska seria solonośna została stwierdzona na głębokości od ok. 240 do ok. 520 m p.p.t. o łącznej miąższości ok. 280 m (zgodnie profilem geologicznym złoża - Ryc. 3.). W skład tej serii wchodzi sól drobno-kryształiczna, czasem przechodząca w grubokryształiczną, często z widocznymi przezroczystymi kryształami. Sól jest zbita, o barwie rdzawo-brunatnej, czasem brązowej i ciemnoszarej, w której można zaobserwować liczne wkładki, przerosty i smugi, bądź rozproszone fragmenty skał ilastych, wykształconych

Palaeozoic sediments, which can be divided into 3 deposition sequences: lagoon and marginal-marine saline layers of Famennian and Early Carboniferous (from 500 to 800 m thick), carbon-bearing paralic layers and early Carboniferous plateau (500 to 2000 m thick) and alluvial lake sediments of the Middle Carboniferous to Permian type 2.5 km thick, containing over 500 m of Permian evaporites (Fig. 2), which are the subject of the present mineralogical-petrographic, chemical and leaching studies (Bykadorov et al., 2003).

The sedimentation profile of this region (Fig. 3) begins with rock salt crusts with a thickness of 40 cm, which are underlain by plastic and firm clay and yellow sandstones, sometimes with reddish gravel. This series of overlapping sand-gravel-clay sediments has a thickness of approx. 200 m. Directly above the Permian supra-saline layers, there is a red mudstone (aleurites) with a fine-grained structure, layered. The Permian supra-salt layers are formed as red, layered, pelitic argillite with thin veins of anhydrite mixed with salt. The Permian salt-bearing series was found at a depth of approx. 240 to approx. 520 m below sea level with a total thickness of approx. 280 m (according to the geological profile of the deposit - Fig. 3).

This series includes fine-crystalline salt, sometimes turning into coarse-crystalline salt, often with visible clear crystals. The salt is compact, rusty-brown, sometimes brown, and dark gray, in which numerous inserts, overgrowths, and streaks, or scattered fragments of clay rocks can be observed, formed as highly diagenized clay, compact (called argillite in local literature and studies).



Ryc. 3. Profil litologiczny otworu wiertniczego w rejonie złoża soli kamiennej Sorkol.

Fig. 3. Lithological profile of the borehole in the Sorkol rock salt deposit.

jako silnie zdiagenezowany iłowiec, zwięzły (w lokalnej literaturze i opracowaniach nazywany argillitem). Za argility można przyjąć skały pelitowe, w których składzie jest co najmniej 50% minerałów ilastych lub wodorotlenków glinu. W nomenklaturze polskiej nie używa się jednak określenia argillit a ił lub iłowiec z domieszką wodorotlenków glinu. Skały alitowe do grupy, których zalicza się argilit uważa się za ogniwo pośrednie między utworami chemicznymi i ilastymi (Manecki i Muszyński, 2008). Bolewski i Parachoniak (1982) podają podobną definicję, tj. „silnie zdiagenezowane, nieplastyczne, pelityczne skały masywne - lub warstwowe - zawierające przynajmniej 50% minerałów ilastych lub wodorotlenków glinu. Nazwa ta pochodzi z języka francuskiego i stanowi odpowiednik polskiej nazwy ił (iłowiec), z tą różnicą, że odnosi się do skał zawierających zarówno minerały ilaste, jak i wodorotlenki glinu, a zatem obejmuje masywne skały ilasto-mułowe, ilaste i alitowe”. Z racji użycia tej nazwy przez Inwestora, będzie ona stosowana w niniejszym artykule synonimicznie z iłowcem.

Iłowiec (argilit) jest tutaj opisywany jako skała twarda, pelityczna, zwięzła, ale czasem spękana, o barwie ciemnoszarej do brunatnej i brązowej. Cała seria solna jest mocno zanieczyszczona skałami ilastymi (argillitem), które wpływają niekorzystnie na współczynniki ługowania, a co za tym idzie zaburzają cały ten proces. W podłożu omawianej serii wydzielono permskie warstwy podsólne, które rozpoczynają się skałami ilastymi (argillitami) o teksturze słoistej, a od głębokości 526 m można zaobserwować tylko skały wapienne.

### 3. METODYKA

Dla skał serii solnej z wybranych głębokości wykonano analizy chemiczne oraz obserwacje mikroskopowe (lupa binokularna), opisano makroskopowo dostarczone rdzenie oraz wykonano podstawowe badania ługownicze, które pozwoliły określić szybkość ługowania na płaszczyźnie bocznej i stropowej, gęstość soli oraz zawartość części nierozpuszczalnych.

Testy prowadzono z użyciem czystej wody o temperaturze 20°C. Średnica próbek testowych wynosiła 60 mm, natomiast długość 100 mm. Próby testowe ważono przed i po ługowaniu. W celu obliczenia szybkości ługowania poziomego (bocznego) wycięto odpowiednie kształty próbek, tak aby duże powierzchnie były równoległe do osi rdzenia, natomiast w celu określenia szybkości ługowania stropowego (pionowego) próby przygotowano tak aby duże powierzchnie ługowane były prostopadłe do osi rdzenia. Pole powierzchni próbki policzono za pomocą oprogramowania komputerowego, na podstawie zeskalowanych skanów prób. Następnie powierzchnie dokładnie wyrównano poprzez oszlifowanie i oczyszczono, a następnie zaparafinowano w celu ochrony powierzchni nie przeznaczonych do ługowania, natomiast powierzchnia ługowana została odkryta. Testy na próbach prowadzono do ustabilizowania procesu ługowania, a odpo-

Pelitic rocks with the composition of at least 50% clay minerals or aluminum hydroxides can be taken as argillite. However, the Polish nomenclature does not use the term argillite or clay with an admixture of aluminum hydroxides. Alite rocks, the group of which includes argillite, are an intermediate link between chemical and clay formations (Manecki and Muszyński, 2008). Bolewski and Parachoniak (1982) give a similar definition, i.e., “highly diagenised, nonplastic, pelitic massive - or layered - rocks containing at least 50% clay minerals or aluminum hydroxides”. This name comes from the French language and is equivalent to the Polish name clay (claystone) with the difference that it refers to rocks containing both clay minerals and aluminum hydroxides, and therefore includes massive clay-silt, clay, and allite rocks. Due to the use of this name by the Investor, it will be used in this article synonymously with the claystone. Claystone (argillite) is described here as a hard, pelitic, compact but sometimes cracked rock, dark gray to brown. The entire salt series is heavily contaminated with clay rocks (argillite), which adversely affect the leaching rates and thus disrupt the entire process. In the base of the mentioned series, Permian sub-salt layers were distinguished, which begin with clay rocks (argillite) with a grain texture, and deeper - from a depth of 526 m, only limestone rocks can be observed.

### 3. METHODOLOGY

For the salt series rocks from selected depths, chemical analyzes and microscopic observations (binocular magnifier) were performed. There were also macroscopic describes of cores and basic leaching tests performed. These studies allowed to determine the leaching rate on the lateral and horizontal plane, salt density, and content of insolubles.

Tests were conducted with pure water at 20°C. The diameter of the samples was 60 mm, and the length was 100 mm. The samples were weighed before and after leaching. To calculate the horizontal (lateral) leaching rate, the corresponding shapes of the samples were cut so that the large surfaces were parallel to the core axis, while to determine the top (vertical) leaching rate, the samples were prepared in the way, that the large leaching surfaces were perpendicular to the core axis.

The surface area of the sample was calculated using computer software based on scaled scans of the samples. The surfaces were then carefully sanded and cleaned and then waxed to protect non-leachable surfaces, while the leached surface was exposed. The tests were conducted until the leaching process stabilized, and the respective time was 21 minutes for all samples. The quality of the obtained surface was assessed after leaching by analyzing the size of the pits, the appearance of which is usually associated with mechanical damage to the core or the presence of easily soluble salts (Fig. 5)



Składniki chemiczne Chemical components	L-1		L-5		L-6	
	g	ppm	g	ppm	g	ppm
<b>sole/salts</b>	100 g	100 g	100 g	100 g	100 g	100 g
<i>Cl</i> <sup>-</sup>	55,67	1570,25	55,58	1567,71	58,60	1652,89
<i>SO</i> <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,91	18,95	2,22	46,22	0,28	5,83
<i>CO</i> <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>HCO</i> <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,43	7,05	0,27	4,43	0,31	5,08
<b>aniony/anions</b>		1596,24		1618,36		1663,80
<i>K</i> <sup>+</sup>	0,010	0,26	0,01	0,26	0,010	0,26
<i>Na</i> <sup>+</sup>	36,29	15770,70	36,26	1576,54	38,07	1655,42
<i>Mg</i> <sup>2+</sup>	0,01	0,82	0,02	1,64	0,020	1,64
<i>Ca</i> <sup>2+</sup>	0,35	17,47	0,80	39,92	0,13	6,49
<b>kationy/cations</b>		1596,24		1618,36		1663,80
<b>części nierozpuszczalne insolubles</b>	5,98		4,62		2,41	
<b>H<sub>2</sub>O krystaliczne H<sub>2</sub>O crystalline</b>	0,35		0,21		0,12	
<b>skład mineralny mineral composition</b>	100,00		99,99		99,95	
<i>Ca(HCO</i> <sub>3</sub> <i>)</i> <sub>2</sub>	0,57		0,36		0,41	
<i>KCl</i>	-		-		0,02	
<i>NaCl</i>	91,77		91,62		96,47	
<i>CaCl</i> <sub>2</sub>	-		-		0,08	
<i>MgCl</i> <sub>2</sub>	-		-		0,04	
<i>CaSO</i> <sub>4</sub>	1,19		2,72		0,40	
<i>MgSO</i> <sub>4</sub>	0,05		0,10		-	
<i>K</i> <sub>2</sub> <i>SO</i> <sub>4</sub>	0,02		0,02		-	
<i>NaSO</i> <sub>4</sub>	0,05		0,33		-	
<b>nie określono/undefined</b>	5,98		4,62		2,41	
<b>H<sub>2</sub>O krystaliczna H<sub>2</sub>O crystalline</b>	0,35		0,21		0,12	
<b>suma/total</b>	99,98		99,98		99,95	

Ryc. 4. Makroskopowe zdjęcia rdzeni wraz z wynikami analizy chemicznej.

Fig. 4. Macroscopic photos of the cores with the results of chemical analysis



wiedni czas wynosił 21 minut dla wszystkich prób. Jakość uzyskanej powierzchni oceniano po wyługowaniu, analizując wielkość wżerów, których wygląd jest związany zwykle z mechanicznymi uszkodzeniami rdzenia lub z obecnością soli łatwo rozpuszczalnych (Ryc. 5).

Próbki soli do obserwacji mikroskopowych rozpuszczono, a części nierozpuszczalne wysuszono na sączkach i poddano suchą pozostałość obserwacjom przy pomocy lupy binokularnej. Zawartość części nierozpuszczalnych oznaczono w sekcji rdzenia poddanej testom ługowania metodą procentową. Do każdego testu użyto ok. 300 g soli, fragmenty wysuszono, zważono i umieszczono na specjalnej siatce. Wszystkie roztwory z zawieszonymi i osadzonymi cząstkami przefiltrowano przez bibułę, przepłukano wodą w celu usunięcia jonów chlorkowych i wysuszono, na koniec ważąc suchą pozostałość.

Wyniki analizy chemicznej uzyskano od Inwestora, nie były one przedmiotem opracowania autorskiego.

#### 4. WYNIKI BADAŃ

Makroskopowo sole charakteryzowały się zróżnicowaną barwą, krystalicznością oraz zawartością części nierozpuszczalnych w postaci minerałów ilastych lub skały ilastej (argillitu) (Ryc. 4). Próba L-1 to sól kamienna barwy ciemnoszarej do brunatnej, która miejscami była przezroczysta a lokalnie mlecznobiała. Skała posiadała strukturę średnio do grubokrystalicznej, teksturę masywną, a ponadto była przerośnięta nieregularnymi agregatami iłowca (argillitu) oraz minerałami ilastymi barwy brunatnej. Sól z próby L-5 makroskopowo miała barwę szarą do ciemnoszarej, strukturę grubokrystaliczną. Ogólnie można było ją opisać jako sól czystą, bez widocznych zanieczyszczeń. Całkiem inaczej prezentowała się próba L-6, w której ilość zanieczyszczeń w postaci anhydrytu i iłowca (argillitu) była bardzo wysoka. Analizy chemiczne wskazują oprócz minerałów ilastych z tlenkami żelaza (koloidami żelazistymi) również dużą ilość siarczanów i magnezu. Zawartość NaCl waha się od ok. 91,5% - 96,5% czyli jest stosunkowo wysoka, biorąc pod uwagę obserwacje makroskopowe. Ponadto w skałach występują niewielkie domieszki siarczanów, max. do 3%, a także substancja niezidentyfikowana/amorficzna o zawartości max. 6%, którą można zaliczyć do tlenków i wodorotlenków żelaza. Badane próby wymagają przeprowadzenia bardziej szczegółowej analizy mineralogicznej z wykorzystaniem metody XRD i SEM-EDS.

Bardzo ciekawym zjawiskiem zachodzącym w trakcie ługowania prób soli było powstawanie zielonkawo-szarego koloidu, który wraz z upływem czasu zmieniał barwę na brunatno-rdzawą, co doskonale widać w słoju z rozpuszczoną próbą L-6 (Ryc. 5). Po rozpuszczeniu prób, w częściach nierozpuszczalnych próby L-1 zaobserwowano liczne blaszkowate nagromadzenia minerałów o połysku metalicznym i barwie szaro-czarnej, które wymagają dalszych analiz w celu odpowied-

The samples of the salt for microscopic observation were dissolved and the insoluble matter was dried on filter paper and the dry residue was subjected to observation with a binocular magnifier. The content of insoluble matter was determined in the section of the core subjected to the leaching tests by the percentage method. Approx. 300 g of salt was used for each test, the pieces were dried, weighed, and placed on a special mesh. All the solutions with suspended and settled particles were filtered through paper, rinsed with water to remove chloride ions, dried, and finally weighted. The results of the chemical analysis were obtained from the Investor, they were not the subject of the author's study.

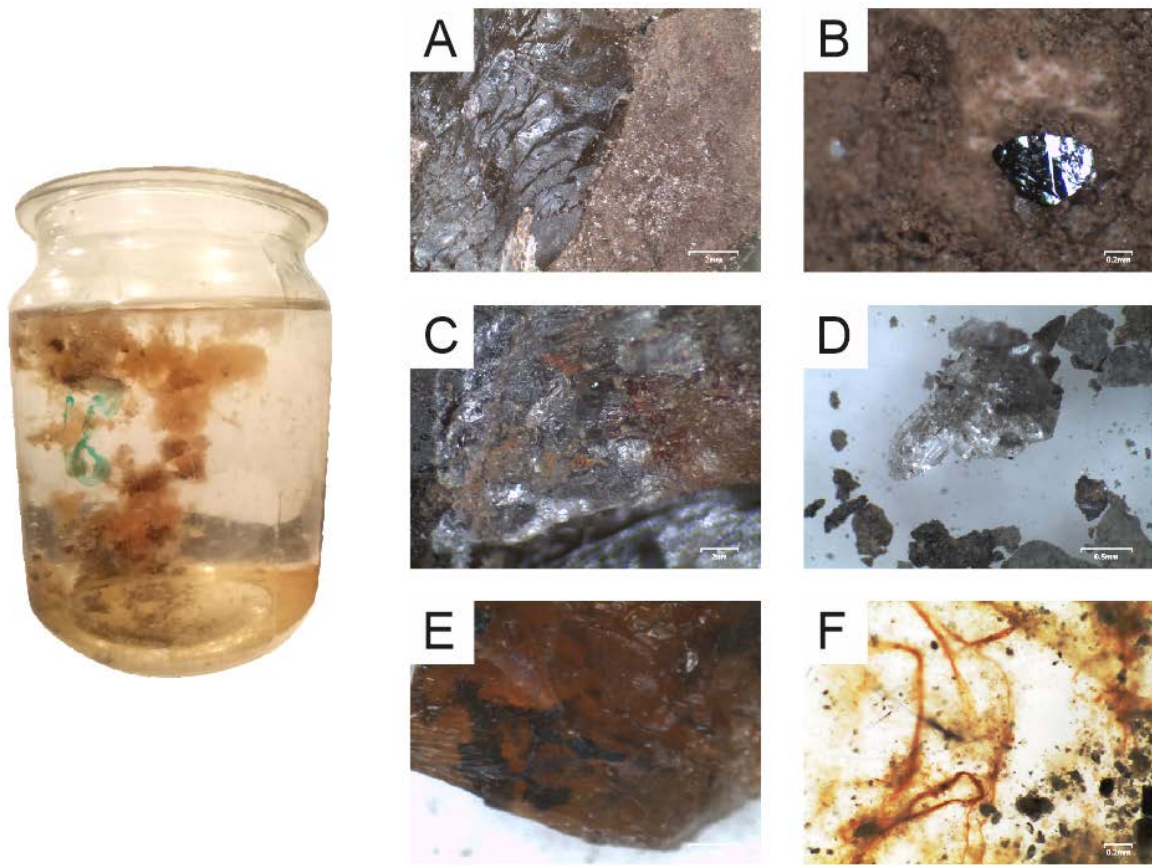
#### 4. RESULTS

Macroscopically, the salts differed in color, crystallinity, and the content of insoluble particles in the form of clay minerals or clay rock (argillite) (Fig. 4). The sample L-1 is a dark gray to brown rock salt which was transparent in places and locally milky white. The rock had a medium to coarse-crystalline structure, and massive texture, and was also overgrown with irregular aggregates of claystone (argillite) and brown clay minerals.

The salt from sample L-5 was macroscopically gray to dark gray, with a coarse-crystalline structure. In general, it could be described as pure salt, with no visible impurities. The L-6 sample was quite different, in which the number of impurities in the form of anhydrite and claystone (argillite) was very high. Chemical analyzes indicate, apart from clay minerals with iron oxides (ferric colloids), also many sulfates and magnesium. The content of NaCl ranges from approx. 91.5% - 96.5%, which is relatively high, considering the macroscopic observations. Moreover, the rocks contain small admixtures of sulphates, max. up to 3%, as well as an unidentified/amorphous substance with content of max. 6%, which can be classified as iron oxides and hydroxides. The investigated trials require a more detailed mineralogical analysis using the XRD and SEM-EDS methods.

A very interesting phenomenon occurring during the leaching of the salt samples was the formation of a greenish-gray colloid, which changed its colour to brown-rusty over time, which is visible in the jar with the dissolved L-6 sample (Fig. 5). After the dissolution of the samples, numerous lamellar accumulations of metallic, gray-black minerals were observed in the insoluble portions of sample L-1, which require further analysis for appropriate mineralogical identification (Fig. 5B). The observations were also given of salt fragments and salt contact with firm claystone (argillite) (Fig. 5 A, C, E).

The insoluble contribute significantly to the entire leaching process, particularly cavern formation, leaching rate, and cavern shape. Therefore, the content of these parts is



**Ryc. 5.** Obraz mikroskopowy (lupa binokularna) prób soli z iłowcem (argillitem). A - Próba L-1, widoczny materiał drobnoziarnisty, pelityczny barwy brunatno-beżowej w sąsiedztwie brunatnej soli kamiennej, powiększenie x5; B - Próba L-1, blaszkowaty minerał o połysku metalicznym, powiększenie x7; C - Próba L-1, powierzchnia szarej soli kamiennej z widocznymi wtrąceniami tlenków żelaza; D - Próba L-5, przypuszczalnie minerały z grupy siarczanów w sąsiedztwie szarego materiału pelitycznego, powiększenie x1; E - Próba L-6, kryształ soli o barwie bursztynowo-czerwonej, silnie zanieczyszczona rozproszonymi tlenkami żelaza oraz iłowcem (argillitem), powiększenie x1, F- Próba L-6, koloidy żelaziste, kłaczkowate nagromadzenia wymieszane z okruchami iłowca (argillitu), powiększenie x7.

**Fig. 5.** Microscopic image (binocular magnifier) of salt samples with claystone (argillite). A - Test L-1, visible fine-grained, pelitic material of a brown-beige colour in the vicinity of brown rock salt, magnification x5; B - Test L-1, a lamellar mineral with a metallic luster, magnification x7; C - Test L-1, surface of gray rock salt with visible iron oxide inclusions; D - Test L-5, presumed sulfate minerals adjacent to gray, pelitic material, x1 magnification; E - Test L-6, amber-red salt crystal, heavily contaminated with dispersed iron oxides and claystone (argillite), magnification x1, F- Test L-6, ferric colloids, flocculent accumulations mixed with claystone (argillite) crumbs, magnification x7.



**Ryc. 6.** Skany prób przed i po ługowaniu stropowym oraz bocznym  
**Fig. 6.** Scans of samples before and after vertical and horizontal leaching.

niej identyfikacji mineralogicznej (Ryc. 5B). Obserwacjom podano również fragmenty soli i kontaktu soli ze związłym iłowcem (argillitem) (Ryc. 5 A, C, E).

Części nierozpuszczalne wpływają znacząco na cały proces ługowania, szczególnie na tworzenie wrębu kawerny, szybkość ługowania i kształt komory. Dlatego zawartość tych części jest specjalnie określana w laboratorium na próbach rdzenia bez kruszenia próby przed testem. Analiza chemiczna nie ma tutaj zastosowania, ponieważ jest niemiarodajna pod względem ilości części nierozpuszczalnych powstających w trakcie właściwego ługowania (analizy chemiczne prowadzone są na próbach uśrednionych i sproszkowanych).

Testowane sole L-5 i L-6 zasadniczo nie wykazują dużych zawartości części nierozpuszczalnych, co w przypadku próby L-6 w ogóle nie wynika z obserwacji makroskopowych. Największa zawartość części nierozpuszczalnych - aż 18,8% występuje w próbce L-1. Wartości szybkości ługowania stropowego i bocznego są zróżnicowane (Tabela 1). Wyższe wartości prędkości ługowania są cechą charakteryzującą dane złoża soli i wynikają ze specyficznej struktury soli krystalicznej oraz zawartości i kształtu części nierozpuszczalnych. Grubokrystaliczne sole o niskiej zawartości, np. piasku anhydrytowego, ługują się znacznie wolniej niż w przypadku soli z małymi kawałkami iłowca (argillitu), które „wypadając” podczas testu powodują przyspieszoną utratę masy badanej próbki, a tym samym zwiększają prędkość ługowania poprzez zwiększenie ługowanej powierzchni.

Wyjątkiem jest tutaj sól L6 z interwału 425,47-425,87 m p.p.m., która ma zdecydowanie inne właściwości, co widać w parametrach ługowania. Zaobserwowano znaczną redukcję szybkości ługowania zarówno stropowo (3,8 mm/h), jak i bocznie (4,2 mm/h). Sól ta charakteryzuje się wyraźnie ciemnym kolorem, od brązowego do czerwono-brązowego. Podczas ługowania soli zauważono, że rozpuszcza się w nietypowy sposób. Na powierzchni próbki powstało coś w rodzaju warstwy żelowej, zielono-brązowej, która z czasem utlenia się do brązowo-szarej. Bardzo prawdopodobne, że są to koloidalne związki żelaza. Liczba części nierozpuszczalnych jest klasyfikowana tylko na poziomie 3%, ponadto nie zaobserwowano rozproszonej materii organicznej i bitumu. Analiza chemiczna wykazała również wysoką zawartość  $SO_4$  i Mg.

Trudności w trakcie ługowania próby L-6 spowodowane są tym, że pokrywa się ona galaretowatym filmem, który uniemożliwia dalsze rozpuszczanie skały solnej. Jak się okazuje, części nierozpuszczalne w postaci fragmentów iłowca (argillitu) i być może piasku anhydrytowego nie są tutaj problematyczne, a wręcz katalizują proces ługowania, co doskonale widać na przykładzie próby L-1. Skała zawiera w sobie duże, ostrokrawędziste fragmenty iłowca (argillitu), które odrywają się w trakcie ługowania od całej próbki zwiększając tym samym ługowaną powierzchnię i przyspieszając cały proces.

especially determined in the laboratory on core trials without crushing the sample before the test. Chemical analysis is not applicable here because it is unreliable in terms of the number of insoluble particles formed during the proper leaching (chemical analyzes are carried out on averaged and powdered samples).

The samples L-5 and L-6 did not show high content of insoluble parts, which in the case of the L-6 sample, does not result from macroscopic observations at all. The highest content of insoluble parts - as much as 18.8% occurs in the L-1 sample. The values of the vertical and horizontal leaching rates are different (Table 1). Higher values of the leaching rate are a characteristic of a given salt deposit and result from the specific structure of the crystalline salt as well as the content and shape of the insoluble matter. Coarse-crystalline salts with a low content, e.g., anhydrite sand, leach much slower than in the case of salts with small pieces of claystone (argillite), which “fall out” during the test, cause accelerated weight loss of the test sample, and thus increase the leaching rate by increasing the leached surface.

The exception here is the L6 sample from the interval 425.47-425.87 m below sea level, which has different properties, which can be seen in the leaching parameters. A significant reduction in the leaching rate was observed both from the vertical (3.8 mm/h) and the horizontal (4.2 mm/h). This salt is dark in colour, ranging from brown to reddish-brown. During the leaching of the salt, it was observed to dissolve unusually. A kind of green-brown gel layer has formed on the surface of the sample, which oxidizes to brown, or gray over time. They are very likely to be colloidal iron compounds. The number of insoluble parts is classified only at the level of 3%, moreover, dispersed organic matter and bitumen were not observed. Chemical analysis also showed a high content of  $SO_4$  and Mg.

Difficulties in leaching the L-6 sample are caused of it becomes covered with a gelatinous film that prevents further dissolution of the salt rock. As it turns out, the insoluble parts in the form of fragments of claystone (argillite) and perhaps anhydrite sand are not problematic here and even catalyze the leaching process, which can be seen in the L-1 test. The rock contains large, sharp-edged fragments of claystone (argillite), which detach from the entire sample during leaching, thereby increasing the leached surface and accelerating the entire process.

## 5. CONCLUSIONS

All the mineralogical-petrographic, chemical, and leaching studies were used by the authors to initially present the rocks from the salt bed in the pre-mountain basin of Chu-Sarysu. It should be emphasized here that the overriding aim of the research is to present the salts formed during the evapo-



**Tab. 1.** Wyniki ługowania prób skał solnych ze złoża Sorkol

Nr próbki	Głębokość pobrania próbki [m. p.p.t]	Ługowanie (*)	Czas ługowania [min]	Gęstość objętościowa [g/cm <sup>3</sup> ]	Współczynnik ługowania [mm/h]	Współczynnik szybkości (s/b)	Części nierozpuszczalne [%]	Stan powierzchni Uwagi
L1	277,30- 277,50	V	21	2,16	15,7	1,9	18,8	Dobra, małe niewyługowane wyspy, małe wżery
		H	21	2,16	8,4			Dobra, liczne niewyługowane wysepki, ogromne wżery
L5	395,08- 395,37	V	21	2,10	20,1	2,9	1,6	Bardzo dobra, bardzo małe niewyługowane wyspy, brak wżerów
		H	21	2,10	7			Bardzo dobra, bardzo małe niewyługowane wyspy i wżery
L6	425,47- 425,87	V	21	2,20	3,8	0,9	3,0	Zła, liczne niewyługowane wysepki i wżery
		H	21	2,18	4,2			Zła, liczne niewyługowane wysepki i wżery

\*V-stropowe, H-boczne

**Tab. 1.** Results of leaching of salt rocks from the Sorkol deposit.

Sample No.	Sample collection depth [m. p.p.t]	Leaching (*)	Leaching time [min]	Bulk density [g/cm <sup>3</sup> ]	Leaching rate [mm/h]	Leaching rate ratio (s/b)	Insoluble parts [%]	Surface condition Comments
L1	277,30- 277,50	V	21	2,16	15,7	1,9	18,8	Good, little non-leached islands, little pits
		H	21	2,16	8,4			Good, lots of non-leached islands, huge pits
L5	395,08- 395,37	V	21	2,10	20,1	2,9	1,6	Very good, very small non-leached islands, no pitting
		H	21	2,10	7			Very good, very small non-leached islands and pits
L6	425,47- 425,87	V	21	2,20	3,8	0,9	3,0	Bad, numerous non-leached islands and pits
		H	21	2,18	4,2			Bad, numerous non-leached islands and pits

\*V-vertical, H-horizontal



## 5. WNIOSKI

Całość badań mineralogiczno-petrograficznych, chemicznych i ługowniczych posłużyła autorkom do wstępnego zaprezentowania skał pochodzących z pokładu soli w basenie przedgórskim, jakim jest Chu-Sarysu. Należy tutaj podkreślić, że nadrzędnym celem badań jest zaprezentowanie soli powstających w trakcie ewaporacji słonego jeziora, w warunkach suchego klimatu kontynentalnego, które znacznie różnią się od soli tego samego wieku spotykanych w Polsce.

Przebadane sole w wybranych interwałach wykazywały duże zanieczyszczenie materiałem ilastym, który jest wykształcony jako zdiagenezowany **iłowiec**, nazywany również przez lokalnych geologów **argilitem**. Ten pelityczny, bardzo twardy składnik skał serii solnej wpływa na współczynniki ługowania, a także może być znacznym utrudnieniem w trakcie eksploatacji otworowej, ze względu na jego nagromadzenie na dnie komory - czyli zmniejszenie jej objętości nawet o połowę. Jeżeli chodzi jednak o samo rozpuszczanie soli to skała bogata w większe fragmenty argilitu wykazuje wysokie współczynniki ługowania, tak jak to zaobserwowano w solach próby L-5. Jest to związane z przyspieszeniem ługowania poprzez wypadanie większych fragmentów skał w trakcie badania, co powoduje nagłe zwiększenie ługowanej powierzchni. Niestety obecność takich skał powoduje zazwyczaj nieregularne rozługowania komory, co wpływa niekorzystnie na jej kształt i stateczność, wiąże się to również ze zmniejszeniem jej objętości i trudny do przewidzenia przebieg całego procesu ługowania. Na szczęście w komorach eksploatacyjnych ma to mniejsze znaczenie niż w przypadku komór magazynowych. Ponadto, jeżeli w ługowanej komorze dojdzie do obierania większego fragmentu takiej skały to wtedy może ona uszkodzić rury ługownicze. Profil geologiczny wskazywał na obecność w solach złoża Sorkol zarówno większych warstw, o miąższości nawet 15 m, jak i wkładek 5-10 cm, bądź iłowców wykształconych w formie rozproszonej, co w ogólnym rozrachunku pokazywało, że złożo jest bardzo zanieczyszczone, a warunki jego eksploatacji są niekorzystne.

Jak wykazały obserwacje i badania **koloidalne związki żelaza** mają istotny, negatywny wpływ na ługowanie skały solnej poprzez tworzenie galaretowatego koloidu, który znacząco utrudnia ten proces oraz może doprowadzić do uszkodzenia infrastruktury ługowniczej przy eksploatacji tej serii solnej. Takie koloidy żelaziste wręcz zatrzymywały całe ługowanie, a kłaczkowaty koloid pęczniał i zwisał z powierzchni rdzenia zatrzymując w sobie drobny materiał ilasty. Stężona solanka utrzymywała się na dnie słoja, a ta, która mogłaby jeszcze wylugować sól zatrzymywała się na galaretowatej powierzchni i nie penetrowała próbki. Następnie koloid, z upływem czasu wyraźnie się utleniał i jego barwa z szaro-zielonej przechodziła w różowo-rdzawo-brunatną. Można powiedzieć, że jeśli roztwór nie jest dotleniony, a w trakcie ewaporacji ze-

ration of a salty lake in the conditions of a dry continental climate, which are significantly different from the salts of the same age found in Poland.

The tested salts in selected intervals showed high contamination with clay material, which is formed as a diagenized **claystone**, also called **argillite** by local geologists. This pelitic, very hard component of the salt series rocks affects the leaching rates and can also be a significant obstacle during borehole exploitation due to its accumulation at the bottom of the cavern - by reducing its volume by up to half. However, in terms of salt dissolution itself, a rock rich in larger argillite fragments exhibits high leaching rates, as observed in the salts of sample L-5. This is, connected with acceleration of leaching process by larger rock fragments falling off during the test, resulting in a sudden increase in the leached area. Unfortunately, the presence of such rocks usually causes irregular leaching of the cavern, which adversely affects its shape and stability, it is also associated with a reduction of its volume, so the entire leaching process is difficult to predict. Fortunately, it matters less in the operating caverns than in the storage caverns. Moreover, if a larger fragment of such rock breaks in the leaching cavern, then it can damage the leaching pipes. The geological profile indicated the presence in the salts of the Sorkol deposit of both larger layers, up to 15 m thick, and 5-10 cm inserts, or scattered claystones, which in general showed that the deposit was very contaminated, and the conditions of its exploitation are unfavorable.

Observations and tests of **colloidal substance** have shown that iron compounds have a significant, negative effect on the leaching of rock salt by creating a gelatinous colloid, which significantly hinders this process and may damage the leaching infrastructure during leaching operations. Such ferric colloids stopped all leaching, and the flocculent colloid swelled and hung from the surface of the core, retaining fine claystone material. Concentrated brine lingered at the bottom of the jar, and any unsaturated brine that might have leached out salt was stopped by the gelatinous surface and did not penetrate the sample. Then the colloid oxidized with time and its colour changed from gray-green to pink-rusty-brown. It can be said that if the solution is not oxygenated and the iron in it oxidizes during evaporation, the sediment can change colour from green to red-brown depending on the iron (III) oxide content, as observed in jars leached with the L-6 test. Such minerals are also formed during intensive weathering in dry climates and are probably present in the salt rocks of the Sorkol deposit.

Formulating further conclusions and defining detailed chemical formulas and nomenclature of ferrous colloids as well as the chemical and mineralogical composition of claystone (argillites) forming insoluble parts in salt will be pos-

lazo w nim zawarte ulega utlenianiu, to osad może zmienić kolor od zielonego do czerwono-brązowego, w zależności od zawartości tlenku żelaza (III), tak jak to zaobserwowano w słojach z rozługowaną próbą L-6. Takie minerały tworzą się również w trakcie intensywnego wietrzenia w suchym klimacie i zapewne są obecne w skałach solnych ze złoża Sorkol.

Sformułowanie dalej idących wniosków oraz określenie szczegółowych wzorów chemicznych i nazewnictwa kolidów żelazistych oraz składu chemicznego i mineralogicznego łożców (argilitów) tworzących części nierozpuszczalne w soli możliwe będzie dopiero po wykonaniu analiz mineralogiczno-petrograficznych z wykorzystaniem mikroskopu polaryzacyjnego, dyfraktometrii rentgenowskiej oraz obserwacji za pomocą SEM-EDS.

sible only after mineralogical and petrographic analyzes using a polarizing microscope, X-ray diffraction and observation with SEM-EDS.

#### LITERATURA/REFERENCES

- ABUOV Y., SEISENBAYEV N., LEE W., 2020. CO<sub>2</sub> storage potential in sedimentary basins of Kazakhstan. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 103, 103186.
- BOLEWKI A., PARACHONIAK W., 1982. Petrografia. Wydanie drugie, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 299 pp.
- BYKADOROV V. A. BUSH V.A, FEDORENKO O.A., FILIPPOVA, I. B. MILETENKO, N.V., PUCHAKOV V.N., SMIRNOV A.V, UZHKENOV B.S., VOLOZH Y.A., 2003. Ordovician - Permian palaeogeography of Central Eurasia: Development of Palaeozoic petroleum-bearing basin. *Journal of Petroleum Geology*, 26 (3):325-350
- DANE od Inwestora (2020) - profil geologiczny, wyniki analiz chemicznych, rdzenie wiertnicze.
- KOSOWSKI T., CHROMIK M., NOWIŃSKA J., WALCZAK N., GARDEŁA A., GIEREK M., WRONA P., 2020. Raport końcowy z badań geomechanicznych, ługowania oraz chemicznych dla skał solnych z otworu na złożu Sorkol. Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych "CHEMKOP" sp. z o.o.
- MANECKI A., MUSZYŃSKI M., 2008. Przewodnik do petrografii. Wydawnictwo AGH, Kraków.
- POSPELOV E.M., 2001. Geograficheskienazvaniyamira. Toponimicheskijislovar. Wydawnictwo AST - Astrel' - Russkieslovari.
- SALNIKOV V. TURULINA G., POLYAKOVA S., PETROVA, Y., SKAKOVA, A., 2014. Climate change in Kazakhstan during the past 70 years. *Quaternary International*, 358:77-82.



## **Fotografia w wielickiej kopalni – od zdjęć Awita Szuberta do skaningu laserowego (na przykładzie prywatnej kolekcji Jerzego Przybyły)**

### **Photographs of the “Wieliczka” Salt Mine: from the photographs taken by Awit Szubert to laser scanning images (Based on the private collections of Jerzy Przybyły)**

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” wzbudza od stuleci zainteresowanie zarówno jako obiekt przemysłowy, jaki i turystyczny, dlatego nic dziwnego, że na stałe zagościła w niej fotografia. Obok pełnienia roli turystycznej pamiątki i dokumentu stała się także narzędziem do naukowych badań oraz metod pomiarów podziemnych wyrobisk.

Za odkrywców fotografii uważa się Francuza Louis Jacques Mandé Daguerre, a oraz Anglika Williama Henry’ego Fox Talbota. Obaj niezależnie od siebie w 1839 r. objawili światu jej wynalazek. Musiało jednak minąć ponad 50 lat zanim zawitała do wielickiej kopalni. Pierwszym fotografem, który ją uwiecznił był Awit Szubert, który w 1892 r. wykonał serią zdjęć wydaną rok później w Wiedniu w postaci albumu. Kolejnymi fotografami ważnymi dla kopalni w okresie do 1945 r. byli Jan Czernecki i Władysław Gargul. Zdjęcia ich autorstwa ilustrowały zarówno książki i artykuły traktujące o kopalni, jak i turystyczne przewodniki, a także były wydawane w postaci pocztówek.

Znaczącą powojenną postacią dla Wieliczki był Alfons Długosz. Zainicjował on powstanie Muzeum Żup Krakowskich. Sam był uznanym fotografem i wykonał wiele zdjęć ukazujących podziemia kopalni. Jego prace charakteryzują się dużym kunsztem artystycznym.

Postępujący rozwój turystyki w kopalni wywołał zapotrzebowanie na przewodniki, pocztówki i zestawy pamiątek

#### ABSTRACT

For centuries, the “Wieliczka” Salt Mine has aroused interest both as an industrial facility and as a tourist destination; therefore, it is no wonder that photography has become a permanent aspect of the site. Photographs served as tourist souvenirs and documents, and photographic techniques become tools for scientific research and surveying underground excavations. The Frenchman Louis Jacques Mandé Daguerre and the Englishman William Henry Fox Talbot are considered to be the inventors of photography. They both independently revealed the invention of photography to the world in 1839. However, over 50 years passed before photography arrived at the “Wieliczka” Salt Mine. Awit Szubert was the first photographer who immortalised the Mine. He took a series of photographs in 1892. They were published a year later in Vienna, in the form of an album. Jan Czernecki and Władysław Gargul were other important Salt Mine photographers before 1945. Their photographs illustrated books and articles about the Salt Mine, as well as tourist guides, and were issued in the form of postcards too. Alfons Długosz became a significant post-war figure in Wieliczka. He initiated the creation of the Kraków Saltworks Museum in Wieliczka. He himself was a recognised photographer and took many photographs showing the undergrounds of the Salt Mine. His photographs demonstrated a high artistic craftsmanship. The progressive development of tourism in the Salt Mine triggered demand

kowych zdjęć. Jej wpisanie w 1976 r. na listę zabytków Województwa Krakowskiego, a w 1978 na Światową Listę Dziedzictwa Przyrodniczego UNESCO spowodowało dalsze zapotrzebowanie na zdjęcia z podziemi. Pojawiły się też duże wydawnictwa albumowe traktujące o kopalni. Po 1989 r., kiedy to w Polsce doszło do przemian ustrojowych i powstania gospodarki wolnorynkowej ilość publikacji albumowych, przewodników i innych pamiątek, takich jak np. kalendarze znacznie wzrosła. Publikowały je zarówno firma organizująca ruch turystyczny w kopalni (Kopalnia Soli „Wieliczka” - Trasa Turystyczna sp. z o.o.) jak i Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka.

Obok komercyjnych funkcji związanych z turystyczną i muzealną rolą kopalni fotografia znalazła zastosowanie w pomiarach podziemnych wyrobisk (fotogrametria), dokumentacji podziemnych zabytkowych miejsc, pełniła także rolę edukacyjną i ilustracyjną dla wielu artykułów naukowych oraz popularnonaukowych. Przeszła drogę od klasycznej (rejestracji obrazu na materiałach światłoczułych) do cyfrowej, a jej techniczna kopalniana przyszłość związana jest ze skanowaniem laserowym wyrobisk.

**Słowa kluczowe:** kopalnia soli „Wieliczka”, fotografia, fotogrametria, skaning laserowy

## 1. WPROWADZENIE

Kopalnia Soli „Wieliczka” wzbudza od stuleci zainteresowanie zarówno jako obiekt przemysłowy, jaki i turystyczny, dlatego nie dziwnego, że na stałe zagościła w niej fotografia, która obok pełnienia roli turystycznej pamiątki i dokumentu stała się także narzędziem do naukowych badań oraz metod pomiarów podziemnych wyrobisk.

Pełniła też funkcję dokumentu pozwalającego zachować w postaci obrazu te zakamarki kopalni, po które nieubłaganie sięga natura, lub które likwiduje człowiek w trosce o wspólne bezpieczeństwo.

Celem niniejszego artykułu jest próba syntezy dotychczasowej wiedzy na temat fotografii wielickich podziemi od końca XIX w., kiedy to pojawiła się w kopalni, do dzisiaj.

## 2. POCZĄTKI FOTOGRAFII

Pragnienie uwiecznienia realistycznego wizerunku świata było marzeniem już od czasów starożytnych. Píše o tym Junko Theresa Mikuriya w swej książce *Historia światła. Idea fotografii*. Fotografia musiała być wynaleziona, bo po prostu była potrzebna (Mikuriya, 2018).

O tym, że związki srebra są światłoczułe wiedziano już w XVIII w. Tworzonych niejednokrotnie przez przypadek quasi fotografii nie potrafiono jednak przez całe dziesięciolecie utrwalić.

for guidebooks, postcards, and sets of commemorative photographs. Entering the Salt Mine on the Landmark List of the Kraków Region in 1976 and on the World Heritage List in 1978 caused further demand for photographs from the underground. Large album publications about the mine appeared. After 1989, when Poland underwent political transformations, and free market economy emerged, the number of album publications, guidebooks, and other souvenirs, such as calendars, increased significantly. They were published both by the company organising tourism in the Mine (The Wieliczka Salt Mine – Tourist Route Ltd.) and the Kraków Saltworks Museum in Wieliczka. Apart from the commercial functions connected with the tourist site and landmark roles of the Mine, photography was also used for the surveying of underground excavations (photogrammetry) and the documentation of the landmark underground workings. It also played educational and illustrative roles for many scientific and popular-science publications. Photography developed from its classical technique (image recording on photosensitive materials) to digital one. The technical future of photograph in the Salt Mine is associated with laser scanning of the Salt Mine’s excavations.

**Key words:** “Wieliczka” Salt Mine, photography, photogrammetry, laser scanning

## 1. INTRODUCTION

For centuries, the “Wieliczka” Salt Mine has aroused interest both as an industrial facility and as a tourist destination; therefore, it is no wonder that photography has become a permanent feature of the site. Photographs served as tourist souvenirs and documents, and photographic techniques become tools for scientific research and surveying underground excavations.

Photographs also became documents allowing for the graphic preservation of unique nooks of the Salt Mine, later regained by nature or buried by man to ensure land surface safety.

This paper attempts at providing a synthetic presentation of our knowledge about the photographs of the Wieliczka’s underground workings, from the end of the 19th century when the first pictures appeared until today.

## 2. THE ORIGIN OF PHOTOGRAPHY

The desire to record realistic images of the world has existed as a dream since antiquity. That was mentioned by Junko Theresa Mikuriya in her book entitled *A History of Light: The Idea of Photography*. Photography “had to be invented” because it was simply necessary (Mikuriya 2018).

The fact that silver compounds were photosensitive was known in the 18th century. Quasi-photographs were obtained



Pierwsze udane próby wykonania zdjęć, które szybko nie zanikały z materiału, na którym je wykonano, datowane są na lata 30-te XIX w. Przełom dokonał się w 1839 r., kiedy to niezależnie od siebie dwaj wynalazcy obwieścili światu metody wykonania realistycznych wizerunków naszego otoczenia i nas samych.

Dwaj pionierzy fotografii byli postaciami z innych bajek. Francuz Louis Jacques Mandé Daguerre (1787-1851) był malarzem - scenografem, ale także przedsiębiorcą. Wynalazł dioramę, czyli rodzaj obrazu, którego część była malowana na cienkim przezroczystym podłożu. Odpowiednie manipulowanie tylnym światłem pozwalało w dioramie uzyskiwać wrażenie ruchu. Dioramy stały się popularne, a Daguerre na nich zarabiał. Pragnął zmodyfikować swój wynalazek i zainteresował się dokonaniem fizyka Josepha Nicéphore'a Niépce'a, który w latach 20. pracował nad metodami utrwalania obrazu. Po śmierci Niépce'a zmodyfikował jego metodę i w 1839 r. zademonstrował swój wynalazek – zdjęcia na srebrnej lub posrebrzanej płycie. Proces ten nazwano dagerotypią, a powstałe w nim obrazy dagerotypami.

Anglik William Henry Fox Talbot (1800-1877) należał do brytyjskiej arystokracji. Był wszechstronnie wykształcony - w kręgu jego zainteresowań znajdowały się historia, archeologia, chemia, botanika, lingwistyka, matematyka i wiele innych zagadnień. Nie potrafił jednak ani malować, ani rysować, co bardzo go martwiło. Postanowił brak ten zrekomensować pewnym wynalazkiem. Opracował metodę uwieczniania obrazu na specjalnie spreparowanym papierze. Otrzymywał obraz negatywowo, który w kopioramce można było powielić już w formie pozytywu. Proces ten nazwano talbotypią lub kalotypią. Talbot ogłosił go światu w tym samym roku co Daguerre – 1839.

Po nagłośnieniu wynalazków Daguerre'a i Talbota około dwudziestu innych badaczy także przyznało się do opracowania swoich technik utrwalania obrazu. Ale to ci dwaj zostali ojcami fotografii.

Pierwszy etap rozwoju fotografii oscylował w kierunku dagerotypii, bowiem Daguerre sprytnie podarował swój wynalazek światu, czyli udostępnił go za darmo, a tym samym nadał kurs początkowego jej rozwoju. Talbot swą talbotypię opatentował, co przyczyniło się do opóźnienia rozwoju procesu negatywowo-pozytywowego. Dagerotypy były niezwykle popularne, ale to przed pomysłem Talbota stała przyszłość.

Obok dagerotypów i talbotypów w pierwszych dziesięcioleciach rozwoju fotografii popularność zdobyły inne techniki – fotografie na szkle zwane ambrotypami, na blaszanych płytach zwane ferrotypami oraz wiele innych.

Oczywiście fotografia nie istniałaby bez specjalnych przyrządów do zdejmowania obrazu, czyli aparatów fotograficznych. Ich pierwowzorem była *camera obscura*. Jest to urządzenie zbudowane z zamkniętego pudełka z niewielkim otworem w jednej ze ścianek. Jeśli przeciwnie ścianka wy-

accidentally although people were unable to fix them to be permanent.

The first successful attempts at taking pictures that would not disappear quickly from the substrate material are dated at the 1830's. A breakthrough arrived in 1839 when two inventors independently announced the methods of presenting realistic pictures of our environment and ourselves. The two photography pioneers were characters from different stories.

Louis Jacques Mandé Daguerre (1787–1851) was a painter and scenographer, as well as a businessman. He invented the diorama, or a type of picture painted on both sides of transparent material. Proper switching of front and back illumination allowed for obtaining impressions of image movement or change. Dioramas became popular e.g. in theatres and Daguerre made money in his invention. He wanted to further modify his invention and got interested in the achievements of the physicist Joseph Nicéphore Niépce who worked on the method of image fixation in the 1820's. After Niépce died, Daguerre modified the original method and demonstrated his invention in 1839: the photographs taken on silver or silver-coated plates. His graphic products were called daguerreotypes.

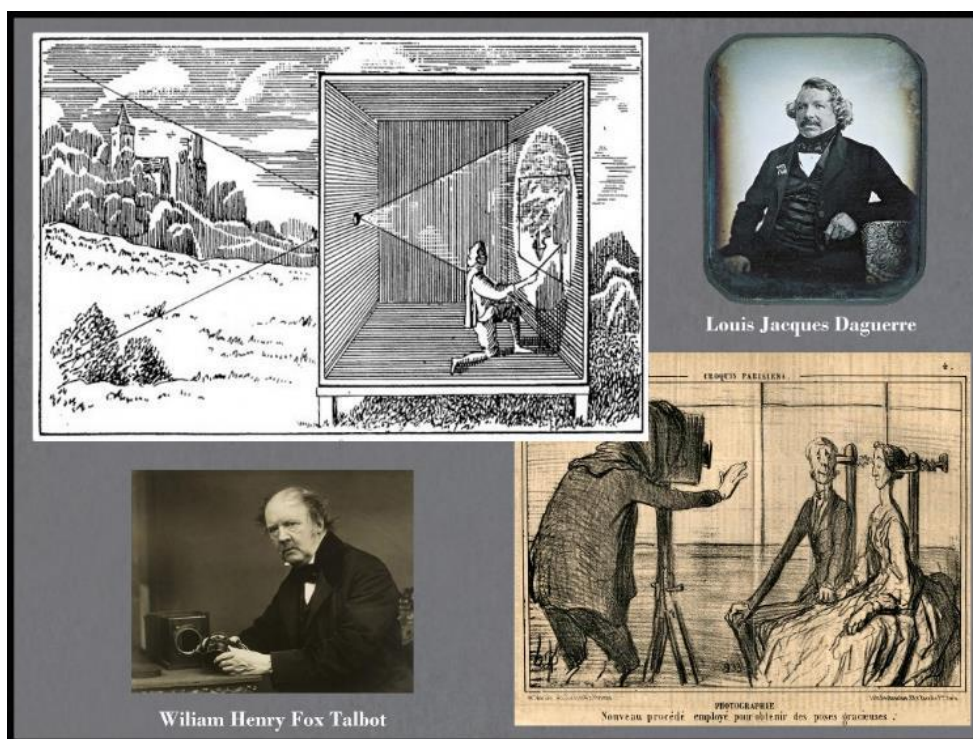
William Henry Fox Talbot (1800–1877) was a British aristocrat. He was comprehensively educated. He was interested in history, archaeology, chemistry, botany, linguistics, mathematics, and many other fields. However, he had no talent for painting or sketching which worried him very much. He decided to compensate that disadvantage by his invention. He developed a method of fixing images on a specially prepared paper. He obtained a negative picture which could be copied as a positive one in a copyframe. The method was called talbotype or calotype process. Talbot announced it in 1839, the same year as Daguerre did.

After the publication of Daguerre's and Talbot's inventions, about twenty other researchers claimed to have developed their own image-fixing techniques. Nevertheless, the first two became the fathers of photography.

The first stage of the development of photography tended to concentrate on daguerreotypes because Daguerre smartly donated his invention to the world by making it available free of charge and that affected the initial course of developments. Talbot, however, patented his talbotypes which contributed to the delay in the negative-positive process development. Although daguerreotypes became extremely popular, the future belonged rather to Talbot's invention.

In addition to those two types of images, other techniques were popular in the initial decades of the development of photography: photographs on glass called ambrotypes, or on plates called ferrotypes etc.

Of course, photography would not exist without special tools for taking pictures or cameras. The *camera obscura* was the first model of a camera. That was actually a darkened room



**Ryc. 1.** Camera Obscura - zasada działania. Poniżej wizyta u dagerotypisty. Długi czas naświetlania wymagał unieruchomienia fotografowanych. Niska światłoczułość pierwszych materiałów fotograficznych tłumaczy, dlaczego fotografia dopiero ponad 50 lat po jej odkryciu pojawiła się w kopalni Wieliczka (źródło - internet, domena publiczna).

**Fig. 1.** Camera Obscura: the principle of operation. Bottom right corner: a visit in a daguerreotype studio. The long exposure time required the photographed to be immobilised. Low photosensitivity of the first photographic materials explains why photography was introduced into the Wieliczka's underground workings over 50 years after its discovery (Source: Internet, public domain).

konana jest z matowego szkła to widać na niej odwrócony obraz utworzony przez promienie światła wpadające przez otwór. Wynalazek ten opisano już około 1020 r., zaczął być wykorzystywany przez malarzy do tworzenia szkiców obrazów. *Camera obscura* uzbrojona w obiektyw stała się aparatem fotograficznym (ryc. 1).

Już w połowie XIX w. fotografowie uwieczniali wszystko co widzieli. Jednak podziemia wielickiej kopalni musiały jeszcze poczekać na swoich fotografów. Do zrobienia zdjęć potrzebny był „towa” w kopalni bardzo deficytowy, mianowicie światło.

Dynamiczny rozwój technik fotograficznych doprowadził pewnego chaosu. Mnogość typów fotografii – dagerotypii, kalotypii, ambrotypii, ferrotypii, cyjanotypii, woodburytypii i innych wywoływał niekiedy ironiczne komentarze publicystów, tracących orientację w nowo rozwijającej się dziedzinie rzemiosła. Stopniowo jednak ten stan ulegał uporządkowaniu. W ostatnich dekadach XIX w. techniki fotograficzne zaczęły się ostatecznie kształtować. Dagerotypia i ambrotypia odeszły do lamusa, ferrotypia znalazła zastosowanie do pamiątkowej fotografii ulicznej, inne „typie” zaczęły zanikać. Światłoczułe materiały srebrno żelatynowe zaczęły wypierać opracowany w 1850 r. papier albuminowy, podłożem dla negatywów były płytki szklane oraz coraz powszechniej stosowany celuloide. Źródłem światła stał się stosowany od 1859 r.

or a box with a small hole at one side. If the opposite side is made of matt glass, it would display a reversed picture created by the light beam entering the hole. That invention was described as early as about 1020 and it was used by painters to create paintings' sketches. The *camera obscura* was later fitted with a lens and became a photographic camera (Fig. 1).

As early as in the 19th century, photographers were taking pictures of everything around. However, the underground workings of the “Wieliczka” Salt Mine had to wait for their photographers a bit longer. What was required there was a rare “commodity”: light.

A dynamic development of photographic technologies caused certain chaos. The multitude of processes: daguerreotypes, calotypes, ambrotypes, ferroypes, cyanotypes, woodburytypes, and other products sometimes invoked ironic comments in publications when authors were disoriented about the newly developing field of craft and art. However, gradually, things were put in order. In the last decades of the 19th century, the photographic techniques were fully shaped. Daguerreotypes and ambrotypes became old fashioned, ferroypes were used in souvenir street photography, and other “types” became obsolete. Photosensitive materials, or silver halide emulsion, started to push out the albumin paper developed in 1850. Glass plates and celluloid films became generally used substrates for negatives. Magnesia, or flash powder,

proszek błyskowy – magnezja. Wrota do fotografii wielickich podziemi zostały otwarte (Warner, 2012; Hacking, Campany, 2014; Pritchard, 2017).

### 3. PIERWSZE ZDJĘCIA WIELICKICH PODZIEMI

Awit Szubert (1837 – 1919) był wszechstronnym fotografem (oprócz portretów i miejskich krajobrazów uwielbiał fotografować góry) działającym pod koniec XIX i w początkowych latach XX w. Zakład prowadził w pierwszym okresie w Oświęcimiu, następnie pracował w Krakowie, a koniec życia spędził w Szczawnicy. Wpadł na pomysł sfotografowania podziemi kopalni, co wyraził w piśmie z 15 lutego 1892 r., zaadresowanym do C.K. Zarządu saliny. Otrzymał zgodę na wizytę z aparatem i tak powstały pierwsze znane zdjęcia kopalni (ponad 20). W 1893 r. podziemne widoki autorstwa Awita Szuberta w liczbie 20 (18 z podziemi i 2 z miasta) zostały wydane w Wiedniu w postaci albumu heliograviur (ryc.2). Te i inne jego wielickie fotografie były reprodukowane w późniejszych latach w charakterze kart pocztowych (Szubert, 1893; Maciesza, 1932; Kudłacz, 2009). Tak zaczęła się epoka fotografii w kopalni.

Jak Szubert wykonywał swe wielickie fotografie?

Fotograf rozmieszczał w wyznaczonym miejscu lub miejscach magnezję, czyli mieszaninę sproszkowanego aluminium lub magnezu z substancją utleniającą np. azotanem potasu. Materiał ten szybko się spala dając bardzo intensywne światło. Sam ustawiony przy aparacie dawał sygnał, na który ukryci w zakamarkach fotografowanej komory pomocnicy

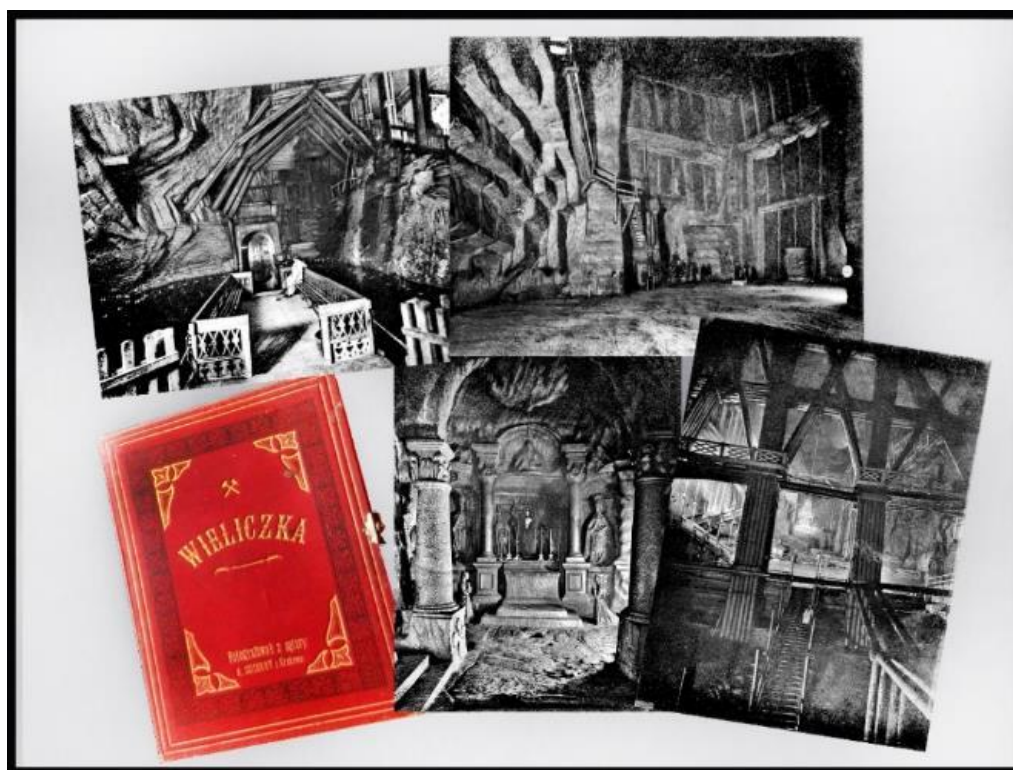
became the source of light in 1859. Thus, the gate to the underground “Wieliczka” Salt Mine became open for photography (Warner 2012; Hacking, Campany 2014; Pritchard 2017).

### 3. FIRST PICTURES OF THE WIELICZKA'S UNDERGROUND WORKINGS

Awit Szubert (1837–1919) was a versatile photographer. In addition to portraits and city landscapes, he loved to take the pictures of mountains. In the late 19th and early 20th centuries, he had operated his studio, first in Oświęcim and later in Kraków, before he left for Szczawnica for good. He had an idea of taking pictures underground and wrote to the Imperial-Royal Salt Mine Management (the area was under the Austrian rule) on 15 February 1892. He was permitted to enter the Salt Mine with his camera and that was the time when the first more than 20 pictures were taken underground. In 1893, the pictures by Awit Szubert (18 taken underground and two in the town) were published in Vienna, in the form of the heliogravure album (Fig. 2). Those and other Wieliczka photographs were reproduced later as picture postcards (Szubert 1893; Maciesza 1932; Kudłacz 2009). That is how the era of the Salt Mine photography started.

How did Szubert produce his Wieliczka photographs?

The photographer distributed magnesia flashes, made of a mixture of powdered aluminium and oxygenating substance, e.g. potassium nitrate, in a specific place or places underground. The material would burn quickly giving an intense flash of light. The photographer was standing behind the cam-



**Ryc. 2.** Zdjęcia Awita Szuberta z r. 1892 wydane drukiem w Wiedniu w 1893 r. (źródło - internet, domena publiczna).

**Fig. 2.** Pictures by Awit Szubert of 1892, printed in Vienna in 1893 (Source: Internet, public domain).



podpalali ładunki magnezji. Na większości zdjęć Szuberta dla zachowania skali widnieją mężczyźni i kobiety, ale sądząc po strojach nie są to pracownicy saliny, lecz osoby z zewnątrz – turyści. Szubert borykał się z trudną materią kopalni, generalnie podkreślał drugi plan, pierwszy pozostawiając nieco nieoświetlony. Jedno z jego wielickich zdjęć powstało inaczej – przedstawia pokaz ogni bengalskich w komorze Steinhauser. Wnikliwa analiza zdjęć Szuberta wykazuje, że przynajmniej część z nich podlegała retuszowi – kontury wyrobisk i niektóre z postaci wyglądają nieco sztucznie.

Fotografia w pierwszym okresie istnienia była w zasadzie jedną z gałęzi rzemiosła. Fotografowanym chodziło o przyzwoitość, na ogół wyidealizowany swój wizerunek, fotografującym po prostu o zarobek. Jednak stopniowo w miarę rozwoju technik i sprzętu zaczęła się wykształcać potrzeba powstania fotograficznej sztuki. Osoby niezależne finansowo mogły pozwolić sobie na drogie wówczas aparaty oraz nie traktować swojej pasji w komercyjny sposób. W drugiej połowie XIX w. zaczęły powstawać kluby zrzeszające fotografów-amatorów, a to ostatnie słowo nie miało dzisiaj negatywnego znaczenia. Przykładami postaci ówczesnych ambitnych znanych fotoamatorów mogą być należąca do wyższych sfer Julia Margaret Cameron czy też pisarz Lewis Carroll.

Pod koniec XIX w. wykształcił się nurt zwany piktoralizmem, którego przedstawiciele traktowali fotografię w sposób malarski. Jeden z prominentnych piktoralistów Amerykanin Alfred Stieglitz założył w 1903 r. pismo *Camera Work*, które prezentowało prace głównych twórców tego kierunku fotografii (Warner M. 2012; Hacking, Company, 2014).

Na ziemiach polskich nieistniejącego jeszcze państwa także znalazła się grupka pasjonatów, którzy zakładali swe, niestety bardzo często efemeryczne fotograficzne stowarzyszenia. W Małopolsce aktywny był Jan Czernecki (1871 – 1955), księgarz i artysta fotograf. Początkowo z zawodu był urzędnikiem, ale po osiedleniu się około 1898 r. w Wieliczce zajął się fotografią. Założył *Wydawnictwo Kart Poczтовых i Artystycznych*, miał wielu przyjaciół w kręgach artystycznych, dla wielu twórców często był mecenasem (Mazur, 2003).

Czernecki w 1902 r. zwrócił się do C.K. Krajowej Dyrekcji Skarbu we Lwowie z prośbą o możliwość uwiecznienia wielickich podziemi. Dostał stosowne pozwolenie. Wykonał bardzo dużo ujęć zamieszczonych później między innymi w albumie *Wieliczka. 32 obrazów z kopalni wielickiej podług fotografii J. Czerneckiego* oraz w książkach Feliksa Piestraka *Z podziemi wielickich, Kilka słów o Wieliczce i jej kopalniach, Wieliczka*, a także w artykułach traktujących o wielickiej kopalni, między innymi w warszawskim *Tygodniku Ilustrowanym* (ryc. 3). W publikacji z 1907 r. pt. *Otchłanie wielickie*, której był wydawcą, zamieszczone są kolorowe ilustracje malowane między innymi na podstawie jego zdjęć przez Piotra Stachiewicza (Mazur 2003; Gawroński, 2008).

era and signalled to his assistants hiding in the salt chamber to ignite the flashes. Most of the pictures taken by Szubert also showed men and women to display the scale of objects. However, judging from their clothes, they were not Salt Mine workers but rather outsiders. Szubert coped with the difficult mine sites and generally concentrated on the backgrounds, with the front objects being backlit. One of the Wieliczka pictures was made in a different way: it shows a firework display inside the Steinhauser Chamber. A careful analysis of Szubert's photographs proves that at least some of the pictures were retouched, as the workings' contours and some figures seem to look rather artificial.

In the early days, photography was rather a craft. The photographed persons expected to obtain decent, usually idealised images, while the photographers worked for money. However, together with the development of techniques and equipment, artistic photography was in demand. Well-off people afforded expensive cameras and did not treat their passion commercially. In the second half of the 19th century, clubs for the amateurs of photography were organised. In fact, the club members were hardly "amateurs." Photographer Julia Margaret Cameron or writer Lewis Carroll, representing aristocracy, were model ambitious amateurs.

By the end of the 20th century, the trend called pictorialism was shaped. Its representatives treated photography as a form of painting. One of the pictorialists, the American Alfred Stieglitz, established the *Camera Work* journal in 1903, presenting the works by main artists practicing that trend in photography (Warner M. 2012; Hacking, Company 2014).

On the Polish territories, although Poland did not exist as a state at that time, a group of enthusiasts established their own, usually short-term operating photographic associations. Jan Czernecki (1871–1955), a book seller and a photographic artist, was active in the Małopolska Region. He had been a clerk initially but once he moved to Wieliczka in 1898, he dedicated himself to photography. He established his company, The Picture Postcard and Artistic Card Publishers. He had many friends in the artistic circles and became a sponsor for many artists (Mazur 2003).

In 1902, Czernecki applied to the National Imperial-Royal Directorate of Treasury in Lvov for a permission to take pictures in the Wieliczka's underground workings and he obtained one. He made a lot of photographs, later published e.g. in the album on *Wieliczka: 32 Pictures of the Salt Mine by J. Czernecki* and in the books by Feliks Piestrak: *From the Wieliczka's Underground Workings, Several Words about Wieliczka and its Salt Mines*, and *Wieliczka*, as well as in the articles about the Salt Mine, published e.g. in the Warsaw's *Tygodnik Ilustrowany* (Fig. 3). The 1907 book entitled *The Wieliczka Chasms* that he published himself contained colour illustrations painted by Piotr Stachiewicz, e.g. based on Czernecki's photographs (Mazur 2003; Gawroński 2008).





Ryc. 3. Kolejny fotograf wielickich podziemi - Jan Czernecki (źródło - internet, domena publiczna).

Fig. 3. Another photographer of the Wieliczka's underground workings: Jan Czernecki (Source: Internet, public domain).

Z pierwszym okresem wielickiej fotografii związana jest pewna ciekawostka i zagadka zarazem. W *Tygodniku Polskim* nr 38 z dnia 21 grudnia 1901 r. widnieje notatka *Wieliczka w Warszawie. Na rogu Nowego Świata i ulicy Foksal otwarto w tych dniach (...) kopalnie Wieliczki w fotoplastykonie, którego właścicielem jest p. Adam Kaczurba. Siadamy na krzesłach i (...) jesteśmy w Wieliczce. Wkoło nas mroczne królestwo soli. Złudzenie jest tak wielkie, że chwilami widz doznaje wrażenia, jakby rzeczywiście dotykał się brył soli wilgotnej (...)* Widzimy Wieliczkę odświętną, strojną, zadziwiająco oczy turystów swemi kaplicami, muzyką, bałem podziemnym i widzimy ją w szacie codziennej, pełną znoju i niebezpieczeństwa. W *Kurierze Warszawskim* nr 4 z 1903 r. zamieszczono reklamę *Tysiące mil przebywają turyści z całego świata do słynnych kopalń Wieliczki. Tysiące osób inteligentnych w Warszawie nie oglądało jeszcze Wieliczki, chociaż mają ją na miejscu najwierniej oddaną. Nowy Świat 42*. Podobne ogłoszenia można znaleźć w innych gazetach z lat 1901-1904.

W Warszawie i innych miastach Królestwa oraz Galicji w fotoplastykonach w pierwszych latach XX w. był pokazywany zestaw zdjęć z kopalni Wieliczka. Ich autor jest nieznany. Notatka zamieszczona w tygodniku wydawanym w Piotrkowie *Tydzień* z dnia 10 stycznia 1904 r. informuje o przybyciu do miasta Adama Kaczurby dwoma seriami panoram do fotoplastykonu pokazujących widoki Wieliczki i Tatr. Informacja traktuje o zestawie 40 kadrów, ale fotoplastykon mający 24 - 25 stanowisk wymagał 48 - 50 zdjęć, zatem możliwe, że zdjęć stereoskopowych kopalni powstało znacznie więcej.

The initial period of the Wieliczka Salt Mine photography was associated with a curiosity and mystery at the same time. The *Tygodnik Polski* weekly No. 38 of 21 December 1901 published the following note: *Wieliczka in Warsaw. At the corner of the Nowy Świat and the Foksal Streets, the Wieliczka Salt Mine was opened these days... in the photoplasticon owned by Mr. Adam Kaczurba. We can just sit on our chairs and enjoy a visit to Wieliczka, surrounded by the murky kingdom of salt. The illusion is so tremendous that we sometimes have an impression of actual touching west rock salt boulders... We can see festive, decorated Wieliczka that amazes the tourists with its underground chapels, or music and ballroom dancing events, or otherwise in daily appearance presenting hard labour and hazards*. The *Kurier Warszawski* No. 4 of 1903 published the following advertisement: *The tourists travel from the whole world thousands of miles to see the famous Wieliczka Salt Mine. Thousands of intelligent residents of Warsaw have not seen Wieliczka yet although they have it around, represented in the most faithful manner at 42, Nowy Świat St.* Similar advertisements could be found in other newspapers in 1901–1904.

A set of pictures made in the Wieliczka Salt Mine was displayed in the photoplasticons of Warsaw and other cities of the Congress Kingdom of Poland (1815–1918) and the southern region of Polish Galicja in the early years of the 20th century. The photographer remained unknown. The note published in the *Tydzień* weekly of Piotrków, dated 10 January 1904, mentioned the arrival of Adam Kaczurba, with two series of

Adam Kaczurba był właścicielem warszawskich fotoplastykonów, najwyraźniej też dysponował także fotoplastykonem mobilnym. Zestaw stereoskopowych zdjęć z kopalni był perłą w jego zbiorach, o czym wielokrotnie z dumą oznajmiał w rozmaitych reklamowych tekstach. W zbiorach Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka są dokumenty, które rzucają światło na ten tajemniczy zestaw. Jedno z pism to prośba do zarządu saliny o umożliwienie zrobienia zdjęć stereoskopowych w kopalni. Drugi list to pytanie wdowy po Adamie Kaczurbie, czy kopalnia nie dysponuje kopią zestawu, bowiem oryginał uległ zniszczeniu. Listy te świadczą, że to Adam Kaczurba był autorem zdjęć, ale czy na pewno?

W historii polskiej fotografii nie jest znany fotograf o nazwisku Adam Kaczurba. Był on wydawcą, opublikował w 1892 r. album fotografii (w postaci heliograviur) *Wawel. Szesnaście pomników naszej przeszłości w obrazach* autorstwa Karola Kroha, fotografa zakładu Awita Szuberta. Możliwe, że znajomość z Szubertem zainspirowała Kaczurbę do sfotografowania stereoskopowego kopalni. Ale czy on zrobił te zdjęcia?

W 1903 r. Kaczurba wydał we Lwowie autorską broszurę *Wieliczka, czyli „świat podziemny” oraz Msza pasterska tysiąc stóp pod ziemią*. W broszurze tej czytamy: *Zdaje mi się, że to pan otrzymał od rządu zezwolenie na zdjęcia naszych kopalń do obrazów fotoplastycznych. Tak jest – odrzekłem, przedstawivszy się nawzajem - a to mój towarzysz w pracy, Francuz, pierwszy mistrz w tym zawodzie*. Najwyraźniej Kaczurba tylko zorganizował sesje fotograficzne w kopalni, a do realizacji przedsięwzięcia wynajął zagranicznego profesjonalistę. To tłumaczy, że dysponował tylko jednym zestawem zdjęć, którego kopii poszukiwała jego żona.

*Ogromnym tedy nakładem pracy i pieniędzy udało mi się Wieliczkę – te cuda przyrody, to „królestwo św. Kingi”, ten prawdziwy świat podziemny zamienić w wierne, barwne widoki fotoplastyczne. I gdy tam na miejscu okazują turystom tylko niektóre kaplice i komory, w moim „Fotoplasticum” widzi się wszystko: najpiękniejsze grotty, kaplice i komory, prace górników, jak n.p. zakładanie i podpalanie min, a nawet Mszę Pasterską 1000 stóp pod ziemią, corocznie odpalaną*. Odnalezienie tego zestawu stereoskopowych zdjęć byłoby rewelacją, a jego poszukiwania należało by zacząć od Francji, skąd pochodził domniemany autor zdjęć z wnętrza kopalni.

Inną tajemnicą wielickiej fotografii jest zestaw 18 zdjęć zakupionych niedawno do zbiorów Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka. Są to transparentne kwadratowe fotografie przeznaczone do projekcji w urządzeniu Magiczna Latarnia (Laterna Magica). Przedstawiają one podziemia kopalni oraz wielickich górników. Autorstwo fotografii i czas ich powstania nie zostały jeszcze ustalone (Praca zbiorowa, 2021).

panoramic pictures designed for the photoplasticon, presenting the views of Wieliczka and the Tatra Mountains. The note mentioned the set of 40 pictures, although a photoplasticon for 24–25 seats required rather 48–50 pictures. Therefore, it is quite possible that many more stereoscopic photographs had been made in the Salt Mine. Adam Kaczurba was the owner of photoplasticons in Warsaw and he definitely possessed a mobile one. A set of his stereoscopic photographs taken in the Salt Mine was a pearl in his collection, as he stated proudly many times in various promotional publications. The Kraków Saltworks Museum in Wieliczka possesses the documents that throw some light on that mysterious photographic collection. One of the preserved letters to the Salt Mine’s management asked for a permission to take stereoscopic pictures in the Salt Mine. Another letter was written by the widow after Adam Kaczurba, asking whether the Salt Mine possessed a copy of the set, because the original one had been destroyed. Those letters indicated that actually Adam Kaczurba was the author of the stereoscopic photographs, although we cannot be a hundred percent sure.

The name of Adam Kaczurba has not been recorded in the history of Polish photography. He was rather a publisher, known from the publication of the 1892 heliogravure photography album on *Wawel: Sixteen Landmarks of our Past in Pictures* by Karol Kroh, a photographer of Awit Szubert’s company. It is possible that Kaczurba’s acquaintance with Szubert inspired the former to take stereoscopic pictures in the Salt Mine. Or was it the case?

In 1903, Kaczurba published in Lvov his own brochure on *Wieliczka, or the “Underground World,” and Shepherds’ Mass a Thousand Feet Underground*. We can read there as follows: *“It seems to me that it was you who received a government permit to take pictures in our Salt Mine, intended for photoplasticon presentations”. And I responded: “Yes.” We introduced ourselves to each other. That was my companion at work, a Frenchman, the first master in the profession in question*. Most certainly, Kaczurba only organised photographic sessions in the Salt Mine, having hired a foreign professional to carry out the project. That would explain the fact that he had possessed only one set of pictures later sought by his wife.

*By a tremendous labour and money expense, I managed to change Wieliczka, with its miracles of nature, or “The Kingdom of St. Kinga,” and the true underground world, into colourful photoplasticon views. And although the tourists are shown only selected chapels and chambers on site, my “Fotoplasticum” shows it all: the most beautiful grottoes and chapels, the work of miners, including e.g. planting and blasting explosives, as well as the Shepherds’ Mass a thousand feet underground, held annually*. It would be a miracle to find that set of stereoscopic photographs. Search should start rather in France, as the place of origin of that alleged author of the pictures taken in the Salt Mine.



Ryc. 4. Informacje prasowe z lat 1901-1904 o fotoplastykonach Adama Kaczurby i pokazywanych w nich zdjęciach z podziemi kopalni Wieliczka (źródło - internet, domena publiczna).

Fig. 4. Press articles of 1901–1904 on Adam Kaczurba's photoplasticons and the photos from the underground workings of the "Wieliczka" Salt Mine (Source: Internet, public domain).

#### 4. FOTOGRAFIA OKRESU MIĘDZYWOJENNEGO

Po pierwszej wojnie światowej i walkach o kształt nowo powstałego państwa polskiego w kraju zaczął się rozwijać ruch fotograficzny. Dominującą postacią był w nim wilnianin Jan Bułhak (1876 – 1950). Był on zażartym wyznawcą piktoralizmu i nurt ten zdominował polską fotografię międzywojenną. Bułhak, twórca słowa *fotografika*, z pasją uwieczniał piękno ojczystego kraju w ówczesnych jego granicach. Godne jest to pochwały, ale piktoralizm był już wtedy anachronizmem. Stieglitz zawiesił wydawanie *Camera Work* w 1917 r. z uwagi na brak zainteresowania czytelników. W tym czasie powstały nowe, awangardowe nurty fotograficzne, a pojawienie się na rynku w 1925 r. pierwszego małoobrazkowego aparatu Leica zrewolucjonizowało ruch fotografii amatorskiej i reporterskiej (ryc.5).

Bułhak, nienawidzący awangardy, zaciążył na polskim ruchu fotograficznym, który zaczął odstawać od tego, co działo się w światowej fotografii w latach 20. i 30. XX stulecia (Płażewski, 2011). Trudno jednak o fotograficzną awangardę w podziemiach kopalni Wieliczka. Tu sprawdzały się wypracowane przez Awita Szuberta i Jana Czerneckiego dawne techniki i przepisy na kompozycję obrazu.

Międzywojennym fotografem, który robił zdjęcia wielickich podziemi był Władysław Gargul (1883 - 1946). Był człowiekiem niezwykle aktywnym i przedsiębiorczym. Do

Another mystery covers a set of 18 photographs acquired recently by the Kraków Museum of Saltworks in Wieliczka. The set includes square transparent slides, designed for display by the *Laterna Magica* system. The photographs presented the Salt Mine's underground workings and the Wieliczka miners. The photographer and the time of taking those pictures remained unknown (Praca zbiorowa 2021).

#### 4. PHOTOGRAPHS OF THE INTER-WAR PERIOD

Photographic movement started to develop again after World War I and the struggles for the shape of the newly-established Polish state. A resident of Vilna, Jan Bułhak (1876–1950), was a dominating figure in that movement. He was an ardent follower of pictorialism and that trend dominated the Polish photography of the inter-war period. Bułhak created the Polish word *fotografika*, referring to the artistic, not utility, aspect of photography. He photographed the beauty of the native country, within its then borders. That was commendable, although pictorialism was rather old fashioned in his days. Stieglitz suspended the publication of the *Camera Work* in 1917, owing to dropping readers' interest. At the same time, new avant-garde photographic trends were developing, with the appearance of the first compact Leica camera on the market in 1925. Leica revolutionised amateur and reporting photography (Fig. 5).





Ryc. 5. Aparaty fotograficzne charakterystyczne dla okresu międzywojennego (kolekcja J. Przybyły).

Fig. 5. Typical pre-World War II cameras (J. Przybyły's collection).

Wieliczki zawitał około 1918 r. i zajął się fotografowaniem gości zwiedzających kopalnię, zarówno dostojników, jak i zwykłych turystów. Uwieczniał także podziemne wyrobiska, czego efektem był na przykład niewielki album *Saliny Wielickie* (Gargul, bdw.) Swoje zdjęcia publikował w przewodnikach, książkach, albumach oraz jako karty pocztowe. Plonem jego pracy jest wizerunek Wieliczki z lat 1918-1943. Dla jego wielickiej fotografii charakterystyczne są grupowe portrety zwiedzających pozujących na tle budynku szybu Daniłowicza z wielką tablicą z napisem *Wieliczka* wzbogaconą w aktualną datę (ryc.6). Był też wynalazcą, a patent na skonstruowane przez niego urządzenie do masowej produkcji powiększeń rzędu 1000 sztuk na godzinę został zakupiony przez firmę Eastman Kodak z USA (Duda 2010, Gawroński, 2008).

Innymi fotografami o znanych w środowisku nazwiskach, którzy zawitali do kopalni w dwudziestoleciu międzywojennym byli Stanisław Mucha (1895 – 1976) oraz Henryk Poddębski (1890 – 1945).

Stanisław Mucha znany był z robienia zdjęć miejsc, do których zwykły śmiertelnik nie miał dostępu, zatem kopalnie Wieliczka i Bochnia nie mogły ująć jego uwadze. W latach 30. wykonał fotograficzną dokumentację pewnych obiektów w tych kopalniach i obu miast, ale zdjęcia te nie są powszechnie dostępne.

Henryk Poddębski mieszkał w Warszawie, był działaczem Polskiego Towarzystwa Krajoznawczego, zajmował się fotografią polskiej przyrody. Stworzył w latach 1935-36

Bułhak hated avant-garde but still influenced the Polish photographic movement which was left behind the global photography developments of the 1920's and 1930's (Płazewski 2011). However, it was rather difficult to implement any avant-garde solutions in the underground workings of the Wieliczka Salt Mine. Only old techniques developed by Awit Szubert and Jan Czernecki remained effective, together with their principles of image composition.

Władysław Gargul (1883–1946) was another pre-World War II photographer who took pictures in the underground workings of the “Wieliczka” Salt Mine. He was an extremely active entrepreneur. He arrived at Wieliczka about 1918 and was involved in photographing the visitors sightseeing the Mine, both officials and regular tourists. He also photographed underground workings, and the results of his work were published in a small album on the *Wieliczka's Salt Mines* (Gargul, undated). Gargul published his pictures in guidebooks, books, photographic albums, and as picture postcards. He created the image of Wieliczka of 1918–1943. Group portraits of visitors standing in front the Daniłowicz Shaft, holding a large *Wieliczka* inscription, fitted with the date, were typical for his works (Fig. 6). He invented and patented a system for mass production of enlarged photographs, at the rate of about 1,000 copies per hour. The patent was purchased later by the American Eastman Kodak Company (Duda 2010; Gawroński 2008).

Stanisław Mucha (1895–1976) and Henryk Poddębski (1890–1945) were other well-known photographers who visited the Salt Mine before World War II.





**Ryc. 6.** Fotografie Władysława Gargula – z podziemi kopalni oraz charakterystyczne zdjęcia grup turystów (źródło - internet, domena publiczna oraz kolekcja J. Przybyły).

**Fig. 6.** Władysław Gargul's photographs from the underground workings and typical pictures of tourist groups (Source: Internet, public domain, and J. Przybyły's collection).

cykl wielickiej fotografii. W zbiorach Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka znajduje się ponad 90 jego zdjęć, ale tylko 14 z nich zostało wykonanych w kopalni, reszta obrazuje miasto. Był jednym z pionierów fotografii kolorowej w Polsce, zmarł uwięziony po powstaniu warszawskim w niemieckim obozie koncentracyjnym (Płażewski, 2011).

W przypadku wyżej wymienionych twórców zdjęcia z kopalni „Wieliczka” tworzyły zestawy fotografii przedstawiających głównie ówczesną trasę turystyczną bądź obiekty kopalni zlokalizowane na powierzchni. Najczęściej wykorzystywane były, podobnie jak zdjęcia autorstwa Szubetra, Czerneckiego lub Gargula, do produkcji pocztówek (ryc. 7).

W czasie II wojny światowej w dalszym ciągu ukazywały się pocztówki oraz artykuły z wizerunkiem kopalni. Kopalnia przemianowana na *Salzwerk Wieliczka* miała teraz innych zwiedzających. Z gruzów prasowych koncernów - krakowskiego *Ilustrowanego Kuriera Codziennego* oraz *Kuriera Warszawskiego*, Zakładów Graficznych *Gońca Częstochowskiego* oraz Domu Prasy w Warszawie okupanci utworzyli w październiku 1939 r. *Zeitungs-Verlag Krakau-Warschau* (Wydawnictwo Prasowe Kraków-Warszawa). Było to przedsięwzięcie propagandowe z siedzibą w Krakowie. W zbiorach Narodowego Archiwum Cyfrowego znajdują się fotografie kopalni Wieliczka, zarówno jej części podziemnej, jak i infrastruktury nadziemnej, autorstwa trzech niemieckich fotografów - Ger-

Stanisław Mucha was known for taking pictures in the sites that had not been accessible for regular visitors. For that reason, he definitely could not miss the Wieliczka or Bochnia Salt Mines. He produced a photographic documentation of certain mining facilities in both towns in the 1930's but the pictures were not generally available.

Henryk Poddębski lived in Warsaw and worked for the Polish Tourism Association. His photographic interests concentrated on the Polish nature. In 1935–36, he produced a series of the Wieliczka photographs. The Kraków Saltworks Museum in Wieliczka holds more than 90 pictures by Poddębski, but only 14 of them were taken inside the Mine, with remaining ones showing the town. Poddębski was one of the colour photography pioneers in Poland. He died in a German Concentration Camp after the Warsaw Uprising (Płażewski 2011).

In the cases of both photographers, their pictures of the “Wieliczka” Salt Mine were composed in sets, presenting the then underground tourist route or the Salt Mine's surface facilities. The photographs were usually used for printing picture post cards, similarly to those by Szubert, Czernecki, or Gargul (Fig. 7).

Picture postcards and publications containing the Salt Mine pictures were still published during World War II. The name of the Salt Mine was changed then to the *Salzwerk Wieliczka* and other types of guests started to visit the Salt Mine. On



Ryc. 7. Pocztowniki sprzed I wojny światowej oraz z okresu międzywojennego przedstawiające podziemia kopalni (kolekcja J. Przybyły).  
Fig. 7. Pre-World War I and II picture postcards, depicting the underground workings of the Salt Mine (J. Przybyły's collection).

harda Lehmana, który prowadził swą pracownię w Krakowie oraz fotografów o nazwiskach Hempelmann i Rossler.

### 5. FOTOGRAFIA KOPALNI W OKRESIE PRL

Po katastrofie II wojny światowej i powojennej utracie suwerenności kraju Wieliczka wpisała się po raz kolejny na listę patriotycznych symboli, ważnych zarówno dla kręgów oficjalnych, partyjno – rządowych, jak i dla zwykłych obywateli. W dalszym ciągu obowiązkiem było ją zwiedzić. I w dalszym ciągu fascynowała. Zauroczony kopalnią Stanisław Brzozowski, powojenny reżyser wielu filmów dokumentalnych i oświatowych, swój pierwszy film nakręcił w 1946 r. Film nosił tytuł *Wieliczka*. Obraz ten na pierwszym festiwalu filmowym w Cannes w 1946 r. zdobył I nagrodę w kategorii filmu dokumentalnego, edukacyjnego.

Innemu pasjonatowi kopalnia zawdzięcza niemal ratunek. Był nim Alfons Długosz (1902 – 1975). Inicjator Muzeum Żup Krakowskich i jego pierwszy kustosz miał wykształcenie plastyczne – przed wojną studiował w Państwowej Szkole Przemysłu Artystycznego w Berlinie i Akademii Sztuk Pięknych w Dreźnie. Zauroczony wielickimi podziemiami, które po raz pierwszy zobaczył w 1949 r., rozpoczął starania o uratowanie zabytkowej kopalni, co stało się idee fixe jego dalszego życia (Gawroński, 2008).

Oprócz gromadzenia zabytkowych przedmiotów i okazów skał pozyskanych podczas podziemnych wędrówek do

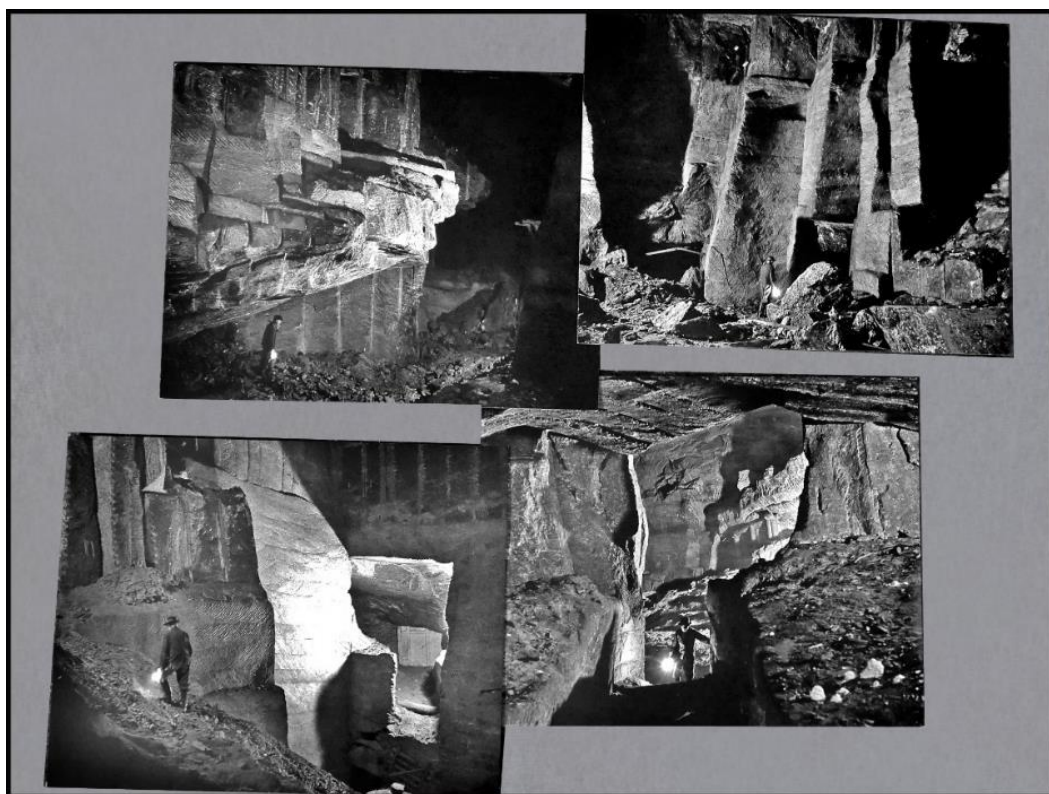
the war debris of the Polish press printing companies, the *Ilustrowany Kurier Codzienny* in Kraków, the *Kurier Warszawski*, the *Goniec Częstochowski* and the “Dom Prasy” Publishers in Warsaw, the occupants established the Zeitungs-Verlag Krakau-Warschau Publishing House in October 1939. That was a propaganda publishing business, with headquarters in Kraków. The Polish National Digital Collection contains the photographs of the Wieliczka Salt Mine, showing both surface and underground infrastructure, taken by the German photographer, Gerhard Lehman who had his studio in Kraków, and other photographers by the names of Hempelmann and Rossler.

### 5. PHOTOGRAPHS OF THE SALT MINE AFTER WORLD WAR II

After the catastrophe of World War II and the post-war loss of national sovereignty, Wieliczka returned on the list of Polish patriotic symbols, for both party-government officials and regular citizens. The Mine was still a must to visit. And it never stopped to fascinate the visitors. Stanisław Brzozowski, a post-war director of a number of documentary and educational films, was enchanted by the Salt Mine. He shot his first film, *Wieliczka*, in 1946. The film was awarded the First Prize in the documentary and educational film category at the Cannes Film Festival in 1946.

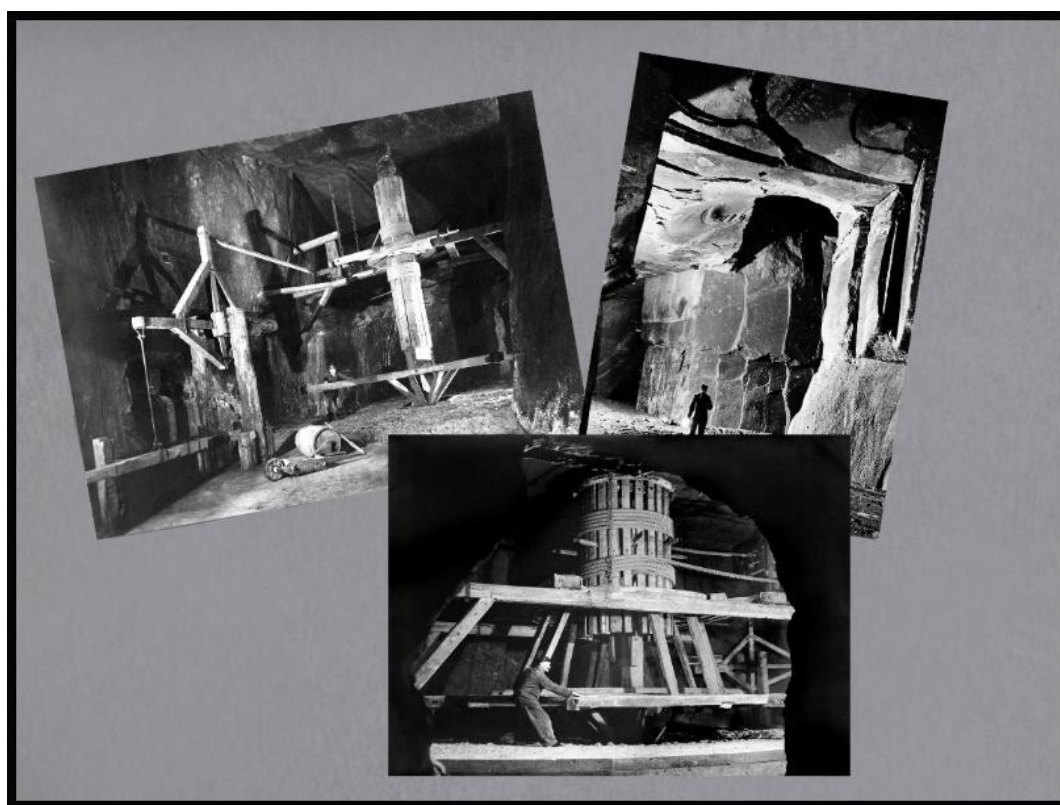
Another Salt Mine enthusiast contributed to “saving” the site. He was Alfons Długosz (1902–1975). He founded the





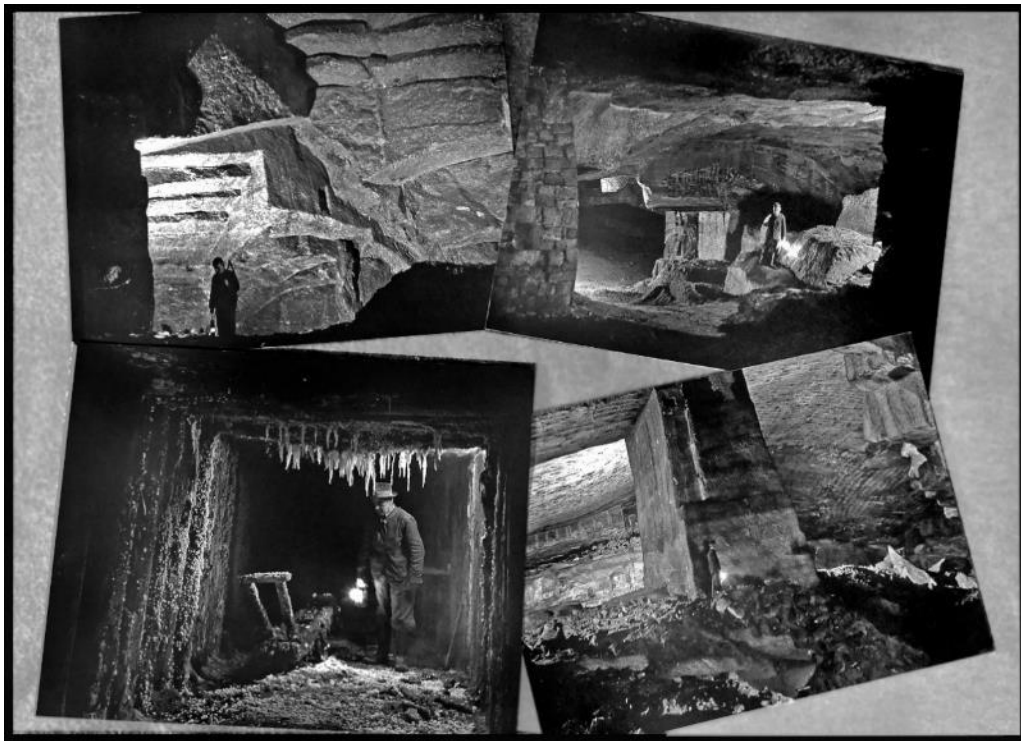
Ryc. 8. Fotografie Alfonsa Długosza, twórcy Muzeum Żup Krakowskich – 1 (kopie zdjęć – kolekcja J. Przybyły).

Fig. 8. (1) Photographs by Alfons Długosz, the founder of the Kraków Saltworks Museum in Wieliczka (Copies from J. Przybyły's collection).



Ryc. 9. Fotografie Alfonsa Długosza, twórcy Muzeum Żup Krakowskich – 2 (kopie zdjęć – kolekcja J. Przybyły).

Fig. 9. (2) Photographs by Alfons Długosz, the founder of the Kraków Saltworks Museum in Wieliczka (Copies from J. Przybyły's collection).



Ryc. 10. Fotografie Alfonsa Długosza, twórcy Muzeum Żup Krakowskich – 3 (kopie zdjęć – kolekcja J. Przybyły).

Fig. 10. (3) Photographs by Alfons Długosz, the founder of the Kraków Saltworks Museum in Wieliczka (Copies from J. Przybyły's collection).

kumentował kopalnię. Wykonał wiele zdjęć, z których wybór zamieścił między innymi w książce *Wieliczka. Magnum Sal jako zabytek kultury materialnej* (Długosz, 1958, ryc. 14).

Magnezja daje bardzo miękkie, rozproszone światło, zdjęcia wykonane przy jej użyciu cechuje niezwykła plastyka. Umiejętnie rozmieszczone jej ładunki wydobywały z fotografowanych zakamarków niebywale piękne obrazy. Do niedawna w zapomnianych komorach można było napotkać na opakowania po filmach i magnezji, pamiątki po pracy Alfonsa Długosza (ryc. 8, 9, 10).

Zagadką w jego zdjęciach są ogólnikowe podpisy kadrów zrobionych poza trasą turystyczną i Muzeum. Nie ma na nich podanych lokalizacji rejestrowanych obiektów. Pod fotografiami czytamy „srebrem lśnią ściany solne”, „tajemnicze piwnice”, „w skale solnej wydrążyli kopacze egzotyczne krajobrazy” i tym podobne. Nie chodziło raczej o zapisy PRL-owskiej cenzury. Może autor zazdrośnie strzegł tajemnicy, którą poznał, albo uznał, że informacje te są dla postronnych nieistotne?

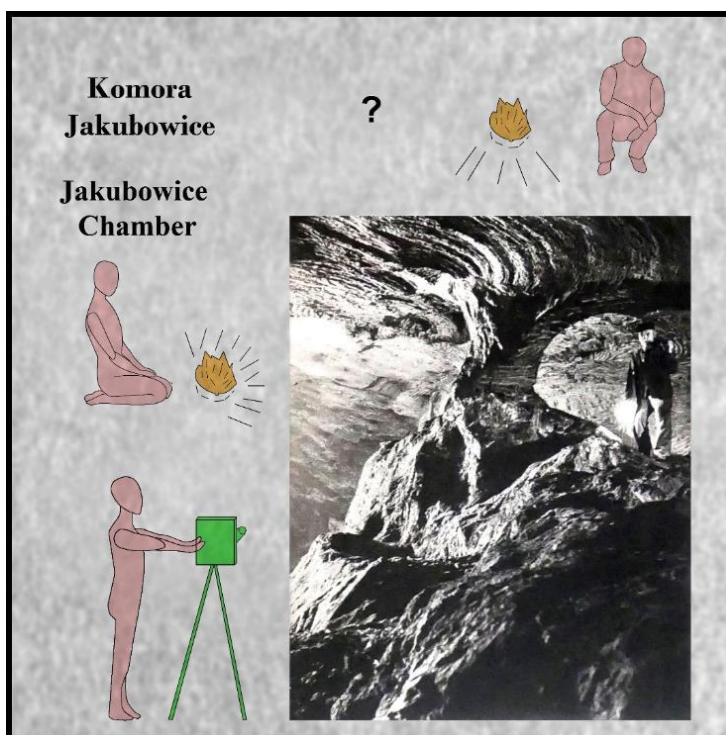
Niewykluczone, że wyjaśnienie tej sprawy jest prozaiczne. O ile Szubert, Czernecki oraz Gargul fotografowali wyrobiska objęte ruchem turystycznym lub pracami wydobywczymi z obecnym przy nich kopalnianym dozorem, to Długosz uwiecznił miejsca, w których jako osoba spoza kopalni nie powinien raczej być. Analiza jego zdjęć wykazuje, że był między innymi w komorze Jan na I poziomie, Lipowiec na poziomie IIw, komorach Jakubowice – Wiesenberg na poziomach IIw - IIIn, komorach Geramb na poziomie IIIn oraz

Kraków Saltworks Museum in Wieliczka and became its first curator. An artist by education, he completed his courses of study at the State School of Artistic Fields in Berlin and the Academy of Fine Arts in Dresden before the war. Enchanted by the Wieliczka's underground workings visited by him for the first time in 1949, he started to work with the intention to preserve the landmark Salt Mine which became his lifetime *idée fixe* (Gawroński 2008). In addition to collecting old objects and rock specimens, gathered during his underground treks, he documented the whole Salt Mine. He also took a number of photographs, later published e.g. in his book on *Wieliczka. Magnum Sal as a Landmark of Material Culture* (Długosz 1958, Fig. 14).

Magnesia gives soft and dispersed light and the related pictures present an unusual artistic impression. A skilful distribution of magnesia charges underground would evoke extremely beautiful images from the photographed nooks. Until recently, one could find film-roll and magnesia wrappings in the long-forgotten Mine chambers, the remnants of Alfons Długosz's ventures (Figs. 8, 9, and 10).

Vague captions on Długosz's pictures taken outside the tourist route and the Museum area remain mysterious. No locations were named identified. We can read for instance as follows: "Rock salt walls shine like silver," "Mysterious cellars," "Diggers dug out exotic landscapes within the rock salt walls" etc. That was not related to censorship. Possibly, the photographer jealously kept the secrets he learned or maybe he recognised that details were not essential for outsiders. Or





Ryc. 11. Technika robienia zdjęć wyrobisk kopalnianych przy użyciu magnezji na przykładzie zdjęcia Alfonsa Długosza (zestawił J. Przybyło).

Fig. 11. The technique of taking pictures in the Salt Mine's workings, with the use of magnesia, on the example of a photograph by Alfons Długosz (A composition by J. Przybyło).



Ryc. 12. Aparaty średnioformatowe – konstrukcje z końcowych lat 30 oraz powojenne (kolekcja J. Przybyły).

Fig. 12. Medium-format cameras: the late 1930's and post-war models (J. Przybyło's collection).



Ryc. 13. Aparaty małoobrazkowe – konstrukcje powojenne (kolekcja J. Przybyły).  
 Fig. 13. Small-format (35 mm) cameras: post-war models (J. Przybyły's collection)

Lipowiec na tym samym poziomie. Dużo fotografii popełnił w zespole komór Margelnik, Wojciech i Magdalena na poziomach II–III. Wędrował też Kanałem Leopolda do Grot Krysztalowych. Może to ówczesny zarząd kopalni zastrzegł sobie anonimowość tych fotografii?

Zdjęcia kopalnianych podziemi przy użyciu magnezji wymagały pracy kilku osób, co doskonale widać na fotografiach Alfonsa Długosza (ryc.11). Tajemnicze pustki i atmosfera zapomnianej kopalni to złudzenie.

Alfons Długosz działał w określonych powojennych realiach. W polskiej fotografii do przełomu 1956 r. nadal aktywny był Jan Bułhak i w dalszym ciągu dominował piktoralizm. Wpisał on się doskonale w ideologię nowej władzy - widoki sielskich wsi czy spokojnych pejzaży ojczystego kraju z zadowolonymi jego mieszkańcami pasował do wyidealizowanego obrazu ojczyzny. Z tym, że brutalnie zmieniono jej granice, a Polska była w ruinie. Bułhak przerażony stanem kraju dokumentował jego zniszczenia. W 1947 r. był jednym z założycieli Związku Polskich Artystów Fotografików. Zmarł w 1950 r.

Pod koniec lat 30. sprzęt i materiały fotograficzne zaczęły ulegać standaryzacji. Królowały dwa formaty – małoobrazkowy, czyli o klatce (naświetlanym na materiale światłoczułym obszarze) o wymiarach 24 x 36 mm oraz średnioformatowy

otherwise, explanation can be quite simple. While Szubert, Czernecki, and Gargul photographed the Salt Mine's workings along the tourist route, or the supervised mining areas, Długosz captured the locations where outsiders should not be allowed. An analysis of Długosz's pictures indicated that he had visited the following Chambers: Jan at Level I, Lipowiec at Level IIw, Jakubowice-Wiesenberg at Levels IIw–IIIn, Geramb at Level IIIn, and Lipowiec at the same Level. A number of his photographs were taken in the chamber complexes of Margelnik, Wojciech, and Magdalena at Levels II–III. He also walked along Leopold's Canal to reach the Crystal Grottoes. It is also possible that the Salt Mine's management asked the photographer not to reveal the identities of the depicted locations.

The pictures of the underground workings, taken with the use of magnesia, required assistance of several persons, which is well visible in Alfons Długosz's pictures (Fig. 11). Besides, mysterious voids and the atmosphere of a forgotten mine may rather be illusions.

Alfons Długosz operated in a specific post-war reality. Jan Bułhak and pictorialism still dominated the Polish style of photography until the political breakthrough of 1956. The photographer ideally represented the new regime's ideology: the views of rural landscapes, with satisfied residents matched



o wymiarach klatki 6x6 cm lub 6x4,5 cm. (ryc.12,13). Pojawiły się już filmy barwne produkowane przez amerykańskiego Kodaka i niemiecką Agfę. W Europie dominowały niemieckie aparaty Leica, Exacta, Contax, Rolleiflex czy Voitlander, konkurujące ze sobą w poszukiwaniu nowoczesnych rozwiązań technicznych. Aparaty zaczęły dzielić się na lunetkowe (wziernikowe), w których wizjer był niezależny od obiektywu, oraz lustrzanki (początkowo dwuobiektywowe, potem jednoobiektywowe) w których wizjerach fotograf widział dokładnie ten obraz, który chciał sfotografować. Obiektywy podzielono na różniące się długością ogniskowej – standardowe (50 mm dla małego obrazka), szerokokątne (poniżej 50 mm) oraz teleobiektywy (powyżej 50 mm). Ustalono też standardowe skale czułości filmów, w tym najbardziej popularne ASA lub DIN (Pritchard 2017; Warner 2012).

Po 1945 r. „żelazna kurtyna” rozdzieliła Europę na dwa wrogie sobie obozy. Fotografowie z krajów będących pod dominacją ZSRR zostali skazani na sprzęt pochodzący z bloku wschodniego.

Część produkcji sprzętu fotograficznego i materiałów fotograficznych umiejscowiona była w Dreźnie, obiektywy powstawały w Jenie i Görlitz, a produkcja klisz, papieru fotograficznego i chemii odbywała się w Wolfen. Te wschodniemieckie miasta stały się ośrodkami produkcji dość przyzwoitego materiału opartego po części jeszcze o tradycje przedwojenne. W NRD powstała seria lustrzanych aparatów małoobrazkowych Practica, średnioformatowych Pentacon, materiałów fotograficznych ORWO (produkowanych pod tą nazwą od przegranej w 1964 r. procesu o prawa do znaku towarowego AGFA) oraz niezłych obiektywów.

Drugim krajem, który masowo zaopatrywał Wschód w sprzęt fotograficzny był Związek Radziecki. Towarzysze poszli na skróty i w większości wypadków bez skrupułów kopiowali rozwiązania niemieckie. W 1938 r. rozpoczęli produkcję klonu lunetkowego aparatu Leica II nazywając go FED (skrót nazwy od inicjałów Feliksa Edmundowicza Dzierżyńskiego). W ramach reparacji wojennych przewieźli z Drezna na Ukrainę ocalałe maszyny (wraz z niemieckim personelem inżynieryjno technicznym, zapewne „szczęśliwym” z tego powodu) i rozpoczęli produkcję kopii małoobrazkowego Contaxa pod nazwą Kiev 4. Dokumentacja firmy Zeiss pozwoliła na wytwarzanie od 1946 r. aparatu średnioformatowego Moskwa. Kopia średnioformatowej profesjonalnej lustrzanki szwedzkiej firmy Hasselblad nosiła nazwę Salut, kolejne wersje tego aparatu nazwano Kiev 88 (ryc.12, 13).

W przypadku pewnego aparatu niestety konstruktorzy radzieccy postanowili być oryginalni. Po wojnie produkowali w dalszym ciągu lunetkowego FED’a oraz jego bardziej staranną wersję zwaną Zorka. Aparaty te miały rozwojowe serie, a jeden z modeli lunetkowej Zorki ludzie radzieccy przekonstruowali tworząc lustrzane aparaty serii Zenith. O wadach Zenitów można napisać całą książkę (Maszczak, 2015).

the idealised image of the motherland. However, the nation’s borders had been changed brutally and the country was changed into ruins. Bułhak was in fact scared by the condition of the country and documented the post-war destruction. He was a co-founder of the Polish Artistic Photographers’ Association (ZPAF) in 1947. He died in 1950.

By the end of the 1930’s, photographic equipment and materials became standardised. Two formats dominated: small-frame (24x36 mm) and medium-frame (6x6, or 6x4.5 cm) (Figs. 12 and 13). Colour films manufactured by the American Kodak and the German Agfa companies also arrived in Poland. Europe was dominated by the German camera brands of Leica, Exacta, Contax, Rolleiflex or Voitlander, competing with each other in search of modern technical solutions. The camera types were either telescopic, with a viewing window, in which the viewfinder was independent of the lens, or reflex (initially with two lenses and later with a single lens), with the viewfinder showing exactly the image to be photographed. Lens types were categorised according to the focal length: standard (50 mm for the small frame), wide-angle (below 50 mm), and telephoto (exceeding 50 mm). Besides, standard film sensitivity scales were adopted, with the most popular standards of ASA and DIN (Pritchard 2017; Warner 2012).

After 1945, the “iron curtain” divided Europe into two hostile camps. The photographers from the countries dominated by the Soviet Union were mostly limited to use the equipment manufactured in the Eastern Bloc. Photographic equipment and materials were manufactured mainly in Dresden, lenses in Jena and Görlitz, while films, photographic paper, and chemicals in Wolfen. Those East German cities became the production centres of fairly decent materials, partly based on pre-war technologies. The products included a series of the Practica small-frame reflex cameras and the Pentacon medium-format ones, together with the ORWO photographic materials (produced under that brand name since the company lost a court battle to use the Agfa trademark in 1964), as well as fairly good lenses.

The Soviet Union was another country that supplied its mass photographic material production to the Eastern Bloc countries. The Russian comrades took shortcuts and mostly copied the German solutions, without scruples. In 1938, the Soviet Union started to produce a telescopic clone of the Leica II camera, calling it FED (which was equivalent of the initials of Felix Edmundovich Dzerzhinsky). As part of war reparations, the Russians had removed intact machinery from Dresden to Ukraine (together with the German engineering and technical personnel who were probably “grateful” for that) and started to manufacture copies of a small-format Contax camera under the name of Kiev 4. The Zeiss Company’s documentation also allowed them for the production of a medium-format camera, the Moskva, since 1946. A copy of the Swedish medium-format reflex camera of the Hassel-

Inne wschodnie kraje też podjęły lub kontynuowały produkcję w branży fotograficznej. Czechosłowacja wytwarzała nieźle powiększalniki oraz między innymi produktami firmy Meopta kopie niemieckiego Rolleicord'a pod nazwą Fleksaret. W Polsce powstała także kopia tego aparatu o nazwie Start, a w Bydgoszczy firma FOTON wytwarzała papiery fotograficzne oraz chemię. Wielki Brat pilnował jednak interesu i nie pozwalał na rozbudowę polskiego przemysłu fotograficznego. Radzieckie aparaty zalały wschodnie kraje i tak w zasadzie pozostało do upadku berlińskiego muru.

Oczywiście, powyższy przegląd jest bardzo uproszczony i powierzchowny, w tzw. „demoludach” produkowano znacznie więcej różnego sprzętu. Po wydarzeniach jesieni 1956 r. żelazna kurtyna nie była już taka szczelna, jednak nasi fotografowie skazani byli na rodzime aparaty, bowiem istniało jeszcze inne, poważne ograniczenie – zachodni sprzęt był poza zasięgiem finansowym naszych obywateli. Aparaty i materiały fotograficzne w ograniczonej ilości sprowadzał z zagranicy i rozprowadzał ZPAF, ale w PRL związki twórcze pełniły rolę kontrolną nad artystami. Obdarowywani mogli być tylko ci wierni.

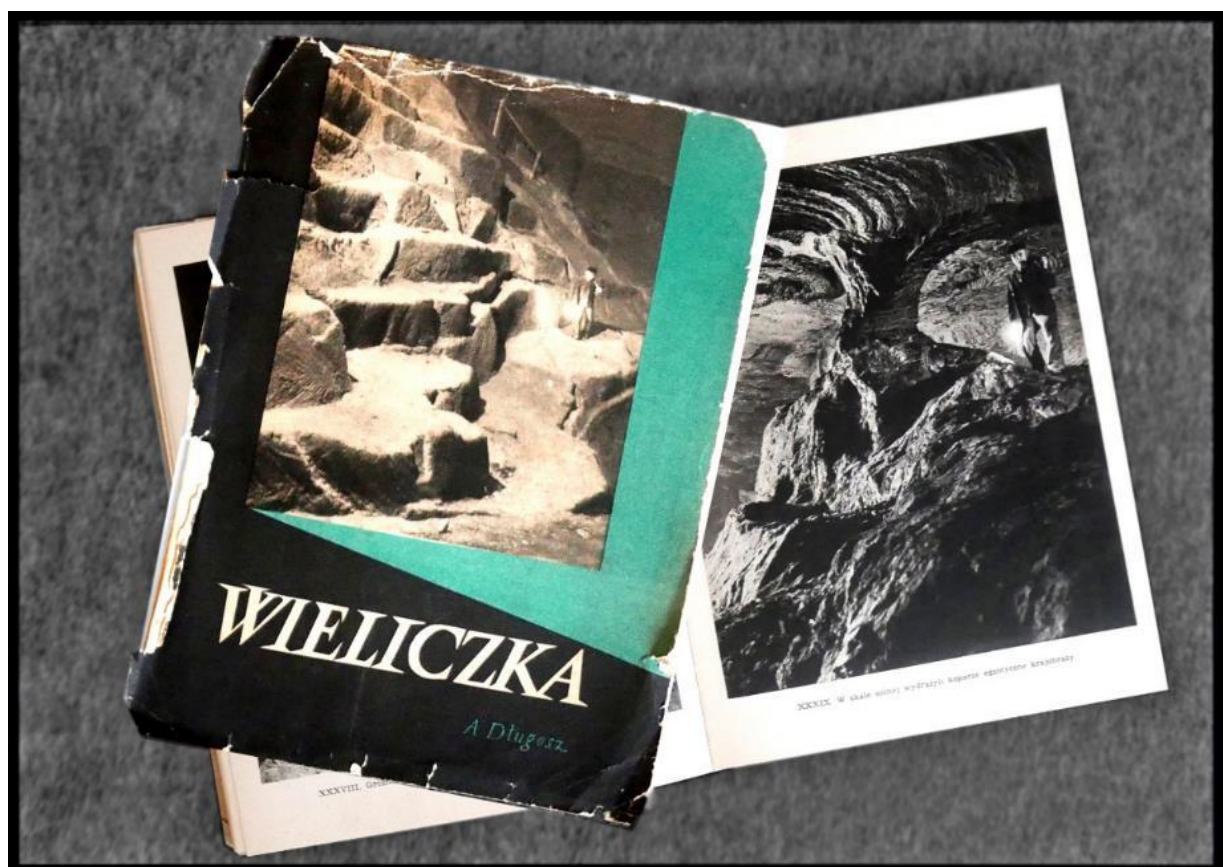
Koniec ze stalinizmem datowany na 1956 rok spowodował także zerwanie ze stylistyką socpiktoralizmu oraz socrealizmu i nawiązanie przez rodzimych fotografów dialogu ze światową fotografią. Wróćmy jednak do Wieliczki.

blad Company was named the Salut, with subsequent models called Kiev 88 (Figs. 12 and 13).

In the case of another camera brand, the Soviet designers decided to be rather original, unfortunately. After the war, they continued to manufacture the telescopic-lens FED and its more carefully designed model called the Zorka. Those cameras had various model series, with one of the telescopic Zorkas remodelled into a reflex camera of the Zenith series by the Soviet people. Well, one can write a book on the defects of the Zenith cameras (Maszczak 2015).

Other Eastern Bloc countries either started or resumed the production of photographic equipment and materials. Czechoslovakia offered fairly good enlargers and, among others, Meopta products, copied after the German Rolleicord, called the Fleksaret. A copy of the same camera was manufactured in Poland under the brand name of the Start. The Polish FOTON Company of Bydgoszcz produced photographic paper and chemicals. However, the Big Brother kept an eye on the photographic businesses and did not allow for any expansion of the Polish industry. The Soviet cameras flooded the Eastern Bloc countries and that situation practically continued until the fall of the Berlin Wall.

Of course, the above review is fairly simplified and superficial, as many more photographic articles had been manufactured in the former Eastern Bloc countries. After the events



Ryc. 14. Książka Alfonsa Długosza *Wieliczka magnum sal* z 1958 r. (kolekcja J. Przybyły).

Fig. 14. “Wieliczka Magnum Sal” by Alfons Długosz of 1958 (J. Przybyły’s collection).



Jednym z niezwykle pracowitych polskich fotografów okresu powojennego był Henryk Hermanowicz (1912 – 1992). Był on uczniem Jana Bułhaka i jego prace wpisują się w estetykę zdjęć nauczyciela. Pomijając dywagacje, czy jest to wada, czy zaleta jego twórczości, nie można pominąć jego wkładu w wielicką fotografię. W zbiorach Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka znajduje się ponad 300 negatywów zdjęć obrazujących zarówno miasto Wieliczka, jak i kopalnię.

Stanisław Kolowca (1904-1968) był znanym krakowskim fotografem, wykładowcą Akademii Sztuk Pięknych, pracownikiem Państwowych Zbiorów Sztuki na Wawelu. Głównie fotografował architekturę, a także dzieła sztuki. Nie obca mu była też wielicka kopalnia, w której wykonał całą serię zdjęć, co ciekawe, nie ukazał nie tylko architekturę podziemnych wyrobisk, ale także górników przy pracy.

Ładunki magnezji jednak w kopalni bądź co bądź metanowej nie są zbyt bezpieczne w użyciu. Szubert, Czernecki, Gargul i Długosz na szczęście nie spowodowali w kopalni żadnych strat. Fotografując wyrobiska do których doprowadzony był prąd elektryczny można było używać standardowych lamp, ale już miejsca nie uzbrojone w instalację elektryczną oświetlać należało inaczej. Magnezja zaczęła wychodzić z użycia, a do uwieczniania wielickich podziemi pomocne stały się lampy błyskowe.

Pierwsze takie urządzenia miały charakter lampek z wymiennymi jednorazowymi żarówkami. Żarówki te wypełnione były tlenem i zawierały w środku drucik z magnezu lub aluminium. Pod wpływem impulsu elektrycznego z baterii lampy drucik ten gwałtownie się rozżarzał co doprowadzało do mini „eksplozji” wewnątrz bańki, trwającej około 1/30 sekundy i dającej błysk światła. Błysku nie można już jednak było powtórzyć z tej samej żarówki.

Postęp techniki umożliwił skonstruowanie bardziej doskonałych lamp, opartych na technologii wyładowania elektrycznego doprowadzającego do jonizacji gazu – ksenonu, zamkniętego w szklanej bańce. Źródłem energii jest naładowany kondensator. Proces ten doprowadza do powstania silnego błysku białego światła, a jego zaletą jest wielokrotność użycia.

Lampy błyskowe nowej generacji umożliwiły stosowanie w fotografii kopalni metody *open flash*. Polega ona na ustawieniu aparatu na stabilnym statywie i otwarciu migawki w czasie B, czyli na stałe. Przemieszczając się po wyrobisku w różne jego zakamarki wykonuje się szereg błysków, które rejestrują film lub matryca aparatu, sumując je ze sobą.

Uproszczenie się przenośnych lamp akumulatorowych doprowadziło do powstania metody pędzla świetlnego. Jest to zmodyfikowana metoda *open flash*. Fotografujący „maluje” światłem lampy kopalnianą przestrzeń. Zaletą tej metody jest możliwość zastosowania w niej roboczych lamp górniczych oraz jej bezpieczeństwo.

of Autumn 1956, the “iron curtain” was not tight any more, although the Polish photographers were still limited to the use of local equipment because another serious restriction applied: the Western equipment was beyond the financial reach of the Polish citizens. Western cameras and photographic materials were, however, imported and distributed in small quantities by the ZPAF Association, although the so-called “association for the artists” controlled the artists and only “the faithful” ones obtained gifts.

The end of the Stalinist era in 1956 also caused a break up with the socialist pictorial style and social realism in art, replaced by a dialogue with international photography among our native photographers. However, let us return to Wieliczka.

Henryk Hermanowicz (1912–1992) was an extremely diligent photographer of the post-war period. He was a disciple of Jan Bułhak and Hermanowicz’s works continued the style of his master. Avoiding speculations whether it was an advantage or disadvantage of Hermanowicz’s photographs, we may not omit his contribution to the Wieliczka photography. The Kraków Saltworks Museum in Wieliczka possesses more than 300 negatives of the artist’s pictures of both town and Salt Mine.

Stanisław Kolowca (1904–1968) was a well-known Kraków’s photographer, lecturer at the Academy of Fine Arts, and curator of the State Art Collection of the Wawel Castle. He mainly photographed architecture and masterpieces of art. He also produced a series of photographs of the Wieliczka Salt Mine, showing not only the architecture of the underground workings, but also the miners at work.

Coming back to the history of photography, let me mention that the magnesia charges were not safe to be used in the Salt Mine where methane was emitted. Szubert, Czernecki, Gargul, and Długosz luckily did not cause any disasters in the Salt Mine. Later, when underground workings were fitted with electrical installations, standard flashes could be used.

The original flashes were small lamps, with disposable bulbs. The bulbs were filled with oxygen and contained a short wire made of magnesium or aluminium. The wire would be burned upon ignition with battery current, causing a small explosion inside the bulb, lasting ca. 1/30 of a second and producing a flash of light. The flash could not be repeated, using the same bulb.

Technical progress brought different types of flash lamps, based on the electrical discharge technology, causing ionisation of xenon enclosed in a glass bulb. A capacitor was the source of energy. The process caused the occurrence of a strong flash of light that could be repeated.

New-generation flash lamps allowed for the use of the “open flash” technique in underground photography. The camera was mounted on a stable stand and the shutter was set at B, or in the open position. The photographer would walk around the area and produce a number of flashes recorded on

Koncepcje metod oświetlania podziemnych wyrobisk błyskiem magnezy, *open flash* i pędzla świetlnego są bardzo podobne. Inne są tylko źródła światła.

Stopniowy rozwój turystyki i wzrost liczby zwiedzających trasę turystyczną kopalni oraz nowo powstałą podziemną ekspozycją Muzeum Żup Krakowskich wywołał lawinę pocztówek produkowanych głównie przez PTTK, ale i własnymi siłami przez Muzeum. Fotografami byli niekiedy twórcy o uznanych nazwiskach, jak wspomniani już Stanisław Kolowca (zdjęcia wykonane przed 1950 r.) czy Piotr Krassowski (lata 70.), ale nie powstawały duże zwarte zestawy prac tych fotografów. Typowe pocztówki niemal do znudzenia pokazują komorę Janowice z rzeźbami autorstwa Mieczysława Kluzka, Kaplicę św. Kingi albo w przypadku kart wydanych przez Muzeum wtórną szatę naciekową w komorze Maria Teresa II lub kieraty z podziemnej ekspozycji. Fotografie Wielickich podziemi tworzone na potrzeby rozmaitych przewodników i broszur, a także dla ilustracji artykułów prasowych o kopalni. Wydawano także zestawy przeźroczy do projekcji w domowych rzutnikach (ryc. 16, 17, 20, 21).

W 1968 r. w serii *Piękno Polski* ukazał się album wydawnictwa Sport i Turystyka pod tytułem *Wieliczka*, zawierający czarno-białe zdjęcia autorstwa Magdaleny Rusinek (ryc. 15). Był to kolejny fotograficzny album traktujący o Wieliczce. Zamieszczone w nim zdjęcia są interesującym dokumentem, jak na przykład obraz Dolnej Groty Kryształowej pozbawionej jeszcze stojącego dziś w niej kasztu (Rusinek, 1968).

the camera's film or matrix to produce a composition of images.

General availability of portable battery-powered flash lamps also caused the development of the "light brush" method. That was a modified "open flash" technique. The photographer would "paint" the underground space with light. The advantages here consisted in the use of miners' torches and resulted in safe underground operations.

In fact the lighting methods based on magnesia, or open-flash and light-brush techniques were fairly similar except for the different light sources.

A gradual development of tourism and the increase of the numbers of visitors arriving to sightsee the underground tourist route, together with the newly designed underground exhibition of the Kraków Saltworks Museum in Wieliczka, caused a flood of picture postcards printed mainly by the Polish Tourism Association (PTTK) and the Museum itself. Well-known photographers provided materials for the business, e.g. Stanisław Kolowca (before 1950) or Piotr Krassowski (in the 1970's), although large sets were not published by those photographers. Typical picture postcards presented over and over the Janowice Chamber, with the sculptures by Mieczysław Kluzek or the St. Kinga's Chapel, or, in the case of the cards published by the Museum, the secondary dripstone formations of the Maria Teresa II Chamber, or the treadmills at the underground exhibition. The photographs of the Wieliczka's underground workings were taken for the needs



Ryc. 15. Album *Wieliczka* ze zdjęciami Magdaleny Rusinek wydany w 1968 r. w serii *Piękno Polski* (kolekcja J. Przybyły).  
 Fig. 15. "Wieliczka," with the photographs by Magdalena Rusinek, published in 1968 in the series of "The Beauty of Poland" (J. Przybyły's collection).





**Ryc. 16.** Pocztówki z okresu powojennego (wydane do 1989 r.) przedstawiające podziemia kopalni, głównie trasę turystyczną oraz wyrobiska podziemnej ekspozycji Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka (kolekcja J. Przybyły).

**Fig. 16.** Picture postcards of the post-war period (issued until 1989) showing the underground workings of the Salt Mine, mainly along the tourist route, and the underground exhibition of the Kraków Saltworks Museum in Wieliczka (J. Przybyły's collection).



**Ryc. 17.** Przykład materiałów przeznaczonych dla masowego turysty – przeźrocza z kopalni wydane przez Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka (kolekcja J. Przybyły).

**Fig. 17.** An example of the materials intended for mass tourism: slides published by the Kraków Saltworks Museum in Wieliczka (J. Przybyły's collection).

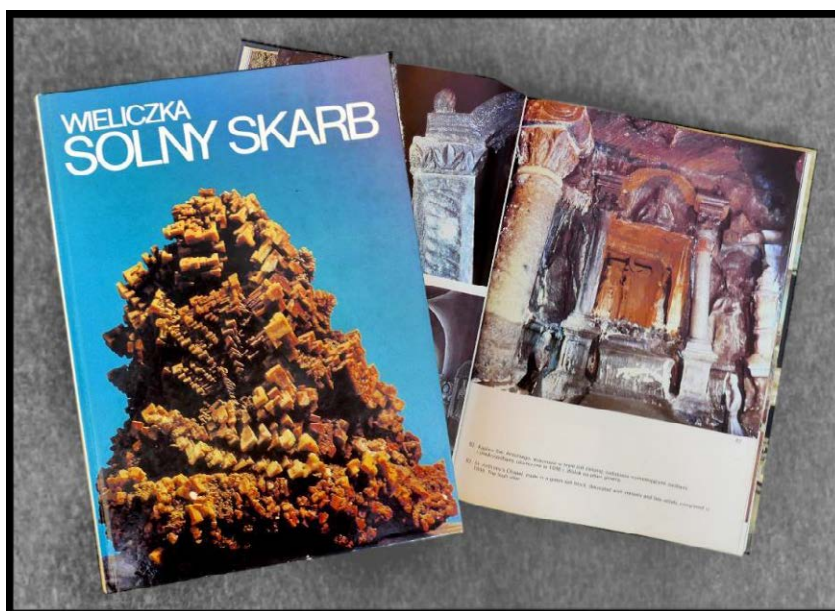
W latach 70. doszło w historii kopalni do dwóch wydarzeń, które zdecydowały o jej dzisiejszym kształcie. W 1976 r. została wpisana na listę zabytków województwa krakowskiego, a w 1978 r. trafiła na pierwszą Światową Listę Dziedzictwa Kulturowego i Przyrodniczego UNESCO. Wydarzenia te zaowocowały kolejnymi albumami traktującymi o kopalni.

of various guidebooks and brochures, as well as illustration of newspaper articles. Sets of slides were also produced (Figs. 16, 17, 20, and 21).

In 1968, Magdalena Rusinek's *Wieliczka* album was published by the Sport i Turystyka Publishers, in the publication series of *The Beauty of Poland*. The album contained black-and-white pictures (Fig. 15). That was yet another photographic album about Wieliczka. The pictures became interesting documents, showing e.g. the Lower Crystal Grotto, without the wooden supports existing there today (Rusinek 1968).

Two significant events occurred in the "Wieliczka" Salt Mine in the 1970's. They affected the present-day shape of the site. The Salt Mine was entered on the Landmark List of the Kraków Region in 1976 and on the UNESCO World Heritage List in 1978. Those events also resulted in the publication of new albums on the Salt Mine.

In 1984, or during the communist state of emergency (called the "Polish-Jaruzelski" war), the *Wieliczka: Salt Treasure* album was published (Fig. 18). It was a review of the Salt Mine's past and present, discussing the issues of geology, history or technology. It is possible that the album had been written earlier, but the chaos of the state of emergency



**Ryc. 18.** Pierwszy album o kopalni wydany po jej wpisie na listę Światowego Dziedzictwa UNESCO – *Solny skarb* (1984 - kolekcja J. Przybyły).

**Fig. 18.** The first album about the Salt Mine published after its entry on the UNESCO World Heritage List: "Wieliczka: Salt Treasure" (1984, J. Przybyły's collection).

W 1984 r., a więc w okresie „wojny Polsko Jaruzelskiej”, ukazał się album *Wieliczka- solny skarb* (ryc.18). Traktuje on przeglądowo o kopalni z wczoraj i z dziś poruszając zagadnienia z geologii, historii czy techniki. Możliwe, że powstał wcześniej, ale zawirowania stanu wojennego spowodowały jego publikację w dopiero w owym roku. Zawiera on zdjęcia różnych autorów, co nie sprzyja jego jednolitej stylistyce. Opowiada o mieście, trasie turystycznej, muzeum, porusza zagadnienia eksploatacji i produkcji soli oraz leczenia chorób w warunkach podziemnego mikroklimatu. Jest to trzeci w historii album o kopalni. Wydany został przez Krajową Agencję Wydawniczą, a wydrukowany w Jugosławii (Praca zbiorowa, 1984).

W 1988 r. nakładem wydawnictwa Interpress wyszedł album ze zdjęciami Stanisława Klimowskiego i tekstem Mariana Hanika *Wieliczka. Siedem wieków polskiej soli* (ryc.19). Album autorstwa jednego fotografa jest jednolity stylistycznie, porusza różne zagadnienia – pokazuje nie tylko trasę turystyczną lub ekspozycję Muzeum, ale także zakamarki tej „prawdziwej” kopalni wskazywane przez jej pracowników, w tym ówczesnego głównego jej geologa Janusza Wiewiórkę. Zdjęcia robione były średnioformatowym aparatem Kiev 88 na specjalnie pozyskanych do tego celu materiałach transparentnych Fuji. Powstawały w pierwszej połowie lat 80, a publikacja albumu w r. 1988 wynikała z faktu skrupulatnego pisania tekstu przez Mariana Hanika (informacje od autora zdjęć).

W czasach PRL każdy fotograf drżał przed tym, co zrobi z jego zdjęciami wydawnictwo i pan Stanisław Klimowski

delayed its publication. The book contained the photographs made by various authors, which distorted a uniform style. The story told us about the town, the tourist route, the Museum, and it contained the descriptions of salt mining, salt production process, and spa treatment in the conditions of underground microclimate. That was the third album about the Salt Mine. It was published by the Krajowa Agencja Wydawnicza Publishers and printed in Yugoslavia (Praca zbiorowa 1984).

In 1988, the Interpress Publishers released an album with the photographs by Stanisław Klimowski and texts by Marian Hanik entitled *Wieliczka. Seven Centuries of Polish Salt* (Fig. 19). The album composed by one photographer was uniform in style and discussed various matters, not only the tourist route, but also the underground Museum’ exhibits, as well as the nooks of the “real” Salt Mine, selected by the miners themselves, including the then Chief Geologist, Janusz Wiewiórka. The pictures were taken with a medium-format camera, Kiev 88, using especially ordered Fuji slides. The project was conducted in the first half of the 1980’s and the album was published only in 1988 due to the time-consuming and careful preparation of the texts by Marian Hanik (private communication with the photographer).

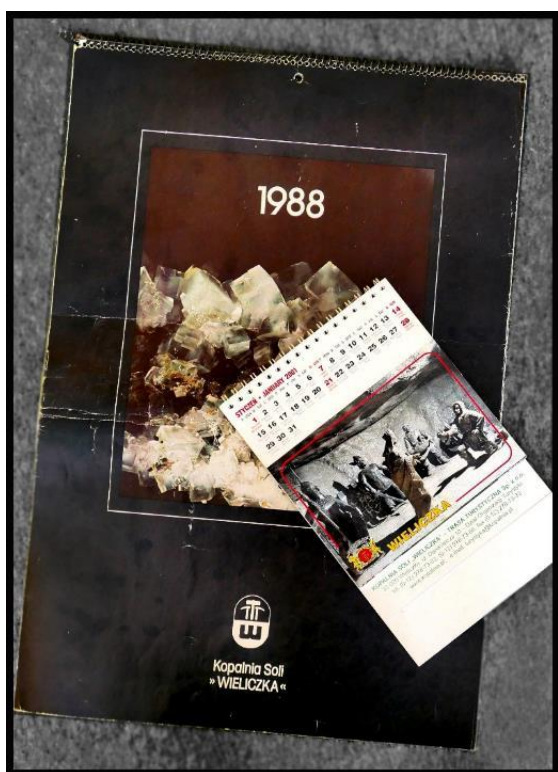
During the communist days, the photographer was worried what the Publishers would actually do with his pictures and Mr. Stanisław Klimowski was not happy of the final publication, unfortunately, because the album was poorly printed in technical terms by the Interpress Publishers (Klimowski, Hanik 1988).



Ryc. 19. *Wieliczka. Siedem wieków polskiej soli* - album ze zdjęciami Stanisława Klimowskiego (1988 - kolekcja J. Przybyły).

Fig. 19. “Wieliczka. Seven Centuries of Polish Salt.” An album with the photographs by Stanisław Klimowski (1988, J. Przybyły’s collection).





Ryc. 20. Przykłady „wielickich” kalendarzy (kolekcja J. Przybyły).

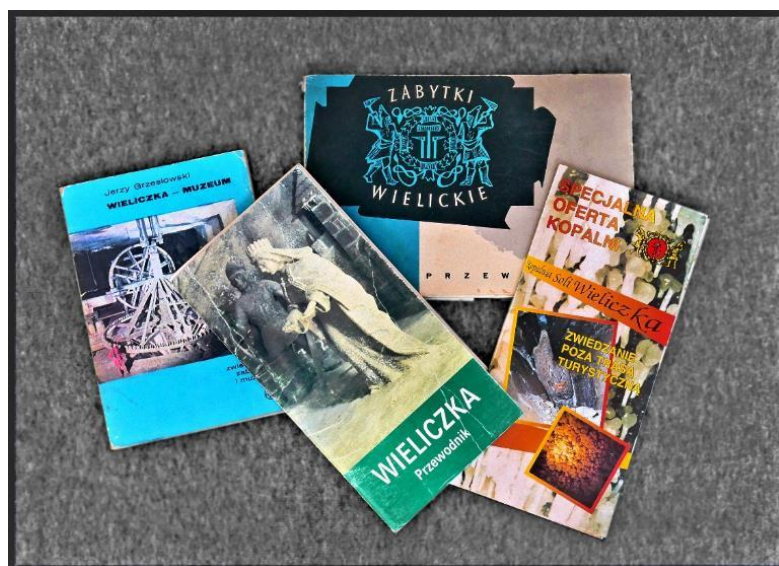
Fig. 20. Examples of the “Wieliczka” Calendars (J. Przybyły’s collection).

niestety też nie był zadowolony z publikacji, bowiem album pod względem technicznym został bardzo źle wydany przez wydawnictwo Interpress (Klimowski, Hanik, 1988).

## 6. WIELICKIE PODZIEMIA NA FOTOGRAFIACH W OKRESIE PO 1989 R.

W listopadzie 1989 r. runął mur berliński, a tym samym „żelazna kurtyna” przestała istnieć. Złotówka stopniowo stawała się wymiernym na inne waluty pieniądzem, choć początkowo przy szalejącej inflacji. Zawodowi fotografowie mogli odłożyć Kiewy, Zorki, Practiki i Pentacony do lamusa, zwłaszcza, że przestały istnieć NRD i ZSRR. Wschodniemieckie firmy fotograficzne połączyły się z zachodnimi wracając tym samym do stanu sprzed 1945 r. Polskim zawodowym fotografom przestawał być potrzebny ZPAF do „załatwiania” aparatów, materiałów i filmów.

W 1993 r. powstał kolejny album o Wielickich podziemiach pt. *Kopalnia soli Wieliczka* ze zdjęciami Pawła Jaroszewskiego i tekstem Leszka Horwatha (ryc. 22). Z fotografem współpracował ponownie Janusz Wiewiórka, wtedy już emerytowany pracownik kopalni. Album przedstawia poszczególne wyrobiska należące do trasy turystycznej oraz Muzeum. Na części zdjęć uderza pustka, nawet w Kaplicy św. Kingi nie ma ludzi. Inne fotografie, nawet z widniejącymi na nich postaciami, są dość statyczne. Jest to prawdopodobnie



Ryc. 21. Masowy ruch turystyczny wymaga publikacji przewodników (kolekcja J. Przybyły).

Fig. 21. Mass tourism required the publication of Guidebooks (J. Przybyły’s collection).

## 6. THE WIELICZKA UNDERGROUND WORKINGS ON THE PICTURES TAKEN AFTER 1989

The Berlin Wall collapsed in November 1989, and, consequently, the “iron curtain” ceased to exist. The Polish zloty was gradually turning into an exchangeable currency, although inflation was very high initially. Professional photographers could set aside their Kievs, Zorkas, Practicas, or Pentacontas for good, the more so as GDR and USSR ceased to exist. East German photographic companies were integrated with the West German ones, returning to the pre-1945 status quo. Polish professional photographers did not need the ZPAF to “arrange” for obtaining cameras, films or other materials.

In 1993, another album on the Wieliczka’ underground workings was published: *The Wieliczka Salt Mine*, with the photographs by Paweł Jaroszewski and texts by Leszek Horwath (Fig. 22). Janusz Wiewiórka co-operated with the photographer again, although he was a retired Salt Mine’s worker at that time. The album presented particular workings along the tourist routes, as well as the Museum. Huge voids looked striking on some pictures. There were no people even in the St. Kinga’s Chapel. Other pictures, even those showing people, were rather static. That was probably an intended method of the photographer, maybe controversial one, but still that album belonged to a few publications on the Salt Mine that showed the artist’s personality (Jaroszewski, Horwath 1993). The photographers’ styles were unnoticeable in the majority of albums, except for two to be mentioned at the end of this chapter.



Ryc. 22. Album *Kopalni Soli Wieliczka* ze zdjęciami Pawła Jaroszewskiego (1993 - kolekcja J. Przybyły).

Fig. 22. “Wieliczka Salt Mine.” An album with the photographs by Paweł Jaroszewski (1993, J. Przybyły’s collection).

celowy zabieg autora fotografii, może dyskusyjny, ale album należy do nielicznych publikacji tego typu o kopalni, gdzie widoczna jest osobowość twórcy (Jaroszewski, Horwath, 1993). W większości następnym albumach niestety indywidualność autorów zdjęć jest niezauważalna. Poza dwoma wyjątkami, o czym na zakończeniu rozdziału.

Po wyodrębnieniu w 1996 r. ze struktur „Kopalni Soli „Wieliczka” p.p. spółki Kopalnia Soli „Wieliczka” - Trasa Turystyczna sp. z o.o. ta ostatnia zaczęła firmować wydawanie kolejnych wydawnictw albumowych traktujących o kopalni. Pierwszym z nich był album pod prostym tytułem *Wieliczka* ze zdjęciami Tomasza Gębusia i Tadeusza Korduli (ryc.23). Publikację tę wydano niestety w nienajlepszej stylistyce (Kordula, Gębuś, b.d.w.).

Po tym niezbyt fortunnym przedsięwzięciu kopalnia podjęła współpracę z wydawnictwem „Karpaty”, którego fotograf Janusz Podlecki wykonał serię zdjęć, opublikowanych w latach 1998 – 2001 w kilku albumach o zróżnicowanych objętościach (ryc.24). Jego kadry są wyraziste, a na przełomie wieków nie było już mowy, aby albumy były już tak technicznie nieudane jak ten Interpressu sprzed ponad 10 lat. Na fotografiach niestety nie widać charakteru i osobowości ich twórcy. Zostały one zrobione różnymi metodami – *open flash*, bezpośrednim błyskiem lampy błyskowej, przy świetle zastanym, widać też zastosowanie akumulatorowego reflektora halogenowego. Fotograf miał też niekiedy problemy z kompozycją zdjęć, a fragmenty części ujęć nie wiedzieć czemu pokolorował w programie graficznym na czerwono. Walorem publikacji wydawnictwa „Karpaty” jeśli chodzi o część fotograficzną jest ukazanie wyrobisk, które w następnych latach

After the Kopalnia Soli “Wieliczka” – Trasa Turystyczna Ltd. was separated as a company from the “Wieliczka” Salt Mine State-Owned Enterprise, in 1996, the new tour operator started to publish own albums about the Salt Mine. The first one was entitled simply *Wieliczka* and contained the photographs by Tomasz Gębuś and Tadeusz Kordula (Fig. 23). Unfortunately, the printing technology was not the best possible (Kordula, Gębuś, no date). That unfortunate project led to the co-operation with the “Karpaty” Publishers rather whose photographer, Janusz Podlecki, took a series of pictures published in several albums of various volumes in 1998–2001 (Fig. 24). The photographer’s frames were very distinct. At the turn of the 21st century, it would be unacceptable to produce technically poor publications, like that by the Interpress Publisher issued ten years before. Unfortunately, the photographs did not display the artist’s nature or personality. The photographs were obtained by various methods: “open flash”, “direct flash”, or in ambient lighting; one can also notice the use of a battery-powered halogen lamp. The photographer sometimes had some problems with the image composition. For some reason, he also painted red certain fragments of some pictures, using graphic software. However, the main value of the album of the “Karpaty” Publishers, in the documentary sense, was the display of the underground workings of the time since their appearance was changed afterwards, e.g. the Franciszek Karol Chamber, or the St. John’s Chapel (Podlecki 1997, 1998; Piotrowicz 2001).

The turn of the century was marked by another revolution in photography. Classical methods of image recording on films were pushed out by digital photography. Besides, graph-





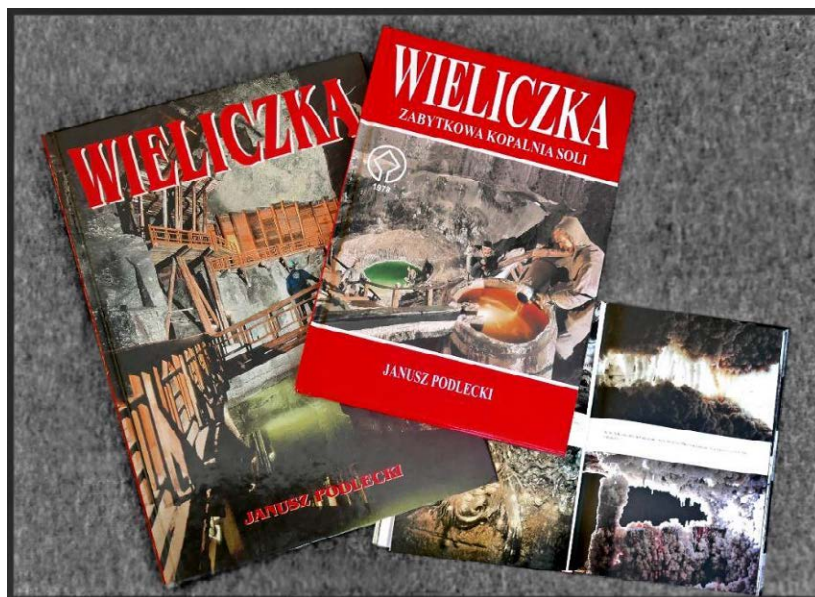
**Ryc. 23.** Album *Wieliczka* wydany w drugiej połowie lat 90. przez kopalnię (Trasę Turystyczną sp. z o.o. - kolekcja J. Przybyły).  
**Fig. 23.** “Wieliczka.” An album published by the Salt Mine’s Company, the Trasa Turystyczna Ltd., in the second half of the 1990’s (J. Przybyły’s collection).

zmieniły swój wygląd, jak komora Franciszek Karol, lub lokalizację, jak kaplica św. Jana (Podlecki, 1997, 1998; Piotrowicz, 2001).

Przełom wieków zaznaczył się kolejną rewolucją w fotografii. Klasyczne metody rejestracji obrazu na błonach filmowych stopniowo zaczęły być wypierane przez fotografię cyfrową. Już w latach 90. XX w. pojawiły się programy graficzne, w których można było dokonać znaczących korekt w zeskanowanych zdjęciach. W pierwszej dekadzie XXI w. fotografia cyfrowa zaczęła być dominującą metodą rejestracji obrazu.

ic software became available in the 1990’s. Considerable corrections could be made in digital pictures. In the first decade of the 21st century, digital photography became a dominating form of taking pictures.

Early in the 21st century, several more albums were published. However, they did not contribute much to the history of photography of the Wieliczka’s underground workings, in respect of techniques or treatment of the theme. Thus, it is hard to discuss any of them separately. The album by Adam Bujak, *A Jewel of Poland: Wieliczka*, published by the “Biały Kruk” Publishers in Kraków in 2005, contained everything



**Ryc. 24.** Albumy o kopalni z przełomu XX i XXI w. ze zdjęciami Janusza Podleckiego (kolekcja J. Przybyły).  
**Fig. 24.** Albums about the Salt Mine published in the late 20th and early 21st century, with the photographs by Janusz Podlecki (J. Przybyły’s collection).

W początkowych latach XXI w. ukazało się kilka wydawnictw albumowych, które do historii fotografii wielickich podziemi w zasadzie nic nie wносиły, zarówno pod względem technik fotografii, jaki i podejścia do tematu, zatem trudno koncentrować się na każdym z nich. Album Adama Bujaka *Klejnót Rzeczypospolitej. Wieliczka* wydany przez krakowski „Biały Kruk” w 2005 r. pokazuje wszystko, co można pokazać w Wieliczce (głównie w mieście), jednocześnie nic nowego z podziemi w nim nie zobaczymy. Album Bogusława Światały *Wieliczka. Świątynia wiary i etosu pracy* z r. 2011 bliski jest dziełu Bujaka. Podobnie jest w albumie Bogumiła Krużela *Skarby Wieliczki* z r. 2012 i jego wznowieniu w nieco poszerzonej wersji w 2014 r., a album Pawła Zechentera *Kopalnia Soli „Wieliczka”. Trasa Turystyczna Trasa Górnicza* z 2013 r. to rodzaj fotograficznej wędrowki po obu kopalnianych trasach (ryc. 27).

Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka prowadzi ożywioną działalność wydawniczą, ale po epoce doskonałego fotografa Alfonsa Długosza w wydawanych publikacjach posiłkowało się pracami wielu twórców, zatem w muzealnych albumach także nie zobaczymy indywidualności. Są to wydawnictwa w dużej mierze edukacyjne, w których zamieszczane są zdjęcia Zamku Żupnego, eksponatów z zamkowej oraz podziemnej ekspozycji zlokalizowanej w komorach zespołów Russeger czy Maria Teresa, fotografie kieratów i tym podobne. Po przemianach 1989 r. pierwszym z albumów był *Wieliczka. Muzeum Żup Krakowskich* ze zdjęciami Artura Grzybowskiego i Mariana Nędzy, wydany w 1991 r. W r. 1999 ukazał

one could see in the town of Wieliczka, and no new sites of the Mine’s underground workings. The album by Bogusław Światały, *Wieliczka: A Temple of Faith and Work Ethos* of 2011 was similar to the work by Bujak. The same can be said about the album by Bogumił Krużel *The Treasures of Wieliczka* of 2012 and its second slightly expanded edition of 2014. The album by Paweł Zechenter, *The “Wieliczka” Salt Mine: The Routes for Tourists and Miners* of 2013 presented illustrated walks along two routes of the Salt Mine (fig. 27).

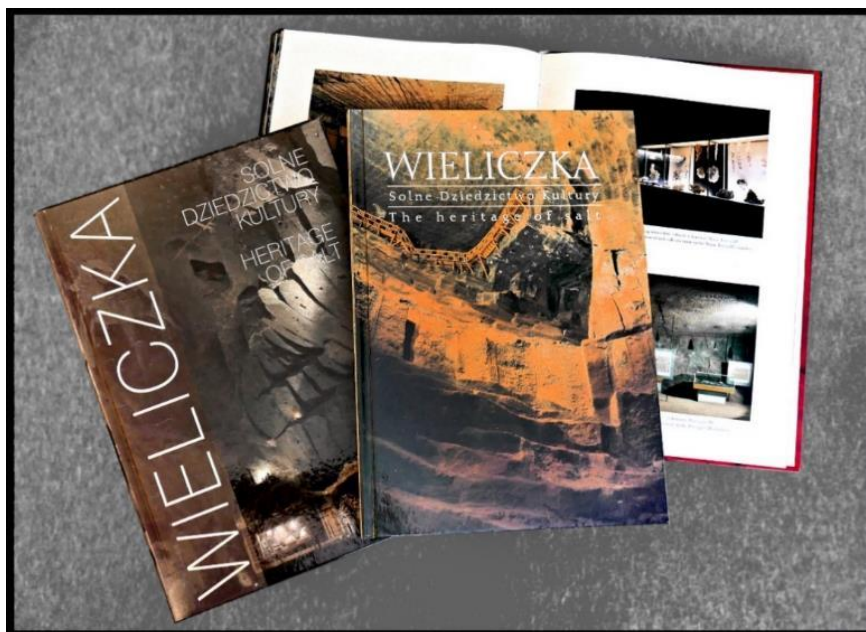
The Kraków Saltworks Museum in Wieliczka has been a prolific publisher, although, after the days of Alfons Długosza, many artistic photographers were employed and that is why it is hard to find artistic personalities among them. The publications were mostly educational in nature, containing the pictures of the Salt Castle, exhibits displayed in the Castle and in the underground Museum, situated in the Russeger or Maria Teresa Chamber complexes, supplemented with the pictures of treadmills etc. After the transformations of 1989, the first album to appear was the *Wieliczka: the Kraków Saltworks Museum*, with the photographs by Artur Grzybowski and Marian Nędza, published in 1991. The next one, published in 1999, was the *Wieliczka: The Heritage of Salt*, with a thorough and substantive story and standard photograph, limited to the template style described above. That album was re-edited, with several pictures replaced, in 2009 (Jodłowski, Grzybowski, Nędza 1999; Jodłowski, Grzybowski, Kostuś, Stachurski, Sulma 2009) (Fig. 26). In 2012, the book entitled *From the Treasury of the Wieliczka’s Museum*, presenting



Ryc. 25. Eksperyment - album *Puntos. Podziemne miasto* (2008 - (kolekcja J. Przybyły).

Fig. 25. Experimental Performance: “Puntos. The Underground City” (2008, J. Przybyły’s collection).





**Ryc. 26.** Wydawnictwa albumowe Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka. Dwukrotna edycja pozycji *Wieliczka. Solne dziedzictwo kultury* (1999, 2009 - kolekcja J. Przybyły).

**Fig. 26.** Albums published by the Kraków Saltworks Museum in Wieliczka. Two editions of the “Wieliczka. The Heritage of Salt” (1999, 2009, J. Przybyły’s collection).

się album *Wieliczka, Solne dziedzictwo kultury* rzetelny, jeśli chodzi o merytoryczną treść, ale fotograficznie nie wybiegający poza opisany powyżej schemat. Album ten, z w kilku przypadkach wymienionymi na inne ujęcia fotografiami, miał swoje ponowne wydanie w 2009 r. (Jodłowski, Grzybowski, Nędzka, 1999; Jodłowski, Grzybowski, Kostuś, Stachurski, Sulma, 2009, ryc. 26). W r. 2012 ukazała się publikacja *Ze skarbca wielickiego Muzeum* ukazująca obok wybranych eksponatów także niektóre wyrobiska podziemnej ekspozycji. Autorami zdjęć byli Artur Grzybowski oraz Ludwik Kostuś (Jodłowski, Grzybowski, Kostuś, 2012).

Fotografia podziemi Wieliczki mała też swój artystyczny eksperyment. Jani Konstantinovski Puntos, Macedończyk, ale urodzony w Wałbrzychu (syn emigrantów politycznych z Grecji) jest artystą, absolwentem krakowskiej ASP. W 2008 r. podziemiach Wieliczki zrealizował za pomocą rozmaitych mediów - światła i dźwięku swój projekt artystyczny „Podziemne miasto”. Zdjęcia z inscenizacji tego projektu zostały opublikowane w albumie *Puntos. Podziemne miasto* (ryc.25). O ile uczestniczenie w takim projekcie „na żywo” może być interesujące, to jednak statyczne fotografie nie oddają dynamiki wydarzenia (Puntos, 2008).

Wspomniane wcześniej dwa albumy, w których widać osobowość twórców zdjęć, zamykają przegląd komercyjnej fotografii wielickich podziemi.

Andrzej Nowakowski jest polonistą, jednocześnie z zamiłowania fotografem. W 2013 r. ukazał się jego album *Skarb. Kopalnia Soli „Wieliczka”* (poprzedzony dwa lata wcześniej znacznie skromniejszym albumem *Miasto w soli*, ryc. 28). Jest to obszerne dzieło, którego część fotograficzna ukazuje kopal-

selected Museum exhibits and some underground workings. The pictures were taken by Artur Grzybowski and Ludwik Kostuś (Jodłowski, Grzybowski, Kostuś 2012).

The photographic projects of the Wieliczka’s underground workings were also marked by an artistic experiment. A Macedonian born in Wałbrzych, a son of political immigrants from Greece, Jani Konstantinovski Puntos, was an artist, a graduate of the Kraków’s Academy of Fine Arts. He used various media, light, and sound, to carry out his artistic project called “The Underground City” in 2008. The photographs of the project performance were published in the album entitled *Puntos. The Underground City* (Fig. 25). Participation in the live performance could have been interesting, but still photographs did not reflect that dynamic performance (Puntos 2008).

The two previously mentioned albums that clearly demonstrated the photographers’ personalities close my review of the commercial photography of the Wieliczka’s underground workings.

Andrzej Nowakowski graduated from the Faculty of Polish Philology of the Jagiellonian University in Kraków, and photography became his passion. In 2013, he published his album *Treasure. The “Wieliczka” Salt Mine* (preceded by a modest one entitled *The City in Salt*, Fig. 28). Nowakowski’s later work was fairly large, with the collection of photographs showing the Salt Mine differently from the previous practice shaped by the end of the 1990’s. He used two miners’ lamps, an older type emitting warm yellow light and a modern lamp, with white and bluish light, as the sources of light. He also applied the “light brush” technique, involving



Ryc. 27. Albumy ze zdjęciami Bogumiła Krużela i Pawła Zechentera (2012–2013 - kolekcja J. Przybyły).

Fig. 27. Albums with the photographs by Bogumił Krużel and Paweł Zechenter (2012–2013, J. Przybyło's collection).

nię w sposób odbiegający od schematu ukształtowanego pod koniec lat 90. XX w. Fotografując jako źródło światła użył dwóch roboczych lampek górniczych, jedną starszego typu dającą światło ciepłe o odcieniu żółtym i drugą najnowszego typu o świetle białym o odcieniu niebieskim. Przy fotografowaniu stosował metodę pędzla świetlnego, czyli intensywnie machając obydwoma lampkami starał się pomalować światłem całą kadr. Osiągnięty efekt jest ciekawy, poza tym fotograf uwiecznił miejsca, które do tej pory nie interesowały innych twórców,

intense movements of both lamps to “paint” the whole frame with light. The lighting effects were quite interesting. Besides, the photographer entered the sites that had been of no interest to other artists, touching upon novel issues, e.g. the fate of metal in the world of salt (Nowakowski 2011, 2013). Andrzej Nowakowski's style was so different from the previous standard treatment of the site by Podlecki, Światała, or Bujak that many viewers criticised Nowakowski's photographs of Wieliczka.



Ryc. 28. Albumy *Miasto w Soli* oraz *Skarb* ze zdjęciami Andrzeja Nowakowskiego (2011, 2013, kolekcja J. Przybyły).

Fig. 28. “The City in Salt” and “The Treasure” albums, with the photographs by Andrzej Nowakowski (2011, 2013, J. Przybyło's collection).





Ryc. 29. Album *Kopalnia Soli wieliczka. Niecodzienny świat soli* ze zdjęciami Ryszarda Tatomira (2018 - kolekcja J. Przybyły).

Fig. 29. “The “Wieliczka” Salt Mine: The Amazing World of Salt” with the photographs by Ryszard Tatomir (2018, J. Przybyły’s collection).

dotknął też wiele zagadnień dotychczas nie poruszanych, jak np. los metalu w solnej rzeczywistości (Nowakowski, 2011, 2013). Fotografie Andrzeja Nowakowskiego tak dalece odbiegły od schematu prac Podleckiego, Światały czy Bujaka, że wielu krytykowało jego zdjęcia podziemi Wieliczki.

Ryszard Tatomir należy do Stowarzyszenia Twórców Fotoklubu Rzeczypospolitej Polskiej. W latach 2017-2018 fotografował kopalnię. Jego praca zaowocowała albumem *Kopalnia Soli „Wieliczka” Niecodzienny świat soli*, wydanym w 2018 r. (ryc. 29). Jego fotografie podziemi są nieco podobne do zdjęć Nowakowskiego, także używa mieszanego światła ciepłego i zimnego, bardzo kontrastowo, nawet wydaje się, że w pewnych sytuacjach z pewną dozą przesady. Stosuje metodę *open flash*, a na swych zdjęciach pokazał wiele zakamarków kopalni zlokalizowanych poza miejscami objętymi masową turystyką. Ideą albumu było pokazanie związku człowieka z naturą – człowiek drążąc kopalnię zawłaszczył część przyrody, teraz natura odbiera z powrotem to co do niej niegdyś należało, zaciskając stopniowo opuszczone wyrobiska i budując szaty naciekowe wtórnych soli (Tatomir, 2018).

## 7. ZDJĘCIA Z KOPALNI W EDUKACJI, NAUCE I TECHNICE

Fotografia wielickiej kopalni ma też swój praktyczny rozdział. Zdjęcia podziemnych korytarzy i komór, górników przy pracy oraz odsłonięć geologicznych służyły celom dydaktycznym. Przykładem takich zdjęć jest jak na razie anonimowy, jeśli chodzi o autorstwo fotografii wspomniany wcześniej zestaw szklanych diapozytywów przeznaczonych dla projekcji w „magicznej latarni”, a powstały do lat 40. XX w. (ryc. 30).

W dawnych latach PRL dziecięcej rozrywce, ale też i edukacji służyły urządzenia zwane diaskopami. Były to projek-

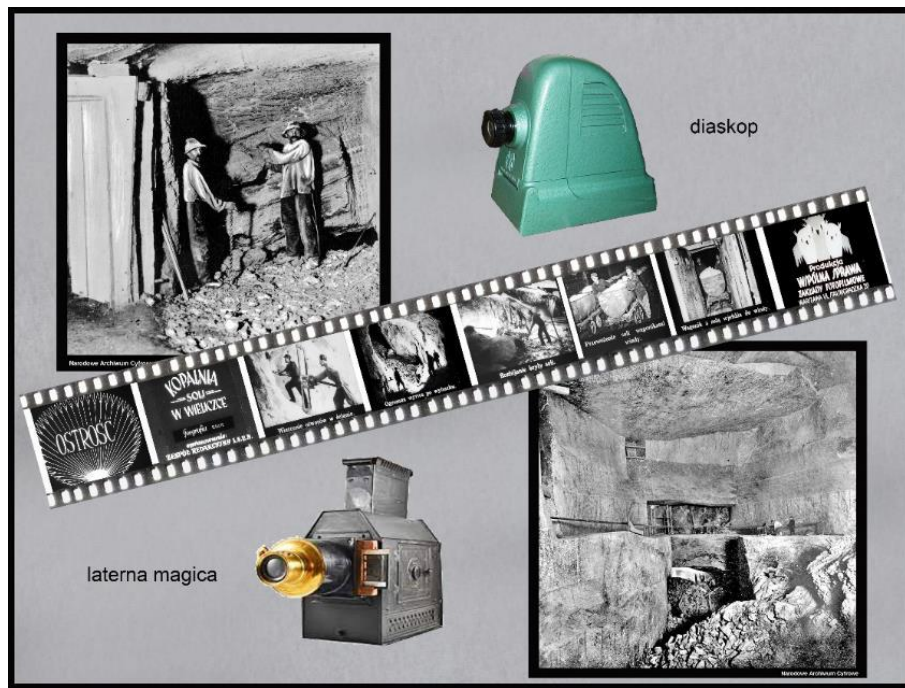
Ryszard Tatomir was a member of the Association of the Artists of the Polish Photoclub (STFRP). He photographed the Salt Mine in 2017–2018. His works were published in the album entitled *The “Wieliczka” Salt Mine: The Unique World of Salt*, in 2018 (Fig. 29). His underground photographs were somewhat similar to those by Nowakowski, as he had also used mixed warm and cold lighting, with sharp contrasts, obtaining even some excessive qualities in certain situations. He applied the “open flash” technique and showed a number of the Salt Mine’s nooks, existing outside the locations made available to the regular tourists. The idea of his album was to show the man-nature relationship: by digging excavations, man had claimed part of nature and later nature took back its domain, as a result of the processes of the convergence of the abandoned excavations and building secondary dripstone formations (Tatomir 2018).

## 7. THE PICTURES OF THE SALT MINE USED FOR EDUCATIONAL, RESEARCH, AND TECHNICAL PURPOSES

The history of the “Wieliczka” Salt Mine photography also had its practical chapters. The pictures of the underground corridors and chambers, miners at work, or geological outcrops and exposures were used for educational purposes. A set of glass positives designed for screening, with the use of the Magic Lantern, produced by an unknown artist, was an example of such materials. Such sets were composed until the 1940’s (Fig. 30).

Diascopes or slide projectors were used for slide shows, as forms of entertainment and education decades ago. The devices were similar to Magic Lanterns that allowed for screening of children’s stories, composed of a series of positive photo-





**Ryc. 30.** Zestaw zdjęć do prezentacji w „laterna magica” (do lat 40. XX w.) oraz film edukacyjny dla szkół podstawowych z pierwszej połowy lat 60. do projekcji w diaskopach (Narodowe Archiwum Cyfrowe - 3/1/0/8/1482 i 3/1/0/8/1472 oraz kolekcja J. Przybyły).  
**Fig. 30.** A set of photographs for presentation in the Laterna Magica (until the 1940’s) and an educational slide series for primary schools of the first half of the 1960’s to be screened with diasscopes (National Digital Archives 3/1/0/8/1482 and 3/1/0/8/1472 and J. Przybyły’s collection).

tory (podobnie jak „magiczne latarnie”), które umożliwiały projekcje na ekranie na przykład bajek będących poszczególnymi obrazkami naświetlonymi na błonie fotograficznej. We wczesnych latach 60. ukazał się czarno-biały zestaw edukacyjny pt. *Kopalnia Soli w Wieliczce* przeznaczony dla klas IV szkoły podstawowej, a zatwierdzony przez Ministerstwo Edukacji dla nauki geografii. Film wyprodukowała spółdzielnia „Wspólna Sprawa”. Jest to sekwencja 18 slajdów autorstwa różnych fotografów, których nazwisk nie wymieniono. Do dziś zestaw ma walory edukacyjne – pokazuje na kilku kolejnych slajdach proces wydobywania soli kamiennej metodą „na sucho”, której zaprzestano w 1964 r. (ryc. 30).

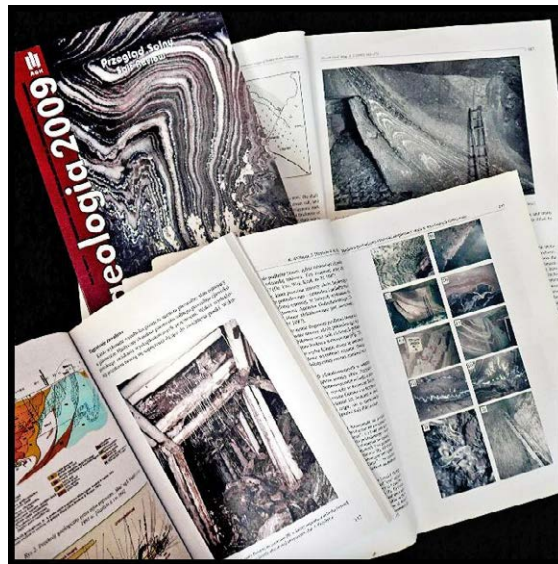
Innym przykładem zastosowania fotografii wielickich podziemi w procesie edukacji i rozwoju nauki są liczne ilustracje zamieszczone w artykułach naukowych oraz popularnonaukowych (ryc. 31).

W 1960 r. ukazała się publikacja pt. *Fotogrametryczne kartowanie i profilowanie wyrobisk górniczych na przykładzie kopalni w Wieliczce* (ryc. 32) autorstwa Zygmunta Kowalczyka (1908-1985). Był on profesorem geodezji, rektorem AGH, pracował też na Politechnice Warszawskiej. Związany był też z górnictwem, bardzo interesował się geologią. W swojej pracy przedstawił metody fotogrametrycznego kartowania geologicznego wyrobisk górniczych, ilustrując zagadnienie przykładami odsłonięć geologicznych w wyrobiskach kopalni Wieliczka. Praca bogata jest w zdjęcia, ryciny oraz skomplikowane wzory, które stosowane są w fotogrametrii (Kowalczyk, 1960).

graphs. In the early 1960’s, a set of black-and-white photographs entitled *The “Wieliczka” Salt Mine* was produced. It was designed for grade-four students in primary schools and approved for geography courses by the Ministry of Education. The set was composed of a sequence of slides taken by several different anonymous photographers and published by the “Wspólna Sprawa” Co-operative. That series of slides has preserved its educational qualities until today. It showed the rock salt mining process by the dry method that had been discontinued in 1964 (Fig. 30).

Numerous illustrations published in research and popular-science articles were another example of how the Wieliczka photographs were used in science and education (Fig. 31).

In 1960, the study on the *Photogrammetric Mapping and Profiling of Mine Workings, on the Example of the “Wieliczka” Salt Mine* by Zygmunt Kowalczyk (1908–1985) was published (Fig. 32). The author was a Professor of Geodesy and the Rector of the AGH Academy of Mining and Metallurgy (presently, AGH University of Science and Technology). He also lectured at the Polytechnic of Warsaw (Warsaw University of Technology). He was professionally associated with mining and was strongly interested in geology. In his study, he presented the methods of photogrammetric geological mapping of underground workings and illustrated the subject matter with the photographs of selected geological outcrops and exposures of the “Wieliczka” Salt Mine. His study contained many photographs, sketches, and complex formulas applied in photogrammetry (Kowalczyk 1960).

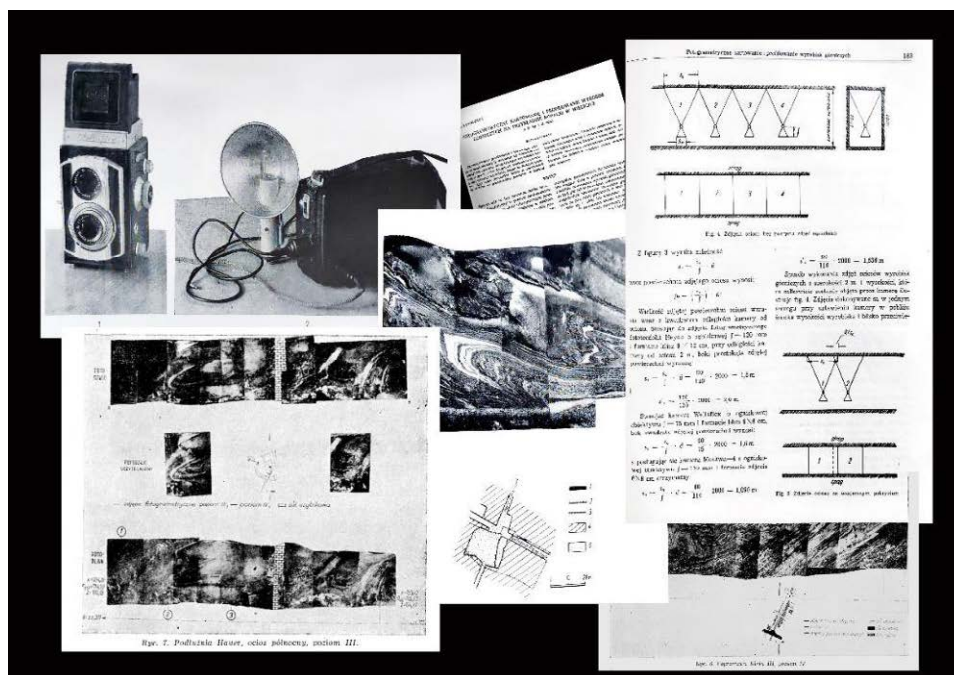


Ryc. 31. Zdjęcia z kopalni są zamieszczane w artykułach naukowych oraz popularnonaukowych. Fot. J. Przybyło.

Fig. 31. Salt Mine photographs published in research and popular-science articles (Photo by J. Przybyło).

Fotogrametria jest pomiarem wykorzystującym obraz w postaci zdjęcia, na którego podstawie interpretuje się kształty, rozmiary i wzajemne położenie obiektów. Na dobre zagościła w Kopalni „Wieliczka” w latach 70. i 80. Wówczas to Krakowskie Przedsiębiorstwo Geodezyjne wykonało gigantyczną mrowczą pracę tworząc tą metodą mapy i przekroje wyrobisk kopalni objętych trasą turystyczną, podziemną ekspozycją Muzeum Żup Krakowskich oraz wybranymi wyrobiskami zlokalizowanymi poza tymi rejonami. Wykonano precyzyjne mapy i przekroje zarówno komór, jak i chodników

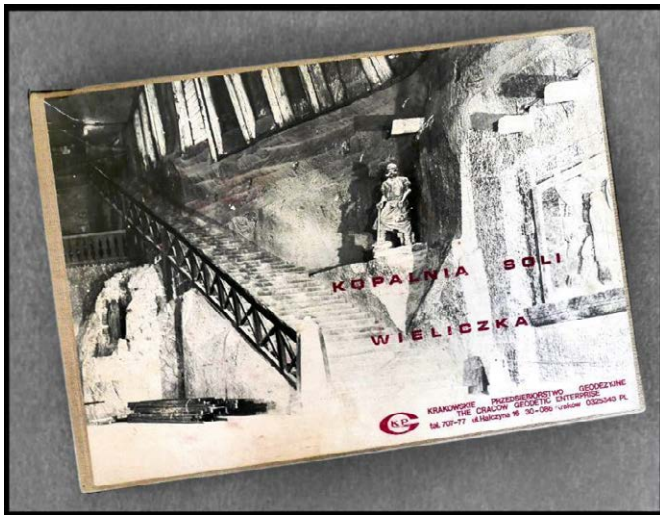
Photogrammetry is a method of surveying, based on images used for the interpretation of shapes, sizes, and distribution of objects. The method was widely used in the “Wieliczka” Salt Mine in the 1970’s and 1980’s. In that period, the Kraków Geodetic Enterprise completed an extremely laborious project to draft maps and cross-sections of the underground workings situated along the tourist route and of the Kraków Saltworks Museum chambers, together with other excavations situated outside those two areas. Precise maps and cross-sections of underground chambers and corridors were drafted in the scale



Ryc. 32. Książka Zygmunta Kowalczyka *Fotogrametryczne kartowanie i profilowanie wyrobisk górniczych na przykładzie Kopalni Soli Wieliczka* z 1960 r. (archiwum Działu Mierniczo-Geologicznego K.S. Wieliczka S.A.).

Fig. 32. A book by Zygmunt Kowalczyk: “Photogrammetric Mapping and Profiling of Mine Workings, on the Example of the “Wieliczka” Salt Mine” (1960, Archives of the Department of Surveying and Geology of the “Wieliczka” Salt Mine).





**Ryc. 33.** Album *Kopalnia Soli Wieliczka* firmowany przez Krakowskie Przedsiębiorstwo Geodezyjne traktujące o zastosowaniu fotogrametrii w pomiarach wyrobisk kopalni (kolekcja J. Przybyły).

**Fig. 33.** The “Wieliczka Salt Mine” album on the use of photogrammetry in the surveying of the Mine’s workings, published by the Kraków Geodetic Enterprise (J. Przybyły’s collection).

w skali 1:50. Powstał też z tej okazji pamiątkowy album. Album jest anonimowy, niedatowany, wydany w czterech językach, ale tak na dobrą sprawę nie bardzo wiadomo dla jakiego odbiorcy przeznaczony (ryc. 33, 34).

Wpis Kopalni „Wieliczka” na listę UNESCO zaowocował między innymi powstaniem w niej Działu Zabezpieczenia Górniczego. Pracownikiem tego działu był fotograf Filip Kalwajtys. Na przełomie lat 70 i 80 mieszane zespoły złożone z pracowników Kopalni i Muzeum prowadziły inwentaryzację zabytkowych wyrobisk. Filip Kalwajtys podczas



**Ryc. 34.** Przykłady zastosowania fotogrametrii w wielkiej kopalni - lata 70. i 80. XX w. (archiwum Działu Mierniczo – Geologicznego K.S. Wieliczka S.A.).

**Fig. 34.** The examples of the use of photogrammetry in the “Wieliczka” Salt Mine (1970’s and 1980’s, Archives of the Department of Surveying and Geology of the “Wieliczka” Salt Mine).

of 1:50. Besides, an album was also published. The book was anonymous and not dated, with texts in four languages. However, it was hard to say who would be the intended readers of that study (Figs. 33 and 34).

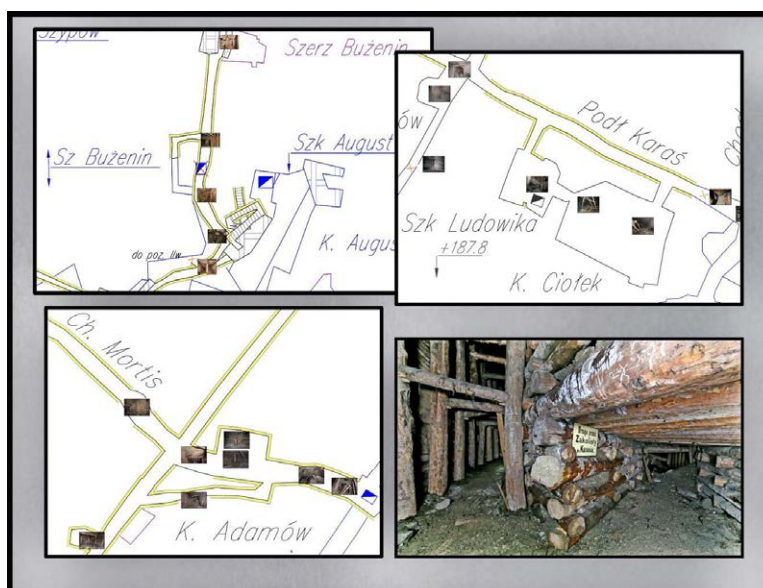
The entry of the “Wieliczka” Salt Mine on the UNESCO List of World Heritage resulted, among others, in the formation of the Mining Safety Department. The Department employed the photographer Filip Kalwajtys. In the late 1970’s and the early 1980’s, mixed professional teams of the Salt Mine and the Museum workers conducted an inventory of



**Ryc. 35.** Wglądówki prac Filipa Kalwajtysa, pracownika Działu Zabezpieczenia Górniczego Kopalni Soli „Wieliczka” będących rezultatem inwentaryzacji zabytkowych wyrobisk przeprowadzonych w latach 70. i 80. XX w. (archiwum Działu Mierniczo-Geologicznego K.S. „Wieliczka” S.A.).

**Fig. 35.** Proofs of the works by Filip Kalwajtys, an employee of the Mining Safety Department of the “Wieliczka” Salt Mine. Documentation of the inventory of underground landmark workings carried out in the 1970’s and 1980’s (Archives of the Department of Surveying and Geology of the “Wieliczka” Salt Mine).





**Ryc. 36.** Wykorzystanie fotografii wykonanych podczas inwentaryzacji wyrobisk wykonywanych w latach 2017 – 2020 do bazy danych GIS (wyk. K. Pamuła, J. Przybyło).

**Fig. 36.** The photographs taken during the inventory of underground workings, carried out in 2017–2020, designed for the GIS database (Designed by K. Pamuła and J. Przybyło).

tych inwentaryzacji wykonał setki dokumentacyjnych zdjęć (ryc. 35). Zdjęcia na potrzeby Muzeum wykonywał Artur Grzybowski. Dokumentatorem kopalni, w szczególności jej turystycznej części i prac górniczych od lat jest Rafał Stachurski. Wiele lat zdjęcia grup turystycznych wykonywał Tadeusz Kordula, także tworząc w ten sposób swoisty społeczny dokument.

Podobne inwentaryzacje, przerwane wybuchem pandemii, zespoły złożone z pracowników Kopalni i Muzeum przeprowadzały w latach 2017-2020. W ich efekcie powstało ponad 3 tysiące zdjęć. Wybrane fotografie z precyzyjnie oznaczoną ich lokalizacją zasilają bazę danych powstającą w systemie GIS z tłem w postaci kartometrycznych map wyrobisk poszczególnych poziomów kopalni (ryc. 36).

Jedną z dyscyplin fotografii, którą próbowano wykorzystać w badaniach naukowych w kopalni Wieliczka była stereoskopia. Zdjęcia stereoskopowe mogą służyć np. do oceny stanu pokrywy krystalicznej Grot Krysztalowych i wychwycenia ewentualnych w niej zmian. Jest to jedna z technik fotogrametrii (stereofotogrametria).

W badaniach naukowych nieocenione przysługi oddaje makrofotografia. Zdjęcia wtórnych soli - „włosów Kingi” w bardzo dużym powiększeniu pozwalają zrozumieć mechanizm ich powstawania, a mikroskopowe powiększenia inkluzji w solnych kryształach dają informacje pomocne w zrozumieniu warunków krystalizacji halitu (ryc. 37, 38).

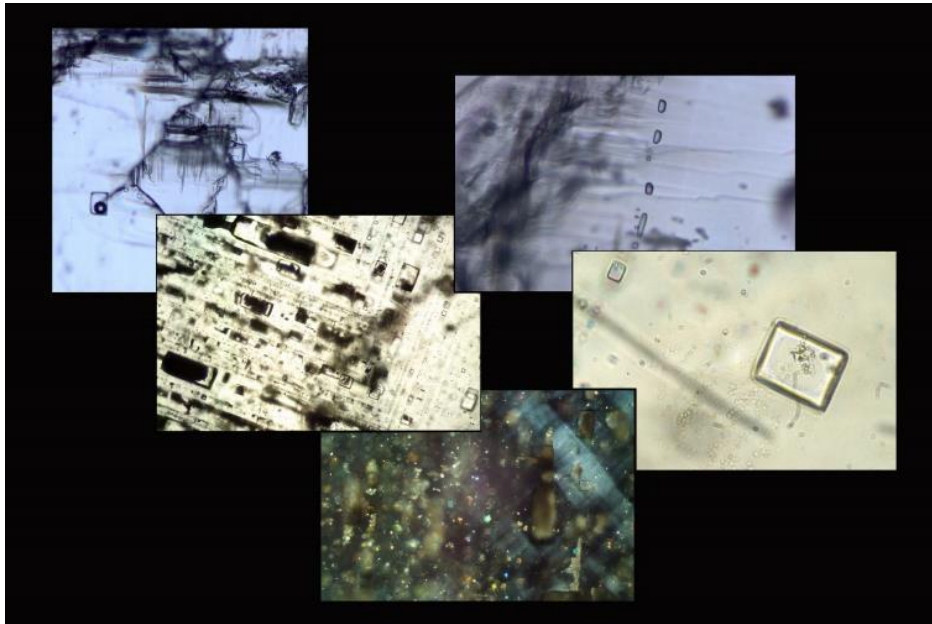
W ostatnich latach w kopalni na dobre zagościła nowa technologia skaningu laserowego. Jest to metoda polegająca na laserowym pomiarze odległości i kąta od punktu o określonych współrzędnych, w którym zlokalizowane jest urzą-

the underground landmark workings of the Salt Mine. Filip Kalwajtys took hundreds of documentary photographs during inventory taking (Fig. 35). Also Artur Grzybowski was taking pictures for the needs of the Museum. Rafał Stachurski was the documentation specialist in the Salt Mine, especially of the tourist route and mining works, for a number of years. Besides, Tadeusz Kordula took photographs of the tourist groups, creating interesting social documentation.

Similar inventory projects, interrupted by the pandemic, were conducted by joint Salt Mine and Museum teams in 2017–2020. As a result, more than 3,000 pictures were collected. Selected photographs, with precisely marked locations, were input into the Geographic Information System (GIS) system database, in the form of cartometric maps of the underground workings situated at particular levels of the Salt Mine (Fig. 36).

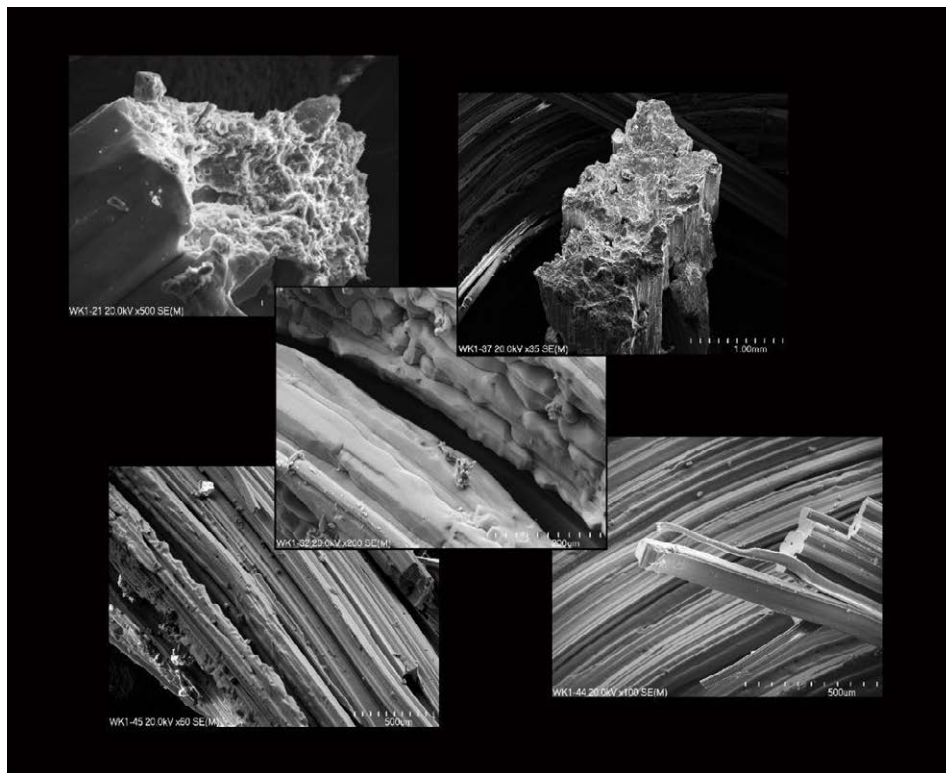
Stereoscopy was one of the photographic methods tested in the research projects conducted in the “Wieliczka” Salt Mine. Stereoscopic photographs can be used for the evaluation of the crystalline coating of the Crystal Grottoes and the identification of transformations within. Stereoscopy is one of the photogrammetric techniques (stereophotogrammetry).

Microphotography is extremely valuable in research. The photographs of the secondary salt formations, called “Kinga’s hair,” are magnified and, in that form, allow analysts for understanding the mechanism of the formation’s origin. Magnification of the microscopic photographs of the inclusions contained in salt crystals provided researchers with the data contributing to the understanding of halite crystallisation conditions (Figs. 37 and 38).



**Ryc. 37.** Makrokosmos – zdjęcia mikroskopowe kryształów pozyskanych z gruzu w Komorze Pośredniej w Grotach Kryształowych (archiwum Działu Mierniczo-Geologicznego K.S. Wieliczka S.A.).

**Fig. 37.** Macrocosm: magnified microscopic photographs of the crystals collected from the salt debris in the Intermediate Chamber of the Crystal Grotto (Archives of the Department of Surveying and Geology of the “Wieliczka” Salt Mine).



**Ryc. 38.** Makrokosmos – zdjęcia mikroskopowe soli wtórnej krystalizacji – „Włosów Kingi” (fot. Z. Sawłowicz).

**Fig. 38.** Macrocosm: magnified microscopic photographs of the secondary crystallisation salt, called “King’s hair” (Photo by Z. Sawłowicz).

dzenie emitujące wiązkę laserową, do obiektu. W wyniku pomiaru powstaje „chmura punktów”, która określa kształt skanowanego obiektu lub przestrzeń wyrobisk kopalni. Różne wartości głębi obrazu z przyporządkowanym odpowied-

In recent years, a new laser scanning technology was introduced to the Salt Mine. It is a method based on laser measurements of distances and angles, from the location of the device emitting laser beams, with the specific coordinates,



**Ryc. 39.** Przykłady wyników współczesnego skaningu laserowego wyrobisk – komory Freitag i oiosu Kaplicy św. Kingi (archiwum Działu Mierniczo – Geologicznego K.S. Wieliczka S.A.).

**Fig. 39.** Examples of the results of modern laser scanning of the Salt Mine’s workings: the Freitag Chamber and a wall in the St. Kinga’s Chapel (Archives of the Department of Surveying and Geology of the “Wieliczka” Salt Mine).

nio kolorem dają obraz podobny do zdjęcia fotograficznego (ryc. 39).

## 8. CO DALEJ Z WIELICKĄ FOTOGRAFIĄ?

Na koniec artykułu pewna refleksja. Przedstawiono w nim zarys dziejów obecności fotografii w Kopalni Soli „Wieliczka”, zarówno w postaci ilustracyjno-pocztówkowo-albumowej jak i mającej zastosowania dydaktyczno-naukowo-techniczne. O ile w tej ostatniej materii na pewno jeszcze przez wiele lat będzie ona obecna, to w tym pierwszym wymiarze budzi niepokój. W ostatnich latach gwałtownie spadła sprzedaż wydawnictw albumowych poświęconych Kopalni. Pocztówek praktycznie już nikt nie wysyła. Aktywność społecznościowa przeniosła się do internetu, a dla większości ludzi fotografia to selfie zrobione smartfonem. Pojawia się pytanie, czy komukolwiek będą jeszcze potrzebne wizerunki wielickich podziemi, tak pieczołowicie niegdyś fotografowanych przez Awita Szuberta, Jana Czerneckiego, Władysława Gargula czy Alfonsa Długosza? Czyżby zbliżał się koniec wielickiej fotografii?

## 9. WNIOSKI

Fotografia zawitała do wielickiej kopalni w 1892 roku, czyli ponad 50 lat po tym, jak w 1839 roku wynalazek fotografii ogłosili niezależnie od siebie Francuz Louis Jacques Mandé Daguerre i Anglik William Henry Fox Talbot. Podstawowym problemem w uwiecznianiu zakamarków kopalni był brak wystarczającego oświetlenia podziemnych wyrobisk. Dopiero wynalezienie w 1859 roku magnezji proszkowej

to the object being measured. The survey gives a collection of a “cloud of points” that defines the shape of the scanned object or the mine workings’ space. Various depth values of the image, with assigned colours, produce an image similar to that of a photograph (Fig. 39).

## 8. THE FUTURE OF PHOTOGRAPHY IN THE WIELICZKA” SALT MINE

Finally, I would like to make a personal comment. My paper presents a history of the presence of photography in the “Wieliczka” Salt Mine, in the aspects of illustration-picture postcard-album and education-research-technology. While the latter aspect is certainly planned to be developed for many years to come, the former one raises my concern. The sales of album publications dedicated to the Salt Mine dropped significantly in recent years. Besides, practically, nobody mails picture postcards any more. Social activities have moved to social media, and selfies taken by smartphones are available to the majority of people. Thus, we can ask if anybody will need the images of the Wieliczka’s underground workings, once so diligently photographed by Awit Szubert, Jan Czernecki, Władysław Gargul or Alfons Długosz. Is the history of the Wieliczka photography coming to an end?

## 9. CONCLUSION

Photography was first introduced to the “Wieliczka” Salt Mine in 1892, or over 50 years after the invention of photography had been independently announced in 1839 by the Frenchman Louis Jacques Mandé Daguerre and the English-



umożliwiło fotografowanie w miejscach, gdzie światło było towarem deficytowym.

Początki fotografii w kopalni związane były z nazwiskami znanych twórców, takich jak Avit Szubert (1837-1919), Jan Czernecki (1871-1955) czy Władysław Gargul (1883-1946). Byli to ludzie wszechstronnie wykształceni o szerokich umysłowych horyzontach i wielorakich zainteresowaniach. Szubert obok fotografii portretowej uwieczniał góry, a zestaw wielickich zdjęć opublikował w wiedeńskim wydawnictwie w postaci albumu heliograwiur. Czernecki z zamiłowania był wydawcą i księgarzem, śmiało można go nazwać mecenasem sztuki. Gargul był zaś człowiekiem niezwykle aktywnym i przedsiębiorczym, przy tym uzdolnionym technicznie wynalazcą. Ci ludzie stworzyli podwaliny wielickiej fotografii, a jednocześnie dzięki ich pracy powstał obraz kopalni z przełomu wieków XIX i XX, a także z pierwszych dekad wieku XX.

Kolejną znaczącą postacią Alfons Długosz (1902-1975). Miał on wykształcenie artystyczne, a jego życiową *idée fixe* stało się uratowanie zabytkowej kopalni. Był twórcą Muzeum Żup Krakowskich. Oprócz gromadzenia eksponatów i okazów skalnych zdobytych podczas podziemnych wędrówek, wykonał wiele zdjęć. Jego fotogramy charakteryzują się dużym kunsztem artystycznym.

Postępujący rozwój turystyki w kopalni wywołał zapotrzebowanie na przewodniki, widokówki i zestawy pamiątkowych fotografii Kopalni Soli wykonywane często przez fotografów o znanych nazwiskach.

W 1976 roku Kopalnia Soli „Wieliczka” została wpisana na Listę Zabytków Województwa Krakowskiego, a następnie w 1978 r. trafiła na Listę Światowego Dziedzictwa Kulturowego i Przyrodniczego UNESCO. Po tych wydarzeniach ukazały się duże wydawnictwa albumowe traktujące o kopalni.

Po 1989 roku, kiedy to w Polsce nastąpiły zmiany ustrojowe i powstała gospodarka wolnorynkowa, znacznie wzrosła liczba publikacji albumowych, przewodników i innych pamiątek, np. kalendarzy. Były one wydawane przez firmę organizującą turystykę w Kopalni Soli oraz przez Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka.

Historia fotografii w wielickiej kopalni miała również swoje praktyczne rozdziały. Fotografie podziemnych korytarzy i komór, górników przy pracy, okazów geologicznych były wykorzystywane do celów edukacyjnych, naukowych. Zastosowanie w podziemnych pomiarach znalazła technika fotogrametrii, zaś w ostatnich latach do Kopalni „Wieliczka” wprowadzono nową technologię skanowania laserowego.

man William Henry Fox Talbot. For a long time, the photographers coped with the problem of the lack of sufficient lighting in underground workings. The invention of flash powder magnesia in 1859 made photography possible in the places where light was a scarce commodity.

The beginnings of photography in the mine were associated with the names of well-known artists, such as Avit Szubert (1837-1919), Jan Czernecki (1871-1955) and Władysław Gargul (1883-1946). They were comprehensively educated people with broad mental horizons and multiple interests. In addition to portrait photography, Szubert immortalized the mountains, and published a set of Wieliczka photos in a Vienna publishing house in the form of an album of heliogravures. Czernecki was a publisher and bookseller by avocation, and could boldly be called a patron of the arts. Gargul, on the other hand, was an extremely active and enterprising man, at the same time a technically gifted inventor. These men laid the foundations of Wieliczka photography, and at the same time, thanks to their work, a picture of the mine from the turn of the 19th and 20th centuries, as well as from the first decades of the 20th century was created.

Another significant figure was Alphonse Długosz (1902-1975). He had a background in art, and his life *idée fixe* became saving the historic mine. He was the founder of the Kraków Saltworks Museum. In addition to collecting artifacts and rock specimens acquired during his underground travels, he took many photographs. His photograms are characterized by great artistry.

The progressive development of tourism at the mine created a demand for guidebooks, postcards and sets of commemorative photographs of the Salt Mine taken often by photographers with well-known names.

In 1976, the Wieliczka Salt Mine was added to the List of Historical Monuments of the Cracow Province, followed in 1978 by its inclusion on the UNESCO World Cultural and Natural Heritage List. These events were followed by large album publications treating the “Wieliczka” Salt Mine.

After 1989, when Poland underwent political changes and a free market economy was established, the number of album publications, guidebooks and other souvenirs, such as calendars, increased significantly. They were published by the company organizing tourism at the Wieliczka Salt Mine and the Kraków Saltworks Museum.

The history of photography in the Wieliczka mine also had its practical chapters. Photographs of underground passages and chambers, miners at work, geological specimens were used for educational, scientific purposes. The technique of photogrammetry found application in underground measurements, while in recent years a new technology of laser scanning was introduced to the Wieliczka Mine.

## LITERATURA/REFERENCES

- DŁUGOSZ A. 1958. Wieliczka. Magnum Sal jako zabytek kultury materialnej. Wydawnictwo Arkady, Warszawa.
- DUDA J. 2010. *Władysław Gargul (1883–1946): fotograf, wynalazca przyrządów fotograficznych, właściciel zakładów fotograficznych w Bochni, Zakopanem, Brzesku, Wieliczce, prezes cechu fotografików w Krakowie*. Biblioteczka Wielicka, 2010.
- GARGUL. W. Bez daty wydania. Saliny Wielickie. Wydawnictwo Salonu Malarzy Polskich w Krakowie.
- GAWROŃSKI W., 2008. Słownik biograficzny Wieliczian, Wieliczka.
- HACKING J., COMPANY D. 2014. Historia Fotografii. Wydawnictwo Arkady.
- JAROSZEWSKI P., HORWATH L. 1993. Kopalnia Soli Wieliczka, Oficyna Wydawnicza Parol, sp. z o.o. PP Kopalnia Soli w Wieliczce.
- JODŁOWSKI A., GRZYBOWSKI A., NĘDZA M., 1991. Wieliczka. Muzeum Żup Krakowskich. Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka.
- JODŁOWSKI A., GRZYBOWSKI A., NĘDZA M., 1999. Wieliczka. Solne dziedzictwo kultury. Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka.
- JODŁOWSKI A., GRZYBOWSKI A., KOSTUŚ L., STACHURSKI R., SULMA M. 2009. Wieliczka. Solne dziedzictwo kultury. Kopalnia Soli „Wieliczka” i Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka.
- JODŁOWSKI A., GRZYBOWSKI A., KOSTUŚ L. 2012. Ze skarbca wielickiego Muzeum. Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka.
- KLIMOWSKI S., HANIK M. 1988. Wieliczka. Siedem wieków polskiej soli. Wydawnictwo Interpress, Warszawa.
- KORDULA T., GĘBUŚ T. Bez daty wydania. Wieliczka – 700 lat Kopalni Soli w Wieliczce. Fortis, Kraków.
- KOWALCZYK Z. 1960. Fotogrametryczne kartowanie i profilowanie wyrobisk górniczych na przykładzie kopalni w Wieliczce. Prace Instytutu Geologicznego, t. XXX, cz. II, Warszawa.
- KUDŁACZ K., 2009. Awit Szubert, krakowski fotograf drugiej połowy XIX wieku, Dagerotyp, nr 18.
- MACIESZA A. 1932. Awit Szubert. Fotograf Polski – miesięcznik ilustrowany. Marzec.
- MASZCZAK M. 2015. Sdzielano w SSSR. Radzieckie aparaty fotograficzne. Muzeum Historii Fotografii w Krakowie.
- MAZUR A. 2003. Fotografia dokumentem przeszłości Wieliczki. *Studia i Materiały do Dziejów Żup Solnych w Polsce, Tom 23*.
- MIKURIYA J.T. 2018. Historia światła. Idea fotografii. Towarzystwo Autorów i Wydawców Prac Naukowych UNIVERSITAS, Kraków.
- NOWAKOWSKIA. 2011. Miasto w soli. Kopalnia Soli w Wieliczce. Towarzystwo Autorów i Wydawców Prac Naukowych UNIVERSITAS, Kraków.
- NOWAKOWSKI A. 2013. Skarb. Kopalnia Soli „Wieliczka”. Towarzystwo Autorów i Wydawców Prac Naukowych UNIVERSITAS, Kraków.
- PIOTROWICZ J. 2001. Nowe wydawnictwa albumowe poświęcone Wieliczce. *Studia i Materiały do Dziejów Żup Solnych w Polsce, Tom 21*.
- PŁAŻEWSKI I. 2011. Dzieje polskiej fotografii. Książka i Wiedza.
- PODLECKI J. 1997. Wieliczka. Zabytkowa kopalnia soli. Wydawnictwo „Karpaty” – Andrzej Łączyński, Kraków.
- PODLECKI J. 1998. Wieliczka. Wydawnictwo „Karpaty” – Andrzej Łączyński, Kraków.
- PRACA BEZ PODANIA AUTORÓW. PRACA BEZ PODANIA DATY WYDANIA. Kopalnia Soli Wieliczka. Krakowskie Przedsiębiorstwo Geodezyjne.
- PRACA ZBIOROWA. 1984. Wieliczka. Solny Skarb. Krajowa Agencja wydawnicza Kraków.
- PRACA ZBIOROWA. 2021. 70 /70. Wystawa jubileuszowa. Katalog. Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka.
- PRITCHARD M. 2017. 50 najsłynniejszych aparatów fotograficznych w historii. Alma-Press.
- PUNTOS J.K. 2008. Puntos. Podziemne miasto. Kopalnia Soli Wieliczka. Kopalnia Soli „Wieliczka” S.A.
- RUSINEK M., RUSINEK M. 1968. Wieliczka. Wydawnictwo Sport i Turystyka, Warszawa.
- SZUBERT A. 1893. Wieliczka. Fotografował z natury A. Szubert. Richard v. Paulussen, Wiedeń.
- TATOMIR R. 2018, Kopalnia Soli wieliczka. Niecodzienny świat soli. Publisher.
- WARNER M. M. 2012. 100 idei, które zmieniły fotografię. TMC Art.



## Sole potasowo-magnezowe – polskie zasoby na tle gospodarki światowej

## Potassium-magnesium salts – Polish deposits in global economy

Marta HODBOD

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

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

Sole potasowo-magnezowe, jako cenne źródło pierwiastka potasu, wykorzystuje się przede wszystkim (w ponad 90%) do produkcji nawozów. Obecnie całe światowe rolnictwo bazuje na nawozach mineralnych, stąd sole potasowo-magnezowe zajmują strategiczną pozycję na rynku surowców. Ponadto surowiec ten stosowany jest w przemyśle szklarskim, spożywczym, kosmetycznym (mydła), farbiarskim, farmaceutycznym, produkcji detergentów i wielu innych.

Złoża soli potasowo-magnezowych powstają w wyniku procesu ewaporacji w zbiornikach z roztworami bogatymi w substancje mineralne. Sedymentacja tych soli następuje zarówno w środowiskach morskich – zatoki, laguny, saliny, jak i w środowiskach lądowych – bezodpływowe zbiorniki jeziorne. Jako najłatwiej rozpuszczalne związki, krystalizują w końcowej fazie pełnego cyklu solnego.

Głównymi minerałami soli potasowo-magnezowych są: sylwin  $\text{KCl}$ , karnalit  $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , polihalit  $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , kizeryt  $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , kainit  $\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , heksahydrat  $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , langbajnit  $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4$ .

Zasadniczo złoża soli potasowych są pierwotne, jednak ich cechy, takie jak plastyczność czy podatność minerałów na przemiany, prowadzą do wtórnych przemian mineralnych pod wpływem procesów diagenetycznych lub/i metamorficznych. W stanie kopalnym większość soli potasowo-magnezowych jest reprezentowana przez takie minerały jak sylwin i karnalit, budujące pierwotne złoża pokładowe. Procesy ich przeobrażeń prowadzą często do powstania soczew, gniazd, żył lub form rozproszonych, zawierających też kizeryt (Czapowski i in., 2020).

Potassium-magnesium salts, as a valuable source of the potassium element, are mainly used (in over 90%) to produce of fertilizers. Currently, the entire world agriculture is based on mineral fertilizers, hence potassium and magnesium salts occupy a strategic position on the raw material market. In addition, this raw material is used in glass, food, cosmetics (soap), dyeing, pharmaceutical, detergent production and many other industries.

Deposits of potassium and magnesium salts are formed as a result of the evaporation process in basins with solutions rich in mineral substances. Sedimentation of these salts occurs both in marine environments - bays, lagoons, salines, and in terrestrial environments - inletless lake reservoirs. As the most soluble compounds, they crystallize in the final phase of the full salt cycle.

The main minerals of potassium and magnesium salts are sylvite  $\text{KCl}$ , carnallite  $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , polyhalite  $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , kieserite  $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , kainite  $\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , hexahydrate  $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , langbeinite  $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4$ .

Basically, the deposits of potassium salts are primary, but their characteristics, such as plasticity or mineral susceptibility to transformation, lead to secondary mineral changes under the influence of diagenetic and/or metamorphic processes. In the fossil state, most potassium-magnesium salts are represented by sylvinite and carnallite, building up the primary bedded deposits. Their alteration processes often lead to the formation of lenses, sockets, veins or dispersed forms, also containing kieserite (Czapowski et al., 2020).



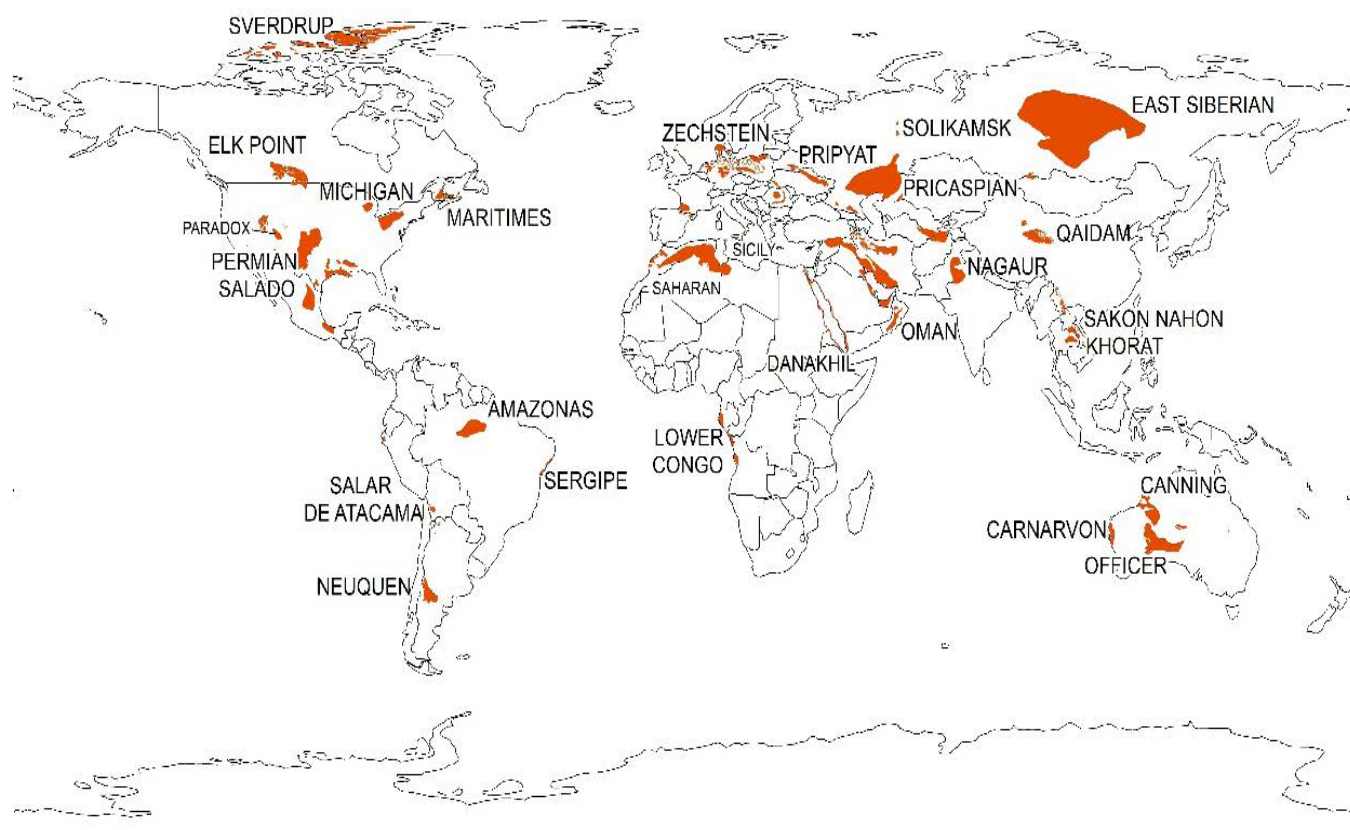
W Polsce sole potasowe i potasowo-magnezowe występują w cechsztyńskiej formacji solnej, która jest częścią ogromnego środkowoeuropejskiego permskiego (cechsztyńskiego) basenu sedymentacyjnego. Udokumentowane sole potasowo-magnezowe występują w wysadzie solnym Kłodawa. Zostały również udokumentowane w pokładowej formacji solnej na Kaszubach, w rejonie Zatoki Puckiej – złoża: Chłapowo, Mioszyno, Swarzewo, Zdrada. Złoża te nie zostały jak dotąd zagospodarowane. Ponadto wystąpienia soli potasowo-magnezowych są znane z większości obszarów występowania cechsztyńskiej soli kamiennej w Polsce. W rejonie Zatoki Puckiej sole występujące w postaci chlorkowej mają charakter pierwotny, a siarczanowe mają genzę infiltracyjną, wczesno diagenetyczną (epigenetyczne), która wynikała z zastępowania pierwotnego siarczanu wapnia przez polihalit (Czapowski, Bukowski, 2013, Czapowski i in., 2020).

Polska posiada stosunkowo duże szacunkowe zasoby perspektywiczne. Sole te są w większości słabo rozpoznane i z reguły występują na dużych głębokościach. Przewidywane (prognostyczne i perspektywiczne) zasoby soli potasowo-magnezowych, obliczone wyłącznie dla złóż pokładowych, oszacowano na 3,64 mld t. Występowanie tych złóż stwierdzono na obszarze monokliny mazursko-podlaskiej, monokliny przedsudeckiej oraz synklinorium północnosudeckiego (peryklina Żar), o łącznej powierzchni ponad 466 km<sup>2</sup> (Czapowski i in., 2020).

In Poland, potassium and potassium-magnesium salts are found in the Zechstein salt formation, part of the vast Central European Permian (Zechstein) sedimentary basin. Documented potassium-magnesium salts occur in the Kłodawa salt dome. They have been documented in the bedded salt formation in Kashubia, in the area of Puck Bay - the Chłapowo, Mioszyno, Swarzewo, Zdrada deposits. These deposits have not been developed so far. In addition, the occurrence of potassium-magnesium salts is known from most areas of the Zechstein rock salt occurrence in Poland. Chloride salts are of primary nature, and sulphate salts have an infiltration, early diagenetic (epigenetic) origin, which resulted from the replacement of primary calcium sulphate by polyhalite (Czapowski, Bukowski, 2013; Czapowski et al., 2020).

Poland has relatively large estimated prospective resources. These salts are mostly poorly known and generally occur at large depths. The predicted (prognostic and prospective) resources of potassium and magnesium salts, calculated only for the bedded deposits, were estimated at 3.64 billion tons. The occurrence of these deposits was found in the area of the Mazurian-Podlasie monocline, the Fore-Sudetic Monocline and the North Sudetic synclinorium (Żary pericline), with a total area of over 466 km<sup>2</sup> (Czapowski et al., 2020).

So far, deposits of potassium and magnesium salts have not been exploited in Poland. In the 20th century it was associated with low profitability of their exploitation - low prices.



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).

Jak dotąd złoża soli potasowo-magnezowych nie były w Polsce eksploatowane. Jeszcze w XX w. wiązało się to z niską opłacalnością ich pozyskiwania - niskie ceny surowca na rynku oraz wysoka podaż z krajów wschodnich, m.in. z Białorusi i Rosji. Stąd zapotrzebowanie na ten surowiec zaspokajał import. Obecnie obserwuje się wzrost zainteresowania złożami soli potasowo-magnezowych, jednak ich zagospodarowanie będzie wymagało lepszego rozpoznania i ponownego oszacowania zasobów (Czapowski, Bukowski, 2013).

Sole kamienne wraz z solami potasowo-magnezowymi są znane są ze wszystkich okresów geologicznych i kontynentów na Ziemi. Największe baseny z sedymentacją tych soli w Ameryce Północnej to: Elk Point, Maritimes, Paradox i Salado, w Europie: cechsztyński, prypecki, Solikamsk i przedkaspijski, w Afryce: Danakil i Dolnego Kongo, w Azji: Morze Martwe, Khorat, Sakon Nakon, Qaidam i baseny centralnej Azji, w Ameryce Południowej: amazoński, Sergipe, Salar de Atacama i Neuquén (Cocker et al., 2016).

Zgodnie z raportem *Mineral Commodity Summaries 2021* (Jasinski, 2021) całkowite zasoby soli potasowych na świecie wynoszą 250 mld t. Z uwagi na niepełne dane trudno oszacować światowe zasoby wydobywalne (*reserves*), jednak wiadomo, że największe z nich znajdują się w Kanadzie, Białorusi, Rosji i USA.

Światowa konsumpcja w 2020 r. utrzymała się na podobnym poziomie, co w latach wcześniejszych i wyniosła około 41 mln t  $K_2O$ . Dzięki zwiększonej produkcji w Kanadzie oraz Rosji, odnotowany został również wzrost światowej produkcji. Wiodącymi regionami konsumenckimi były Azja i Ameryka Południowa, dzięki którym również w 2021 roku spodziewany jest wzrost globalnej konsumpcji (Jasinski, 2021). International Fertilizer Association (IFA) oszacowało, że w 2020 r. produkcja wzrosła o 6% w stosunku do 2019 r. i przekroczyła 70 mln ton  $K_2O$ . Wolumen handlowy osiągnął rekordowy przyrost – z 49 mln ton MOP (KCl) w 2019 r. do 65 mln ton w 2020 r. MOP (KCl). Wpływ na to miał m.in. zwiększony popyt w krajach takich jak USA, Brazylia, Indie czy Chiny, jak również znaczny wzrost produkcji w Rosji i na Białorusi (o 2,3 mln t  $K_2O$  więcej niż w 2019 r.), gdzie uruchomione zostały nowe kopalnie. IFA prognozuje dalsze zwiększanie mocy produkcyjnej nawet o 4,6 mln ton  $K_2O$  w latach 2021-2025, w związku z planowanym uruchomieniem kolejnych projektów potasowych (IFA, 2021).

Czołowymi producentami soli potasowych są: Kanada – 14 mln ton  $K_2O$  w 2020 r., Rosja – 7,6 mln ton  $K_2O$  w 2020 r. i Białoruś – 7,3 mln ton  $K_2O$  w 2020 r. (Jasinski, 2021). Światowy rynek potasu charakteryzuje się stosunkowo niewielką liczbą producentów. Konkurencja uzależniona jest głównie od kosztów produkcji i możliwości logistycznych. Wejście na rynek dla nowych firm nie jest łatwe z uwagi na wysokie koszty inwestycyjne oraz czas niezbędny do rozpoczęcia działalności (pozwolenia, koncesje, budowa kopalni i zakła-

es of the raw material on the market and high supply from eastern countries, including Belarus and Russia. Hence the demand for this raw material was met by imports. At present, there is an increased interest in deposits of potassium and magnesium salts, however, they require better recognition and re-estimation of resources. (Czapowski, Bukowski, 2013).

Rock salts and potassium-magnesium salts are known from all geological periods and continents on Earth. The largest basins with the sedimentation of these salts in North America are: Elk Point, Maritimes, Paradox and Salado. In Europe: Zechstein, Pripyat, Solikamsk and Pricaspian, in Africa: Danakil and Lower Congo, in Asia: Dead Sea, Khorat, SakonNakon, Qaidam and the basins of Central Asia, in South America: Amazonian, Sergipe, Salar de Atacama and Neuquén (Cocker et al., 2016).

According to the report *Mineral Commodity Summaries 2021* (Jasinski, 2021), the total reserves of potassium salts in the world amount to 250 billion tons. Due to incomplete data, it isn't easy to estimate the world's recoverable reserves. However, it is known that the largest of them are in Canada, Belarus, Russia and the USA.

World consumption in 2020 remained at a similar level as in the previous years and amounted to about 41 million tons of  $K_2O$ . Due to increased production in Canada and Russia, an increase in global production was also noted. The leading consumer regions were Asia and South America, thanks to which global consumption is also expected to increase in 2021 (Jasinski, 2021). International Fertilizer Association (IFA) estimated that in 2020 production increased by 6% compared to 2019 and exceeded 70 million tonnes of  $K_2O$ . Trade volume reached a record increase - from 49 million tons of MOP (KCl) in 2019 to 65 million tons in 2020. MOP (KCl). It was influenced, among others, by increased demand in countries such as the USA, Brazil, India and China, as well as a significant increase in production in Russia and Belarus (by 2.3 million tons of  $K_2O$  more than in 2019), where new mines were launched. IFA forecasts a further increase in production capacity by up to 4.6 million tons of  $K_2O$  in 2021-2025, in connection with the planned launch of further potash projects (IFA, 2021).

The leading producers of potassium salts are Canada - 14 million tons of  $K_2O$  in 2020, Russia - 7.6 million tons of  $K_2O$  in 2020 and Belarus - 7.3 million tons of  $K_2O$  in 2020 (Jasinski, 2021). The global potassium market is characterized by a relatively small number of producers. Competition depends mainly on production costs and logistic possibilities. Entering the market is not easy for new companies due to the high investment costs and the time necessary to start operations (permits, concessions, construction of mines and production plants). Currently, the largest competing enterprises are (Fig. 2):

dów produkcyjnych). Obecnie największymi, konkurującymi ze sobą przedsiębiorstwami są (Fig. 2):

**Nutrien** – kanadyjska firma, jest największym na świecie producentem związków potasu (ponad 20 mln ton – 21% możliwości produkcji światowej) w sześciu zakładach/kopalniach potasu w Saskatchewan: Allan Potash, Cory Potash, Lanigan Potash, Patience Lake Potash, Rocanville Potash, Vanscoy Potash. 79% obrotów światowych KCl należy do osiągnięć firmy. Głównymi importerami związków potasu są Brazylia, USA, Chiny oraz Indie (Nutrien, 2019).

**Mosaic** – amerykańska firma, jeden z wiodących na świecie producentów i sprzedawców skoncentrowanych fosforanów oraz soli potasowych. Roczna produkcja związków potasu to 10,5 mln ton (15 % produkcji światowej). Firma posiada 3 kopalnie i zakłady produkcyjne w Kanadzie (Saskatchewan): Belle Plaine, Colonsay i Esterhazy oraz 1 kopalnię w Carlsbad (Nowy Meksyk, USA). Główne kierunki eksportu: Chiny, Indie, Korea Południowa, Brazylia, Wietnam, Malezja, rynek wewnętrzny (USA) i kanadyjski (Mosaic, 2019).

**JSC Belaruskali** – białoruska spółka, jest jednym z największych producentów (15 % produkcji światowej) i eksporterów nawozów potasowych na świecie. Wydobyte opiera się na złożu soli potasowych Starobin, w południowej części obwodu mińskiego na Białorusi. Spółka posiada 6 kopalń oraz 4 zakłady produkcyjne. Drugim, niedawno ustanowionym obszarem jest złożo Petrikovsky (obwód homelski). JSC Belaruskali produkuje głównie nawozy potasowe (87,9%), a także nawozy typu NPK (2,2%) oraz chlorek sodu (NaCl) w postaci technicznej, paszowej i soli kuchennej (9,9%). Eksport odbywa się do Europy, wschodniej Azji, krajów śródziemnomorskich, Afryki, Indii, Chin, Ameryki Południowej i Północnej (<https://kali.by/en>).

**Uralkali** – rosyjska spółka, zajmująca się produkcją związków potasu, głównie MOP oraz karnalitu, a także soli kamiennej (NaCl). Ma znaczący udział (14%) w produkcji światowej soli potasowych. Posiada 5 kopalń (Solikamsk-1, Solikamsk-2, Solikamsk-3, Berezniki-2, Berezniki-4), 6 zakładów obróbki rudy potasu (KCl) oraz 1 zakład obróbki karnalitu, zlokalizowanych w miejscowościach Berezniki i Solikamsk (Kraj Permski, Rosja). Uralkali prowadzi też badania w ramach 4 koncesji poszukiwawczo-rozpoznawczych nowych bloków złoża. Kluczowe rynki eksportu: Brazylia, Indie, Chiny, południowo-wschodnia Azja, USA, Europa (Uralkali, 2019).

**K+S** – niemiecka grupa, jest największym dostawcą produktów solnych na świecie, piątym wśród największych producentów soli potasowych na świecie (udział 7%) i największym dostawcą soli potasowych w zachodniej Euro-

**Nutrien** - a Canadian company, is the world's largest producer of potassium compounds (over 20 million tons - 21% of global production capacity) at six potassium plants/mines in Saskatchewan: Allan Potash, Cory Potash, Lanigan Potash, Patience Lake Potash, Rocanville Potash, Vanscoy Potash. 79% of KCl's global turnover belongs to the company's achievements. The main importers of potassium compounds are Brazil, the USA, China and India (Nutrien, 2019).

**Mosaic** - an American company, one of the world's leading producers and sellers of concentrated phosphates and potassium salts. The annual production of potassium compounds is 10.5 million tonnes (15% of world production). The company has 3 mines and production plants in Canada (Saskatchewan): Belle Plaine, Colonsay and Esterhazy, and 1 mine in Carlsbad (New Mexico, USA). Main export destinations: China, India, South Korea, Brazil, Vietnam, Malaysia, domestic (USA) and Canadian (Mosaic, 2019).

**JSC Belaruskali** - a Belarusian company, is one of the largest producers (15% of world production) and exporters of potash fertilizers in the world. The mining is based on the Starobin potassium salt deposit in the southern part of the Minsk region in Belarus. The company has 6 mines and 4 production plants. The second recently established area is the Petrikovsky field (Gomel region). JSC Belaruskali mainly produces potassium fertilizers (87.9%), as well as NPK fertilizers (2.2%) and sodium chloride (NaCl) in technical, feed and table salt (9.9%) forms. Exports are made to Europe, East Asia, Mediterranean countries, Africa, India, China, South and North America (<https://kali.by/en>).

**Uralkali** - a Russian company dealing in the production of potassium compounds, mainly MOP, and carnallite and rock salt (NaCl). It has a significant share (14%) in the production of the world potassium salt. It has 5 mines (Solikamsk-1, Solikamsk-2, Solikamsk-3, Berezniki-2, Berezniki-4), 6 potassium ore processing plants (KCl) and 1 carnallite processing plant located in Berezniki and Solikamsk (Perm Region, Russia). Uralkali is also researching 4 exploration and appraisal licenses for new deposit blocks. Key export markets: Brazil, India, China, Southeast Asia, USA, Europe (Uralkali, 2019).

**K + S** - the German group, is the largest supplier of salt products in the world, the fifth largest producer of potassium salts in the world (7% share) and the largest supplier of potassium salts in Western Europe. The raw material is obtained in underground and opencast mines, as well as borehole mines and evaporation of sea reservoirs and salines in many regions around the world. Half of the profits of the agricultural segment were generated in Europe. The other key export destinations are the countries of South America (especially Brazil) and Asia (K + S, 2019).

The significant producers of potassium salts also include: QSL (China), ICL (Israel), APC (Jordan), EuroChem (Russia) and SQM (Chile). The remaining companies account for only 10% of the share.

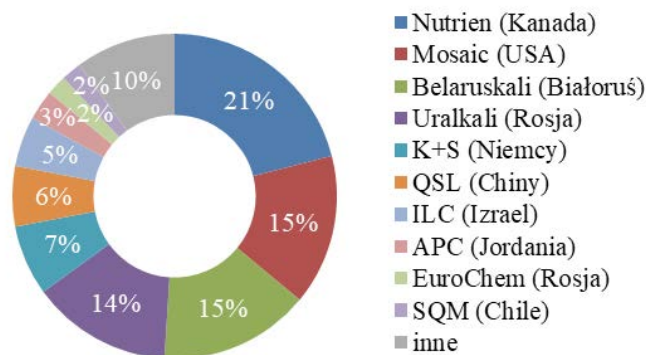


pie. Surowiec pozyskiwany jest w kopalniach podziemnych i odkrywkowych, jak również otworowych oraz ewaporacje zbiorników morskich i salin w wielu regionach na świecie. Połowa zysków segmentu rolniczego została wygenerowana w Europie, pozostałymi kluczowymi kierunkami eksportu są kraje Ameryki Południowej (zwłaszcza Brazylia) oraz Azji (K+S, 2019).

Wśród znaczących producentów soli potasowych można wymienić także: QSL (Chiny), ICL (Izrael), APC (Jordania), EuroChem (Rosja) i SQM (Chile). Pozostałe firmy stanowią zaledwie 10% udziału.

W ciągu ostatnich kilku lat przodującymi krajami w eksporcie produktów potasowych były Kanada, Białoruś i Rosja. Głównymi odbiorcami dostaw były Brazylia, Chiny i USA. (tab. 1, 2). W 2019 r. Polska zajęła 8. miejsce wśród państw importujących (Nutrien, 2020).

W najbliższych latach przewiduje się wzrost importu w krajach Ameryki Południowej i wschodniej Azji. Niektórzy kluczowi konsumenci z południowo-wschodniej Azji wskazują na możliwy wzrost importu w tym regionie, w tym m.in. Indie, Indonezja, Malezja, ale też Afryka (IFA, 2020).



Ryc. 2. Udział poszczególnych producentów soli potasowych na rynku międzynarodowym (ICL, 2021)

Fig. 2. Share of individual producers of potassium salts on the international market (ICL, 2021).

Over the past few years, Canada, Belarus and Russia have been the leading countries in the export of potassium products. The main recipients of supplies were Brazil, China and the USA. (Tab. 1, 2). In 2019, Poland was ranked 8th among importing countries (Nutrien, 2020).

Tab. 1. Zestawienie przodujących krajów w eksporcie KCl w latach 2017–2019 oraz główne kierunki eksportu (Nutrien, 2020).

CAŁKOWITY EKSPORT [tys. ton KCl]					GŁÓWNE KIERUNKI EKSPORTU W 2019 r.		
POZYCJA	PAŃSTWO EKSPORTUJĄCE	2019	2018	2017	1	2	3
1	Kanada	19 236	21 421	18 920	USA	Chiny	Brazylia
2	Białoruś	10 323	10 960	10 508	Chiny	Brazylia	Indie
3	Rosja	9 544	8 622	10 241	Brazylia	Chiny	Indonezja
<b>Razem</b>	<b>top 3</b>	<b>39 103</b>	<b>41 003</b>	<b>39 669</b>			
<b>Razem</b>	<b>świat</b>	<b>49 291</b>	<b>52 323</b>	<b>51 522</b>			

Tab. 2. Zestawienie przodujących krajów w imporcie KCl w latach 2017–2019 oraz główne źródła importu (Nutrien, 2020).

CAŁKOWITY IMPORT [tys. ton KCl]					GŁÓWNE ŹRÓDŁA IMPORTU W 2019 r.		
POZYCJA	PAŃSTWO IMPORTUJĄCE	2019	2018	2017	1	2	3
1	Brazylia	10 201	10 011	9 228	Kanada	Rosja	Białoruś
2	Chiny	8 962	7 409	7 544	Kanada	Rosja	Białoruś
3	USA	7 792	9 109	9 530	Kanada	Białoruś	Rosja
<b>Razem</b>	<b>top 3</b>	<b>26 955</b>	<b>26 529</b>	<b>26 302</b>			
<b>Razem</b>	<b>świat</b>	<b>49 291</b>	<b>52 323</b>	<b>51 522</b>			

**Tab. 1.** List of the leading countries in KCl export in 2017-2019 and the main directions of exports (Nutrien, 2020).

TOTAL EXPORT [thousand tonnes KCL]					MAIN DIRECTIONS OF EXPORT IN 2019		
POSITION	EXPORTING COUNTRY	2019	2018	2017	1	2	3
1	Canada	19 236	21 421	18 920	USA	China	Brasil
2	Belarus	10 323	10 960	10 508	China	Brasil	India
3	Russia	9 544	8 622	10 241	Brasil	China	Indonesia
<b>TOTAL</b>	<b>top 3</b>	<b>39 103</b>	<b>41 003</b>	<b>39 669</b>			
<b>TOTAL</b>	<b>world</b>	<b>49 291</b>	<b>52 323</b>	<b>51 522</b>			

**Tab. 2.** A list of the leading countries in KCl import in 2017-2019 and the main sources of imports (Nutrien, 2020).

TOTAL IMPORT [thousand tonnes KCL]					MAIN DIRECTIONS OF IMPORT IN 2019		
POSITION	IMPORTING COUNTRY	2019	2018	2017	1	2	3
1	Brasil	10 201	10 011	9 228	Canada	Russia	Belarus
2	China	8 962	7 409	7 544	Canada	Russia	Belarus
3	USA	7 792	9 109	9 530	Canada	Belarus	Russia
<b>TOTAL</b>	<b>top 3</b>	<b>26 955</b>	<b>26 529</b>	<b>26 302</b>			
<b>TOTAL</b>	<b>world</b>	<b>49 291</b>	<b>52 323</b>	<b>51 522</b>			

**Słowa kluczowe:** sole potasowo-magnezowe, światowa konsumpcja, wiodący producenci, złoża soli

Imports are expected to increase in South America and East Asia in the coming years. Some key consumers in Southeast Asia indicate a possible increase in imports in the region, including India, Indonesia, Malaysia, but also Africa (IFA, 2020).

**Key words:** potassium-magnesium salts, world consumption, leading producers, deposits

## LITERATURA/REFERENCES

- 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., 2013. Potencjał zasobowy soli kamienniej i soli potasowych w Polsce a perspektywy jego wykorzystania. *Górnictwo Odkrywkowe*, 54, 2: 74 – 84.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K., MAZUREK S., 2020. Sól kamienna (rock salt, salt, halites) i sole potasowo-magnezowe (potashsalts, potassiumsals, 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. <https://kali.by/en>
- ICL, 2019. Annual Report. For the Period Ended December 31, 2020 [www document]. [https://s27.q4cdn.com/112109382/files/doc\\_financials/2020/ar/ICL-Group-Ltd.-final-20F-2020.pdf](https://s27.q4cdn.com/112109382/files/doc_financials/2020/ar/ICL-Group-Ltd.-final-20F-2020.pdf)
- IFA, 2020. Fertilizer Outlook 2020–2024 [www document]. [https://www.fertilizer.org/Public/Stewardship/Publication\\_Detail.aspx?SEQN=6020&PUBKEY=FDB434B2-9E8A-4ABC-A4BE-5F0422F198ED](https://www.fertilizer.org/Public/Stewardship/Publication_Detail.aspx?SEQN=6020&PUBKEY=FDB434B2-9E8A-4ABC-A4BE-5F0422F198ED)
- IFA, 2021. Public Summary Medium-Term Fertilizer Outlook 2021–2025 [www document]. [https://www.fertilizer.org/public/resources/publication\\_detail.aspx?SEQN=6177&PUBKEY=29353BFE-6AEF-4C6C-8DBC-A360A645F491](https://www.fertilizer.org/public/resources/publication_detail.aspx?SEQN=6177&PUBKEY=29353BFE-6AEF-4C6C-8DBC-A360A645F491)
- JASINSKI S. M., 2021. Potash. *W: Mineral commodity summaries 2021*. U.S. Geological Survey: 126–127.
- K+S, 2019. Annual Report [www document]. <http://www.ks-group.com.au/wp-content/uploads/sites/2/2019/10/KS-Corp-Annual-Report-2019.pdf>
- MOSAIC, 2019. Annual Report [www document]. [https://www.annualreports.com/HostedData/AnnualReportArchive/m/NYSE\\_MOS\\_2019.pdf](https://www.annualreports.com/HostedData/AnnualReportArchive/m/NYSE_MOS_2019.pdf)
- NUTRIEN, 2019. Fact Book [www document]. <https://www.nutrien.com/nutrien-fact-book>

- NUTRIEN, 2020. Fact Book [www document]. <https://www.nutrien.com/nutrien-fact-book>
- ORRIS G.J., COCKER M.D., DUNLAP P., WYNN J., SPAN-  
SKI G.T., BRIGGS D.A., GASS L., BLISS J.D., BOLM K.S.,  
YANG C., LIPIN B.R., LUDINGTON S., MILLER R.J.,  
SŁOWAKIEWICZ 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,  
daneprzestrzenie:<http://dx.doi.org/10.3133/sir20105090S>.
- URALKALI, 2019. Proactive, progressive, proud. Annual Report  
[www document]. [https://ar2019.uralkali.com/pdf/Uralkaliy2019\\_EN.pdf](https://ar2019.uralkali.com/pdf/Uralkaliy2019_EN.pdf)





# Monitoring ekologiczny zagrożeń gazowych dla obszarów objętych działalnością związaną z magazynowaniem mieszaniny gazu ziemnego, wodoru i biometanu oraz czystego wodoru

## Ecological monitoring of gas hazards on the areas of mining activities related to the storage of the mixtures of natural gas, hydrogen, and biomethane, or of pure hydrogen

Małgorzata GIEREK<sup>1,2</sup>, Andrzej GARDEŁA<sup>1</sup>, Aleksandra BASIURA<sup>1</sup>, Paulina CYRAN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych „CHEMKOP” Sp. z o.o., ul. Józefa Wybickiego 7, 31-261 Kraków, e-mail: aleksandra.basiura@chemkop.pl, paulina.cyran@chemkop.pl, andrzej.gardela@chemkop.pl, malgorzata.gierek@chemkop.pl

<sup>2</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: gierek@agh.edu.pl

<sup>1</sup> The Research and Development Centre for Mining of Chemical Raw Materials “CHEMKOP” Ltd., Jozefa Wybickiego 7, 31-261 Cracow; e-mail: aleksandra.basiura@chemkop.pl, paulina.cyran@chemkop.pl, andrzej.gardela@chemkop.pl, malgorzata.gierek@chemkop.pl

<sup>2</sup> AGH University of Science and Technology, Faculty of Drilling, Oil and Gas, Av. Mickiewicza 30, 30-059 Cracow; e-mail: gierek@agh.edu.pl

### STRESZCZENIE

Jednym z ważniejszych problemów występujących w procesie podziemnego magazynowania gazu ziemnego jest zapewnienie bezpiecznej eksploatacji tych obiektów. Praktyka światowa wykazuje, że podziemne magazynowanie węglowodorów w kawernach solnych należy do najbezpieczniejszych i jednocześnie najtańszych. Stosowane aktualnie technologie budowy podziemnych magazynów na czysty wodór, gaz ziemny i ciekłe węglowodory gwarantują ich długotrwałą szczelność. Nie można jednak z całkowitą pewnością wykluczyć okoliczności, które mogą prowadzić do powstania chociażby nieznacznych nieszczelności podziemnego magazynu w czasie jego eksploatacji i związanej z tym migracji magazynowanych gazów do geosfery. Okresowe badania geochemiczne mają na celu odpowiednio wczesne zasygnalizowanie anomalii wskazujących na możliwość wystąpienia tego rodzaju awarii oraz podjęcie działań w celu wyjaśnienia jej przyczyn i likwidacji zagrożeń.

**Słowa kluczowe:** Gazy glebowe, gaz ziemny, biometan, wodór, paliwa, monitoring środowiska, ochrona środowiska

### ABSTRACT

One of the most important problems in the process of underground natural gas storage is ensuring a safe operation of storage facilities. World practice shows that the underground storage of hydrocarbons in salt caverns is one of the safest methods and, at the same time, it is the cheapest one. The current technologies used in the construction of pure hydrogen, natural gas, and liquid hydrocarbon storage facilities guarantee long-term tightness of the facilities. However, it is not possible to exclude, with 100% certainty, the occurrence of the circumstances that may lead to even slight leaks in underground storage facilities during their operation followed by the migration of stored gases to the geosphere. Periodic geochemical tests are intended to signal early anomalies indicating the possibility of failure. They are followed by taking action to explain failure causes and eliminating threats.

**Key words:** Soil gases, natural gas, biomethane, hydrogen, fuels, environmental monitoring, environmental protection

## 1. WPROWADZENIE

Jednym z ważniejszych problemów występujących w procesie podziemnego magazynowania gazu ziemnego jest zapewnienie bezpiecznej eksploatacji tych obiektów (Górowska, 2014). Praktyka światowa wykazuje, że podziemne magazynowanie węglowodorów w kawernach solnych należy do najbezpieczniejszych i jednocześnie najtańszych (Gaska i in., 2012). Stosowane aktualnie technologie budowy podziemnych magazynów na wodór, gaz ziemny i ciekłe węglowodory gwarantują ich długotrwałą szczelność (np. Chromik, 2015; Uliasz-Misiak i in., 2016). Nie można jednak z całkowitą pewnością wykluczyć okoliczności, które mogą prowadzić do powstania chociażby nieznacznych nieszczelności podziemnego magazynu w czasie jego eksploatacji i związanej z tym migracji magazynowanych węglowodorów do geosfery. Na powstanie nieszczelności mogą mieć wpływ między innymi takie czynniki jak struktura geologiczna terenu (dyslokacje, strefy szczelinowe), wady uszczelnienia orurowania otworu, korozja rur czy odkształcenia geomechaniczne w strefie stropów komór magazynowych (np. Laskowska i in., 2009; Ślizowski i in., 2011).

Okresowe badania geochemiczne mają na celu odpowiednio wczesne zasygnalizowanie anomalii wskazujących na możliwość wystąpienia tego rodzaju awarii oraz podjęcie działań w celu wyjaśnienia jej przyczyn i likwidacji zagrożeń. W celu określenia zawartości lekkich węglowodorów, wodoru czy biometanu w glebie na kontrolowanym obszarze należy przewidzieć pobór prób powietrza glebowego zarówno z podstawowej sieci punktów pomiarowych obejmującej powierzchnię obszaru magazynowania gazu, jak i zagęszczonej sieci punktów pomiarowych w strefie cementacji głowic oraz miejscach potencjalnych skażeń gleby ropopochodnymi materiałami eksploatacyjnymi.

Migracja wodoru, gazu ziemnego, czy biometanu z magazynu do geosfery powinna zostać w pierwszym rzędzie zauważona w cyklicznych badaniach składu chemicznego próbek gazu pobranych z wyznaczonych punktów pomiarowych. Wykonanie badania tła geochemicznego polegające na określeniu zawartości węglowodorów lekkich w tzw. „gazie wolnym” w przypowierzchniowych warstwach gleby pozwala jednoznacznie oznaczyć i zlokalizować często występujące anomalie. Umożliwia to wyznaczenie oraz podział obszarów o wzmożonej migracji gazów pochodzenia złożowego oraz obszarów, w których występujące anomalie stężenia lekkich węglowodorów związane są z długotrwałymi procesami rozkładu materiałów pochodzenia organicznego.

Wyniki analiz prób pobranych z miejsc wyznaczonych zgodnie z przyjętą „siatką” stanowiąc będą podstawę do porównania z wynikami uzyskanymi zarówno w przeszłości, jak i w toku dalszych regularnych badań próbek powietrza glebowego.

## 1. INTRODUCTION

One of the most important problems in the process of underground natural gas storage is ensuring a safe operation of storage facilities (Górowska 2014). World practice shows that the underground storage of hydrocarbons in salt caverns is one of the safest methods and, at the same time, it is the cheapest one (Gaska et al. 2012). The current technologies used in the construction of pure hydrogen, natural gas, and liquid hydrocarbon storage facilities guarantee their long-term tightness of the facilities (e.g. Chromik 2015; Uliasz-Misiak et al. 2016). However, it is not possible to exclude, with 100% certainty, the occurrence of circumstances that may lead to even slight leaks in the underground storage facilities during their operation followed by the migration of stored gases to the geosphere. Leaks can be caused by such factors as the geological structure (dislocation or fault zones), borehole lining tightness defects, pipe corrosion, or geomechanical deformations in the chamber storage ceilings (e.g. Laskowska et al. 2009; Ślizowski et al. 2011).

Periodic geochemical tests are intended to signal early anomalies indicating the possibility of failure. They are followed by taking action to explain failure causes and eliminating threats. It is necessary to implement soil air sampling, within the basic measurement point network covering the gas storage facility surface area and the dense measurement point network around the borehole head's cementation area and the locations of potential soil pollution with substances of petroleum origin, in order to determine the light hydrocarbon, hydrogen, or biomethane contents in the soil on the site being monitored.

The migrations of hydrogen, natural gas, or biomethane from the underground storage facility to geosphere should be noticed primarily by regular testing of the chemical composition of the gas samples collected from the specific measurement points. Establishment of the geochemical background profile, consisting in the determination of the light hydrocarbon contents in the so-called “free gas” contained in the surface layers of soil, allows for clear determination and identification of anomalies. Consequently, it will be possible to delineate and subdivide the areas of increased gas migrations from the deposit, as well as the areas of anomalous concentrations of light hydrocarbons, associated with the long-term processes of organic matter decomposition.

The results of the analysis of the samples collected from the locations identified within the measurement-point grid will constitute the basis for comparisons with both historical results and those obtained during further regular soil air sample tests.

## 2. PIERWOTNE TŁO GAZOWE - ISTOTA I CEL BADAŃ GEOCHEMICZNYCH

Jednym z ważniejszych problemów występujących w procesie wydobywania gazu ze złóż niezależnie od źródła pochodzenia i stosowanej metody, jest zapewnienie bezpiecznej eksploatacji obszarów i obiektów, na których prowadzone jest wydobycie lub magazynowanie (Pieńkowski, 2009).

W tym celu w pierwszej kolejności wykonuje się oznaczenie pierwotnego tzw. naturalnego, tła gazowego terenu, na którym przewidywane jest magazynowanie gazu. Wyznaczone pierwotne tło gazowe stanowi poziom odniesienia, w oparciu o który, można będzie w przyszłości oceniać czy prowadzona na danym obszarze działalność magazynowa jest bezpieczna i czy nie przyczynia się do skażenia środowiska.

Metoda oznaczania tzw. gazu glebowego (wolnego, międzyziarnowego) określa dynamikę transportu węglowodorów gazowych migrujących na skutek dyfuzji i efuzy od źródła pochodzenia w kierunku powierzchniowych warstw gleby. Badania te polegają na określeniu zawartości węglowodorów lekkich w gazie międzyziarnowym znajdującym się w przypowierzchniowych warstwach gleby. Gazy te z reguły odzwierciedlają skład ich źródła wglębnego. Gaz glebowy wypełnia wolne przestrzenie – pory, pustki i szczeliny gruntu.

## 3. METODA OZNACZENIA GAZU GLEBOWEGO Z POBRANYCH PRÓBEK GLEBY

Polega ona na określeniu zawartości węglowodorów lekkich w gazie glebowym pochodzącym z próbek gleby pobranych z warstw przypowierzchniowych. Próbkę gleby w postaci jednolitego walca, pobierane są przy użyciu penetrometru, z interwału głębokościowego 1,2 – 1,5 m. Próbkę gleby o ściśle ustalonej wadze zamykane są w hermetycznych wialkach o określonej objętości.

Analizę gazu glebowego prowadzi się przy użyciu chromatografu gazowego (GC) wyposażonego w przystawkę Headspace, w której w wyniku desorpcji termicznej następuje uwolnienie gazu międzyziarnowego. Zaletami przedstawionej metody jest zdecydowanie mniejsza ilość pobieranej próbki gleby (ok. 5 - 10 g). Ma to zasadniczy wpływ na szybkość poboru próbek, niższe koszty poboru i transportu oraz możliwość bezpośredniego magazynowania próbki w hermetycznych wialkach analitycznych, które całkowicie zabezpieczają próbkę przed zmiennymi warunkami atmosferycznymi.

Metoda ta cechuje się identycznymi warunkami analitycznymi dla wszystkich oznaczanych próbek, które umożliwiają autosampler wraz z termostatem zainstalowany w przystawce Headspace oraz wysoką precyzję oznaczeń badanych składników.

## 2. ORIGINAL GAS BACKGROUND: THE ESSENCE AND PURPOSE OF GEOCHEMICAL TESTS

One of the most important issues occurring in the process of gas extraction from deposits, regardless of the type of source or methods applied, involves ensuring safe management of the sites and facilities designed for substance extraction or storage (Pieńkowski, 2009).

For that reason, the first step requires to determine the original or the so-called natural gas background of the site designated for gas storage facilities. The original gas background will become a reference level and the basis of future evaluations whether the storage operation is safe on the site or possibly causes environmental pollution.

The determination method of soil air or gas (free gas or intergranular gas) intends to show the transportation dynamics of gaseous hydrocarbons migrating from the source to the soil's surface layers, as a result of diffusion and effusion. The soil air tests are designed to determine the light hydrocarbon contents in intergranular gas contained in the soil's surface layers. Such a gas usually reflects the content of the deep gaseous source. Soil gas penetrates free spaces: pores, voids, or fractures in earth.

## 3. THE METHOD OF DETERMINING SOIL GAS IN SOIL SAMPLES

The method consists in the determination of the light hydrocarbon content in the soil air contained in the soil samples collected from the soil's surface layers. Soil samples are collected in the form of solid cylinders from the depth range of 1.2–1.5 m, with the use of a penetrometer. Soil samples, with a strictly determined weight, are sealed in airtight vials of specific volumes.

Soil gas analysis is conducted with a gas chromatograph (GC), equipped with a headspace piece where intergranular gas is released as a result of thermal desorption. Small quantities of the required soil samples (ca. 5–10 g) are the advantage of that method. This feature allows for fast sampling, low costs of sample collection and transportation, and possibilities of direct sample storage in airtight vials that completely isolate samples from changing weather conditions.

The method is characterised by identical analytical conditions for all samples, owing to the use of an autosampler, with a thermostat installed in the headspace piece, as well as high precision of the component determination.

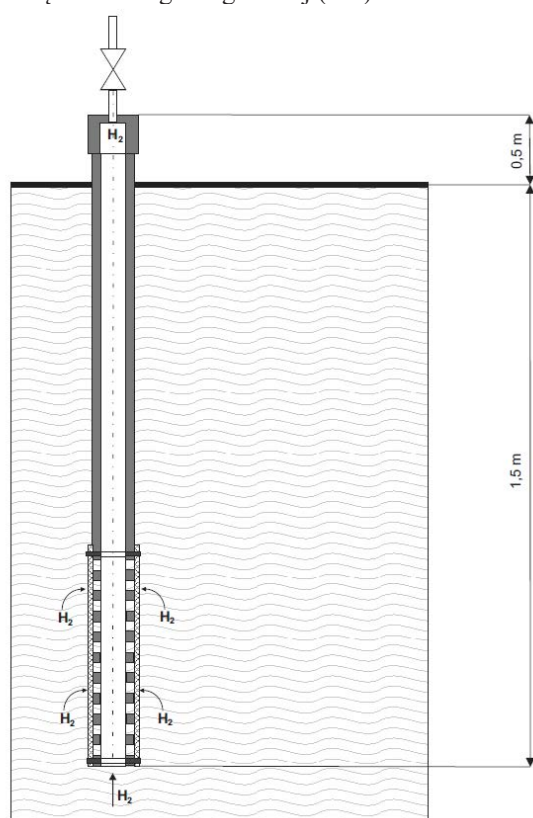
## 4. COLLECTION OF SAMPLES FROM GAS TRAPS (HYDROGEN TRAPS)

The method consists in soil air sample collection from special hydrogen traps (Figs. 1 and 2). It is necessary to dig



#### 4. POBÓR PRÓB Z PUŁAPEK GAZOWYCH (PUŁAPEK WODOROWYCH)

Metoda polega na poborze prób powietrza glebowego ze specjalnie do tego celu wykonanych pułapek wodorowych (Rys. 1, 2). Do ich zainstalowania potrzebne jest wykonanie otworów umożliwiających posadowienie pułapki na odpowiedniej głębokości. Pułapki w dolnej części posiadają perforacje w górnej zaś zagłowiczenie umożliwiające pobieranie próbek badanego medium gazowego. Gaz pobierany jest z pułapek do worków tedlarowych za pomocą aspiratora, zapewniającego pełną izolację gazów z opróbowywanego punktu od wpływów zewnętrznych. Pobór próbek odbywa się w odpowiednich cyklach godzinowych. Próbki gazu analizuje się metodą chromatografii gazowej (GC).

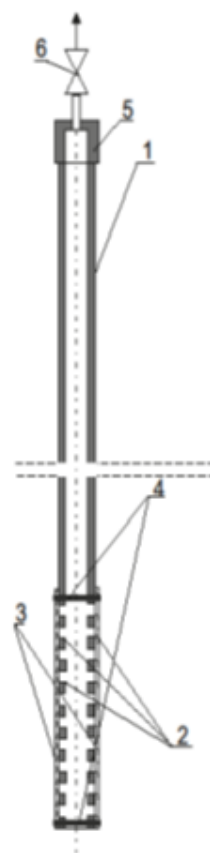


Ryc. 1. Piezometr (pułapka wodorowa) – posadowienie w glebie.  
Fig. 1. Mounting of a piezometer (hydrogen trap) in soil.

#### 5. ANALIZA GAZU GLEBOWEGO DLA OBSZARÓW Z KAWERNOWYMI MAGAZYNAMI CZYSTEGO WODORU LUB MIESZANIN GAZU ZIEMNEGO, WODORU CZY BIOMETANU

Dotychczasowe metody badania szczelności podziemnych magazynów gazu ziemnego i paliw stosowane przez operatorów nie są wystarczające w przypadku magazynowania mieszaniny gazu ziemnego z wodorem, mieszaniny gazu ziemnego z biometanem i wodorem oraz czystego wodoru. Zachodzi tutaj konieczność opracowania nowej metodyki adekwatnej do właściwości magazynowanego medium.

out holes to install such traps at the specific selected depth. A perforated tube is located in the lower section of the trap and a head designed for the collection of the gas medium from the trap on top. Gas is extracted from traps to Tedlar bags, using an aspirator, to ensure complete isolation of sampled gas from external influences. Sampling is conducted in hourly cycles. Gas samples are analysed by the gas chromatography method (GC).



- 1 - rura z tworzywa np. PP
- 2 - część perforowana
- 3 - siatka osłonowa
- 4 - opaski mocujące
- 5 - kołpak
- 6 - zawór gazowy

- 1 - plastic pipe, e.g. made of PP
- 2 - perforated section
- 3 - cover mesh
- 4 - fastening bands
- 5 - hubcap
- 6 - gas valve

Ryc. 2. Piezometr (pułapka wodorowa) – przekrój.  
Fig. 2. Cross-section of the piezometer (hydrogen trap).

#### 5. SOIL GAS ANALYSIS ON THE SITES WITH CAVERN STORAGE FACILITIES FOR PURE HYDROGEN, OR THE MIXTURES OF NATURAL GAS WITH HYDROGEN OR BIOMETHANE

The previously used methods of testing the tightness of underground storage facilities for natural gas or fuels, applied by the facility operators, are found to be inadequate in the storage facilities for the mixtures of natural gas with hydrogen, or natural gas with biomethane and hydrogen, or pure hydrogen. In such cases, it is necessary to design a new method that would comply with the properties of the media being stored.

Owing to the fact that gas mixtures, pure hydrogen or biomethane can be stored in underground caverns, facility tightness is of special importance. There is a high probability that in case of a leak, especially of hydrogen, gas will

Z uwagi na fakt, iż w kawernach magazynowane mogą być mieszaniny gazów, czysty wodór lub biometan, zadanie to nabiera szczególnego znaczenia. Istnieje duże prawdopodobieństwo, że w przypadku ewentualnej ucieczki z magazynu gazu, w szczególności wodoru, będzie on migrował wskutek efuzji i dyfuzji bezpośrednio do atmosfery nie wzbogacając powietrza glebowego. Wynika to z braku właściwości sorpcyjnych wodoru oraz wysokiej przenikalności (Urbańczyk, 2016). Fakt ten w przypadku prowadzenia monitoringu obszarów związanych z magazynowaniem mieszanin gazu ziemnego z wodorem jak i czystego wodoru eliminuje z użycia powszechnie wykorzystywane metody poboru próbek gazu przy użyciu sondy próżniowej a także metody oparte na poborze próbek gleby.

migrate directly to atmosphere, without enriching soil, as a result of effusion and diffusion. That is related to missing sorption properties in hydrogen and high permeability of gas (Urbańczyk 2016). That fact disqualifies the generally used methods of gas sampling, using a vacuum probe, or the methods based on soil sample collection when monitoring the storage sites of the mixtures of natural gas with hydrogen, or pure hydrogen.

#### LITERATURA/REFERENCES

- CHROMIK M. 2015. Możliwości magazynowania energii elektrycznej w soli kamiennej w postaci wodoru w regionie nadbałtyckim. *Przegląd Solny*, 11: 44–50.
- GĄSKA K., HOSZOWSKI A., GMIŃSKI Z., KUREK A. 2012. Monografia podziemnych magazynów gazu w Polsce. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Przemysłu Naftowego i Gazowniczego Oddział Warszawa II, Warszawa.
- GÓROWSKA K. 2014. Kawerna dla wodoru. *Chemia Przemysłowa*, 6: 36–40.
- LASKOWSKA T., SZCZEBYŁO J., GĄSKA K., WILKOSZ P. 2009. Polskie magazyny gazu ziemnego – od Mogilna do Kosakowa. *Przegląd Geologiczny*, 57 (9): 755–756.
- PIEŃKOWSKI G. 2009. Podziemne magazynowanie węglowodorów w kawernach solnych w Polsce – wymiar strategiczny i możliwości poprawy stanu środowiska naturalnego. *Przegląd Geologiczny*, 57 (9): 769–797.
- ŚLIZOWSKI J., URBAŃCZYK K. (red.) 2011. Możliwości magazynowania gazu ziemnego w polskich złożach soli kamiennej w zależności od warunków geologiczno-górnictwowych. Wyd. IGSMiE PAN. Kraków.
- ULIASZ-MISIAK B., PRZYBYCIN A. 2016. Present and future status of the underground space use in Poland. *Environmental Earth Sciences* 75 (22): 1–15.
- URBAŃCZYK K. 2016. Wybrane aspekty termodynamiczne magazynowania wodoru w kawernach solnych. *Przegląd Solny*, 12: 92–97.



# Ograniczenie zagrożenia wodnego w Kopalni Soli „Kłodawa” S.A. poprzez likwidację wyrobisk poza filarem brzeżnym w Polu nr 1 na poz. 600 m

## Reduction of water hazard in the “Kłodawa” S.A. Salt Mine by liquidation of the workings outside the salt dome’s border pillar in Field 1, Level 600 m

Kajetan D’OBYRN<sup>1</sup>, Wacław ANDRUSIKIEWICZ<sup>2</sup>, Katarzyna CYRAN<sup>2</sup>  
Waldemar STASZCZAK<sup>3</sup>

<sup>1</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska  
e-mail: dobyrn@agh.edu.pl

<sup>2</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

<sup>3</sup> Kopalnia Soli „Kłodawa” S.A.

<sup>1</sup> AGH University of Science and Technology, Faculty of Geology,

Geophysics and Environmental Protection, Av. Mickiewicza 30, 30-059 Cracow;

<sup>2</sup> AGH University of Science and Technology, Faculty of Civil Engineering and Resource Management,  
Av. Mickiewicza 30, 30-059 Cracow;

<sup>3</sup> Kłodawa” Salt Mine, Aleja 1000-lecia 2, 62-650 Kłodawa

### STRESZCZENIE:

Ograniczenie zagrożenia wodnego stanowi jeden z priorytetów Kopalni Soli „Kłodawa”. Pole soli kamiennej białej nr 1 zlokalizowane jest wzdłuż wschodniej granicy wysadu. Granice Pola od strony północno-wschodniej stanowi konstrukcyjnie wyznaczona powierzchnia filara brzeżnego, który do poziomu 600 m ma grubość 50 m. Źródłem zagrożenia wodnego przy eksploatacji Pola nr 1 są północno-wschodnia granica wysadu solnego oraz południowo-zachodnia granica Pola.

W artykule przedstawiono metodykę likwidacji wyrobisk chodnikowych w filarze brzeżnym, w których stwierdzono zjawiska wodne. Odpowiedni dobór technologii likwidacji, uzależniony od miejsca występowania zjawisk wodnych ogranicza zagrożenie wodne omawianego rejonu kopalni.

**Słowa kluczowe:** kopalnia soli, zagrożenie wodne, likwidacja wyrobisk

### ABSTRACT

Water hazard reduction is one of the priorities of the “Kłodawa” Salt Mine’s management. White rock salt Field No. 1 is situated along the eastern border of the Kłodawa salt dome. The boundaries of the field on the north-east side are equivalent to the structurally designated area of the peripheral pillar, which is 50 m thick down to the level of 600 m. The source of water hazard during the exploitation of Field No. 1 is situated in the north-eastern boundary of the salt dome and the south-western boundary of the Field. This paper presents a methodology of the liquidation of the salt mine’s workings in the peripheral pillar where water hazard has been identified. Appropriate selection of the mine decommissioning technology, depending on the places of occurrence of water leaks, can reduce the water hazard in the specific areas of the salt mine.

**Keywords:** salt mine, water hazard, liquidation of underground workings



## WSTĘP

Pole soli kamiennej białej nr 1 zlokalizowane jest wzdłuż wschodniej granicy wysadu, na wschód od centralnych sztybów kopalnianych. Długość Pola w rzucie poziomym na poziomie 600 m wynosi ok. 1030 m, a szerokość od 40 do 200 m. Południowo-zachodnią granicę Pola stanowi zredukowana seria potasonośna PZ3 (całkowity brak soli potasowej starszej K2, szarego iłu solnego T3 i anhydrytu głównego A3). Sól budująca pole jest silnie sfałdowana, co szczególnie uwidacznia się w części centralnej. Ponadto na odcinku ok. 400 m występuje pośród starszej soli kamiennej białej seria epigenetycznej soli zanieczyszczonej ropą naftową, silnie zgazowanej, głównie metanem, o zmiennej miąższości dochodzącej do kilkunastu metrów.

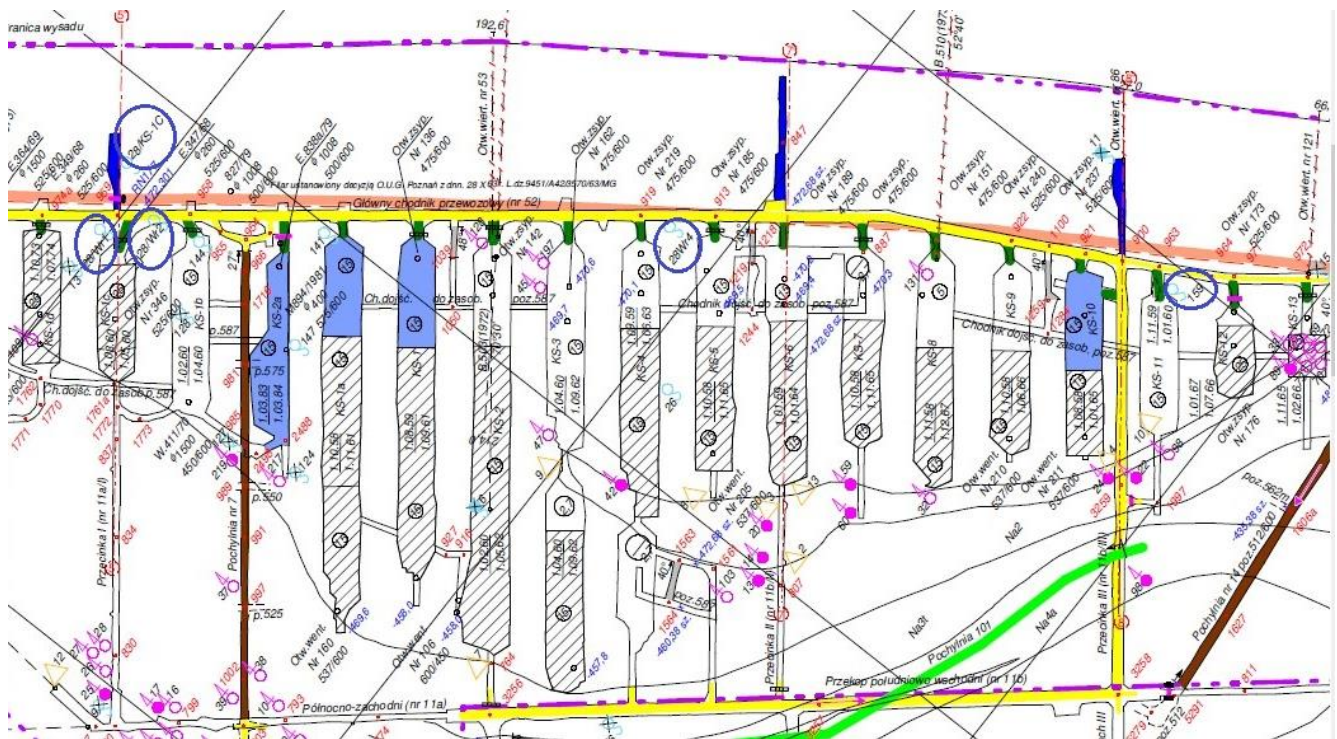
Zagrożenie wodne od strony północno-wschodniej granicy wysadu stwierdza się poziomymi otworami wiertniczymi przewiercającymi filar brzeżny. Wycieki w tej strefie cechuje stosunkowo mała wydajność przy znacznym ciśnieniu, odpowiadającym przeważnie ciśnieniu hydrostatycznemu dla danego poziomu. Wskazuje to na połączenie hydrauliczne tej strefy z wodami pozazłożowymi. Wypływającą cieczą jest nasycona NaCl solanka. Zagrożenie wodne związane z południowo-zachodnią granicą pola ma związek ze szczeliną tektoniczną po wyprasowanych ogniwach serii solnych, z której w pewnych miejscach wystąpiły niewielkie wycieki łągu. Ponieważ fuga ta sięga prawdopodobnie zwierciadła

## INTRODUCTION

White rock salt Field No. 1 is situated along the eastern border of the Kłodawa salt dome, east of the central shafts of the Salt Mine. The length of the Field on horizontal plane reaches ca. 1,030 m and the width is from 40 to 200 m at Level 600. The south-western boundary of the Field is lying on the reduced PZ3 potassium-bearing series, with complete lack of K2 Older Potash, T3 Grey Pelite, or A3 Main Anhydrite units. The Field's salt deposit is strongly folded which is especially visible in the central section of the Field. In addition, white series of epigenetic salt, contaminated with crude oil, strongly saturated with gases, mainly with methane, and with changing thickness reaching a dozen of metres, occurs at the section of ca. 400 m, among the Older Halite deposits.

Water hazard occurring on the north-eastern boundary of the Field was identified upon drilling horizontal boreholes cutting through the boundary pillar. Leaks occurring in that zone were characterised by a fairly low volumes at significant pressure, corresponding mostly to the hydrostatic pressure of the given salt mine level. That would indicate that there was a hydraulic connection of the zone with the waters situated outside the salt dome. The leaking liquid consisted of brine saturated with NaCl.

Water hazard existing at the south-western boundary of the Field was associated with a tectonic crack running along the compressed salt series. Brine was leaking from the crack



Ryc. 1. Wycinek mapy poziomu 600 Pole 1 z zaznaczeniem trzech chodników przeznaczonych do likwidacji. Niebieskimi kółkami zaznaczono najważniejsze wycieki.

Fig. 1. Extract from the map of Field No. 1, Level 600, with marked three corridors intended for liquidation. Blue circles indicate the largest leaks.

solnego, unika się częstego przebijania jej wyrobiskami górnymi.

Zarówno w samym złożu Kopalni Soli „Kłodawa” S.A. jak i w jego otoczeniu nie występują zbiorniki wodne zagrażające bezpieczeństwu ruchu zakładu górniczego. W rejonie projektowanych robót górniczych w Polu nr 1 w przeszłości miały miejsce wycieki i wypływy. Istnieje ryzyko, że w trakcie prowadzenia robót górniczych może dojść do połączeń hydraulicznych z już istniejącymi zjawiskami zagrożenia wodnego. W związku z powyższym istnieje prawdopodobieństwo wystąpienia nowych lub powiększenia strefy wpływu już istniejących zjawisk zagrożenia wodnego.

Przewidziane do likwidacji wyrobiska usytuowane są w południowo-wschodnim rejonie obszaru górniczego i północno-wschodniej części Pola nr 1 na poz. 600. Znajdują się w strefie zidentyfikowanych zagrożeń naturalnych – zagrożenia wodnego, metanowego oraz wyrzutami gazów i skał. Wyrobiska korytarzowe wykonane w filarze brzeżnym pokazano na Ryc. 1. Długość tych wyrobisk wynosi odpowiednio: Chodnik KS-1c – 31,0 mb, Chodnik KS-6 – 54,1 mb, Przećinka III – 38,9 mb.

#### BUDOWA GEOLOGICZNA REJONU WYROBISK PRZEZNACZONYCH DO LIKWIDACJI

W wysadzie kłodawskim warstwy soli kamiennej występują we wszystkich czterech cyklotemach: sole najstarsze w cyklotemie PZ1, sole starsze w cyklotemie PZ2, sole młodsze w cyklotemie PZ3 i sole najmłodsze w cyklotemie PZ4. Przedmiotem eksploatacji są głównie sole starsze (Na2) i sole najmłodsze (Na4).

W Polu nr 1 przedmiotem eksploatacji były sole starsze (Na2). Starsza sól kamienna (Na2) jest to sól średnio- i gruboziarnista, biała oraz biała z szarym odcieniem. Występuje jako kompleks ławic o miąższości około 300 m i tworzy w złożu kłodawskim największe, dość jednorodne skupienia. W najbardziej typowym wykształceniu charakteryzuje się występowaniem szarych smug. Wzdłuż północno-wschodniej granicy wysadu, gdzie zalegają wyższe ogniwa stratygraficzne tego kompleksu, sole starsze zawierają średnio ok. 97,5% NaCl. W obrębie północno-wschodniej antykliny brzeżnej, na poziomach 600 i 630, przeważają sole laminowane różnokrystaliczne, od drobno- do grubokrystalicznych, z soczewami, żyłami i warstwami soli wielokrystalicznej (kryształowej) wtórnej. Brzegi tych żył i warstw są często wzbogacone w piasek anhydrytowy i bituminy. Na poziomie 750 opisywane ogniwo soli kamiennej jest bardziej jednorodne, pomimo spękań i przefaldowań. Dominuje typ soli równo- i różnokrystalicznej, średnio- i grubokrystalicznej, regularnie laminowanej. W południowo-zachodnich partiach wysadu zawartość NaCl nieznacznie obniża się do około 94,0-96,5%. W obrębie południowo-zachodniego antykli-

in some locations. Since the crack probably reached the salt mirror level, the miners avoid frequent cutting through the salt mirror with mining corridors.

No aquifers that would present hazard to mining safety existed within the salt deposit of the “Kłodawa” S.A. Salt Mine or in its surroundings. In the past, however, leaks and outflows had appeared in the areas of the newly designed mining operations in Field No. 1. There is risk that hydraulic connections can appear in the presently existing water-hazard areas during new mining works. Consequently, it is quite probable that new or expanded leaks may appear in that area.

The underground workings that are planned to be liquidated are situated in the south-eastern area of the mining operations and north-eastern section of Field No. 1 at Level 600. Such workings occur within the zone of identified natural hazards presented by water and methane and gas and rock bursts. The corridor workings cut within the boundary pillar are shown in Fig. 1. The length of those workings is the following: Corridor KS-1c: 31.0 m, Corridor KS-6: 54.1 m, and Cross-cut III: 38.9 m.

#### GEOLOGICAL STRUCTURE IN THE AREA OF THE WORKINGS INTENDED FOR LIQUIDATION

Rock salt beds belonging to all four cyclothems occur in the Kłodawa salt dome salts of: PZ1, PZ2, PZ3 and PZ4 cyclothems. Mainly Older Halite (Na2) and the Youngest Halite (Na4) are extracted by the Kłodawa Salt Mine.

Older Halite (Na2) were extracted in Field No. 1. This salt (Na2) is medium- or coarse-grained, white or white-greyish. Such salts occur as a bedded complex, with the thickness of ca. 300 m, creating the largest and fairly uniform salt concentrations in the Kłodawa deposit. The most typical formation is characterised by the occurrence of grey streaks.

Along the north-eastern boundary of the salt dome, where higher stratigraphic sequences occur in that complex, Older Halite unit contain ca. 97.5% of NaCl on the average. Within the north-eastern border anticline, at Levels 600 and 630, laminated salts with various grain sizes dominate, from fine- to coarse-grained crystalline salts, with lenses, veins, and beds of large-size crystalline secondary formations. The borders of those veins and layers are often mixed with anhydrite sand and bitumens.

The above described rock salt formation is more uniform, despite cracking and folding, at Level 750. Even-grained and diverse-grained crystalline, medium- and coarse-grained crystalline regularly laminated salts dominate.

In the south-western sections of the salt dome, the NaCl content is slightly reduced down to 94.0–96.5%. Within the south-western border anticlinorium, at Level 600, The Older Halite are white or grey, semi-transparent, with even-grain crystalline or mostly coarse- and medium-grain crystalline



rium brzeżnego, na poziomie 600, sól starsza jest biała i szara, półprzezroczysta o strukturze równokrystalicznej, przeważnie grubo- i średniokrystalicznej. W południowym skrzydle antyklinorium dominuje typ soli laminowanej, określanej też jako „smugowana”, której główną cechą jest regularne występowanie równoległych ciemnych lamin anhydrytu o grubości do 4 mm.

Główne zanieczyszczenie w soli starszej stanowi anhydryt, występujący w formie rozproszonych drobnych ziaren oraz kwarc, węglany (kalcyt, magnezyt) i minerały ilaste. W wyższych partiach kompleksu występują śladowe ilości soli potasowych.

W rejonie przewidzianych do likwidacji wyrobisk dość dokładnie rozpoznano budowę geologiczną wysadu i nie stwierdzono zaburzeń geologicznych.

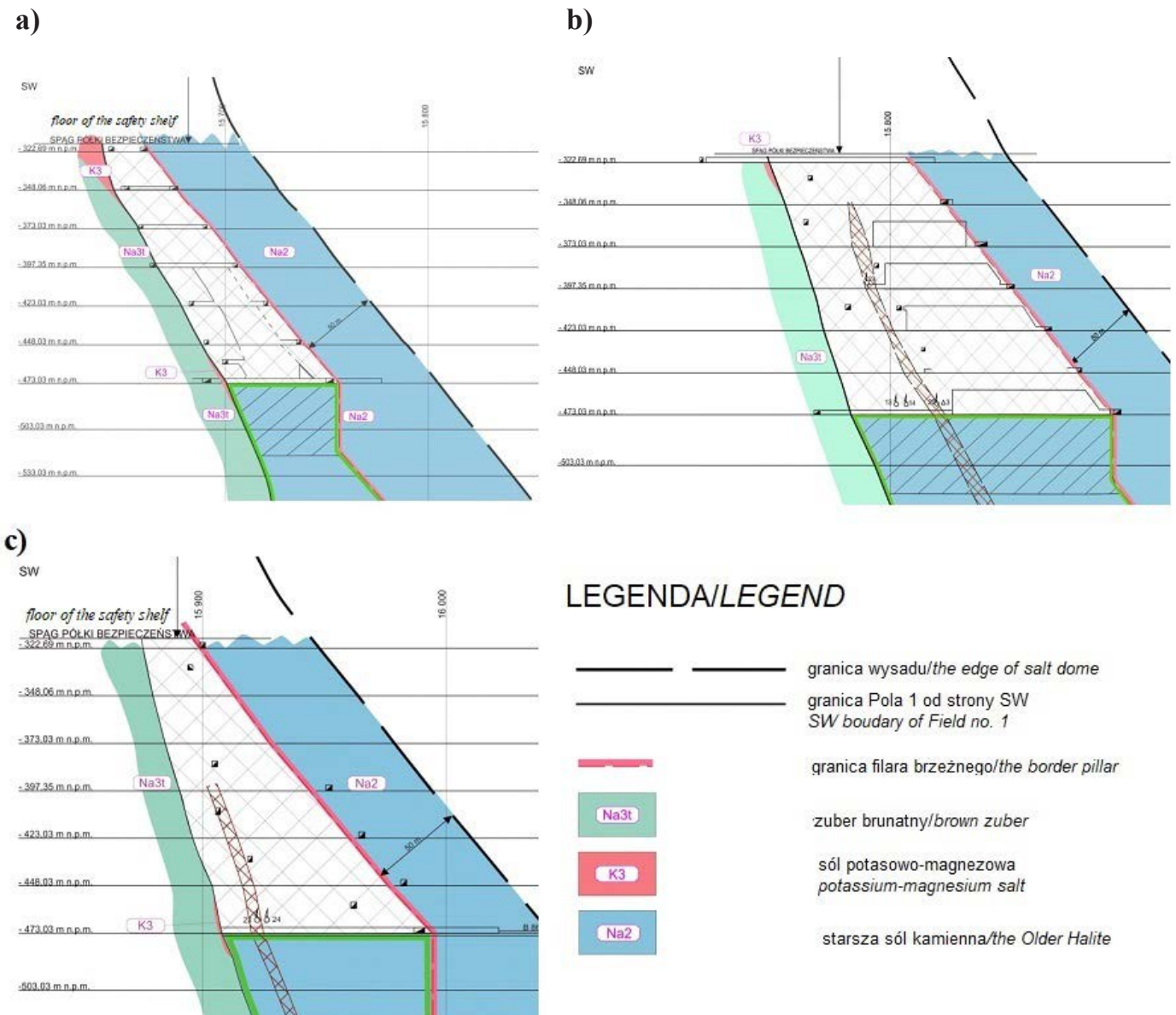
structure. The southern wing of the anticlinorium is dominated by laminated salts, called “streaked salts” where regular parallel dark anhydrite laminas, up to 4 mm thick each, are the main features.

Anhydrite is the dominating pollutant of Older Halite, occurring in the form of spread small grains, together with quartz, carbonates (calcite and magnesite) and silt minerals. Trace quantities of potassium salts appear in higher beds of the salt rock complex.

The geological structure of the salt dome has been well recognised in the area of the intended liquidation of mine workings and no geological disturbances were found.

Geological cross-sections of the area of the intended liquidation of mine workings are shown in Fig. 2.

*SPĄG PÓLKI BEZPIECZEŃSTWA*: floor of the safety shelf; *granica wysadu*: salt dome boundary; *granica pola 1 od*



**Ryc. 2.** Przekroje geologiczne: a) chodnik KS-1c, b) chodnik KS-6, c) Przecinka III.  
**Fig. 2.** Geological cross-sections: a) Corridor KS-1c, b) Corridor KS-6, c) Cross-cut III.



Przekroje geologiczne obejmujące rejon likwidowanych wyrobisk pokazano na Ryc. 2.

### WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE

W związku z zaliczeniem złoża „Kłodawa 1” (Bezkorowajny i in. 2013) wraz z przyległymi wyrobiskami górnymi oraz otaczającym górotworem w granicach obszaru górniczego do III stopnia zagrożenia wodnego, Kopalnia jest zobowiązana do stosowania zabezpieczeń w zakresie:

- Wyznaczania i pozostawiania filarów bezpieczeństwa:
  - stropowej półki bezpieczeństwa nad złożem o grubości 200 m,
  - filara brzeżnego o grubości 50 m do poziomu 600 oraz 75 m od poziomu 600 do 810,
  - filarów od warstwy o dużym prawdopodobieństwie zawodnienia – 30 m od granicy anhydrytu głównego.
- Prognozowania oraz monitoringu istniejących zjawisk wodnych obejmujących:
  - analizy chemiczne,
  - pomiary wydajności wypływu wód,
  - badania izotopowe – w przypadku uznania wycieku lub wypływu przez służbę geologiczną za potencjalnie niebezpieczny,
  - systematyczne analizy porównawcze uwzględniające warunki geologiczno-górnice,
  - systematyczne obserwacje zjawisk zagrożenia wodnego,
- Systematycznych pomiarów osiadań powierzchni terenu oraz konwergencji połączonej z bieżącą kontrolą wyrobisk, przy wsparciu jednostek naukowo-badawczych,
- Stosowania środków zapobiegawczych w postaci budowy tam wodnych w sytuacji wystąpienia dużego dopływu do/z likwidowanych wyrobisk.

Z uwagi na skomplikowaną sytuację hydrogeologiczną w rejonie likwidowanych wyrobisk, została ona szczegółowo przeanalizowana pod kątem prac likwidacyjnych. Dla kopalni najgroźniejsze są niżej opisane zjawiska, zagrażające bezpieczeństwu prowadzenia planowanych robót likwidacyjnych w tej części zakładu górniczego:

Zjawisko 28/KS-1c (Ryc. 1) - Największe dopływy do rzepi, rzędu kilku cm, od momentu ostatniego wybierania, zaobserwowano tradycyjnie dla wrębów KS-1c oraz KS-11, które są zarazem największymi wrębami, i z których solankę dotychczas pobierano regularnie. W I i II kwartale 2021 roku wybrano wodę z rejonu Pola nr 1 uzyskując około 1 200 l solanki (ok. 200 l/miesiąc). W pozostałych wrębach Wr1, Wr2, Wr3 i Wr4 nie ma możliwości odczytania poziomu solanki z uwagi na przeprowadzone prace związane ze stosowaniem środków uszczelniających do iniekcji górotworu oraz robotami górnymi. Do czasu zakończenia prac górniczych, we wrębach Wr1, Wr2, Wr3 oraz Wr4 są prowadzone obserwacje

*strony SW*: boundary of Field No. 1 from the SW side; *granica filara brzeżnego*: boundary of border pillar; *zuber brunatny*: Brown Zuber; *sól potasowo-magnezowa*: potassium-magnesium salt; *starsza sól kamienna, biała*: white Older Halite

### HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS

The “Kłodawa 1” salt deposit has been determined to belong to Water Hazard Area III, together with the adjacent mine workings and the surrounding rock mass situated within the mining area (Bezkorowajny et al. 2013). Consequently, the Salt Mine is obligated to implement the following types of protective measures:

- Determination of and keeping safety pillars:
  - ceiling protection shelf above the salt deposit, 200 m thick,
  - border pillars, 50 m high down to Level 600 and 75 m high between Levels 600 and 810,
  - pillars reaching from the layer of a high probability of flooding, 30 m away from the main anhydrite boundary.
- Prediction and monitoring of the current water events, including the following:
  - chemical analysis,
  - water outflow volumes,
  - isotopic examinations, once a leak or outflow has been recognised as potentially dangerous by the mine’s engineers,
  - regular comparative analyses taking into account geological and mining conditions,
  - regular observations of water hazards.
- Taking regular measurements of land surface subsidence and of workings’ convergence, in conjunction with regular inspections of mine workings, with the support of scientific and research workers.
- Application of preventive measures, in the form of water dams, in the case of the occurrence of large inflows or outflows in the workings to be liquidated.

Owing to the complex hydrogeological situation in the area of the workings to be liquidated, the situation was analysed in detail, in respect of the future liquidation works. The events described below are the most dangerous for the Salt Mine, as they can threaten the safety of the planned liquidation works in the specific section of the Salt Mine.

Event 28/KS-1c (Fig. 3). The largest inflows to sumps of several cubic cm each, after the previous brine collection, were observed in Corridors KS-1c and KS-11, being the largest ones, from which brine had been collected regularly. In Q1 and Q2 of 2021, brine was collected from the area of Field No. 1: ca. 1,200 l of brine (ca. 200 l/month). In the other underground Faces Wr1, Wr2, Wr3, and Wr4, it

pośrednie. Poziom odniesienia solanki jest niższy od potencjalnego punktu składowania pulpy. Potwierdzają to również badania chemiczne (próbek pobranych do czerwca 2021 r.), a zwłaszcza gęstość i pH prób solanek pobieranych do analizy. Pod względem chemicznym stężenie chlorków potasu wynosi od 29 do ok. 33,7 g/l, zaś chlorku wapnia od 40,5 do ok. 43,0 g/l, stężenie chlorków sodu wynosi od ok. 160 g/l do ok. 170 g/l – średnio 164,2 g/l. Natomiast ciężar właściwy pobieranych prób mieści się w zakresie od 1,225 do 1,248 g/cm<sup>3</sup>. Wszystkie powyższe wycieki posiadają przewagę kationów jednowartościowych nad dwuwartościowymi. Pierwsze cztery znajdują się w strefie przepływu powietrza, piąty (KS-1c) – w odległości ok. 30 m od strefy aktywnego przepływu powietrza. Solanki o podanym typie mineralizacji mogą w takich warunkach podlegać procesowi parowania, który powoduje odejście składu izotopowego wody od Światowej Linii Wód Meteorycznych. Uzyskane wyniki badań izotopowych wykonanych w 2020 r. z wrębu nr 3 i 4 są zbliżone do otrzymanych w 2016 r. – tzn. wody technologiczne zmieszane z innymi wodami nieokreślonego pochodzenia. Z izotopowego punktu widzenia może to być silnie odparowana woda spoza wysadu (aczkolwiek ostatni wynik skłania do złagodzenia takiej hipotezy). Nie można wykluczyć także technologicznego pochodzenia tej wody (Duliński i in., 2019).

Zjawisko 28/600/W3 - Skład izotopowy wody z tego zjawiska budzi od lat pewne wątpliwości co do swojej genezy (Duliński i in., 2019). Obecne wyniki nie odbiegają pod tym względem od wcześniejszych. Zarówno wartości składu izotopowego jak i jego zmienność czasowa sugerują możliwe warianty genetyczne wody:

- obserwowane wartości stanowią efekt silnego odparowania wody infiltracji czwartorzędowej – pesymistyczny wariant, którego jednak nie można wykluczyć z uwagi na nakładanie się trzech czynników: stosunkowo wysokiej temperatury i niskiej wilgotności atmosfery kopalni oraz mineralizacji zdominowanej przez jony jednowartościowe, co dodatkowo sprzyja parowaniu. Solanki o podobnej mineralizacji mogą w wyniku parowania do swobodnej atmosfery tracić nawet ponad 2/3 wyjściowej masy wody, wytrącając przy tym sól. Taki ubytek wody powinien skutkować dużą modyfikacją pierwotnego składu izotopowego. Jednakże do czasu wykonania odpowiednich pomiarów nie wiadomo jak duży może być izotopowy efekt parowania w warunkach kopalni.
- skład izotopowy jest rezultatem mieszania wody z pulpy z jakąś wodą technologiczną – wydaje się mniej prawdopodobne z uwagi na wiek pulpy i związaną z nim ilość odsączonej wody,
- badana woda jest całkowicie technologicznego pochodzenia.

Zgodnie z prowadzoną dokumentacją mierniczo-geologiczną zjawiska w chodnikach naprzeciw komór KS-6 i Prze-

was not possible to identify the brine level, because insulation works were conducted there, in the form of rock-mass injection, as well as regular mining operations. Until the mining operations have been completed, Faces Wr1, Wr2, Wr3, and Wr4 will be inspected by indirect observations. The brine reference level is lower than the potential point of pulp storage (pulp: rock salt process waste is deposited in the underground chambers in the form of pulp). That was also confirmed by chemical tests on the samples collected until June 2021, especially to obtain densities and pH values of the brine samples collected there. In chemical terms, the concentration of potassium chlorides ranged from 29 to ca. 33.7 g/l, and that of calcium chloride from 40.5 to ca. 43.0 g/l. The concentration of sodium chlorides ranged from ca. 160 g/l to ca. 170 g/l, or 164.2 g/l on the average. However, the specific gravity of the brine samples ranged from 1.225 to 1.248 g/cm<sup>3</sup>.

All the leaks discussed above were dominated by univalent cations over the bivalent ones. The first four leaks were situated in the air-flow zone, while the fifth one (KS-1c) ca. 30 m from the active air-flow zone. The brines of the above specified type of mineralisation rates can be susceptible to evaporation that causes deviation of the isotopic composition of water from the parameters of the Global Meteoric Water Line. The results of isotopic tests completed in 2020, using the samples from Faces No. 3 and 4, were similar to those obtained in 2016, which allows us to conclude that process waters were mixed with other waters of unknown origin. In isotopic terms, it could be strongly evaporated water arriving from the outside of the salt dome (although the most recent test result would rather reduce such a hypothesis). One may not exclude, however, that the water originated from the mining process [Duliński et al. 2019].

Event 28/600/W3. The isotopic composition of water belonging to that event has raised certain doubts in recent years as to the origin of the water [Duliński et al. 2019]. Recent results do not differ much from the previous ones. Both isotopic composition values and changes of the values in time suggest several genetic variants of water:

- The observed values are the results of strong infiltrating Quaternary water evaporation, which is a pessimistic option, although it cannot be excluded, owing to the three concurrent conditions: a relatively high temperature, low air humidity in the salt mine, and the mineralisation rate dominated by univalent ions, which additionally cause increase of evaporation. As a result of evaporation to air, the brines of similar mineralisation rates can lose even more than 2/3 of original water mass, with salt precipitation. Such water loss should result in a considerable modification of the original isotopic composition. However, it is not known how large can be the isotopic effect of evapora-

cinki III (nr 11b/III) do ok. 2010 roku były obserwowane jako niewielkie kałuże i zawilgocenia. Z biegiem lat poziom solanki w rejonie występowania zjawisk zagrożenia wodnego nieznacznie się obniżył. Dziś, w związku z konwergencją wyrobisk i jednocześnie uniemożliwieniem dojścia ww. rejonie (naprzeciw komór KS-6 i Przecinki III (nr 11b/III)) prowadzi się częściowo obserwacje pośrednie. Dotychczasowe (z ostatnich 10 lat) jak i bieżące obserwacje nie wykazały i nie wykazują znamion zjawiska aktywnego. Solanka ówczesnie zgromadzona skryształizowała w spągu likwidowanych chodników. Jednocześnie nie wykluczone jest występowanie niewielkich zawilgoczeń w końcowych odcinkach ww. wyrobisk.

Analizując skład chemiczny i izotopowy poszczególnych zjawisk wodnych należy brać pod uwagę fakt wypełniania niektórych komór (Ryc. 1) odpadami technologicznymi soli, składowanymi w tych komorach w postaci pulpy.

Ciecze pochodzące z wycieków w wyrobiskach, jeżeli spełniają odpowiednie wymagania dotyczące ich składu chemicznego, są wykorzystywane jako płuczka dołowych otworów wiertniczych.

#### METODA OGRANICZENIA ZAGROŻENIA WODNEGO

Z uwagi na czynne zjawisko wodne/solankowe w chodniku nie ma możliwości jego pełnej likwidacji, przynajmniej do czasu stabilnego samozaniku zjawiska. Ze względu na specyfikę zjawisk wodnych w górotworze solnym, budowa klasycznej tamy betonowej jest nieuzasadniona, w szczególności biorąc pod uwagę wielkość dopływu do wrębu oraz zachowanie bieżącej jego kontroli.

W związku z istnieniem czynnego zjawiska wodnego 28/KS-1c projektuje się wykonanie przytamtki o wysokości ok. 90 cm wykonanej z belek drewnianych, przez którą zostanie przeprowadzony rurociąg  $\varnothing 50$  mm, umożliwiający wypompowanie solanki z rząpika w Chodniku KS-1c bez konieczności wchodzenia do wyrobiska (Motyka i in. 2021). Końcówka rurociągu zaopatrzona w kosz ssawny zostanie umieszczona w rząpiu, a następnie przechodząc przez przytamtę zostanie podłączona do pompy umożliwiającej odpompowywanie solanki. W przypadku zwiększonego dopływu do wrębu przewiduje się wykonanie drugiej, analogicznej przytamtki w odległości 4,0 m od wlotu do Głównego chodnika przewozowego (nr 52). Przestrzeń między przytamtami powinna zostać wypełniona iłem, rozłożonym warstwami o grubości ok. 20 cm z zagęszczeniem każdej warstwy. Rurociąg do wypompowywania solanki powinien zostać przedłużony. Lokalizację przytamek oraz jej konstrukcję i szczegóły wrębów pokazano na Ryc. 3.

Nie przewiduje się odwadniania Chodnika KS-6 oraz Przecinki III z racji niewystępowania obecnie w tych wyrobiskach wody/solanki. W obu przewidzianych do likwidacji wyrobiskach w przeszłości zaobserwowano zjawiska wod-

tion in the salt mine conditions until proper measurements have been completed.

- Isotopic composition is a result of mixing pulp water with some type of process water: this option seems to be less probable, owing to the age of pulp and the related quantities of drained water.
- Tested water turned out to be process water and nothing else.

According to the current surveying and geological documentation, the events occurring in the corridors opposite Chambers KS-6 and Cross-cut III (No. 11b/III) were recorded as small puddles and humid areas until about 2010. With years, however, the level of brine in the area of water hazard was slightly lowered. Today, only indirect observations are conducted due to the convergence of workings and blocked access to that area (opposite Chamber KS-6 and Cross-cut III (No. 11b/III)). Previous observations conducted in the past ten years and the current ones have not identified any active phenomena. Previously collected brine crystallised at the floor of the liquidated corridors. However, we cannot exclude that humid areas can occur in the terminal section of the mine workings.

When analysing the chemical and isotopic compositions of particular water events, one should consider the fact that some of the chambers have been backfilled with rock salt process waste (Fig. 3), deposited in the underground chambers in the form of pulp.

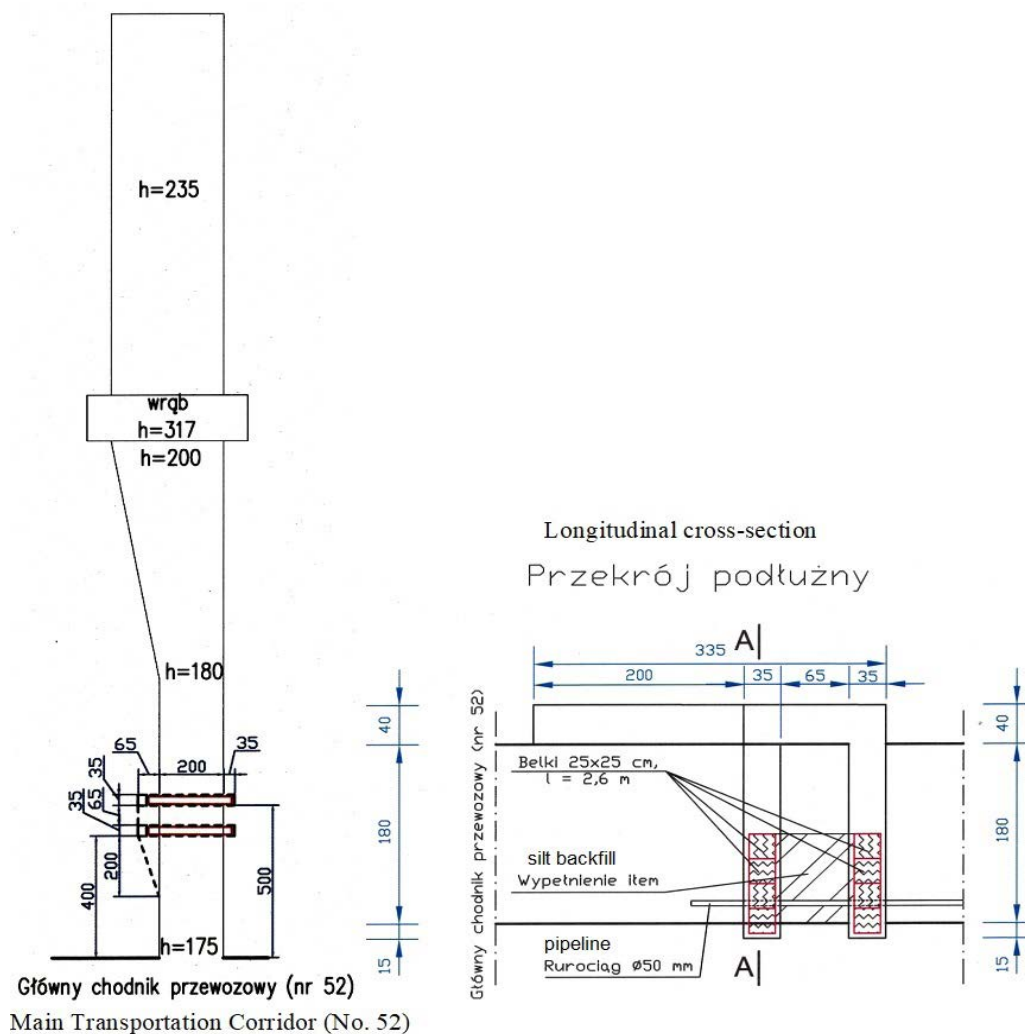
The liquid originating from the chamber leaks is used as drilling fluid in underground drilling operations provided that it meets certain requirements.

#### METHODS OF REDUCING WATER HAZARD

It is not possible to liquidate underground workings, owing to the active water/brine events occurring in the mine's corridors, at least until the leaks have disappeared naturally. Water events within salt rock mass are quite specific and it is not reasonable to construct concrete dams, especially when we take into account the size of inflows to the corridor faces or regular inspections of leaks.

Water Event 28/KS-1c continues to be active and that is why a low retention dam has been designed, ca. 90 cm high, made of wooden beams. A  $\varnothing 50$  mm pipeline will penetrate the dam to pump out brine from the sump of Corridor KS-1c, without the need to enter the workings (Motyka et al. 2021). The tip of the pipe will be fitted with a suction and sinking basket and placed in the sump. The pipe penetrating the low retention dam will be connected to a pump, and brine will be removed. In case of large flows into the corridor face, another similar low retention dam is contemplated, 4.0 m away from the entrance of the Main





Ryc. 3. Szkic Chodnika KS-1c z lokalizacją dwóch przytamek oraz przekrój podłużny  
 Fig. 3. A sketch of Corridor KS-1c, with the locations of two retention dams, and a longitudinal cross-section

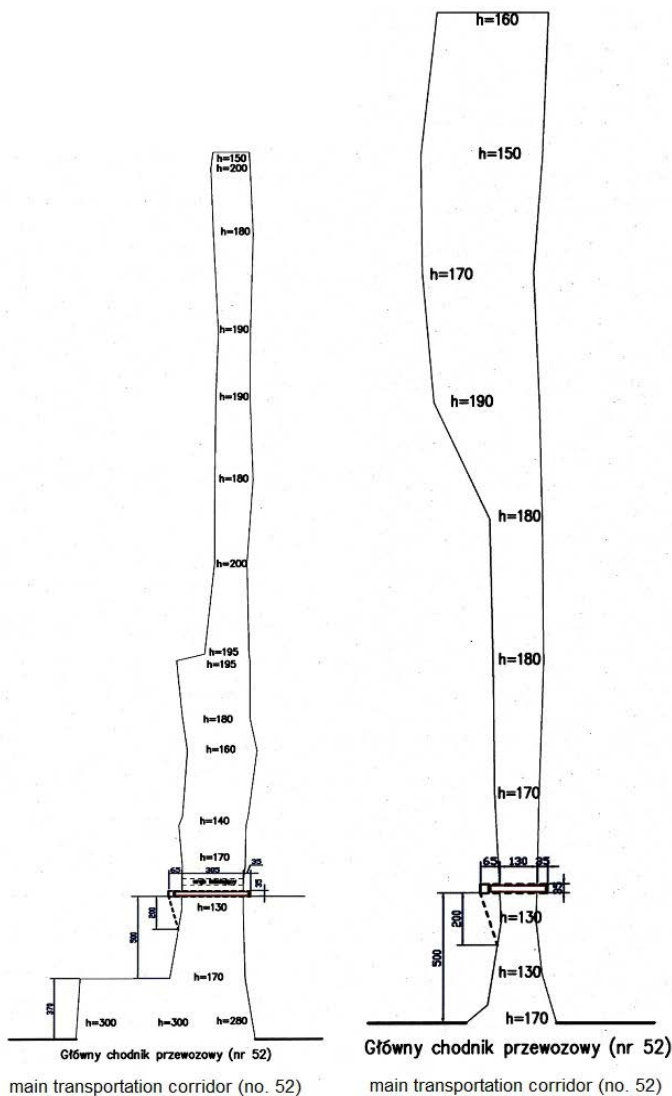
ne w postaci niewielkich kałuż i zawilgoceń, które z czasem uległy skryształowaniu. Na przestrzeni ostatnich 10 lat nie stwierdzono w tych wyrobiskach obecności wody/solanki. W związku z tym projektuje się likwidację tych wyrobisk poprzez wypełnienie ich iletm oraz zamknięcie tamami drewnianymi leżącymi.

Oba wyrobiska powinny zostać wypełnione iletm, układanym warstwami o grubości ok. 20÷30 cm i zagęszczonym poprzez ubijanie (Motyka i in. 2021). Dopuszczona jest możliwość ułożenia w części przystopowej warstw iletm bez zagęszczenia. Likwidowane wyrobisko zamknięte zostanie pełną tamą drewnianą z belek leżących o przekroju 25 × 25 cm z drewna klasy min. C20 (drewno sosnowe, bukowe lub dębowe), obsadzonej w górotworze (we wrębach) na głębokość min. 30 cm. Długość belek w Chodniku KS-6 – ok. 3,65 m, a w Przecince III ok. 1,9 m. W spągu wyrobiska należy wykonać wrąb o głębokości min. 15 cm (w razie stwierdzenia spękania warstwy przypowierzchniowej spągu wyrobiska wrąb będzie pogłębiony), szerokości ok. 35 cm i wypełniony warstwą iletm o grubości min. 5 cm. Na tak wykonanym podłożu zostanie ułożona pierwsza belka. Ponadto zostaną

Transportation Corridor (No. 52). The space between the retention dams should be backfilled with silt, spread in layers, ca. 20 cm thick each, with compaction of each layer. The brine pipeline should be then extended. The locations of retention dams and structural details of dams and faces are shown in Fig. 3.

Designers do not expect to dewater Corridor KS-6 or Cross-cut III because no water or brine has been found there. In both workings to be liquidated, brine leaks, in the form performance puddles and humid areas, had been observed in the past. Brine crystallised with time. In the past ten years, no water or brine was found in those workings. Consequently, the workings will be liquidated by backfilling with silt and closed with wooden dams placed on the floor.

Both workings will be backfilled with silt in ca. 20-30 cm layers, with compaction of each layer (Motyka et al. 2021). It is also possible to lay a top silt layer without compaction. The workings to be liquidated will be closed with a solid dam laid on the floor, The dam will be made of wooden beams, 25x25 cm each, with Timber Class of at least C20 (pine, beech or oak wood), mounted in notches



Ryc. 4. Szkic Chodnika KS-6 oraz przecinki III z lokalizacją tam.

Fig. 4. A sketch of Corridor KS-6 and Cross-cut III, with dam location.

wykonane wręby w ociosach wyrobiska o głębokości ok. 35 cm i szerokości ok. 35 cm, stanowiące punkty stabilizacji belek przytamki. W stropie wyrobiska przewidziano wykonanie przybierki o wysokości ok. 40 cm z jednostronnym „wachlarzem” umożliwiającym układanie belek we wrębach. Każda belka powinna zostać rozparta (zastabilizowana) we wrębie za pomocą klinów drewnianych, a dodatkowo zostaną one spięte kłami ciemnymi. Pusta przestrzeń we wrębie zostanie wypełniona łem.

Wznoszenie tamy będzie skorelowane z wypełnianiem końcowego odcinka wyrobiska łem w ten sposób, aby w miarę możliwości maksymalnie wypełnić przestrzeń przy tamie w części przystropowej.

Z uwagi na zróżnicowany przekrój poprzeczny obu wyrobisk, który dość istotnie zmienia się na ich długości, lokalizację tamy wraz z jej szczegółami w Chodniku KS-6 pokazano na Ryc. 4 i 5.

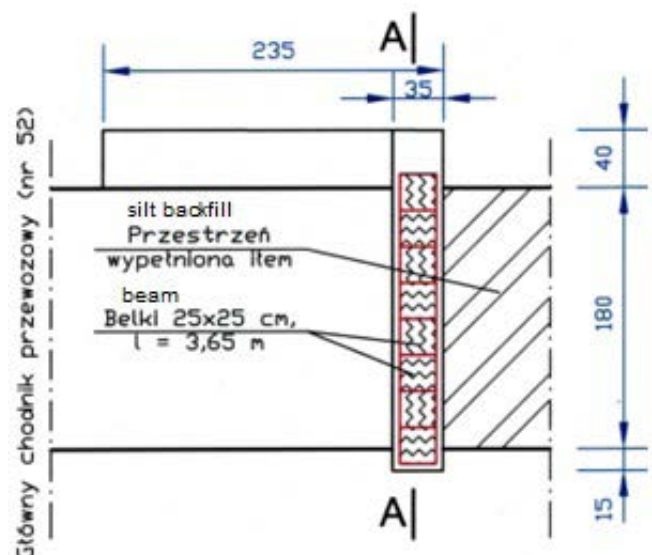
made within the rock mass, at the depth of at least 30 cm. The length of the beams in Corridor KS-6 will be ca. 3.65 m, and that in Cross-cut III: ca. 1.9 m. Besides a min. 15 cm notch will be made in the floor. The notch will be deeper if the floor surface is found to be cracked. The notch width will be ca. 35 cm. It will be backfilled with a layer of silt, min. 5 cm thick. Such a substrate will be used for laying the first wooden beam. Besides, notches will be cut in the workings' walls, ca. 35x35 cm each, constituting mounting points for the retention dam beams. The ceiling will be cut, 40 cm deep, with a side ripping allowing for mounting the beams in the notches. Each beam should be expanded (or stabilised) within its notch, using wooden wedges. In addition, the beams will be fastened with brackets. The empty space in the working will be backfilled with silt.

Dam construction will be correlated with backfilling of the terminal section of the working with silt so that the top space close to the dam has been backfilled to the as tight as possible.

The cross-sections of both workings are diverse and their parameters considerably change at the length of each working. The location of the dam in Corridor KS-6 and its details are shown in Figs. 4 and 5.

## SUMMARY

A separate solution has been proposed for the active water/brine event occurring in Corridor KS-1c. It consists in the construction of two low retention dams, with silt backfilling between them, and a pipeline penetrating the dams to pipe brine out of the working sump. Such a solution will assure access to the working and, at the same time, protect that section of the Mining Field in case of the increased inflow. In extreme



Ryc. 5. Przekrój podłużny przez chodnik KS-6 i Przecinkę III w rejonie projektowanych tam.

Fig. 5. Longitudinal cross-section of Corridor KS-6 and Cross-cut III, in the area of the designed dams.

## PODSUMOWANIE

W przypadku czynnego zjawiska w Chodniku KS-1c zaproponowano rozwiązanie polegające na wykonaniu dwóch przytamek z wypełnieniem iłowym pomiędzy nimi oraz przeprowadzenie przez nie rurociągu wypompowującego solankę z wrębu (rząpika). Takie rozwiązanie zapewnia dostęp do wrębu, ale jednocześnie zabezpiecza ten rejon Pola w przypadku zwiększenia się wydajności wypływu. W skrajnym przypadku umożliwia wykonanie pełnego odcięcia chodnika poprzez nadbudowę na zaprojektowanych przytawkach konstrukcji tamy pełnej z uszczelnieniem iłowym.

Pełna likwidacja wyrobiska poprzez jego wypełnienie materiałem ilastym jest możliwa w przypadku Chodnika KS-6 oraz Przecinki III. Wynika to z faktu zanikania w tych wyrobiskach zjawisk wodnych. W przypadku ich ewentualnego ponownego uaktywnienia się, materiał ilasty wypełniający te wyrobiska będzie stanowić rodzaj szczelnego orka, dodatkowo zabezpieczonego drewnianą tamą.

Zaproponowane działania w istotny sposób ograniczają zagrożenie wodne i podnoszą bezpieczeństwo w tym fragmencie Pola nr 1.

cases, this system will allow for making a complete cut-off of the corridor across the superstructure on the designed retention dams, with the construction of a full plugging dam, with silt backfill.

A complete liquidation of the workings by silt backfilling will be possible to attain in Corridor KS-6 and Cross-cut III since water/brine events have disappeared in those workings. In the case of leak reactivation, silt backfill will act as a plug and it will be additionally protected with a wooden dam.

The operations proposed here will considerably reduce water hazard and increase safety in the specific section of Field No. 1.

## LITERATURA/REFERENCES

BEZKOROWAJNY A., MOTYKA J., i in., 2013. Dokumentacja hydrogeologiczna złoża „Kłodawa 1”, Stow. Nauk. im. St. Staszica, Kraków (mat. arch. KS „Kłodawa S.A.).

DULIŃSKI M., RÓŻAŃSKI K., GORCZYCA Z., 2019. Badania składu izotopowego prób ługów solnych pobranych w roku 2019 w KS w Kłodawie, (mat. arch. KS „Kłodawa S.A.).

MOTYKA J., ANDRUSIKIEWICZ W., D'OBYRN K., CYRAN K., 2021. Projekt techniczny likwidacji wyrobisk poza filarem brzeżnym w Polu nr 1 na poz. 600 m w Kopalni Soli „Kłodawa” S. A., FNITG, Kraków (mat. arch. KS „Kłodawa S.A.).





# Paleofacie i paleogeografia górnopermskich (cechszyńskich) basenów ewaporatowych w rejonie Gorzowa Wielkopolskiego (Zachodnia Polska)

## Palaeofacies and palaeogeography of Upper Permian (Zechstein) evaporite basins in the Gorzów Wielkopolski area (western Poland)

Grzegorz CZAPOWSKI, Zbigniew MAŁOLEPSZY, Ewa SZYNKARUK,  
Jacek CHEŁMIŃSKI, Łukasz NOWACKI

Państwowy Instytut Geologiczny-Państwowy Instytut Badawczy, ul Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; grzegorz.czapowski@pgi.gov.pl  
The Polish Geological Institute - National Research Institute, Rakowiecka 4, 00-975 Warsaw, grzegorz.czapowski@pgi.gov.pl

Przestrzenny model budowy geologicznej tzw. bloku Gorzowa, obejmujący otoczenie Gorzowa Wielkopolskiego w zachodniej Polsce (ryc. 1), obrazuje architekturę sedymentacyjno-tektoniczną basenu depozycyjnego od utworów kenozoiku po karbońską część jego waryscyjskiego podłoża na gł. 2,5-4,5 km p.p.m. (Adamczak-Biały i in., 2020). Przy konstrukcji modelu wykorzystano dane z 23 zdjęć sejsmicznych 3D, ponad tysiąc linii sejsmicznych 2D oraz dane z 300 głębokich (>500 m) odwiertów (ryc. 2).

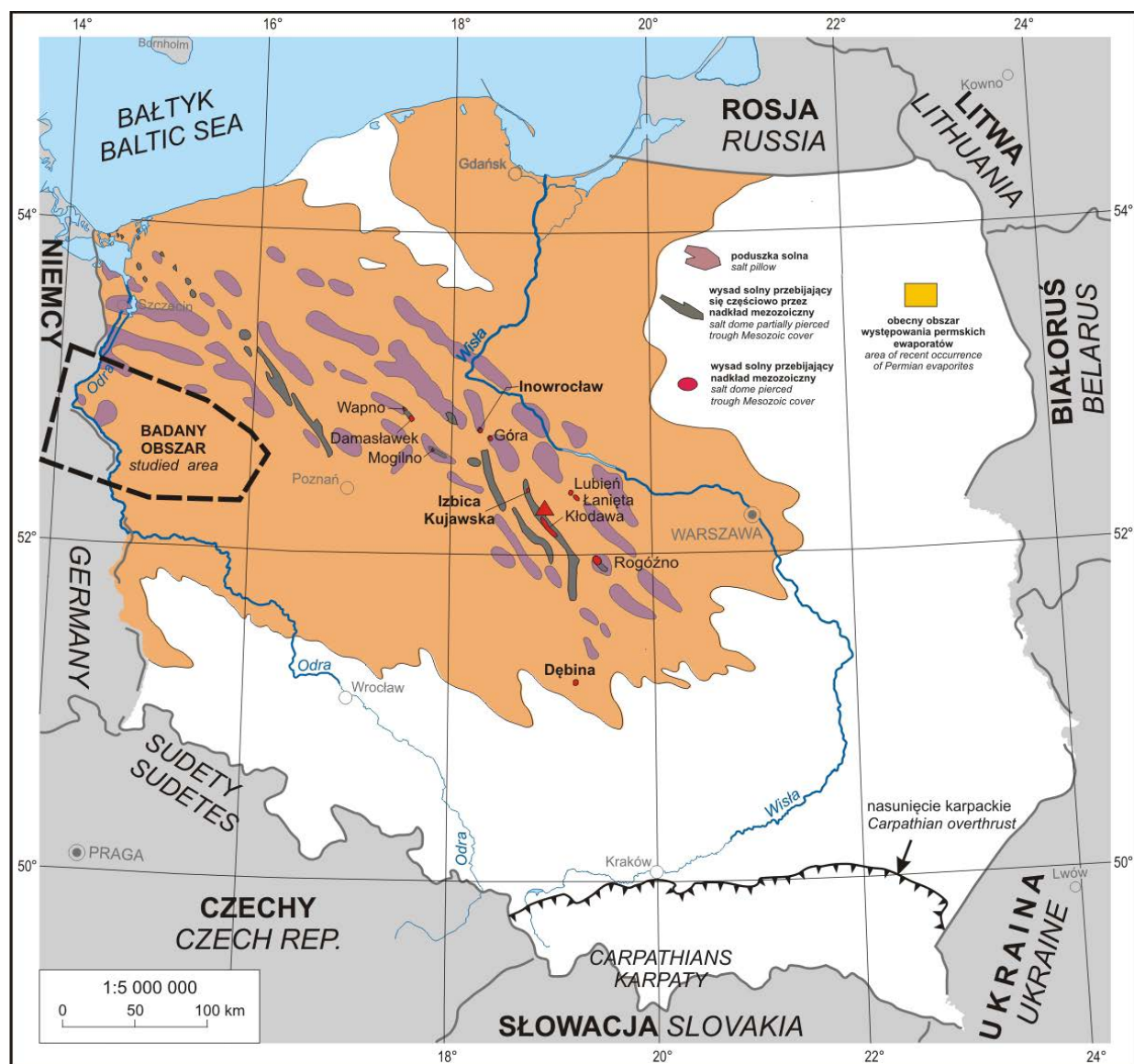
Istotnym komponentem modelu są twory ewaporatowe (siarczany i sole) górnego permu (cechsztyn), stanowiące od ok. 1/3 do ok. 1/4 wypełnienia basenu w strefach poduszek solnych. Tworzy je 10 siarczanowych (anhydryty) i 9 litostratygraficznych wydzieleni solnych (w tym dwa wydzielenia soli K-Mg), przypisanych odpowiednio cyklotomom od PZ1 do PZ4 cechsztynu (tab.1). Opisy materiału rdzeniowego z 53 otworów wiertniczych (na blisko 280 otworów rejestrujących twory cechsztynu), umożliwiły wyróżnienie szeregu litofacji, reprezentujących różne środowiska depozycji ewaporatów.

Dla utworów siarczanowych wyróżniono następujące litofacje: otwartego basenu siarczanowego (z partiami głębszymi), platformy siarczanowej, laguny siarczanowej (z partiami płytszymi), laguny i panwi solno-siarczanowej oraz sebkhy siarczanowej. W przypadku utworów solnych są to facje: otwartego basenu solnego (z partiami głębszymi i płytszymi), laguny solnej (z partiami płytszymi), laguny solno-siarczanowej, panwi solnej

3D model of geological structure of s.c. Gorzów block, located in Gorzów Wielkopolski area in western Poland (fig. 1), imaged the sedimentary-tectonic architecture of the depositional basin there, from the Cenozoic deposits down to the Carboniferous rocks of the Variscan basement at depth 2.5-4.5 km b.s.l. (Adamczak-Biały et al., 2020). For model construction were applied data of 23 3D and over thousand 2D seismic sections, as well as data from 300 deep (>500 m) boreholes (fig. 2).

Evaporites (sulphates and salts) of Upper Permian (Zechstein) became the valid component of 3D model, building c.a. 1/3 to 1/4 of basin infill in zones of salt pillows. Ten sulphate (anhydrites) and 9 salt lithostratigraphic units (two units of K-Mg salts within), belong to Zechstein cyclothems from PZ1 to PZ4 (tab.1). Core descriptions of 53 wells (from up to 280 boreholes, registering Zechstein deposits), enabled definition of several lithofacies, corresponding with various evaporite depositional environments.

Following lithofacies were distinguished for sulphates: open sulphate basin (with deeper parts), sulphate platform, sulphate lagoon (with shallower parts), salt-sulphate lagoon and pan and sulphate sabkha. For salt deposits the lithofacies were as follow: open salt basin (with deeper and shallower parts), salt lagoon (with shallower parts), salt-sulphate lagoon, salt pan to salina, salina and seaside lake, transforming into inland one of *playa* type.



Ryc. 1. Lokalizacja obszaru badań

Fig. 1. Location of studied area

z przejściem do saliny, saliny oraz nadmorskiego (przeradzającego się w śródlądowy) zbiornika jeziornego typu *playa*.

Analiza rozkładu miąższości poszczególnych wydzieliń i wymienionych litofacji pozwoliła opracować mapy przypuszczalnej paleogeografii kolejnych basenów ewaporatowych: siarczanowych (6 map) i solnych (6 map). Wartości korelacji pomiędzy miąższością siarczanów, rozpoczynających depozycję ewaporatów w każdym z cykli, a miąższością nadległych soli oraz tychże soli do kończących cykl siarczanów, umożliwiły określenie typu ewaporatowego basenu depozycyjnego (patrz: Czapowski, Tomaszczyk, 2014). Jedynie zbiorniki sedymentacyjne utworów najstarszej soli kamiennej (Na1) i anhydrytu stropowego (A3r/A3g\*) reprezentują basen typu „wypełnieniowego” (*infill evaporite basin*; wysoka ujemna wartość współczynnika korelacji; tab.1). Pozostałe badane ewaporaty powstały w basenach typu „niestabilnego” (*fluctuating evaporite basin*; niska ujemna i dodatnia wartość

Analysis of thickness and lithofacies distribution of following evaporite units in the studied area enabled map creation of supposed paleogeography images of evaporite depositional basin for each unit: 6 maps for sulphate units and 6 maps for salt ones. Values of correlation coefficient between thickness of sulphates, initiating evaporite deposition in each cycle, and thickness of overlying salts and relation of these salts to next sulphates, finalizing the cycle, defined the type of evaporite depositional basin (see: Czapowski, Tomaszczyk, 2014). Only the sedimentary basins of Oldest Halite (Na1) and Top Anhydrite (A3r/A3g) deposits represented the infill evaporite basin type (high negative value; tab.1), other studied evaporites were accumulated in the fluctuating evaporite basins (low negative and positive values; tab.1). Interpretation of thickness images considered also post- and syndimentary tectonics, active especially during deposition of PZ2 and PZ3 evaporites.

**Tab. 1.** Badane ewaporatowe wydzielenia litostratygraficzne cechsztynu w rejonie Gorzowa Wielkopolskiego i typy ich basenów depozycyjnych

Wyzdzielienia chlorkowe i siarczanowe (wg Wagner 1995, zmienione)		Typ basenu depozycyjnego (wg Czapowski, Tomaszczyk, 2014)
najmłodsza sól kamienna dolna (Na4a <sub>1</sub> /Na4a*)		basen typu „niestabilnego” współczynnik korelacji $A4a_1 / Na4a_1 = -0,08$
anhydryt pegmatytowy dolny (A4a <sub>1</sub> /A4ad*)		brak interpretacji
anhydryt stropowy (A3r/A3g*)		basen typu „wypełnieniowego”? współczynnik korelacji $Na3+K3/A3r = -0,83$
młodsza sól kamienna górna (Na3g)	młodsza sól kamienna (Na3)	basen typu „niestabilnego” współczynnik korelacji $A3/Na3+K3 = 0,14$
młodsza sól potasowa (K3)		
młodsza sól kamienna dolna (Na3d)		
anhydryt główny (A3)		brak interpretacji
anhydryt kryjący (A2r)		basen typu „niestabilnego” współczynnik korelacji $Na2+K2/A2r = -0,37$
starsza sól kamienna kryjąca (Na2r)		basen typu „niestabilnego” współczynnik korelacji $A2/Na2+K2 = -0,17$
starsza sól potasowa (K2)		
starsza sól kamienna (Na2)		
anhydryt podstawowy (A2)		brak interpretacji
anhydryt górny (A1g)		basen typu „niestabilnego” współczynnik korelacji $Na1 (+A1s)/A1g (+A1Br) = 0,10$
brekcja anhydrytowa (A1Br)		
najstarsza sól kamienna górna (Na1g)	najstarsza sól kamienna (Na1)	basen typu „wypełnieniowego” współczynnik korelacji $A1d/Na1(+A1s) = -0,61$
anhydryt śródsolny (A1s)		
najstarsza sól kamienna dolna (Na1d)		
anhydryt dolny (A1d)		brak interpretacji

\* symbol wydzielenia litostratygraficznego, użyty w opisie profilu otworu wiertniczego (baza danych CBDG) oraz dla potrzeb konstrukcji modelu

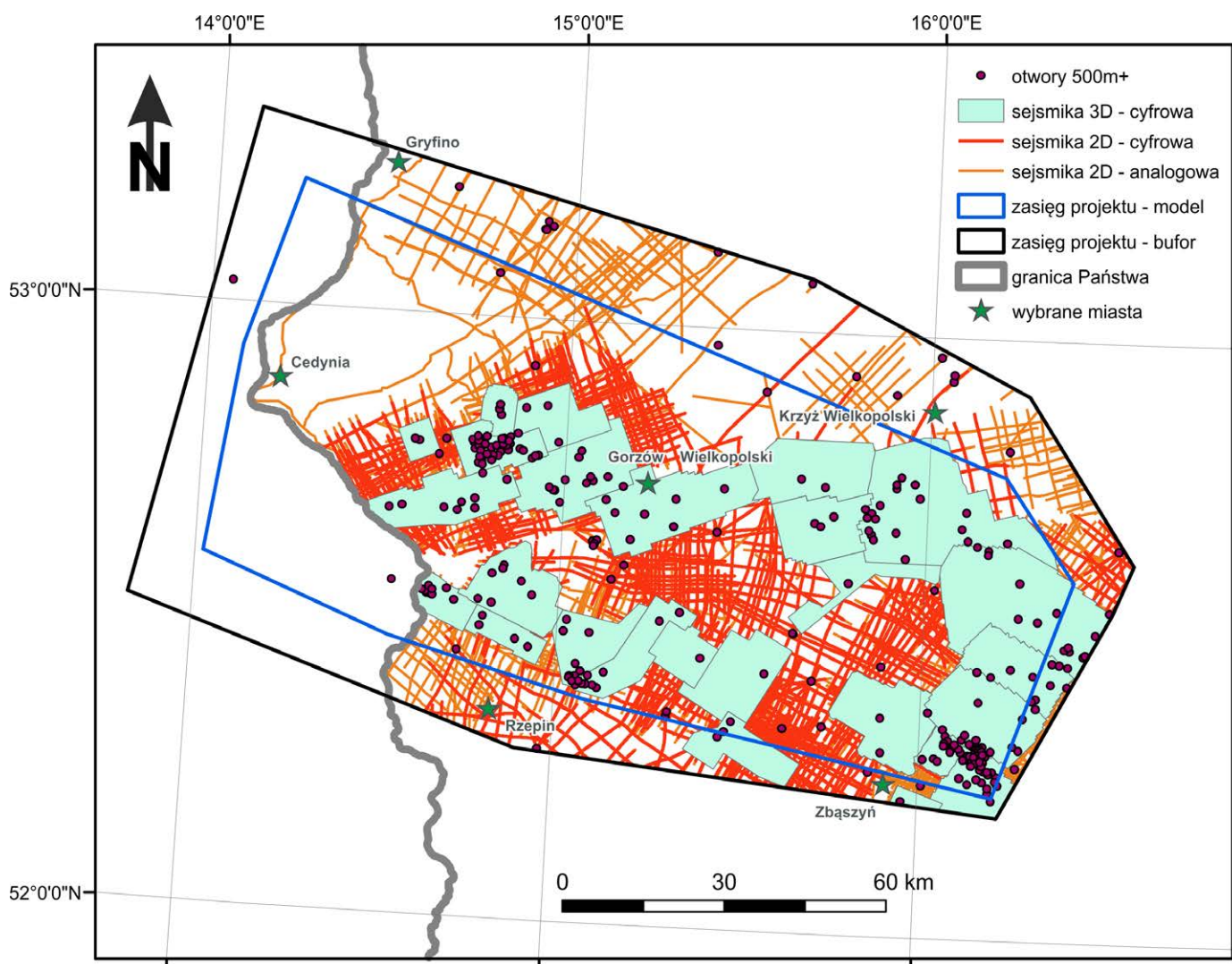


**Tab. 1.** Studied Zechstein evaporite lithostratigraphic units and their depositional basin types in the Gorzów Wielkopolski area

Chloride+sulphate units (after Wagner, 1995; modified)		Evaporite basin type (after Czapowski, Tomaszczyk, 2014)	
Lower Youngest Halite (Na4a <sub>1</sub> /Na4a*)		fluctuating evaporite basin correlation coefficient $A4a_1 / Na4a_1 = -0,08$	
Lower Pegmatite Anhydrite (A4a <sub>1</sub> /A4ad*)		no interpretation	
Top Anhydrite (A3r/A3g*)		infill evaporite basin correlation coefficient $Na3+K3/A3r = -0,83$	
Upper Younger Halite (Na3g)	Younger Halite (Na3)	fluctuating evaporite basin correlation coefficient $A3/Na3+K3 = 0,14$	
Younger Potash (K3)			
Lower Younger Halite (Na3d)			
Main Anhydrite (A3)		no interpretation	
Screening Anhydrite (A2r)		fluctuating evaporite basin correlation coefficient $Na2+K2/A2r = -0,37$	
Screening Older Halite (Na2r)		fluctuating evaporite basin correlation coefficient $A2/Na2+K2 = -0,17$	
Older Potash (K2)			
Older Halite (Na2)			
Basal Anhydrite (A2)		no interpretation	
Upper Anhydrite (A1g)	Werra Anhydrite (A1*)	fluctuating evaporite basin correlation coefficient $Na1 (+A1s)/A1g (+A1Br) = 0,10$	
Anhydrite Breccia (A1Br)			
upper Oldest Halite (Na1g)		Oldest Halite (Na1)	infill evaporite basin correlation coefficient $A1d/Na1(+A1s) = -0,61$
intrasalt anhydrite (A1s)			
lower Oldest Halite (Na1d)			
Lower Anhydrite (A1d)		no interpretation	

\* symbol of lithostratigraphic unit, used in the well profile descriptions (CBDG data base) and for model construction purposes

współczynnika korelacji; tab. 1). W interpretacjach rozkładu miąższości ewaporatów uwzględniono także wpływ tektoniki post- i syndepozycyjnej, szczególnie aktywnej podczas formowania ewaporatów cyklotemów PZ2 i PZ3.



Ryc. 2. Lokalizacja wierzeń i sekcji sejsmicznych wykorzystanych w modelu 3D budowy geologicznej rejonu Gorzowa Wielkopolskiego.

Fig. 2. Location of boreholes and seismic sections used for the 3D geological model of Gorzów Wielkopolski area.

**Słowa kluczowe:** model 3D, cechsztyńskie ewaporaty, paleofacje i paleogeografia, blok Gorzowa

**Key words:** 3D model, Zechstei evaporites, palaeofacies and palaeogeography, Gorzów block

#### LITERATURA/REFERENCES

ADAMCZAK-BIAŁY T., BECKER A., CHEŁMIŃSKI J., CZAPOWSKI G., FELDMAN-OLSZEWSKA A., GŁUSZYŃSKA., GOGOLEK T., KIERSNOWSKI H., KIJEWSKA S., LESZCZYŃSKI K., MAJEWSKA A. MAŁOLEPSZY Z. NOWACKI Ł., PAWŁOS R., PERYT T., ROSOWIECKA O., SMAJDOR Ł., STĘPIEŃ U., SZYNKARUK E., TOMASZCZYK M., WAKSMUNDZKA M. I., WAŚKIEWICZ K., WĘGLIŃSKI D., WRÓBEL K., ŻUK T., 2020. Trójwymiarowy, cyfrowy model pokrywy osadowej bloku Gorzowa. 4. Opracow-

anie końcowe. Poz. planu: 22.2609.1501.00.1. NAG PIG-PiB, Warszawa

CZAPOWSKI G., TOMASZCZYK M., 2014. Baseny ewaporatowe cykli PZ1, PZ2 i PZ3 cechsztynu (górnym perm) w Polsce – studium miąższościowe. *Przegląd Solny*, 10: 49-64.

WAGNER R., 1995. Stratygrafia i rozwój basenu cechsztyńskiego na Niżu Polskim. *Prace PIG*, 146: 1-71.



# Halit w poziomie eksploatacyjnym złóż rud miedzi na monoklinie przedsudeckiej – przykład współczesnej mineralizacji chlorkowej

## Halite in mine drifts in copper ore deposits over the Fore-Sudetic Homocline: an example of modern chloride mineralization

Mateusz ŚWIERK<sup>1</sup>, Stanisław BURLIGA<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych, pl. M. Borna 9, 50-204 Wrocław,  
e-mail: <sup>1</sup>mateusz.swierk@uwr.edu.pl; <sup>2</sup>stanislaw.burliga@uwr.edu.pl

<sup>1,2</sup> Institute of Geological Sciences, University of Wrocław, Pl. M. Borna 9, 50-204 Wrocław,  
e-mail: <sup>1</sup>mateusz.swierk@uwr.edu.pl; <sup>2</sup>stanislaw.burliga@uwr.edu.pl

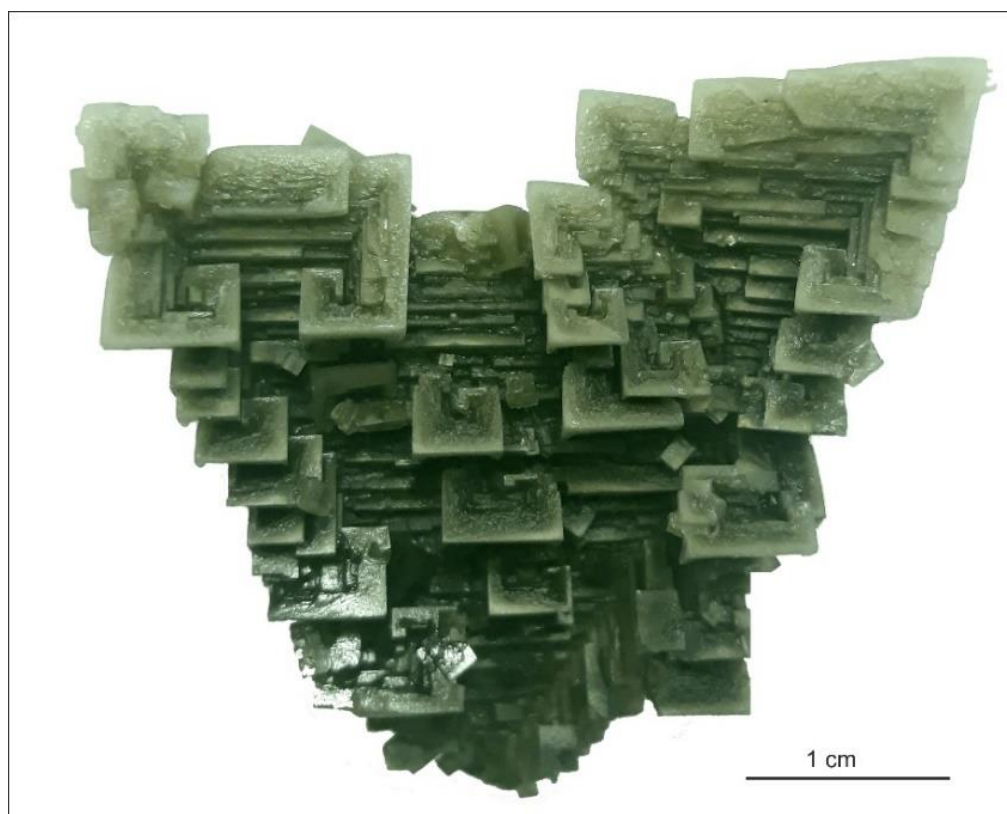
Eksploatacja złóż rud miedzi na monoklinie przedsudeckiej umożliwia okresowy dopływ wód pozazłożowych w obręb wyrobisk górniczych, inicjujący rozwój współczesnej mineralizacji. Miedziowa mineralizacja rudna występuje w skałach pogranicza czerwonego spągowca i cechsztynu, tj. w piaskowcach, łupkach ilastych i dolomitach. W dolomitach powyżej strefy mineralizacji miedziowej występuje również mineralizacja cynkowo-ołowiowa (Banaś i in., 1985), natomiast powyżej dolomitów zalegają warstwy anhydrytów, ponad którymi na części obszaru monokliny występują sole kamienne cechsztyńskiego cyklu PZ1. Takie zróżnicowanie petrograficzne serii nadzłożowej wpływa na chemizm wód kopalnianych (Becker i in., 2007), szczególnie w obszarze występowania soli kamiennych. W pracy przedstawiono wyniki szczegółowych badań mineralogicznych halitu krystalizującego w wyrobiskach górniczych w kopalni ZG Polkowice–Sierszowice podczas dopływu solanek aktywnego w roku 2016. Analizie poddano kilkanaście okazów z kolekcji Muzeum Geologicznego im. Henryka Teisseyre Uniwersytetu Wrocławskiego.

W wyrobisku górniczym usytuowanym w północnej części ZG Polkowice–Sierszowice w roku 2016 wystąpił okresowy wypływ solanek chlorkowo-sodowych, który doprowadził do rozwoju bogatej halitowej szaty naciekowej na stropie, ociosach i spągu wyrobiska górniczego. Spekta-

The exploitation of copper ore deposits in the Fore-Sudetic Homocline (FSH) enables a periodic water infiltration from outside the deposits into the mine workings, initiating the development of modern mineralization. Copper ore mineralization occurs in the border zone of the Rotliegendes and Zechstein, i.e. in sandstones, shales and dolostones. Zinc-lead mineralization also occurs in the dolomites above the copper mineralization zone (Banaś et al., 1985), while above the dolostones there are layers of anhydrite overlain, over a part of the FSH, by rock salts of the Zechstein PZ1 cycle. Such petrographic diversity of the supra-deposit series influences the chemistry of mine waters (Becker et al., 2007), especially in the area of rock salt occurrence. The paper presents the results of detailed mineralogical studies of halite which crystallized in mining drifts in the ZG Polkowice–Sierszowice mine during the inflow of brines, active in 2016. Over dozen mineral specimens from the collection of the Henryk Teisseyre Geological Museum of the University of Wrocław were analysed.

In 2016, in the mining drifts located in the northern part of the ZG Polkowice–Sierszowice mine, there was a periodic outflow of sodium-chloride brines, which led to the development of rich halite dripstones on the roof, side walls and floor of a mining drift. Spectacular forms of stalactites, stalagmites, stalagnates and flowstones were largely made of multiple arrays of skeletal crystals of halite (Fig. 1). Their





**Ryc. 1.** Halit szkieletowy z wyrobisk górniczych kopalni ZG Polkowice–Sieroszowice. Kolekcja Muzeum Geologicznego Uniwersytetu Wrocławskiego.

**Fig. 1.** Skeletal halite from the copper mine drifts on the Fore-Sudetic Homocline. Collection of the Geological Museum of University of Wrocław.

kularne formy stalaktytów, stalagmitów, stalagnatów i polew zbudowane były w znacznej mierze z wielokrotnych wzrostów kryształów szkieletowych halitu (Ryc. 1). Ich wyjątkowość wynikała również z barwnego zróżnicowania halitu, tj. występowania odmian o odcieniach białych, zielonawych i brązowych, wskazujących na obecność domieszek innych minerałów. Celem podjętych badań była identyfikacja domieszek wpływających na zieloną barwę halitu. Próbkę mineralną analizowano przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) wyposażonego w detektory dyspersji elektronów wtórnych i wstecznie rozproszonych (SE i BSE) i spektrometr dyspersji energii (EDS), spektrometru Ramana oraz dyfraktometru rentgenowskiego.

Analizy przy pomocy SEM i spektrometru Ramana wykazały, że minerały obecne w zielonych halitach w postaci wzrostów i narostów stanowią głównie odmiany polimorficzne chlorków Cu z grupy atacamitu ( $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ ): atacamit, botallackit oraz klinoatacamit. Analiza SEM wykazała także obecność chlorku Cu i Zn, który metodą dyfraktometryczną zidentyfikowano jako herbertsmithyt ( $\text{Cu}_3\text{Zn}(\text{OH})_6\text{Cl}_2$ ). Analiza dyfraktometryczna sproszkowanych próbek wykazała ponadto obecność tolbachitu ( $\text{CuCl}_2$ ) i eriochalcytu ( $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Wymienione minerały wykazują zabarwienie w różnych odcieniach zieleni i koloru niebieskiego. Oprócz minerałów

uniqueness was also due to variation in colour of the halite, i.e. the presence of varieties with shades of white, greenish and brownish, indicating the presence of admixtures of other minerals. The aim of the research was to identify the mineral admixtures influencing the green colour of halite. Mineral samples were analysed using a scanning electron microscope (SEM) coupled with SE and BSE detectors and EDS spectrometer, a Raman spectrometer and an X-ray diffractometer (XRD).

Analyses with the use of SEM and Raman spectrometer showed that minerals incorporated in the green halites in forms of inclusions and overgrowths are represented mainly by polymorphs of Cu-chlorides from the atacamite group ( $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ ): atacamite, botallackite and clinoatacamite. The SEM analysis also revealed the presence of Cu- and Zn- chloride, which was identified using XRD as herbertsmithite ( $\text{Cu}_3\text{Zn}(\text{OH})_6\text{Cl}_2$ ). XRD analysis of powdered samples also revealed the presence of tolbachite ( $\text{CuCl}_2$ ) and eriochalcite ( $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). All the mentioned minerals are coloured in various shades of green and bluish. Apart from chloride minerals, yellowish spheroidal sulphur and colourless bunch-shape aggregates ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) were documented.

chlorkowych udokumentowano występowanie sferoidalnych skupień siarki rodzimej w kolorze żółtawym oraz bezbarwnych snopkowych agregatów gipsu ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

Uzyskane wyniki dowodzą, że zielone zabarwienie halitów, krystalizujących w rejonie wypływu solanek w poziomie eksploatacji złóż rud miedzi, wynika w głównej mierze z obecności wrostków minerałów z grupy chlorków Cu o różnych odcieniach zieleni. Stwierdzona mineralizacja wskazuje ponadto, iż solanki chlorkowo-sodowe migrujące ze strefy nadłożowej ługowały skały nadkładu i wzbogaciły się w składniki minerałów rudnych z grupy siarczków Cu i Zn, w wyniku czego w wyrobisku równocześnie z halitem krystalizowały chlorki Cu i Zn oraz siarka rodzima. Badania implikują ponadto, iż możliwe są bardziej zróżnicowane naturalne środowiska krystalizacji niektórych minerałów z grupy chlorków Cu, niż opisane w literaturze, jak np. herbertsmithytu, który dotychczas znany był głównie z porfirowych złóż miedzi w Chile i Iranie oraz polimetalicznych złóż Zn-Pb w Iranie (Braithwaite i in., 2004). Konkluzję tę potwierdza także wcześniejsze stwierdzenie obecności tego minerału w złożu rud miedzi na obszarze ZG Rudna w strefie współczesnego wietrzenia okruszczonych piaskowców białego spągowca (Kruszewski i in., 2020).

**Słowa kluczowe:** halit, minerały chlorkowe, złożo rud miedzi, monoklina przedsudecka

#### PODZIĘKOWANIA

Autorzy dziękują Muzeum Geologicznemu im. Henryka Teisseyre Uniwersytetu Wrocławskiego za udostępnienie próbek do badań.

The obtained results prove that the green colour of the halites which crystallized in the area of brine outflow in the copper ore deposit mine workings is mainly due to the presence of Cu-chloride minerals of various shades of green. The identified mineralization also indicates that sodium chloride brines infiltrating from the above of the copper deposit leached the overburden rocks, being enriched in elements of ore minerals from the group of Cu- and Zn- sulphides.

As a result, Cu- and Zn- chlorides, and native sulphur crystallized in the mine workings simultaneously with halite. The research also implies that more diverse natural environments for the crystallization of some minerals from the Cu chloride group than those described in the literature are possible, e.g. as in a case of herbertsmithite, which so far was known mainly from porphyry copper deposits in Chile and Iran, and polymetallic Zn-Pb deposits. in Iran (Braithwaite et al., 2004). This conclusion is also confirmed by the earlier finding of this mineral in the copper ore deposit in the ZG Rudna mine in the zone of modern weathering of Weissliegendes sandstones with copper ore mineralization (Kruszewski et al., 2020).

**Key words:** halite, chloride minerals, copper ore, Fore-Sudetic Homocline

#### ACKNOWLEDGEMENT

Authors thank Geological Museum named after Henryk Teisseyre in Wrocław University for share samples and research.

#### LITERATURA/REFERENCES

- BANAŚ M., KUCHA H., MAYER W., PIESTRZYŃSKI A., SALAMON W., 1985. Okruszczowanie ołowiem i cynkiem w złożach rud miedzi na monoklinie przedsudeckiej. *Annales Societatis Geologorum Poloniae* 53 (1/4): 13-42.
- BECKER R., FISZER J., KALISZ M., 2007. Hydrogeologia. [W:] Piestrzyński A., Banaszak A., Zaleska-Kuczmiereczak M. (red.), *Monografia KGHM Polska Miedź S.A.*, Cuprum, Lubin: 82–89.
- BRAITHWAITE R.S.W., MEREITER K., PAAR W.H., CLARK A.M., 2004. Herbertsmithite,  $\text{Cu}_3\text{Zn}(\text{OH})_6\text{Cl}_2$ , a new species, and the definition of paratacamite. *Mineralogical Magazine* 68 (3): 527-539. /dx.doi.org/10.1180/0026461046830204
- KRUSZEWSKI Ł., ŚWIERK M., SIUDA R., SZEŁĘG E., MARCINIAK-MALISZEWSKA B., 2020. Third Worldwide Occurrence of Juangodoyite,  $\text{Na}_2\text{Cu}(\text{CO}_3)_2$ , and Other Secondary Na, Cu, Mg, and Ca Minerals in the Fore-Sudetic Monocline (Lower Silesia, SW Poland). *Minerals* 10 (2): 190. https://doi.org/10.3390/min10020190



# **Problemy środowiskowe i społeczno-gospodarcze spowodowane działalnością odkrywki Dombrowski zakładu potasowo-magnezowego Kałusz oraz sposoby ich rozwiązania w kontekście odrodzenia przemysłu potasowego na Podkarpaciu ukraińskim**

## **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**

Yuryij V. SADOVYI<sup>1</sup>, Anatolij R. GALAMAY<sup>2</sup>, Krzysztof BUKOWSKI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Badawczy i Projektowy Podstaw Chemii (NIOCHIM), Charków, Ukraina, e-mail: ysadovyi@gmail.com

<sup>2</sup> Instytut Geologii i Geochemii Mineralów Palnych, Ukraińska Akademia Nauk, Lwów, e-mail: galamaytolik@ukr.net

<sup>3</sup> Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, e-mail: buk@agh.edu.pl

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

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

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

W granicach dawnej Galicji (zachodnia Ukraina) występują rzadkie złoża soli potasowo-magnezowej, typu siarczanowego i chlorkowo-siarczanowego o łącznych zasobach soli polimineralnych wynoszących 8315,3 mln ton. Na podstawie danych z badań geologicznych-poszukiwawczych, rozpoznano tam około dwudziestu obszarów koncentracji złóż soli K-Mg (Sadovyi i in., 2018). Najbardziej zbadane zostało złożo Kałusz-Hołyń, gdzie na jednym z odcinków tego złoża (dzielnica Dombrowska) na głębokości 20–30 metrów stwierdzono występowanie grubych pokładów soli polimineralnej. Z tego też względu w latach 50-tych, na początku lat 60-tych XX wieku, po raz pierwszy na świecie w Kałuszu rozpoczęto wydobycie soli potasowo-magnezowych metodą odkrywkową w kamieniołomie (Ryc. 1).

W trakcie istnienia kopalni wydobyto tu 52 mln m<sup>3</sup> skał obejmujących łącznie skały nadkładu, brekcję solną oraz rudę

Within the former Galicia (western Ukraine) borders are rare deposits of potassium-magnesium salt, sulfate, and chloride-sulfate types with total polymineral salt reserves of 8 315.3 million tons. Based on geological-exploration data, about twenty areas of concentration of K-Mg salt deposits have been recognized there (Sadovyi et al., 2018). The most studied was the Kalush-Holyn deposit, where thick deposits of polymineral salt were found at a depth of 20-30 meters in one section of this deposit (Dombrovskaya district). For this reason, in the 1950s, and early 1960s, for the first time in the world in Kalush, the mining of K-Mg salts began using the open-pit method in a quarry (Fig. 1).

During the mine's existence, 52 million cubic meters of rock were mined there, comprising a total of overburden rock, salt breccia and ore - a mixture of potassium and magnesium minerals with halite. At the same time, in the areas adjacent



– mieszaninę minerałów potasowo-magnezowych z halitem. W tym samym czasie na terenach przylegających do dzielnicy Dombrowski te same złoża było eksploatowane metodą górnictw w kopalni podziemnej. Wydobywaniu i przeróbce surowców mineralnych towarzyszyło powstawanie znacznej ilości odpadów stałych i płynnych, które następnie były składowane na wysypiskach i hałdach oraz w stawie osadnikowym, co do dziś negatywnie wpływa na stan ekologiczny środowiska (Ryc. 1).

Ze względu na niedoskonałą technologię przetwarzania surowca (przeróbkę) wprowadzoną w latach 60-tych ubiegłego wieku, udział procentowy pozyskiwania składników użytecznych był niezwykle niski. Doprowadziło to do tego, że zawiesina, która dostała się do odpadów poflotacyjnych zawierała do 50% zawartości K, Mg i siarczanów z ich pierwotnej ilości w wydobytej masie górniczej oraz prawie cały chlorek sodu znajdujący się w rudzie. Obecnie roztwory które wypełniają kamieniołom Dombrowski oraz roztwory skoncentrowane w stawach osadnikowych składowiska są wieloskładnikowe – zawierają jony Na, Cl, Mg, K, SO<sub>4</sub>, Ca. Dominują jony Cl i Na, zawartość jonów Mg, K i SO<sub>4</sub> naturalnie wzrasta wraz z głębokością, a względny udział jonu Ca w ogólnym składzie soli jest niewielki. W wyrobisku stężenie roztworów waha się od 20 g/l na powierzchni do prawie 400 g/l przy dnie. W składowisku odpadów nr 2 – od 60–80 g/l na powierzchni do 400 g/l w dolnej części. Porównanie danych testowych z różnych lat wskazuje na zmianę gęstości, całkowitej mineralizacji i zawartości rozpuszczonych składników soli w czasie, zwłaszcza w górnej części warstwy solanki.

Próbki przypowierzchniowe solanek w południowej części kamieniołomu Dombrowski w 1995 r. wskazywały mineralizację około 180 g/l i więcej, w 2010 r. ok. 130 g/l, w 2013 r. ok. 70 g/l, a w 2018 r. tylko około 25 g/l. Dzieje się tak w wyniku postępującego zalewania kamieniołomu słodkimi wodami pochodzenia atmosferycznego. Można przewidywać, że jeśli proces ten będzie postępował zawartość soli zmniejszy się, a woda będzie zbliżona do lekko słonawej. Stały spadek mineralizacji roztworów występuje również w górnych warstwach solanki w stawach osadnikowych i w zbiornikach szlamu na składowisku odpadów.

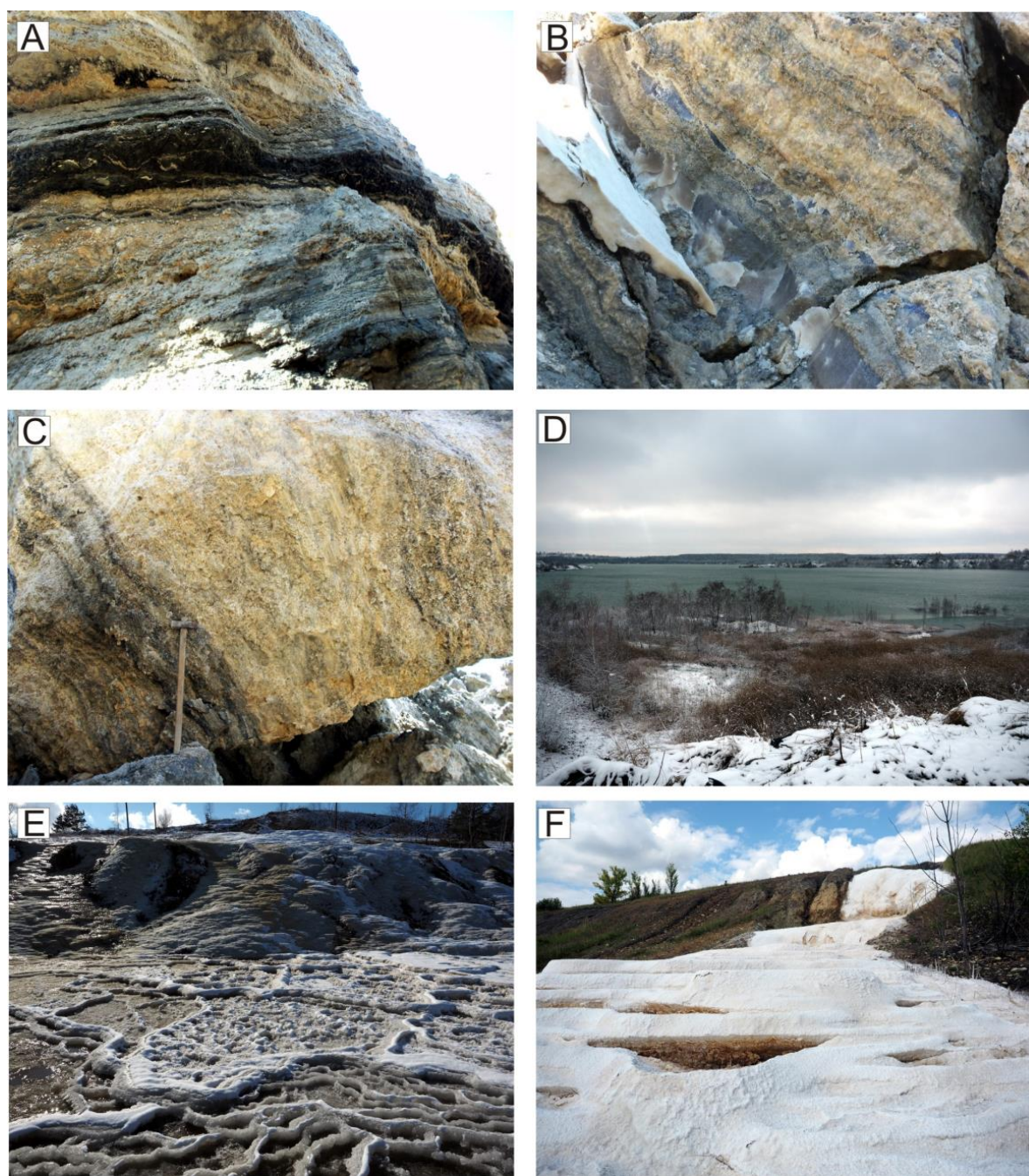
Od ponad 50 lat wysoko zmineralizowane roztwory są stale uwalniane do środowiska ze wszystkich tych obiektów i nadkładów kamieniołomu Dombrowski, przedostając się do sieci rzecznej i warstwy wodonośnej. W rezultacie w warstwie wodonośnej w pobliżu miasta Kałusz powstał obszar zasolonych wód gruntowych, który stale się powiększa, rozszerzając się w kierunku południowo-wschodnim (Ryc. 2). Istnieje niebezpieczeństwo dotarcia wód zmineralizowanych do ujęcia miejskiego z odpowiednimi negatywnymi skutkami. Na chwilę obecną informacje o stanie faktycznym warstwy wodonośnej są fragmentaryczne. Jednak dane uzyskane w ostatnich latach wskazują na znaczne pogorszenie sytuacji

to the Dombrowsky district, the same deposit was exploited using underground mining. The extraction and processing of minerals were accompanied by the generation of a significant amount of solid and liquid waste, which was subsequently dumped in landfills and heaps and in a tailings pond, which still negatively affects the ecological state of the environment today (Fig. 1).

Due to the highly imperfect raw material processing technology introduced in the 1960s, the percentage of valuable constituents extracted was extremely low. It led to the slurry that entered the tailings containing up to 50% of the K, Mg and sulfate content of their original amount in the mined ore and almost all of the sodium chloride found in the ore. Currently, the solutions that fill the Dombrowsky quarry and the solutions concentrated in the landfill's settling ponds are multicomponent - they contain Na, Cl, Mg, K, SO<sub>4</sub>, and Ca ions. Chloride and sodium ions dominate, the content of Mg, K, and SO<sub>4</sub> ions naturally increase with depth, and the content of Ca ions in the overall salt composition is low. In the pit, the concentration of solutions varies from 20 g/l at the surface to almost 400 g/l near the bottom. Landfill No. 2 - from 60-80 g/l at the surface to 400 g/l at the bottom. A test data from different years shows a change in density, total mineralization and dissolved salt content over time, especially in the upper part of the brine layer.

Samples of near-surface brine in the southern part of the Dombrowsky quarry in 1995 indicated mineralization of about 180 g/l and more, in 2010, about 130 g/l, in 2013, about 70 g/l, and in 2018 only about 25 g/l. It is due to the progressive flooding of the quarry with fresh water of atmospheric origin. If this process continues, the salt content will decrease, and the water will be close to slightly brackish. A steady decrease in solution mineralization is also occurring in the upper layers of brine in the settling ponds and the sludge tanks at the landfill. For over fifty years, highly mineralized solutions have been continuously released into the environment from all of these facilities and the overburdened dumps of the Dombrowsky quarry, seeping into the river network and aquifer.

Consequently, an area of saline groundwater has been formed in the aquifer near the city of Kałush, which is constantly growing, expanding in the southeast direction (Fig. 2). There is a risk of saline water reaching the city with corresponding negative consequences. At the moment, information about the actual state of the aquifer is fragmentary. However, the data obtained in recent years indicate a significant deterioration of the technological and ecological situation. In particular, according to the data of well No. 65, located a few hundred meters east of the Dombrowsky quarry and overburdened dumps, the mineralization of solutions in 2006 was less than 20 g/l, and at the end of 2018 – more than 105 g/l. A sharp increase in groundwater salinization began after the intensive



**Ryc. 1.** Odkrywka Dombrowski w Kałuszu. A-C – widok odsłoneń K-Mg soli przed zatopieniem (stan na wrzesień 2011 r.); A – seria surowca kainitowego; B – warstwa langbeinitu w skale kainitowo-langbeinitowej; C – bryła soli kainitowej; D - zatopiony kamieniołom, głębokość solanki w niektórych miejscach przekracza 100m (marzec 2021 r.); E - wykrystalizowany zimą mirabilite na brzegach zbiornika szlamu (marzec 2021 r.); F – tenardyt powstały z dehydratacji mirabilitu na brzegach składowiska odpadów przerobczych nr 1 (lipiec 2022 r.).

**Fig. 1.** The Dombrowski quarry in Kalush. A-C - view of outcrops of K-Mg salts before sinking (as of September 2011); A - kainite series; B - a layer of langbeinite in kainite-langbeinite rock; C - lump of kainite; D - sunken quarry, the depth of brine in some places exceeds 100m (as of March 2021); E - winter crystallized mirabilite on the banks of the slurry reservoir (as of March 2021); F - thenardite formed from dehydration of mirabilite in banks of tailings storage site No. 1 (as of July 2022).

ekologicznej. W szczególności, według danych odwiertu nr 65, położonego kilkaset metrów na wschód od kamieniołomu Dombrowski i zwałowisk nadkładu, mineralizacja roztworów w 2006 r. wyniosła poniżej 20 g/l, a na koniec 2018 r. – ponad 105 g/l. Gwałtowny wzrost mineralizacji wód gruntowych rozpoczął się po intensywnym zalaniu kamieniołomu Do-

flooding of the Dombrowsky quarry. Saline waters spread in the direction of the regional slope of the aquifer – towards the city of Kalush and, presumably, towards the city's water intake on the Limnytsia River (Fig.2).

The catastrophic environmental condition caused by the previous ineffective organization of the operations of the



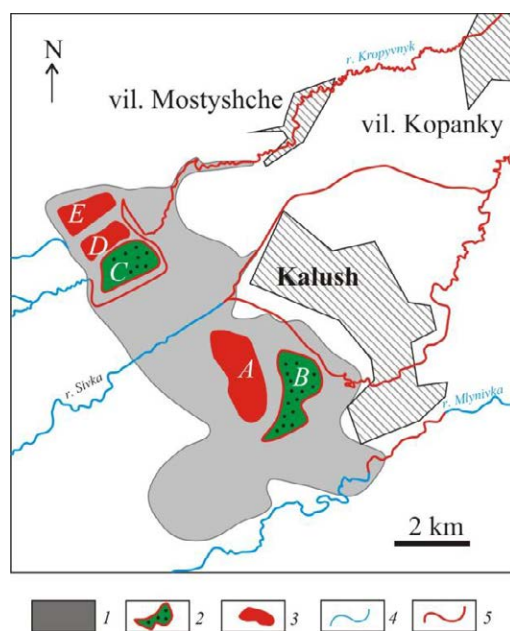
mbrovski. Wody zasolone rozchodzą się w kierunku regionalnego stoku poziomego wodonośnego w kierunku miasta Kałusz i przypuszczalnie w kierunku miejskiego ujęcia wody na rzece Limnytsia (Ryc. 2).

Katastrofalny stan środowiska spowodowany dotychczasową nieefektywną organizacją działalności zakładu potasowo-magnezowego Kałusz oraz wieloletnią bezczynnością w rozwiązywaniu problemów środowiskowych regionu, stanowi zagrożenie dla bezpiecznego życia ludzi. Najbardziej racjonalnym sposobem rozwiązania obecnej sytuacji kryzysowej w tej materii jest przeróbka nagromadzonych solanek z zaplecza technologicznego zakładu. Tego rodzaju prace będą skuteczne, gdy równolegle prowadzony będzie kompleks prac, mających na celu znaczne ograniczenie dopływu opadów atmosferycznych i wód wodonośnych do zagospodarowanej przestrzeni kamieniołomu Dombrovski oraz zapobieżenie przenoszeniu składników soli poza obiekty technologiczne.

W wyniku badań laboratoryjnych przeprowadzonych w Instytucie Badawczym „Halurgia” w Kałuszu opracowano technologię przetwarzania stężonych roztworów pochodzących z kamieniołomu Dombrovski. Gotowe produkty tej technologii to kalimagnezja o zawartości składników (w %):  $K_2O$  – 28.79%;  $MgO$  – 11.73%;  $SO_4^{2-}$  – 59.29%;  $Cl$  – 1.77% (suma składników  $K_2O + MgO = 60.3\%$ ) oraz sól techniczna najwyższej jakości oraz roztwór chlorku magnezu o zawartości  $MgCl_2$  co najmniej 25.0 %, który można wykorzystać do uzyskania spoiw magnezowych lub tlenku magnezu o wy-

Kalush potash and magnesium plant and many years of inaction in solving the region’s environmental problems threatens the safe existence of people. The most reasonable way to solve the current crisis in this matter is to process accumulated brine from the plant’s technological facilities. Such work will be effective when a complex of works is carried out in a parallel manner, aimed at significantly reducing the inflow of precipitation and aquifers into the developed space of the Dombrovsky quarry and preventing the transfer of salt components outside the technological facilities.

As a result of laboratory tests conducted at the Research Institute “Halurgia”, processing technology for concentrated solutions from the Dombrovsky quarry was developed. The finished products of this technology are calimagnesia with the content of components (in %):  $K_2O$  – 28.79%;  $MgO$  – 11.73%;  $SO_4$  – 59.29%;  $Cl$  – 1.77% (the sum of the components  $K_2O + MgO = 60.3\%$ ) and a technical salt of the highest quality and a solution of magnesium chloride with a concentration of  $MgCl_2$  of at least 25.0%.  $MgCl_2$  can be used to obtain magnesium binders or high-purity magnesium oxide, or crystalline bischofite. The extraction of potassium in calimagnesia is 90.0 %, magnesium – 36.4 %, and sulfate – 94.4 %. According to calculations, 10 m<sup>3</sup> of solution from the Dombrovsky pit will produce 1.1 t of calimagnesia, 2.3 t of industrial salt and 1.90 t of  $MgCl_2$  solution. There is no solid production waste. The proposed approach would make it possible to stop the progressive release of salt components



**Ryc. 2.** Układ zaplecza technologicznego złoża soli potasowo-magnezowych Kałusz-Hołyń (Sadovyi i in., 2022). Objasnienia: 1 – obszar zasolonych warstw wodonośnych; 2 – zrehabilitowane obiekty zasolone na powierzchni; 3 – zbiorniki z solankami; 4 – cieki wodne niezasolone, 5 – cieki wodne zasolone. A – kamieniołom Dombrovski; B – zwałowisko soli i skał nadkładu, C – składowisko odpadów przerobczych nr 1; D – zbiornik szlamu; E – staw osadnikowy, składowisko odpadów przerobczych nr 2.

**Fig. 2.** Layout of the technological facilities of the Kalush-Holyn potassium-magnesium salt deposit (Sadovyi et al., 2022). Explanations: 1 – an area of saline aquifers; 2 – reclaimed saline objects on the surface; 3 – saline reservoirs; 4 – non-saline watercourses; 5 – saline watercourses. A – Dombrovsky quarry; B – salt and overburden rock dump; C – tailings storage facility No. 1; D – sludge reservoir; E – settling pond, tailings storage facility No. 2.

sokiej czystości lub krystalicznego biszofitu. Odzyskiwanie potasu w kalimagnezji wynosi 90.0%, magnezu – 36.4%, a siarczanów – 94.4%. Według obliczeń z 10 m<sup>3</sup> roztworu z wyrobiska Dombrowskiego powstanie 1.1 t kalimagnezji, 2.3 t soli przemysłowej i 1.90 t roztworu MgCl<sub>2</sub>. Nie ma stałych odpadów produkcyjnych.

Zaproponowane podejście umożliwiłoby zatrzymanie postępującego procesu uwalniania składników soli do środowiska i uruchomienie produkcji przy jednoczesnym rozwiązaniu problemów środowiskowych i społeczno-gospodarczych miasta Kałusz.

Skuteczne rozwiązanie problemów środowiskowych spowodowanych nieefektywnymi technologiami rozwoju i przetwarzania surowców polimineralnych, a tym samym skrajnie nieracjonalne wykorzystanie zasobów soli potasowo-magnezowych złoża Kałusz-Hołyń (a także złoża Stebnik), otwiera możliwości rozwoju innych obiecujących obszarów na Przedkarpaciu i odrodzenie przemysłu potasowego w perspektywie długoterminowej. Będzie to ułatwione przez zastosowanie najnowszych technologii wydobywczych. W ostatnich latach w Instytucie Badawczym „Halurgia” opracowano kilka opcji schematów technologicznych przetwarzania złóż soli polimineralnych, które różnią się od stosowanych dotychczas technologii znacznie wyższym pozyskaniem składników użytecznych z surowców oraz brakiem konieczności budowy obiektów składowisk odpadów poflotacyjnych.

**Słowa kluczowe:** Odkrywka Dombrowski w Kałuszu, sole potasowo-magnezowe, problemy środowiskowe, problemy społeczno-ekonomiczne

into the environment and start production while solving the environmental and socio-economic problems of the city of Kalush.

The successful resolution of environmental problems caused by inefficient technologies for processing polymineral raw materials, and thus the highly irrational use of the potassium-magnesium salt resources of the Kalusz-Holyn deposit (as well as the Stebnik deposit), opens up opportunities for the development of other promising areas in the Forecarpathian region and the revival of the potash industry in the long term. This will be facilitated by the application of the latest mining technologies. In recent years, the Research Institute “Halurgia” has developed several options for technological schemes for the processing of polymineral salt deposits, which differ from the technologies used to date by significantly higher extraction of valuable components from raw materials and by not having to build tailings storage facilities.

**Key words:** Dombrowski quarry in Kalusz, potassium-magnesium salts, environmental problems, socio-economic problems

## LITERATURA/REFERENCES

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.

САДОВИЙ Ю. В., ГАЛАМАЙ А. Р., СИДОР Д. В. 2022. Екологічний стан та проблеми охорони водотоків у районі Калузького калійно-магнієвого заводу. XX Міжнародна науково-практична конференція „Ресурси природних вод карпатського регіону”. Проблеми охорони та раціонального використання. – Львів, Україна. – 26-27 травня 2022, 34–35.





# Przykłady współczesnego diapiryzmu związanego z eokambryjską formacją solonośną Ara w Omanie – miejsce rekomendowane dla przyszłych badań Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego

## Examples of recent diapirism related to the Eocambrian Ara Salt Formation in Oman – site recommended for future study by the Polish Salt Mining Association

Krzysztof BUKOWSKI<sup>1</sup>, Hubert KIERSNOWSKI<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa, Polska, e-mail: hubert.kiersnowski@pgi.gov.pl; hubert.kiersnowski@gmail.com

<sup>1</sup> AGH University of Science and Technology, Faculty of Geology, Geophysics and Environmental Protection, Av. Mickiewicza 30, 30-059 Cracow, Polska; e-mail: buk@agh.edu.pl

<sup>2</sup> The Polish Geological Institute - National Research Institute, Rakowiecka 4, 00-975 Warsaw, e-mail: hubert.kiersnowski@pgi.gov.pl; hubert.kiersnowski@gmail.com

Jeden z najgrubszych na świecie kompleksów soli kamiennych powstawał w okresie od późnego neoproterozoiku (ediacaru) do wczesnego kambru, czyli około 550 mln lat temu. W tym czasie, w okresie dawniej definiowanym jako eokambry będącym strefą przejściową między erą proterozoiczną a paleozoiczną, ewaporaty tworzyły się wzdłuż krawędzi superkontynentu Gondwany, w pobliżu ówczesnego równika (Warren, 2016). Obecnie sole tego wieku zostały rozpoznane na obszarze Iranu i Zatoki Perskiej (formacja Hormuz), Omanu i Kataru (formacja Ara), a także w Pakistanie (formacja Salt Range), północno-zachodnich Indiach (formacja Hanseran), ale także na Syberii (formacja Usolka) i w basenie Amadeus w Australii (Warren, 2016). Do najbardziej znanych wystąpień tych soli należą odsłaniające się na powierzchni wysady i lodowce solne w górach Zagros, zaliczone do formacji Hormuz, które były obiektem badań i obserwacji geologicznych przeprowadzonych podczas wyprawy Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego do Iranu w 2018 roku (Bukowski, 2020).

Celem tego krótkiego artykułu jest przedstawienie stosunkowo mało znanego i do tej pory szerzej nie opisywanego

One of the world's thickest rock salt complexes was formed between the late Neoproterozoic (Ediacaran) and early Cambrian, i.e., about 550 million years ago. During the period formerly defined as the Eocambrian (a transition zone between the Proterozoic and Paleozoic eras), evaporites formed along the edge of the Gondwana supercontinent near the then equator (Warren, 2016). Currently, salts of this age have been recognized in Iran and the Persian Gulf (Hormuz Formation), Oman and Qatar (Ara Formation), as well as in Pakistan (Salt Range Formation), northwest India (Hanseran Formation), but also in Siberia (Usolka Formation) and the Amadeus Basin in Australia (Warren, 2016). The most famous occurrences of these salts are exposed as diapirs, and salt glaciers in the Zagros Mountains, included in the Hormuz Formation, which were the subject of geological research and observations carried out during the Polish Salt Mining Association's expedition to Iran in 2018 (Bukowski, 2020).

The purpose of this short paper is to present the relatively little known and, so far, not described in the Polish geological literature, the Al-Hajar Mountains region and

go w polskiej literaturze geologicznej rejonu gór Al-Hadžar oraz wschodniej części pustyni Ar-Rab al-Chali w Omanie. Współcześnie na powierzchni można tam obserwować wierzchołki diapirów solnych należące do eokambryjskiej formacji solonośnej Ara. Wysady te często mają skomplikowaną budowę wewnętrzną i zawierają wyniesione na powierzchnię fragmenty głębokiego podłoża oraz skał przewarstwiających kompleksy solne. Prowadzone wiosną 2022 roku obserwacje terenowe w tym rejonie, mogą być zdaniem autorów pomocne w przygotowaniu w przyszłości kolejnej wyprawy Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego w celu kontynuowania badań złóż soli w Omanie.

Formacja Ara jest węglanowo - ewaporatową sekwencją zawierającą bardzo grube osady soli kamiennej dochodzących do 1000 metrów miąższości (Polasstro, 1999) oraz bardzo miąższe do nawet 150 m przewarstwienia skał węglanowych (Reuning 2009). Osady ewaporatowe powstawały w paleogeograficznie ograniczonych basenach sedymentacyjnych, podczas okresów relatywnie niskiego poziomu wód. W tych warunkach dochodziło do rozwarstwienia gęstościowego (stratyfikacji) solanki z okresowymi warunkami beztlenowymi w głębszych częściach, sprzyjającymi tworzeniu sedymentacji osadów bogatych w materię organiczną w obrębie utworów solnych. Osady te w formie przewarstwień w obrębie soli (ang. *stringers*) są często skałą macierzystą dla bogatych złóż ropy naftowej w tym rejonie (Polasstro, 1999). Współcześnie można je obserwować na powierzchni w strefie wychodni diapirów, gdzie w czapach wysadów tworzą pokrywy brekcji lub występują w postaci dużych wyciągniętych na powierzchnię wznoszących się ku górze „ławic” (ang. *rafts*) skał węglanowych. W niektórych wysadach skala tego zjawiska jest tak znaczna, że zostały nazwane górami (Jebel Mayjayiz).

W Omanie osady formacji Ara występują głównie w trzech basenach, z których dwa są zlokalizowane w centralnej części interioru (Ghaba Salt Basin, Fahud Salt Basin) oraz w trzeci największy zlokalizowany w południowej części kraju (South Oman Salt Basin).

Sześć wyłaniających się na powierzchni kopuł wysadów solnych jest rozrzuconych na pustynnych równinach środkowego Omanu w basenie solnym Ghaba (Ryc. 1). Wysady te po raz pierwszy zostały rozpoznane na zdjęciach lotniczych na początku lat 50-tych XX wieku. Później podczas poszukiwań ropy naftowej w tym rejonie, zostały one również badaniami terenowymi (Peters i in., 2003). Badania grawimetryczne wykazały, że w tym rejonie znajduje się jeszcze kilka innych struktur solnych nieprzebijających powierzchni, niektóre w formie poduszek solnych, kropli solnych oderwanych od podstawy diapiru, lub pionowych słupów solnych o wysokości do 9 km od jej pierwotnego położenia (Searle, 2019).

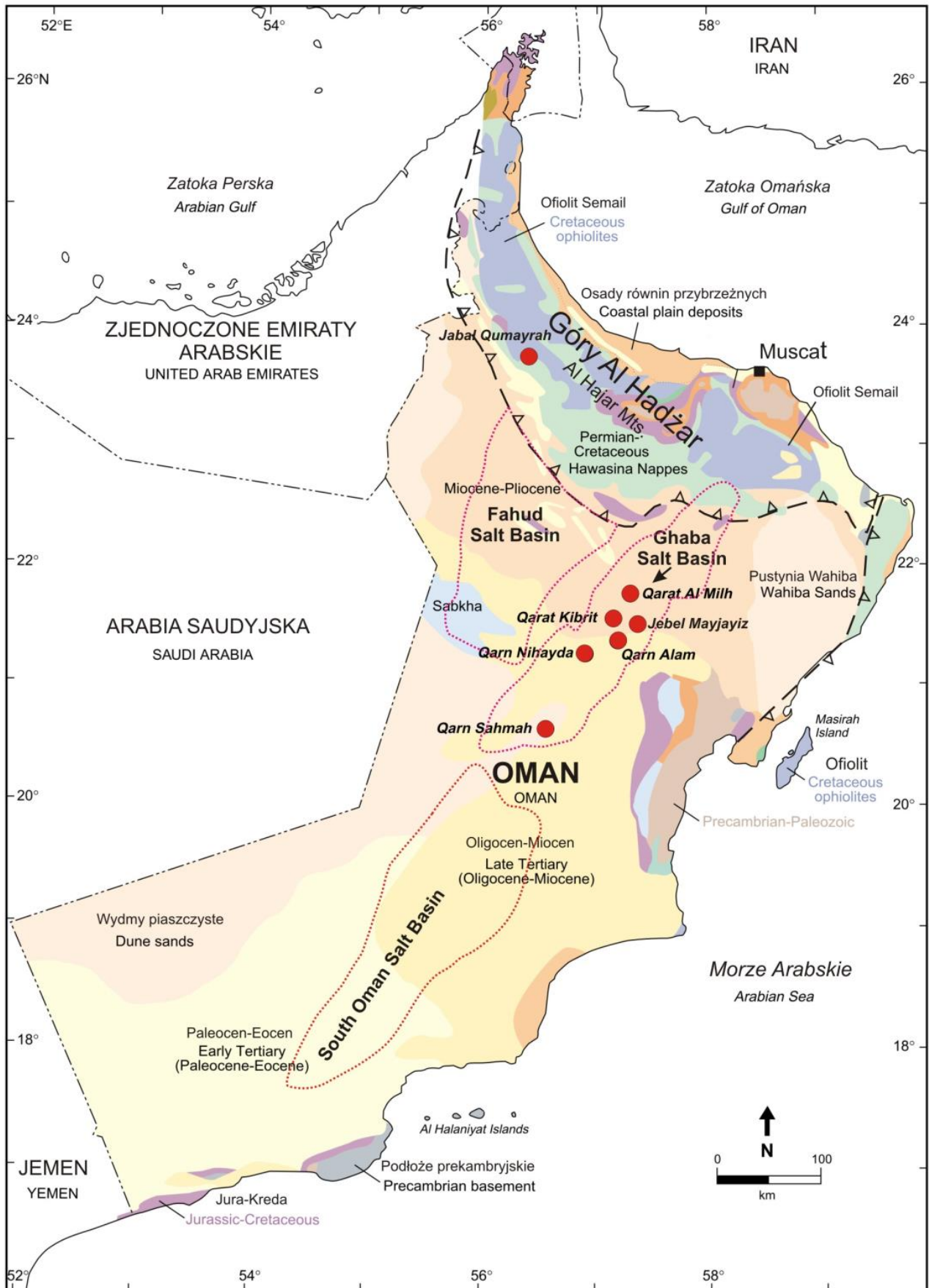
Podczas geologicznych badań powierzchniowych udało się dotrzeć do czterech z wysadów odsłaniających się na po-

the eastern part of the Ar-Rab al-Khali desert in Oman. Today, on the surface, one can observe the tops of salt diapirs belonging to the Eocambrian Ara Formation. These diapirs often have a complicated internal structure and contain elevated fragments of deep bedrock and rocks layering the salt complexes at the surface. The author's field observations in this area, conducted in the spring of 2022, may be helpful in the preparation of the next expedition of the Polish Salt Mining Association to continue research on salt deposits in Oman.

The Ara Formation is a carbonate-evaporite sequence containing very thick rock salt deposits reaching up to 1,000 meters in thickness (Polasstro, 1999) and very thicker, up to 150 m interlayer of carbonate rocks (Reuning 2009). These evaporative sediments were formed in restricted sedimentary basins during relatively low water levels. Under these conditions, density stratification of the brine occurred with periodic anaerobic conditions in the deeper parts, promoting the formation of sedimentation of organic matter-rich sediments within the salt formations. These sediments, in the form of stratified deposits within the salt (*stringers*), are often the source rock for the rich oil deposits in this area (Polasstro, 1999). Nowadays, they can be observed on the surface in salt dome outcrops, where they form breccia covers in the cap rock or the form of large carbonate rocks rising upwards to the surface. In some highlands, the scale of this phenomenon is so great that they have been called mountains (Jebel Mayjayiz). In Oman, Ara Formation sediments occur mainly in three basins, two of which are located in the central interior (Ghaba Salt Basin, Fahud Salt Basin) and the third largest is located in the southern part of the country (South Oman Salt Basin).

Six emerging salt domes are scattered across the desert plains of central Oman in the Ghaba salt basin (Fig. 1). These salt diapirs were first recognized in aerial photographs in the early 1950s. Later, during oil exploration in the area, they were also surveyed in the field (Peters et al., 2003). Gravitmetric studies have shown that there are several other non-surface-piercing salt structures in the area, some in the form of salt pillows, salt droplets detached from the base of the diapir, or vertical salt columns up to 9 km from their original position (Searle, 2019).

During geological surface surveys, four exposed salt domes have been reached: Qarat Kibrit, Qarn Alam, Jebel Mayjayiz and Qarat al-Milh. They are relatively small diapirs. One of the smallest is Qarat al-Kibrit (Arabic sulfur), a 700m x 500m diapir forming an elevation of up to 30m above the flat area of the Ghaba Basin and containing small exposures of rock salt (Fig. 2 A-C). The largest is Jebel Mayjayiz (3km x 1.5km), which forms hills over 60 meters high, formed by an accumulation of blocks and stringers, some of which contain visible stromatolite structures (Reun-



Ryc. 1. Uproszczona mapa geologiczna Omanu z zaznaczoną lokalizacją wysadów soli na powierzchni oraz zasięgami basenów solonośnych formacji Ara (wg Peters i in., 2003; Reuning i in., 2009, zmieniona).

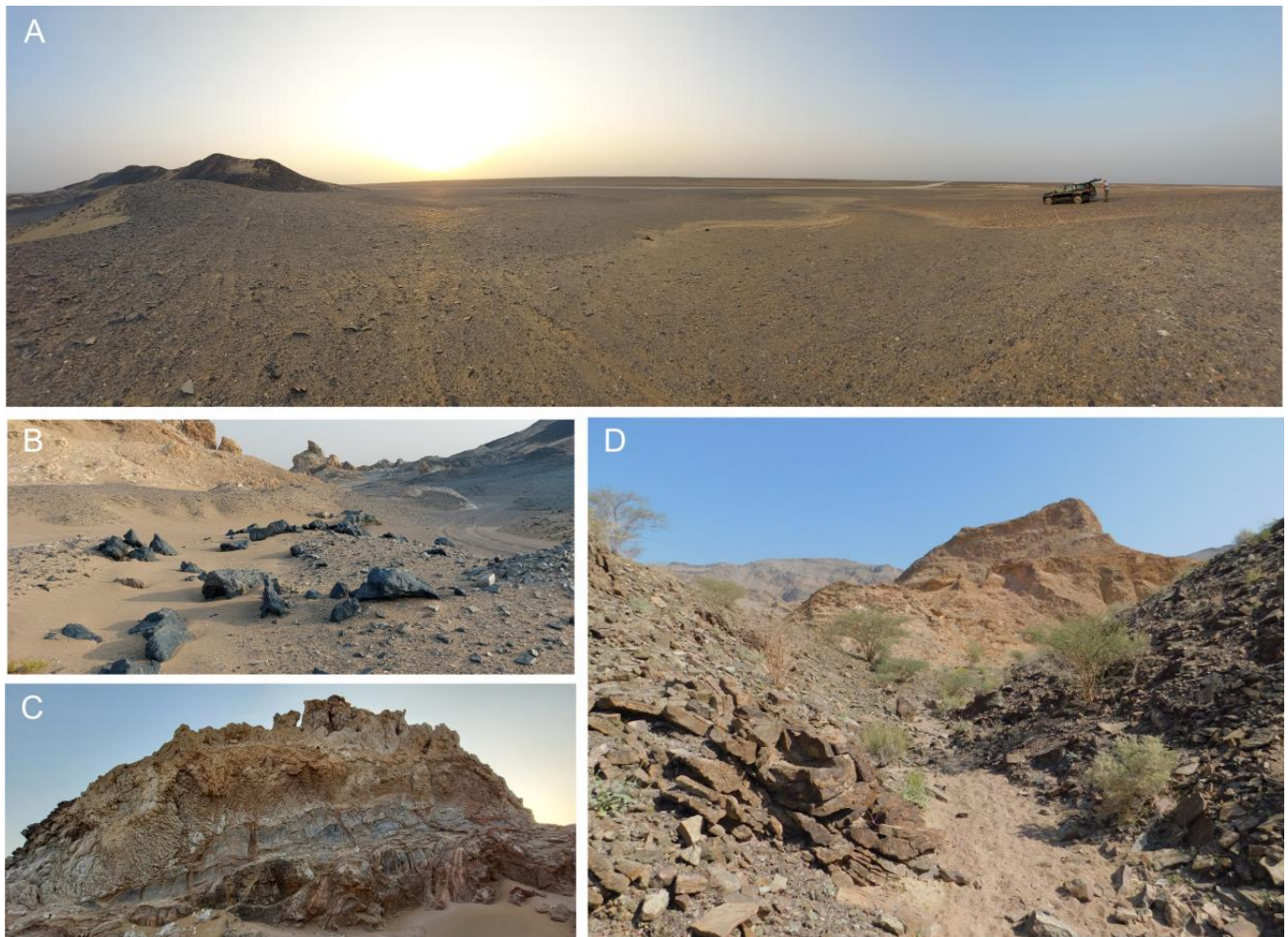
Fig. 1. A simplified geological map of Oman with the marked location of the salt domes on the surface and the ranges of the Ara salt basins (according to Peters et al., 2003; Reuning et al., 2009, revised).



wierzchni: Qarat Kibrit, Qarn Alam, Jebel Mayjayiz i Qarat al-Milh. Są to stosunkowo niewielkie diapiry. Jednym z mniejszych jest z Qarat Kibrit (*kibrit* arab. siarka) diapir o wymiarach 700m x 500m tworzący wzniesienie do 30 m wznoszące się ponad płaskim obszaru basenu Ghaba i zawierający niewielkie odsłonięcia soli formacji Ara (Ryc. 2 A-C). Największy jest Jebel Mayjayiz (3km x 1,5km), który tworzy wzgórze o wysokości ponad 60 metrów powstałe z nagromadzenia bloków i ławic wapieni (*stringers*), z których niektóre zawierają widoczne struktury stromatolitowe (Reuning i in., 2009). Większość występujących na powierzchni wysadów solnych wykazuje wyraźne ślady intensywnego rozpuszczania soli. Sugeruje to,

ing et al., 2009). Most of the salt domes on the surface show clear traces of intense salt dissolution. It suggests that at the time of their greater activity, their size and abundance were much more significant than today. As a result of the constant dissolution of salt on the surface, the proportion of insoluble rocks increased.

In the northern part of Oman, in the Al-Hajar Mountains, another surface diapir named Jabal Qumayrah (Lisail) was discovered relatively recently (Copper et al., 2013). Located in the inaccessible mountains north of Qumayrah, it is an example of allochthonous salts squeezed out by tectonic processes during the sliding and folding of Mesozoic rocks in



**Ryc. 2.** Wysady solne formacji Ara w Omanie. A- wysad soli Qarat Kibrit tworzy wzgórze o łagodnych zboczach. Czwartorzędowe stożki aluwialne na zboczach wysadu są lekko nachylone co wskazuje na ostatnią fazę wznoszenia się wysadu; B – proces rozpuszczania soli stopniowo pogłębia depresję w centrum wysadu Qarat Kibrit i jest wzmacniany drenażem wody kierowanej od brzegów do centrum wysadu podczas sporadycznych opadów. Na pierwszym planie widoczne bloki czarnych, laminowanych wapieni, egzotyków, pochodzących z formacji Ara (tzw. stringers); C – wychodnia białych, szarych i różowych, pasiastych, soli formacji Ara przykrytych skrasowiałą powierzchnią skał gipsowo-anhydrytowo-klastycznych (czapa wysadu), Qarat Kibrit.; D – wysad solny Jabal Qumayrah (Lisail) w centrum. Jasno-kremowy masyw wysadu zbudowany głównie ze skał gipsowo-anhydrytowych wyraźnie odcinający się na tle ciemnoszarych wapieni kredowych.

**Fig. 2.** Ara salt domes in Oman. A- the Qarat Kibrit salt dome forms a hill with gentle slopes. Quaternary alluvial fans on the slopes of the dome are slightly sloping, which indicates the last ascent phase of the diapir's history; B – the process of salt dissolution gradually deepens the depression in the centre of the outcrop of Qarat Kibrit, reinforced by the inflow of meteoric water diverted from the banks to the centre during sporadic rainfall. In the foreground are blocks of black laminated limestone exotics from the Ara Formation (*stringers*); C – an outcrop of banded white, grey and pink Ara salts covered by a fractured layer of gypsum-anhydrite-clastic rocks (*cap rock*), Qarat Kibrit; D – Jabal Qumayrah (Lisail) salt dome in the centre. Light cream-coloured massif mainly of gypsum-anhydrite rocks stands out against the dark grey Cretaceous limestones.

że w czasie ich największej aktywności zarówno ich wielkość jak i rozpowszechnienie było znacznie większe niż obecnie, a także w wyniku stałego rozpuszczania soli na powierzchni, wzrastał wyraźnie udział skał nierozpuszczalnych.

W północnej części Omanu w górach Al-Hadžar stosunkowo niedawno (Copper i in., 2013) został odkryty jeszcze jeden wysad na powierzchni nazwany Jabal Qumayrah (Lisail). Zlokalizowany jest on w stosunkowo trudno dostępnych górach na północ od miejscowości Qumayrah stanowi przykład allochtonicznych soli wyciśniętych w procesie tektonicznym w trakcie nasuwania i fałdowania skał mezozoicznych w brzeżnej strefie nasunięcia ofiolitu Semail. Obecnie na powierzchni zachowała się głównie czapa wysadu składająca się ze skał gipsowo-anhydrytowych i wapieni z przewarstwieniami piaskowców i mułowców pochodzących z porwaków skał w obrębie soli (Ryc. 2D). W obrębie wysadu nie stwierdzono powierzchniowych odsłoneń samej soli kamiennej. W pobliżu wysadu występują jeszcze szereg mniejszych odsłoneń skał ewaporatowych oraz słone źródła, od których pochodzi nazwa doliny Wadi Milh (arab. sól). Obecnie jedno z nich jest ciągle czynne, a wykonana analiza chemiczna wypływającej solanki wykazała zasolenie 25 g/l (zbliżone do zasolenia wody morskiej). W tym rejonie występują również niewielkie wystąpienia siarki rodzimej.

**Słowa kluczowe:** formacja solonośna Ara, Oman, góry Al.-Hadżar, wysady solne

the marginal zone of the Semail ophiolite nappe. The surface mainly preserves a cap rock consisting of gypsum-anhydrite rocks and limestone with interbeds of sandstone and siltstone as xenoliths within the salt (Fig. 2D). No surface exposures of rock salt were found within the salt dome. Several smaller outcrops of evaporite rocks are still in the vicinity, and the salt springs gave the valley its name, Wadi Milh (Arabic - salt). One of them is still active, and chemical analysis of the outflowing brine showed a salinity of 25 g/l (close to that of seawater). There are also minor occurrences of native sulfur in the area.

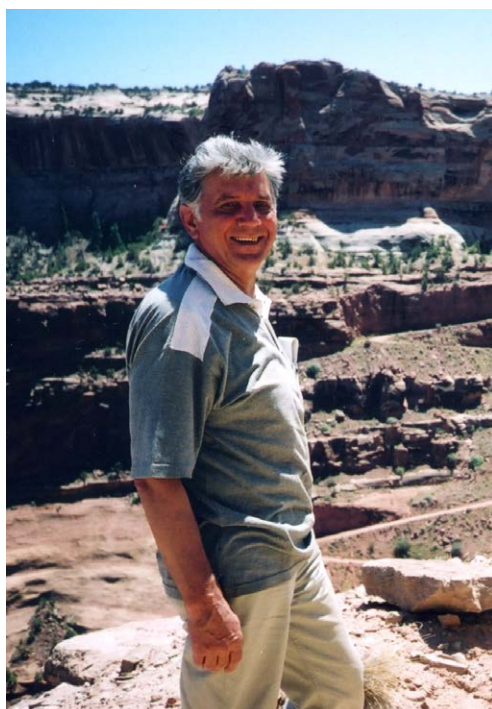
**Key words:** Ara salt formation, Oman, Al.-Hadżar Mountains, salt domes.

## LITERATURA/REFERENCES

- BUKOWSKI K. 2020. Procesy geomorfologiczne na wybranych wysadach soli w pasie fałdowo-nasuwczym gór Zagros w Iranie. *Przegląd Geologiczny*, 68, 3: 167–177.
- COOPER D.J.W., SEARLE M.P., ALI M.Y. 2013. Salt intrusions in Jabal Qumayrah, northern Oman Mountains: implications from structural and gravity investigations. *GeoArabia* 18:141 – 176.
- PETERS J.M., FILBRANDT J.B., GROTZINGER J.P., NEWALL M.J., SHUSTER M.W., AL-SIYABI H.A. 2003. Surface-piercing salt domes of interior North Oman and their significance for the Ara carbonate “stringer” hydrocarbon play. *GeoArabia*, 8:231 – 270.
- Pollastro R.M. 1999. Ghaba Salt Basin Province and Fahud Salt Basin Province, Oman -- Geological Overview and Total Petroleum Systems. U.S. Geological Survey Open-File Report 99-50-D.
- REUNING L., SCHOENHERR J., HEIMANN A., URAI J.L., LITTKER R., KUKLA P.Z. RAWAHI Z. 2009. Constraints on the diagenesis, stratigraphy, and internal dynamics of the surface-piercing salt domes in the Ghaba Salt Basin (Oman): A comparison to the Ara Group in the South Oman Salt Basin. *GeoArabia*, 14, 3: 83-120.
- Searle M. 2019. *Geology of the Oman Mountains, Eastern Arabia*. Springer International Publishing.
- Warren J.K. 2016. *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

## II. KOMUNIKATY / NOTICES

### Profesor Volodymyr Mychailovych Kovalevych



(1941–2021)

Profesor Volodymyr Mychailovych Kovalevych, uznany ukraiński autorytet naukowy w dziedzinie geochemii, litologii, mineralogii, specjalizujący się w badaniach warunków fizykochemicznych powstawania i diagenety różnych osadów (głównie ewaporatów), odszedł 18 kwietnia 2021 r. we Lwowie.

Profesor był czołowym pracownikiem naukowym Zakładu Geochemii Warstw Osadowych Prowincji Naftowo-Gazowych Instytutu Geologii i Geochemii Mineralów Palnych Narodowej Akademii Nauk Ukrainy z siedzibą we Lwowie gdzie pracował aż do odejścia na zasłużoną emeryturę w 2010 r. Jego fundamentalne prace naukowe są poświęcone rekonstrukcji składu chemicznego wód oceanicznych w fanerozoiku na podstawie badań płynnych inkluzji w halicie, występującym w morskich formacjach ewaporatowych. Prace te wniosły istotny wkład w światowy stan wiedzy o ewolucji składu wód oceanicznych w przeszłości geologicznej Ziemi.

Wołodmyr Kovalevych urodził się 5 stycznia 1941 r. w okręgu Iwano-Frankowskim w górskiej wsi Wierchnij Strutyń w obwodzie Roźniatowskim. W 1966 r. został zatrud-

Professor Volodymyr Mychailovych Kovalevych, the recognized Ukrainian authority in geochemistry, lithology and mineralogy, the specialist in study of physico-chemical condition of sediments generation and diagenesis (especially evaporates), left us on 18. April 2021 in Lvov.

Professor was the prominent scientist of the Department of Deposits of Oil-Gas Provinces in the Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of the Ukrainian National Academy of Sciences (IG&GCM UNAS) in Lvov, where He was employed until being retired in 2010. His fundamental works concentrated on reconstruction of oceanic waters chemical composition during Phanerozoic, based on studies of fluid inclusions captured in halite crystals from marine evaporitic formations. These papers became the significant input in the knowledge on evolution of oceanic water composition in the Earth geological history.

Wołodmyr Kovalevych was born on 5. January 1941 in the Ivano-Frankovsk area in small mountain village Vierchnij Strutyń, located in the Rozniatov district. In 1966 He was employed in the IG&GCM UNAS in Lvov. His post-diploma



niony w Instytucie Geologii i Geochemii Mineralów Palnych Narodowej Akademii Nauk Ukrainy (IGiGMP NANU) we Lwowie. Jego studia podyplomowe (lata 1972–1975) przypadły na okres wdrożenia nowego kierunku badań - badanie wzorców geochemicznych i warunków fizykochemicznych powstawania ewaporatów. W tym czasie rozpoczął pracę w dziale budowy geologicznej solnych prowincji naftowych i gazowych. Nawiązał wówczas wieloletnią przyjaźń i twórczą współpracę z profesorem Olegiem Yosypovyczem Petrychenko, która zaowocowała opracowaniem nowej metody badań termo-baro-geochemicznych osadów solnych. Zastosowanie nowoczesnych metod badań geochemicznych i litologicznych, w tym unikatowej - ultramikrochemicznej analizy solanek w ciekłych inkluzjach, opracowanej przez profesora O. Petrychenko w 1973 r. - pozwoliło V. Kovalevychowi uzyskać nowy materiał faktograficzny na temat warunków powstawania miocenów ewaporatów depresji Przedkarpaciej, przedstawiony w pracy doktorskiej (doktorat w dziedzinie nauk geologicznych i mineralogicznych, 1976 r.) pt. *Wybrane cechy geochemiczne i warunki fizykochemiczne powstania solnej formacji Vоротishche regionu Prekarpacia* oraz w monografii pt. *Warunki fizykochemiczne powstawania soli złoża soli potasowych Stebnik* (1978).

Badania inkluzji w minerałach ewaporatów cieszą się coraz większą popularnością wśród geologów solnych, a do IGiGMP NANU napływały coraz liczniej próbki soli z różnowiekowych formacji solnych z całego świata. Wieloletnie badania składu wtrąceń w minerałach z tych próbek pozwoliły zgromadzić ogromną bazę danych, umożliwiającą opracowanie wzorców formowania osadów solnych i ustalenie zmian składu chemicznego solanek morskich basenów ewaporatowych w neoproterozoiku i fanerozoiku. Powyższe osiągnięcia przedstawiono w obszernej rozprawie naukowej pt. *Ewolucja morskich osadów solnych i składu chemicznego oceanów w fanerozoiku* (1990 r.), na podstawie której w 1991 r. przyznano dr V. Kovalevychowi stopień doktora habilitowanego. Badania ewolucji skał osadowych i składu chemicznego wód oceanicznych w historii Ziemi mają wymiar w teoretyczny i praktyczny, stanowiąc istotny element prac IGiGMP NANU w problematyce geologiczno-geochemicznej paleoceanografii dawnych obszarów kontynentalnych i ich zasobów mineralnych.

Profesor Wołodmyr Kovalevych uczestniczył w badaniach geochemicznych ewaporatów w Europie Środkowej i Zachodniej we współpracy z naukowcami z Polski, Rosji, Słowacji, Szwajcarii, Holandii, Niemiec, Hiszpanii i Stanów Zjednoczonych. Zagraniczny świat naukowy docenił wysoki poziom merytoryczny badań geochemicznych Wołodmyra Kovalevycha, o czym świadczą jego liczne publikacje w prestiżowych periodykach zagranicznych oraz udział w międzynarodowych forach naukowych. Istotny wkład w ukraiński i światowy dorobek naukowy doceniono przyznając Mu w 2007 r. tytuł profesora.

studies (1972–1975) coincided the introducing there the new investigations option – study of geochemical standards and physico-chemical conditions of evaporates generation. Then He worked in the Division of Geological Structure of Salt Oil-Gas Provinces and started to cooperate with the professor Oleg Yosypovych Petrychenko, elaborating together the new method of thermo-baric-geochemical analysis of salt deposits. The modern methods of geochemical and lithological investigations – especially the unique ultra-microchemical analysis of brines from fluid inclusions invented by professor O. Petrychenko in 1973 – supplied a lot of new data on generation conditions of Miocene marine evaporites from the Fore-Carpathian depression. These materials were presented by V. Kovalevych in His PhD thesis (PhD in geological and mineralogical sciences, 1976) titled *Selected geochemical features and physico-chemical conditions of the Vоротishche formation from Fore-Carpathian region as well as in the monography titled Physico-chemical conditions of the Stebnik potash deposit origin* (1978).

Inclusions study in minerals from evaporates are more frequently use by salt geologists and the IG&GCM UNAS in Lvov received numerous salt samples from salt formations of various age and world locations. Many year's studies of inputs composition from them finalized with the rich data base enabled to elaborate the standards salt deposits generation and to define the changes of chemical composition in brines characteristic for marine evaporitic basin during the Neo-Proterozoic and from Phanerozoic. The results of these studies were presented in the paper titled *Evolution of marine salt deposits and chemical composition of ocean waters in Phanerozoic* (1990), after which to V. Kovalevych was conferred in 1991 the degree of Associate Professor. Investigations of deposits evolution and chemical composition of oceanic waters in the Earth play both theoretical and practical role in the projects carried on by IG&GCM UNAS in Lvov, focused on geological-geochemical aspects of palaeoceanography of former continental margins and their mineral resources.

Professor Wołodmyr Kovalevych participated in geochemical studies of evaporates from Middle and West Europa cooperating with scientists from Poland, Russia, Slovakia, Switzerland, Netherlands, Germany, Spain and United States. He presented their results in numerous publications published in prestige foreign journals and during international meetings. His scientific achievements was honoured in 2007 with the real professor title.

During 45 years of scientific activity Professor Wołodmyr Kovalevych prepared two monographs and 150 papers, published in Ukrainian and international journals and thematic series as well as lectures presented during over 20 international conferences and symposia. He promoted three the PhDs and was the reviewer of several PhD theses,

Dorobek naukowy Profesora w okresie 45 lat aktywnej pracy twórczej obejmuje dwie monografie i 150 publikacji naukowych, zamieszczonych w ukraińskich i międzynarodowych czasopismach i zbiorach tematycznych, ponadto główne wyniki prowadzonych przez Niego badań przedstawiono podczas ponad 20 międzynarodowych konferencji i sympozjów. Profesor był promotorem 3 doktoratów i recenzentem w szeregu innych oraz wieloletnim członkiem rady redakcyjnej czasopisma *Geology and Geochemistry of Combustible Minerals*.

W osobie Profesora środowisko „solarzy” utraciło wspańniętego, życzliwego człowieka i wybitnego specjalistę w niełatwej dziedzinie geochemii i warunków powstawania formacji solnych, zawsze gotowego służyć Swoją wiedzą i pomocą w rozwiązywaniu trudnych problemów geologii tych utworów.

*Oksana Stupka i Andrej Poberezhskyy*  
Instytut Geologii i Geochemii Mineralów Palnych  
Narodowej Akademii Nauk Ukrainy, Lwów

*Tłumaczenie Grzegorz Czapowski*

moreover He was for many years the member of editorial board of the journal *Geology and Geochemistry of Combustible Minerals*.

Professor Volodymyr Kovalevych was the excellent specialist in geochemistry and genesis of salt formations and privately - the splendid, familiar person, always ready to help others with His experience and knowledge in solving the difficulties in salt geology. “Salt” society, both Ukrainian and international ones, lost with Him the very important authority.

*Oksana Stupka and Andrej Poberezhskyy*  
the Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of the Ukrainian National Academy  
of Sciences, Lvov

*Translated by Grzegorz Czapowski*

## INSTRUKCJA DLA AUTORÓW

Teksty nadsyłane do Redakcji Przeglądu Solnego będą zamieszczone w dwóch rozdziałach:

### I. Artykuły

### II. Komunikaty, wydarzenia, opinie

#### I. Artykuły

1. Tytuł w języku polskim i angielskim, czcionką Times New Roman 14
2. Pełne imiona i nazwiska (kapitałkami) wszystkich autorów, np.:  
Marek KOWALSKI<sup>1</sup>, Jacek NOWAK<sup>2</sup>, Iwona ROŚ<sup>2</sup>
3. Afiliacje autorów czcionką Times New Roman 11, np.:  
<sup>1</sup>IKS Solino S.A. ul. Św. Ducha 26a, 88-100 Inowrocław.  
E-mail: m.kowal@wp.pl  
<sup>2</sup>Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górniczo-Hutniczy i Geoinżynierii,  
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków. E-mail: nowak@agh.edu.pl
4. Tekst artykułu napisany czcionką Times New Roman 12 obejmujący:
  - a. streszczenie i słowa kluczowe w języku polskim i angielskim,
  - b. treść w języku polskim i angielskim, zawierająca podstawowe człony: wstęp, metody badań, wyniki badań, wnioski,
  - c. podsumowanie (Summary) w j. polskim i angielskim z cytacją wszystkich rycin i tabel zawartych w teście,
  - d. alfabetyczny wykaz cytowanych pozycji literatury,
  - e. spis rycin w j. polskim i angielskim,
  - f. spis tabel w j. polskim i angielskim.

Uwaga!

  - W tekście pisanym po polsku, autorów innych publikacji należy cytować używając wyłącznie polskich znaków i przecinków! Np. (Smith i in., 2013), (Kowalski, Plana, 2014).
  - W j. angielskim należy używać angielskich znaków i przecinków, np.: (Smith at al., 2013), (Kowalski & Plana, 2014).

#### 5. Ryciny.

Nazwa ryciny (Ryc., ang. Fig.) obejmuje zdjęcia, wykresy, diagramy, itp. Rycina powinna być włączona w tekst oraz dołączona jako załącznik, zapisany w programie Corel Draw w wersji nie nowszej niż X5 lub w plikach TIF, BMP, JPG, PDF w rozdzielczości min. 300 dpi. Opisy rycin należy podać w j. polskim i angielskim (*kursywą*), numeracja cyframi arabskimi np.:

Ryc. 2. Profil litostratygraficzny.....

Fig. 2. Lithostratigraphic profile.....

Tekst wewnątrz rycin musi być napisany w j. polskim i angielskim (*kursywą*)

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 / Referencje.

W spisie literatury mogą być zamieszczane wyłącznie pozycje cytowane w tekście. Dla listowanej publikacji należy podać kolejno: nazwiska i inicjały imion wszystkich autorów, rok wydania pracy, tytuł pracy, nazwę czasopisma (*kursywą*), numer tomu, numer zeszytu (w nawiasie), strony. W przypadku opracowań archiwalnych należy podać miejsce przechowywania opracowania i jego numer archiwalny. Np.:

#### LITERATURA / REFERENCES

BURNS P.C., CARPENTER M.A., 1996. Phase transitions in the series boracite – trembathite – congolite: phase relations. *Canadian Mineralogist* 34 (12): 881–892.

CHARYSZ W., 1973. Cechy geologiczne piętrowości soli młodszych w regionie kujawskim. *Prace Geologiczne*, 75: 7-67.

CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., MISIEK G., 2007. Podział i występowanie górnopernskich skał zubrowych w Polsce. Materiały XII Sympozjum Solnego pt. „Przemysł solny w gospodarce”. Kłodawa, 11-12 października 2007 r. Abstrakt: 31-33.

### II. Komunikaty, wydarzenia, opinie.

Treści zawarte w tym rozdziale mają charakter informacyjny o wydarzeniach w polskim i światowym górnictwie solnym (informacje o konferencjach, wyprawach naukowych, notki biograficzne, krótkie recenzje itp.). Nie wymagany jest tu układ tekstu jak w przypadku artykułu, np. streszczenie, wstęp, słowa kluczowe itp. Format tekstu jak w artykule.

#### Uwagi końcowe

Redakcja Przeglądu Solnego wymaga od autorów rzetelnego cytowania osiągnięć wcześniejszych badaczy w zakresie tematyki składanych do opublikowania opracowań oraz respektowania podanych wyżej reguł cytacji i listowania literatury. 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. *Invest-gas 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.