XXX MIĘDZYNARODOWE SYMPOZJUM SOLNE

International Salt Symposium

QUO VADIS SAL



GÓRNICTWO SOLNE: PRZESZŁOŚĆ, TERAŹNIEJSZOŚĆ I PRZYSZŁOŚĆ

Salt Mining: Past, Present and Future

WIELICZKA, BOCHNIA, 14-16 PAŹDZIERNIKA 2026

PSGS

BOCHNIA • 1248 • KOPALNIA SOLI • 1248

QUO VADIS SAL BOCHNIA 2026

www.psgs.org.pl

sympozjum@psgs.org.pl

XXX Międzynarodowe Sympozjum Solne
International Salt Symposium



QUO VADIS SAL

WIELICZKA, BOCHNIA

14–16.10.2026

Górnictwo solne: przeszłość, teraźniejszość i przyszłość

Salt Mining: Past, Present and Future

XXX Międzynarodowe Sympozjum Solne
International Salt Symposium

Zakres tematyczny / *Symposium Topics*:

Tematy przewodnie:

- **Światowe i krajowe zasoby soli:**
  - sole kamienne;
  - sole potasowo-magnezowe.
- **Geologia w górnictwie solnym:**
  - dokumentowanie budowy geologicznej;
  - określenie zasobów;
  - prognozowanie miejsc eksploatacji.
- **Techniki/technologie pozyskiwania soli:**
  - ewaporacja naturalnych solanek (warzelnictwo);
  - klasyczna eksploatacja podziemna;
  - eksploatacja otworowa.
- **Zagrożenia w eksploatacji soli: rodzaje, metody prognozowania i zapobiegania.**
- **Kierunki i perspektywy rozwoju górnictwa solnego:**
  1. pozyskiwanie soli/solanki;
  2. magazynowanie (kawerny magazynowe);
  3. składowanie (wyrobiska składowiskowe);
  4. edukacja (muzealnictwo, kultywowanie/propagowanie tradycji górniczych);
  - turystyka;
  - lecznictwo.

Leading topics:

- ***Global and domestic salt resources:***
  - *rock salts;*
  - *potassium-magnesium salts*.
- ***Geology in salt mining:***
  - *geological documentation;*
  - *resource estimation;*
  - *forecasting mining areas*.
- ***Salt extraction techniques and technologies:***
  - *evaporation of natural brines*.
  - *conventional underground mining;*
  - *solution mining*.
- ***Mining hazards in salt mining: types, prediction, and prevention methods.***
- ***Directions and prospects for salt mining development:***
  5. *salt/brine extraction*.
  6. *storage (storage caverns);*
  7. *storage (landfill pits);*
  8. *education (museums, cultivation/promotion of mining traditions).*
  - *tourism;*
  - *healthcare*

Organizatorzy / *The Organizers*

Polskie Stowarzyszenie Górnictwa Solnego

Kopalnia Soli Bochnia Sp. z. o. o.

Partnerzy / *The Partners*

KGHM Polska Miedź S.A.

Kopalnia Soli „Kłodawa” S.A.

Operator Gazociągów Przesyłowych
GAZ-SYSTEM S.A.

Kopalnia Soli „Wieliczka” S.A.

Ośrodek Badawczo-Rozwojowy
Górnictwa Surowców Chemicznych
„CHEMKOP” sp. z o.o.

Patronat honorowy / *Honorary Patronage*

Minister Klimatu i Środowiska

Minister of Climate and Environment

Prezes Wyższego Urzędu Górniczego

President of the State Mining Authority

Komitet Naukowy / *Scientific Committee*

dr hab. Stanisław Burliga – Uniwersytet Wrocławski

dr hab. Grzegorz Czapowski – PIG-PIB Warszawa

dr hab. inż. Katarzyna Cyran – AGH w Krakowie

dr hab. inż. Tomasz Toboła – AGH w Krakowie

Komitet Organizacyjny / *Organizing Committee*

dr hab. inż. Wacław Andrusikiewicz, PSGS / AGH w Krakowie

mgr inż. Krzysztof Zięba, Kopalnia Soli Bochnia Sp. z. o. o.

mgr inż. Grażyna Meisel, PSGS

dr inż. Justyna Nowińska-Jarzębińska, PSGS

mgr inż. Paulina Cyran, PSGS / OBRGSChem „CHEMKOP" Sp. z o. o. / AGH w Krakowie

mgr inż. Katarzyna Bajda, PSGS, AGH w Krakowie

mgr inż. Mateusz Piotrowicz, OBRGSChem „CHEMKOP" Sp. z o. o.

inż. Julia Piestrzyńska, AGH w Krakowie

Redakcja tomu konferencyjnego i projekt graficzny / *Editor and graphic design*

mgr inż. Paulina Cyran, PSGS / OBRGSChem „CHEMKOP" Sp. z o. o. / AGH w Krakowie

Projekt logo / *Logo design*

mgr inż. Piotr Skubisz, OBRGSChem „CHEMKOP" Sp. z o. o.

PROGRAM SYMPOZJUM 2026
SYMPOSIUM PROGRAMME 2026

Środa, 14.10.2026 ***Wednesday, 14.10.2026***		
13:00 – 15:00	Rejestracja uczestników Sympozjum w Hotelu „SORAY" w Wieliczka *Registration of participants for the Symposium at the „SORAY" Hotel in Wieliczka*	
15:00 – 15:30	Uroczyste otwarcie konferencji, powitanie uczestników i Gości przez: Gospodarza – Prezesa Zarządu Kopalni Soli Bochnia Sp. z o.o. Organizatora – Prezesa Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego *Official opening of the conference, welcoming of participants and Guests by:* *The Host – President of the Management Board of Bochnia Salt Mine* *The Organizer – President of the Polish Association of Salt Mining*	
15:30 - 18:20 - SESJA PLENARNA ***PLENARY SESSION*** Kierunki i perspektywy rozwoju górnictwa solnego *Directions and prospects for salt mining development* **18:20 - 19:20 - SESJA POSTEROWA** ***POSTER SESSION*** **HOTEL „SORAY" WIELICZKA** ***„SORAY" HOTEL IN WIELICZKA***		
15:30 – 15:50	JACEK WACHOWIAK 30-lecie Quo Vadis Sal *30th Anniversary of Quo Vadis Sal*	16
15:50 – 16:10	WACŁAW ANDRUSIKIEWICZ Polskie górnictwo solne wczoraj, dziś i jutro *Polish salt mining: yesterday, today and tomorrow*	23
16:10 – 16:30	ANDRZEJ SADOWSKI, TOMASZ KROKOS, GRZEGORZ BARTŁOMIEJCZAK Kopalnia Soli Kłodawa – od eksploatacji surowca do odpowiedzialnego zagospodarowania przestrzeni poeksploatacyjnej *Kłodawa Salt Mine – from mineral extraction to the responsible management of mined-out voids*	33
16:30 – 16:50	ROBERT LESZCZYŃSKI, MAŁGORZATA SPIAK Pomorski polihalit – szansa na nowe górnictwo solne w Polsce *Pomeranian polyhalite: an opportunity for a new salt mining industry in Poland*	37
16:50 – 17:10	Przerwa kawowa *Coffee break*	

17:10 – 17:30	DAMIAN KURDEK, ALEKSANDRA KARBOWSKA, AGNIESZKA MALINOWSKA Cyfrowy bliźniak Kopalni Soli „Kłodawa" S.A. jako infrastruktura danych dla bezpieczeństwa eksploatacji i przyszłego wykorzystania przestrzeni solnej *Digital twin of the "Kłodawa" Salt Mine as a data infrastructure for operational safety and future use of salt underground spaces*	38
17:30 – 17:50	AGATA PONTEK Potencjał rozwojowy krajowego górnictwa solnego, w uwarunkowaniach transformacji energetycznej oraz w perspektywie celów Polityki Energetycznej Polski do 2040 r., na przykładzie możliwości zagospodarowania wysadu Goleniów *The development potential of domestic salt mining in the context of the energy transition and the objectives of the energy policy of Poland until 2040, exemplified by the development possibilities of the Goleniów salt dome*	40
17:50 – 18:10	KAZIMIERZ URBAŃCZYK 50 lat nad modelowaniem ługowania kawern solnych *50 years of work on modeling salt cavern leaching*	41
18:10 – 18:20	KAZIMIERZ URBAŃCZYK O pewnym plagiacie, czyli jak (nie) korzystać z AI *On a case of plagiarism, or how (not) to use AI*	44
18:20 – 19:20	Sesja posterowa *Poster Session*	
20:00	Uroczysta kolacja *Gala Dinner*	
Czwartek, 15.10.2026 ***Thursday, 15.10.2026***		
09:00 - 12:00 - I SESJA REFERATOWA ***Ist ORAL SESSION*** Zasoby soli *Salt resources* Geologia w górnictwie solnym *Geology in salt mining* **HOTEL „SORAY" WIELICZKA** ***„SORAY" HOTEL IN WIELICZKA***		
09:00 – 09:20	JOANNA JAWORSKA Porwaki skał cechsztyńskich w czapach wysadów (na przykładzie Polski i Niemiec) *Zechstein rock stringers in salt diapir cap-rocks: examples from Poland and Germany*	46

09:20 – 9:40	GRZEGORZ CZAPOWSKI, MARTA HODBOD Zapomniane sole triasu w Polsce – występowanie i wykształcenie *Forgotten triassic rock salts in Poland – occurrence, characteristics and genesis*	49
9:40 – 10:00	STANISŁAW BURLIGA, SLAVOMÍR NEHYBA Złoża gipsu w zachodniej części zapadliska przedkarpackiego *Gypsum deposits in the western part of the carpathian foredeep*	54
10:00 – 10:20	KAROL DURKOWSKI Relacje anhydryt dolny - mineralizacja polihalitowa - perspektywy przyrostu zasobów soli potasowo-magnezowych w cechsztynie Wyniesienia Łeby (Rejon Pucka) *Lower anhydrite – polyhalite mineralization – prospects for increasing potash-magnesia salt resources in the Zechstein of the Łeba High*	56
10:20 – 10:40	Przerwa kawowa *Coffee break*	
10:40 – 11:00	ANATOLIY R. GALAMAY, KRZYSZTOF BUKOWSKI, JURYIJ V. SADOVYI, DARIA V. SYDOR, FANWEI MENG Badania ciekłych inkluzji w halicie jako narzędzie oceny perspektyw występowania mineralizacji potasowo-magnezowej w basenie Dawenkou w Chinach *Study of fluid inclusions in halite for assessing the prospects of potassium–magnesium mineralization in the Dawenkou basin, China*	61
11:00 – 11:20	GRZEGORZ CZAPOWSKI, ZBIGNIEW MAŁOLEPSZY, LESZEK SKOWROŃSKI, MARTA HODBOD Ewaporaty cyklotemu PZ1 cechsztynu jako komponenty modelu 3D budowy geologicznej obszaru przedsudeckiego (SW Polska) – wstępna analiza *Evaporates of zechstein PZ1 cyclothem as the elements of 3D geological model of fore-sudetic monocline (SW Poland) – preliminary analysis*	62
11:20 – 11:40	NOWACKI ŁUKASZ, GRZEGORZ CZAPOWSKI, LESZEK SKOWROŃSKI, MARTA HODBOD, JACEK CHEŁMIŃSKI, MICHAŁ MICHNA Rozprzestrzenienie litofacjalne utworów cechsztynu Niecki Szczecińskiej w opracowanym modelu przestrzennym 3D *Lithofacies distribution of zechstein deposits in the Szczecin Trough within the developed 3D spatial model*	67
11:40 – 12:00	KATARZYNA BAJDA Zmienność własności mechanicznych w skałach zubrowych z wysadu solnego Góra *Variability of mechanical properties in zuber rocks from the Góra salt dome*	72

12:30 – 13:45	Transfer do Kopalni Soli Bochnia Zjazdy do kopalni szybem Campi *Transfer to the Bochnia Salt Mine* *Descent into the Bochnia Salt Mine via the shaft Campi*	
14:00 - 14:55	Obiad *Lunch*	
15:00 - 18:00 - II SESJA REFERATOWA ***IInd ORAL SESSION*** Zagrożenia w eksploatacji soli *Mining hazards in salt mining* Kierunki i perspektywy rozwoju górnictwa solnego *Directions and prospects for salt mining development* **KOPALNIA SOLI BOCHNIA** ***BOCHNIA SALT MINE***		
15:00 - 15:20	MARTA ADAMUSZEK, MAREK JAROSIŃSKI, KINGA BOBEK, RAFAŁ NASIŁOWSKI Geometria otworów w soli kamiennej a orientacja współczesnego pola naprężeń *Borehole geometry in rock salt and the orientation of the present-day stress field*	75
15:20 - 15:40	PIOTR MROZIŃSKI, MIROSŁAW M. MAZUR Znaczące zwiększenie wskaźnika wykorzystania wysadowego złoża soli „Mogilno I" w oparciu o wykonane „modelowania geomechaniczne 3D stanu naprężeń i przemieszczeń w eksploatowanym wysadzie solnym" *Significant increment of usage rate of salt dome deposit "Mogilno I" based on performed "geomechanical modelling of stress and dislocation state in mined salt dome"*	78
15:40 – 16:00	PATRYK BLADUSIAK, JAKUB CURYŁO Kartowanie pola temperatury powierzchniowej nad wysadem solnym Lubień i jego interpretacja geologiczna *Mapping the surface temperature field over the Lubień salt dome and geological interpetation*	79
16:00 – 16:20	WACŁAW ANDRUSIKIEWICZ, MICHAŁ KOWALSKI, KATARZYNA CYRAN, DAMIAN KURDEK Zintegrowane zastosowanie monitoringu konwergencji i modelowania numerycznego w ocenie stateczności Kopalni Soli Kłodawa *Integration of convergence monitoring and numerical modelling for stability assessment of the Kłodawa Salt Mine*	83
16:20 – 16:40	Przerwa kawowa *Coffee break*	

16:40 – 17:00	TOMASZ KUBACKA, JAKUB PIETRAS Nieinwazyjna detekcja oraz otworowe metody przestrzennego obrazowania pustek podziemnych *Non-destructive detection and borehole methods for spatial imaging of underground voids*	85
17:00 – 17:20	PAWEŁ MUSIAŁ Likwidacja komór o predyspozycjach zapadliskowych w Kopalni Soli „Wieliczka". Ochrona powierzchni na podstawie prac w komorach Raba i Hoenig na poziomie I *Elimination of chambers prone to collapse at the "Wieliczka" Salt Mine. Surface protection based on works in the Raba and Hoenig chambers on level I*	88
17:20 – 17:40	PIOTR KOCZWARA, ALEKSANDRA KRÓL-SĘK Mapy w czasie, czyli rozwój kartografii w Kopalni Soli „Wieliczka *Maps over time the evolution of cartography in the Wieliczka Salt Mine*	92
17:40 – 18:00	KRZYSZTOF ZIĘBA – Prezes Kopalni Soli Bochnia Kopalnia Soli Bochnia *Bochnia Salt Mine*	
18:00 – 18:20	Podsumowanie części referatowej Sympozjum *Summary of the paper part of the Symposium*	
18:45	Biesiada Górnicza *Miners' Feast*	
22:30 oraz 23:30	*Transfery do hotelu SORAY w Wieliczce* *Transfers to the „SORAY" Hotel in Wieliczka*	
Piątek, 16.10.2025 ***Friday, 16.10.2025***		
9:00 – 13:00	Wycieczka terenowa – zwiedzanie trasy geologiczno-górniczej Kopalni Soli Bochnia (dla zainteresowanych) *Field trip / tour of the geological and mining route at the Bochnia Salt Mine (for those interested)*	
13:30 – 14:30	Obiad dla uczestników wycieczki w Kopalni Soli Bochnia, *Lunch for tour participants at the Bochnia Salt Mine*	

POSTERY *POSTERS*	
ADAM KAROL CHASZCZEWICZ, STANISŁAW BURLIGA Stan rozpoznania górnopermskiego dolomitu płytowego Ca3 na obszarze Polski *Current state of knowledge on the upper permian Ca3 platy dolomite in Poland*	98
AGNIESZKA MALEC, ANDRZEJ KWINTA, PIOTR KOCZWARA Opis geometrii komór eksploatacyjnych na potrzeby tworzenia modelu 3D kopalni soli *Geometry description of mining chambers for 3D salt mine modeling*	103
AGNIESZKA ONISZCZUK, MICHAŁ SŁOTWIŃSKI, WERONIKA WIELISŁAWSKA, MARIUSZ FIAŁKIEWICZ, MARTA TOMASZCZYK, MARCIN OLKOWICZ, MARTA HODBOD, GRZEGORZ CZAPOWSKI, MARTA ADAMUSZEK Podziemne magazynowanie substancji w kawernach solnych – popularyzacja wiedzy w dobie transformacji energetycznej *Underground storage in salt caverns – promoting public awareness in the context of the energy transition*	108
ALEKSANDRA BASIURA, PAULINA CYRAN, KAROL JOŃCA, PIOTR SKUBISZ, MATEUSZ ZAJĄC Analiza chemiczna gipsu naturalnego *Chemical analysis of natural gypsum*	112
ANDRIJ POBEREZHSKYY, OKSANA STUPKA Złoża soli potasowych na zachodzie Ukrainy i ich perspektywy *Potash deposits in western Ukraine and their prospects*	115
JACEK CHEŁMIŃSKI, ŁUKASZ NOWACKI, MARTA HODBOD, GRZEGORZ CZAPOWSKI Występowanie triasowych soli kamiennych w południowo-zachodniej i centralnej Polsce *Occurrence of the triassc rock salts in the south-western and central Poland*	117
JACEK CHEŁMIŃSKI, ŁUKASZ NOWACKI, MIROSŁAW LUDWINIAK, ANNA GŁOWACKA Wykorzystanie modułu „Statystyka" oprogramowania Geostar do interpretacji danych strukturalnych Application of the Geostar "Statistics" module to interpret structural data	118
MARIANNA SKUPINSKA, KATRIONA EDLMANN, ANDREW KILPATRICK Reaktywność geochemiczna wodoru w kawernach solnych cechsztynu: eksperymenty reakcji wsadowych *Geochemical reactivity of hydrogen in Zechstein salt caverns: batch reaction experiments*	120
MARIUSZ CHROMIK, MAŁGORZATA GIEREK, PIOTR SKUBISZ, TOMASZ NOWAK, TOMASZ KOSOWSKI Modelowanie geomechaniczne kawern solnych w środowisku *Comsol Multiphysics* *Geomechanical modeling of salt caverns using "Comsol Multiphysics"*	124

Streszczenia referatów

Abstracts of oral presentations

w kolejności wystąpień

in order of presentation

30-LECIE QUO *VADIS SAL*

30TH ANNIVERSARY OF QUO VADIS SAL

Jacek WACHOWIAK

Polskie Stowarzyszenie Górnictwa Solnego

Potrzeba spotkań i wymiany myśli na płaszczyźnie zawodowo towarzyskiej jest naturalnym sposobem powiększania wiedzy i doświadczenia oraz czerpania radości z wykonywanej pracy. Poprzez kontakty osobiste ułatwia to pracę zawodową, która przecież wypełnia znaczną część naszego życia. W latach 70-tych i 80-tych rolę tę pełniły kilkudniowe konferencje branży kopalnictwa surowców chemicznych organizowane przez kolegę Grzegorza Kortasa. Konferencje takie odbyły się w Wieliczce 1974, Boguszowie 1975, Skubarczewie 1976, Wapnie 1978, Lwówku Śląskim 1979, Grzybowie 1980, Rabce 1983, Zakopanym - Murowańcu 1984 i w Bystrej-Szczyrku 1985. Treścią spotkań było prezentowanie problematyki górniczej.

Kontynuację tej tradycji w nowych warunkach ustrojowych mogło podjąć stowarzyszenie ludzi związanych z polskim górnictwem solnym. Na przełomie 1990/1991 pomysł ten i określenie założeń do statutu sformułował przyszły pierwszy prezes Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego – Grzegorz Kortas. Janusz Wójcik opracował tekst statutu. 8 października 1991 roku wyłoniono Komitet Założycielski, powierzając mu przeprowadzenie postępowania rejestracyjnego i powołanie do życia Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego.

Celem powołania Stowarzyszenia była przede wszystkim integracja środowiska solarzy poprzez odbywanie co rocznych spotkań, prezentację tej części dorobku naukowego, która mogła być wykorzystana w praktyce, przedstawianie problematyki technicznej zakładów górniczych, wypowiadanie się Stowarzyszenia w ważnych dla górnictwa solnego sprawach. Zakładano, że finansowanie Stowarzyszenia opierać się będzie głównie na wsparciu zakładów górniczych i innych jednostek.

Wpis do rejestru Stowarzyszeń nastąpił w dniu 4 grudnia 1991 roku. Zwołane na dzień 24 lutego 1992 roku Walne Zgromadzenie wyłoniło pierwsze Władze Stowarzyszenia.

Główną formą działania stały się otwarte, koleżeńskie spotkania Stowarzyszenia, które w prelekcjach i dyskusjach skierowane były na aktualne zagadnienia górnictwa solnego w Polsce.

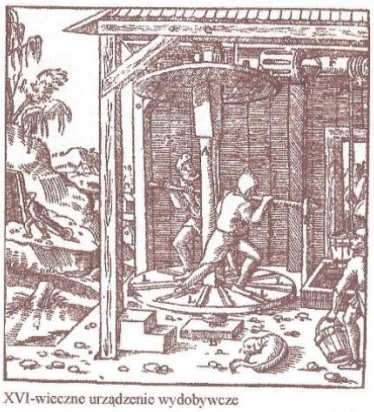
W pierwszej fazie działalności Stowarzyszenia, w latach 1992 - 1998 zorganizowano 5 takich spotkań (wykaz poniżej).

Po roku 1998 działalność Stowarzyszenia, z niewiadomych (lub wiadomych) przyczyn zamarła. Zaprzestano też organizowania corocznych spotkań solarzy.

Wznowienie ogólnopolskich spotkań solarzy nastąpiło spontanicznie i nie było związane z niedziałającym Stowarzyszeniem.

Pod koniec lat 90., na podstawie materiałów z kopalni Kłodawa, zostały napisane i obronione dwa doktoraty: Stanisława Burligi i Jacka Wachowiaka. Dyrektor kopalni Pan Andrzej Sadowski oraz Kierownik Laboratorium Chemicznego Pan Bogdan Sztąber poprosili w/w doktorów o zaprezentowanie wyników badań. Spotkanie zorganizowano w dniach 15-16 XI 2001 r. Gospodarzem spotkania była Kopalnia Soli Kłodawa, a organizatorem i sponsorem - Przedsiębiorstwo Mineralogiczne „Minerwa" z Krakowa (firma J. Wachowiaka). Na spotkanie zaproszono koleżanki i kolegów z solnych zakładów przemysłowych, wyższych uczelni, ośrodków badawczych i urzędów górniczych Razem około 50 osób.

Spotkanie zatytułowano: Sympozjum Geologiczno-Górnicze pod hasłem: **Quo Vadis Sal** (po raz pierwszy) „**Kierunki rozwoju solnictwa w Polsce" (***to trwałe, ponadczasowe hasło powstało podczas opracowywania programu Sympozjum przez organizatora w czasie emisji w TVP filmu Quo Vadis).*



XVI-wieczne urządzenie wydobywcze

"...Trzecie urządzenie mniej męczy górników, choć większe ciężary dźwiga, choć nieco wolniej, jak wszystkie te maszyny, które mają zębate przekładnie, za to wyżej, bo na wysokość stu osiemdziesięciu stóp. Maszyna jest zbudowana w następujący sposób: żelazne czopy pionowej osi okręcają się w dwóch żelaznych łożyskach. Dolne jest umieszczone na pniu, leżącym na ziemi, górne w belce stropowej poddasza. Oś ta ma na dole koło zrobione z grubych desek, na górze ma koło palcowe. To napędza potem wrzecionową przekładnię poziomej osi; wokół tej osi, której czopy okręcają się również w żelaznych łożyskach belek, owinięta jest lina wydobywcza. Dwaj górnicy, którzy, aby nie upaść, trzymają się pręta przymocowanego do dwóch pionowych belek, i nogami pchając płyty w tył, poruszają maszyną. Kiedy zaś jedno naczynie napełnione wydobytym urobkiem wyciągną i wysypią, to znowu w drugą stronę kręcąc maszyną, drugie naczynie wyciągają..."

Reprodukcja i tekst:
Georgius Agricola "De re metallica libri XII"
BASILEAE M.D.LXI



Szyb "Barbara" KSK Kłodawa

Kłodawa 2001

Zaproszenie



Program

Czwartek 15.11.2001

godz. 7^{00} - 10^{30}	spotkanie robocze w kopalni (dla zainteresowanych)
godz. 11^{30} - 14^{00}	powitanie gości rozpoczęcie sympozjum sesja referatowa
godz. 14^{15} - 15^{00}	obiad
godz. 15^{30} - 19^{30}	sesja referatowa
godz. 20^{00} -	uroczysta kolacja

Piątek 16.11.2001

godz. 9^{00} -	śniadanie
godz. 10^{00} - 12^{30}	podziemna wycieczka po kopalni soli "Kłodawa"
godz. 13^{30} -	obiad
godz. 15^{15} -	zakończenie sympozjum pożegnanie gości

ODDZIAŁ SITG
PRZY
KOPALNI SOLI KŁODAWA

Przedsiębiorstwo Mineralogiczne
MINERWA z Krakowa

Mają zaszczyt zaprosić

Sz.P

Na Sympozjum
Geologiczno-Górnicze
pod hasłem

QVO VADIS SAL

Poświęcone kierunkom
rozwoju solnictwa w Polsce

Które odbedzie sie
w Kopalni Soli Kłodawa
w dniach 15-16 listopada 2001

Fot. 1. Zaproszenie na Sympozjum Quo Vadis Sal (po raz pierwszy o tej nazwie), zewnętrzne (u góry), wewnętrzne (u dołu)

Photo 1. *Invitation to the Quo Vadis Sal Symposium (appearing under this name for the first time): exterior (top), interior (bottom)*

Sympozjum spodobało się Panu Czesławowi Misterskiemu – Dyrektorowi Inowrocławskich Kopalń Soli i zaproponował zorganizowanie spotkania w następnym roku w Inowrocławiu. Odbyło się ono Mikorzynie w dniach **17-18 X 2002 r.**, już pod obecną nazwą **Międzynarodowe Sympozjum Solne Quo Vadis Sal,** zorganizowane przez Inowrocławskie Kopalnie Soli, KS Kłodawę i PM Minerwa z Krakowa. W Sympozjum po raz pierwszy wzięły udział firmy zagraniczne.

Wówczas przypomniano sobie o Stowarzyszeniu i dawnej tradycji spotkań. Powstał pomysł reaktywacji PSGS. Nastąpiło to w kolejnym roku w Wieliczce.

Podczas Sympozjum w Wieliczce, w dniu 14 XI 2003 r. odbyło się Walne Zgromadzenie Członków PSGS i wybrano nowe władze Stowarzyszenia. Prezesem Zarządu PSGS został dr inż. Jacek Wachowiak.

Od tego momentu aż do dziś, Międzynarodowe Sympozjum Solne Quo Vadis Sal organizowane jest przez Polskie Stowarzyszenie Górnictwa Solnego.

Ponadto, numerację spotkań połączono i ujednolicono tak, że kolejne w Bochni (2004) było już **IX Międzynarodowym Sympozjum Solnym Quo Vadis Sal**.

Poniżej zestawiono daty i tematykę wszystkich spotkań:

I. Zakopane. 5-6.11.1992 r. Niekonwencjonalne wykorzystanie złóż soli.

II. Wiktorowo. 6-8.10.1993 r. Kopalnie soli w końcowej fazie eksploatacji.

III. Wieliczka. 18-19.09.1995 r. Likwidacja zagrożenia wodnego dla zabezpieczenia zabytkowej Kopalni Soli Wieliczka

IV. Ślesin. 16-18.10.1997 r. Naturalne zagrożenia w kopalniach soli.

V. Bochnia. 2-4.09.1998 r. Kopalnia Soli Bochnia - 750 lat górnictwa solnego.

VI. Kłodawa. 15-16 XI 2001 r. Quo Vadis Sal (po raz pierwszy) - Kierunki rozwoju solnictwa w Polsce

VII. Mikorzyn. 17-18.X. 2002 r. Quo Vadis Sal - Niekonwencjonalne sposoby wykorzystania złóż solnych.

VIII. Wieliczka. 13-14.XI. 2003 r. Quo Vadis Sal - Kierunki rozwoju górnictwa solnego w Polsce. Zagrożenia geologiczno-górnicze w kopalniach soli.

IX. Bochnia. 25-26.11.2004 r. Quo Vadis Sal - Racjonalne sposoby wykorzystania złóż solnych.

X. Ciechocinek. 13-14.10.2005 r. Quo Vadis Sal - Przyszłość podziemnego magazynowania w złożach soli.

XI. Szklarska Poręba. 9-10.11.2006 r. Quo Vadis Sal - Pokładowe złoża soli w Polsce.

XII. Kłodawa. 11-12.10. 2007 r. Przemysł Solny w Gospodarce.

XIII. Dolina Demianowska (Słowacja). 2-3.10. 2008 r. Podziemne magazynowanie paliw. Zagrożenia w górnictwie solnym.

XIV. Gdańsk-Jelitkowo. 8-9.10.2009 r. Bezpieczeństwo energetyczne Polski. Magazynowanie paliw i bezpieczne składowanie w złożach soli kamiennej.

XV. Świeradów Zdrój. 21-22.10.2010 r. Potencjał gospodarczy polskiego Górnictwa Solnego – stan obecny i perspektywy rozwoju.

XVI. Toruń. 13-14.10.2011 r. Magazynowanie i składowanie w wyrobiskach solnych – teraźniejszość i przyszłość górnictwa solnego.

XVII. Wieliczka. 11-13.10. 2012 r. Poeksploatacyjne zagospodarowanie wyrobisk górniczych w złożach soli.

XVIII. Sopot. 10-11.10. 2013 r. Sól a energetyka – od gazu do atomu.

XIX. Wągrowiec. 8-11.10. 2014 r. Współczesne problemy górnictwa solnego.

XX. Bochnia. 7-10.10. 2015 r. Górnictwo solne – dokonania i perspektywy na początku XXI wieku.

XXI. Zawoja. 5-8.10. 2016 r. Varia Sal – wszystko o soli.

XXII. Wieliczka. 4-7.10. 2017 r. Aqua et Sal – woda i sól.

XXIII. Kłodawa, Uniejów. 10-13.10. 2018 r. Sól skarbem Kujaw i Wielkopolski.

XXIV. Żnin. 9-11.10. 2019 r. Kawerny solne jako element proekologicznej polityki energetycznej

--------- 2020 r**.** Sympozjum nie odbyło się z powodu pandemii

XXV. Kraków (AGH). 30.09-01.10. 2021. Varia Sal – wszystko o soli.

XXVI. Kraków (Hotel Qubus). 22-23.09. 2022 r. Solnictwo w świetle nowych wyzwań geopolitycznych i klimatycznych.

XXVII. Kłodawa, Uniejów. 11-13.10. 2023. Wysadowe złoża soli – ich rola w polityce energetycznej.

XXVIII. Wieliczka. 9-11.10. 2024. Rola soli w Polsce i Europie w dobie kryzysu geopolitycznego.

XXIX. Bydgoszcz. 15-17. 10. 2025 r. Polskie białe złoto – od solniczki do magazynowania energii. Rola solnictwa w XXI wieku.

XXX. Wieliczka-Bochnia. 14-16.10. 2026. Górnictwo solne – przeszłość, teraźniejszość i przyszłość

Przepiękna tradycja spotkań polskich i zagranicznych solarzy, zapoczątkowana w 1992 r. przez Ojców założycieli Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego, w szczególności Pana Doc. Grzegorza Kortasa i Prof. Aleksandra Garlickiego, kontynuowana przez nasze pokolenie, trwa już ponad 30 lat.

I NIECH TRWA!



Fot. 2. XIX Międzynarodowe Sympozjum Solne Quo Vadis Sal, Wągrowiec, 2014 r.
80. Urodziny Prof. A. Garlickiego

Photo 2. *19th International Salt Symposium "Quo Vadis Sal", Wągrowiec, 2014*
80th Birthday of Prof. A. Garlicki



Fot. 3. XXIII Międzynarodowe Sympozjum Solne Quo Vadis Sal, Kłodawa-Uniejów, 2018 r.

Photo 3. *23rd International Salt Symposium "Quo Vadis Sal", Kłodawa–Uniejów, 2018.*

The need for meetings and the exchange of ideas in a professional yet social setting is a natural way to expand one's knowledge and experience while finding satisfaction in one's work. Personal connections facilitate professional activities—which, after all, occupy a significant part of our lives. In the 1970s and 1980s, this role was fulfilled by multi-day conferences for the chemical raw materials mining industry, organized by our colleague Grzegorz Kortas. These conferences took place in Wieliczka (1974), Boguszów (1975), Skubarczewo (1976), Wapno (1978), Lwówek Śląski (1979), Grzybów (1980), Rabka (1983), Zakopane-Murowaniec (1984), and Bystra-Szczyrk (1985). The meetings focused on presenting issues related to mining.

An association of individuals connected to the Polish salt mining industry was well-positioned to continue this tradition under the new political and economic system. At the turn of 1990 and 1991, Grzegorz Kortas—who would go on to become the first president of the Polish Salt Mining Association—formulated the concept and outlined the principles for the association's statutes. Janusz Wójcik drafted the text of the statutes. On October 8, 1991, a Founding Committee was appointed and tasked with handling the registration process and officially establishing the Polish Salt Mining Association. The Association was established primarily to foster integration within the salt mining community through annual meetings, the presentation of research findings with practical applications, the discussion of technical issues facing mining operations, and the articulation of the Association's stance on matters of importance to the salt mining industry. It was envisaged that the Association's funding would rely chiefly on support from mining enterprises and other entities.

The Association was entered into the register on December 4, 1991. A General Meeting convened on February 24, 1992, elected the Association's first governing bodies.

Its primary mode of activity consisted of open, collegial gatherings featuring lectures and discussions focused on current issues in Polish salt mining.

During the Association's initial phase of activity (1992–1998), five such meetings were organized (see list below).

After 1998, the Association's activities ceased for reasons unknown (or perhaps known). The organization of annual meetings for salt industry professionals was also discontinued.

The resumption of nationwide meetings for salt industry professionals occurred spontaneously and was unrelated to the then-inactive Association.

In the late 1990s, two doctoral theses—authored by Stanisław Burliga and Jacek Wachowiak—were written and successfully defended based on materials from the Kłodawa mine. The mine's director, Andrzej Sadowski, and the head of the chemical laboratory, Bogdan Sztąber, invited the two doctors to present their research findings. The meeting took place on November 15–16, 2001. It was hosted by the Kłodawa Salt Mine, while the Mineralogical Enterprise "Minerwa" from Kraków (J. Wachowiak's company) served as the organizer and sponsor. Colleagues from salt processing plants, universities, research centers, and mining authorities were invited to the event; in total, approximately 50 people attended.

The meeting was titled the Geological and Mining Symposium, held under the theme ***"Quo Vadis Sal"*** *(for the first time) —* ***"Directions for the Development of the Salt Industry in Poland"*** *(this enduring, timeless slogan was coined by the organizer while drafting the symposium program, coinciding with the broadcast of the film *Quo Vadis* on TVP).*

Mr. Czesław Misterski, Director of the Inowrocław Salt Mines, was impressed by the symposium and proposed organizing the following year's meeting in Inowrocław. That event took place in Mikorzyn on ***October 17–18, 2002,*** *under the current name — the* ***"Quo Vadis Sal" International Salt Symposium*** *— and was organized by the Inowrocław Salt Mines, KS Kłodawa, and PM Minerwa of Kraków. Foreign companies participated in the symposium for the first time.*

At that time, the Association and the long-standing tradition of these meetings were recalled, leading to the idea of reactivating the PSGS. This took place the following year in Wieliczka.

During the symposium in Wieliczka, on November 14, 2003, the General Meeting of PSGS members was held, and new Association leadership was elected. Dr. Eng. Jacek Wachowiak became the President of the PSGS Board.

From that moment to the present day, the "Quo Vadis Sal" International Salt Symposium has been organized by the Polish Salt Mining Association (PSGS).

Furthermore, the numbering of the meetings was combined and standardized, such that the subsequent event in Bochnia (2004) was designated ***the 9th "Quo Vadis Sal" International Salt Symposium.***

The dates and themes of all meetings are listed below:

I. Zakopane. *5–6 Nov. 1992. Unconventional use of salt deposits.*

II. Wiktorowo*. 6–8 Oct. 1993. Salt mines in the final stage of exploitation.*

III. Wieliczka. *18–19 Sept. 1995. Mitigation of water hazards to secure the historic Wieliczka Salt Mine.*

IV. Ślesin. *16–18 Oct. 1997. Natural hazards in salt mines.*

V. Bochnia. *2–4 Sept. 1998. Bochnia Salt Mine – 750 years of salt mining.*

VI. Kłodawa. *15–16 Nov. 2001. Quo Vadis Sal (first edition) – Directions for the development of the salt industry in Poland.*

VII. Mikorzyn. *17–18 Oct. 2002. Quo Vadis Sal – Unconventional methods of utilizing salt deposits.*

VIII. Wieliczka. *13–14 Nov. 2003. Quo Vadis Sal – Directions for the development of salt mining in Poland; geological and mining hazards in salt mines.*

IX. Bochnia. *25–26 Nov. 2004. Quo Vadis Sal – Rational methods of utilizing salt deposits.*

X. Ciechocinek. *13–14 Oct. 2005. Quo Vadis Sal – The future of underground storage in salt deposits.*

XI. Szklarska Poręba. *9–10 Nov. 2006. Quo Vadis Sal – Bedded salt deposits in Poland.*

XII. Kłodawa. *11–12 Oct. 2007. The salt industry in the economy.*

XIII. Demänová Valley (Slovakia). *2–3 Oct. 2008. Underground fuel storage. Hazards in salt mining.*

XIV. Gdańsk-Jelitkowo. *8–9 Oct. 2009. Poland's energy security. Fuel storage and safe containment in rock salt deposits.*

XV. Świeradów-Zdrój. *21–22 Oct. 2010. Economic potential of the Polish salt mining industry – current status and development prospects.*

XVI. Toruń. *13–14 Oct. 2011. Storage and containment in salt workings – the present and future of salt mining.*

XVII. Wieliczka. *11–13 Oct. 2012. Post-exploitation management of mine workings in salt deposits.*

XVIII. Sopot. *10–11 Oct. 2013. Salt and the energy sector – from gas to nuclear power.*

XIX. Wągrowiec. *8–11 Oct. 2014. Contemporary issues in salt mining.*

XX. Bochnia. *7–10 Oct. 2015. Salt mining – achievements and prospects at the beginning of the 21st century.*

XXI. Zawoja. *5–8 Oct. 2016. Varia Sal – everything about salt.*

XXII. Wieliczka. *Oct. 4–7, 2017. Aqua et Sal – water and salt.*

XXIII. Kłodawa, Uniejów. *Oct. 10–13, 2018. Salt as a treasure of Kujawy and Greater Poland.*

XXIV. Żnin. *Oct. 9–11, 2019. Salt caverns as an element of pro-environmental energy policy.*

--------- 2020. *Symposium cancelled due to the pandemic.*

XXV. Kraków (AGH). *Sept. 30–Oct. 1, 2021. Varia Sal – everything about salt.*

XXVI. Kraków (Hotel Qubus). *Sept. 22–23, 2022. The salt industry in light of new geopolitical and climate challenges.*

XXVII. Kłodawa, Uniejów. *Oct. 11–13, 2023. Salt diapir deposits – their role in energy policy.*

XXVIII. Wieliczka. *Oct. 9–11, 2024. The role of salt in Poland and Europe in the era of geopolitical crisis.*

XXIX. Bydgoszcz. *Oct. 15–17, 2025. Polish white gold – from the salt cellar to energy storage. The role of the salt industry in the 21st century.*

XXX. Wieliczka-Bochnia. *Oct. 14–16, 2026. Salt mining – past, present, and future.*

The beautiful tradition of gatherings for Polish and international salt mining specialists—initiated in 1992 by the founding fathers of the Polish Salt Mining Association, notably Assoc. Prof. Grzegorz Kortas and Prof. Aleksander Garlicki, and continued by our generation — has endured for over 30 years.

AND LONG MAY IT CONTINUE!

POLSKIE GÓRNICTWO SOLNE WCZORAJ, DZIŚ I JUTRO

POLISH SALT MINING: YESTERDAY, TODAY AND TOMORROW

WACŁAW ANDRUSIKIEWICZ[1]

[1]Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, e-mail: andrus@agh.edu.pl

1. Wprowadzenie

Sól należała przez stulecia do najważniejszych kopalin na ziemiach polskich. Ośrodki w Bochni i Wieliczce stały się podstawą funkcjonowania Żup Krakowskich, natomiast w XIX i XX w. rozwój przemysłu chemicznego przesunął ciężar eksploatacji ku Wielkopolsce, Kujawom i cechsztyńskim strukturom Niżu Polskiego [7–10]. Współcześnie znaczenie górnictwa solnego nie może być oceniane wyłącznie przez wielkość produkcji NaCl. Eksploatacja tworzy bowiem rozległe pustki i kawerny, które mogą pełnić funkcje magazynowe, energetyczne i strategiczne [1, 3–5].

Celem artykułu jest wskazanie najważniejszych etapów rozwoju sektora, scharakteryzowanie jego obecnej kondycji oraz ocena kierunków rozwoju. Punktem odniesienia są dane PIG-PIB za 2025 r., informacje operatorów kopalń i magazynów oraz publikacje dotyczące geologicznych warunków budowy kawern [1–6, 11, 12].

2. Wczoraj – od żup do nowoczesnego górnictwa

Najstarszym sposobem pozyskiwania soli było warzelnictwo solanek; ślady tej działalności w rejonie Wieliczki sięgają neolitu. W 1248 r. rozpoczęto eksploatację soli kamiennej w Bochni, a w drugiej połowie XIII w. rozwinęła się kopalnia w Wieliczce. Zorganizowane w Żupy Krakowskie zakłady przez kilka stuleci należały do najważniejszych przedsiębiorstw państwa i źródeł dochodów monarszych [7, 8]. Ich znaczenie wykraczało poza wydobycie: rozwijano techniki szybowe, transport podziemny, odwadnianie i organizację pracy.

W XIX i XX w. powstało nowoczesne zagłębie solne Wielkopolski i Kujaw. Eksploatację prowadzono m.in. w Inowrocławiu i Wapnie, a po II wojnie światowej uruchomiono Kłodawę. Katastrofa wodna w Wapnie w 1977 r. oraz późniejsza likwidacja kopalni Solno w Inowrocławiu pokazały, że podstawowym zagrożeniem dla wyrobisk solnych jest migracja wód nienasyconych i niekontrolowane ługowanie górotworu [9, 10]. Z czasem znaczenie klasycznych kopalń południowej Polski zmalało, a Wieliczka i Bochnia przeszły głównie do funkcji turystycznych, leczniczych i ochrony dziedzictwa.

Przełomem technologicznym było upowszechnienie eksploatacji wysadów i złóż pokładowych Niżu Polskiego. Kłodawa została zaprojektowana jako zakład wielkoskalowy, zdolny do mechanicznego urabiania soli na kilku poziomach, natomiast w rejonie Inowrocławia rozwinięto eksploatację otworową. Pozwoliło to powiązać wydobycie bezpośrednio z potrzebami przemysłu sodowego i chemicznego. Od końca XX w. coraz większego znaczenia nabierała również funkcja przestrzenna złóż: ługowane komory zaczęto projektować nie tylko jako etap produkcji solanki, lecz także jako przyszłe magazyny gazu, ropy i paliw [10, 11].

Tabela 1. Wybrane etapy rozwoju polskiego górnictwa solnego [7–10].

***Table 1**. Selected stages in the development of Polish salt mining [7–10].*

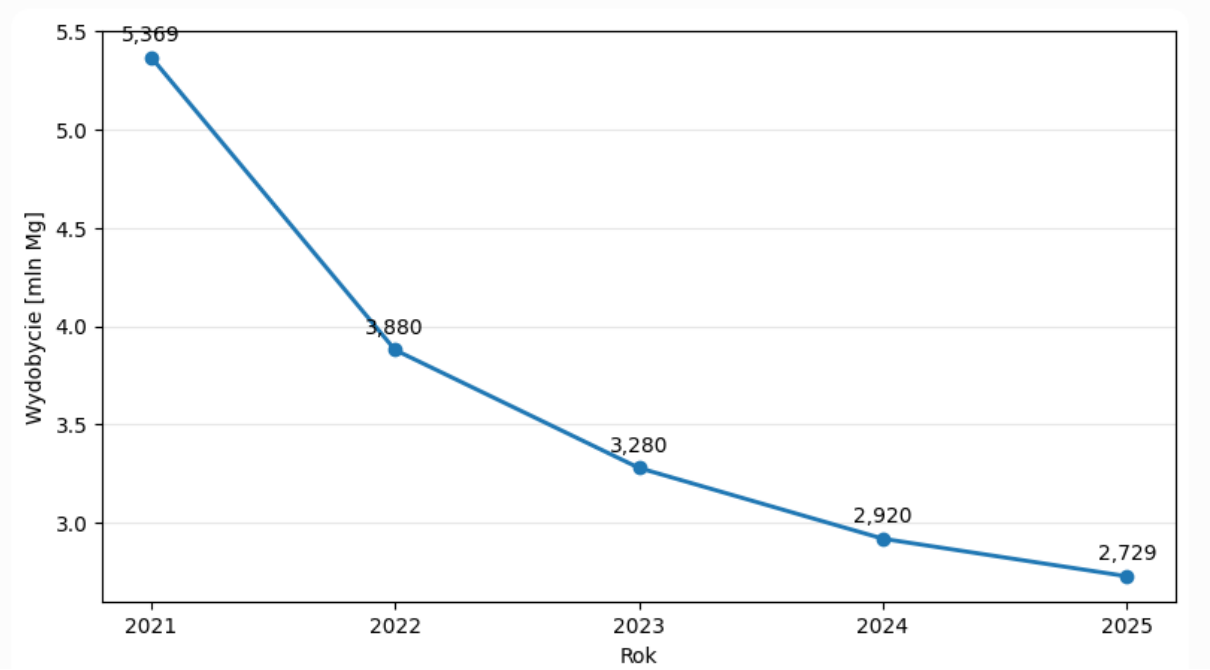
Okres / rok ***Period / year***	**Wydarzenie** ***Event***	**Znaczenie** ***Significance***
1248	Początek wydobycia soli kamiennej w Bochni *Beginning of rock salt mining in Bochnia*	Narodziny trwałego górnictwa podziemnego soli *Establishment of permanent underground salt mining*
XIII–XVIII w. *13th–18th centuries*	Rozwój Żup Krakowskich *Development of the Kraków Saltworks*	Sól jako strategiczne źródło dochodów państwa *Salt as a strategic source of state revenue*
XIX–XX w. *19th–20th centuries*	Rozwój Inowrocławia i Wapna *Development of Inowrocław and Wapno*	Przesunięcie produkcji ku Wielkopolsce i Kujawom *Shift of production towards Greater Poland and Kuyavia*
1956/1957	Uruchomienie Kłodawy *Commissioning of the Kłodawa mine*	Powstanie głównej współczesnej kopalni podziemnej *Establishment of the principal modern underground salt mine*
od końca XX w. *From the late 20th century*	Rozwój eksploatacji otworowej i kawern *Development of solution mining and caverns*	Przejście od samego surowca do wykorzystania przestrzeni podziemnej *Transition from raw-material production to the utilisation of underground space*

3. Dziś – zasoby, wydobycie i kawerny

Polska dysponuje bardzo dużą bazą zasobową. Według PIG-PIB udokumentowane bilansowe zasoby geologiczne soli kamiennej wynosiły w 2025 r. ponad 112,2 mld Mg, a zasoby przemysłowe około 1,97 mld Mg; zasoby prognostyczne i perspektywiczne do głębokości 2000 m szacuje się na około 4 bln Mg [2]. Gospodarcze znaczenie mają przede wszystkim utwory cechsztyńskie Niżu Polskiego, występujące jako pokłady i wysady. Eksploatowane są m.in. struktury Kłodawy, Mogilna i Góry, a sól pokładowa występuje w rejonie Sieroszowic [1, 2, 12].

Z geologicznego punktu widzenia podstawowe znaczenie mają dwie formacje solonośne. Mioceńskie złoża południowej Polski, związane m.in. z Wieliczką i Bochnią, są silnie zaburzone tektonicznie i obecnie nie mają większego znaczenia produkcyjnego. Zupełnie inny potencjał przedstawia cechsztyńska formacja solonośna, zajmująca rozległą część Niżu Polskiego. Występują tu zarówno rozległe pokłady, jak i diapiryczne wysady solne o znacznej miąższości. Wysady są szczególnie atrakcyjne dla ługowania kawern, natomiast złoża pokładowe mogą być wykorzystywane w klasycznej eksploatacji podziemnej oraz do budowy magazynów tam, gdzie spełnione są wymagania geomechaniczne [1, 2].

W 2025 r. podstawowe wydobycie soli kamiennej wyniosło 2,729 mln Mg. Góra i Mogilno I dostarczyły 2,036 mln Mg (74,6%), Kłodawa 532 tys. Mg (19,5%), a eksploatacja związana z KGHM 161 tys. Mg (5,9%) [2]. W latach 2021–2025 produkcja zmniejszyła się z 5,369 do 2,729 mln Mg. Spadek nie wynika z wyczerpywania zasobów, lecz głównie ze zmian popytu, kosztów energii i transportu oraz ewolucji modelu biznesowego przedsiębiorstw.



Rys. 1. Wydobycie soli kamiennej w Polsce w latach 2020–2025. Opracowanie własne na podstawie PIG-PIB [2].

Fig. 1. *Rock salt production in Poland in 2021–2025. Author's compilation based on PGI-NRI data [2].*

Tabela 2. Główne współczesne ośrodki polskiego górnictwa solnego [2, 6, 11, 12].

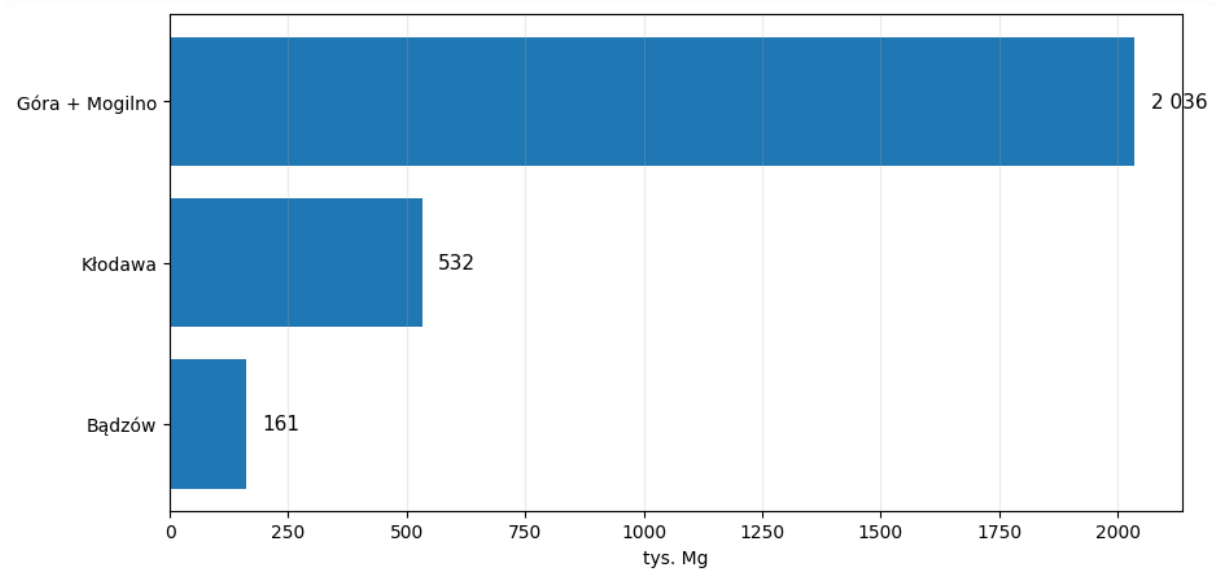
Table 2*. Major contemporary centres of Polish salt mining [2, 6, 11, 12].*

Zakład / złoże ***Operation/deposit***	**Charakter eksploatacji** ***Type of operation***	**Produkcja 2025** ***Production in 2025***	**Znaczenie** ***Significance***
Góra + Mogilno I (IKS Solino)	otworowa; solanka *Solution mining; brine production*	2 036 tys. Mg *2,036 thousand Mg*	główny producent solanki; powiązanie z przemysłem i magazynowaniem *Main brine producer; integrated with industrial use and underground storage*
Kłodawa 1	podziemna, komorowa *Underground chamber mining*	532 tys. Mg *532 thousand Mg*	główna klasyczna kopalnia soli; koncesja do 2052 r. *Main conventional salt mine; mining licence valid until 2052*
Rejon KGHM *KGHM area*	pokładowa / towarzysząca *Bedded / associated mineral extraction*	161 tys. Mg *161 thousand Mg*	wydobycie związane z kompleksem górniczym rud miedzi *Salt production associated with copper-ore mining operations*
Wieliczka i Bochnia *Wieliczka and Bochnia*	historyczne wyrobiska *Historical mine workings*	—	turystyka, lecznictwo, zabezpieczenie zabytku *Tourism, therapeutic functions and heritage protection*

3.1. Kłodawa, KGHM i Solino – trzy odmienne modele działalności

Kłodawa reprezentuje klasyczny model podziemnej kopalni soli. Jej atutem jest możliwość sprzedaży szerokiej gamy produktów: soli drogowej, spożywczej, przemysłowej i bryłowej. Koncesja na złoże Kłodawa 1 obowiązuje do 2052 r., co zapewnia długi horyzont funkcjonowania zakładu [6]. Wielkość produkcji jest jednak podatna na warunki pogodowe, ponieważ istotną część sprzedaży stanowi sól drogowa. W dłuższym okresie dodatkową wartość mogą tworzyć rozległe pustki poeksploatacyjne, o ile ich wykorzystanie będzie zgodne z warunkami bezpieczeństwa i ochrony górotworu.

W KGHM sól ma charakter kopaliny towarzyszącej wobec podstawowej eksploatacji rud miedzi. Oznacza to, że decyzje produkcyjne są podporządkowane przede wszystkim gospodarce złożem rudnym, a sól nie stanowi samodzielnego strategicznego produktu koncernu [12]. Odmienny model reprezentuje IKS „Solino", gdzie produkcja solanki jest silnie zintegrowana z przemysłem chemicznym i działalnością magazynową. To właśnie połączenie odbioru solanki z późniejszym wykorzystaniem kawern stanowi dziś jeden z najbardziej efektywnych modeli gospodarowania strukturą solną [11].



Rys. 2. Struktura podstawowego wydobycia soli kamiennej w Polsce w 2025 r. [2].

Fig. 2. *Structure of basic rock salt production in Poland in 2025 [2].*

Szczególną cechą współczesnego sektora jest połączenie wydobycia z magazynowaniem. W 2026 r. w Polsce działały trzy główne kompleksy kawernowe: magazyn gazu Mogilno, magazyn gazu Kosakowo oraz magazyn ropy i paliw Góra; łącznie wykorzystywano 36 kawern [3]. Rozwiązanie to zmienia sposób postrzegania złoża: produktem górnictwa staje się nie tylko sól lub solanka, lecz również bezpieczna przestrzeń podziemna. W Kłodawie dodatkową wartość tworzą istniejące pustki poeksploatacyjne, których dalsze zastosowania wymagają analiz geomechanicznych i ekonomicznych [6].

3.2. Kawerny jako produkt górnictwa

Kawerna powstaje w wyniku kontrolowanego ługowania złoża. Do otworu zatłacza się wodę lub solankę o niższym stopniu nasycenia, która rozpuszcza halit, a powstająca solanka jest odbierana na powierzchni. Poprzez odpowiednią lokalizację rur i kontrolę strefy nierozpuszczalnej cieczy ochronnej można sterować kształtem komory. Po zakończeniu ługowania kawerna może zostać przygotowana do magazynowania medium pod ciśnieniem. O atrakcyjności soli decydują bardzo niska przepuszczalność i zdolność do pełzania, która sprzyja samozaciskaniu drobnych szczelin, ale jednocześnie wymaga uwzględnienia zmiany geometrii komory w czasie [3–5].

4. Jutro – magazynowanie i nowe funkcje struktur solnych

W perspektywie kolejnych dekad kluczowe będzie przygotowanie nowych struktur, które mogą przejąć funkcje wydobywcze i magazynowe. Wśród wysadów wskazywanych jako perspektywiczne znajdują się Damasławek, Lubień Kujawski i Łanięta [1, 5]. Szczególne znaczenie ma Damasławek, analizowany jako potencjalny kompleks wielokawernowy. Uruchomienie nowej kopalni otworowej wymaga jednak nie tylko rozpoznania złoża i koncesji, ale również infrastruktury przesyłowej oraz trwałego odbiorcy solanki.

Drugim kierunkiem jest magazynowanie wodoru. Rozwój energetyki wiatrowej i fotowoltaicznej zwiększa potrzebę sezonowego przechowywania energii, a kawerny solne są jedną z nielicznych technologii umożliwiających składowanie gazu w bardzo dużej skali. PIG-PIB analizuje zarówno wysady centralnej Polski, jak i pokładowe sole Wyniesienia Łeby, istotne ze względu na bliskość bałtyckiej energetyki wiatrowej [1, 4]. Potencjalnym uzupełnieniem jest CAES, czyli magazynowanie energii w postaci sprężonego powietrza [5].

4.1. Nowe struktury i magazynowanie wodoru

Damasławek jest przykładem lokalizacji, w której rozważa się wykorzystanie wysadu nie tylko do produkcji solanki, ale także jako przyszłego kompleksu magazynowego. Koncepcje tego typu powinny być oceniane w całym cyklu życia inwestycji: od rozpoznania geologicznego, przez ługowanie i zagospodarowanie solanki, aż po wieloletnią eksploatację magazynu. Podobne znaczenie mogą w przyszłości uzyskać inne wysady centralnej Polski, m.in. Lubień Kujawski i Łanięta [1, 5].

W przypadku wodoru szczególnego znaczenia nabierają szczelność i czystość magazynowanego gazu. Konieczne jest rozpoznanie składu mineralnego soli, udziału anhydrytów i iłów, warunków ciśnieniowych oraz możliwych oddziaływań wodoru z płynami złożowymi i materiałami instalacji. Nie każda struktura odpowiednia dla gazu ziemnego automatycznie będzie optymalna dla wodoru. Z tego względu projekty demonstracyjne i badania geomechaniczne mają kluczowe znaczenie przed wdrożeniem magazynowania na skalę przemysłową [1, 4].

Najważniejszym ograniczeniem przyszłych projektów może okazać się gospodarka solankowa. Wytworzenie dużej kawerny wymaga rozpuszczenia ogromnej masy soli, a zatem zapewnienia wody technologicznej i odbioru nasyconej solanki. Model Góra–Mogilno jest korzystny dlatego, że produkcja solanki jest połączona z zapotrzebowaniem przemysłu chemicznego [11]. W nowej lokalizacji brak stabilnego odbiorcy może ograniczyć tempo ługowania równie silnie jak warunki geologiczne.

4.2. Solanka, logistyka i ekonomika

Ekonomika nowych projektów zależy również od lokalizacji względem odbiorców soli i solanki. Transport niskowartościowego masowego surowca na duże odległości szybko zwiększa koszty, dlatego zakłady solne historycznie rozwijały się w sąsiedztwie przemysłu chemicznego, infrastruktury kolejowej i rurociągowej. W przyszłości podobnie ważna będzie bliskość gazociągów, sieci wodorowych, terminali paliwowych lub źródeł energii odnawialnej. O przewadze konkurencyjnej konkretnego wysadu może więc przesądzić nie tylko geologia, lecz także infrastruktura powierzchniowa i możliwość długoterminowego zagospodarowania produktów ługowania.

Warunkiem rozwoju pozostaje bezpieczeństwo. Sól jest ośrodkiem o bardzo małej przepuszczalności i korzystnej zdolności do samozaciskania mikroszczelin, lecz podlega pełzaniu. Dla kawern konieczny jest więc monitoring geometrii, ciśnienia i deformacji górotworu, a w przypadku wodoru także kontrola oddziaływania gazu na skały, płyny i materiały instalacji [1, 4]. Doświadczenia historycznych kopalń przypominają ponadto, że niekontrolowany dopływ wód nienasyconych pozostaje jednym z najpoważniejszych zagrożeń [9].

5. Dyskusja i wnioski

Historia sektora pokazuje zmianę źródła wartości ekonomicznej: od samej soli, przez wyspecjalizowane produkty i solankę, do kontrolowanej przestrzeni podziemnej. Z tego punktu widzenia spadek wydobycia w latach 2021–2025 nie oznacza prostego regresu branży. Kłodawa zachowuje znaczenie jako producent soli kruszonej, Solino łączy ługowanie z działalnością magazynową, a struktury solne stają się elementem infrastruktury bezpieczeństwa energetycznego [2, 3, 6, 11].

Ważnym czynnikiem pozostaje konkurencja innych źródeł soli. Sól warzona i produkty otrzymywane przez ewaporację mogą być konkurencyjne tam, gdzie dostępna jest tania energia i duże strumienie solanki technologicznej. Rynek drogowy jest ponadto sezonowy, a ceny produktów masowych są wrażliwe na koszty transportu. Oznacza to, że samo posiadanie bardzo dużych zasobów nie gwarantuje wzrostu produkcji. Przewagę daje raczej zdolność do sprzedaży produktów o wyższej wartości oraz łączenia eksploatacji z usługą magazynowania.

W długiej perspektywie polskie górnictwo solne może zatem rozwijać się dwutorowo. Pierwszy nurt będzie obejmował tradycyjną produkcję soli i solanki dla przemysłu, drogownictwa i gospodarki żywnościowej. Drugi obejmie projektowanie i eksploatację podziemnej przestrzeni: magazynów paliw, gazów, wodoru, a lokalnie także innych zastosowań wymagających stabilnego i izolowanego środowiska. Tak rozumiany sektor zachowuje znaczenie nawet przy stabilnym lub malejącym wolumenie wydobycia.

1. **Zasoby geologiczne nie są barierą rozwoju:** ponad 112,2 mld Mg zasobów bilansowych wielokrotnie przewyższa obecną skalę produkcji [2].
2. **Tradycyjne górnictwo będzie nadal potrzebne,** lecz wzrost wartości sektora będzie coraz silniej związany z funkcjami magazynowymi i energetycznymi.
3. **Najbardziej perspektywiczne kierunki to rozwój nowych kawern, magazynowanie wodoru i ewentualnie CAES**, przy równoczesnym wykorzystaniu istniejących pustek kopalnianych [1, 3–6].
4. **Krytycznym warunkiem nowych inwestycji jest zagospodarowanie solanki, dostęp do sieci przesyłowych oraz długoterminowy monitoring geomechaniczny i hydrogeologiczny.**
5. **Pojęcie „górnictwa solnego" powinno w przyszłości obejmować nie tylko pozyskanie NaCl, ale również projektowanie, wykonywanie i eksploatację bezpiecznej podziemnej przestrzeni magazynowej.**

*Projekt badawczy finansowany ze środków programu **„Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza"** w AGH.*

Słowa kluczowe: górnictwo solne, sól kamienna, Kłodawa, kawerny solne, magazynowanie wodoru, bezpieczeństwo energetyczne

Polish salt mining has evolved from brine evaporation and royal salt works to modern underground and solution mining. This paper presents the sector from three perspectives: past, present, and future. It briefly discusses the historical centres of salt mining, the current resource base and production structure, and the growing role of salt caverns for the storage of fuels, natural gas and, potentially, hydrogen and energy. The analysis indicates that the future of the sector will depend less on resource availability and more on the ability to use salt structures multifunctionally, manage brine streams and maintain geomechanical safety.

1. Introduction

For centuries, salt was one of the most important mineral resources exploited in Poland. The mining centres in Bochnia and Wieliczka formed the basis of the Kraków Saltworks, while in the 19th and 20th centuries the development of the chemical industry shifted the focus of production towards Greater Poland, Kuyavia and the Zechstein structures of the Polish Lowlands [7–10]. Today, the significance of salt mining cannot be assessed solely in terms of NaCl production volumes. Mining operations create extensive underground voids and caverns that may perform storage, energy-related and strategic functions [1, 3–5].

The aim of this paper is to identify the key stages in the development of the sector, characterise its present condition and assess potential future directions. The analysis is based on data published by the Polish Geological Institute – National Research Institute (PGI-NRI) for 2025, information provided by mine

and storage-facility operators, and publications concerning the geological conditions for cavern construction [1–6, 11, 12].

2. Yesterday – from Royal Saltworks to Modern Mining

The oldest method of obtaining salt was the evaporation of brines; traces of such activity in the Wieliczka area date back to the Neolithic period. Rock salt mining began in Bochnia in 1248, while the Wieliczka mine developed in the second half of the 13th century. Organised as the Kraków Saltworks, these operations remained among the most important state-owned enterprises and sources of royal revenue for several centuries [7, 8]. Their importance extended far beyond extraction itself, as they contributed to the development of shaft-sinking techniques, underground transport, mine drainage and work organisation.

In the 19th and 20th centuries, a modern salt-mining district developed in Greater Poland and Kuyavia. Mining operations were conducted, among other locations, in Inowrocław and Wapno, while the Kłodawa mine was commissioned after the Second World War. The catastrophic water inflow at Wapno in 1977 and the subsequent closure of the Solno mine in Inowrocław demonstrated that the migration of unsaturated waters and uncontrolled dissolution of the salt rock mass represent fundamental hazards in salt mines [9, 10]. Over time, the importance of conventional mines in southern Poland declined, while Wieliczka and Bochnia were transformed primarily into tourist, therapeutic and heritage-protection facilities.

A major technological breakthrough came with the development of mining operations in salt domes and bedded deposits of the Polish Lowlands. Kłodawa was designed as a large-scale operation capable of mechanised salt extraction on several mining levels, whereas solution mining was developed in the Inowrocław region. This made it possible to link production directly with the requirements of the soda and chemical industries. From the late 20th century onwards, the spatial function of salt deposits also gained increasing importance: solution-mined caverns began to be designed not only as a stage in brine production, but also as future storage facilities for natural gas, crude oil, and liquid fuels [10, 11].

3. Today – Resources, Production and Caverns

Poland has a very large salt resource base. According to PGI-NRI, documented geological balance resources of rock salt exceeded 112.2 billion Mg in 2025, while industrial resources amounted to approximately 1.97 billion Mg. Prognostic and prospective resources occurring at depths of up to 2,000 m are estimated at approximately 4 trillion Mg [2].

From an economic perspective, the most important deposits are the Zechstein salt formations of the Polish Lowlands, occurring both as bedded deposits and salt domes. The structures currently exploited include Kłodawa, Mogilno and Góra, while bedded rock salt is mined in the Sieroszowice area [1, 2, 12].

From a geological point of view, two principal salt-bearing formations are of fundamental importance. The Miocene deposits of southern Poland, associated with locations such as Wieliczka and Bochnia, are strongly tectonically disturbed and currently have little significance for industrial production. The Zechstein salt formation, which extends over a large part of the Polish Lowlands, has substantially greater potential. Both extensive bedded deposits and diapiric salt domes of considerable thickness occur in this area. Salt domes are particularly attractive for cavern solution mining, while bedded deposits may be used for conventional underground mining and, where geomechanical conditions are suitable, for underground storage construction [1, 2].

In 2025, basic rock salt production in Poland amounted to 2.729 million Mg. Góra and Mogilno I accounted for 2.036 million Mg (74.6%), Kłodawa produced 532 thousand Mg (19.5%), and production associated with KGHM amounted to 161 thousand Mg (5.9%) [2]. Between 2021 and 2025, total production decreased from 5.369 to 2.729 million Mg. This decline is not a result of resource depletion, but primarily reflects changes in demand, energy and transport costs, and the evolution of corporate business models.

3.1. Kłodawa, KGHM and Solino – Three Different Operating Models

Kłodawa represents the conventional model of an underground salt mine. One of its strengths is the ability to sell a broad range of products, including road salt, food-grade salt, industrial salt, and lump salt. The mining licence for the Kłodawa 1 deposit is valid until 2052, providing a long-term operating horizon for the mine [6]. Production volumes are nevertheless sensitive to weather conditions, as road salt accounts for a substantial share of sales.

In the longer term, the extensive post-mining voids may generate additional value, provided that their future use complies with safety requirements and rock-mass protection principles.

At KGHM, rock salt is an associated mineral in relation to the primary extraction of copper ores. Consequently, production decisions are governed mainly by the management of the ore deposit, while salt is not treated as an independent strategic product of the corporation [12].

IKS "Solino" represents a different model, in which brine production is closely integrated with the chemical industry and underground storage operations. The combination of brine utilisation with the subsequent use of solution-mined caverns currently represents one of the most efficient approaches to the comprehensive utilisation of salt structures [11].

A distinctive feature of the contemporary sector is the integration of mining and storage functions. In 2026, three major cavern complexes were operating in Poland: the Mogilno underground gas storage facility, the Kosakowo underground gas storage facility and the Góra crude oil and fuel storage facility. A total of 36 caverns were in use [3].

This solution changes the way in which a salt deposit is perceived: the product of mining is no longer limited to salt or brine, but also includes safe underground storage space. In Kłodawa, additional value may be generated by existing post-mining voids, although any future applications require detailed geomechanical and economic assessment [6].

3.2. Caverns as a Product of Mining

A cavern is created by the controlled solution mining of a salt deposit. Water or undersaturated brine is injected through a borehole, dissolving the halite, while the resulting saturated brine is withdrawn to the surface. By appropriately positioning the tubing strings and controlling the protective blanket fluid, the geometry of the cavern can be managed.

Once solution mining has been completed, the cavern may be prepared for the storage of pressurised media. Salt is particularly suitable for this purpose because of its extremely low permeability and its creep behaviour, which promotes the self-sealing of small fractures. At the same time, creep requires changes in cavern geometry over time to be taken into account during design and operation [3–5].

4. Tomorrow – Storage and New Functions of Salt Structures

Over the coming decades, one of the key challenges will be to develop new salt structures capable of assuming both mining and storage functions. Salt domes identified as prospective include Damasławek, Lubień Kujawski and Łanięta [1, 5]. Damasławek is of particular interest because it has been analysed as a potential multi-cavern complex.

The development of a new solution-mining operation requires not only detailed geological exploration and the appropriate mining licence, but also transmission infrastructure and a stable long-term recipient for the produced brine.

A second important direction is hydrogen storage. The expansion of wind and solar power increases the need for seasonal energy storage, and salt caverns are among the few technologies capable of storing gaseous energy carriers on a very large scale. PGI-NRI is investigating both salt domes in central Poland and the bedded salt formations of the Łeba Elevation, which are particularly relevant because of their proximity to offshore wind development in the Baltic Sea [1, 4]. A potential complementary technology is CAES – compressed-air energy storage [5].

4.1. New Structures and Hydrogen Storage

Damasławek is an example of a location where the salt dome is being considered not only as a source of brine but also as a future underground storage complex. Such concepts should be assessed over the entire life cycle of the investment, from geological exploration, through cavern solution mining and brine management, to long-term storage operation. Other salt domes in central Poland, including Lubień Kujawski and Łanięta, may acquire similar importance in the future [1, 5].

For hydrogen storage, cavern tightness and the purity of the stored gas are particularly important. The mineralogical composition of the salt, the proportion of anhydrite and clay interbeds, pressure conditions,

and possible interactions between hydrogen, formation fluids and installation materials must be investigated.

A structure suitable for natural-gas storage is not automatically optimal for hydrogen storage. Demonstration projects and detailed geomechanical studies are therefore essential before full-scale industrial implementation [1, 4].

One of the most significant constraints on future projects may be brine management. Creating a large cavern requires the dissolution of a very large mass of salt and therefore both a sufficient supply of process water and a reliable outlet for saturated brine. The Góra–Mogilno model is advantageous because brine production is linked directly to demand from the chemical industry [11]. At a new location, the absence of a stable brine recipient may constrain the cavern-development rate just as strongly as geological conditions.

4.2. Brine, Logistics and Economics

The economics of new projects also depend on their location relative to salt and brine consumers. Transporting a low-value bulk commodity over long distances rapidly increases costs. For this reason, salt operations historically developed in the vicinity of chemical plants, railway infrastructure and pipelines.

In the future, proximity to natural-gas pipelines, hydrogen networks, fuel terminals or renewable-energy sources will be equally important. The competitive advantage of a particular salt dome may therefore be determined not only by geological conditions, but also by surface infrastructure and the possibility of securing long-term utilisation of the products generated during solution mining.

Safety remains a fundamental prerequisite for development. Salt has extremely low permeability and a favourable ability to self-seal microscopic fractures, but it is also subject to creep. Cavern operation therefore requires continuous monitoring of geometry, pressure, and rock-mass deformation. In the case of hydrogen, it is also necessary to monitor the interaction of the gas with the surrounding rocks, formation fluids and installation materials [1, 4].

Experience from historical mines also demonstrates that uncontrolled inflow of undersaturated water remains one of the most serious hazards in salt mining [9].

5. Discussion and Conclusions

The history of the sector demonstrates a gradual change in the source of economic value: from salt itself, through specialised salt products and brine, to controlled underground space. From this perspective, the decline in production observed between 2021 and 2025 should not be interpreted simply as a regression of the industry.

Kłodawa retains its importance as a producer of mined rock salt, Solino integrates solution mining with underground storage operations, and salt structures are becoming an increasingly important component of energy-security infrastructure [2, 3, 6, 11].

Competition from alternative sources of salt remains an important factor. Vacuum salt and products obtained by evaporation may be competitive where inexpensive energy and large streams of technological brine are available. The road-salt market is also seasonal, while the prices of bulk products are highly sensitive to transport costs.

Consequently, the existence of very large geological resources alone does not guarantee growth in production. A competitive advantage is more likely to result from the ability to market higher-value products and to combine mining with underground storage services.

In the long term, Polish salt mining may therefore develop along two parallel paths. The first will involve conventional production of salt and brine for industry, road maintenance and food-related applications. The second will involve the design and operation of underground space for the storage of fuels, gases, and hydrogen and, locally, for other purposes requiring a stable and isolated subsurface environment.

Understood in this broader way, the salt-mining sector may retain substantial economic importance even if extraction volumes remain stable or continue to decline.

1. ***Geological resources do not constitute a barrier to development:*** *more than 112.2 billion Mg of documented balance resources greatly exceed the present scale of production [2].*
2. ***Conventional mining will remain necessary****, but growth in the value of the sector will increasingly be associated with storage and energy-related functions.*
3. ***The most promising directions include the development of new caverns, hydrogen storage and potentially CAES****, together with the use of existing post-mining voids [1, 3–6].*
4. ***Critical conditions for new investments include brine management, access to transmission networks and long-term geomechanical and hydrogeological monitoring.***
5. *In the future, the term* ***"salt mining" should encompass not only the extraction of NaCl, but also the design, construction, and operation of safe underground storage space.***

Research project funded by the ***"Excellence Initiative – Research University"*** *programme at AGH University of Krakow.*

Keywords*: salt mining, rock salt, salt caverns, energy storage, energy security*

LITERATURA / ***REFERENCES*****:**

[1] Czapowski G., Tarkowski R., 2018. Uwarunkowania geologiczne wybranych wysadów solnych w Polsce i ich przydatność do budowy kawern do magazynowania wodoru. Biuletyn PIG, 472.

[2] Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, 2026. Sól kamienna – zasoby i wydobycie, stan na 31.12.2025 r.; Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce.

[3] Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, 2026. Magazyny kawernowe w Polsce.

[4] Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, 2024–2026. Podziemne magazynowanie wodoru – badania stabilności magazynów na Wyniesieniu Łeby.

[5] Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, 2026. Kawerny solne a transformacja energetyczna.

[6] Kopalnia Soli Kłodawa S.A., 2026. Historia kopalni; informacje o koncesji i możliwościach wykorzystania pustek poeksploatacyjnych.

[7] Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka, materiały dotyczące historii warzelnictwa, kopalni soli i Żup Krakowskich.

[8] Kopalnia Soli Bochnia Sp. z o. o., Historia Kopalni Soli Bochnia.

[9] Kortas G., Maj A., 2014. Okoliczności i skutki katastrofalnego wdarcia wód do kopalni soli w Wapnie. Przegląd Solny, 10, 101–106.

[10] Miłosz J., 2016. Wielkopolska i Kujawy – zagłębie solne XIX i XX wieku – uzdrowiska i kopalnie. W: Głowiński T., Zawadka M. (red.), Od regaliów po dobro narodowe, s. 205–228.

[11] Inowrocławskie Kopalnie Soli „Solino" S.A. (Grupa ORLEN), materiały firmowe: kopalnie Góra i Mogilno, produkcja solanki i magazynowanie.

[12] KGHM Polska Miedź S.A., materiały dotyczące eksploatacji soli kamiennej w O /ZG Polkowice-Sieroszowice.

KOPALNIA SOLI KŁODAWA – OD EKSPLOATACJI SUROWCA DO ODPOWIEDZIALNEGO ZAGOSPODAROWANIA PRZESTRZENI POEKSPLOATACYJNEJ

KŁODAWA SALT MINE – FROM MINERAL EXTRACTION TO THE RESPONSIBLE MANAGEMENT OF MINED-OUT VOIDS

Andrzej SADOWSKI[1], Tomasz KROKOS[1], Grzegorz BARTŁOMIEJCZAK[1]

[1]Kopalnia Soli „Kłodawa" S.A., Aleja 1000-lecia 2, 62-650 Kłodawa
e-mail: gbartlomiejczak@sol-klodawa.com.pl

Kopalnia soli „Kłodawa" S.A. to największy producent soli kamiennej w Polsce działający już od lat 50 dwudziestego wieku. Wydobywana tutaj sól pochodzi z okresu cechsztyńskiego i została uformowana w postaci wysadu solnego. Aktualna eksploatacja odbywa się do poziomu 810 m w trzech polach eksploatacyjnych. Prowadzona jest tradycyjną metodą górniczą z użyciem materiałów strzałowych przy pomocy maszyn spalinowych i elektrycznych. Na przestrzeni wieloletniej eksploatacji powstało pod ziemią ponad 400 km wyrobisk chodnikowych oraz ponad 1000 wyrobisk komorowych, co przełożyło się na ponad 21 mln m^3 pustek poeksploatacyjnych. Wydobywa się tu średnio około 650 tys. Mg soli kamiennej na rok (białej i różowej).

Kopalnia to nie tylko wydobycie, ale również działalność edukacyjna i naukowo-badawcza, inwestowanie w nowe technologie oraz trasa turystyczna – **Rys. 1**.



Rys. 1. Liczba turystów zwiedzających kopalnię w latach 2006-2026

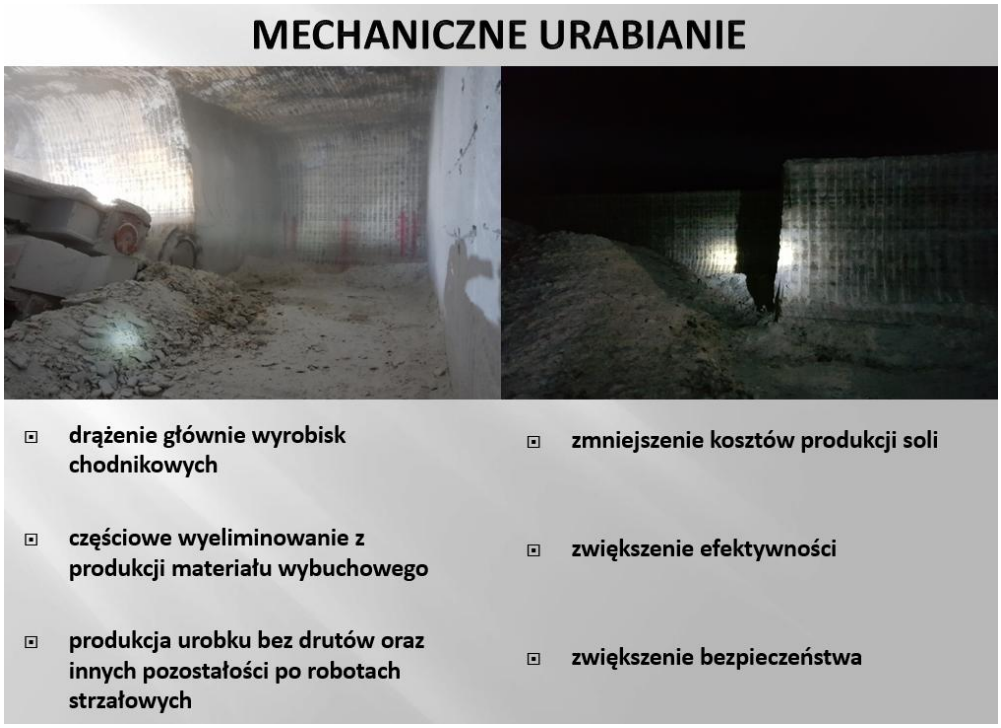
Z myślą o jak najdłuższym oraz bezpiecznym kontynuowaniu eksploatacji Kopalnia podjęła działania ukierunkowane na zagospodarowanie przestrzeni poeksploatacyjnej poprzez wypełnienie już wyeksploatowanych wyrobisk mieszaniną odpadów w postaci podsadzki (prowadząc odzysk odpadów) lub poprzez utworzenie podziemnego składowiska odpadów (PSO). W obu przypadkach plany dotyczyły odpadów obojętnych, innych niż niebezpieczne i niebezpiecznych w technologii wykonywanej w Europie od wielu lat.

Realizacja takich projektów ma charakter proekologiczny i prospołeczny. Przyczyni się między innymi do stworzenia możliwości zagospodarowania odpadów niebezpiecznych pochodzących głównie z procesów termicznych oraz procesów termicznego przekształcania odpadów komunalnych, co byłoby ważnym elementem gospodarki odpadami i ochrony środowiska w Polsce, szczególnie w związku z budową kolejnych spalarni odpadów komunalnych.

Ponadto przedsięwzięcie polegające na podsadzaniu wyeksploatowanych wyrobisk górniczych (wykorzystując do tego celu odpady mające właściwości geotechniczne) w celu zachowania bezpieczeństwa górniczego pod ziemią oraz zapobieganiu w przyszłości szkodom górniczym wynikającym z osiadania terenu, przyczyni się do zwiększenia stateczności górotworu oraz zmniejszenia konwergencji wyrobisk.

Obecnie kopalnia posiada koncesję na eksploatację do 2052 roku. Wdrożenie przedsięwzięcia polegającego na wykorzystaniu odpadów (również niektórych niebezpiecznych) do podsadzania wyrobisk byłby początkiem procesu likwidacji podziemnych wyrobisk kopalnianych, co jest nieuchronne dla kopalni po zakończeniu eksploatacji, a koszty tej likwidacji poniesie skarb państwa. Każdy inny proces likwidacji kopalni (np. zalewanie kopalni solanką nasyconą) będzie procesem bardzo kosztownym, trudnym technicznie i długotrwałym. Proces ten przyczyni się również do możliwości przedłużenia eksploatacji po 2052 roku.

W związku z koniecznością zwiększenia efektywności wydobycia Kopalnia dąży do wprowadzania nowych technologii eksploatacji i produkcji soli pozwalających na efektywniejszą pracę oraz utrzymanie się na trudnym rynku solnym – **Rys. 2**. Jednym z projektów strategicznych jest wprowadzenia mechanicznego urabiania przy pomocy kombajnu typu Continuous Miner.



Rys. 2. Korzyści związane z wprowadzeniem mechanicznego urabiania soli

Słowa kluczowe: eksploatacja, podsadzanie, kombajn

Kłodawa Salt Mine is Poland's largest producer of rock salt and has been operating since the 1950s. The salt extracted here dates from the Zechstein and occurs in a salt diapir. Mining currently extends down to the 810 m level in three mining districts. Conventional mining methods involving blasting are employed, supported by diesel-powered and electric machinery. Over decades of operation, more than 400 km of underground roadways and over 1,000 chambers have been excavated, creating more than 21 million m^3 of mined-out voids. The mine produces an average of approximately 650,000 tonnes of white and pink rock salt annually.

*In addition to extraction, the mine's activities include education, scientific research, investment in new technologies, and the operation of an underground tourist route (**Fig. 1**).*

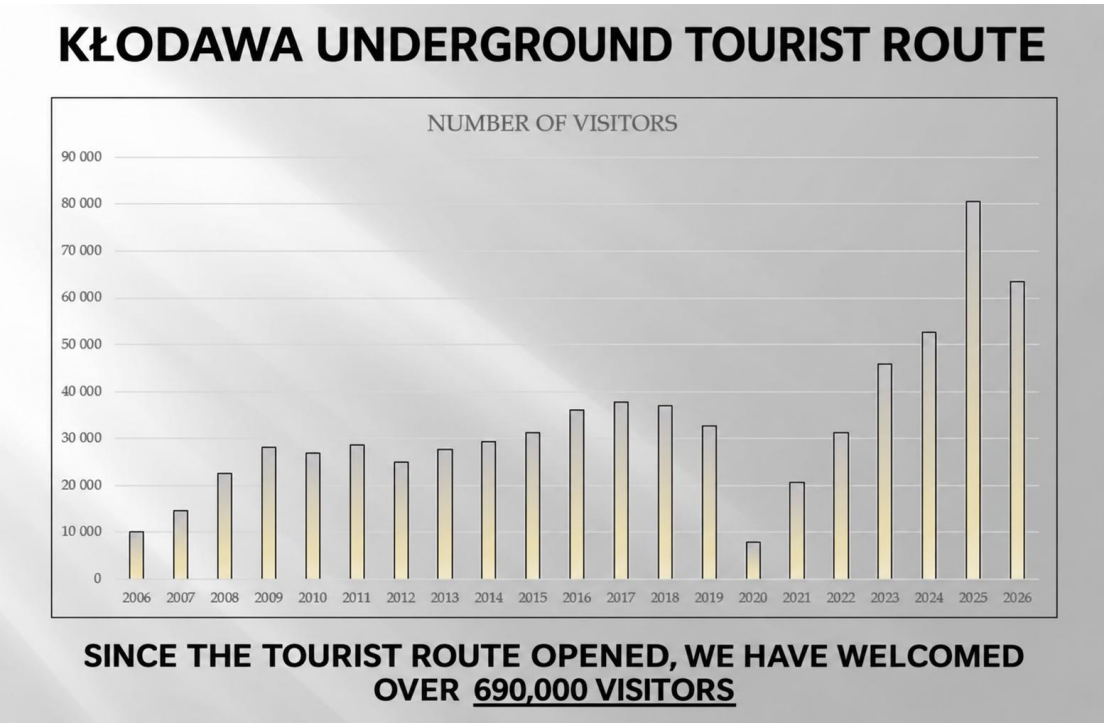


***Fig. 1.** Number of tourists visiting the mine between 2006 and 2026*

To enable mining to continue safely for as long as possible, the mine has taken steps to manage its mined-out voids by filling exhausted workings with a mixture of waste materials used as backfill—a waste recovery operation—or by establishing an underground waste disposal facility. Both proposals envisaged accepting inert, non-hazardous, and hazardous waste, using technologies that have been applied in Europe for many years.

The implementation of such projects offers environmental and social benefits. Among other things, it will provide opportunities to manage hazardous waste generated primarily by thermal processes and the thermal treatment of municipal waste. This would represent an important contribution to waste management and environmental protection in Poland, particularly in view of the construction of additional municipal waste incineration plants.

Furthermore, backfilling exhausted mine workings with waste possessing suitable geotechnical properties, with the aim of maintaining underground mining safety and preventing future mining-related damage caused by ground subsidence, will improve rock mass stability, and reduce the convergence of my workings.

The mine currently holds a mining licence valid until 2052. Implementing a project involving the use of waste, including certain types of hazardous waste, to backfill mine workings would mark the beginning of the decommissioning of the mine's underground workings. This process is inevitable once extraction ends, and its costs will be borne by the State Treasury. Any alternative method of mine closure, such as flooding

the mine with saturated brine, will be very costly, technically challenging, and time-consuming. Backfilling will also help make it possible to extend mining beyond 2052.

Given the need to improve extraction efficiency, the mine is seeking to introduce new mining and salt production technologies that will enable more efficient operations and help it remain competitive in a challenging salt market (**Fig. 2**). One of its strategic projects is the introduction of mechanical cutting using a continuous miner.

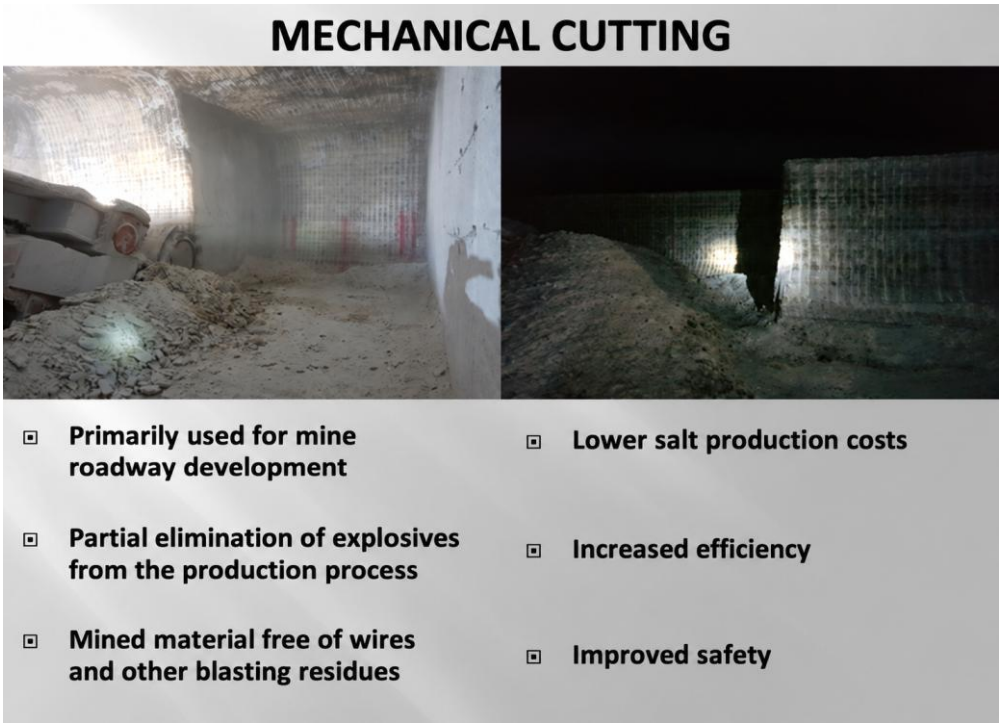


Fig. 2. *Benefits of introducing mechanical salt cutting*

Keywords: *mining, backfilling, continuous miner*

POMORSKI POLIHALIT – SZANSA NA NOWE GÓRNICTWO SOLNE W POLSCE

POMERANIAN POLYHALITE: AN OPPORTUNITY FOR A NEW SALT MINING INDUSTRY IN POLAND

Robert Leszczyński[1], Małgorzata Spiak[1]

[1]KGHM Polska Miedz S.A., e-mail: Robert.Leszczynski@kghm.com, Malgorzata.Spiak@kghm.com

Potas odgrywa istotną rolę w produkcji rolniczej, stanowiąc jeden z podstawowych składników nawozów mineralnych. Wzrastające zapotrzebowanie na nawozy oraz światowa produkcja surowców potasowych ograniczona zaledwie do kilku krajów, zwiększa znaczenie poszukiwania nowych źródeł ich pozyskiwania. W tym kontekście szczególnie interesującym surowcem jest polihalit, będący naturalnym źródłem potasu, magnezu siarki i wapnia. Dzięki swym właściwościom stanowi alternatywę dla tradycyjnych surowców typu chlorkowego i z powodzeniem może być wykorzystywany w produkcji wieloskładnikowych mieszanek.

W referacie przedstawiono wyniki prac geologiczno-poszukiwawczych prowadzonych w ramach projektu PUCK, którego celem było rozpoznanie występowania soli potasowo-magnezowych w obszarze północnego Pomorza. Omówiono aktualną sytuację na światowym rynku nawozów potasowych, znaczenie polihalitu dla sektora nawozowego. Zaprezentowano także najważniejsze parametry geologiczne złoża „Mieroszyno", dla którego w 2025 r. zatwierdzono dokumentację geologiczną wykazującą zasoby geologiczne przekraczające 300 mln ton.

Przeprowadzone analizy wskazują, że złoża polihalitu w rejonie Pucka mogą stanowić istotny element krajowej bazy surowcowej potasu. W warunkach całkowitej zależności Polski od importu nawozów potasowych oraz prognozowanego wzrostu globalnego popytu na ten surowiec, projekt PUCK należy postrzegać jako przedsięwzięcie o znaczącym potencjale gospodarczym i strategicznym, wspierające dywersyfikację źródeł surowców oraz wzmacnianie bezpieczeństwa surowcowego państwa.

Projekt ma unikatowy w skali czasu i miejsca charakter polegający na wybudowaniu, po raz pierwszy od pół wieku, nowoczesnej kopalni podziemnej, w regionie, gdzie tego typu górnictwo nigdy nie zaistniało.

Potassium plays fundamental role in modern agriculture being one of the principal components of mineral fertilizers. Growing demand for fertilizers combined with limited number of countries responsible for global production, increases the importance of identifying new sources of supply. Particular attention is being given to polyhalite deposits, which provide a natural source of potassium, magnesium, sulphur, and calcium. Owing to its properties, polihalite is recognized as an alternative to conventional potassium sources derived from chloride-bearing deposits and may be used as a valuable raw material for the production of multi-nutrient fertilizers.

This paper presents the results of geological exploration carried out as part of the PUCK Project, aimed at exploring potassium-magnesium salt deposits in northern Pomerania. It discusses the current situation in the global potassium fertiliser market, the importance of polyhalite to the fertiliser industry. The paper also presents the key geological parameters of the Mieroszyno deposit, for which geological documentation was approved in 2025, confirming geological resources exceeding 300 million tonnes.

The analyses indicate that the polyhalite deposits in the Puck area could become an important component of Poland's domestic potassium resource base. Given Poland's complete dependence on imported potassium fertilisers and the projected growth in global demand for this raw material, the PUCK Project should be regarded as an initiative with considerable economic and strategic potential. It could support the diversification of raw material supply sources and strengthen Poland's raw material security.

The project is unique in both its historical and regional context, as it involves the development of a modern underground mine for the first time in half a century, in a region where underground mining of this type has never previously been undertaken.

CYFROWY BLIŹNIAK KOPALNI SOLI „KŁODAWA" S.A. JAKO INFRASTRUKTURA DANYCH DLA BEZPIECZEŃSTWA EKSPLOATACJI I PRZYSZŁEGO WYKORZYSTANIA PRZESTRZENI SOLNEJ

DIGITAL TWIN OF THE "KŁODAWA" SALT MINE AS A DATA INFRASTRUCTURE FOR OPERATIONAL SAFETY AND FUTURE USE OF SALT UNDERGROUND SPACES

Damian KURDEK[1], Aleksandra KARBOWSKA[2], Agnieszka MALINOWSKA [2]

[1]Kopalnia Soli „Kłodawa" S.A., Aleja 1000-lecia 2, 62-650 Kłodawa,
e-mail: dkurdek@sol-klodawa.com.pl

[2] AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Kopalnie soli są obiektami o znaczeniu wykraczającym poza bieżącą eksploatację surowca. Pozostawione komory, chodniki, filary, strefy zagrożeń wodnych i gazowych oraz deformacje górotworu tworzą długowieczny system geologiczno-techniczny, którego stan musi być systematycznie dokumentowany, interpretowany i aktualizowany. Szczególnego znaczenia nabiera przy tym możliwość przyszłego zagospodarowania przestrzeni powstałych w wyniku eksploatacji. Ocena takich możliwości wymaga rozpoznania geometrii wyrobisk, ich stateczności, procesów deformacyjnych, warunków geologicznych oraz występujących zagrożeń, a także uwzględnienia relacji pomiędzy przestrzenią podziemną a powierzchnią terenu.

Celem artykułu jest przedstawienie koncepcji cyfrowego bliźniaka Kopalni Soli „Kłodawa" S.A. jako rozwijanego systemu danych łączącego geometrię wyrobisk, monitoring deformacji, informacje o zagrożeniach oraz model 3D w jedno środowisko wspomagania analiz i podejmowania decyzji. Artykuł prezentuje zakres integrowanych danych, strukturę systemu, przykładowe wyniki analiz przestrzennych oraz znaczenie cyfrowego bliźniaka dla przyszłej oceny możliwości bezpiecznego i racjonalnego zagospodarowania przestrzeni poeksploatacyjnych.

Wyniki wskazują, że cyfrowy bliźniak kopalni soli nie powinien być rozumiany wyłącznie jako wizualizacja 3D, lecz jako audytowalna infrastruktura wiedzy o stanie górotworu, procesach deformacyjnych, zagrożeniach wodnych i gazowych oraz relacjach pomiędzy wyrobiskami podziemnymi a powierzchnią. Tak zorganizowany i aktualizowany model danych może stanowić podstawę do identyfikacji, klasyfikacji i oceny pustych przestrzeni pod kątem ich dalszego wykorzystania, z uwzględnieniem uwarunkowań technicznych, geomechanicznych i bezpieczeństwa. Praca nie przesądza o konkretnym sposobie zagospodarowania poszczególnych wyrobisk, lecz wskazuje, że odpowiedzialne planowanie ich przyszłego wykorzystania wymaga spójnego, wielowarstwowego i stale aktualizowanego środowiska danych.

Słowa kluczowe: kopalnia soli, cyfrowy bliźniak, monitoring deformacji, przestrzeń poeksploatacyjna

Salt mines are facilities whose significance extends beyond the ongoing extraction of mineral resources. Abandoned chambers, galleries, pillars, zones of water and gas hazards, as well as rock mass deformations, form a long-lived geological and technical system whose condition must be systematically documented, interpreted, and updated. In this context, the potential future use of spaces created as a result of mining operations is of particular importance. Assessing such possibilities requires a detailed understanding of excavation geometry, structural stability, deformation processes, geological conditions, and existing hazards, as well as consideration of the relationships between underground spaces and the surface.

The aim of this article is to present the concept of a digital twin of the "Kłodawa" Salt Mine S.A. as a developing data system integrating excavation geometry, deformation monitoring, hazard-related information, and a 3D model within a single environment supporting analysis and decision-making. The article presents the scope of integrated data, the system architecture, examples of spatial analysis results, and the role of the digital twin in the future assessment of opportunities for the safe and rational use of post-mining spaces.

The results indicate that a digital twin of a salt mine should not be understood solely as a 3D visualization, but rather as an auditable knowledge infrastructure describing the condition of the rock mass, deformation processes, water and gas hazards, and the relationships between underground workings and the surface. Such an organized and continuously updated data model may provide a basis for the identification, classification, and assessment of void spaces with regard to their potential future use, taking into account technical, geomechanical, and safety-related conditions. The study does not determine any specific form of future use for individual workings but demonstrates that responsible planning of their further utilization requires a coherent, multilayered, and continuously updated data environment.

Keywords: *salt mine, digital twin, deformation monitoring, post-mining space*

Referat będzie opublikowany w formie artykułu w Przeglądzie Solnym 2026

Full text will be published in Salt Review 2026

POTENCJAŁ ROZWOJOWY KRAJOWEGO GÓRNICTWA SOLNEGO, W UWARUNKOWANIACH TRANSFORMACJI ENERGETYCZNEJ ORAZ W PERSPEKTYWIE CELÓW POLITYKI ENERGETYCZNEJ POLSKI DO 2040 R., NA PRZYKŁADZIE MOŻLIWOŚCI ZAGOSPODAROWANIA WYSADU GOLENIÓW

THE DEVELOPMENT POTENTIAL OF DOMESTIC SALT MINING IN THE CONTEXT OF THE ENERGY TRANSITION AND THE OBJECTIVES OF THE ENERGY POLICY OF POLAND UNTIL 2040, EXEMPLIFIED BY THE DEVELOPMENT POSSIBILITIES OF THE GOLENIÓW SALT DOME

Agata PONTEK[1]

[1] AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: pontek@student.agh.edu.pl

Przedmiotem opracowania jest analiza potencjału rozwojowego krajowego górnictwa solnego w kontekście transformacji energetycznej oraz celów Polityki Energetycznej Polski do 2040 r., na przykładzie wysadu solnego Goleniów. Celem referatu jest wykazanie znaczenia lokalizacji oraz możliwości zagospodarowania złóż soli w korelacji z kluczową krajową infrastrukturą paliwowo energetyczną. W treści w szczególności przedstawiono możliwości w zakresie magazynowania gazu ziemnego oraz wodoru. Opracowanie uwzględnia również kwestie wpływu inwestycji związanych z rozwojem magazynowania w strukturach solnych dla utrzymania i rozwoju synergii między poszczególnymi obszarami sektora paliwowo energetycznego. Podstawę przedmiotowego opracowania stanowi analiza informacji źródłowych oraz opracowań specjalistycznych i aktów prawnych. Przywołane w treści permskie struktury solne, w tym wysady Rogóźno, Damasławek, Lubień, Łanięta i Goleniów, dowodzą istnienia znaczącej podstawy geologicznej dla dalszego rozwoju kawernowych podziemnych magazynów gazu (KPMG), z uwzględnieniem potencjału krajowego górnictwa solnego. Wartym szczególnego podkreślenia jest, że ta sama infrastruktura podziemna może jednocześnie wspierać bezpieczeństwo dostaw gazu ziemnego, rozwój OZE i magazynowania wodoru oraz wpływać korzystnie na procesy bilansowania systemów przesyłu nośników energii jak również systemu elektroenergetycznego.

Słowa kluczowe: kawerny solne, magazynowanie gazu ziemnego, magazynowanie wodoru, transformacja energetyczna, Polityka Energetyczna Polski do 2040 r., wysad solny Goleniów

The subject of this paper is an analysis of the development potential of domestic salt mining in the context of the energy transition and the objectives of the Energy Policy of Poland until 2040, exemplified by the Goleniów salt dome. The aim of the paper is to demonstrate the significance of the location and the development possibilities of salt deposits in correlation with key national fuel and energy infrastructure. In particular, the text presents the possibilities for natural gas and hydrogen storage. The paper also addresses the issue of the impact of investments related to the development of storage in salt structures on the maintenance and development of synergy between individual areas of the fuel and energy sector. The basis of this paper is an analysis of source information, specialist studies, and legal acts. The Permian salt structures referred to in the text, including the Rogóźno, Damasławek, Lubień, Łanięta, and Goleniów salt domes, prove the existence of a significant geological basis for the further development of cavern underground gas storage (CUGS), taking into account the potential of domestic salt mining. It is particularly worth emphasizing that the same underground infrastructure can simultaneously support the security of natural gas supply, the development of RES (renewable energy sources) and hydrogen storage, and favourably influence the balancing processes of energy carrier transmission systems as well as the power system.

Keywords: *salt caverns, natural gas storage, hydrogen storage, energy transition, Energy Policy of Poland until 2040, Goleniów salt dome*

Referat będzie opublikowany w formie artykułu w Przeglądzie Solnym 2026

Full text will be published in Salt Review 2026

50 LAT NAD MODELOWANIEM ŁUGOWANIA KAWERN SOLNYCH

50 YEARS OF WORK ON MODELING SALT CAVERN LEACHING

Kazimierz URBAŃCZYK[1]

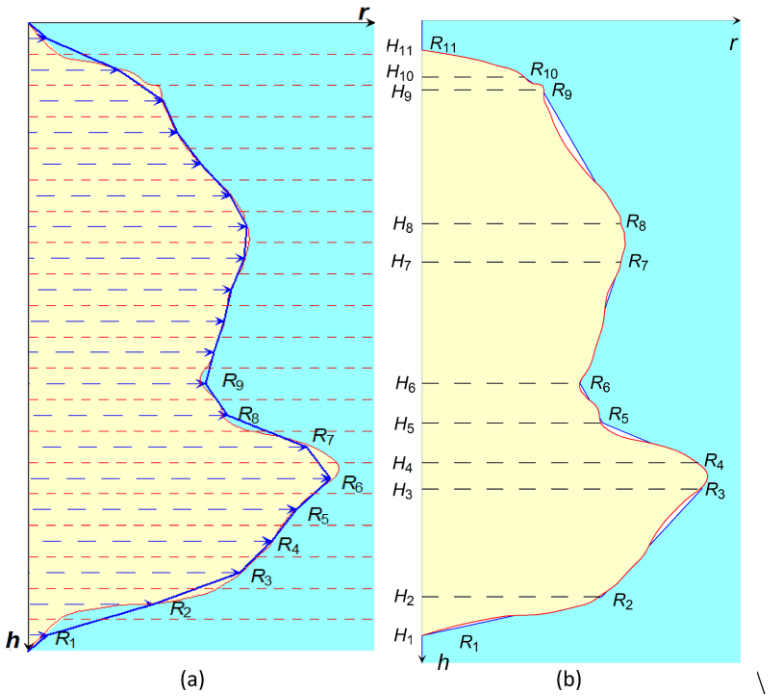
[1] Ubroservice, e-mail: kazeku@poczta.onet.pl

Autor zajmuje się modelowaniem procesu ługowania kawern w złożach soli od 1976 roku. Większość tego okresu przepracował w Chemkopie, obecnie współpracuje z Ubroservice. Wspólnie z Andrzejem Kunstmanem prowadzili badania nad opracowaniem matematyczno-fizycznego modelu procesu, różnych jego przybliżeń i ich implementacji komputerowych oraz wykorzystania stworzonego ostatecznie modelu przy projektowaniu ługowania kawern oraz nadzorze.

W referaciie dokonano przeglądu badań, zwracając uwagę zarówno na ich sukcesy, jak i niepowodzenia, przy czym szczególną uwagę zwrócono na te wyniki, które nie pojawiały się wcześniej w publikacjach.

Są to:

1. Metoda aproksymacji konturu kawerny taka sama jak w typowym przypadku obszaru o stałym brzegu nie sprawdza się w przypadku przemieszczającego się brzegu obszaru. Zaproponowano oryginalną metodę niezależnej aproksymacji przemieszczającego się brzegu przez linię łamaną o niezależnie przemieszczanych odcinkach (**Ryc.1**).



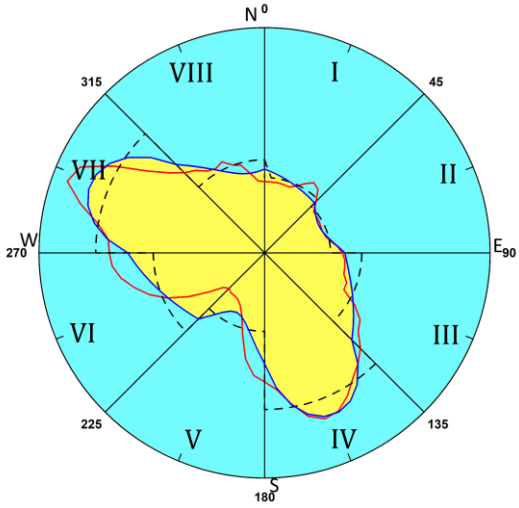
kontur kawerny, kontur zaproksymowany, podział na plastry

cavern contour, approximated contour, division onto slices

Ryc. 1. Aproksymacja pionowego półprofilu kawerny: (**a)** przez promienie ekwiwalentne w plastrach; (**b**) łamaną niezależną od aproksymacji plastrami por. (Urbańczyk, 2018)

Fig. 1. *Approximation of the cavern vertical semi-profile: (a) by equivalent radia of the cavern slices (b) by an open polygonal line independent of approximation by slices cf. (Urbańczyk, 2018)*

2. Porównując wyniki modelowania z rzeczywistym ługowaniem, stwierdzono, że szybkość ługowania zależy od niedosycenia potęgowo z wykładnikiem 1,5.
3. Równania Naviera-Stokesa dominowane są przez gradient ciśnienia i wpływ grawitacji. W związku z tym nie jest możliwe wyznaczenie rozkładu prędkości przepływu w kawernie z tych równań metodami relaksacyjnymi.
4. W kawernie panują w przybliżeniu warunki hydrostatyczne a przepływ można uważać za mało istotną „poprawkę" do tych warunków.
5. Za rozkład stężenia w kawernie odpowiada dyfuzja turbulentna wywołana siłami grawitacji. Pominięcie tego efektu prowadzi do zerowego stężenia w kawernie poza warstwą przyścienną.
6. Model 3D polega na podziale górotworu i kawerny na sektory azymutalne. W każdym sektorze modeluje się kontur ekwiwalentnych promieni. Przejście od promieni w sektorach do przybliżonego przekroju poziomego przez kawernę uzyskuje się łukami z ciągłością, zachowaniem pola w sektorach oraz wartością średnią harmoniczną na granicy sektorów.



— kontur kawerny - - - promienie ekwiwalentne, — odtworzony kontur kawerny

— *cavern contour, - - - equivalent radia*, — *recovered cavern*

Ryc. 2. Odtworzenie obrysu poziomego kawerny z promieni ekwiwalentnych
Fig. 2. *Recovery of cavern contour from equivalent radiuses*

7. Niejednorodność współczynników ługowania uzyskuje się za pomocą procedury KORLOG, porównującej przyrosty objętości według modelu i według echosondy.

Program UBRO, oparty na tych osiągnięciach stał się w całym świecie podstawowym narzędziem do projektowania ługowania kawern i nadzoru nad przebiegiem tego ługowania.

Autor nadal uczestniczy w ciągłym rozwoju oprogramowania UBRO poprzez konsultacje techniczne, identyfikację obszarów wymagających udoskonalenia oraz ulepszanie interfejsu użytkownika, przyczyniając się w ten sposób do utrzymania jego statusu standardowego oprogramowania do projektowania i nadzoru procesów ługowania kawern solnych.

Słowa kluczowe: Modelowanie ługowania, kawerny solne, program UBRO, górnictwo ługownicze

The author has been engaged in modeling the leaching process of salt caverns since 1976. He spent most of this period working at Chemkop and is currently associated with Ubroservice. In collaboration with Andrzej Kunstman, he conducted research aimed at development of a mathematical and physical model of the process, various approximations of the model, and their computer implementations, as well as the application of the final model in the design and supervision of cavern leaching.

The paper reviews the research, highlighting both its successes and its setbacks, with particular attention given to results that had not previously appeared in the published literature. These include:

1. *The method of approximating the cavern contour used for a typical fixed-boundary domain is not suitable for a domain with a moving boundary. An original method was proposed in which the moving boundary is approximated independently by a polygonal line whose segments are displaced independently (**Fig.1**).*
2. *By comparing the modeling results with the actual leaching process, it was found that the leaching rate depends on the undersaturation raised to the power of 1.5.*
3. *The Navier-Stokes equations are dominated by the pressure gradient and the effect of gravity. Therefore, it is not possible to determine the distribution of flow velocity in the cavern from these equations using relaxation methods.*
4. *Hydrostatic conditions prevail in the cavern; the flow can be considered a negligible "correction" to these conditions.*
5. *The concentration distribution within the cavern is governed by turbulent diffusion induced by gravitational forces. Neglecting this effect results in zero concentration throughout the cavern, except the -wall boundary layer*
6. *The transition from radii in sectors to an approximate horizontal cross-section through the cavern is achieved using arcs that ensure continuity and preserve the area of each sector (**Fig.2**).*
7. *Inhomogeneity of leaching coefficients is obtained using the KORLOG procedure, which compares volume increments derived from the model with those obtained from the sonar survey.*

Based on these achievements, the UBRO program has become the standard tool worldwide for designing cavern leaching operations and monitoring solution-mining operations.

The author continues to contribute to the ongoing development of the UBRO software through technical consultations, the identification of areas requiring improvement, and enhancement of the user interface, thereby helping to maintain its status as the standard software for salt cavern leaching design and supervision.

Keywords: *Modeling of leaching process, salt caverns, UBRO software, solution mining*

LITERATURA / REFERENCES:

- URBAŃCZYK, K., 2018. Model numeryczny procesu ługowania (Proces ługowania kawern solnych cz. III) / Numerical model of leaching process. (Salt cavern leaching process p. III) *Przegląd Solny / Salt Review* 14**:** 54–69

Referat będzie opublikowany w formie artykułu w Przeglądzie Solnym 2026

Full text will be published in Salt Review 2026

O PEWNYM PLAGIACIE, CZYLI JAK (NIE) KORZYSTAĆ Z AI

ON A CASE OF PLAGIARISM, OR HOW (NOT) TO USE AI

Kazimierz URBAŃCZYK[1]

[1] Ubroservice, e-mail: kazeku@poczta.onet.pl

Fragment artykułu opublikowanego w czasopiśmie *Processes* (Cen i in., 2024) wykorzystuje materiał z artykułu opublikowanego w Przeglądzie *Solnym* (Urbańczyk, 2018). Materiał ten został wykorzystany bez podania źródła, co stanowi plagiat. Plagiat dotyczy zarówno metody aproksymacji półprofilu kawerny (cztery rysunki i szesnaście równań), jak i procedury konstruowania poziomego przekroju przez kawernę na podstawie ekwiwalentnych promieni w sektorach kątowych (jeden rysunek i pięć równań).

Istnieją silne przesłanki sugerujące, że plagiat wynikał z bezkrytycznego polegania autorów na treściach generowanych przez sztuczną inteligencję. Wniosek ten potwierdzają następujące cechy plagiatu:

- Szereg oznak, że autorzy nie zrozumieli prezentowanego przez siebie materiału.
- Cytowania nieistniejących publikacji.
- Cytowania publikacji, które nie zawierają informacji im przypisywanych.
- Cytowania literatury niezwiązanej z tematem.
- Błędy merytoryczne.
- Stosowanie niekonwencjonalnej terminologii.

Nie ma nic złego w korzystaniu ze sztucznej inteligencji. Jednak treści generowane przez sztuczną inteligencję nigdy nie powinny być akceptowane bez starannej weryfikacji. Przygotowując przegląd literatury, badacze powinni:

- Sprawdzić, czy wszystkie cytowane publikacje rzeczywiście istnieją.
- Potwierdzić, że cytowane prace zawierają informacje, które są im przypisywane.
- Upewnić się, że ważne publikacje czołowych autorów nie zostały pominięte przez narzędzia sztucznej inteligencji.
- Krytycznie analizować materiały generowane przez sztuczną inteligencję, aż do ich pełnego zrozumienia.
- Pominąć wątpliwe materiały, jeśli wątpliwości nie udało się rozwiać.

Przede wszystkim autorzy powinni posiadać jakie takie obycie w dziedzinie, o której piszą.

Po zgłoszeniu sprawy jeden z autorów wysłał przeproszenie, stwierdzając, że plagiat był wynikiem niedopatrzenia i nieumyślnego pominięcia oryginalnej publikacji w bibliografii. Autorzy zaproponowali poprawioną wersję artykułu, usuwając plagiat i poprawiając najistotniejsze błędy. Mimo to, szesnaście miesięcy po ujawnieniu sprawy, oryginalna praca zawierająca plagiat nadal jest dostępna bez żadnego komentarza wydawnictwa.

Słowa kluczowe: plagiat, AI, błędy AI, sprawdzanie AI, model procesu ługowania

Part of an article published in Processes (Cen et al., 2024) makes use of material from an article published in Przegląd Solny (Urbańczyk, 2018). The material was used without acknowledging the original source, which constitutes plagiarism. The plagiarism involves both the method for approximating a cavern half-profile (four figures and sixteen equations) and the procedure for constructing a horizontal cavern cross-section based on equivalent sector radii (one figure and five equations).

There is strong evidence suggesting that the plagiarism resulted from the authors' uncritical reliance on AI-generated content. This conclusion is supported by the following features of the plagiarized text:

- *Numerous indications that the authors did not understand the material they were presenting.*
- *Citations of non-existent publications.*
- *Citations of publications that do not contain the information attributed to them.*
- *Citations of literature unrelated to the topic.*
- *Factual errors.*
- *Use of unconventional terminology.*

There is nothing inherently wrong with using AI. However, AI-generated content should never be accepted without careful verification. When preparing a literature review, researchers should:

- *Verify that all cited publications actually exist.*
- *Confirm that the cited works contain the information attributed to them.*
- *Ensure that important publications by leading authors have not been omitted by AI tools.*
- *Critically examine AI-generated material until you fully understand it.*
- *Omit doubtful material if uncertainties cannot be resolved.*

Above all, authors should have a working knowledge of the field in which they are writing.

Following notification of the case, one of the authors issued an apology, stating that the plagiarism resulted from oversight and the unintentional omission of the original publication from the reference list. The authors proposed a corrected version of the paper, removing the plagiarized material and correcting the most significant errors. However, despite this, sixteen months after the case was reported, the original paper containing the plagiarized material remains available without any editorial notice.

Keywords: *plagiarism, AI, errors of AI, verification of AI, leaching process model*

LITERATURA / *REFERENCES*:

- CEN X., MENG X., REN Z., CAO J. 2024. Three-Dimensional Heterogeneous Salt Cavern Underground Gas Storage Water Solution Cavity Model Study. *Processes*, **12**, 1124. doi.org/10.3390/pr12061124
- URBAŃCZYK, K. 2018**.** Model numeryczny procesu ługowania (Proces ługowania kawern solnych cz. III) /Numerical model of leaching process. (Salt cavern leaching process p. III). *Przegląd Solny / Salt Review*, **14** 54-69.

PORWAKI SKAŁ CECHSZTYŃSKICH W CZAPACH WYSADÓW (NA PRZYKŁADZIE POLSKI I NIEMIEC)

ZECHSTEIN ROCK STRINGERS IN SALT DIAPIR CAP-ROCKS: EXAMPLES FROM POLAND AND GERMANY

Joanna JAWORSKA[1]

[1]Instytut Geologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu,
e-mail: veronika@amu.edu.pl

WSTĘP

W czapach wysadów solnych, obok drobnoziarnistego materiału rezydualnego powstałego w wyniku rozpuszczania soli kamiennej, występują fragmenty pierwotnych skał cechsztyńskich, określane w niniejszej pracy jako porwaki. Porwaki zdefiniowano jako fragmenty pierwotnej skały cechsztyńskiej, przemieszczone i wydźwignięte wraz z solami kamiennymi podczas diapiryzmu, oddzielone lub częściowo oddzielone od macierzystego poziomu stratygraficznego/podłoża, a następnie włączone do czapy podczas rozpuszczania stropowej części wysadu. Stanowią one szczególny składnik materiału rezydualnego, ale zachowują cechy pozwalające odróżnić go od drobnoziarnistego residuum po rozpuszczeniu halitu.

Tak zdefiniowane porwaki udokumentowano w czapach wysadów Wapna, Mogilna, Goleniowa oraz Gorleben. Podstawę obserwacji i identyfikacji porwaków stanowił materiał rdzeniowy, opisy petrograficzne próbek z czap oraz opublikowane profile, przekroje i dokumentacje archiwalne.

W literaturze fragmenty nie-solnych skał w obrębie struktur solnych określa się m.in. jako *boudins, blocks, isolated blocks, detached blocks, rafts, embedded rock bodies* oraz *stringers*. W polskiej literaturze termin porwak stosowano do fragmentów anhydrytu w obrębie wysadów; obecnie wydaje się zasadnym stosowanie tego samego terminu również do tych samych bloków anhydrytu rozpoznanych również w czapach. Ze względu na rozpowszechnienie w literaturze dotyczącej tektoniki solnej terminu *stringer* wydaje się on najbardziej właściwym angielskim odpowiednikiem słowa porwak, choć nie wszystkie przywołane określenia są w pełni synonimami.

IDENTYFIKACJA PORWAKÓW

Najczęściej identyfikowanymi porwakami są fragmenty anhydrytu głównego (A3), rzadziej anhydrytu pegmatytowego (A4). Występują w otoczeniu gipsów i utworów gipsowo-ilastych, od których odróżniają się większą twardością, większym ciężarem, masywną budową oraz zachowanymi cechami strukturalno-teksturalnymi (w tym strukturami sferolitycznymi i radialnymi). W materiale z Gorleben stwierdzono laminację składnikami węglanowymi, natomiast w Mogilnie laminację nachyloną pod kątem około 70°. W anhydrytach z Mogilna i Goleniowa rozpoznano także wielokrotne zbliźniaczenia deformacyjne. Zachowanie laminacji, struktur sferolitycznych i radialnych oraz zbliźniaczeń deformacyjnych umożliwia petrograficzne i niekiedy stratygraficzne rozpoznanie porwaków. Porwaki anhydrytowe (podobnie jak piaskowce anhydrytowe, stanowiące typowe residuum tworzące się bezpośrednio nad zwierciadłem soli) ulegają gipsyfikacji, lecz proces ten przebiega wolniej niż w drobnoziarnistym residuum. Stąd wyraźna różnica między otaczającą skałą gipsową a anhydrytowym porwakiem, który jest niekiedy tylko częściowo zgipsyfikowany.

ZNACZENIE GEOLOGICZNE I DOKUMENTACYJNE

Obecność porwaków w czapach może dokumentować litologię przystropowej i głębszej części wysadu. Rozpoznanie fragmentów anhydrytu głównego A3 w czapie wskazuje, że poziom ten został wyniesiony, sfałdowany i rozerwany podczas rozwoju struktury. Może także sugerować występowanie dalszych

fragmentów A3 poniżej zwierciadła soli. Zbieżność występowania nie-solnych ogniw pod zwierciadłem soli i porwaków w czapie obserwuje się m.in. w Goleniowie i Gorleben.

Duże bloki anhydrytowe tworzą kontrast właściwości mechanicznych względem otaczających gipsów i skał gipsowo-ilastych. Spękania wewnątrz porwaku oraz strefy kontaktu anhydryt–gips mogą potencjalnie wpływać na koncentrację naprężeń i drogi przepływu wód. Profile Gorleben wskazują ponadto, że w sąsiedztwie dużych bloków anhydrytu czapa może lokalnie osiągać znacznie większą miąższość niż w miejscach, w których takich ciał nie rozpoznano.

Pozorna rzadkość porwaków może wynikać przede wszystkim z niepełnego rdzeniowania czap i złego stanu zachowania starszych rdzeni. Pomijanie czapy w programach nowych wierceń uniemożliwia ocenę jej rzeczywistej niejednorodności. Dokumentowanie nowych otworów powinno zatem obejmować ciągłe lub celowane rdzeniowanie czapy oraz badania mineralogiczne, petrograficzne i strukturalne.

Słowa kluczowe: wysad solny, czapa, porwak, anhydryt, cechsztyn, Wapno, Mogilno, Goleniów, Gorleben

INTRODUCTION

In salt-diapir cap-rocks, fragments of primary Zechstein rocks occur alongside fine-grained residual material formed through the dissolution of rock salt. In this study, these fragments are referred to as stringers. Stringers are defined as fragments of primary Zechstein rocks that were displaced and uplifted together with rock salt during diapirism, detached or partly detached from their parent stratigraphic horizon or source bed, and subsequently incorporated into the cap-rock during dissolution of the upper part of the diapir. They constitute a specific component of the residual material but retain features that allow them to be distinguished from the fine-grained residue left after halite dissolution.

Stringers defined in this way have been documented in the cap-rocks of the Wapno, Mogilno, Goleniów, and Gorleben salt diapirs. Their identification was based on core material, petrographic descriptions of cap-rock samples, and published borehole profiles, cross-sections, and archival documentation.

In the literature, fragments of non-salt rocks within salt structures are variously described as boudins, blocks, isolated blocks, detached blocks, rafts, embedded rock bodies, and stringers. In Polish literature, the term porwak has been applied to anhydrite fragments occurring within salt diapirs. It now appears reasonable to use the same term for equivalent anhydrite blocks identified in cap-rocks. Given the widespread use of stringer in the salt-tectonics literature, this term appears to be the most appropriate English equivalent of the Polish term porwak, although the terms listed above are not entirely synonymous.

IDENTIFICATION OF STRINGERS

The most commonly identified stringers are fragments of the Main Anhydrite (A3), with Pegmatitic Anhydrite (A4) occurring less frequently. They are enclosed within gypsum and gypsum–clay rocks, from which they differ in their greater hardness and density, massive structure, and preserved structural and textural features, including spherulitic and radial structures. Carbonate lamination has been identified in material from Gorleben, whereas lamination inclined at approximately 70° has been observed at Mogilno. Multiple deformation twins have also been identified in anhydrites from Mogilno and Goleniów. The preservation of lamination, spherulitic and radial structures, and deformation twins allows the stringers to be identified petrographically and, in some cases, assigned stratigraphically.

Anhydrite stringers, like anhydrite sandstones representing the typical residue formed directly above the top-of-salt surface, undergo gypsification. However, this process proceeds more slowly in the stringers than in the fine-grained residue. Consequently, a distinct contrast occurs between the surrounding gypsum rock and the anhydrite stringer, which may be only partly gypsified.

GEOLOGICAL AND DOCUMENTARY SIGNIFICANCE

The presence of stringers in cap-rocks may provide evidence of the lithology of both the uppermost and deeper parts of a salt diapir. The identification of Main Anhydrite (A3) fragments within a cap-rock indicates that this unit was uplifted, folded, and disrupted during the development of the structure. It may also suggest the presence of additional A3 fragments below the top-of-salt surface. A correspondence between

non-salt units below the top of salt and stringers within the cap-rock has been observed, among other localities, at Goleniów and Gorleben.

Large anhydrite blocks create a contrast in mechanical properties relative to the surrounding gypsum and gypsum–clay rocks. Fractures within stringers and anhydrite–gypsum contact zones may influence stress concentrations and groundwater-flow pathways. Borehole profiles from Gorleben also indicate that, in the vicinity of large anhydrite blocks, the cap-rock may locally be considerably thicker than in areas where such bodies have not been identified.

The apparent rarity of stringers may result primarily from incomplete coring of cap-rocks and the poor preservation of older cores. Excluding the cap-rock from new drilling programmes prevents a reliable assessment of its actual heterogeneity. Documentation of new boreholes should therefore include continuous or targeted coring of the cap-rock, accompanied by mineralogical, petrographic, and structural investigations.

***Keywords**: salt diapir, cap-rock, stringer, anhydrite, Zechstein, Wapno, Mogilno, Goleniów, Gorleben*

Referat będzie opublikowany w formie artykułu w Przeglądzie Solnym 2026

Full text will be published in Salt Review 2026

ZAPOMNIANE SOLE KAMIENNE TRIASU W POLSCE – WYSTĘPOWANIE, WYKSZTAŁCENIE I GENEZA

FORGOTTEN TRIASSIC ROCK SALTS IN POLAND – OCCURRENCE, CHARACTERISTICS AND GENESIS

Grzegorz CZAPOWSKI[1], Marta HODBOD[1]

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

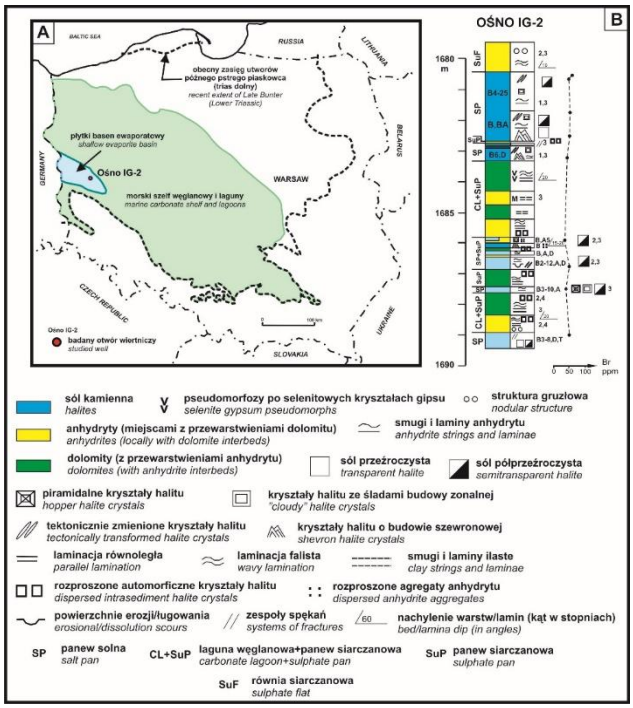
Utwory solne okresu triasowego w Polsce budują kompleksy skał osadowych, obejmujący pokłady soli kamiennej przewarstwione iłowcami i mułowcami z domieszką dolomitu i anhydrytu oraz dolomitem z anhydrytem. Kompleksy te występują na obszarze Niżu Polskiego, głownie w południowo-zachodniej i centralnej Polsce (Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2016). Sedymentacja ewaporatów w triasie występowała w dwóch interwałach czasowych: dolnym triasie (górny pstry piaskowiec, ret, piętro olenek) oraz w późnym triasie (dolny kajper, piętro karnik).

SOLE DOLNEGO TRIASU

U schyłku dolnego triasu na większości obszaru południowego basenu permskiego nastąpił rozwój facji kontynentalnych, z rozległą saliną w osi basenu, obramowaną utworami sebkhy, przechodzącymi w stronę otaczających zbiornik wyniesień w osady aluwialne (Bachmann i in., 2010). Na obszarze SW Polski wschodni kraj wspomnianej saliny zrejestrował się osadami płytkiego ewaporatowego zbiornika w zachodniej części monokliny przedsudeckiej (**Fig. 1A**) w rejonie Ośno-Sulechów-Chlebowo (Gajewska, 1964).

Sole dolnego triasu (retu) występują w obrębie tzw. „warstw gipsowych I" (Gajewska, 1964) w formie przewarstwień grubości cm-dcm do ok. 9 m wśród anhydrytów i dolomitów. Przebadano je dotychczas jedynie w profilu jednego otworu wiertniczego (Ośno IG-2; ryc. 1B), gdzie ich łączna miąższość przekracza 13 m (Gajewska, 1983) zaś wykształcone są jako sole kamienne różnokrystaliczne i wielkokrystaliczne wtórne, rzadziej drobnokrystaliczne, białe, szare i beżowe, ze smugami i skupieniami anhydrytu (ryc. 1B). Sporadycznie występuje w soli rozproszona substancja ilasta (Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2016). W solach występują liczne kryształy halitu ze śladami budowy zonalnej oraz sporadycznie kryształy piramidalne, częste są kryształy o budowie szewronowej oraz odnotowano pojedyncze powierzchnie rozmyć (Ryc. 1B). Powszechne są wydłużone tektonicznie kryształy halitu. Warstwy chlorkowe przedzielone są zmiennej (dcm-m) grubości warstwami anhydrytu (Ryc. 1B) z wkładkami dolomitu, przechodzących w dolomity z wkładkami siarczanów. Skały te cechuje laminacja pozioma i falista, w siarczanach widoczna jest struktura gruzłowa, rzadko obserwuje się pojedyncze kryształy halitu oraz pseudomorfozy po selenitowych kryształach gipsu (**Ryc. 1B**).

Opisane cechy strukturalne badanych utworów i zawartość bromu (48-62 ppm; **ryc. 1B**) w chlorkach wskazują na ich powstanie w środowisku solnej panwi nadmorskiej, stanowiącej obok równi sebkhy element składowy wspomnianego płytkiego zbiornika ewaporacyjnego.



Ryc. 1. Litofacje i paleogeografia (A) utworów dolnego triasu (górny pstry piaskowiec = ret; wg Dadlez i in. 1998; zmienione) na obszarze Polski oraz profil otworu wiertniczego Ośno IG-2 z solami kamiennymi retu (B; wg Czapowski i in. 1992; zmienione). Objaśnienia: A- sól równokrystaliczna, B – sól różnokrystaliczna, B 3-10 - sól różnokrystaliczna, średnica kryształów halitu w mm, D – sól wielkorystaliczna wtórna, T – rozproszona substancja ilasta, M – skała beztekstularna; barwa skały: 1 – biała, 2 - szara, 3 - beżowa, 4 – niebieska.

Fig. 1. *The Lower Triassic (Upper Bunter = Röt) lithofacies and palaeogeography (A: after Dadlez et al. 1998; modified) in the Poland and the well Ośno IG-2 profile with the Röt rock salts (B; after Czapowski et al. 1992; modified). Captions: A - monomorphic halite, B – polymorphic halite, B 3-10 - polymorphic halite, crystal size in mm, D – secondary giant halite, T – dispersed clay matter, M – structureless rock; rock colour: 1 – white, 2- grey, 3 - beige, 4 – blue.*

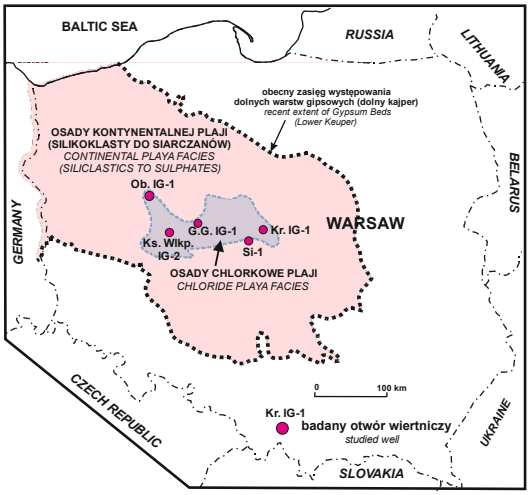
SOLE GÓRNEGO TRIASU

Górny trias na większości obszaru południowego basenu permskiego zaznaczył się rozwojem facji kontynentalnych, z rozległymi obszarami śródlądowej playi zaś w szeregu jej zagłębień, np. obniżenie Krośniewic na terenie Polski, powstały saliny z depozycją ewaporatów (Bachmann i in., 2010).

Chlorki zaliczone do górnego triasu (dolny kajper) powstały w obrębie niewielkiego śródlądowego salinarnego zbiornika, zajmującego w środkowym kajprze centrum Polski i otoczonego klastyczno-siarczanowymi osadami kontynentalnej playi (Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2016).

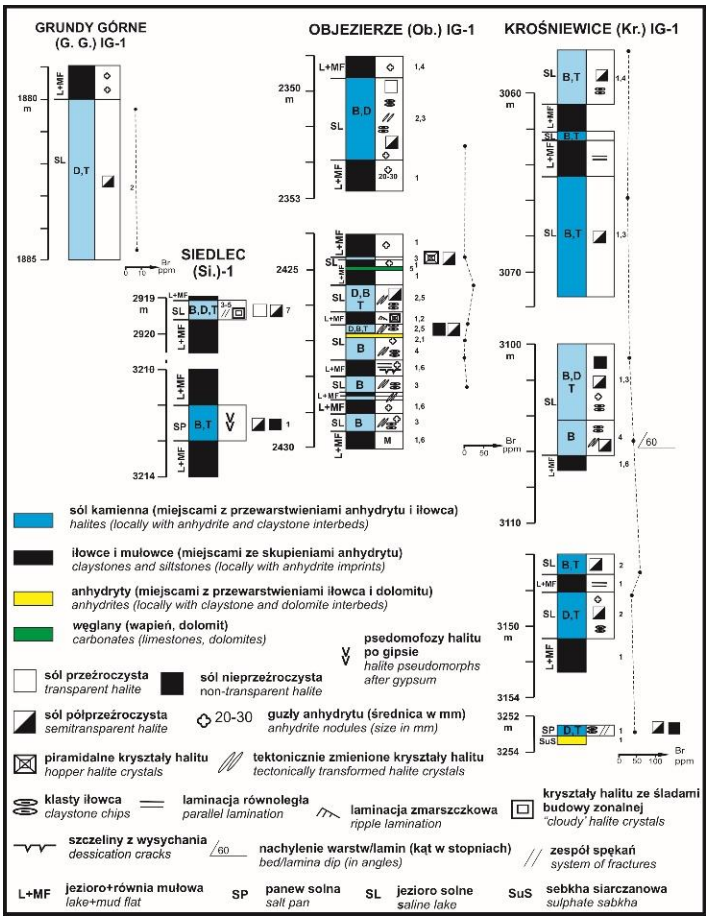
Sole kajpru przebadano dotychczas w 4 otworach wiertniczych (**Ryc. 2**), gdzie ich warstwy grubości od kilku do 90 m są przedzielone seriami iłowców i mułowców ze skupieniami i przewarstwieniami anhydrytu, dolomitu i wapieni (op. cit.). Są to sole kamienne głównie różnokrystaliczne i wielkokrystaliczne wtórne, białe, beżowe, miodowe do różowych, ze skupieniami anhydrytu i rozproszoną substancją ilastą.

W solach zaobserwowano liczne kryształy halitu ze śladami budowy zonalnej oraz sporadycznie kryształy piramidalne, oraz pseudomorfozy halitu po selenitowych kryształach gipsu (**Ryc. 3**). Powszechne są tu wydłużone tektonicznie kryształy halitu oraz okruchy iłowców. Warstwy chlorkowe przedzielone są zmiennej (dcm-m) grubości warstwami iłowców i mułowców ze skupieniami anhydrytu, laminowane równolegle, podrzędnie odnotowano cienkie (cm-dcm grubości) wkładki anhydrytu z przewarstwieniami iłowców i dolomitu oraz wkładki dolomitu i wapienia. W skałach pelitycznych sporadycznie zaobserwowano laminację zmarszczkową, szczeliny z wysychania oraz piramidalne kryształy halitu.



Ryc. 2. Występowanie utworów solnych górnego triasu (dolny kajper, warstwy gipsowe dolne) na obszarze Polski i lokalizacja zbadanych profili wiertniczych (Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2016)

Fig. 2. *Occurrence of the Upper Triassic (Lower Keuper, Lower Gypsum Beds) salt deposits in Poland and location of studied wells (after Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2016)*



Ryc. 3. Szczegółowe profile utworów późnego triasu z solami kamiennymi (dolny kajper, warstwy gipsowe dolne; wg Gajewska i in. 1985; zmienione) w badanych otworach wiertniczych z obszaru Polski (patrz **ryc. 4**). Objaśnienia: B - sól różnokrystaliczna, D – sól wielkorystaliczna wtórna, T – rozproszona substancja ilasta, M – osad beztekstularny, 3-5 – średnica kryształów halitu w mm, barwa skały: 1 - szara, 2 - beżowa, 3 – różowa, 4 – czerwona, 5 – brunatna, 6 – zielona, 7 - miodowa.

Fig. 3. *Detail profiles of Late Triassic deposits with rock salts (Lower Keuper, Lower Gypsum Beds; after Gajewska et al., 1985; modified) in studied wells from Poland (see **Fig. 4**). Captions: B – polymorphic halite, D – secondary giant halite, T – dispersed clay matter, M – structureless deposit, 3-5 – halite crystal size in mm, rock colour: 1 - grey, 2 - beige, 3 – pink, 4 – red, 5 – brownish, 6 – green, 7 - honey.*

Wymienione cechy strukturalne badanych osadów i niska zawartość bromu (0-42 ppm; **ryc. 3**) w chlorkach wskazują na powstanie soli z nisko skoncentrowanych solanek (Gajewska i in., 1985) w środowisku okresowo zasolonego zbiornika jeziornego, zaś źródłem ługów mogły być odsłonięte wspomniane sole kamienne dolnego triasu i/lub najmłodsze wydzielenia solne cechsztynu, budujące strop formujących się wówczas struktur wysadowych (Krzywiec, 2004, 2012). Częsty recycling zakumulowanych chlorków, normalny w warunkach śródlądowej playi, skutkował powstaniem soli zubożonych w brom.

Słowa kluczowe: sole kamienne triasu, występowanie, charakterystyka, geneza, Polska

The Triassic rock salt deposits in Poland formed the sedimentary deposits complexes, including halite layers interbedded by claystones and siltstones with dolomite and anhydrite admixtures as well as dolomite with anhydrite layers. These deposits occur mainly within the Polish Lowlands, in the south-western and the central Poland (Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2016). Triassic evaporite sedimentation occurred during two periods: in late Lower Triassic (Upper Buntsandstein, older Rethian, Olenekian stage) and in early Upper Triasssic (Lower Keuper, Carnian stage).

*The late Upper Triasic halites ocurr as interbeds cm-dcm to do 9 m thick within series of anhydrites and dolomites dcm-m thick (Gajewska, 1964). They were studied in the single well Ośno IG-2 (**Fig. 1**), where total halite thickness is over 13 m (Gajewska, 1983). They were developed mainly as polymorphic and secondary giant halites, seldom monomorphic fine crystalline, white, grey and beige, with dispersed clay matter, anhydrite flames and nodules, frequent zonal, pyramidal and chevron halite crystals and single erosion surfaces (**Ryc. 1B**). Dolomite and anhydrite beds exhibit planar and wavy lamination and nodular structure in sulphates as well as rare halite crystals and selenite pseudomorphs (**Ryc. 1B**). These features and relatively high bromine content (48-62 ppm; **Fig. 1B**) indicate their origin in the seaside salt pans being components of costal sabkha.*

*The Upper Triassic (Lower Keuper, Carnian stage) rock salts, belonged to the Lower Gypsum Beds unit, occupied the central part of the Kueper basin in Poland (**Fig. 2**) and they have been registered as 1-3 salt seams (each one consisted of 1-2 salt beds from several to 90 m thick; total salt thickness varies from over 40 to 143 m). They were studied in 4 core profiles (**Fig. 2**) and were developed as white, beige, honey to orange and pink halites, mainly polymorphic (coarse to fine crystalline), differed in transparency (controlled by dispersed clay matter, claystone chips and anhydrite aggregates), locally with tectonically transformed zones (fractures, elongated halite crystals) and occurrences of secondary giant halite. Bromine (0 to 42 ppm) content is very low (**Fig. 3**). Salt beds are divided by grey greenish to olive and locally brownish claystones, structureless to wavy and parallel laminated, with anhydrite nodules and single halite crystals and rare thin layers of nodular to wavy laminated anhydrite. Similar rocks with single dolomite and limestone interbeds under- and overlay the salt seams.*

These salt features and low bromine content clearly indicated their precipitation from low concentrated brines (Gajewska et al., 1985) in a continental playa saline basin. This basin was probably supplied with salt brines (resulted halites with higher bromine content) produced by dissolving the exposed older primary marine salts of the Lower Triassic (Rhaethian – Czapowski et al., 1992) and the Zechstein youngest salt series uplifted to the surface by initial diapiric movements (Krzywiec, 2004, 2012). Frequent recycling of accumulated halites, common in such inland environ as playa, produced halites depleted in bromine.

***Keywords**: Triassic rock salts, occurrence, characteristics, Poland.*

LITERATURA/*REFERENCES:*

- BACHMANN G. H., WARRINGTON G., BECKER-ROMAN A., BEUTLER G., HAGDOM H., HOUNSLOW M., NITSCH E., RÖHLING H.-G., SIMON T., EZULC A., 2010. Triassic. [W]: Doornenbal J. C. & Stevenson A. G. (eds), Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area: 149-173. EAGE Publications b. v. (Houten).

- CZAPOWSKI G., PERYT T. M., RAUP O.B., 1992. Carbonate anhydrite-halite cycles in the Roet (Lower Triassic) of western Poland. *Bull. Pol. Academ. des Sciences, Earth Sciences*, 40 (2): 1-4. Warsaw.
- CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., 2016. Baseny solne triasu na obszarze Polski. Przegląd Solny (Salt Review), 12: 51-55. Kraków.
- DADLEZ R., MAREK S., POKORSKI J. (eds), 1998. Palaeogeographic Atlas of the Epicontinental Permian and Mesozoic in Poland, scale 1:2 500 000. Warsaw.
- GAJEWSKA I., 1964. Ret, wapień muszlowy i kajper w zachodniej i środkowej części monokliny przedsudeckiej. *Kwart. Geol.*, 8 (3): 598-608.
- GAJEWSKA I., 1983. Trias. [W]: I. Gajewska (red.), Ośno IG 2. *Profile Głębokich Otworów Wiertniczych IG*, 57:40-47. Warszawa.
- GAJEWSKA I., PERYT T. M., TOMASSI-MORAWIEC H., 1985. Bromine content of the Keuper (Upper Triassic) salts in Central Poland indicates their marine (mainly second cycle) origin. *N. Jb. Geol. Paläont. Mh.*, 6:349-356. Stuttgart.
- KRZYWIEC P., 2004. Triassic evolution of the Kłodawa salt structure: basement-controlled salt tectonics within the Mid-Polish Trough (central Poland). *Geol. Quarterly*, 48 (2): 123-134.
- KRZYWIEC P., 2012. Mesozoic and Cenozoic evolution of salt structures within the Polish Basin – an overview. [W]: Alsop G.I., Archer S.G., Hartley A.J. Grant N.T., Hodgkinson R., (eds.), Salt Tectonics, Sediments and Prospectivity. Geological Society, London, Special Publications, 363: 381–394.

ZŁOŻA GIPSÓW ZACHODNIEJ CZĘŚCI ZAPADLISKA PRZEDKARPACKIEGO

GYPSUM DEPOSITS IN THE WESTERN PART OF THE CARPATHIAN FOREDEEP

Stanisław BURLIGA[1], Slavomír NEHYBA[2]

[1] Instytut Nauk Geologicznych, Uniwersytet Wrocławski, plac Maksa Borna 9, 50-204 Wrocław, Polska;
e-mail: stanislaw.burliga@uwr.edu.pl

[2] Department of Geological Sciences, Masaryk University, Kotlářská 267/2, 611 37 Brno, Republika Czeska;
e-mail: slavek@sci.muni.cz

Mioceńskie ewaporaty są głównym źródłem naturalnych skał siarczanowych w Polsce. Występują one w zapadlisku przedkarpackim, a największa ilość udokumentowanych złóż gipsu położona jest w północnej części zapadliska (*Bilans zasobów złóż kopalin*..., 2025). W jego rejonie zachodnim udokumentowano jedynie 1 złoże Dzierżysław na obszarze Polski i 5 złóż w rejonie Opawy na Morawach w Republice Czeskiej. Budowa i stan zagospodarowania tych złóż są przedmiotem niniejszego artykułu.

Pokładowe złoże gipsów Dzierżysław usytuowane jest w rejonie Kietrza na Płaskowyżu Głubczyckim i w granicach ujętych łącznie ze złożem pozabilansowym zalega na obszarze ok. 180 ha. Średnia miąższość złoża szacowana jest na ok. 40 m, a w części dotychczas eksploatowanej ok. 60 m. Strop skał złożowych zalega średnio 20 m p.p.t, lecz lokalnie występuje na powierzchni terenu. Ze względu na nadkład, w złożu prowadzono z przerwami eksploatację podziemną w latach 1812-1973, sumarycznie na 8 poziomach eksploatacyjnych, a ostatecznie zasoby zostały zdjęte z ewidencji w roku 1997. Poniżej sukcesji ewaporatowej zalegają ilasto-piaszczyste skały karbonu (kulm), a nadkład stanowią neogeńskie iły oraz plejstoceńskie piaski i żwiry. W strukturze złoża udokumentowano gipsy grubokrystaliczne i zbite oraz iły gipsowe. Średnia zawartość gipsu w złożu sięga 90% (Preidel, Wójcik, 2007).

W morawskiej części zapadliska przedkarpackiego udokumentowano 5 mniejszych złóż między Opavą a Ostrawą, o łącznych zasobach całkowitych szacowanych na ponad 500 mln t., o zawartości gipsu 70-80%. Złoża Kobeřice-north, Třebom i Rohov-Strahovice zostały jedynie udokumentowane. W złożu Sudice eksploatację prowadzono od pierwszej połowy XIX w. do roku 1960, kiedy woda z pobliskiej rzeki zalała kamieniołom i obecnie teren jest całkowicie zrekultywowany. Współcześnie, od roku 1963, eksploatacja gipsu prowadzona jest wyłącznie w obrębie złoża Kobeřice-south (*Mineral Commodity Summaries of the Czech Republic*, 2001). Obszar górniczy zajmuje 92 ha, a powierzchnia odkrywki ok. 12 ha (https://www.gypstrend.cz/). Miąższość sukcesji gipsonośniej nie przekracza 50 m, a przykrywa ją górnobadeńska ilasto-piaszczysto-węglanowa, powyżej której zalegają osady glacigeniczne. W strukturze złoża wyróżniają się pokłady gipsów wielkokrystalicznych i szablastych rozdzielone warstwami gipsów laminowanych, mikrokrystalicznych i iłów gipsowych (Peryt i in., 1997).

Sumarycznie, w zachodniej części zapadliska przedkarpackiego udokumentowano zasoby gipsu wielkości ok. 600 mln t. Złoża te występują płytko pod powierzchnią terenu, lecz niektóre z nich objęte są częściowo ochroną przyrodniczą, stąd możliwość rozszerzenia eksploatacji jest w pewnym stopniu ograniczona. Niemniej ujmowane są one ciągle wśród zasobów perspektywicznych. Na przykład potencjalne zasoby gipsu w złożu Dzierżysław szacowane są na ok. 87 mln t (Mazurek, Naworyta, 2026).

Słowa kluczowe: złoża gipsu, zasoby gipsu, zapadlisko przedkarpackie, miocen

Miocene evaporites are the primary source of natural sulphate rocks in Poland. They occur in the Carpathian Foredeep, with the largest number of documented gypsum deposits located in the northern part of the basin (Balance of mineral resources..., 2025). In the western sector of the foredeep, only one deposit—Dzierżysław—has been documented on the Polish side, alongside five deposits in the Opava region of Moravia (Czech Republic). The structure and development status of these deposits are the subject of this article.

The Dzierżysław bedded gypsum deposit is located in the Kietrz area on the Głubczyce Plateau. Including the perspective resource portion, it covers an area of approximately 180 hectares. The average thickness of the deposit is estimated at about 40 m, reaching approximately 60 m in the section that has already been mined. The top of the deposit lies at an average depth of 20 m below ground level, though it outcrops at the surface in some locations. Due to the overburden, underground mining was conducted intermittently between 1812 and 1973 across a total of eight mining levels. The resources were ultimately removed from the official register in 1997. Beneath the evaporite succession, Carboniferous clayey-sandy rocks (Culm) occur, while the overburden consists of Neogene clays and Pleistocene sands and gravels. Coarse-crystalline and massive gypsum, as well as gypsiferous clays, have been documented within the deposit structure. The average gypsum content reaches 90% (Preidel, Wójcik, 2007).

In the Moravian section of the Carpathian Foredeep, five smaller deposits have been documented between Opava and Ostrava, with total estimated reserves exceeding 500 million tonnes and a gypsum content of 70–80%. The Kobeřice-North, Třebom, and Rohov-Strahovice deposits have merely been documented. Open-pit mining at the Sudice deposit took place from the first half of the 19th century until 1960, when water from a nearby river flooded the quarry; the site has since been fully recultivated. Since 1963, gypsum extraction has been conducted exclusively at the Kobeřice-South deposit (Mineral Commodity Summaries of the Czech Republic, 2001). The mining area covers 92 hectares, while the open-pit area spans approximately 12 hectares (https://www.gypstrend.cz/). The thickness of the gypsum-bearing succession does not exceed 50 m; it is overlain by Upper Badenian clayey-sandy-carbonate deposits, which are in turn covered by glacigenic sediments. The deposit structure is characterized by beds of course-crystalline and "sabre-like" gypsum separated by layers of laminated and microcrystalline gypsum as well as gypsiferous clays (Peryt et al., 1997).

In total, gypsum resources amounting to approximately 600 million tonnes have been documented in the western part of the Carpathian Foredeep. These deposits occur at shallow depths; however, as some are partially subject to nature conservation measures, the potential for expanding extraction is somewhat limited. Nevertheless, they continue to be classified as prospective resources. For instance, the potential gypsum resources in the Dzierżysław deposit are estimated at approximately 87 million tonnes (Mazurek, Naworyta, 2026).

Keywords: *gypsum deposit, gypsum resources, Carpatian Foredeep, Miocene*

LITERATURA / *REFERENCES*:

- Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31XII 2025. https://www.pgi.gov.pl/surowce/strona-glowna.html. ISSN 2299-4459
- https://www.gypstrend.cz/ - data dostępu 30.09.2026
- Mazurek S., Naworyta W.R., 2026. Availability of domestic gypsum resources versus the predicted decline in synthetic gypsum production. Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management 42, 2, 45–67.
- Mineral Commodity Summaries of the Czech Republic 2001 yearbook. 2001. Ministry of the Environment of the Czech Republic.
- Peryt T.M., Karoli S., Peryt D., Petrichenko O. I., Gedl P., Narkiewicz W., Durkovièova J. & Dobieszyńska Z., 1997. Westernmost occurrence of the Middle Miocene Badenian gypsum in central Paratethys (Kobeřice, Moravia, Czech Republic). Slovak Geological Magasine 3, 105–120.
- Preidl W., Wójcik A.J., 2007. Wpływ płytkiej eksploatacji na powierzchnię na przykładzie kopalni gipsu w Dzierżysławiu. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 1751, Górnictwo 276, 139–149.

RELACJE ANHYDRYT DOLNY – MINERALIZACJA POLIHALITOWA – PERSPEKTYWY PRZYROSTU ZASOBÓW SOLI POTASOWO-MAGNEZOWYCH W CECHSZTYNIE NA WYNIESIENIU ŁEBY

LOWER ANHYDRITE – POLYHALITE MINERALIZATION – PROSPECTS FOR INCREASING POTASH-MAGNESIA SALT RESOURCES IN THE ZECHSTEIN OF THE ŁEBA HIGH

Karol DURKOWSKI[1]

[1]KGHM CUPRUM sp. z o.o. Centrum Badawczo-Rozwojowe ul. Gen. Wł. Sikorskiego 2-8 53-659 Wrocław,
e-mail: karol.durkowski@kghmcuprum.com

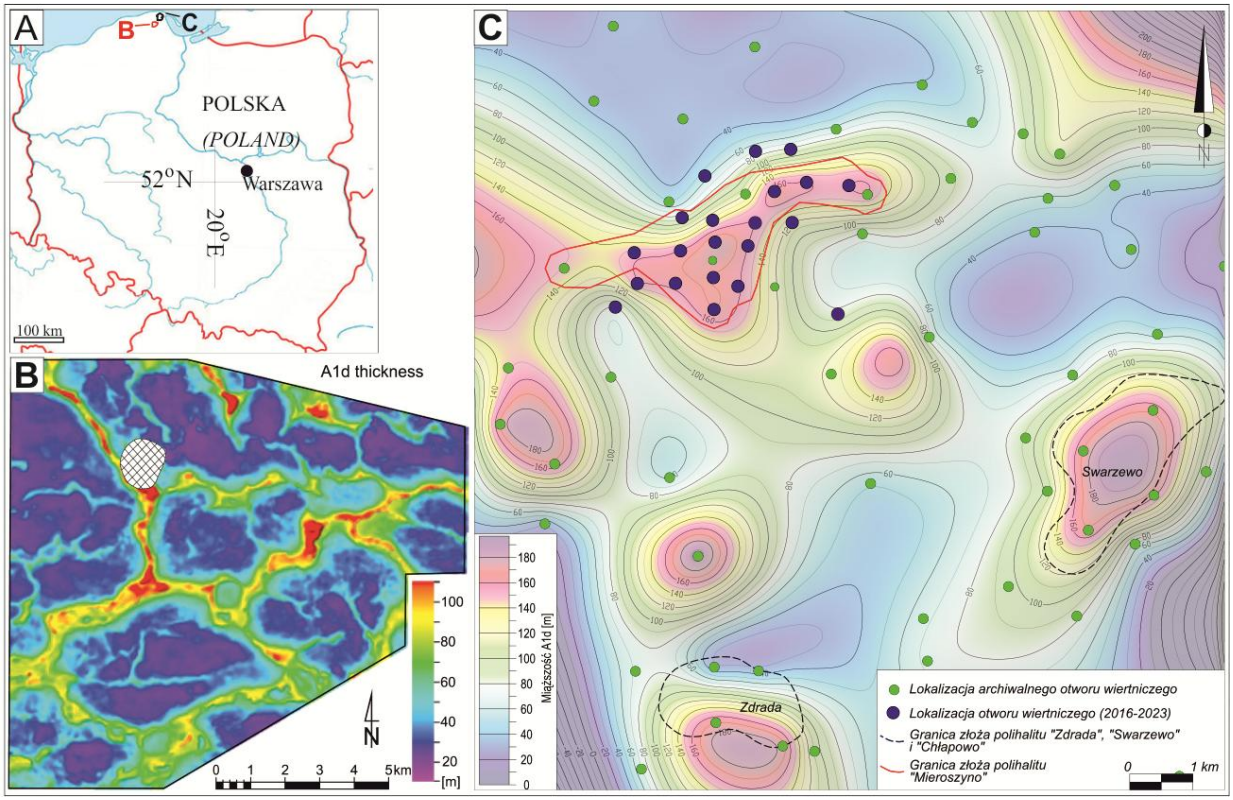
Mineralizacja polihalitowa rozpoznana na Wyniesieniu Łeby należy do najciekawszych przejawów koncentracji soli potasowo-magnezowych w polskiej części basenu cechsztyńskiego. Dotychczasowe wyniki wierceń, badań petrograficznych oraz analiz litofacjalnych jednoznacznie wskazują, że rozmieszczenie polihalitu jest ściśle związane z anhydrytem dolnym A1d cyklotemu Werra (PZ1) oraz z rozwojem platform siarczanowych występujących w obrębie Wyniesienia Łeby (Peryt, 1994; Peryt i in., 1986; Peryt i Antonowicz, 1990; Czapowski i Tomaszczyk, 2014). Wspomniane platformy siarczanowe charakteryzują się zwiększeniem miąższości anhydrytu dolnego z około 50 m (w części basenowej) do około 170 m i tym samym znaczne zróżnicowanie morfologiczne stropu A1d.

Reinterpretacja danych geofizycznych, nowe informacje wiertnicze oraz sejsmika 3D sugerują możliwość łączenia się poszczególnych platform anhydrytowych w bardziej rozległe układy strukturalne (**Ryc. 1**). Jeżeli interpretacja ta zostanie potwierdzona kolejnymi wierceniami, potencjalny zasięg stref polihalitonośnych może być istotnie większy od obecnie udokumentowanego. Szczególnie perspektywiczne wydają się kierunki zachodni, południowy i wschodni względem złoża „Mieroszyno", gdzie obserwowane są przesłanki mineralizacji polihalitonośnej i kontynuacje wyniesień A1d.

Szczególne znaczenie posiada platforma siarczanowa pokrywająca się ze złożem "Mieroszyno", gdzie największe koncentracje polihalitu stwierdzono w obrębie odmiany litofacjalnej anhydrytów masywnych zawierających pseudomorfozy po kryształach gipsu (**Ryc. 2**). Związek ten obserwowany jest konsekwentnie we wszystkich otworach wiertniczych wykonanych w okolicach Pucka i należy obecnie do najlepiej udokumentowanych zależności geologicznych w analizowanym rejonie. Wraz z przestrzenną zmianą litofacji na anhydryty warstwowane, laminowane lub brekcjowe, następuje wyraźny spadek zawartości K_2O i stopniowy zanik mineralizacji polihalitowej.

Rozkład przestrzenny polihalitu wskazuje, że kluczowe znaczenie dla jego powstania miała morfologia powierzchni anhydrytu dolnego. Zróżnicowanie układu morfologicznego A1d mogło istnieć już we wczesnej fazie sedymentacji anhydrytu dolnego co zostało wstępnie potwierdzone m.in. przez Mastalerza i Durkowskiego (2025). Wyniesienia A1d stanowiły obszary preferencyjnej koncentracji i cyrkulacji wysoko zasolonych solanek wzbogaconych w jony potasu i magnezu. W efekcie największe miąższości polihalitu występują w najwyższych częściach platform siarczanowych, podczas gdy na ich obrzeżach obserwuje się wyklinowanie poziomów złożowych (**Ryc. 2**). Analogiczne zależności rozpoznano również w rejonie złóż „Swarzewo" lub „Zdrada", gdzie geneza polihalitu została powiązana z ewolucją platform siarczanowych i późnymi etapami ewaporacji basenu (Hryniv i Peryt, 2000; Peryt i in., 2005).

W profilu anhydrytu dolnego można wyróżnić kilka poziomów polihalitonośnych. Największe znaczenie gospodarcze posiadają poziomy rozwinięte w górnej części A1d. Charakteryzują się one największą ciągłością przestrzenną, znacznymi miąższościami oraz korzystniejszymi parametrami jakościowymi. Niższe poziomy mają najczęściej charakter soczewkowo-gniazdowy i wykazują większą zmienność zarówno pod względem miąższości, jak i zawartości składników użytecznych (Durkowski, 2024). Pomimo tego ich obecność wskazuje, że proces mineralizacji był wieloetapowy i silnie związany z lokalnym rozwojem platform siarczanowych.

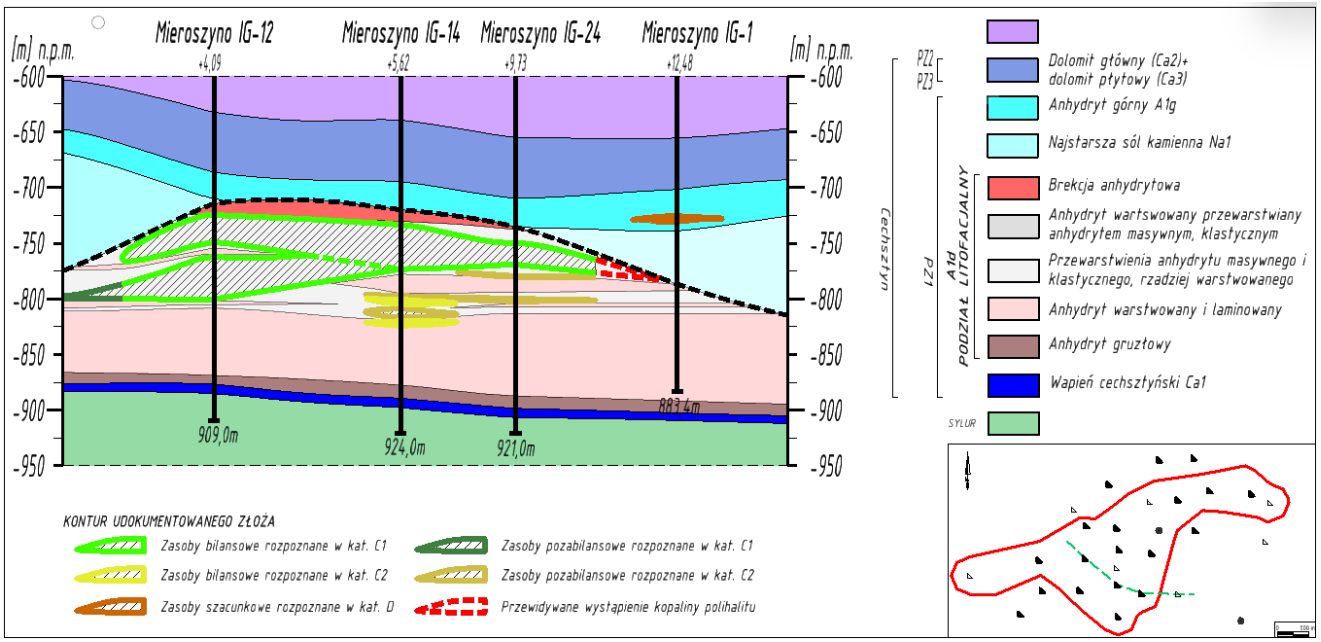


Ryc. 1. Mapy rozprzestrzenienia platform siarczanowych na przykładzie miąższości anhydrytu dolnego A1d; **A –** Mapa lokalizacyjna; **B** – Mapa rozkładu miąższości anhydrytu dolnego A1d obszaru sąsiedniego w stosunku do złóż polihalitów wykonana na podstawie wyników pomiarów sejsmiki 3D (Głuszyński i in., 2025); **C** – Mapa rozkładu miąższości anhydrytu dolnego A1d wykonana na podstawie danych otworowych

Fig. 1. *Maps of Sulphate Platform Distribution Based on the Thickness of the Lower Anhydrite (A1d);* ***A*** *– Location map;* ***B*** *– Thickness distribution map of the Lower Anhydrite (A1d) in the area adjacent to the polyhalite deposits, prepared on the basis of 3D seismic survey data (Głuszyński et al., 2025);* ***C*** *– Thickness distribution map of the Lower Anhydrite (A1d), prepared on the basis of borehole data*

Istotnym argumentem przemawiającym za możliwością dalszego przyrostu zasobów są wyniki wierceń wykonanych poza pierwotnymi granicami złoża Mieroszyno. Przykładowe otwory Mieroszyno IG-2 czy Mieroszyno-8 wskazują na mineralizacje polihalitową w obrębie A1d poza wcześniej udokumentowanym obszarem złoża. Powyższe pozwala stwierdzić, że obecnie rozpoznane złoże może stanowić jedynie fragment większego systemu mineralizacji rozwiniętego w obrębie platformy A1d.

Znaczenie prognostyczne posiada również zależność pomiędzy dużą miąższością anhydrytu dolnego, ograniczonym rozwojem soli kamiennej Na1 oraz obecnością mineralizacji polihalitowej (m.in. Czapowski i Tomaszczyk, 2014). Relacja ta jest obserwowana w wielu otworach wykonanych na Wyniesieniu Łeby i może stanowić jedno z podstawowych kryteriów poszukiwań nowych złóż soli potasowo-magnezowych. W praktyce oznacza to możliwość wskazywania najbardziej perspektywicznych obszarów jeszcze przed wykonaniem szczegółowych wierceń rozpoznawczych.



Ryc. 2. Schematyczny przekrój przez złoże polihalitu „Mieroszyno". Lokalizacja przekroju (przerywana zielona linia) na tle złoża polihalitu „Mieroszyno" (kolor czerwony) znajduje się w dolnym prawym rogu (na podstawie Durkowski, 2024 r.)

Fig. 2. *Schematic cross-section through the "Mieroszyno" polyhalite deposit. The location of the cross-section (dashed green line) relative to the "Mieroszyno" polyhalite deposit (shown in red) is presented in the lower right corner (after Durkowski, 2024)*

Należy jednak podkreślić, że część zagadnień dotyczących genezy platform A1d oraz szczegółowego mechanizmu powstania polihalitu pozostaje przedmiotem dyskusji. Dotyczy to między innymi względnej roli procesów tektonicznych, lokalnej redepozycji osadów siarczanowych i późniejszych przekształceń diagenetycznych. Nie zmienia to jednak faktu, że zależność pomiędzy geometrią anhydrytu dolnego a rozmieszczeniem mineralizacji polihalitowej znajduje jednoznaczne potwierdzenie w materiale wiertniczym.

Podsumowując, sedymentacja anhydrytu dolnego A1d stanowiła podstawowy czynnik kontrolujący rozwój i rozmieszczenie mineralizacji polihalitowej na Wyniesieniu Łeby. Największy potencjał przyrostu zasobów związany jest z rozprzestrzenieniem rozpoznanych platform siarczanowych oraz słabiej rozpoznanych, punktowych wyniesień stropu A1d (przykład otworu Mieroszyno-8). Na podstawie obecnie dostępnych danych można uznać, że perspektywy zwiększenia zasobów soli potasowo-magnezowych są wysokie, jednak ich ilościowe oszacowanie wymaga dalszych wierceń, analiz geofizycznych i badań petrograficznych.

Słowa kluczowe: mineralizacja polihalitowa, platforma siarczanowa, anhydryt dolny A1d, złoże „Mieroszyno"

Polyhalite mineralization identified on the Łeba High represents one of the most significant occurrences of potash-magnesia salt concentration within the Polish sector of the Zechstein Basin. Existing drilling results, petrographic investigations, and lithofacies analyses clearly indicate that the distribution of polyhalite is closely related to the Lower Anhydrite (A1d) of the Werra Cyclothem (PZ1) and to the development of sulphate platforms within the Łeba High (Peryt, 1994; Peryt et al., 1986; Peryt and Antonowicz, 1990; Czapowski and Tomaszczyk, 2014). These sulphate platforms are characterized by an increase in the thickness of the Lower Anhydrite from approximately 50 m in the basinal zone to about 170 m on the platforms, resulting in considerable morphological differentiation of the A1d top surface.

*The reinterpretation of geophysical data, new drilling information, and 3D seismic surveys suggest that individual anhydrite platforms may be interconnected, forming more extensive structural systems (**Fig. 1**). If this interpretation is confirmed by further drilling, the potential extent of polyhalite-bearing zones may be substantially greater than currently documented. The areas located west, south, and east of the "Mieroszyno" deposit appear particularly prospective, as indications of polyhalite mineralization and continuations of A1d structural highs have been identified there.*

*Particular significance is attached to the sulphate platform coinciding with the "Mieroszyno" deposit, where the highest concentrations of polyhalite have been recorded within the lithofacies of massive anhydrites containing gypsum crystal pseudomorphs (**Fig. 2**). This relationship has been consistently observed in all boreholes drilled in the vicinity of Puck and currently represents one of the best-documented geological relationships in the study area. As the lithofacies change laterally into bedded, laminated, or brecciated anhydrites, a distinct decrease in K_2O content and a gradual disappearance of polyhalite mineralization is observed.*

*The spatial distribution of polyhalite indicates that the morphology of the Lower Anhydrite surface played a key role in its formation. Variations in the morphological configuration of A1d may have already existed during the early stages of Lower Anhydrite deposition, as preliminarily demonstrated by Mastalerz and Durkowski (2025). A1d structural highs constituted preferential areas for the concentration and circulation of highly saline brines enriched in potassium and magnesium ions. As a result, the greatest polyhalite thicknesses occur in the highest parts of the sulphate platforms, whereas wedging-out of ore-bearing horizons is observed along their margins (**Fig. 2**). Similar relationships have also been recognized in the vicinity of the "Swarzewo" and "Zdrada" deposits, where polyhalite genesis has been linked to the evolution of sulphate platforms and the late stages of basin evaporation (Hryniv and Peryt, 2000; Peryt et al., 2005).*

Several polyhalite-bearing horizons can be distinguished within the Lower Anhydrite succession. The most economically significant are those developed in the upper part of A1d. These horizons are characterized by the greatest lateral continuity, considerable thicknesses, and more favourable quality parameters. Lower horizons generally display a lenticular and discontinuous character and show greater variability in both thickness and grades of valuable components (Durkowski, 2024). Nevertheless, their occurrence indicates that the mineralization process was multi-stage and strongly associated with the local development of sulphate platforms.

An important argument supporting the possibility of further resource growth is provided by drilling results obtained outside the original boundaries of the Mieroszyno deposit. Boreholes such as Mieroszyno IG-2 and Mieroszyno-8 indicate the presence of polyhalite mineralization within A1d beyond the previously documented deposit area. This suggests that the currently recognized deposit may represent only a fragment of a larger mineralization system developed within the A1d platform.

The relationship between substantial Lower Anhydrite thickness, limited development of the Na1 Rock Salt, and the occurrence of polyhalite mineralization is also of considerable predictive significance (e.g., Czapowski and Tomaszczyk, 2014). This relationship has been observed in numerous boreholes drilled on the Łeba High and may constitute one of the principal exploration criteria for new potash-magnesia salt deposits. In practice, this makes it possible to identify the most prospective areas even before detailed exploration drilling is undertaken.

It should be emphasized, however, that certain aspects concerning the genesis of A1d platforms and the detailed mechanisms of polyhalite formation remain subjects of ongoing discussion. These include the relative roles of tectonic processes, local redeposition of sulphate sediments, and subsequent diagenetic transformations. Nevertheless, the relationship between the geometry of the Lower Anhydrite and the distribution of polyhalite mineralization is unequivocally supported by drilling data.

In conclusion, the deposition of the Lower Anhydrite (A1d) was the principal factor controlling the development and distribution of polyhalite mineralization on the Łeba High. The greatest potential for resource growth is associated with the extension of the recognized sulphate platforms and with less well-defined, isolated structural highs of the A1d top surface (as exemplified by the Mieroszyno-8 borehole). Based on currently available data, the prospects for increasing potash-magnesia salt resources are

considered highly favourable; however, quantitative assessment of this potential will require further drilling, geophysical investigations, and petrographic studies.

Keywords: *Polyhalite mineralization; sulphate platform; Lower Anhydrite (A1d); Mieroszyno deposit*

LITERATURA / ***REFERENCES*****:**

- CZAPOWSKI G., TOMASZCZYK M., 2014. Baseny ewaporatowe cykli PZ1, PZ2 i PZ3 cechsztynu (górny perm) w Polsce – studium miąższościowe. *Przegląd Solny, 10: 49-64*
- DURKOWSKI K., 2024. Dokumentacja geologiczna złoża soli potasowo-magnezowej „Mieroszyno". KGHM Cuprum Sp z o. o. CB-R, Wrocław
- GŁUSZYNSKI A., JAROSIŃSKI M., DĄBROWSKI M., PERYT T.M, 2025. Giant polygonal anhydrite ridges in the Southern Permian Basin. *Geology, 53 (2); 109-113*.
- PERYT T.M., 1994.The anatomy of a sulphate platform and adjacent basin system in the Leba sub-basin of the Lower Werra Anydrite (Zechstein, Upper Permian), northern Poland. *Sedimentology, 41(1): 83–113*
- PERYT T.M., 1986. The Zechstein (Upper Permian) Main Dolomite deposits of the Łeba Elevation, northern Poland: facies and depositional history, *Facies*, *nr 14, s. 151–200*.
- PERYT T.M., HRYNIV S.P., 1998. Origin of polyhalite deposits in the Zechstein (Upper Permian) Zdrada Platform, northern Poland, *Sedimentology, t. 45, nr 3, s. 565–578*.
- PERYT T.M., TOMASSI M.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, t. 20, nr 2, s. 183–194*.
- PERYT T.M., ANTONOWICZ L., 1990. Facje i paleogeografia cechsztyńskiego anhydrytu dolnego (A1d) w Polsce. *Przegląd Geologiczny, t. 38, nr 4, s. 173-180*.
- MASTALERZ K., DURKOWSKI K., 2025. Relikty tekstur okruchowych i struktur sedymentacyjnych najniższej części anhydrytu dolnego (A1d, cechsztyn) w okolicach Mieroszyna, Pomorze Gdańskie. *Przegląd Geologiczny, 73(12): 1063–1073*.

BADANIA INKLUZJI FLUIDALNYCH W HALICIE W CELU OCENY PERSPEKTYW MINERALIZACJI POTASOWO-MAGNEZOWEJ W BASENIE DAWENKOU W CHINACH

STUDY OF FLUID INCLUSIONS IN HALITE FOR ASSESSING THE PROSPECTS OF POTASSIUM–MAGNESIUM MINERALIZATION IN THE DAWENKOU BASIN, CHINA

Anatoliy R. GALAMAY[1], Krzysztof BUKOWSKI[2], Yuri V. SADOVYI[3], Daria V. SYDOR[1], Fanwei MENG[4]

[1]Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals, NAS of Ukraine, 3a Naukova Street, Lviv, 79060, Ukraine

[2]AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

[3]State Institution State Scientific Research and Design Institute of Basic Chemistry (NIOCHIM), Kharkiv, Ukraine

[4]School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, No. 1 Daxue Road, Xuzhou, Jiangsu, 221116, China

Basen solonośny Dawenkou we wschodnich Chinach cechuje się mineralizacją ewaporatową, obejmującą sole potasowo-magnezowe. W pracy zbadano pierwotne i wtórne inkluzje fluidalne w halicie z otworu wiertniczego XZK-101, z wykorzystaniem obserwacji mikroskopowych, analiz ultramikrochemicznych oraz badań termobarometrycznych. Skład solanek w inkluzjach pierwotnych wskazuje na okresowy dopływ wód morskich w eocenie, natomiast podwyższona zawartość siarczanów jest pochodną oddziaływania fluidów z gipsami wieku kambryjsko-ordowickiego. Z określonych temperatur homogenizacji wynika, że halit krystalizował w zakresie 45–64 °C. Inkluzje wtórne rejestrują natomiast wieloetapową rekrystalizację oraz tektonicznie uwarunkowaną migrację płynów. Szczególne znaczenie prognostyczne mają solanki zawierające do 106 g/l Mg^{2+}, stanowiące bezpośredni wskaźnik obecności złóż potasowo-magnezowych w obszarach przyległych. Geochemia inkluzji fluidalnych jest więc skutecznym narzędziem prognostycznym – pozwala wyznaczać perspektywiczne strefy mineralizacji K–Mg oraz zweryfikować istniejące mapy facjalne, co umożliwia ukierunkowanie dalszych prac poszukiwawczo-wiertniczych.

Słowa kluczowe: Basen Dawenkou; halit; inkluzje fluidalne; geochemia solanek; halogeneza; mineralizacja potasowo-magnezowa; poszukiwanie złóż.

Referat będzie opublikowany w formie artykułu w Przeglądzie Solnym 2026

Full text will be published in Salt Review 2026

EWAPORATY CYKLOTEMU PZ1 CECHSZTYNU JAKO KOMPONENTY MODELU 3D BUDOWY GEOLOGICZNEJ OBSZARU PRZEDSUDECKIEGO (SW POLSKA) – WSTĘPNA ANALIZA

EVAPORATES OF ZECHSTEIN PZ1 CYCLOTHEM AS THE ELEMENTS OF 3D GEOLOGICAL MODEL OF FORE-SUDETIC MONOCLINE (SW POLAND) – PRELIMINARY ANALYSIS

Grzegorz CZAPOWSKI[1], Zbigniew MAŁOLEPSZY[1], Leszek SKOWROŃSKI[1], Marta HODBOD[1]

[1]Państwowy Instytut Geologiczny-Państwowy Instytut Badawczy, ul.Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa;
e-mail: grzegorz.czapowski@pgi.gov.pl

Od ponad dekady Państwowy Instytut Geologiczny-Państwowy Instytut Badawczy realizuje projekty dotyczące modelowania 3D budowy geologicznej wybranych regionów Polski np. obszaru lubelskiego (np. Czapowski i in., 2017), obszaru tzw. wału wolsztyńskiego i jego otoczenia (np. Czapowski i in., 2023) czy obszaru tzw. niecki szczecińskiej (np. Nowacki i in., 2022, 2025). Aktualnie realizowany jest model 3D budowy geologicznej obszaru przedsudeckiego (monoklina przedsudecka) wraz z terenem Górnego Śląska (monoklina śląsko-krakowska), którego istotnym elementem jest prezentacja rozprzestrzenienia i zróżnicowania wiekowego i litologiczno-facjalnego utworów permskich.

Ważną rolę – ze względu na litologię, miąższości i potencjał surowcowy – odgrywają w tym modelu utwory górnego permu (cechsztyn), a szczególnie ewaporaty (sole kamienne i potasowo-magnezowe oraz siarczany) budujące 4 cyklotemy osadowe.

Przedstawiono tu wstępną analizę rozprzestrzenienia i rozkładu miąższości ewaporatów cyklotemu PZ1 cechsztynu na obszarze objętym modelem 3D, odpowiadających głównym wydzieleniom litostratygraficznym (**Tab. 1**) jak: utwory anhydrytu Werry [A1] wraz z anhydrytem dolnym [A1d] (**Ryc. 1**), utwory najstarszej soli kamiennej [Na1] wraz z anhydrytem śródsolnym [A1s] (**Ryc. 2**) i utwory anhydrytu górnego [A1g] wraz z brekcją anhydrytową [A1Br] (**Ryc. 3**). Do konstrukcji map wykorzystano dane z 1333 otworów wiertniczych natomiast w tabeli 1 przedstawiono – obok sukcesji i relacji wzajemnych wydzieleń litostratygraficznych – także główne parametry statystyczne odnośnie głębokości występowania i miąższości tych jednostek, wyliczone w oparciu o dane z 359 wybranych otworów wiertniczych.

Należy podkreślić, że prezentowane mapy mają charakter wstępny, ukazują pewne tendencje zmian miąższości danych wydzieleń i nie uwzględniają wpływu tektoniki na ich rozkład co będzie przedmiotem dalszych analiz.

Utwory siarczanowe, podścielające chlorki cyklotemu PZ1, obejmujące 2 wydzielenia: anhydryt Werra (A1) anhydryt dolny (A1d), cechuje stosunkowo niewielka (do 60 m) miąższość w części osiowej i SE obszaru objętego modelem (**Ryc. 1**). Większe miąższości (do 150 m) odnotowano w formie swoistych centrów w rejonie Zielonej Góry na południu obszaru oraz w pasie od rejonu na zachód od Poznania po tereny na SE od Kalisza w części północnej modelu.

Tabela 1. Evaporatowe wydzielenia litostratygraficzne cyklotemu PZ1 cechsztynu na obszarze przedsudeckim i ich parametry statystyczne

Table 1. *Evaporitic lithostratigraphic units of Zechstein PZ1 cyclothem and their statistic parameters*

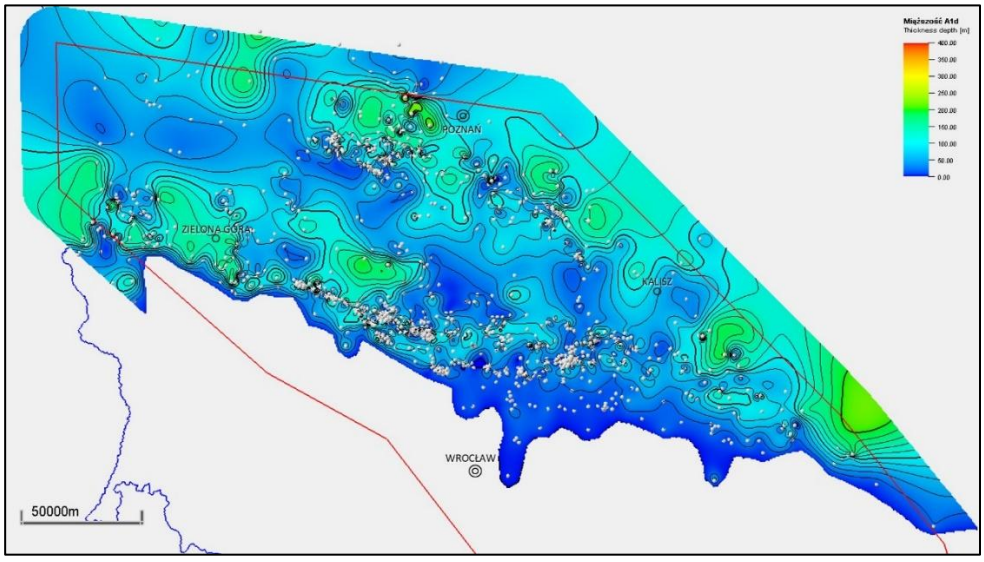
<table>
<tr><th colspan="3">WYDZIELENIE LITOSTRATYGRAFICZNE
Lithostratigraphic unit</th></tr>
<tr><td rowspan="6">Anydryt Werry (A1)
Werra Anhydrite
[45]
[1]413,0-3941,0/1954,8
[2] 529,0-4022,5/2069,8
[3] 23,5-353,0/115,0</td><td colspan="2">Anhydryt górny (A1g)
Upper Anhydrite
[312]
[1]509,4-4040,5/2017,7
[2] 1212,0-4057,5/2056,2
[3]1,1-320,8/38,5</td></tr>
<tr><td colspan="2">Brekcja anhydrytowa (A1Br)
Anhydrite Breccia
[9]
[1]574,0-2894,5/1776,7
[2] 583,8-2902,5/1782,1
[3]6,6-9,8/5,4</td></tr>
<tr><td>Najstarsza sól kamienna górna (Na1g)
Upper Oldest Halite
[17]
[1]790,0-3681,0/2232,72
[2]1016,5-3781,5/2309,33
[3]10,0-226,5/70,72</td><td rowspan="3">Najstarsza sól kamienna (Na1)
Oldest Halite
[271]
[1]779,2-4057,5/2083,4
[2] 914,5-4202,5/2172,3
[3]2,0-297,0/88,9</td></tr>
<tr><td>Anhydryt śródsolny (A1s)
Intrasalt Anhydrite
[17]
[1]1016,5-3781,5/2308,15
[2]1070,0-3802,0/2329,45
[3]2,0-61,5/21,24</td></tr>
<tr><td>Najstarsza sól kamienna dolna (Na1d)
Lower Oldest Halite
[17]
[1]1078,0-3802,0/2328,24
[2]1087,0-3812,5/2358,17
[3]2,0-133,0/28,72</td></tr>
<tr><td colspan="2">Anhydryt dolny (A1d)
Lower Anhydrite
[282]
[1]483,8-4202,5/2142,6
[2] 627,5-4334,0/2216,0
[3]1,0-279,0/74,5</td></tr>
</table>

[45] liczba otworów wiertniczych *number of wells*

[1] głębokość występowania stropu wydzielenia (m): minimalna-maksymalna/średnia (arytmetyczna)
unit top depth (m): minimum maximum/average (arithmetic)

[2] głębokość występowania spągu wydzielenia (m): minimalna-maksymalna/średnia (arytmetyczna)
unit bottom depth (m): minimum maximum/average (arithmetic)

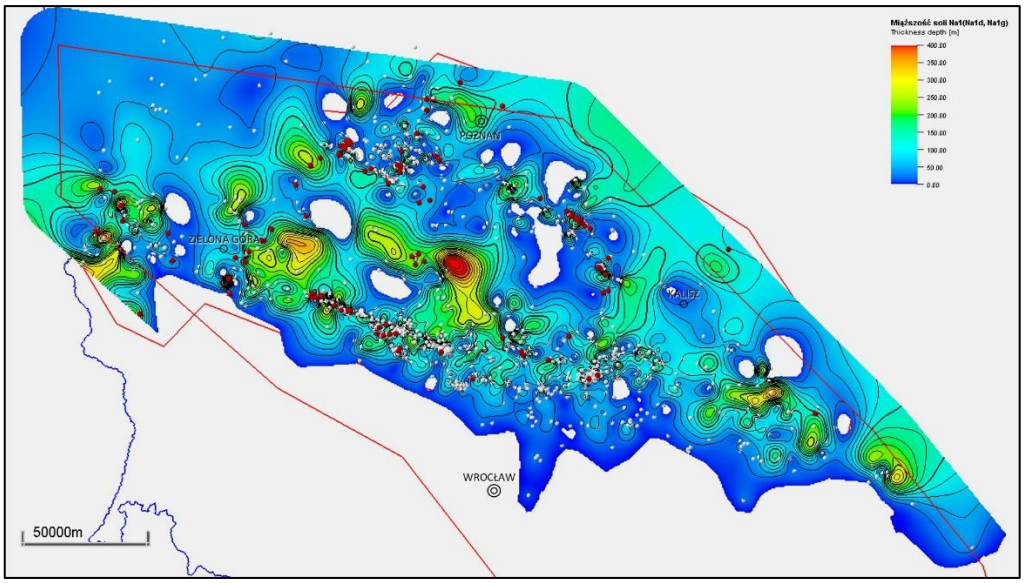
[3] miąższość wydzielenia (m): minimalna-maksymalna/średnia (arytmetyczna)
unit thickness (m): minimum maximum/average (arithmetic)



Ryc. 1. Wstępna mapa rozprzestrzenienia i sumarycznego rozkładu miąższości utworów anhydrytu Werra (A1) i anhydrytu dolnego (A1d). Objaśnienia: białe punkty – otwory wiertnicze, czerwona linia – obszar modelu 3D

***Fig. 1**. Preliminary map of distribution and summary thickness of the Werra Anhydrite (A1) and the Lower Anhydrite (A1d) units. Captions: white points - boreholes, red line – limit of 3D model area*

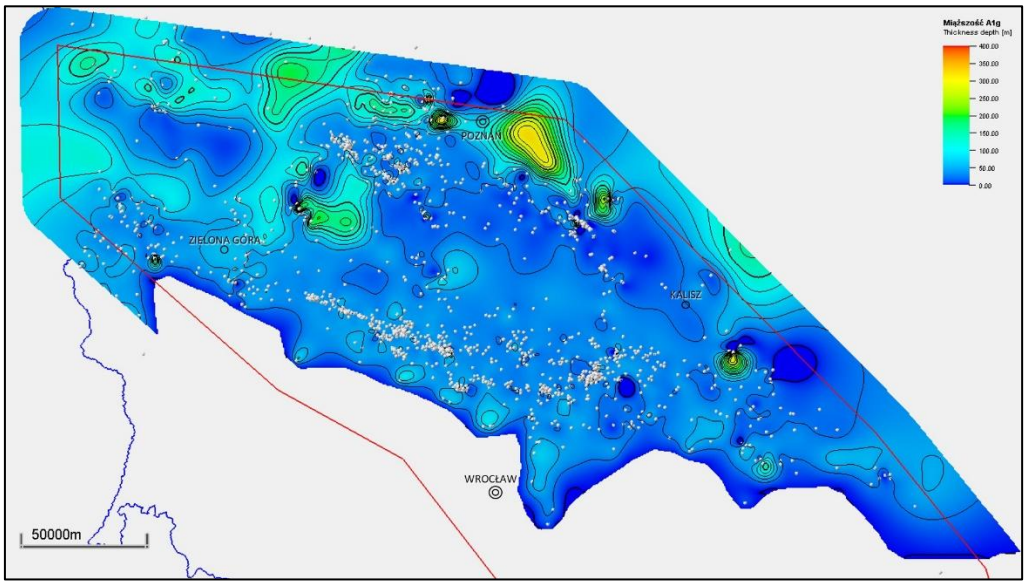
Utwory chlorkowo-siarczanowe cyklotemu PZ1, obejmujące najstarszą sól kamienną (Na1) wraz z osadami anhydrytu śródsolnego (A1s), charakteryzują się stosunkowo niewielką (do 90 m) miąższością na większej części obszaru objętego modelem (**Ryc. 2**). Większe miąższości (do 300 m, a lokalnie 400 m) odnotowano w formie swoistych niewielkich centrów w południowej i środkowej części obszaru oraz na jego SE skraju. Zwraca uwagę lokalny brak tych utworów w części środkowej, południowej i SE modelu.



Ryc. 2. Wstępna mapa rozprzestrzenienia i sumarycznego rozkładu miąższości utworów najstarszej soli kamiennej (Na1) i anhydrytu śródsolnego (A1s). Objaśnienia: białe punkty – otwory wiertnicze, czerwone punkty – otwory z utworami A1s, czerwona linia – obszar modelu 3D

***Fig. 2**. Preliminary map of distribution and summary thickness of the Oldest Halite (Na1) and the Intrasalt Anhydrite (A1s) units. Captions: white points - boreholes, red points – boreholes with A1s, red line – limit of 3D model area*

Utwory siarczanowe cyklotemu PZ1, przykrywające osady chlorkowe, obejmują osady anhydrytu górnego (A1g) oraz brekcji anhydrytowej (A1Br). Na większości obszaru objętego modelem osiągają one niewielką (do 50 m) miąższość (**Ryc. 3**), lokalne stosunkowo małe izolowane centra o większej miąższości (do 100 m) zarejestrowano w środkowej, północnej i wschodniej części obszaru. Zawraca uwagę lokalny wzrost miąższości (do 300 m) w rejonie na wschód od Poznania.



Ryc. 3. Wstępna mapa rozprzestrzenienia i sumarycznego rozkładu miąższości utworów anhydrytu górnego (A1g) i brekcji anhydrytowej (A1Br). Objaśnienia jak na **Ryc. 1**

Fig. 3**. Preliminary map of distribution and summary thickness of the Upper Anhydrite (A1g) and the Anhydrite Breccia (A1Br) units. Captions as on **Fig.1

W podobny sposób zostaną przeanalizowane osady ewaporatowe młodszych cyklotemów cechsztynu z uwzględnieniem roli tektoniki w ich rozprzestrzenieniu i zrejestrowanych miąższościach.

Słowa kluczowe: ewaporaty, cyklotem PZ1, cechsztyn, model 3D, monoklina przedsudecka, SW Polska

Over decade the National Geological Institute-National Scientific Institute realized the projects of 3D models illustrating the geological structure of selected regions of Poland e.g. the Lublin area (e.g. Czapowski et all., 2017), the Wolsztyn Ridge area (e.g. Czapowski et all., 2023) or the Szczecin Depression area (e.g. Nowacki et all., 2022, 2025). Current project focused on 3D geological model of Fore-Sudetic area (Fore-Sudetic monocline) with the Upper Silesia basin (Silesian-Cracovian monocline), which the valid component is visualisation of extent as well as age and lithological-facies variety of the Permian rocks.

Important – due to lithology, thickness, and resource potential – role in this model play The Upper Permian (Zechstein), particularly the evaporates (rock and potash salts and sulphates) composing the four sedimentary cyclothemes.

Presented here as the maps the preliminary results of extension and thickness distribution analysis of evaporates belonged to the PZ1 cyclothem of Zechstein referred to the deposits of main evaporitic lithostratigraphic units, registered in the model area (Tab. 1): the Werra Anhydrite [A1] with the Lower Anhydrite [A1d] units (Fig. 1), the Oldest Halite [Na1] unit with the Intrasalt Anhydrite [A1s] unit (Fig. 2) and the units of Upper Anhydrite [A1g] and Anhydrite Breccia [A1Br] (Fig. 3). Data from 1333 boreholes were used to construct these maps but in table 1 were also noticed the main statistic parameters registering the depth and thickness of studied lithostratigraphic units, calculated for 359 selected representative boreholes.

It should be emphasized that the presented maps are preliminary in nature; they illustrate certain trends in the thickness variations of the identified units but do not account for the influence of tectonics on their distribution—a subject to be addressed in future analyses.

*The sulfate deposits underlying the PZ1 cyclothem chlorides—comprising two units: the Werra Anhydrite (A1) and the Lower Anhydrite (A1d)—are characterized by relatively low thickness (up to 60 m) in the axial and southeastern parts of the modeled area (**Fig. 1**). Greater thicknesses (up to 150 m) were recorded in distinct zones: near Zielona Góra in the south, and along a belt extending from the area west of Poznań to the region southeast of Kalisz in the northern part of the model.*

*The chloride-sulfate deposits of the PZ1 cyclothem—comprising the oldest rock salt (Na1) and the inter-salt anhydrite (A1s)—are characterized by relatively low thickness (up to 90 m) across the greater part of the modeled area (**Fig. 2**). Greater thicknesses (up to 300 m, and locally 400 m) were recorded in the form of distinct, small depocenters in the southern and central parts of the area, as well as at its southeastern margin. A notable feature is the local absence of these deposits in the central, southern, and southeastern sections of the model.*

*The sulfate deposits of the PZ1 cyclothem, overlying the chloride sediments, comprise the Upper Anhydrite (A1g) and Anhydrite Breccia (A1Br) units. Across the majority of the modeled area, they are relatively thin (up to 50 m) (**Fig. 3**), though small, isolated depocenters with greater thickness (up to 100 m) have been identified in the central, northern, and eastern parts of the area. A localized increase in thickness (up to 300 m) in the region east of Poznań is particularly noteworthy.*

The evaporite deposits of the younger Zechstein cyclothems will be analyzed in a similar manner, taking into account the role of tectonics in their distribution and recorded thicknesses.

***Keywords**: evaporites, PZ1cyclothem, Zechstein, 3D model, Fore-Sudetic monocline, SW Poland*

LITERATURA/*REFERENCES:*

- CZAPOWSKI G., CHEŁMIŃSKI J., MAŁOLEPSZY Zb., NOWACKI Ł., 2017 - Rozwój sedymentacji utworów ewaporatowych cechsztynu na obszarze rowu mazursko-lubelskiego (SE Polska). Przegląd Solny (Salt Review), 13: 75-93. Kraków
- CZAPOWSKI G., MAŁOLEPSZY Z., SZYNKARUK E., CHEŁMIŃSKI J., NOWACKI Ł., SKOWROŃSKI L., 2023 - Paleofacje i paleomorfologia górnopermskich (cechsztyńskich) basenów ewaporatowych w rejonie Gorzowa Wielkopolskiego (zachodnia Polska). Prace PIG, 208:1-60.
- NOWACKI Ł., CHEŁMIŃSKI J., SZYNKARUK E., CZAPOWSKI G., 2022 – Litostratygrafia i środowiska facjalne – wybrane aspekty problematyki modelowania 3D na przykładzie projektu „Modelowanie budowy geologicznej basenów sedymentacyjnych Polski – Etap II „Blok Gorzowa"". XXVI Międzynarodowe Sympozjum Solne QUO VADIS SAL, Kraków 21-25.09.2022, Mat. konf.: 106-109. Kraków
- NOWACKI Ł., CZAPOWSKI G., CHEŁMIŃSKI J., SKOWROŃSKI L., HODBOD M., MICHNA M., 2025 – Charakterystyka występowania ewaporatowych wydzieleń litostratygraficznych cechsztynu na obszarze modelu niecki szczecińskiej. XIX Międzynarodowe Sympozjum Solne QUO VADIS SAL, Bydgoszcz, 15-17.10.2025, Mat. konf.:105-106. Kraków

ROZPRZESTRZENIENIE LITOFACJALNE UTWORÓW CECHSZTYNU NIECKI SZCZECIŃSKIEJ W OPRACOWANYM MODELU PRZESTRZENNYM 3D

LITHOFACIES DISTRIBUTION OF ZECHSTEIN DEPOSITS IN THE SZCZECIN TROUGH WITHIN THE DEVELOPED 3D SPATIAL MODEL

Łukasz NOWACKI[1], Grzegorz CZAPOWSKI[1], Leszek SKOWROŃSKI, [1] Marta HODBOD[1], Jacek CHEŁMIŃSKI[1], Michał MICHNA[1]

[1] Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa
e-mail: lukasz.nowacki@pgi.gov.pl

Dla celów modelowania 3D budowy geologicznej obszaru niecki szczecińskiej przeprowadzono analizę występowania utworów ewaporatowych – obejmujących siarczany i sole młodszego permu (cechsztyn) w ponad 300 głębokich otworach wiertniczych wykonanych na obszarze objętym modelowaniem. Korzystano za uaktualnionych i zweryfikowanych zasobów danych Centralnej Bazy Danych Geologicznych (CBDG).

W zestawieniu przedstawiono poszczególne wydzielenia litostratygraficzne, dotyczące utworów ewaporatowych w obrębie profilu cechsztynu na obszarze Polski, wykorzystując terminologię zastosowaną przez R. Wagnera (1995). Ponieważ określa ona nieformalne jednostki litostratygraficzne – użyto terminu" wydzielenie". Poszczególne wydzielenia, opatrzone stosowaną dotychczas symboliką (Wagner, 1995), zostały przypisane poszczególnym sukcesjom litologicznym cechsztynu, rejestrującym powtarzające się cyklicznie zmiany środowiskowe (cykle depozycyjne) podczas formowania się utworów cechsztynu w Polsce.

Cyklotem PZ1 (werra) zawiera 6 ewaporatowych wydzieleń litostratygraficznych: 5 siarczanowych i 1 solne. Utwory solne reprezentowane są przez najstarszą sól kamienną (Na1) (**Ryc.1**), która może być lokalnie rozdzielona siarczanowym wydzieleniem anhydrytu śródsolnego (A1s) na część dolną (Na1d) i górną (Na1g). Siarczanom odpowiadają wydzielenia anhydrytu dolnego (A1d) i górnego (A1g), lokalnie występujących anhydrytu śródsolnego (A1s) i brekcji anhydrytowej (A1Br). Gdy w sukcesji cyklotemu PZ1 brak jest soli i występują tylko siarczany bez możliwości ich rozdzielenia na wymienione wydzielenia to określa się takie utworu terminem „anhydryt werra" (A1). Pominięto tu lokalnie występujące w NE Polsce utwory chlorkowych soli potasowo-magnezowych, określanych terminem najstarsza sól potasowa (K1) (Czapowski i in., 2023). Ze względu na rozdzielczość danych w modelu 3D wydzielono powierzchnie stropu wydzieleni A1d, Na1 i A1g.

Cyklotem PZ2 (stassfurt) zawiera 5 ewaporatowych wydzieleń litostratygraficznych: 2 siarczanowe i 3 solne. Utwory solne reprezentowane są przez starszą sól kamienną (Na2), starszą sól potasową (K2) i starszą sól kamienną kryjącą (Na2r) (**Ryc. 2**). Siarczanom odpowiadają wydzielenia anhydrytu podstawowego (A2) i anhydrytu kryjącego (A2r).

Cyklotem PZ3 (leine) zawiera 6 ewaporatowych wydzieleń litostratygraficznych: 3 siarczanowe i 3 solne. Utwory solne reprezentowane są przez młodszą sól kamienną (Na3), która może być lokalnie rozdzielona siarczanowym wydzieleniem anhydrytu śródsolnego (A3s) na część dolną (Na3d) i górną (Na3g), młodszą sól potasową (K3) i specyficzne utwory młodszej soli kamiennej zailonej (Na3t), określanej też w zakładach górniczych terminem „zuber brunatny" (Tomassi-Morawiec i in., 2019). Siarczanom odpowiadają wydzielenia anhydrytu głównego (A3) i lokalnie występujących anhydrytu śródsolnego (A3s) i anhydrytu „stropowego/lub granicznego" (A3r/A3g).

W przypadku cyklotemu PZ4 (aller) podział wydzieleń jest bardziej złożony. Na terenie Polski wyróżniono w nim 5 sukcesji litologicznych, określanych jako subcyklotemy – od PZ4a do PZ4e, odpowiadających cyklotemowym sukcesjom z obszaru Niemiec (Wagner, 1995) - z których 2 najstarsze (PZ4a i PZ4b) zawierają ewaporaty natomiast 3 młodsze (PZ4c, PZ4d i PZ4e) reprezentowane są przez specyficzne facje

zubrowe (głównie mieszanina soli kamiennej i substancji ilastej z domieszką siarczanów), wyróżnione w postaci nieformalnych formacji i ogniw litostatygraficznych (Wagner, 1995).

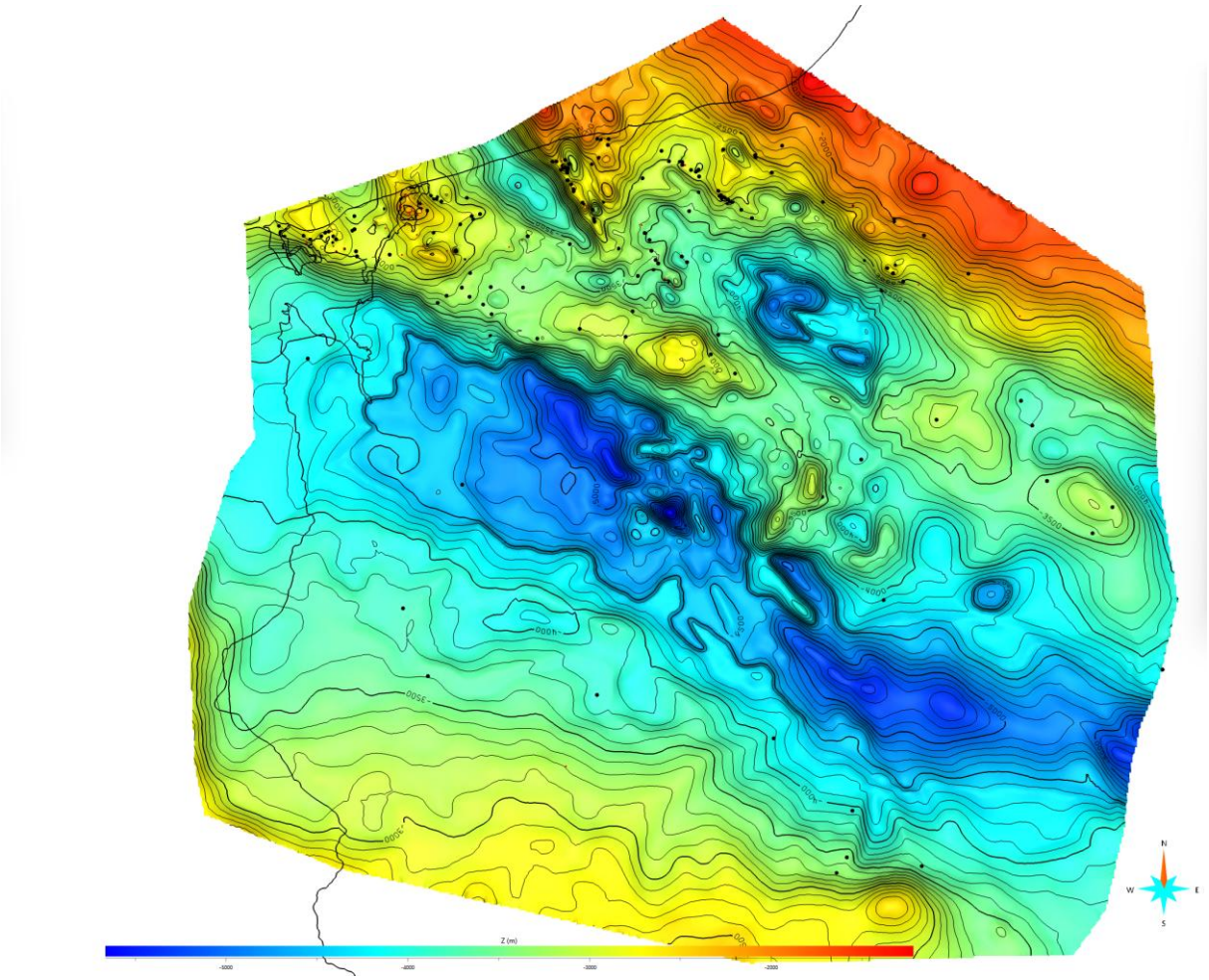
Subcyklotem PZ4a zawiera 6 ewaporatowych wydzieleń litostratygraficznych: 2 siarczanowe i 4 solne. Utwory solne reprezentowane są przez sól podścielającą (Na4a0), najmłodszą sól kamienną dolną (Na4a1/Na4a/Na4ad), najmłodszą sól kamienną górną (Na4a2/Na4ag) i najmłodszą sól kamienną górną ilastą (Na4a2t). W szeregu profili geologicznych w centralnej Polsce zailone utwory solne tego subcyklotemu, kończące sukcesję cechsztynu, są określane terminem „zuber czerwony" ze względu na charakterystyczne zabarwienie (Tomassi-Morawiec i in., 2019). Siarczanom odpowiadają wydzielenia anhydrytu pegmatytowego/lub dolnego (A4a1/A4ad) i anhydrytu pegmatytowego górnego (A4a2/A4ag).

Subcyklotem PZ4b pozbawiony jest wystąpień osadów siarczanowych, budują go utwory solne przedzielone ilastymi. Utwory solne reprezentowane są przez sól rozdzielającą (Na4b1/Na4b/Na4bp) i najmłodszą sól kamienną stropową (Na4b2).

Tab. 1. Ewaporatowe wydzielenia litostratygraficzne w obrębie cyklotemów od PZ1 do PZ4 cechsztynu na obszarze niecki szczecińskiej objętej modelem 3D (Wagner, 1995)

Tab. 1. *Evaporitic lithostratigraphic units of PZ1 to PZ4 Zechstein cyclothems in the Szczecin Trough within the 3D model (acc. Wagner, 1995)*

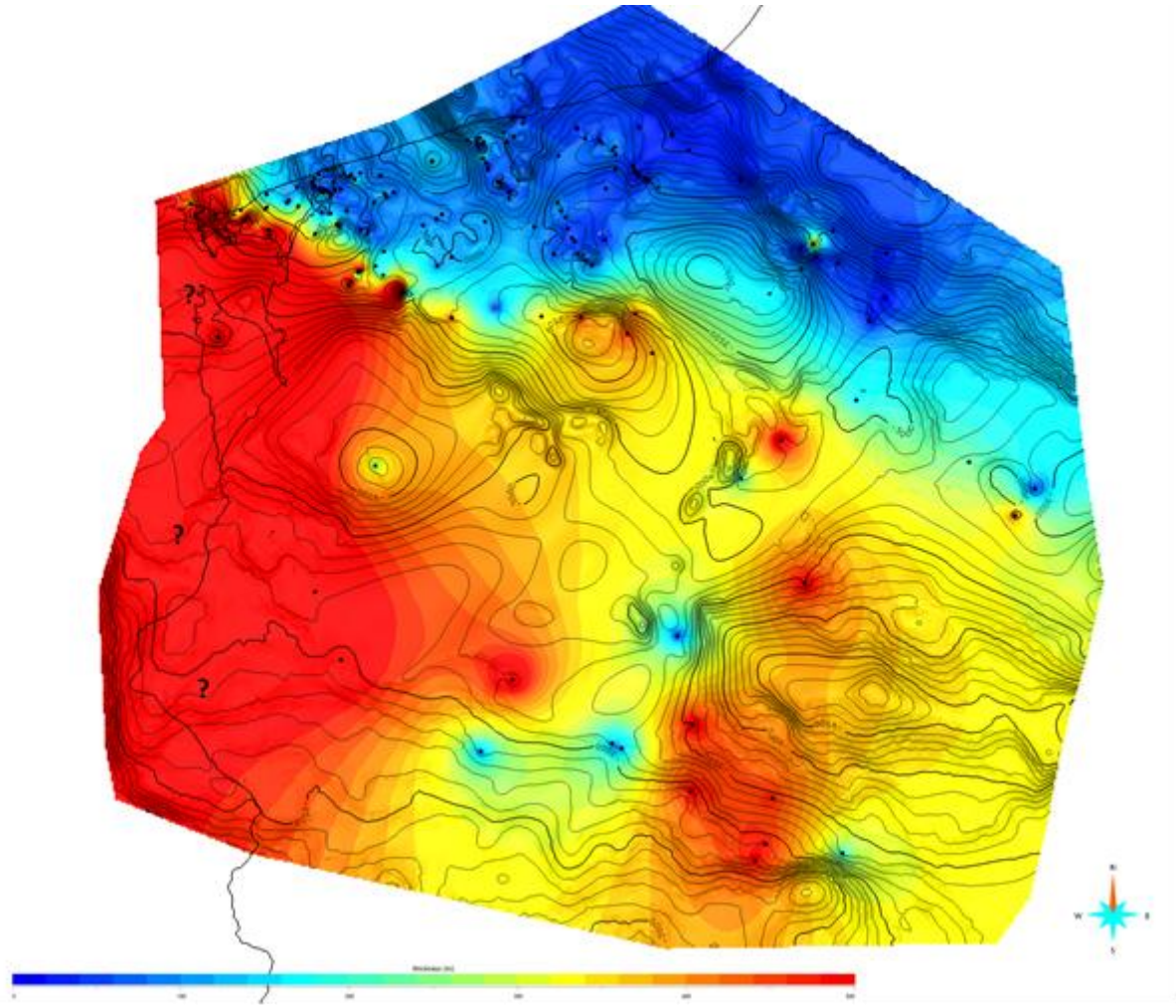
CYKLOTEMY I LITOSTRATYGRAFIA			
CYKLOTEM	**Subcyklotem**	**Wydzielenie litostratygraficzne (symbol)**	
PZ4 (aller)	PZ4e	wydzielenia (formacje i ogniwa zubrowe)	
	PZ4d		
	PZ4c		
	PZ4b	najmłodsza sól kamienna stropowa (Na4b2)	
		sól rozdzielająca (Na4b1/Na4b/Na4bp)	
	PZ4a	najmłodsza sól kamienna górna ilasta (Na4a2t)	
		najmłodsza sól kamienna górna (Na4a2/Na4ag)	
		anhydryt pegmatytowy górny (A4a2/A4ag)	
		najmłodsza sól kamienna dolna (Na4a1/Na4a/Na4ad)	
		anhydryt pegmatytowy/dolny (A4a1/A4ad)	
		sól podścielająca (Na4a0)	
PZ3 (leine)		anhydryt „stropowy/graniczny" (A3r/A3g)	
		młodsza sól zailona/zuber brunatny (Na3t)	
		anhydryt śródsolny (A3s)	
		młodsza sól potasowa (K3)	
		młodsza sól kamienna (Na3)	
		anhydryt główny (A3)	
PZ2 (stassfurt)		anhydryt kryjacy (A2r)	
		starsza sól kamienna kryjąca (Na2r)	
		starsza sól potasowa (K2)	
		starsza sól kamienna (Na2)	
		anhydryt podstawowy (A2)	
PZ1 (werra)		anhydryt dolny (A1d)	anhydryt werra (A1)
		brekcja anhydrytowa (A1Br)	
		najstarsza sól kamienna (Na1)	
		anhydryt śródsolny (A1s)	
		najstarsza sól kamienna (Na1)	
		anhydryt dolny (A1d)	



Ryc. 1. Powierzchnia stropu najstarszej soli kamiennej (Na1) w m n.p.m.

Fig. 1. *Oldest Halite (Na1) top surface [m a.s.l.]*

Analiza występowania utworów ewaporatowych (siarczany i sole) cechsztynu na obszarach niecki szczecińskiej, oraz części wału pomorskiego, umożliwiła skonstruowanie modelu 3D. Na podstawie przestrzennego modelu opracowano mapy miąższościowe poszczególnych wydzieleń litostratygraficznych lub ich pakietów. Mapy te w zamierzeniu ukazują tendencje zmian miąższości tych utworów na analizowanym obszarze, wynikające zarówno z sedymentacyjno-facjalnych uwarunkowań w obrębie kolejnych ewaporatowych basenów depozycyjnych cechsztynu jak i z późniejszych procesów halotektonicznych. Ocena wpływu tych ostatnich na obecny obraz miąższościowy ewaporatów cechsztyńskich wymaga znajomości aktualnego rozmieszczenia i skali wielkości struktur wysadowych i stref dyslokacyjnych, występujących na obszarze modelu 3D. W dalszym etapie analiz możliwe jest opracowanie map facjalnych opisanych ewaporatów, ilustrujących prawdopodobne zróżnicowanie paleobatymetrii i środowisk sedymentacji zbiorników depozycyjnych kolejnych cyklotemów ewaporatowych.



Ryc. 2. Powierzchnia stropu starszej soli kamiennej (Na2) i miąższość pakietu (Na2+K2+Na2r) w m

Fig. 2. *Older Halite (Na2) top surface and package thickness (Na2+K2+Na2r) [m]*

Słowa kluczowe: litofacje, model 3D, mapy strukturalne

For the purposes of 3D geological modeling of the Szczecin Trough, an analysis of the occurrence of evaporitic deposits—comprising sulfates and salts of the Upper Permian (Zechstein)—was conducted in over 300 deep boreholes drilled within the study area. Updated and verified data assets from the Central Geological Database (CBDG) were utilized.

The compilation presents the individual lithostratigraphic units of the evaporitic succession within the Zechstein profile of Poland, using the terminology established by R. Wagner (1995). Since this framework defines informal lithostratigraphic units. The individual units, designated with the standard symbols used to date (Wagner, 1995), were assigned to specific Zechstein lithological successions that record cyclically recurring environmental changes (depositional cycles) during the formation of the Zechstein deposits in Poland.

The PZ1 (Werra) cyclothem comprises 6 evaporitic lithostratigraphic units: 5 sulfate units and 1 salt unit. The salt deposits are represented by the Oldest Halite (Na1) (Fig. 1), which can be locally subdivided by a sulfate unit—the Intrasalt Anhydrite (A1s)—into a lower (Na1d) and an upper (Na1g) part. The sulfates correspond to the units of the Lower Anhydrite (A1d) and Upper Anhydrite (A1g), alongside the locally occurring Intrasalt Anhydrite (A1s) and Anhydrite Breccia (A1Br). When salt is absent in the PZ1 cyclothem succession and only sulfates occur without the possibility of subdividing them into the aforementioned units, such deposits are referred to by the term "Werra Anhydrite" (A1). The potassium-magnesium chloride salts, locally occurring in NE Poland and referred to as the Oldest Potash (K1) (Czapowski et al., 2023),

were omitted here. Due to data resolution constraints, the top surfaces of units A1d, Na1, and A1g were distinguished in the 3D model.

The PZ2 (Stassfurt) cyclothem comprises 5 evaporitic lithostratigraphic units: 2 sulfate units and 3 salt units. The salt deposits are represented by the Older Halite (Na2), the Older Potash Salt (K2), and the Screening Older Halite (Na2r)- (Fig. 2). The sulfates correspond to the units of the Basal Anhydrite (A2) and the Screening Anhydrite (A2r).

The PZ3 (Leine) cyclothem comprises 6 evaporitic lithostratigraphic units: 3 sulfate units and 3 salt units. The salt deposits are represented by the Younger Halite (Na3) - which can be locally subdivided by a sulfate unit, the Intrasalt Anhydrite (A3s), into a lower (Na3d) and an upper (Na3g) part - the Younger Potash (K3), and specific units of the argillaceous Younger Halite (Na3t), also referred to in mining operations by the term "Brown Zuber" (Tomassi-Morawiec et al., 2019). The sulfates correspond to the units of the Main Anhydrite (A3) and the locally occurring Intrasalt Anhydrite (A3s) and "Top/Boundary" anhydrite (A3r/A3g).

In the case of the PZ4 (Aller) cyclothem, the subdivision of units is more complex. Within the territory of Poland, 5 lithological successions, referred to as subcyclothems—from PZ4a to PZ4e—have been distinguished, which correspond to the cyclothem successions of the German area (Wagner, 1995), with the 2 oldest ones (PZ4a and PZ4b) containing evaporites.

The PZ4a sub-cyclothem comprises six evaporite lithostratigraphic units: two sulfate and four salt units. The salt deposits are represented by the basal salt (Na4a0), the youngest lower rock salt (Na4a1/Na4a/Na4ad), the youngest upper rock salt (Na4a2/Na4ag), and the youngest upper argillaceous rock salt (Na4a2t). In a number of geological profiles in central Poland, the argillaceous salt deposits of this sub-cyclothem—which mark the end of the Zechstein succession—are referred to as "red zuber" due to their characteristic coloration (Tomassi-Morawiec et al., 2019). The sulfate units correspond to the pegmatitic/lower anhydrite (A4a1/A4ad) and the upper pegmatitic anhydrite (A4a2/A4ag).

The PZ4b sub-cyclothem lacks sulfate deposits and consists of salt units interbedded with argillaceous deposits. The salt deposits are represented by the separating salt (Na4b1/Na4b/Na4bp) and the youngest roof rock salt (Na4b2).

The analysis of the occurrence of Zechstein evaporitic deposits (sulfates and salts) within the Szczecin Trough and parts of the Pomeranian Anticlinorium enabled the construction of a 3D model. Based on this spatial model, thickness maps of individual lithostratigraphic units or their packages were developed. These maps are intended to illustrate the thickness trends of these deposits across the study area, resulting from both sedimentary-facies conditions within successive Zechstein evaporitic depositional basins and subsequent halotectonic processes. Assessing the impact of the latter on the present-day thickness distribution of Zechstein evaporates requires knowledge of the current arrangement and scale of salt diapirs and fault zones occurring within the 3D model area. In the further stages of analysis, it is possible to develop facies maps for the described evaporates, illustrating the probable paleobathymetric variations and sedimentary environments of the depositional basins during successive evaporitic cyclothems.

Keywords: *lithofacies, 3D model, structural maps*

LITERATURA / *REFERENCES*:

- CZAPOWSKI G., HODBOD M., SKOWROŃSKI L., SOBIEŃ K., 2023 - Pokładowe wystąpienia soli potasowo-magnezowych w południowo-zachodniej Polsce – potencjał złożowy. Przegląd Geologiczny, vol. 71, nr 6, s. 321-331.
- TOMASSI-MORAWIEC H., WACHOWIAK J., CZAPOWSKI G., 2019 - Geochemia i wykształcenie skał zubrowych górnego permu (cechsztyn) z obszaru Polski. Biuletyn PIG, vol. 477, s. 69-122.
- WAGNER R., 1995 Stratygrafia i rozwój basenu cechsztyńskiego na Niżu Polskim. Prace PIG, t. 146, 71 s. Warszawa.

ZMIENNOŚĆ WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH W SKAŁACH ZUBROWYCH Z WYSADU SOLNEGO GÓRA

VARIABILITY OF MECHANICAL PROPERTIES IN ZUBER ROCKS FROM THE GÓRA SALT DOME

Katarzyna BAJDA[1]

[1] AGH Akademia Górnicza- Hutnicza w Krakowie, Wydział Inzynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: kgurdak@agh.edu.pl

Zubry permskie – skały solno-ilaste o zróżnicowanej budowie i składzie mineralnym – stanowią istotny, lecz wciąż słabo rozpoznany element formacji cechsztyńskich Europy Środkowej. Ich występowanie między innymi w Polsce i Niemczech sugeruje potencjalnie szerokie znaczenie zarówno dla geologii strukturalnej, jak i dla górnictwa podziemnego (*Tomassi-Morawiec i in. 2019*). Literatura wykazuje istotny deficyt danych dotyczących ich własności mechanicznych oraz wpływu składu mineralnego na zachowanie tych skał pod obciążeniem.

Celem niniejszego badania była litologiczna klasyfikacja próbek zubra pozyskanych z wysadu solnego Góra, a także określenie zależności między wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie, a zawartością części nierozpuszczalnych w ich składzie. Ustalono cztery podstawowe typy litologiczne: sole różowe, zuber czerwony, zuber jasny oraz zuber ciemny. Do analizy wybrano osiem reprezentatywnych próbek z głębokości 1725,5–1743,7 m. Dla każdej z nich przeprowadzono testy wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, a następnie wykonano analizy geochemiczne w celu określenia procentowego udziału składników nierozpuszczalnych (**Tab. 1**).

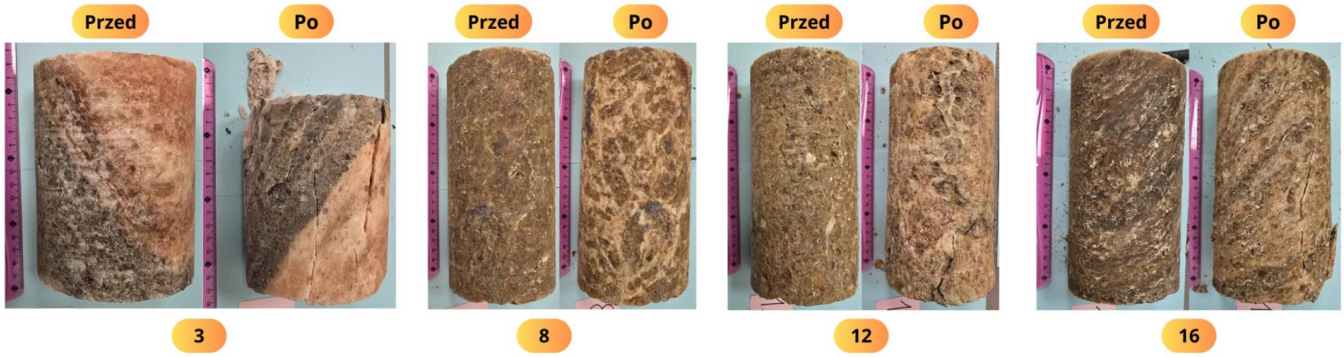
Tab.1. Zestawienie wyników badań wytrzymałości na ściskanie i rozpuszczania

Tab1. *Summary of the results of compressive strength and dissolution tests*

nr próbki zakwalifikowanej do badania *number of the sample selected for testing*	głębokość *depth* [m]	powierzchnia area [mm²]	siła niszcząca *breaking force* [kN]	wytrzymałość na ściskanie *compressive strength* [MPa]	naważka *weighed portion* [g]	części nierozpuszczalne w próbce *insoluble matter in the sample* [g]	części nierozpuszczalne w próbce *insoluble matter in the sample* [%]
2	1726,0	7850,0	137,5	17,5	20,42	0,16	0,78
3	1725,5	7850,0	224,7	28,6	20,51	1,55	7,56
8	1733,0	7539,1	166,6	22,1	10,51	1,04	9,90
11	1733,5	7693,8	166,5	21,6	10,52	0,75	7,13
5	1732,4	7850,0	191,0	24,3	10,47	0,94	8,98
12 (spękana *cracked*)	1732,5	7693,8	109,7	14,3	10,55	0,92	8,72
15	1743,7	7539,1	199,4	26,5	20,65	0,85	4,12
16	1743,7	7539,1	246,1	32,6	10,73	0,80	7,46

Legenda: sole różowe | zuber czerwony | zubry jasne | zubry ciemne

Wyniki wykazały korelację między zawartością części nierozpuszczalnych, a wytrzymałością na ściskanie. W większości przypadków próbki o wyższej zawartości nierozpuszczalnych komponentów wykazywały wyższe wartości wytrzymałościowe, co może świadczyć o stabilizującym wpływie tych składników na mikrostrukturę skały. Wyjątek stanowiła próbka nr 12, której niska wytrzymałość była prawdopodobnie wynikiem spękań obserwowanych przed testem, pomimo porównywalnej litologii i zawartości osadu względem próbki nr 5. Analiza wewnątrzgrupowa (dla danego typu litologicznego) potwierdziła, że sole różowe wykazują wzrost wytrzymałości wraz ze wzrostem udziału frakcji nierozpuszczalnych, co może mieć znaczenie w ocenie zachowania się tych skał w warunkach eksploatacji górniczej (**Ryc. 1**).



Ryc. 1. Rdzenie zubra przed i po testach wytrzymałości

Fig. 1. *Zuber cores before and after endurance tests*

W oparciu o uzyskane rezultaty zaplanowano kontynuację badań z wykorzystaniem badań mikrostrukturalnych, a także analizę mineralogiczną i petrograficzną próbek. Dalsze prace obejmą również identyfikację inkluzji i zanieczyszczeń oraz ich wpływu na parametry mechaniczne. W szerszej perspektywie przewiduje się porównanie uzyskanych danych z wynikami badań próbek pochodzących z innych cechsztyńskich złóż solnych, co umożliwi lepsze zrozumienie uwarunkowań litologicznych i geomechanicznych formacji zubrowych.

Słowa kluczowe: zuber permski, skały solno-ilaste, Cechsztyn

Permian zuber rocks – salt-clay rocks with varied structure and mineral composition – constitute an important yet still poorly understood component of the Zechstein formations in Central Europe. Their occurrence, among others in Poland and Germany, suggests a potentially broad significance for both structural geology and underground mining (Tomassi-Morawiec et al., 2019). The literature reveals a significant deficit of data regarding their mechanical properties and the influence of mineral composition on the behavior of these rocks under load.

*The objective of this study was the lithological classification of zuber samples obtained from the Góra salt dome, as well as determining the relationship between uniaxial compressive strength and the insoluble fraction content in their composition. Four basic lithological types were established: pink salts, red zuber, light zuber, and dark zuber. Eight representative samples from the depth interval of 1,725.5–1,743.7 m was selected for analysis. For each sample, uniaxial compressive strength tests were conducted, followed by geochemical analyses to determine the percentage share of insoluble components (**Tab. 1**).*

The results demonstrated a correlation between insoluble fraction content and compressive strength. In most cases, samples with a higher content of insoluble components exhibited higher strength values, which may indicate a stabilizing effect of these components on the rock microstructure. An exception was sample No. 12, whose low strength resulted from fractures observed prior to testing, despite a comparable

*lithological character and sediment content relative to sample No. 5. Within-group analysis (for a given lithological type) confirmed that pink salts show an increase in strength with an increasing proportion of the insoluble fraction, which may be significant in evaluating the behavior of these rocks under mining exploitation conditions (**Fig. 1**).*

Based on the obtained results, a continuation of the research using microstructural tests is planned, along with mineralogical and petrographic analyses of the samples. Further work will also include the identification of inclusions and impurities, as well as their influence on mechanical parameters. In a broader perspective, a comparison of the obtained data with test results from samples originating from other Zechstein salt deposits is anticipated, enabling a better understanding of the lithological and geomechanical conditions of zuber formations.

Keywords: *Permian Zuber, salty-clay rock, Zechstein*

LITERATURA / *REFERENCES*:

- Tomassi-Morawiec, H., Wachowiak, J., Czapowski, G., 2019, Geochemia i wykształcenie skał zubrowych górnego permu (cechsztyn) z obszaru Polski. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 477: 69-122.

GEOMETRIA OTWORÓW W SOLI KAMIENNEJ A ORIENTACJA WSPÓŁCZESNEGO POLA NAPRĘŻEŃ

BOREHOLE GEOMETRY IN ROCK SALT AND THE ORIENTATION OF THE PRESENT-DAY STRESS FIELD

Marta ADAMUSZEK[1], Marek JAROSIŃSKI[1], Kinga BOBEK[1], Rafał NASIŁOWSKI[1]

[1] Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa
e-mail: marta.adamuszek@pgi.gov.pl

Analiza struktur typu *borehole breakout (BB),* rozwijających się na ścianach otworów wiertniczych, jest jedną z metod wyznaczania kierunków współczesnego pola naprężeń skorupy ziemskiej. Struktury te powstają wskutek koncentracji naprężeń kompresyjnych wokół otworu i przekroczenia wytrzymałości skały na ściskanie, prowadząc do lokalnego zniszczenia ścian otworu i kierunkowego zwiększania jego średnicy. W otworach pionowych strefy zniszczenia rozwijają się w kierunku minimalnego poziomego naprężenia S_{hmin}, dzięki czemu kierunek maksymalnego poziomego naprężenia S_{Hmax} można wyznaczyć jako prostopadły do osi wydłużenia przekroju otworu. W przypadku soli kamiennej, ze względu na jej specyficzne właściwości reologiczne i zdolność do znacznych odkształceń bez utraty spójności, rozwój klasycznych *breakoutów* jest znacznie ograniczony.

W ramach naszych badań przeprowadzono analizę danych z 23 otworów wiertniczych przecinających cechsztyńskie utwory solne monokliny przedsudeckiej. Geometrię otworów określono na podstawie pomiarów wykonanych sześcioramiennym dipmetrem, umożliwiających analizę zarówno zmian średnicy otworu, jak i ich kierunkowości. Wyniki wykazały, że w interwałach solnych średnica otworów jest zazwyczaj większa od nominalnej średnicy świdra, a ich przekroje wykazywały wyraźną kierunkową eliptyczność. W większości analizowanych przypadków minimalna średnica przekraczała wartość nominalną średnio o około 10 cm, a lokalnie różnica wynosiła ponad 30 cm. Eliptyczność przekrojów osiągała 6-15%, przy średniej wartości około 8%. Struktury te określono jako *breakout-like structures (BBL)*, ponieważ ich geometria przypomina klasyczne *borehole breakouts*, choć mechanizm ich powstawania w soli jest odmienny i najprawdopodobniej wynika ze współdziałania kilku procesów. Z jednej strony pełzanie soli prowadzi do konwergencji ścian i stopniowego zaciskania otworu, z drugiej natomiast kontakt z niedosyconą względem NaCl płuczką wiertniczą powoduje rozpuszczanie soli i poszerzanie otworu. Nałożenie tych procesów, przy ich zależności od lokalnej orientacji kierunków naprężeń wokół otworu, może prowadzić do powstania obserwowanej eliptyczności przekroju.

W analizowanych otworach, do oszacowania tempa zaciskania otworu wykorzystano model analityczny Corneta i in. (2018), opisujący deformację otworu w anizotropowym polu naprężeń z uwzględnieniem mechanizmów pełzania dyslokacyjnego i rozpuszczania pod ciśnieniem. Dla otworu o promieniu 0,105 m, różnicy ciśnień rzędu 20-30 MPa, temperatury dochodzącej do 140°C oraz drobnoziarnistej soli o wielkości ziaren 0,5-1 mm model wskazuje, że tempo zaciskania otworu może osiągać kilka centymetrów na miesiąc. Wyraźna deformacja może zatem rozwinąć się już w ciągu około tygodnia, a w warunkach wysokiego naprężenia różnicowego i podwyższonej temperatury konwergencja otworu może stać się istotna operacyjnie nawet w skali dni.

Na geometrię strefy przyotworowej może dodatkowo wpływać rozwój mikropęknięć oraz rozpuszczanie wspomagane naprężeniami. Mikrospękania zwiększają lokalną przepuszczalność i ułatwiaja penetrację płynu w głąb ściany otworu, natomiast niedosycona płuczka może przyspieszać rozpuszczanie i ograniczać ponowne wytrącanie soli. W anizotropowym polu naprężeń konwergencja jest preferowana w kierunku S_{Hmax}, natomiast rozwój mikropęknięć i związane z nim rozpuszczanie mogą być intensywniejsze w kierunku S_{hmin}. Oba procesy prowadzą zatem do względnego wydłużenia przekroju otworu w kierunku S_{hmin}. Orientacja eliptyczności otworu może więc stanowić potencjalny wskaźnik kierunku współczesnego S_{Hmax} w kompleksie solnym.

Regionalna analiza orientacji struktur *BBL* na obszarze monokliny przedsudeckiej wskazała, że dominujący kierunek S_{Hmax} w utworach solnych ma orientację ENE–WSW, podczas gdy w skałach podłoża jest on zorientowany NNW–SSE. Rozbieżność ta sugeruje, że kompleks solny nie musi bezpośrednio przenosić naprężeń z podłoża. Obserwowane kierunki naprężeń w soli mogą być kontrolowane przede wszystkim przez gradient ciśnienia litostatycznego związany ze zmianami głębokości zalegania soli, a lokalnie również przez geometrię platform anhydrytowych i raf węglanowych oraz możliwe grawitacyjne przemieszczanie warstw.

Słowa kluczowe: sól kamienna, Monoklina przedsudecka, *breakout-like structures* (BBL), konwergencja otworów, współczesne pole naprężeń

Analysis of borehole breakout (BB) structures developing along borehole walls is one of the methods used to determine the orientation of the present-day stress field in the Earth's crust. These structures form as a result of compressive stress concentration around the borehole, when the compressive stress exceeds the rock strength, leading to local failure of the borehole wall and directional enlargement of the borehole diameter. In vertical boreholes, the failure zones develop in the direction of the minimum horizontal stress, S_{hmin}, allowing the orientation of the maximum horizontal stress, S_{Hmax}, to be determined as perpendicular to the axis of borehole elongation. In rock salt, however, the development of classical breakouts is strongly limited due to its specific rheological properties and its ability to undergo substantial deformation without loss of cohesion.

In our study we analysed data from 23 boreholes penetrating the Zechstein salt formations of the Fore-Sudetic Homocline. Borehole geometry was determined from six-arm dipmeter measurements, allowing assessing both changes in borehole diameter and their directional character. The results showed that, within the salt intervals, borehole diameters were generally larger than the nominal bit diameter, while the borehole cross-sections displayed a distinct directional ellipticity. In most cases, the minimum diameter exceeded the nominal value by an average of approximately 10 cm, with local differences of more than 30 cm. Cross-sectional ellipticity ranged from 6 to 15%, with an average of about 8%. These features were termed breakout-like structures (BBL) because their geometry resembles that of classical borehole breakouts, although their formation mechanism in salt is different and most likely reflects the interaction of several processes. On the one hand, salt creep causes borehole wall convergence and gradual borehole closure; on the other hand, contact with drilling mud undersaturated with respect to NaCl promotes salt dissolution and borehole enlargement. The combined effect of these processes, together with their dependence on the local stress orientation around the borehole, may lead to the observed cross-sectional ellipticity.

In the studied boreholes, to estimate the timescale of borehole closure, we applied the analytical model of Cornet et al. (2018), which describes borehole deformation in an anisotropic stress field while accounting for dislocation creep and pressure-solution mechanisms. For a borehole radius of 0.105 m, a pressure difference of about 20–30 MPa, temperatures of up to 140°C, and fine-grained salt with grain sizes of 0.5–1 mm, the model indicates that closure rates may reach several centimeters per month. Significant deformation may therefore develop within about one week, while under conditions of high differential stress and elevated temperature, borehole convergence may become operationally significant within only a few days.

The geometry of the near-borehole zone may also be influenced by the development of microcracks and stress-assisted dissolution. Microcracking increases local permeability and facilitates fluid penetration into the borehole wall, while undersaturated drilling mud may enhance dissolution and inhibit salt reprecipitation. In an anisotropic stress field, convergence is preferentially developed in the S_{Hmax} direction, whereas microcrack development and the associated dissolution may be more intense in the S_{hmin} direction. Both processes therefore lead to relative elongation of the borehole cross-section in the S_{hmin} direction. The orientation of borehole ellipticity may thus serve as a potential indicator of the present-day S_{Hmax} direction within the salt complex.

Regional analysis of BBL orientations across the Fore-Sudetic Homocline showed that the dominant S_{Hmax} direction within the salt formations is ENE–WSW, whereas in the underlying rocks it is oriented NNW–

SSE. This discrepancy suggests that the salt complex may not directly transmit stresses from the underlying formations. Stress orientations within the salt may instead be controlled primarily by the lithostatic pressure gradient associated with variations in salt burial depth, and locally also by the geometry of anhydrite platforms and carbonate reefs, as well as by possible gravitational displacement of rock layers.

Keywords: *rock salt, Fore-Sudetic Homocline, breakout-like structures (BBL), borehole convergence, present-day stress field*

LITERATURA / *REFERENCES*:

- CORNET J.S., DABROWSKI M., SCHMID D.W., 2018. Long term creep closure of salt cavities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 103: 96–106.

ZNACZĄCE ZWIĘKSZENIE WSKAŹNIKA WYKORZYSTANIA WYSADOWEGO ZŁOŻA SOLI „MOGILNO I” W OPARCIU O WYKONANE „MODELOWANIA GEOMECHANICZNE 3D STANU NAPRĘŻEŃ I PRZEMIESZCZEŃ W EKSPLOATOWANYM WYSADZIE SOLNYM"

SIGNIFICANT INCREMENT OF USAGE RATE OF SALT DOME DEPOSIT MOGILNO I BASED ON PERFORMED “GEOMECHANICAL MODELLING OF STRESS AND DISLOCATION STATE IN MINED SALT DOME”

Piotr MROZIŃSKI, Mirosław M. MAZUR

Pionierska eksploatacja soli kamiennej **metodą otworową** na skalę przemysłową złoża wysadowego „Góra” rozpoczęła się w 1968 roku. Natomiast od 1986 roku, złoża wysadowego „Mogilno I”. Przed rozpoczęciem eksploatacji na każdym ze złóż odwiercono po kilkanaście otworów eksploatacyjnych w siatce trójkąta równobocznego **o boku 100 m.** Eksploatacja soli zakładała tworzenie cylindrycznych komór poeksploatacyjnych **o średnicy 50 m i wysokości ok. 1000 m,** poniżej przyjętej półki stropowej, na spągu której znajdował się but ostatniej cementowanej kolumny rur. Eksploatacja złoża poprzez wydobycie solanki zabezpieczała wymaganą zdolność produkcyjną dla przemysłu sodowego i solnego. Wyżej wymienione otwory były wiercone na najbardziej korzystnej części wysadów. W miarę upływu czasu i postępów eksploatacji zasoby wydobywanej soli przy pomocy otworów eksploatacyjnych wyczerpywały się. Wiercono więc nowe otwory**.** W latach 80-tych XX wieku w kopalni Mogilno **zwiększono średnice komór do 55 m.** Jednakże bardzo skomplikowana budowa geologiczna złoża Mogilno I spowodowała niski wskaźnik wydobycia soli. Aby znacząco zwiększyć wskaźnik wydobycia soli w Kopalni Mogilno autorzy projektu w oparciu o najnowszą wiedzę, podjęli się wykonania modelowań geomechanicznych pn."**Modelowanie geomechaniczne 3D stanu naprężeń i przemieszczeń w eksploatowanym wysadzie solnym".** Wyniki powstałego opracowania jednoznacznie wskazują możliwość zwiększenia **średnic komór do 60m i zwiększyć wskaźnik wydobycia o około 20%.**

Słowa kluczowe: sól kamienna, eksploatacja otworowa soli, geomechanika wysadów solnych, wskaźnik wykorzystania złoża

The industrial pioneer exploitation on salt rock with dirinned wells of domal deposit “Góra” has started in 1968 year. The Mogilno I deposit has been mined from 1986. Prior to exploitation on each deposit several wells were drilled. The exploitation wells have been drilled in triangle pattern in 100 m distance. The mining of the deposit was based on creating of cylinders cavern of diameter 50 m and height about 1000 m, down to upper shelf on the top of which the last casing shoe was situated. Brine production was used by salt and soda industry. Mentioned wells have been drilled in most beneficial parts of the deposit. Over time available reserves run out so the next wells were drilled. In eighties of XX centaury in the mogilno mine the caverns diameters were increased to 55 m. However very complicated geological conditions of Mogilno I deposit caused very low salt production usage rate. To achieve significant increase of salt usage rate the project authors basing on most recent knowledge undertaken geomechalnical modelling of stress and dislocations sate in the exploited salt dome. The results of performed calculations clearly show possibility of caver diameter increase to 60 m and increment of deposit usage rate of 20%.

***Keywords**: salt rock, salt exploitation, geomechanics of domal salt, deposit usage rate*

Referat będzie opublikowany w formie artykułu w Przeglądzie Solnym 2026

Full text will be published in Salt Review 2026

KARTOWANIE POLA TEMPERATURY POWIERZCHNIOWEJ NAD WYSADEM SOLNYM LUBIEŃ I JEGO INTERPRETACJA GEOLOGICZNA

MAPPING THE SURFACE TEMPERATURE FIELD OVER THE LUBIEŃ SALT DOME AND GEOLOGICAL INTERPETATION

Patryk Damian BLADUSIAK[1,2], Jakub CURYŁO[2]

[1] AGH University of Krakow, Al. Adama Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland
e-mail: patbladusiak@agh.edu.pl

[2] Polish Geological Institute – National Research Institute, Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa, Poland
e-mail: pblad@pgi.gov.pl

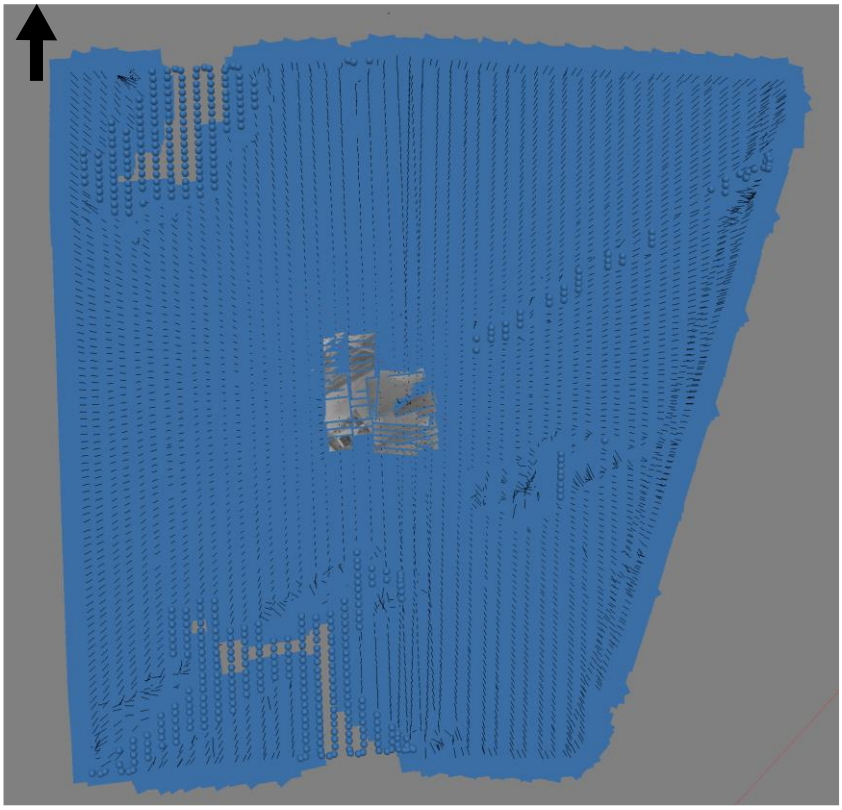
Struktury solne należą do najliczniej reprezentowanych struktur basenów sedymentacyjnych (Belenitskaya, 2018; Peryt & Kiersnowski., 2026). W wyniku procesów halokinezy rozwijają się m.in. poduszki, wały, grzbiety solne oraz diapiry solne (Poborska-Młynarska, 2022). Obecność soli wpływa na warunki hydrogeologiczne oraz rozkład temperatury w górotworze, co może modyfikować lokalny transport ciepła (Teixeira et al., 2014). Szczególne znaczenie ma wysoka przewodność cieplna halitu, wyraźnie większa niż wielu skał otaczających, a także miąższość, geometria i głębokość występowania utworów solnych (Ondrak et al., 1998; Scheck-Wenderoth et al., 2014; Degen et al., 2022; Grunnaleite i Mosbron, 2019; Vizgirda et al., 1985; Mello et al., 1995; Raymond et al., 2022).

Struktury solne mają również istotne znaczenie gospodarcze. Są przedmiotem eksploatacji soli kamiennej, potasowej i potasowo-magnezowej oraz solanek, a budowa geologiczna i właściwości geomechaniczne umożliwiają wykorzystanie ich do budowy podziemnych magazynów, m.in. do przechowywania węglowodorów i wodoru (Czapowski et al., 2025; Czapowski i Tarkowski, 2018; Górski i Rasała, 2009; Kukiałka, 2015). Jednocześnie właściwości termiczne i hydrogeologiczne wysadów solnych stanowią podstawę do badań nad funkcjonowaniem systemów geologicznych oraz możliwością wykorzystania lokalnych anomalii termicznych jako m. in. prawdopodobnego wskaźnika budowy stref uskokowych. Występowanie anomalii termicznych może być wykorzystane do zwiększenia potencjału energetycznego.

Celem badań było opracowanie i weryfikacja metody wykorzystującej termowizję z pokładu bezzałogowych statków powietrznych (BSP) do identyfikacji i analizy przestrzennego zróżnicowania temperatury powierzchniowej w rejonie wysadu solnego Lubień, w centralnej Polsce. Wybór obszaru badań wynikał m.in. z wcześniejszych obserwacji wskazujących na występowanie lokalnych anomalii temperatury wód podziemnych, których wartości osiągają około 2°C (Bladusiak et al., 2026).

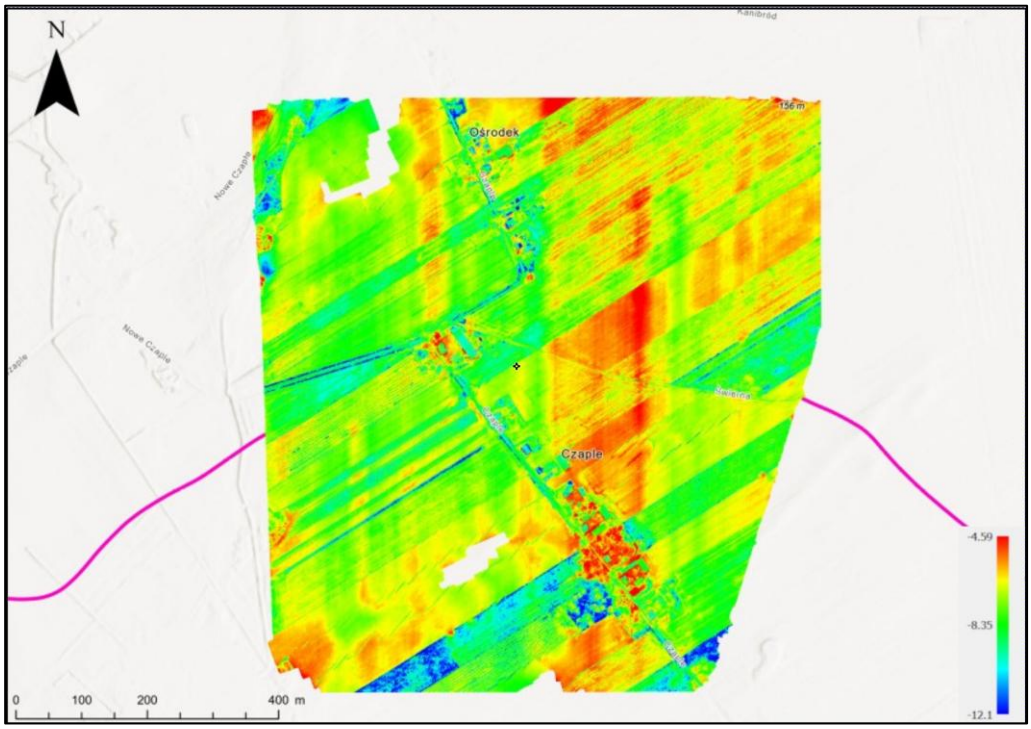
W ramach prac terenowych wykonano naloty z wykorzystaniem BSP DJI Matrice 300 RTK wyposażonego w kamerę termowizyjną DJI Zenmuse XT2. Łącznie pozyskano ponad 7000 zdjęć termowizyjnych, które wykorzystano do opracowania georeferencjonowanych danych termalnych oraz przestrzennego rozkładu temperatury powierzchniowej (**Fig. 1**). Analiza obejmuje identyfikację i charakterystykę przestrzenną anomalii termicznych oraz ocenę ich związku z budową geologiczną wysadu, przebiegiem stref uskokowych, rzeźbą terenu i właściwościami przypowierzchniowych osadów.

Równolegle opracowano trójwymiarowy model budowy geologicznej badanego obszaru oraz mapy parametryczne umożliwiające integrację danych geologicznych, geomorfologicznych i termicznych. Połączenie wysokorozdzielczych danych termowizyjnych pozyskanych z BSP z przestrzennym modelem geologicznym pozwala na analizę zależności pomiędzy obserwowanymi anomaliami temperatury powierzchniowej a geometrią wysadu oraz przebiegiem stref uskokowych. Szczególne znaczenie ma możliwość oceny czy anomalie termiczne rejestrowane na powierzchni mogą stanowić pośredni przejaw procesów termicznych zachodzących w głębszych partiach ośrodka geologicznego.



Ryc. 1. Pokrycie terenu zdjęciami z kamery termowizyjnej (niebieski prostokąt - zdjęcie skalibrowane, niebieska kropka - zdjęcie nieskalibrowane)

Fig. 1. *Terrain coverage with thermal camera images (blue rectangle: calibrated image; blue dot: uncalibrated image)*



Ryc. 2. Mapa różnic temperatur nad fragmentem wysadu solnego Lubień

Fig. 2. *Map of temperature differences over the salt dome Lubień*

Uzyskane wyniki stanowią podstawę do oceny przydatności termowizji UAV jako narzędzia wspomagającego rozpoznanie przestrzennego występowania anomalii termicznych związanych z wysadami solnymi (**Fig. 2**). Zastosowanie danych termicznych w połączeniu z informacjami geologicznymi umożliwia szczegółową analizę ich przestrzennego zróżnicowania oraz identyfikację czynników geologicznych mogących wpływać na ich występowanie. Jednocześnie uwzględnienie warunków meteorologicznych, właściwości badanej powierzchni oraz parametrów akwizycji danych jest niezbędne do prawidłowej interpretacji rejestrowanych anomalii termicznych.

Słowa kluczowe: geotermia niskotemperaturowa, wysady solne, termowizja, anomalie temperaturowe, badania za pomoc BSP

Salt structures are among the most common features found in sedimentary basins (Belenitskaya, 2018; Peryt & Kiersnowski, 2026). Halokinesis processes give rise to features such as salt pillows, salt ridges, salt swells, and salt diapirs (Poborska-Młynarska, 2022). The presence of salt influences hydrogeological conditions and the temperature distribution within the rock mass, potentially modifying local heat transport (Teixeira et al., 2014). Of particular importance are the high thermal conductivity of halite—significantly higher than that of many surrounding rocks—as well as the thickness, geometry, and depth of the salt deposits (Ondrak et al., 1998; Scheck-Wenderoth et al., 2014; Degen et al., 2022; Grunnaleite & Mosbron, 2019; Vizgirda et al., 1985; Mello et al., 1995; Raymond et al., 2022).

Salt structures are also of significant economic importance. They are sites for the extraction of rock salt, potash, and potassium-magnesium salts, as well as brines; furthermore, their geological structure and geomechanical properties enable their use for the construction of underground storage facilities, including those for hydrocarbons and hydrogen (Czapowski et al., 2025; Czapowski and Tarkowski, 2018; Górski and Rasała, 2009; Kukiałka, 2015). At the same time, the thermal and hydrogeological properties of salt diapirs provide a basis for studying the functioning of geological systems and exploring the potential use of local thermal anomalies—for instance, as a likely indicator of fault zone structure. The presence of thermal anomalies can be leveraged to enhance energy potential.

The aim of the study was to develop and verify a method using thermal imaging from unmanned aerial vehicles (UAVs) to identify and analyze the spatial variation of surface temperature in the area of the Lubień salt diapir in central Poland. The study area was selected based on, among other factors, previous observations indicating the presence of local groundwater temperature anomalies with magnitudes of approximately 2°C (Bladusiak et al., 2026).

*Fieldwork involved aerial surveys using a DJI Matrice 300 RTK UAV equipped with a DJI Zenmuse XT2 thermal imaging camera. A total of over 7,000 thermal images were acquired and used to generate georeferenced thermal data and map the spatial distribution of surface temperatures (**Fig. 1**). The analysis encompasses the identification and spatial characterization of thermal anomalies, as well as an assessment of their relationship to the geological structure of the salt diapir, the course of fault zones, the terrain morphology, and the properties of near-surface deposits.*

Concurrently, a three-dimensional model of the study area's geological structure and parametric maps were developed to enable the integration of geological, geomorphological, and thermal data. Combining high-resolution thermal imaging data acquired via UAVs with the spatial geological model allows for the analysis of relationships between observed surface temperature anomalies, the geometry of the diapir, and the course of fault zones. Of particular importance is the ability to assess whether thermal anomalies recorded at the surface may serve as an indirect manifestation of thermal processes occurring in the deeper parts of the geological medium.

*The obtained results provide a basis for evaluating the utility of UAV-based thermal imaging as a tool to support the identification of the spatial distribution of thermal anomalies associated with salt diapirs (**Fig. 2**). Combining thermal data with geological information enables a detailed analysis of their spatial variability and the identification of geological factors that may influence their occurrence. At the same time, accounting for meteorological conditions, the properties of the surveyed surface, and data acquisition parameters is essential for the correct interpretation of the recorded thermal anomalies.*

Keywords: *low-temperature geothermal energy, salt domes, thermal imaging, temperature anomalies, UAV-based surveys*

LITERATURA / ***REFERENCES*****:**

- BELENITSKAYA, G., 2018. Salt systems of the Earth: distribution, tectonic and kinematic history, salt-naphthids interrelations, discharge foci, recycling. John Wiley & Sons, Hoboken.
- BLADUSIAK, P., OPERACZ, T., PAWELEC, K., 2026. Groundwater temperature anomalies in the vicinity of salt domes in central Poland as a potential for low-temperature geothermal energy. Geological Quarterly, 70, 12.
- CZAPOWSKI, G., BUKOWSKI, K., RAZOWSKA-JAWOREK, L., TOMASZEWSKA, B., TYSZER, M., BURLIGA, S., 2025. Assessment of the possibility of obtaining selected critical elements (boron, magnesium, strontium) in Poland. Przegląd Geologiczny, 73(3).
- CZAPOWSKI, G., TARKOWSKI, R., 2018. Uwarunkowania geologiczne wybranych wysadów solnych w Polsce i ich przydatność do budowy kawern do magazynowania wodoru. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 1–15.
- DEGEN, D., VEROY, K., WELLMANN, F., 2022. Uncertainty quantification for basin-scale geothermal conduction models. Scientific Reports.
- GÓRSKI, J., RASAŁA, M., 2009. Warunki hydrogeologiczne w rejonie wysadów solnych i ich znaczenie dla bezpieczeństwa gospodarczego wykorzystania struktur solnych. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 121–128.
- GRUNNALEITE, I., MOSBRON, A., 2019. On the significance of salt modelling—Example from modelling of salt tectonics, temperature and maturity around salt structures in southern North Sea. Geosciences, 9, 363.
- KUKIAŁKA, P., 2015. Kawerny solne w prowincji Alberta, Zachodnia Kanada. Przegląd Solny, 11.
- MELLO, U.T., KARNER, G.D., ANDERSON, R.N., 1995. Role of salt in restraining the maturation of subsalt source rocks. Marine and Petroleum Geology, 12, 697–716.
- ONDRAK, R., WENDEROTH, F., SCHECK, M., BAYER, U., 1998. Integrated geothermal modeling on different scales in the Northeast German Basin. Geologische Rundschau, 87, 32–42.
- PERYT, T.M., KIERSNOWSKI, H., 2026. Perm. W: Budowa geologiczna Polski. Tom 1. Stratygrafia (red. T.M. Peryt): 337–402. Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa.
- POBORSKA-MŁYNARSKA, K., 2022. Geologiczno-górnicze warunki eksploatacji w kopalniach podziemnych w wysadach solnych Polski środkowej. Wydawnictwa Naukowe AGH, Kraków.
- RAYMOND, J., LANGEVIN, H., COMEAU, F.A., MALO, M., 2022. Temperature dependence of rock salt thermal conductivity: Implications for geothermal exploration. Renewable Energy, 184, 26–35.
- SCHECK-WENDEROTH, M., CACACE, M., MAYSTRENKO, Y.P., CHERUBINI, Y., NOACK, V., KAISER, B.O., BJÖRN, L., 2014. Models of heat transport in the Central European Basin System: Effective mechanisms at different scales. Marine and Petroleum Geology, 55, 315–331.
- TEIXEIRA, M.G., LIU, I.S., RINCON, M.A., CIPOLATTI, R.A., PALERMO, L.A., 2014. The influence of temperature on the formation of salt domes. International Journal of Modeling and Simulation for Petroleum Industry, 8, 35–41.
- VIZGIRDA, J., O'BRIEN, J.J., LERCHE, I., 1985. Thermal anomalies on the flanks of a salt dome. Geothermics, 14, 553–565.
- WOOD, M. et al., 2016. Drone with thermal infrared camera provides high resolution georeferenced imagery of the Waikite geothermal area, New Zealand. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 325, 61–69.

ZINTEGROWANE ZASTOSOWANIE MONITORINGU KONWERGENCJI I MODELOWANIA NUMERYCZNEGO W OCENIE STATECZNOŚCI KOPALNI SOLI KŁODAWA

INTEGRATION OF CONVERGENCE MONITORING AND NUMERICAL MODELLING FOR STABILITY ASSESSMENT OF THE KŁODAWA SALT MINE

Wacław ANDRUSIKIEWICZ[1], Michał KOWALSKI[1], Katarzyna CYRAN[1], Damian KURDEK[2]

[1] AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
e-mail: andrus@agh.edu.pl, kowalski@agh.edu.pl, kcyran@agh.edu.pl

[2] Kopalnia Soli Kłodawa**,** Aleja 1000-lecia 2, 62-650 Kłodawa,
e-mail: dkurdek@sol-klodawa.com.pl

Monitoring konwergencji odgrywa fundamentalną rolę w ocenie procesów deformacyjnych oraz identyfikacji wczesnych etapów rozwoju odkształceń w wyrobiskach podziemnych. Uzyskiwane wyniki pomiarów stanowią również istotne dane wykorzystywane do kalibracji modeli numerycznych służących do oceny długoterminowej stateczności kopalń. Modele numeryczne umożliwiają symulowanie reakcji górotworu o złożonej budowie geologicznej na działalność górniczą. Do najważniejszych danych wejściowych wykorzystywanych w analizach należą informacje geologiczne, warunki brzegowe, właściwości mechaniczne górotworu, wyniki pomiarów naprężeń w znanych lokalizacjach oraz dane pochodzące z monitoringu deformacji wyrobisk górniczych. Iteracyjny proces kalibracji pozwala na uzyskanie wiarygodnego przybliżenia rzeczywistego stanu naprężeń in situ, uwzględniającego złożone oddziaływania pomiędzy strukturami geologicznymi.

Kompleksowy model numeryczny 4D Kopalni Soli Kłodawa opracowano w 2015 roku w celu odwzorowania zmian wywołanych działalnością górniczą oraz prognozowania warunków stateczności do 2052 roku, odpowiadającego planowanemu terminowi zakończenia eksploatacji soli kamiennej. Do odwzorowania mechanicznego zachowania górotworu oraz oceny warunków stateczności kopalni zastosowano trójwymiarowy program oparty na metodzie różnic skończonych FLAC3D firmy Itasca Consulting Group. Model numeryczny składa się z około 67 milionów elementów tetraedrycznych i obejmuje blisko 1400 komór oraz około 400 km wyrobisk korytarzowych. Odwzorowuje on złożoną budowę geologiczną wysadu solnego Kłodawa, obejmującą warstwy białej i różowej soli kamiennej, karnalitu, anhydrytu oraz skał płonnych, a także skały otaczające i nadległe.

Model jest aktualizowany w pięcioletnich odstępach w celu uwzględnienia postępu robót górniczych oraz ponownie kalibrowany na podstawie najnowszych wyników pomiarów konwergencji. Systematyczna aktualizacja zwiększa wiarygodność oceny stateczności istniejących wyrobisk oraz dokładność prognoz długoterminowych. Zastosowane podejście umożliwia ponadto prognozowanie osiadania powierzchni terenu nad wyrobiskami kopalni.

Parametry reologiczne soli kamiennej skalibrowano na podstawie wyników pomiarów konwergencji prowadzonych w wybranych wyrobiskach górniczych. Proces kalibracji pozwolił na takie dostosowanie parametrów modelu numerycznego, aby odwzorowywał on rzeczywiste deformacje rozwijające się przez kilkadziesiąt lat w wyeksploatowanych częściach kopalni. Skalibrowany model jest wykorzystywany zarówno do wspomagania planowania robót górniczych, jak i prognozowania długoterminowej odpowiedzi górotworu. Umożliwia on w szczególności analizę warunków naprężeniowo-odkształceniowych w komorach i filarach międzykomorowych, zarówno dla aktualnego układu wyrobisk, jak i dla alternatywnych scenariuszy przyszłej eksploatacji.

Projekt badawczy finansowany ze środków programu „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia badawcza” w AGH.

Słowa kluczowe: konwergencja, modelowanie numeryczne, stateczność wyrobisk, kalibracja modelu numerycznego

Convergence monitoring plays a fundamental role in assessing deformation processes and identifying the early development of strain within underground workings. The collected measurements also provide essential data for the calibration the numerical models used to evaluate the long-term stability of mines. Numerical models are used to simulate how rock mass characterised by complex geological structure reacts to engineering activities. Key inputs for analysis include geological data, boundary conditions, mechanical properties of the rock mass, stress measurement data at known locations, and deformation monitoring data from my working. This iterative process ensures a reasonable approximation of the in-situ field stress, reflecting the complex interactions between geological structures.

A comprehensive 4D numerical model of the Kłodawa Salt Mine was developed in 2015 to simulate the evolution of mining-induced changes and predict stability conditions up to 2052, the anticipated completion date of rock salt extraction. 3D finite difference program (FLAC3D, Itasca Consulting Group) was used to project the mechanical behaviour of rock mass and evaluate stability conditions of the mine. The numerical model comprises approximately 33 million tetrahedral elements and represents nearly 1,000 mining chambers and around 400 km of galleries. It reproduces the complex geological structure of the Kłodawa salt dome, including layers of white and pink rock salt, carnallite, anhydrite and barren rocks, as well as the surrounding and overlying rocks.

The model is revised at five-year intervals to incorporate the ongoing development of mining operations and is recalibrated using the most recent convergence data. This systematic updating procedure improves the reliability of stability assessments for existing mine workings and enhances the accuracy of long-term predictions. In addition, this approach makes it possible to predict surface subsidence above the mine workings.

The rheological parameters assigned to rock salt were calibrated against convergence measurements obtained from selected my workings. This calibration allowed the numerical parameters to be adjusted so that the model reproduced the actual deformations that had accumulated within the excavated parts of the mine over several decades. The resulting calibrated model is used both to support the planning of mining activities and to forecast the long-term response of the rock mass. In particular, it enables the analysis of stress–strain conditions within mining chambers and inter-chamber pillars under both the current excavation layout and alternative future mining scenarios.

Research project supported by program "Excellence initiative – research university" for the AGH University of Krakow.

***Keywords**: Convergence, numerical modelling, stability of mine workings, numerical model calibration*

NIEINWAZYJNA DETEKCJA ORAZ OTWOROWE METODY PRZESTRZENNEGO OBRAZOWANIA PUSTEK PODZIEMNYCH

NON-DESTRUCTIVE DETECTION AND BOREHOLE METHODS FOR SPATIAL IMAGING OF UNDERGROUND VOIDS

Jakub PIETRAS[1,2], Tomasz KUBACKA[1]

[1]Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych „CHEMKOP" Sp. z o. o.,
31-261 Kraków, ul. Wybickiego 7
e-mail: jakub.pietras@chemkop.pl, tomasz.kubacka@chemkop.pl,

[2]AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska,
Al. Adama Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Pustki występujące w górotworze stanowią istotny element analizy geotechnicznej, hydrogeologicznej oraz górniczej, a ich genezę można zasadniczo rozpatrywać w ramach dwóch głównych kategorii. Pierwszą z nich są anomalie powstałe w wyniku naturalnych procesów geologicznych. Są to przede wszystkim zjawiska krasowe, prowadzące do powstawania jaskiń, kanałów i kawern w skałach rozpuszczalnych, takich jak wapienie, gipsy czy hality, a także pustki pseudokrasowe, tektoniczne, w tym szczeliny i rozwarstwienia w strefach dyslokacji, oraz pęcherze i tunele lawowe w skałach pochodzenia wulkanicznego. Drugą grupę stanowią antropogeniczne formy podziemne, będące bezpośrednim efektem działalności górniczej, zarówno historycznej, jak i współczesnej, do których należą pustki poeksploatacyjne takie jak wyrobiska komorowe i chodnikowe. Do tej kategorii zaliczają się również pustki wynikające z ogólnej działalności inżynieryjnej człowieka, w tym dawne podziemia miejskie, tunele komunikacyjne, obiekty militarne czy kawerny będące wynikiem eksploatacji złóż soli lub tworzone celowo na potrzeby podziemnego magazynowania surowców.

Niezależnie od genezy i mechanizmu powstania tych struktur, precyzyjna wiedza o ich istnieniu, a także szczegółowe dane ilościowe dotyczące ich dokładnej lokalizacji przestrzennej, geometrii, kształtu oraz objętości, mają fundamentalne znaczenie dla bezpieczeństwa i efektywności prowadzonych prac inżynieryjnych. W sektorze wydobywczym informacje te są kluczowe dla bieżącego projektowania i bezpiecznego prowadzenia robót górniczych, minimalizowania ryzyka niekontrolowanego wdarcia się wody lub gazów do wyrobisk, a także ochrony powierzchni przed deformacjami ciągłymi i nieciągłymi. Ponadto detekcja i parametryzacja pustek podziemnych są nieodzowne w geotechnice i budownictwem infrastrukturalnym, między innymi przy ocenie stateczności podłoża gruntowo-skalnego pod obiektami kubaturowymi i liniowymi, rewitalizacji terenów pogórniczych, a także w hydrogeologii do modelowania migracji wód podziemnych.

Proces badawczy ukierunkowany na ujawnienie i opisanie tego typu obiektów opiera się na wieloetapowym podejściu metodologicznym, gdzie w pierwszej kolejności kluczowa jest lokalizacja anomalii, następnie jej weryfikacja wizualna lub dokładne sparametryzowanie przestrzenne. W związku z tym współczesna geodezja inżynieryjna, geofizyka oraz geotechnika rozwijają i implementują komplementarne techniki pomiarowe.

Jednym z podstawowych narzędzi wykorzystywanym na etapie wstępnej detekcji ukrytych struktur jest georadar, który w zależności od uwarunkowań przestrzennych oraz głębokości zalegania pustki może być stosowany w wariancie ekranowym z powierzchni terenu lub wyrobiska, bądź w wersji otworowej, co pozwala na identyfikowanie granic anomalii w masie skalnej.

Równie istotnym instrumentem weryfikacyjnym wykorzystywanym bezpośrednio w otworach wiertniczych jest kamera otworowa. Technika ta znajduje kluczowe zastosowanie w trakcie prac wiertniczych, m.in. w sytuacji, kiedy dochodzi do nagłego grawitacyjnego opadu przewodu wiertniczego, potocznie określanego jako przepadnięcie wiertła, co stanowi bezpośredni sygnał natrafienia na pustą

przestrzeń. Inspekcja telewizyjna pozwala na natychmiastowe, wizualne potwierdzenie obecności poszukiwanej pustki oraz wstępną ocenę jej charakteru. Ponadto pomiary kamerą otworową są powszechnie wykorzystywane do szczegółowej oceny stanu technicznego uzbrojenia otworów, w tym do badania stopnia zużycia, perforacji, spękań oraz ogólnej integralności rur okładzinowych, co warunkuje bezpieczeństwo dalszych prac pomiarowych.

Po zlokalizowaniu i zweryfikowaniu pustki przez otwór małośrednicowy, kluczowym zadaniem staje się jej dokładny pomiar ilościowy. Dobór optymalnej technologii pomiarowej w tym ostatnim etapie jest uwarunkowany przede wszystkim fazowym wypełnieniem badanej przestrzeni. W przypadku w pełni lub częściowo wypełnionych powietrzem pustek niedostępnych dla typowych rozwiązań pomiarowych, doskonałe rezultaty modelowania trójwymiarowego zapewnia laserowy skaning otworowy realizowany za pomocą wyspecjalizowanych systemów takich jak np. C-ALS, które umożliwiają precyzyjne odtworzenie geometrii komory. W sytuacjach, gdy struktura podziemna jest całkowicie wypełniona cieczą taką jak np. woda, solanka lub płuczka wiertnicza, niezastąpioną metodą parametryzacji staje się pomiar za pomocą sond echometrycznych, które wykorzystując zjawiska akustyczne, pozwalają na dokładne określenie objętości i zasięgu powstałych struktur podziemnych. Niniejsza publikacja jest w całości poświęcona analizie możliwości wykorzystania tych technologii, koncentrując się na procesie wykrywania pustek metodą georadarową, ich wizualnej identyfikacji i ocenie otworów kamerą inspekcyjną, a także na późniejszym przestrzennym mapowaniu przy użyciu skanerów laserowych C-ALS i sond echometrycznych w specyficznych warunkach środowiska podziemnego.

Słowa kluczowe: Pustki podziemne, Laserowy skaning otworowy, Pomiary echometryczne, Georadar (GPR), Inspekcja kamerą otworową, Geotechnika górnicza

Voids within rock masses constitute a critical element of geotechnical, hydrogeological, and mining analyses, and their genesis can be fundamentally categorized into two primary groups. The first comprises anomalies resulting from natural geological processes. These primarily include karst phenomena, which lead to the formation of caves, conduits, and caverns in soluble rocks such as limestone, gypsum, or halite, as well as pseudokarst and tectonic voids, including fractures and bed separation within dislocation zones, and lava tubes and vesicles in rocks of volcanic origin. The second group consists of anthropogenic underground forms, which are a direct consequence of both historical and contemporary mining operations; these include post-mining voids such as room-and-pillar workings and drifts. This category also encompasses voids resulting from general civil engineering activities, including ancient urban underground structures, transport tunnels, military facilities, and caverns produced by salt mining or intentionally created for the underground storage of resources.

Regardless of the genesis and mechanism of formation of these structures, precise knowledge of their existence, along with detailed quantitative data regarding their exact spatial location, geometry, shape, and volume, is of fundamental importance for the safety and efficiency of engineering works. In the extractive sector, this information is crucial for the ongoing design and safe execution of mining operations, minimizing the risk of uncontrolled water or gas inrush into the workings, and protecting the ground surface against continuous and discontinuous deformations. Furthermore, the detection and parameterization of underground voids are indispensable in geotechnical and infrastructure engineering, specifically for assessing the stability of the soil-rock foundation beneath cubature and linear structures, rehabilitating post-mining areas, and modeling groundwater migration in hydrogeology.

The research process aimed at uncovering and characterizing such objects relies on a multi-stage methodological approach, where the primary objective is locating the anomaly, followed by its visual verification or precise spatial parameterization. Consequently, modern engineering geodesy, geophysics, and geotechnics continuously develop and implement complementary measurement techniques.

Ground-penetrating radar (GPR) serves as one of the fundamental tools utilized during the preliminary detection stage of hidden structures. Depending on the spatial constraints and the burial depth of the void, GPR can be deployed in a shielded antenna configuration from the ground surface or within an

underground excavation, or alternatively, in a borehole variant, thereby enabling the identification of anomaly boundaries within the rock mass.

An equally critical verification instrument deployed directly inside boreholes is the borehole camera. This technique finds key applications during drilling operations, for instance, when an abrupt gravitational drop of the drill string occurs, colloquially referred to as "drill bit dropping," which serves as an immediate indicator of encountering an open void. Downhole television inspection allows for an immediate visual confirmation of the targeted void and a preliminary assessment of its characteristics. Furthermore, borehole camera measurements are widely used for the detailed technical assessment of borehole completion, including the inspection of wear, perforations, fractures, and the overall structural integrity of the casing pipes, which conditions the safety of subsequent measurement operations.

Once the void has been located and verified through a small-diameter borehole, its accurate quantitative measurement becomes the primary objective. Selecting the optimal measurement technology in this final stage depends strictly on the phase filling of the investigated space. In the case of fully or partially air-filled voids that are inaccessible to conventional survey methods, three-dimensional modeling is successfully achieved via borehole laser scanning executed by specialized systems such as C-ALS, which enable the precise reconstruction of the cavern geometry. Conversely, when the underground structure is completely filled with fluid, such as water, brine, or drilling mud, echometric probing becomes an indispensable parameterization method; by exploiting acoustic phenomena, it allows for the precise determination of the volume and boundaries of the underground structures. This publication is entirely dedicated to analyzing the potential applications of these technologies, focusing on the process of void detection using the GPR method, their visual identification and borehole assessment via inspection cameras, and their subsequent spatial mapping using C-ALS laser scanners and echometric probes under the specific conditions of the underground environment.

***Keywords**: Underground voids, Borehole laser scanning, Echometric measurement, Ground-penetrating radar (GPR), Borehole camera inspection, Mining geotechnics*

Referat będzie opublikowany w formie artykułu w Przeglądzie Solnym 2026

Full text will be published in Salt Review 2026

LIKWIDACJA KOMÓR O PREDYSPOZYCJACH ZAPADLISKOWYCH W KOPALNI SOLI „WIELICZKA” OCHRONA POWIERZCHNI NA PODSTAWIE PRAC W KOMORACH RABA I HOENIG NA POZIOMIE I

ELIMINATION OF CHAMBERS PRONE TO COLLAPSE AT THE “WIELICZKA” SALT MINE SURFACE PROTECTION BASED ON WORKS IN THE RABA AND HOENIG CHAMBERS ON LEVEL I

Paweł MUSIAŁ[1]

[1] Kopalnia Soli „Wieliczka” S.A., e-mail: pawel.musial@kopalnia.pl

Kopalnia Soli „Wieliczka”, wpisana w 1978 roku na Pierwszą Listę Światowego Dziedzictwa Kulturalnego i Przyrodniczego UNESCO, jest jednym z najcenniejszych zabytków kultury materialnej i geoinżynierii na świecie. Siedem wieków intensywnej eksploatacji górniczej pozostawiło unikalny, lecz zarazem niezwykle skomplikowany przestrzennie podziemny labirynt wyrobisk. Obejmuje on prawie 300 km chodników oraz niemal 2200 komór, zlokalizowanych na 9 poziomach, sięgających od głębokości 64 m do 327 m pod powierzchnią terenu. Poważnym wyzwaniem dla ciągłości istnienia tego obiektu oraz bezpiecznego funkcjonowania leżącego nad nim miasta jest zachowanie stateczności górotworu i ochrona powierzchni przed osiadaniami i niekontrolowanymi zapadliskami.

Praktyka zwalczania i zapobiegania zagrożeniom geomechanicznym w Kopalni Soli „Wieliczka” przechodziła ewolucję ściśle powiązaną z rozwojem techniki górniczej, geoinżynierii oraz stanem wiedzy o mechanice skał solnych. Pierwsze udokumentowane działania zabezpieczające sięgają XVII i XVIII wieku, kiedy to podstawowym sposobem wzmacniania osłabionych komór było wznoszenie drewnianych kasztów wypełnianych skałą płonną (rumoszem skalnym) oraz pozostawianie pasów i filarów solnych. Obudowy drewniane, choć elastyczne i odporne na korozyjne działanie soli, posiadały ograniczoną nośność i z czasem ulegały deformacjom pod wpływem nacisku górotworu.

Przełom w podejściu do ochrony powierzchni nastąpił na początku XX wieku wraz z wprowadzeniem podsadzki suchej, a następnie podsadzki hydraulicznej “piaskowej”. Wypełnianie przestrzeni poeksploatacyjnych piaskiem transportowanym strumieniem solanki pełnonasyconej pozwalało na eliminację znacznych objętości wolnych przestrzeni, eliminując ryzyko dużych zawałów.

W ostatnich dekadach klasyczną podsadzkę piaskową wspomaga również zaawansowana technologia iniekcyjna, uszczelniająca i wzmacniająca górotwór. Do wypełniania pustek i stref spękań zaczęto stosować mieszaniny produkowane na bazie żużli, cementów oraz pełnonasyconej solanki. Mieszaniny te charakteryzują się wysokim parametrem wytrzymałości oraz idealne dopasowują się do geometrii nieregularnych komór wypełniając je w całości bez zera podsadzkowego.

Poziom I (Bono) zlokalizowany jest na głębokości od 60 do 80 metrów poniżej powierzchni terenu i należy do najstarszych części kopalni. Większość komór na tym poziomie została wyeksploatowana w XVIII i XIX wieku bez zachowania bezpiecznych filarów ochronnych. Ze względu na położenie w strefie brzegowej i stropowej złoża, wyrobiska Poziomu I odznaczają się specyficznym układem warunków geologiczno-górniczych. Dodatkowo w wyrobiskach pozostawiono niedostateczną miąższość „skorupy” solnej gwarantującej stateczność komory, wybranej w bryle solnej. Wskutek wiekowego oddziaływania naprężeń reologicznych w stropach komór utworzyły się strefy spękań i odwarstwień soli które w niektórych komorach mają tendencję do „kominowania” w kierunku powierzchni. Komory te przeważnie osiągają objętości do kilku tysięcy metrów sześciennych przy wysokościach przekraczających niejednokrotnie 10m.

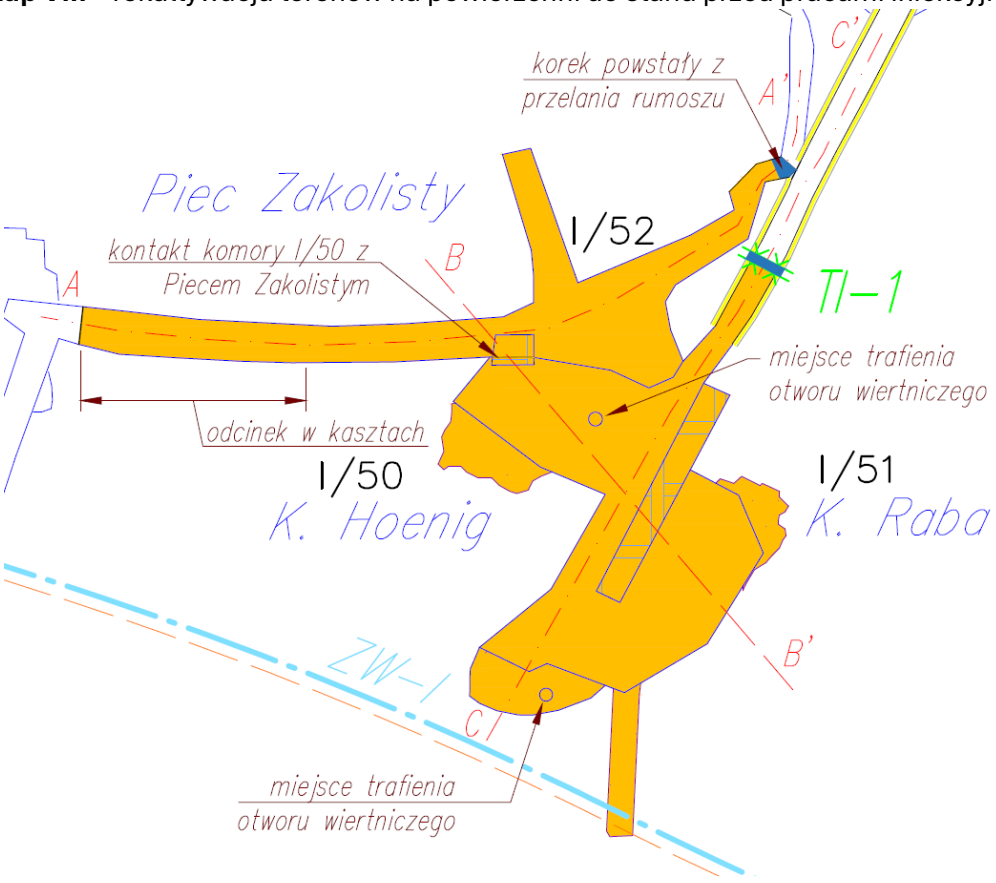
Powyższe czynniki sprawiają, że komory na Poziomie I posiadają utajoną lub aktywną tendencję do powstawania zawałów komorowych w dłuższej perspektywie czasu. Bez podjęcia zdecydowanych prac

profilaktycznych i likwidacyjnych, niekontrolowany zawał pojedynczej komory może doprowadzić do efektu domina – zniszczenia sąsiednich filarów i wytworzenia leja zapadliskowego na powierzchni, co stanowiłoby bezpośrednie zagrożenie dla zabudowy miejskiej Wieliczki, oraz samych wyrobisk górniczych poprzez niekontrolowane dopływy wody słodkiej. Dlatego ważnym czynnikiem bezpieczeństwa jest ciągła kontrola zagrożeń wyrobisk górniczych. Komory o tendencjach zapadliskowych objęte są monitoringiem mierniczym i harmonogramem kontroli.

W ramach realizowanego przez Kopalnię Soli „Wieliczka" S.A. kompleksowego programu zabezpieczania i likwidacji wyrobisk o tendencjach zapadliskowych, jako priorytetowe na 2026 rok wskazane zostały komory Raba, oraz Hoenig na poziomie I. Wyrobiska te ze względu na swój stan techniczny, stopień deformacji oraz położenie geologiczne i geograficzne stwarzały największe potencjalne zagrożenie zapadliskowe.

Prace likwidacyjne poza samą przebudową chodników dojściowych do rejonu robót podzielone zostały na kilka etapów (**Ryc.1**):

- **etap I –** odwiercenie otworów iniekcyjnych z powierzchni do komór Raba - Hoenig i uzbrojeniem ich w rurociągi podające mieszaninę iniekcyjną,
- **etap II** – budowa tymczasowego węzła iniekcyjnego do podawania zaczynów do wyrobisk kopalni na powierzchni bezpośrednio nad komorami,
- **etap III** – budowa tam iniekcyjnych izolujących likwidowane wyrobiska od reszty kopalni, prace wiertnicze do komory podpoziomowej I /52, zabudowa rurociągów iniekcyjnych,
- **etap IV** – szczelna likwidacja fragmentu chodnika o nazwie Piec Zakolisty wraz z komorą I /52 i innymi pustkami podpoziomowymi w stosunku do spągu poprzeczni Powroźnik i spągowych partii komory Hoenig,
- **etap V** – szczelna likwidacja komory Hoenig,
- **etap VI** – szczelna likwidacja komory Raba,
- **etap VII** – likwidacja otworów z powierzchni do komór Raba i Hoenig,
- **etap VIII** – rekultywacja terenów na powierzchni do stanu przed pracami iniekcyjnymi.



Ryc. 1. Zakres likwidacji zespołu komór Raba-Hoeinig (wg Wałach D., 2021)

Fig. 1. *Scope of Backfilling of the Raba–Hoenig Chamber Complex (acc. Wałach D., 2021)*

Na podstawie dostępnych danych, szacowana objętość wyrobisk do likwidacji wyniesie około 3 500m^3. Aktualnie wieliccy górnicy wykonują V i VI etap prac likwidacyjnych znajdują się na półmetku prac związanych z projektem Raba – Hoenig.

Wdrożenie powyższej metody iniekcji w wyrobiskach o tendencjach zapadliskowych jakim są komory Raba i Hoenig doprowadzi do redukcji szybkości deformacji w tym rejonie kopalni. Wskaźniki konwergencji ustabilizują się, dzięki pełnemu wypełnieniu przestrzeni jaką zajmowały komory przez związany monolit iniekcyjny. Ostatecznie ryzyko zawału komorowego dla tych wyrobisk zostanie całkowicie zlikwidowane.

Słowa kluczowe: zagrożenie zawałowe, ochrona powierzchni, likwidacja zbędnych pustek, podsadzka iniekcyjna.

Inscribed on the UNESCO World Cultural and Natural Heritage List in 1978, the "Wieliczka" Salt Mine is one of the world's most precious monuments of material culture and geoengineering. Seven centuries of intensive mining activities have left a unique, yet spatially complex, underground labyrinth of workings. It comprises nearly 300 km of galleries and almost 2,200 chambers located across 9 levels, ranging from depths of 64 m down to 327 m below ground level. Preserving the rock mass stability and protecting the surface against subsidence and uncontrolled sinkholes pose a critical challenge to the long-term integrity of this site and the safety of the town above.

The practice of combating and mitigating geomechanical hazards at the "Wieliczka" Salt Mine has evolved in close alignment with advancements in mining engineering, geoengineering, and rock mechanics of rock salt. The earliest documented stabilization measures date back to the 17th and 18th centuries, when the primary method of reinforcing weakened chambers involved erecting wooden cribs filled with waste rock (muck/debris) and leaving behind salt pillars and barrier walls. Although wooden supports were flexible and resistant to salt corrosion, they possessed limited load-bearing capacity and gradually deformed over time under rock mass pressure.

A major breakthrough in surface protection occurred in the early 20th century with the introduction of dry backfill, followed by hydraulic sand backfill. Filling post-mining voids with sand carried by a stream of fully saturated brine enabled the elimination of vast volumes of open space, mitigating the risk of major collapses.

In recent decades, traditional sand backfill has been supplemented by advanced grouting technology designed to seal and reinforce the rock mass. Mixtures based on slag, cement, and fully saturated brine have been introduced to fill voids and fracture zones. These grouting mixtures exhibit high strength parameters and conform perfectly to the geometry of irregular chambers, achieving complete filling without leaving backfill gaps (roof void/shrinkage gaps).

Level I (Bono) is located at a depth between 60 m and 80 m below ground level and is among the oldest sections of the mine. Most of its chambers were excavated during the 18th and 19th centuries without leaving adequate safety pillars. Due to their location in the peripheral and roof zones of the deposit, Level I workings are subject to unique geological and mining conditions. Furthermore, an insufficient thickness of the protective salt "crust" was left to guarantee the stability of chambers mined directly within the salt body. Under centuries of rheological stress, fracture and delamination zones formed in the chamber roofs, exhibiting a tendency toward upward chimneying (cavity progression) toward the surface in some chambers. These chambers typically reach volumes of up to several thousand cubic meters, with heights frequently exceeding 10 meters.

These factors confer an inherent latent or active propensity for long-term chamber roof collapses. Without decisive preventive and backfilling operations, the uncontrolled collapse of a single chamber could trigger a domino effect—destroying adjacent pillars and creating a sinkhole on the surface. This would pose a direct threat to the urban infrastructure of Wieliczka and to the mine workings themselves due to potential uncontrolled freshwater inflows. Continuous hazard monitoring of the mine workings is therefore an essential safety measure. Chambers prone to sinkhole formation are subjected to geodetic surveys and scheduled inspection regimes.

As part of the comprehensive stabilization and backfilling program for sinkhole-prone workings carried out by Kopalnia Soli „Wieliczka" S.A., the Raba and Hoenig chambers on Level I were designated as top-priority projects for 2026. Due to their technical condition, degree of deformation, and geological and spatial location, these workings posed the greatest potential sinkhole risk.

*Apart from the reconstruction of access drifts to the operational area, the backfilling operations were divided into several stages (**Fig. 1**):*

- ***Stage I:** Drilling injection boreholes from the surface into the Raba and Hoenig chambers and equipping them with grout pipelines.*
- ***Stage II**: Constructing a temporary surface grouting plant directly above the chambers to deliver slurry into the mine workings.*
- ***Stage III**: Constructing injection bulkheads to isolate the workings to be backfilled from the rest of the mine, drilling into sublevel chamber I /52, and installing injection pipelines.*
- ***Stage IV**: Tight sealing and backfilling of the section of the gallery named Piec Zakolisty along with chamber I /52 and other voids located below the floor level of the Powroźnik crosscut and floor areas of the Hoenig chamber.*
- ***Stage V**: Tight backfilling of the Hoenig chamber.*
- ***Stage VI**: Tight backfilling of the Raba chamber.*
- ***Stage VII**: Sealing and abandoning the boreholes drilled from the surface into the Raba and Hoenig chambers.*
- ***Stage VIII**: Land reclamation of the surface area back to its pre-grouting condition.*

Based on available data, the estimated volume of workings to be backfilled is approximately 3,500 m^3. Currently, the Wieliczka miners are executing Stages V and VI of the backfilling operations, marking the midpoint of the Raba–Hoenig project.

Implementing this grouting method in sinkhole-prone workings like the Raba and Hoenig chambers will reduce the rate of deformation in this sector of the mine. Convergence rates will stabilize as the volume previously occupied by the chambers is fully replaced by a solidified grout monolith. Ultimately, the risk of chamber collapse in these workings will be entirely eliminated.

***Keywords:** collapse hazard, surface protection, void backfilling, backfill grouting.*

LITERATURA / *REFERENCES*:

- Aktualizacja dokumentacji projektowej likwidacji zespołu komór Raba i Hoenig znajdujących się na poziomie I - Branża Górnicza, Fundacja Nauka i Tradycje Górnicze. Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica, Kraków 2021

MAPY W CZASIE
CZYLI ROZWÓJ KARTOGRAFII W KOPALNI SOLI „WIELICZKA”

MAPS OVER TIME
THE EVOLUTION OF CARTOGRAPHY IN THE “WIELICZKA” SALT MINE

Piotr KOCZWARA[1], Aleksandra KRÓL-SĘK[1]

[1] Kopalnia Soli „Wieliczka” S.A. Park Kingi 1, 32-020 Wieliczka,
e-mail piotr.koczwara@kopalnia.pl, e-mail aleksandra.krol@kopalnia.pl

Kopalnia podziemna należy do nielicznych obiektów budowlanych, których nie sposób objąć bezpośrednią obserwacją. Powstaje w trzech wymiarach, a jej geometria jest znana wyłącznie za pośrednictwem pomiaru. Mapa jest w tym przypadku podstawowym nośnikiem wiedzy o obiekcie, a każdy błąd kartograficzny prowadzi do błędnej oceny wzajemnego położenia wyrobisk, która może skończyć się katastrofą. Rozpoznanie geometrii wyrobisk wielickich rozpoczęło się od najprostszych narzędzi. Wynikiem takiego pomiaru był odręczny rysunek, w którym proporcje ustalano intuicyjnie, pozbawiony stałej skali. Dopiero konsekwentne połączenie pomiaru z podziałką liniową zamieniło szkic w dokument. Standaryzacja map górniczych była procesem długotrwałym: od planów wykonywanych odręcznie, przez stopniowe wprowadzanie skał i znaków umownych, aż po jednolitą dokumentację cyfrową, której formę określają dziś przepisy prawa. Celem prezentacji jest rekonstrukcja etapów rozwoju dokumentacji kartograficznej Kopalni Soli „Wieliczka”, wskazanie czynników sprawczych kolejnych przemian, podsumowanie dotychczasowych osiągnięć oraz ukazanie, że proces ten ma charakter cykliczny: współczesne techniki pomiaru trójwymiarowego przywracają mapie górniczej poziom szczegółowości odwzorowania porównywalny z dawnym, zdobniczym przedstawieniem kopalni przy zachowaniu standaryzacji wypracowanej w XIX i XX w.

Początki miernictwa wielickiego związane są z żupnikiem Porinusem, działającym w XIV wieku. W XVI i XVII stuleciu działali tu Piotr Franco oraz Jan Taubenheim, tytułowany *„montium salinarum architector”* — *„architekt gór solnych”*. Inwentaryzacja służyła celom ewidencyjnym i miała wówczas formę opisową — rejestr komór, spis szybów. Wiedza o kształcie kopalni istniała w pamięci pracowników i odchodziła razem z nimi.

Najstarsze plany kopalni powstawały przede wszystkim z potrzeby rozliczania pracy górników i kontroli nad eksploatacją złoża. Tworzono je lokalnie, miały formę rysunków odręcznych. Pomiary wykonywano wtedy doraźnie, przy pomocy sznura i laski sztygarskiej. Katastrofa komory Małdrzyk z 1582 r. potwierdziła realne zagrożenie zapadliskami. Była impulsem do dokładnej inwentaryzacji chodników i komór, określenia ich orientacji oraz gabarytów. Pierwsze udokumentowane pomiary wyrobisk przeprowadził Jan Brożek, który w latach 1616–1630 wykonał setki zjazdów w celu kartowania podziemi.

W pełni wartościowym materiałem kartograficznym były mapy pierwszych trzech poziomów Marcina Germana. Geometra w latach 1631–1638 prowadził pomiary i sporządził pierwsze rzetelne plany trzech poziomów kopalni oraz powierzchni w ujednoliconej skali ok. 1:1266. W 1645 r. Wilhelm Hondius wydał je jako cztery miedzioryty o wymiarach ok. 40 × 50 cm w skali 1:3800, sygnowane przez obu autorów i numerowane cyframi rzymskimi. Odwzorowywano szyby, komory, chodniki, a także schody i kieraty. Arkusze orientowano północą u dołu, skalę podawano wyłącznie w postaci podziałki liniowej opisanej po łacinie i po polsku, ponieważ skala liczbowa nie była wówczas jeszcze stosowana. Miedzioryty stały się wzorcem podziemnej kartografii, łącząc precyzję pomiarową z bogatym zdobnictwem.

Istotną cechą jest zagospodarowanie arkusza poza rysunkiem wyrobisk. Na planie pierwszego poziomu Germana i Hondiusa umieszczono osiem scen pracy górniczej, na drugim — pięć takich scen oraz wizerunki narzędzi, na trzecim zaś obelisk z dedykacją dla króla Władysława IV i Adama Kazanowskiego. Plan miasta obudowano herbem Wieliczki i herbami królewskimi oraz kartuszami z dedykacjami. Całość uzupełniały wstęgi, woluty, rozbudowana tytulatura po łacinie, podpisy autorów, legendy objaśniające

znaki i ozdobne podziałki. Te elementy stanowiły komunikat o właścicielach kopalni, ówcześnie stosowanych narzędziach oraz randze przedsiębiorstwa.

W 1717 r. do kopalni przybył Jan Gotfryd Borlach, który prowadził pomiary w latach ok. 1718–1727. Skutkiem jego działalności było utworzenie drugiego zespołu planów, które zostały wydane na miedziorytach Jana Ezejasza Nilsona (1766–1768). Borlach wprowadził do podziemnej kartografii precyzyjne przekroje pionowe, dzięki którym można było zrozumieć trójwymiarowy układ wyrobisk, oraz zastosował stałe podziałki liniowe. Mapy Borlacha charakteryzowały się niezwykłą systematycznością. Adnotacja wymieniająca siedmiu *„Geometrów, którzy w Fodynach mierzyli i Mappy rysowali*" dowodzi zespołowego i ciągłego charakteru prac mierniczych.

Z czasem rola mapy ewoluowała i pojawiły się czynniki, które wymusiły ograniczenie warstwy zdobniczej mapy na rzecz zwiększenia jej wartości użytkowej. Pierwszym z nich była funkcja dowodowa przy sporach własnościowych i granicznych. Drugim — bezpieczeństwo ruchu: ocena zagrożenia wodnego oraz projektowanie nowych chodników wymagały wiarygodnego obrazu wzajemnego położenia wyrobisk. Trzecim — kontrola skarbowa wielkości wydobycia. Po 1772 roku administracja austriacka wprowadziła urząd markszajdra i urzędową dokumentację ruchu zakładu. Mapa przestała być prywatnym opracowaniem, a stała się dokumentem prawnym o określonej formie.

Postępująca standaryzacja doprowadziła do eliminacji elementów zdobniczych z map: z arkuszy zniknęły sceny rodzajowe, herby i dedykacje, fundamentalnymi elementami stały się siatka współrzędnych, znaki umowne i legenda. Mapa zyskała czytelność i uniwersalność.

XIX wiek przyniósł ze sobą rutynę tworzenia opracowań. Przestały być dziełami sztuki, a stały się formą regularnej inwentaryzacji, prowadzonej przez stały zespół pomiarowy. Zaczęto tworzyć mapy, które do dziś zachowane są w archiwach: mapy poziomowe, eksploatacyjne, geologiczne, mapy ruchu i mapy pojedynczych komór.

Wiek XX tę logikę tylko utrwalił. Mapę podstawową kopalni założono w latach trzydziestych, dzieląc ją na sekcje o stałym formacie i prowadząc we własnym, lokalnym układzie współrzędnych. Miała jednak wadę: powstała przez nałożenie pomiarów z kilku stuleci, z których każdy wnosił własny błąd — im starsze wyrobisko, tym mniej pewne jego miejsce na arkuszu.

Po wpisaniu kopalni na listę UNESCO w 1978 roku, wraz ze zmianą wiodącej funkcji kopalni z zakładu produkcyjnego w obiekt zabytkowy, dokumentacja przestała służyć planowaniu eksploatacji, a zaczęła zabezpieczaniu i konserwacji zabytku. Potrzebny był pełny obraz wszystkich dostępnych wyrobisk, na podstawie którego można było planować dalsze prace.

W 1994 r. Okręgowy Urząd Górniczy w Krakowie nakazał rekonstrukcję mapy podstawowej. Wykonano ją, łącząc ponowny pomiar biegunowy we wszystkich dostępnych wyrobiskach z danymi otrzymanymi w wyniku skanowania i digitalizacji dawnych map oraz materiałów muzealnych.

Mapę podstawową przyjęto w skali 1:1000, a z bazy numerycznej generowano wtórniki 1:2000 i 1:5000 oraz pierwsze przestrzenne obrazy wybranych fragmentów kopalni. Był to moment, w którym mapa przestała być rysunkiem, a stała się bazą danych.

Współczesna dokumentacja mierniczo-geologiczna jest ściśle uregulowana. Mapy podstawowe wyrobisk, mapy przeglądowe, mapy specjalne, profile i przekroje prowadzi się w określonych skalach. Obowiązuje państwowy system odniesień przestrzennych (układy lokalne dopuszcza się tylko z możliwością transformacji), mapa prowadzona jest w formie elektronicznej bazy danych, a każdy rodzaj mapy ma określony cykl aktualizacji. Skala i treść mają zapewniać przede wszystkim dokładność i czytelność. Mapa dwuwymiarowa skorelowana jest ze środowiskiem 3D, w którym użytkownik może płynnie przechodzić od ogólnego obrazu wyrobisk do szczegółowych przekrojów konkretnego chodnika.

Równolegle zmienił się sam sposób wykonywania pomiaru i jego rola. Standardem jest odniesienie do osnowy podziemnej, nawiązanej do powierzchni przez szyb. Instrumentarium wypełniają nowoczesne urządzenia pomiarowe — tachimetry, służące do pomiaru biegunowego oraz niwelatory stosowane do pomiarów wysokościowych — natomiast podstawowym narzędziem inwentaryzacji stał się skaner laserowy. W ciągu kilku minut rejestrowane jest wszystko, co skaner widzi ze swojego stanowiska.

Poszczególne skany łączy się następnie w jedną chmurę punktów i dowiązuje do osnowy. Ta część pracy — wykonywana już przy komputerze — pochłania wielokrotnie więcej czasu niż sam pomiar.

Analiza kolejnych etapów rozwoju kartografii górniczej, z uwzględnieniem szczegółowości odwzorowania oraz stopnia standaryzacji map, wskazuje na powtarzalność pewnych tendencji w ich ewolucji. Najpierw powstawały opracowania zdobne, w których dokument techniczny i dzieło sztuki stanowiły jedność, a scena górnicza, herb i kartusz mówiły o kopalni tyle samo, co rysunek chodnika. Potem, wraz z wprowadzaniem zasad, jednostek, skal i obowiązku aktualizacji, mapa została świadomie ograniczona do wartości użytkowej. Ze względu na stosowane wówczas techniki pomiarowe i sposób ich kartograficznej prezentacji — zyskała precyzję i porównywalność, tracąc warstwę narracyjną. Dziś technologia pozwala połączyć obie te tradycje: skaning laserowy przywraca pełną, tym razem mierzalną i trójwymiarową szczegółowość odwzorowania, a jednocześnie zasila mapę prowadzoną w ściśle standaryzowanej, urzędowej formie. Warto pamiętać o różnicy jakościowej między dawnym a dzisiejszym sposobem przedstawiania danych. Ówczesna prezentacja szczegółów była symboliczna i selektywna — zależna od rysownika. Rejestracja przy pomocy skaningu laserowego obejmuje całą dostępną powierzchnię wyrobiska, a poziom szczegółowości opracowania dobiera się do potrzeb. Chmura punktów pełni funkcję dawnej sceny rodzajowej — pokazuje kopalnię taką, jaka naprawdę jest — z tą różnicą, że każdy jej punkt ma współrzędne.

Słowa kluczowe: Kopalnia „Wieliczka”, mapy górnicze, kartografia, technologie pomiarowe.

An underground mine is one of the few types of structures that cannot be directly observed in their entirety. It develops in three dimensions, while its geometry can only be determined through surveying. In this context, the map is the primary source of knowledge about the structure, and any cartographic error may result in an incorrect assessment of the relative position of underground workings, potentially leading to a disaster. The process of documenting the geometry of the Wieliczka workings began with the simplest tools. The result of such measurements was a freehand drawing, in which proportions were determined intuitively and no fixed scale was used. Only the consistent combination of measurement with a linear scale transformed the sketch into a document. The standardisation of mining maps was a long-term process: from hand-drawn plans, through the gradual introduction of scales and conventional symbols, to uniform digital documentation whose form is now defined by law. The aim of this presentation is to reconstruct the stages in the development of the cartographic documentation of the Wieliczka Salt Mine, identify the factors driving successive transformations, summarise the achievements to date, and demonstrate that this process is cyclical in nature. Modern three-dimensional surveying techniques restore to the mining map a level of representational detail comparable to that of historical ornamental depictions of the mine, while retaining the standards of map standardisation developed in the nineteenth and twentieth centuries.

The beginnings of surveying in Wieliczka are associated with the salt mine administrator Porinus, who was active in the fourteenth century. In the sixteenth and seventeenth centuries, Piotr Franco and Jan Taubenheim also worked here, the latter bearing the title “montium salinarum architector” — “architect of the salt mountains”. At that time, inventorying served record-keeping purposes and took a descriptive form, consisting of registers of chambers and lists of shafts. Knowledge of the shape of the mine existed in the memory of its workers and was lost with them.

The oldest plans of the mine were created primarily out of the need to account for miners’ work and control the exploitation of the deposit. They were produced locally and took the form of hand-drawn representations. Measurements were carried out on an ad hoc basis using a rope and a mining foreman’s staff. The collapse of the Małdrzyk Chamber in 1582 confirmed the real threat posed by ground collapses. It prompted a detailed inventory of galleries and chambers, including the determination of their orientation and dimensions. The first documented surveys of the workings were conducted by Jan Brożek, who made hundreds of descents between 1616 and 1630 in order to map the underground workings.

The maps of the first three levels prepared by Marcin German constituted a fully valuable body of cartographic material. Between 1631 and 1638, the geometer conducted surveys and prepared the first

reliable plans of the mine's three levels and the surface at a uniform scale of approximately 1:1266. In 1645, Wilhelm Hondius published them as four copperplate engravings measuring approximately 40 × 50 cm at a scale of 1:3800. The engravings were signed by both authors and numbered using Roman numerals. Shafts, chambers and galleries were represented, as well as stairways and horse-driven hoists. The sheets were oriented with north at the bottom, while the scale was given exclusively in the form of a linear scale described in Latin and Polish, since a numerical scale was not yet in use. The copperplate engravings became a model for underground cartography, combining surveying precision with rich ornamentation.

An important feature was the use of the sheet beyond the actual representation of the workings. The plan of the first level by German and Hondius contained eight scenes depicting mining activities; the second included five such scenes and representations of tools, while the third featured an obelisk with a dedication to King Władysław IV and Adam Kazanowski. The plan of the town was framed by the coat of arms of Wieliczka and royal coats of arms, as well as cartouches bearing dedications. The whole composition was complemented by ribbons, volutes, elaborate Latin titles, the authors' signatures, legends explaining the symbols and decorative scale bars. These elements conveyed information about the owners of the mine, the tools used at the time and the status of the enterprise.

In 1717, Jan Gotfryd Borlach arrived at the mine and conducted surveys from approximately 1718 to 1727. His work resulted in the creation of a second set of plans, which were published as copperplate engravings by Jan Ezejasz Nilson in 1766–1768. Borlach introduced precise vertical sections into underground cartography, which made it possible to understand the three-dimensional arrangement of the workings and applied fixed linear scales. Borlach's maps were characterised by remarkable systematicity. An annotation listing seven "Geometers who surveyed in the Fodyny and drew the Mappy" provides evidence of the collaborative and continuous nature of the surveying work.

Over time, the role of the map evolved, and factors emerged that necessitated limiting its ornamental layer in favour of increasing its practical value. The first was its evidentiary function in ownership and boundary disputes. The second was operational safety: the assessment of water hazards and the design of new galleries required a reliable representation of the relative position of the workings. The third was fiscal control over the amount of extracted salt. After 1772, the Austrian administration introduced the office of the Markscheider and official documentation of my operations. The map ceased to be a private work and became a legal document with a defined form.

Progressive standardisation led to the elimination of ornamental elements from maps. Genre scenes, coats of arms and dedications disappeared from the sheets, while the coordinate grid, conventional symbols and legend became fundamental elements. The map thus gained greater legibility and universality.

The nineteenth century brought a routine approach to the production of cartographic documentation. Maps ceased to be works of art and became a form of regular inventory conducted by a permanent surveying team. Maps were produced that have been preserved in archives to the present day, including level maps, mining-operation maps, geological maps, operational maps and maps of individual chambers.

The twentieth century further consolidated this approach. The mine's base map was established in the 1930s, divided into sections of a fixed format and maintained using its own local coordinate system. It nevertheless had a significant limitation: it had been created by overlaying surveying data from several centuries, each of which introduced its own error. Consequently, the older the working, the less certain its position on the sheet.

Following the mine's inscription on the UNESCO World Heritage List in 1978, and with the transformation of its primary function from a production facility into a historic monument, the documentation ceased to serve the planning of mining operations and began to serve the protection and conservation of the monument. A complete representation of all accessible workings was required as a basis for planning further work.

In 1994, the District Mining Office in Kraków ordered the reconstruction of the base map. This was carried out by combining a new polar survey of all accessible workings with data obtained through the scanning and digitisation of historical maps and museum materials.

The base map was adopted at a scale of 1:1000, while derivative maps at scales of 1:2000 and 1:5000, as well as the first spatial representations of selected parts of the mine, were generated from the digital database. This was the point at which the map ceased to be merely a drawing and became a database.

Contemporary surveying and geological documentation are strictly regulated. Base maps of underground workings, overview maps, special-purpose maps, profiles and sections are maintained at specified scales. A national spatial reference system is used, while local systems are permitted only if they can be transformed into the required reference system. The map is maintained in the form of an electronic database, and each type of map has a defined update cycle. The scale and content are intended primarily to ensure accuracy and legibility. The two-dimensional map is correlated with a 3D environment, in which the user can move seamlessly from a general representation of the workings to detailed sections of a specific gallery.

At the same time, the method of surveying itself and its role have changed. The standard is to reference measurements to an underground surveying control network connected to the surface through a shaft. The equipment includes modern surveying instruments — total stations used for polar surveying and levels used for height measurements — while the laser scanner has become the primary tool for inventorying the workings. Within a few minutes, everything visible to the scanner from its surveying station is recorded. Individual scans are subsequently combined into a single point cloud and tied to the control network. This part of the work, carried out at a computer, takes considerably more time than the measurement itself.

An analysis of the successive stages in the development of mining cartography, taking into account the level of detail of the representation and the degree of map standardisation, indicates the recurrence of certain tendencies in its evolution. Initially, elaborate cartographic works were created in which the technical document and the work of art constituted a single whole, while the mining scene, coat of arms and cartouche conveyed as much information about the mine as the drawing of a gallery. Subsequently, with the introduction of rules, units, scales and requirements for regular updating, the map was deliberately limited to its practical value. Owing to the surveying techniques used at the time and the way in which their results were presented cartographically, the map gained precision and comparability while losing its narrative layer.

Today, technology makes it possible to combine these two traditions. Laser scanning restores a complete level of representational detail — this time measurable and three-dimensional — while simultaneously providing data for a map maintained in a strictly standardised official form. It is important to recognise the qualitative difference between historical and contemporary methods of data representation. In historical maps, the presentation of detail was symbolic and selective, depending on the draughtsman. Laser scanning, by contrast, records the entire accessible surface of a working, while the level of detail of the resulting documentation can be adapted to specific needs. The point cloud performs a function analogous to that of the historical genre scenes: it shows the mine as it actually is, with the difference that every point has spatial coordinates.

Keywords: *Wieliczka Salt Mine, mining maps, cartography, measurement technologies.*

LITERATURA/REFERENCES:

- BEIERSDORF Z., JODŁOWSKI A., KRASNOWOLSKI B., NOGA Z., 2015. Wieliczka, red. Z. NOGA, [w:] Atlas historyczny miast polskich, red. R. CZAJA, t. V: Małopolska, z. 3, Toruń–Kraków–Wieliczka.
- CHARKOT J., SKUBISZ M., 2018. Żupa i miasto Wieliczka na miedziorytniczych mapach Jana Ezejasza Nilsona z 1760 i 1768 r., Wieliczka.
- KUC W., 2017. Miernicze i kartograficzne dowody w sporze o kopalnię w Sierczy, „Studia i Materiały do Dziejów Żup Solnych w Polsce".
- MAŚLANKIEWICZ K., 1965. Z dziejów górnictwa solnego w Polsce, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- PRZYBYŁO J., 2009. Magnum Sal – Komora Michałowice w Kopalni Soli Wieliczka, „Geologia" (AGH).
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 28 października 2015 r. w sprawie dokumentacji mierniczo-geologicznej, Dz. U. 2015 poz. 1941.
- Kolekcja: kartografia, Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka, www.muzeum.wieliczka.pl

Streszczenia posterów

Abstracts of posters

STAN ROZPOZNANIA GÓRNOPERMSKIEGO DOLOMITU PŁYTOWEGO CA3 NA OBSZARZE POLSKI

CURRENT STATE OF KNOWLEDGE ON THE UPPER PERMIAN CA3 PLATY DOLOMITE IN POLAND

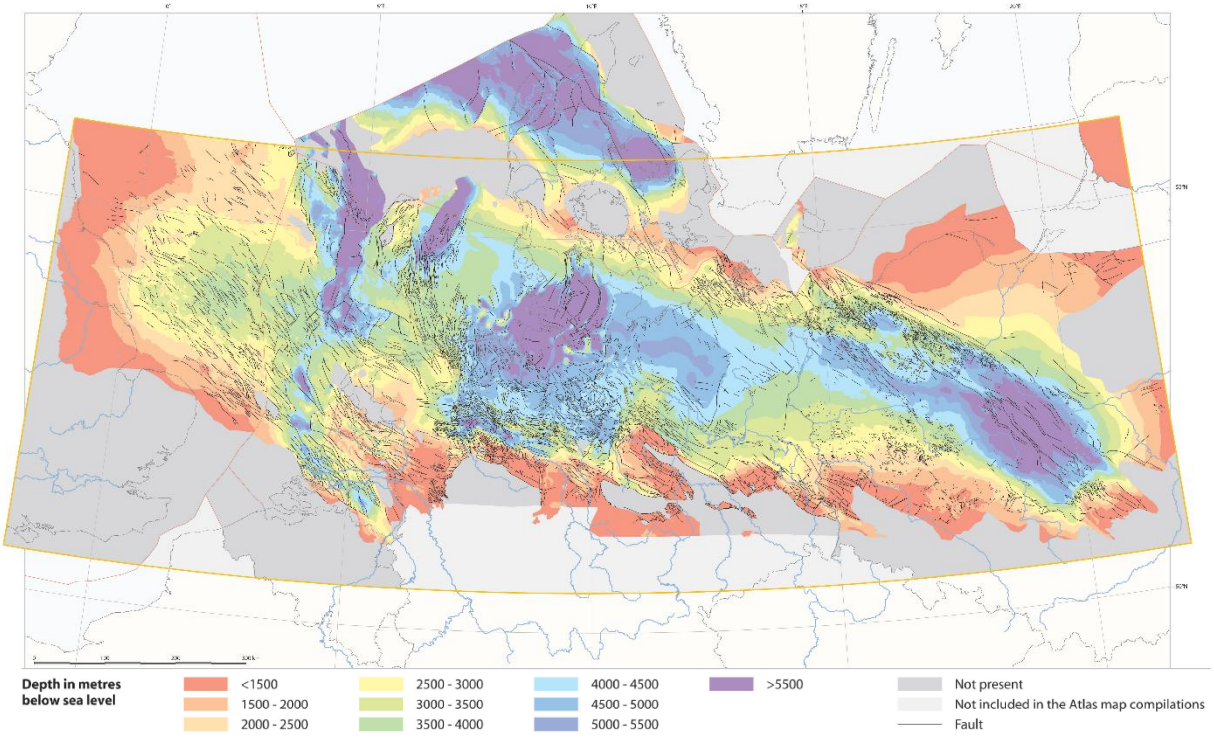
Adam Karol CHASZCZEWICZ[1], Stanisław BURLIGA[1]

[1] Instytut Nauk Geologicznych, Uniwersytet Wrocławski, plac Maksa Borna 9, 50-204 Wrocław
e-mail: adam.chaszczewicz@phd.uwr.edu.pl; stanislaw.burliga@uwr.edu.pl

Permskie morze cechsztyńskie istniało na obszarze obecnej Europy zaledwie kilka milionów lat, lecz pozostawiło po sobie sukcesję osadową zawierającą liczne złoża surowców chemicznych, energetycznych i rud metali o olbrzymim znaczeniu ekonomicznym. W tym rozległym, lecz stosunkowo płytkim, śródlądowym akwenie uformowało się kilka podbasenów sedymentacyjnych, m.in. basen polski (Peryt, Kiersnowski, 2026). Osady cechsztyńskie powstały głównie w wyniku cyklicznej ewaporacji wody morskiej i obecnie występują w podłożu około 70% terytorium Polski (**Ryc. 1**), (Wagner, 1994; Dadlez i in., 1998). Są to w przewadze sole kamienne, skały siarczanowe (głównie anhydryty) i węglanowe (dolomity i wapienie), a także sole potasowo-magnezowe, iłowce i zubry. Cykliczność ich powstawania przypisuje się powtarzającemu wypłycaniu lub wysychaniu zbiornika morskiego i jego pogłębianiu. W basenie polskim wyróżniono cztery cyklotemy ewaporatowe: PZ1, PZ2, PZ3 i PZ4 (Wagner, 1994), bazując na stratygrafii opracowanej pierwotnie dla cechsztyńskiego basenu niemieckiego (Richter-Bernburg, 1955).

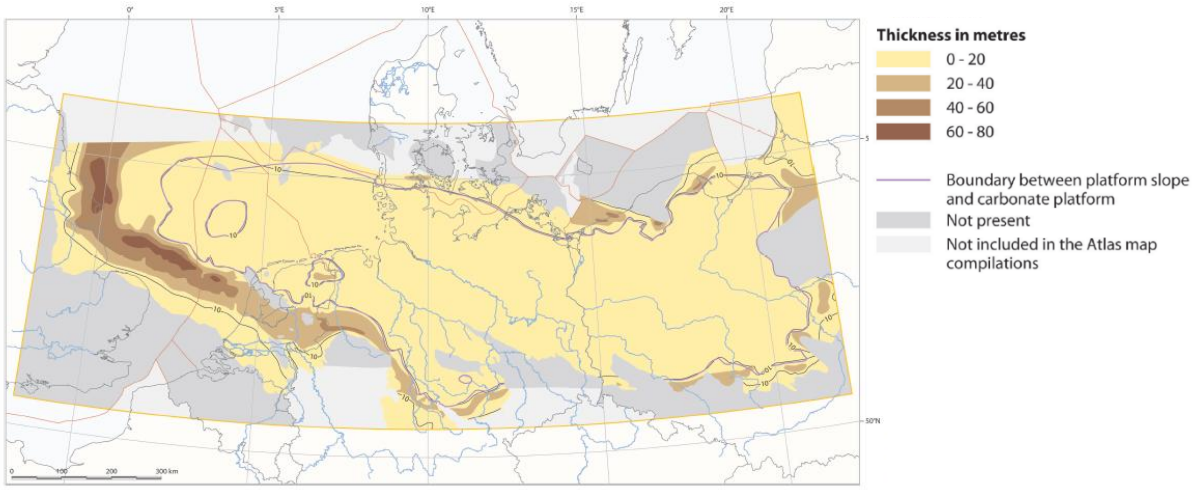
Stan rozpoznania geologii utworów cechsztyńskich na obszarze Polski jest bardzo zróżnicowany. Najlepiej poznane są skały dostępne na powierzchni terenu w Sudetach i Górach Świętokrzyskich (Peryt, Kiersnowski, 2026). Na pozostałym obszarze znajdują się one pod pokrywą skał mezozoicznych i kenozoicznych na głębokości od kilkuset metrów p.p.t. w strefach brzeżnych basenu oraz w rejonie występowania diapirowych struktur solnych, do ponad 6000 metrów p.p.t. w centralnej Polsce (**Ryc. 2**). Stąd poza obrzeżami basenu dokładniej rozpoznano je jedynie w rejonach eksploracji złóż soli kamiennych i potasowych oraz rud metali i węglowodorów w skałach węglanowych cyklotemów PZ1 i PZ2. Relatywnie mało uwagi poświęcono w piśmiennictwie pozostałym skałom sukcesji cechsztyńskiej. Mimo iż poza solami kamiennymi i potasowo-magnezowymi młodsze ogniwa litostratygraficzne mają znikome znaczenie złożowe, stanowią one kluczowe repery stratygraficzne przy identyfikacji tektoniki wewnętrznej cechsztyńskiej formacji ewaporatowej. W aspekcie tym szczególnie istotne są ogniwa węglanowe i siarczanowe rozdzielające sole kamienne poszczególnych cyklotemów. Stan rozpoznania ogniwa węglanowego cyklotemu PZ3, tj. dolomitu płytowego Ca3, jest przedmiotem niniejszego opracowania.

Dolomit płytowy Ca3 występuje na niemal całym obszarze basenu polskiego (**Ryc. 1, Ryc. 2**) (Dadlez i in., 1998; Peryt i in., 2010), jednak prace na temat petrografii skał, ich genezy oraz paleogeografii basenu cechsztyńskiego w okresie sedymentacji osadów tego ogniwa wyraźnie skoncentrowane były na kilku rejonach. Najwięcej opracowań na temat dolomitu płytowego Ca3 odnosi się do północnych krańców basenu polskiego, w ujęciu geologicznym do obszaru wyniesienia Łeby i syneklizy perybałtyckiej (np. Gąsiewicz, Peryt, 1989; Gąsiewicz, 1990). Począwszy od lat 60. XX wieku, w wyniku sukcesywnie prowadzonych prac, udokumentowano na tym terenie zapis przybrzeżnych facji dolomitu płytowego. Są to utwory o miąższości 20-40 m, o wyraźnych cechach regresywnych w górnej części sukcesji osadowej, przeważnie warstwowane madstony z dużą reprezentacją skamieniałości małży, otwornic i małżoraczków, lokalnie także ślimaków i mikroskamieniałości. Udokumentowano ponadto oolitowe i bioklastyczne wakstony, pakstony i rudstony, reprezentujące mikrofacje lagunowe i barierowe, a także mikrobiality (Wagner, 1994; Gąsiewicz, 2010).



Ryc. 1. Zasięg cechsztynu w basenie europejskim i współczesna głębokość zalegania jego spągu (w metrach pod poziomem morza) wg Peryta i in. (2010)

***Fig. 1**. Extent of the Zechstein in the European Basin and the present-day depth of its base (in metres below sea level) according to Peryt et al. (2010)*



Ryc. 2. Miąższość osadów dolomitu płytowego w basenie cechsztyńskim (Peryt i in., 2010)

***Fig. 2.** Thickness of the Platy Dolomite in the Zechstein Basin (Peryt et al., 2010)*

Występowanie dolomitu płytowego o analogicznych cechach petrograficznych jak w rejonie Łeby potwierdzono również w północno-wschodniej, brzeżnej części polskiego basenu cechsztyńskiego, począwszy od rejonu Zatoki Puckiej, poprzez Mazury, okolice Warszawy, aż po Podlasie (Peryt, Skowroński, 2021). Z kolei analizy przeprowadzone na obszarze niecki północnosudeckiej wykazały, że w rejonie południowego obrzeżenia basenu polskiego dolomit płytowy charakteryzuje się występowaniem utworów lagunowych i barierowych, z dużym nagromadzeniem skamieniałości alg, małży i ślimaków (Raczyński, 2010).

Stosunkowo dobre udokumentowanie facji ogniwa dolomitu płytowego w brzeżnej części basenu cechsztyńskiego kontrastuje z niewielką ilością prac poświęconych centralnej części basenu polskiego. Występowanie dolomitu płytowego w kopalniach w Kłodawie i Inowrocławiu jest znane od dekad (Charysz, 1973), jednak dotychczasowe rozpoznanie tego ogniwa jest bardzo pobieżne. Charysz (1973) zawęził charakterystykę skał do stwierdzenia, że jest to dolomit drobnoziarnisty, brunatnawoszary, w stropie anhydrytowo-ilasty o barwie szarej lub ciemnoszarej. W syntetycznym opracowaniu stratygrafii osadów i ewolucji basenu cechsztyńskiego na Niżu Polskim (Wagner, 1994) ogniwo dolomitu płytowego opisane zostało jako skały powstałe w płytkowodnym i rozległym basenie sedymentacyjnym, zbudowane z monotonnych osadów zailonych oraz warstwowanych madstonów z przewarstwieniami magnezytów (do 80% udziału $MgCO_3$). Utwory tej facji mają osiągać przeważnie 2-4 m miąższości, i zawierać istotną ilość skamieniałości małży, mikrofauny i peloidów (Wagner, 1994). Pozostaje to w sprzeczności z informacjami z wysadu solnego Kłodawy, w którym miąższość dolomitu płytowego nie przekracza 1 m (Charysz, 1973). Jeszcze mniej wiadomo o skałach dolomitu płytowego z rejonu północno-zachodniej części basenu polskiego, gdzie przeważnie w publikacjach jest on pomijany bądź nieodnotowywany (np. Peryt, 2010; Czapowski i in., 2023).

Studium literatury wskazuje, że cechy petrograficzne, sedymentologiczne oraz biostratygrafia dolomitu płytowego Ca3 są *de facto* rozpoznane jedynie w strefach brzeżnych polskiego basenu cechsztyńskiego, w szczególności w rejonie wyniesienia Łeby. Petrografia, rozkład litofacji i miąższości dolomitu płytowego oraz paleogeografia cechsztynu w strefie otwartego basenu jest bardzo zgeneralizowana, a w modelach regionalnych bazuje na założeniach ekstrapolacyjnych, nie uwzględniających danych m.in. z kopalń soli. Wskazuje to na potrzebę weryfikacji istniejących map miąższościowych i modeli paleogeograficznych cechsztynu w obszarze centralnej części polskiego basenu cechsztyńskiego oraz uzupełnienie luki w zakresie charakterystyki petrograficzno-sedymentologicznej tego ogniwa, na podstawie, której możliwa będzie jego jednoznaczna identyfikacja, np. w danych otworowych.

Słowa kluczowe: cechsztyn, dolomit płytowy, Ca3, basen polski

Although the Permian Zechstein Sea existed over the territory of present-day Europe for only a few million years, it left a sedimentary succession hosting numerous chemical, energy, and metal ores resources of high economic significance. In this vast yet relatively shallow epicontinental sea, several sedimentary sub-basins developed, including the Polish Zechstein Basin (Peryt, Kiersnowski, 2026). Zechstein deposits formed primarily as a result of cyclic seawater evaporation. Nowadays they underlie approximately 70% of the territory of Poland (Fig. 1) (Wagner, 1994; Dadlez et al., 1998). This succession is dominated by rock salt, sulphates (mostly anhydrite) and carbonates (mainly dolomite and limestone), with subordinate potassium-magnesium salts, claystones and clayey salts (zuber salt). The succession reflects repeated shallowing and drying up of the sea, interspersed with periods of its deepening. Four evaporitic cyclothems, PZ1–PZ4, have been distinguished in the Polish Zechstein Basin (Wagner, 1994), following the stratigraphic division originally established for the German Zechstein Basin by Richter-Bernburg (1955).

The state of knowledge on the Zechstein succession varies considerably across the Polish Zechstein Basin. The best documented are the areas where the Zechstein rock occur at the surface, especially in the Sudetes and the Holy Cross Mountains (Peryt, Kiersnowski, 2026). Elsewhere, these deposits occur beneath the Mesozoic and Cenozoic cover at depths ranging from a few hundred meters below ground level – in the basin's marginal zone and over diapiric salt structures – to over 6,000 meters below ground level in the central parts of basin (Fig. 2). Beyond the basin margins, they have been investigated in greater detail only in areas where exploration has targeted rock salt and potash deposits, metal ores, and hydrocarbons within the carbonate rocks of the PZ1 and PZ2 cyclothems. Other rocks of the Zechstein succession have received relatively little attention in the literature. Although apart from the rock salt and potassium-magnesium salts the younger lithostratigraphic units are of limited economic importance, they provide key stratigraphic markers for reconstructing the internal tectonics of the Zechstein evaporite formation. In this context, the carbonate and sulphate units separating the rock salt layers of individual cyclothems are of particular significance. The present study focuses on the state of knowledge of the carbonate unit of the PZ3 cyclothem, i.e. the Ca3 Platy Dolomite.

The Ca3 Platy Dolomite occurs over almost the entire Polish Basin (Figs. 1 and 2); however, research into the petrography, origin and evolution of rocks, as well as paleogeography of the Zechstein Basin during the deposition of this unit has so far focused primarily on a few regions. Most studies concerning the Platy Dolomite (Ca3) have focused on the northern reaches of the Polish Basin, in areas of the Łeba High and the Peribaltic Syneclise (e.g., Gąsiewicz & Peryt, 1989; Gąsiewicz, 1990). Since the 1960s, the ongoing research has documented the record of nearshore facies of the Platy Dolomite there. These deposits, ranging from 20 m to 40 m in thickness, exhibit distinct regressive characteristics in the upper part of the sedimentary succession. They consist predominantly of bedded mudstones rich in fossils, including bivalves, foraminifera, and ostracods, with gastropods and microfossils, locally. Additionally, oolitic and bioclastic wackestones, packstones and rudstones representing lagoonal and barrier microfacies have been documented, alongside microbialites (Wagner, 1994; Gąsiewicz, 2010).

The widespread occurrence of Platy Dolomite with petrographic characteristics analogous to those from the Łeba region has also been confirmed in the northeastern marginal zone of the Polish Zechstein Basin, extending from the region of Bay of Puck through Masuria, Warsaw area to Podlasie (Peryt & Skowroński, 2021). Meanwhile, studies carried out in the North Sudetic Syncinorium have shown that, along the southern margin of the Polish Basin, the Platy Dolomite is characterized by lagoonal and barrier deposits containing abundant accumulations of algal, bivalve, and gastropod fossils (Raczyński, 2010).

The relatively well-documented nature of the Platy Dolomite facies in the marginal zone of the Zechstein Basin contrasts with the scarcity of studies focusing on the central part of the Polish Basin. Although the occurrence of the Platy Dolomite in the Kłodawa and Inowrocław mines has been known for decades (e.g. Charysz, 1973), its lithological characteristics remains only briefly described. Charysz (1973) limited his description to noting that the rock is a fine-grained, brownish-grey dolomite, becoming anhydritic-clayey and grey or dark grey at the top. In a comprehensive study on the stratigraphy and evolution of the Zechstein Basin in the Polish Lowlands (Wagner, 1994), the Platy Dolomite Member was described as rocks having formed in a vast, shallow-water sedimentary basin, consisting of monotonous argillaceous deposits and laminated mudstones with magnesite intercalations (containing up to 80% MgCO3). Deposits of this facies typically range predominantly from 2 m to 4 m in thickness and contain significant amounts of bivalve fossils, microfauna, and peloids (Wagner, 1994). This interpretation is at odds with data from the Kłodawa Salt Structure, where the Platy Dolomite is less than 1 m thick (Charysz, 1973). Even less is known about the Platy Dolomite rocks in the northwestern part of the Polish Basin, an area where the unit is either omitted or unrecorded in published interpretations (e.g., Peryt, 2010; Czapowski et al., 2023).

A review of the literature indicates that the petrographic, sedimentological, and biostratigraphic characteristics of the Ca3 Platy Dolomite are relatively well constrained only in the marginal zones of the Polish Basin, specifically in the Łeba Elevation area. Beyond these marginal zones, knowledge of its petrography, lithofacies distribution, thickness, and the corresponding Zechstein palaeogeography remains highly generalized. Existing regional models rely largely on extrapolative assumptions that fail to incorporate data from subsurface sources such as salt mines. This highlights the need to reassess the existing thickness maps and palaeogeographic models for the central part of the Polish Zechstein Basin and to address the lack of petrographic and sedimentological characterization for this unit, i.e. the data essential for unambiguous identification of the Platy Dolomite, for instance, in borehole logs.

Keywords: *Zechstein, Platy Dolomite, Ca3, Polish Zechstein Basin*

LITERATURA / *REFERENCES*:

- Charysz W., 1973. Cechsztyńskie piętro soli młodszych (Z3) w regionie kujawskim. Prace Geologiczne, 75.
- Czapowski G., Małolepszy Z., Szynkaruk E., Chełmiński J., Nowacki N., Skowroński L., 2023. Paleofacje i paleomorfologia górnopermskich (cechsztyńskich) basenów ewaporatowych w rejonie Gorzowa Wielkopolskiego (zachodnia Polska). Prace Państwowego Instytutu Geologicznego, 208.
- Dadlez R., Marek S., Pokorski J. (red.), 1998. Atlas paleogeograficzny epikontynentalnego permu i mezozoiku w Polsce. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- Gąsiewicz A., 1990. Rozwój sedymentacji cechsztyńskiego dolomitu płytowego (Ca3) w rejonie Zatoki Puckiej. Przegląd Geologiczny, 38: 187–195.

- Gąsiewicz A., 2010. Platy Dolomite (Ca3) carbonate platform in northern Poland. W: Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area (red. J.C. Doornenbal, A.G. Stevenson): 145–146. EAGE Publications b.v, Houten.
- Gąsiewicz A., Peryt T.M., 1989b. O sedymentacji cechsztyńskiego dolomitu płytowego w brzeżnej, południowej części syneklizy perybałtyckiej. Przegląd Geologiczny, 37: 193–199.
- Peryt T.M., 2010. Ewaporaty cechsztynu PZ1-PZ3 bloku Gorzowa. Przegląd Geologiczny, 58: 689–694.
- Peryt T.M., Geluk M.C., Mathiesen A., Paul J., Smith K., 2010. Zechstein. W: Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area (red. J.C. Doornenbal, A.G. Stevenson): 123–147. EAGE Publications b.v., Houten.
- Peryt T.M., Kiersnowski H., 2026. Perm. W: Budowa geologiczna Polski. Tom 1. Stratygrafia (red. T.M. Peryt): 337–402. Warszawa, 2026.
- Peryt T.M., Skowroński L., 2021. The stratigraphy of Zechstein strata in the East European Craton of Poland: an overview. Geological Quarterly, 2021, 65: 48,
- Raczyński P., 2010. North-Sudetic Basin: nearshore carbonate and siliciclastic deposits. W: Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area (red. J.C. Doornenbal, A.G. Stevenson): 142–143. EAGE Publications b.v, Houten.
- Richter-Bernburg G., 1955. Stratigraphische Gliederung des deutschen Zechsteins. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 105: 843–854.
- Wagner R., 1994. Stratygrafia osadów i rozwój basenu cechsztyńskiego na Niżu Polskim. Prace Państwowego Instytutu Geologicznego, 146.

OPIS GEOMETRII KOMÓR EKSPLOATACYJNYCH NA POTRZEBY TWORZENIA MODELU 3D KOPALNI SOLI

GEOMETRY DESCRIPTION OF MINING CHAMBERS FOR 3D SALT MINE MODELING

Agnieszka MALEC[1, 2], Andrzej KWINTA[1], Piotr KOCZWARA[3]

[1] Katedra Geodezji, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Polska
e-mail: agnieszka.malec@student.urk.edu.pl, andrzej.kwinta@urk.edu.pl

[2] Szkoła Doktorska Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Polska

[3] Kopalnia Soli „Wieliczka", Polska
e-mail: piotr.koczwara@kopalnia.pl

WSTĘP

Kopalnia Soli „Wieliczka" jest jednym z najstarszych obiektów górniczych na świecie, którego początki eksploatacji soli sięgają XIII wieku (Wiewiórka i in. 2009). Wielowiekowa działalność górnicza doprowadziła do powstania rozległego systemu wyrobisk podziemnych obejmujących komory eksploatacyjne oraz chodniki. Obecnie kopalnia pełni funkcję zarówno obiektu zabytkowego i turystycznego, jak i zakładu górniczego, w którym prowadzone są roboty górnicze. Z tych względów stanowi też cenny obiekt badań geodezyjnych, geologicznych i inżynierskich. Ze względu na zachodzące w górotworze procesy deformacyjne konieczna jest okresowa inwentaryzacja oraz aktualizacja danych przestrzennych. Współczesne technologie pomiarowe umożliwiają tworzenie modeli 3D o różnym poziomie szczegółowości (LOD – Level of Detail), pozwalających na przedstawienie tego samego obiektu z różnym stopniem odwzorowania geometrii, zależnie od przeznaczenia modelu i dostępnych danych (Biljecki i in. 2016a; Biljecki i in. 2016b; Donovaro i in. 2006; Tan i Daut 2004).

Celem pracy było opracowanie i porównanie trzech poziomów geometrycznej reprezentacji wybranego wyrobiska Kopalni Soli „Wieliczka" – LOD 1, LOD 2 i LOD 3 – oraz określenie różnic wynikających z zastosowania kolejnych poziomów szczegółowości. Analizę przeprowadzono na przykładzie komory III/141 – kaplicy św. Jana na III poziomie kopalni.

DANE I METODY

Do opracowania modeli wykorzystano dane pochodzące z różnych źródeł, odpowiadających kolejnym poziomom szczegółowości. LOD 1 opracowano na podstawie danych inwentaryzacyjnych obejmujących ponad 2000 wyrobisk Kopalni Soli „Wieliczka". Dane te pozwoliły na przedstawienie lokalizacji komory III/141 na tle przestrzennego rozmieszczenia wyrobisk na poziomach I –IX.

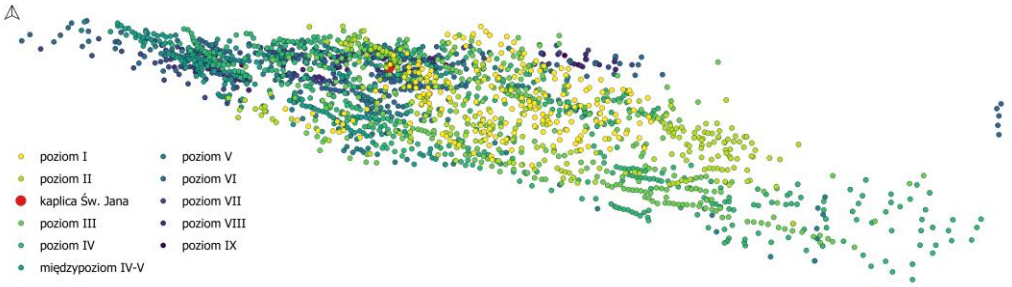
LOD 2 opracowano na podstawie materiałów archiwalnych oraz danych geodezyjnych. Wykorzystano archiwalną mapę II i III poziomu kopalni w skali 1:1000 oraz wyniki pomiarów tachimetrycznych. Na podstawie charakterystycznych punktów stropu i spągu opracowano w programie BricsCAD uproszczony model przestrzenny komory.

LOD 3 utworzono poprzez uzupełnienie modelu LOD 2 o dane z naziemnego skanowania laserowego. Skanowanie komory III/141 wykonano w lutym 2026 roku z wykorzystaniem skanera Leica BLK360 G2. Rejestrację chmury punktów przeprowadzono w programie Cyclone REGISTER 360 PLUS. Dane TLS powiązano z podziemną osnową geodezyjną. Model LOD 3 opracowano jako rozwiązanie hybrydowe, w którym model LOD 2 stanowił podstawę, a dane TLS wykorzystano do modyfikacji geometrii i lepszego odwzorowania rzeczywistych powierzchni komory.

WYNIKI

Opracowane modele przedstawiają ten sam obiekt na trzech kolejnych poziomach szczegółowości, różniących się zakresem informacji geometrycznej.

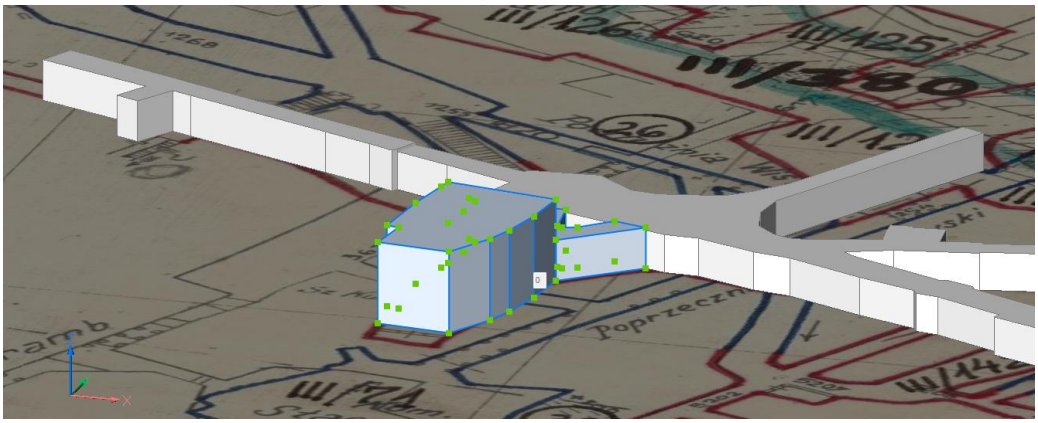
Poziom LOD 1 reprezentuje maksymalnie uproszczony model lokalizacyjny, w którym każdą komorę potraktowano jako punkt w przestrzeni odpowiadający współrzędnym jej środka. W ramach tego poziomu opracowano mapę rozmieszczenia komór eksploatacyjnych Kopalni Soli „Wieliczka" w lokalnym układzie współrzędnych („układ Wielicki") (**ryc. 1**). Na mapie przedstawiono komory zlokalizowane na poziomach I –IX, wykorzystując gradient kolorystyczny umożliwiający rozróżnienie poszczególnych poziomów kopalni. Kaplicę św. Jana oznaczono kolorem czerwonym, co pozwala na jej jednoznaczną identyfikację względem pozostałych wyrobisk.



Ryc. 1. Model lokalizacyjny LOD 1 przedstawiający rozmieszczenie wyrobisk Kopalni Soli „Wieliczka" z wyróżnieniem komory III/141

Fig. 1. *LOD 1 location model showing the distribution of workings in the "Wieliczka" Salt Mine, with chamber III/141 highlighted*

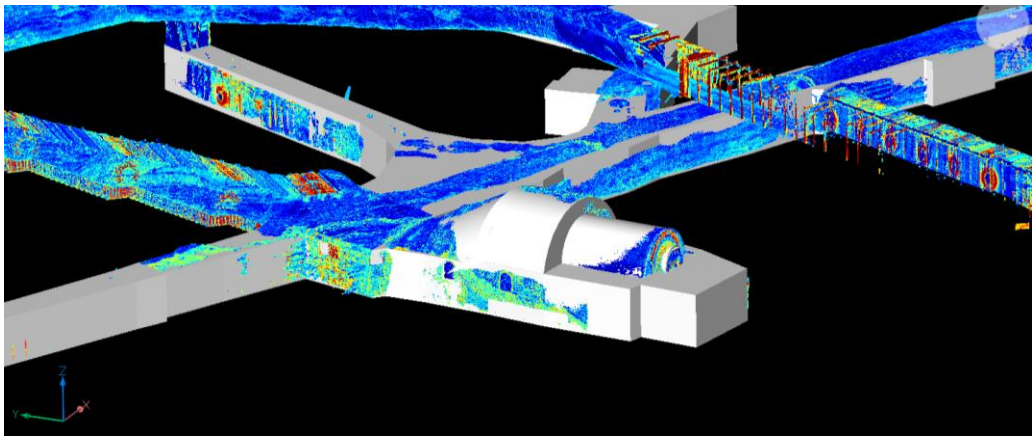
Na poziomie LOD 2 uzyskano uproszczoną reprezentację przestrzenną komory, opracowaną na podstawie materiałów archiwalnych i danych tachimetrycznych (**ryc. 2**). Powierzchnia modelu wyniosła 753,35 m^2, a jego objętość 898,59 m^3. Model odwzorowuje podstawowe wymiary i kształt wyrobiska, jednak jego geometria jest wynikiem generalizacji danych pomiarowych.



Ryc. 2. Uproszczony model komory III/141 opracowany na poziomie LOD 2

Fig. 2. *Simplified model of chamber III/141 developed at the LOD 2 level*

Integracja chmury punktów pozyskanej z naziemnego skaningu laserowego (TLS) z bryłą bazową opracowaną na poziomie LOD 2 pozwoliła na utworzenie modelu 3D na poziomie LOD 3 (**ryc. 3**). W modelu na poziomie LOD 3 uwzględniono rzeczywisty przebieg powierzchni komory zarejestrowany w chmurze punktów, przy zachowaniu uproszczeń pozwalających na uzyskanie funkcjonalnego modelu geometrycznego. Powierzchnia modelu LOD 3 wyniosła 523,28 m^2, natomiast jego objętość 436,18 m^3.



Ryc. 3. Dokładny model 3D kaplicy Św. Jana w trybie intensywność (Intensity) wyświetlania chmury punktów

Fig. 3. *Detailed 3D model of St. John's Chapel, with the point cloud displayed in Intensity mode*

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano trzy poziomy geometrycznej reprezentacji komory III/141 – kaplicy św. Jana w Kopalni Soli „Wieliczka". Zastosowanie modeli o różnych poziomach szczegółowości (LOD) umożliwia wieloskalowy opis geometrii komór eksploatacyjnych Kopalni Soli „Wieliczka". Poszczególne poziomy LOD dostarczają informacji o różnym stopniu dokładności geometrycznej i mogą być wykorzystywane do odmiennych analiz przestrzennych.

LOD 1 pozwala na analizę rozmieszczenia wyrobisk w skali całej kopalni oraz identyfikację lokalizacji komór w lokalnym układzie współrzędnych. Dzięki temu możliwe jest przedstawienie wzajemnego położenia wyrobisk oraz analiza przestrzennej struktury kopalni.

Model LOD 2 umożliwia przedstawienie orientacyjnej geometrii komór oraz analizę ich relacji przestrzennych z otaczającymi wyrobiskami. Poziom ten może być szczególnie przydatny w przypadku ograniczonej dostępności danych pomiarowych wysokiej dokładności lub podczas opracowywania modeli obejmujących większe obszary kopalni.

Model LOD 3 dostarcza szczegółowej informacji geometrycznej, pozwalającej na dokładną dokumentację stanu wyrobiska, analizę deformacji oraz tworzenie realistycznych modeli 3D kopalni. Szczegółowe modele mogą wspierać monitoring stanu technicznego wyrobisk oraz działania związane z ochroną i dokumentacją zabytkowych przestrzeni podziemnych.

Porównanie modeli LOD 2 i LOD 3 wykazało istotne różnice w parametrach geometrycznych. Powierzchnia zmniejszyła się z 753,35 m^2 do 523,28 m^2, a objętość z 898,59 m^3 do 436,18 m^3. Największy wpływ na różnicę objętości miał sposób odwzorowania stropu komory – uproszczony w LOD2 i odwzorowany na podstawie rzeczywistej geometrii uzyskanej z TLS w LOD3.

Wyniki wskazują, że wraz ze wzrostem poziomu szczegółowości modelu rośnie dokładność odwzorowania geometrii komory, ale jednocześnie zwiększa się ilość danych pomiarowych oraz stopień złożoności opracowania modelu. Wielopoziomowe podejście do modelowania 3D pozwala więc dostosować zakres i dokładność modelu do celu analizy oraz dostępnych danych pomiarowych.

Przedstawione rozwiązanie stanowi podstawę do dalszych badań obejmujących kolejne wyrobiska o zróżnicowanej geometrii oraz wykorzystanie powtarzanych pomiarów TLS i danych geodezyjnych do analizy zmian geometrii w czasie. W dalszej perspektywie może to stanowić jeden z elementów budowy przestrzennego modelu kopalni rozwijanego w kierunku cyfrowego bliźniaka.

Słowa kluczowe: modelowanie 3D, kopalnia soli, komory eksploatacyjne, poziomy szczegółowości

INTRODUCTION

The "Wieliczka" Salt Mine is one of the oldest mining sites in the world, with salt extraction dating back to the 13th century (Wiewiórka et al. 2009). Centuries of mining activity have produced an extensive system of underground workings, including extraction chambers and galleries. Today the mine serves both as a historical and tourist site and as an operating mine in which mining works are still carried out. For these reasons, it is also a valuable object for geodetic, geological and engineering research. Because of the deformation processes occurring in the rock mass, periodic surveying and updating of spatial data are necessary. Modern measurement technologies make it possible to create 3D models at different levels of detail (LOD), which allow the same object to be represented with varying degrees of geometric fidelity, depending on the intended purpose of the model and the available data (Biljecki et al., 2016a; Biljecki et al., 2016b; Donovaro et al. 2006; Tan and Daut, 2004).

The aim of this study was to develop and compare three levels of geometric representation of a selected working of the "Wieliczka" Salt Mine – LOD 1, LOD 2 and LOD 3 – and to determine the differences resulting from the application of successive levels of detail. The analysis was carried out using chamber III/141, St. John's Chapel on the third level of the mine, as a case study.

DATA AND METHODS

The models were developed using data from various sources, corresponding to the successive levels of detail. LOD 1 was created on the basis of inventory data covering more than 2,000 workings of the "Wieliczka" Salt Mine. These data made it possible to show the location of chamber III/141 against the spatial distribution of workings on levels I –IX.

LOD 2 was developed using archival materials and geodetic data. An archival map of the second and third levels of the mine at a scale of 1:1000 and the results of tacheometric measurements were used. Based on characteristic points of the roof and floor, a simplified spatial model of the chamber was created in BricsCAD.

LOD 3 was created by supplementing the LOD 2 model with terrestrial laser scanning data. The scanning of chamber III/141 was carried out in February 2026 using a Leica BLK360 G2 scanner. The point cloud was registered in Cyclone REGISTER 360 PLUS. The TLS data were tied to the underground geodetic control network. The LOD 3 model was developed as a hybrid solution in which the LOD 2 model served as the basis, and the TLS data were used to modify the geometry and better represent the actual surfaces of the chamber.

RESULTS

The models developed represent the same object at three successive levels of detail, which differ in the scope of geometric information.

*LOD 1 is a maximally simplified location model in which each chamber is treated as a point in space corresponding to the coordinates of its center. At this level, a map of the distribution of extraction chambers in the "Wieliczka" Salt Mine was produced in the local coordinate system (the "Wieliczka system") (**Fig. 1**). The map shows chambers located on levels I –IX, using a color gradient to distinguish the individual levels of the mine. St. John's Chapel is marked in red, which allows it to be clearly identified in relation to the other workings.*

*At the LOD 2 level, a simplified spatial representation of the chamber was obtained, developed from archival materials and tacheometric data (**Fig. 2**). The surface area of the model was 753.35 m^2 and its volume was 898.59 m^3. The model reproduces the basic dimensions and shape of the working; however, its geometry is the result of generalization of the survey data.*

*Integrating the point cloud acquired by terrestrial laser scanning (TLS) with the base solid developed at the LOD 2 level made it possible to create a 3D model at the LOD 3 level (**Fig. 3**). The LOD 3 model takes into account the actual course of the chamber surfaces recorded in the point cloud, while retaining simplifications that yield a functional geometric model. The surface area of the LOD 3 model was 523.28 m^2 and its volume was 436.18 m^3.*

CONCLUSIONS

On the basis of the research carried out, three levels of geometric representation of chamber III/141 – St. John's Chapel in the "Wieliczka" Salt Mine – were developed. The use of models with different levels of detail (LOD) enables a multiscale description of the geometry of the extraction chambers of the "Wieliczka" Salt Mine. The individual LOD levels provide information of differing geometric accuracy and can be used for different spatial analyses.

LOD 1 allows analysis of the distribution of workings at the scale of the entire mine and identification of chamber locations in the local coordinate system. This makes it possible to show the mutual positions of the workings and to analyze the spatial structure of the mine. The

LOD 2 model makes it possible to present the approximate geometry of chambers and to analyze their spatial relationships with the surrounding workings. This level may be particularly useful when high-accuracy survey data are of limited availability, or when developing models covering larger areas of the mine.

The LOD 3 model provides detailed geometric information, allowing accurate documentation of the condition of the working, deformation analysis, and the creation of realistic 3D models of the mine. Detailed models can support the monitoring of the technical condition of workings, as well as activities related to the protection and documentation of historic underground spaces.

The comparison of the LOD 2 and LOD 3 models revealed significant differences in geometric parameters. The surface area decreased from 753.35 m^2 to 523.28 m^2, and the volume from 898.59 m^3 to 436.18 m^3. The greatest influence on the volume difference was the way the chamber roof was represented – simplified in LOD 2 and reproduced from the actual geometry obtained from TLS in LOD 3.

The results indicate that as the level of detail of the model increases, the accuracy of the chamber geometry representation grows, but at the same time the amount of survey data and the complexity of model development also increase. A multilevel approach to 3D modeling therefore makes it possible to adjust the scope and accuracy of the model to the purpose of the analysis and the available survey data.

The presented solution provides a basis for further research covering additional workings with varied geometry, and for the use of repeated TLS measurements and geodetic data to analyze changes in geometry over time. In the longer term, it may become one of the elements in building a spatial model of the mine, developed toward a digital twin.

Keywords: *3D modeling, salt mine, mining chambers, levels of detail (LOD)*

LITERATURA / *REFERENCES*:

- BILJECKI F., LEDOUX H., STOTER J., 2016a, An improved LOD specification for 3D building models, *Computers, Environment and Urban Systems*, 59, 25–37.
- BILJECKI F., LEDOUX H., STOTER J., VOSSELMAN G., 2016b, The variants of an LOD of a 3D building model and their influence on spatial analyses, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 116, 42–54.
- DANOVARO E., DE FLORIANI L., MAGILLO P., PUPPO E., SOBRERO D., 2006, Level-of-detail for data analysis and exploration: A historical overview and some new perspectives, *Computers & Graphics*, 30, 334–344.
- TAN K.H., DAUT D., 2004. A review on level of detail. Proceedings. International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization, CGIV 2004, 70–75.
- WIEWIÓRKA J., CHARKOT J., DUDEK K., GONERA M., 2009, Historic salt mines in Wieliczka and Bochnia, *Geotourism/Geoturystyka*, 18, 61-70
- Archives of the survey and geology department of Kopalnia Soli „Wieliczka” S.A.

PODZIEMNE MAGAZYNOWANIE SUBSTANCJI W KAWERNACH SOLNYCH – POPULARYZACJA WIEDZY W DOBIE TRANSFORMACJI ENERGETYCZNEJ

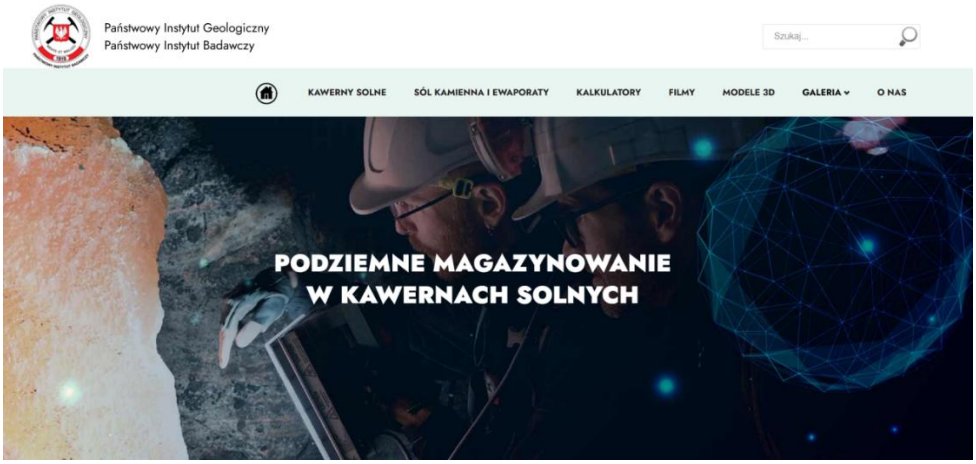
UNDERGROUND STORAGE IN SALT CAVERNS – PROMOTING PUBLIC AWARENESS IN THE CONTEXT OF THE ENERGY TRANSITION

Agnieszka ONISZCZUK[1], Michał SŁOTWIŃSKI[1], Weronika WIELISŁAWSKA[1], Mariusz FIAŁKIEWICZ[1], Marta TOMASZCZYK[1], Marcin OLKOWICZ[1], Marta HODBOD[1], Grzegorz CZAPOWSKI[1], Marta ADAMUSZEK[1]

[1]Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, e-mail agnieszka.oniszczuk@pgi.gov.pl

Kawerny solne stanowią jedno z najbezpieczniejszych i najbardziej praktycznych rozwiązań w zakresie wielkoskalowego magazynowania surowców i nośników energii, takich jak gaz ziemny, ropa naftowa oraz wodór. Ze względu na unikatowe właściwości fizyczne i chemiczne soli kamiennej, kawerny mają coraz większe znaczenie w procesie transformacji energetycznej oraz strategiach zapewnienia bezpieczeństwa surowcowego i energetycznego na świecie. Wysokie ceny paliw kopalnych, konieczność ograniczenia emisji gazów cieplarnianych oraz zmienność produkcji energii z odnawialnych źródeł (OZE) napędzają rozwój nowych technologii oraz projektów związanych z wytwarzaniem i magazynowaniem wodoru. W tym kontekście istotne znaczenie nabiera upowszechnianie wiedzy na temat możliwości i zasad funkcjonowania podziemnych magazynów, w szczególności magazynów wodoru umożliwiających pośrednie magazynowanie nadwyżek energii wytwarzanej z OZE, które mogą bezpośrednio przyczynić się do zwiększenia elastyczności systemu elektroenergetycznego i poprawy bezpieczeństwa energetycznego kraju. W odpowiedzi na tę potrzebę powstała popularnonaukowa strona internetowa poświęcona tematyce podziemnego magazynowania substancji w kawernach solnych: www.pgi.gov.pl/kawerny-solne. Strona powstała jako jeden z elementów projektu realizowanego przez Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy (PIG-PIB) pt. „Wpływ zmienności litologicznej w obrębie pokładu najstarszej soli kamiennej na obszarze Wyniesienia Łeby na geomechaniczną stabilność projektowanych podziemnych magazynów wodoru".

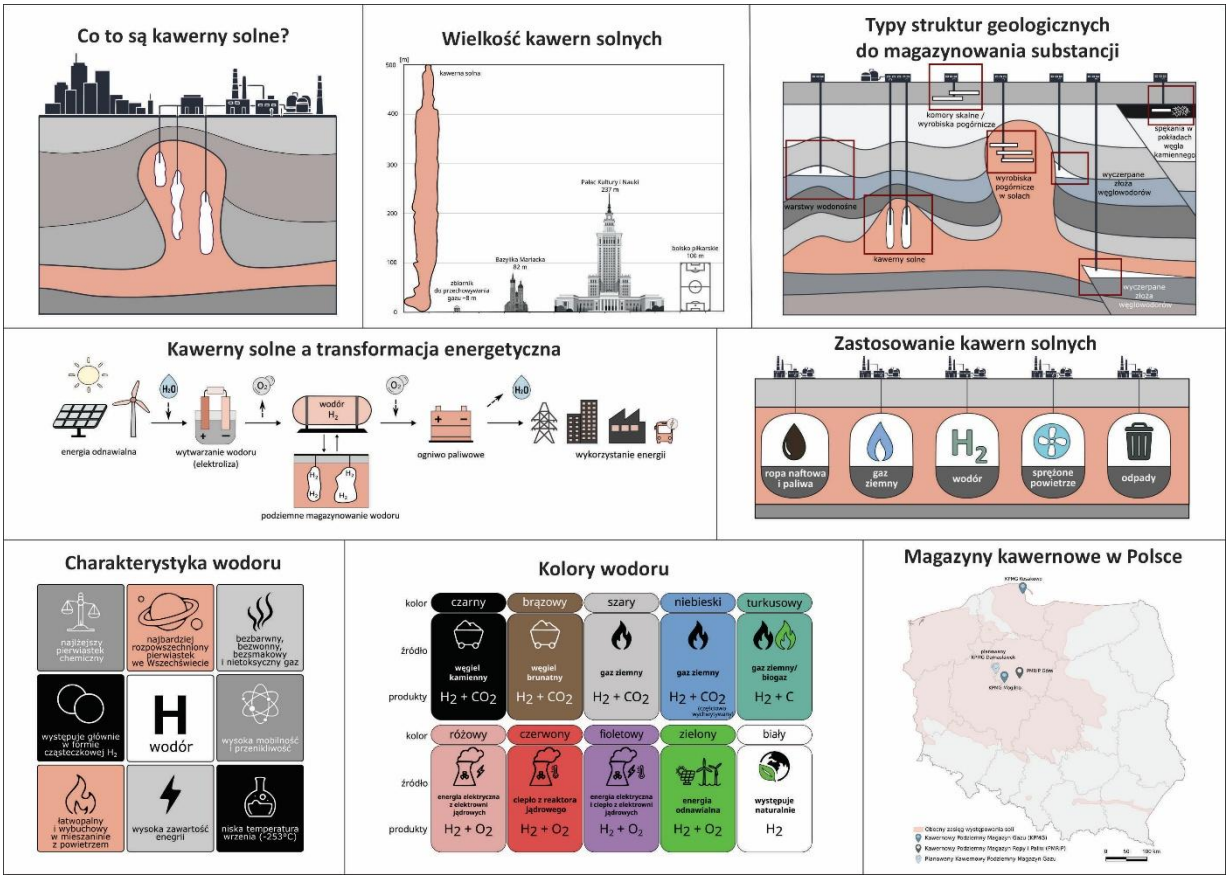
Na stronie internetowej poruszane są najważniejsze zagadnienia związane z podziemnym magazynowaniem substancji, w szczególności w kawernach solnych. Informacje przedstawiono w formie zwięzłych artykułów popularnonaukowych przystępnych dla szerokiego grona odbiorców. Stronę wzbogacono również o kalkulator masy wodoru, galerię zdjęć, modele 3D oraz krótki opis projektu (**Ryc.1**). Poszczególne zagadnienia zostały opracowane przez specjalistów z PIG-PIB oraz ekspertów z innych dziedzin.



Ryc. 1. Strona internetowa – widok główny

Fig. 1. *Website – main view*

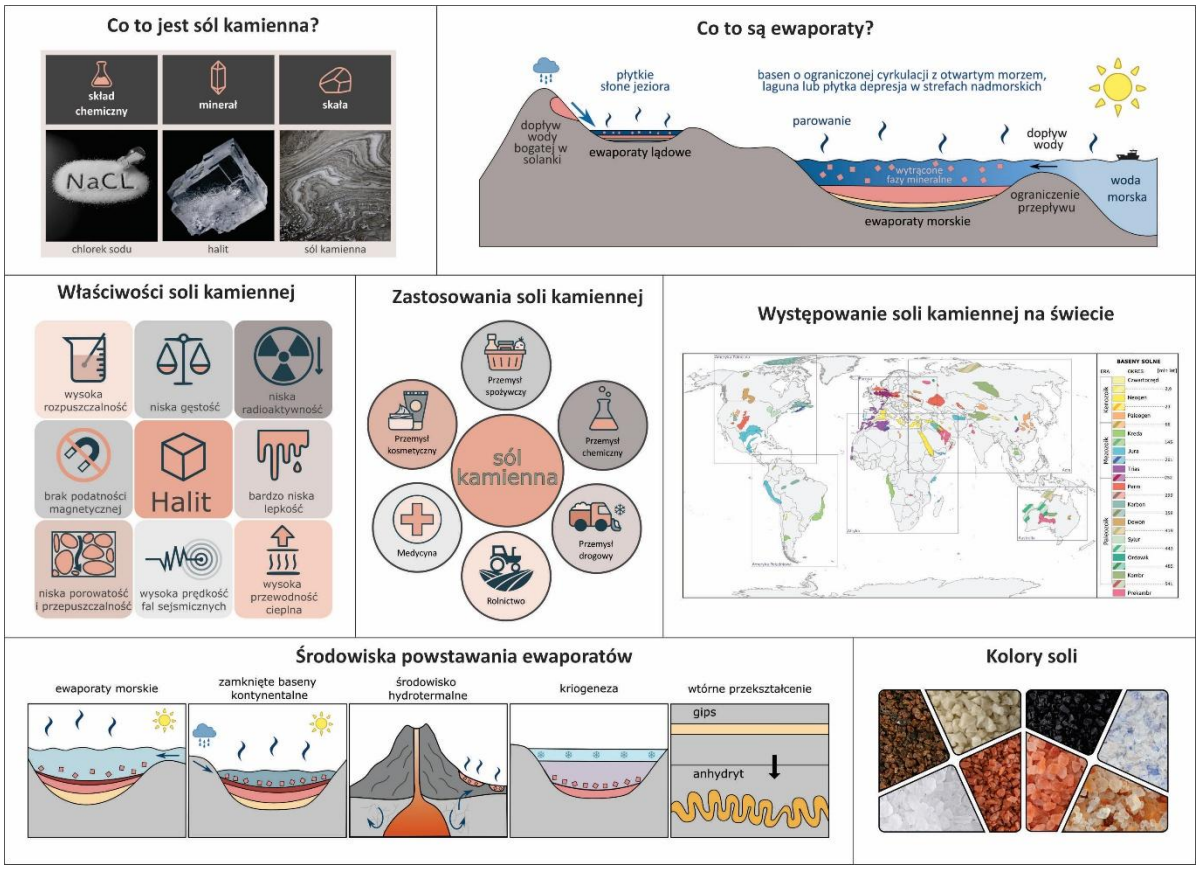
Artykuły podzielono na dwa główne bloki tematyczne: 1) Kawerny solne oraz 2) Sól kamienna i ewaporaty. W części poświęconej kawernom solnym przedstawiono ich charakterystykę, historię wykorzystania, technologię powstawania oraz zagadnienia związane z bezpieczeństwem użytkowania. Omówiono również potencjał kawern w zakresie magazynowania, obecne lokalizacje ich występowania oraz perspektywy rozwoju tego typu magazynów w Polsce i na świecie. Uzupełnieniem tej części są informacje dotyczące innych struktur geologicznych i obiektów podziemnych przydatnych do magazynowania wodoru. Nie zabrakło też tematów związanych z samym wodorem – jego właściwościami, rodzajami, historią wykorzystania, znaczeniem dla gospodarki i możliwymi zastosowaniami (**Ryc. 2**). Zebrane artykuły pozwalają zrozumieć, dlaczego kawerny solne są szczególnie korzystne w kontekście podziemnego magazynowania substancji oraz dlaczego podziemne magazynowanie wodoru zyskuje na znaczeniu w dobie transformacji energetycznej.



Ryc. 1. Widok przykładowych grafik do artykułów związanych z kawernami solnymi

Fig. 2. *Sample articles related to salt cavern convergence.*

Drugi blok został poświęcony tematom związanym z solą kamienną i ewaporatami. Obejmuje on artykuły przedstawiające podstawowe informacje dotyczące m.in. rodzajów i charakterystyki soli oraz skał ewaporatowych, ich zastosowania, a także rozmieszczenia złóż soli w Polsce i na świecie. Zakres tematyczny został poszerzony o zagadnienia związane m.in. z rozwojem struktur solnych, środowiskiem powstawania ewaporatów i przykładową stratygrafią utworów ewaporatowych na obszarze Polski, metodami badań i analiz wykonywanych na solach, a nawet występowanie ewaporatów w kosmosie (**Ryc. 3**).



Ryc. 2. Widok przykładowych artykułów związanych z solą kamienną i ewaporatami

Fig. 3. *Sample articles related to rock salt and evaporites*

Powstała strona internetowa ma stanowić ogólnodostępną bazę wiedzy na temat podziemnego magazynowania substancji w kawernach solnych oraz zagadnień geologicznych i technologicznych z nim związanych. Jej celem jest popularyzacja tej tematyki oraz zwiększanie świadomości społecznej dotyczącej roli podziemnych magazynów w nowoczesnych systemach energetycznych. Dzięki przystępnej formie i zróżnicowanym materiałom strona pełni funkcję edukacyjną i informacyjną, wspierając świadomą debatę na temat znaczenia tego typu obiektów w procesie transformacji energetycznej.

Słowa kluczowe: kawerny solne, podziemne magazynowanie substancji, wodór, transformacja energetyczna, popularyzacja wiedzy

Salt caverns are one of the safest and most practical solutions for the large-scale storage of energy resources and carries, such as natural gas, oil and hydrogen. Due to the unique physical and chemical properties of rock salt, salt caverns are becoming increasingly important in the energy transition process and in strategies to ensure global resource and energy security. High fossil fuel prices, the need to reduce greenhouse gas emissions, and fluctuations in renewable energy production are driving the development of new technologies and hydrogen projects focused on hydrogen production and storage. In this context, promoting public awareness regarding the feasibility and operational principles of underground storage facilities – particularly hydrogen storage, which enables the indirect storage of excess renewable energy – grows increasingly vital to enhancing power grid flexibility and improving national energy security. In response to this need, a popular science website dedicated to the underground storage of substances in salt caverns was created: www.pgi.gov.pl/kawerny-solne. This website was created as part of a project carried out by the Polish Geological Institute – National Research Institute (PGI-NRI), entitled "Impact of lithological variability within the Oldest Halite unit in the Łeba Elevation on the geomechanical stability of prospective underground hydrogen storage".

*The website covers the most critical topics related to underground substance storage, with a particular focus on salt caverns. This information is presented in the form of concise, popular science articles accessible to a wide audience. The website also features a hydrogen mass calculator, a photo gallery, 3D models, and a brief description of the project (**Fig. 1**). These topics were prepared by specialists from the PGI-NRI and experts from other fields.*

*The articles are divided into two main thematic blocks: 1) Salt caverns and 2) Rock salt and evaporites. The section dedicated to salt caverns outlines their characteristics, history of utilization, construction technology, and operational safety aspects. The hydrogen storage potential of salt caverns, their current global and domestic locations, and the future development prospects of such storage facilities are also discussed. This section is supplemented by information on other geological structures and underground facilities suitable for hydrogen storage. Hydrogen related topic was also considered, including its properties, different types, history of use, economic significance, and future applications (**Fig. 2**). The collected articles help explain why salt caverns are particularly advantageous for the underground storage of substances and why underground hydrogen storage is gaining increasing importance in the context of ongoing energy transition.*

*The second section is dedicated to topics related to rock salt and evaporites. It includes articles presenting fundamental information on, e.g., the types and characteristics of salts and evaporite rocks, their applications, as well as the distribution of salt deposits in Poland and worldwide. The thematic scope is further expanded to include topics such as the development of salt structures, the evaporite depositional environments, examples of evaporite stratigraphy in Poland, methods used for the investigation and analysis of salts, and even the occurrence of evaporites in extraterrestrial environments (**Fig. 3**).*

The newly established website is intended to serve as an open-access knowledge base on the underground storage of substances in salt caverns and related geological and technological topics. Its goal is to popularize these topics and raise social awareness regarding the role of underground storage facilities in modern energy systems. Thanks to its accessible presentation of content and diverse range of materials, the website serves both educational and informational purposes, rising public awareness of the importance of such facilities in the energy transition process.

Keywords: *salt caverns, underground storage, hydrogen, energy transition, popularization of knowledge*

ANALIZA CHEMICZNA GIPSU NATURALNEGO

CHEMICAL ANALYSIS OF NATURAL GYPSUM

Aleksandra BASIURA[1,2], Paulina CYRAN[1,3], Karol JOŃCA[1], Piotr SKUBISZ[1], Mateusz ZAJĄC[1]

[1] Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych „CHEMKOP" Sp. z o. o., ul. Józefa Wybickiego 7, 31-261 Kraków, e-mail: aleksandra.basiura@chemkop.pl

[2] Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: basiura@agh.edu.pl

[3] Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: cyran@agh.edu.pl

Wstęp

Gips to minerał z gromady siarczanów o wzorze sumarycznym $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (uwodniony siarczan wapnia). Powstaje przede wszystkim w procesach ewaporacyjnych, w wyniku utleniania minerałów siarczkowych oraz uwodnienia anhydrytu. Teoretyczny skład chemiczny czystego gipsu odpowiada około 32,5% CaO; 46,6% SO_3 i 20,9% H_2O. Skały gipsowe, oprócz dominującego gipsu, mogą zawierać również anhydryt i inne minerały siarczanowe, węglany, takie jak kalcyt, dolomit i aragonit, a także kwarc, hematyt i inne składniki mineralne. Laboratorium Chemiczne Działu Projektowo-Badawczego Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Górnictwa Surowców Chemicznych „CHEMKOP" sp. z o. o. prowadzi badania składu chemicznego skał gipsowych z zastosowaniem metod klasycznych i instrumentalnych.

Analiza składu chemicznego

Analizę chemiczną poprzedza proces odpowiedniego przygotowania i przeróbki skały polegający na jej kruszeniu, uśrednianiu i kwartowaniu oraz mieleniu przy pomocy odpowiednich urządzeń. Uzyskany materiał proszkowy poddaje się oznaczeniu zawartości wody związanej metodą wagową, z wykorzystaniem pieca muflowego do wyprażenia próbki w odpowiednich warunkach. W celu oznaczenia głównych składników próbkę roztwarza się w kwasie solnym, a pozostałość nierozpuszczoną filtruje się przez sączek bibułowy (**Ryc. 1A**). Zawartość składników nierozpuszczalnych w kwasie solnym określa się metodą wagową, po uprzednim spaleniu sączków wraz z zawartością w piecu muflowym (**Ryc. 1B**). Zawartość wapnia oznacza się kompleksometrycznie poprzez miareczkowanie roztworem EDTA w środowisku zasadowym (KOH) w obecności kalcesu. Zawartość siarczanów (VI) określa się metodą wagową po ich wytrąceniu w postaci siarczanu (VI) baru, odsączeniu i prażeniu osadu w piecu muflowym (**Ryc. 1B**).



Ryc. 1. A – stanowisko do sączenia, B – piec muflowy

Fig. 1. *A – filtration station, B – muffle furnace*

Zawartość glinu w przeliczeniu na Al_2O_3, żelaza w przeliczeniu na Fe_2O_3 oraz magnezu w przeliczeniu na MgO oznacza się metodą optycznej spektrometrii emisyjnej z plazmą indukcyjnie sprzężoną (ICP-OES) (**Ryc. 2A**). Metodę spektrometrii ICP-OES wykorzystuje się również do oznaczania pierwiastków śladowych w roztworach uzyskanych po mineralizacji próbek w odpowiednio dobranej mieszaninie kwasów z wykorzystaniem mineralizatora mikrofalowego (**Ryc. 2B**). W obrębie części badanych skał gipsowych obserwowano przypadki ciemnych skupień, co jest charakterystyczne dla przerostów manganowych.

Analiza minerałów węglanowych

Ze względu na możliwość współwystępowania minerałów węglanowych w skałach gipsowych istotnym elementem badań jest również określenie ich zawartości. W celu wyznaczenia ich wagowego udziału w próbce, stosuje się objętościową metodę Scheiblera (**Ryc. 2C**) oraz miareczkowanie odwrotne. Pierwsza metoda polega na odczytaniu objętości wydzielonego dwutlenku węgla w reakcji węglanów zawartych w próbce z kwasem solnym. Z kolei miareczkowanie odwrotne przeprowadza się poprzez potraktowanie próbki nadmiarem kwasu solnego, a następnie odmiareczkowanie tego nadmiaru roztworem NaOH wobec wskaźnika.

Analizy mineralogiczne oraz termiczne

Informacji o składzie mineralnym badanych próbek dostarczyła dyfrakcja rentgenowska (XRD), umożliwiająca identyfikację głównych faz mineralnych występujących w skałach gipsowych. Ponadto wykonano analizę termiczną obejmującą TG, DTG, DTA pozwalającą na obserwację zmian masy próbki oraz efektów cieplnych zachodzących podczas jej ogrzewania. Badania te umożliwiają ocenę kolejnych etapów przemian termicznych składników mineralnych, w tym procesów związanych z utratą wody krystalizacyjnej oraz rozkładem wybranych faz obecnych w próbce. Analizę termiczną uzupełniono o oznaczenie składu produktów gazowych wydzielających się podczas ogrzewania. Badania XRD oraz analizę termiczną wraz z analizą produktów gazowych wykonano we współpracy z AGH.



Ryc. 2. A – spektrometr ICP-OES, B – mineralizator mikrofalowy, C – aparat Scheiblera

Fig. 2. *A – spectrometer ICP-OES, B – microwave digestion system, C – Scheibler apparatus*

Podsumowanie

Zastosowanie zestawu metod klasycznych i instrumentalnych umożliwia oznaczenie składników głównych oraz pierwiastków występujących w mniejszych stężeniach w skałach gipsowych. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do oceny zróżnicowania składu badanych próbek.

Słowa kluczowe: skały gipsowe, gips naturalny, analiza chemiczna, ICP-OES

Introduction

Gypsum is a sulfate mineral with the chemical formula CaSO4·2H2O (hydrated calcium sulfate). It forms primarily through evaporation processes, as well as via the oxidation of sulfide minerals and the hydration of anhydrite. The theoretical chemical composition of pure gypsum corresponds to approximately 32.5% CaO, 46.6% SO3, and 20.9% H2O. In addition to the dominant gypsum, gypsum rocks may also contain anhydrite and other sulfate minerals, carbonates such as calcite, dolomite, and aragonite, as well as quartz, hematite, and other mineral constituents. The Chemical Laboratory of the Design and Research Department at the "CHEMKOP" Research and Development Centre for the Mining of Chemical Raw Materials conducts analyses of the chemical composition of gypsum rocks using both classical and instrumental methods.

Chemical composition analysis

*The chemical analysis is preceded by a process of appropriate rock preparation and processing, involving crushing, homogenization, quartering, and grinding using suitable equipment. The resulting powdered material is subjected to the determination of bound water content via the gravimetric method, using a muffle furnace to ignite the sample under controlled conditions. To determine the major constituents, the sample is digested in hydrochloric acid, and the insoluble residue is filtered through filter paper (**Fig. 1A**). The content of acid-insoluble components is determined gravimetrically after igniting the filter papers and their contents in a muffle furnace (**Fig. 1B**). Calcium content is determined complexometrically by titration with an EDTA solution in an alkaline medium (KOH) using Calces as an indicator. Sulfate content is determined gravimetrically following precipitation as barium sulfate, filtration, and ignition of the precipitate in a muffle furnace (**Fig. 1B**).*

*The contents of aluminum (expressed as Al_2O_3), iron (expressed as Fe_2O_3), and magnesium (expressed as MgO) are determined using inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) (**Fig. 2A**). ICP-OES spectrometry is also used to determine trace elements in solutions obtained after sample mineralization in a suitably selected acid mixture using a microwave mineralization system (**Fig. 2B**). Dark aggregates were observed in some of the gypsum rock samples, a feature characteristic of manganese-rich inclusions.*

Analysis of carbonate minerals

*Given the potential co-occurrence of carbonate minerals within gypsum rocks, determining their content is also a key aspect of the study. To determine their weight fraction in the sample, the volumetric Scheibler method (**Fig. 2C**) and back-titration are employed. The first method involves measuring the volume of carbon dioxide released during the reaction between the carbonates present in the sample and hydrochloric acid. Back-titration, in turn, is performed by treating the sample with an excess of hydrochloric acid and subsequently titrating the excess with an NaOH solution in the presence of an indicator.*

Mineralogical and thermal analyses

Information on the mineral composition of the tested samples was obtained via X-ray diffraction (XRD), which enabled the identification of the major mineral phases present in the gypsum rocks. Additionally, thermal analysis—comprising TG, DTG, and DTA—was performed to observe changes in sample mass and thermal effects occurring during heating. These analyses allow for the assessment of the successive stages of thermal transformation of mineral components, including processes associated with the loss of water of crystallization and the decomposition of specific phases present in the sample. The thermal analysis was supplemented by the determination of the composition of gaseous products evolved during heating. The XRD and thermal analyses, along with the analysis of gaseous products, were conducted in collaboration with AGH.

Summary

The application of a combination of classical and instrumental methods enables the determination of major constituents and trace elements in gypsum rocks. The results obtained provide a basis for assessing compositional variations among the analyzed samples.

Keywords: *gypsum rocks, natural gypsum, chemical analysis, ICP-OES*

ZŁOŻA SOLI POTASOWYCH NA ZACHODZIE UKRAINY I ICH PERSPEKTYWY

POTASH DEPOSITS IN WESTERN UKRAINE AND THEIR PROSPECTS

Andriy POBEREZHSKYY[1], Oksana STUPKA[1]

[1] Instytut Geologii i Geochemi Paliw Kopalnych NAN Ukrainy ul. Naukowa, 3a, Lviv, Ukraina,79060
e-mail: andrij.poberezhskyy@gmail.com, stupkaoksana@gmail.com

Podkarpacie posiada znaczne zasoby soli mineralnych, które stanowią bazę mineralno-surowcową przemysłu agrochemicznego, chemicznego, spożywczego i innych Ukrainy. Te zasoby soli reprezentowane są przez złoża soli potasowych i kamiennych.

Sole potasowe mają strategiczne znaczenie dla Ukrainy i są jedynym źródłem siarczanowanych surowców potasowych do produkcji nawozów niezwykle potrzebnych w rolnictwie. Główne rezerwy soli potasowych skoncentrowane są w regionie Przedkarpackim. Przedkarpacki basen potasonośny ma długość około 120 km (od miasta Borysław do Delatyna) i średnią szerokość 10-15 km, rozszerza się w środkowej części do 30 km (obwód Kałuszski). Znaczna część zasobów soli przemysłowej koncentruje się na głębokości 600-700 m, rzadziej - do 1000 m i więcej.

Przemysłowe złoża soli potasowych związane są z dolnomioceńskim kompleksem molasowym osadów Basenu Przedkarpackiego, który zajmuje obszar depresji Borysławsko-Pokuckiej i Samborskiej. W tym kompleksie znaczną część tworzą złoża solne 2 formacji halogenicznych - Vorotyckiej i Balickiej, z których każda zawiera przemysłowe złoża soli potasowych.

Złoża soli potasowych zlokalizowane są w rejonach Stebnickim-Dowgołuckim, Rosilniańsko-Markowskim i Bolehowskim-Rożniatywskim.

Główna masa skał potasonośnych koncentruje się na obszarze struktury Kałusz-Holińsky, która jest przypisana do zespołu złożowego o tej samej nazwie. Zespól złożowy Kałuszo-Holiński znajduje się w obwodzie iwanofrankowskim u zbiegu rzek Bołochówka i Bereżnica. Szerokość strefy złożowej wynosi 8-10 km, długość 13-15 km, łączna powierzchnia to ok. 140 km^2.

Zasoby zbadanych złóż i powierzchni soli potasowych Przedkarpacia według stanu na 01.01.2012 r. (mld ton) dla kategorii A + B + C_1 wyniosły 2,3 mld ton (w przeliczeniu na K_2O - 0,3), dla kategorii C_2 - 1.9 mld ton (K_2O – 0,2), pozabilansowe – 0,7 mld ton (K_2O – 0,07). Łączne zasoby perspektywiczne i prognozowane soli potasowych w całym zagłębiu solnym wynoszą 3,9 mld ton. Najdokładniej zbadano grupy osadów rejonów Stebnytsia i Kałusz-Holiń. Zasoby soli potasowej w kategorii A +B grupy Kałusz-Holiń stanowią około 40% ich łącznej ilości, a Stebnyckiego tylko 20,5%.

Dla rozwoju przemysłu potasowego Ukraina ma potężną bazę surowcową. Całkowite zasoby soli potasowych wynoszą 4 mld 263 mln ton (457 mln ton w przeliczeniu na K_2O), zasoby perspektywiczne i prognozowane – 3,9 mln t. Pomimo istniejącego zapotrzebowania na nawozy potasowe i sprzyjających warunków surowcowych, przemysł potasowy naszego kraj jest na skraju całkowitego upadku.

Głównym zadaniem ożywienia wydobycia soli potasowych na Ukrainie jest ocena dostępnych zasobów soli w regionie Przedkarpackim, perspektyw ich ekspansji w oparciu o kryteria wyszukiwania i nowe dane dotyczące budowy geologicznej, przedstawienie zaleceń dotyczących poprawy metodologii i kierunku poszukiwań i prace poszukiwawcze.

Do tego jest konieczne:

- analiza wyników wszystkich prac poszukiwawczych i innych dla różnych rodzajów kopalin prowadzonych w regionie Przedkarpackim;
- szczegółowe zbadanie materiałów geologicznych i geofizycznych związanych z odkrytymi złożami i obszarami soli potasowych i kamiennych;
- analiza wskaźników jakościowych złóż soli kamiennej i potasowej.

Precarpathian region has considerable resources of mineral salts that form a raw-materials base for agricultural-chemical, chemical, food and other branches of industry of Ukraine. These salt resources are represented by the fields of potassium and rock salt.

Potassium salts are strategically important for Ukraine and are known to be a single source of sulphate potassium raw materials for production of fertilizers necessary for agriculture. Main reserves of potassium salts are concentrated in the Precarpathian region. The Precarpathian potassium bearing basin is about 120km long from the north-2west to the south-east (from Boryslav town to Deliatyn), 10-15 km wide, and is broadened up to 30 km (Kalush region) in the middle part. A considerable part of industrial reserves of salts is concentrated at a depth of 600-700 m, rarely: up to 1000 m and more.

Industrial deposits of potassium salts are connected with the Lower Miocene molasse complex of sediments of Precarpathian basin that occurs in the territory of Boryslav-Pokuttia and Sambir zones of the deep. In this complex, a considerable part of the section is formed by salt-bearing deposits of two halogen formations: Vorotyshchenska and Balytska ones, each of them containing industrial deposits of potassium salts.

Deposits of potassium salt are localized within the bounds of Stebnyk-Dovholuka-Rosilna -Markove and Bolekhiv-Rozhniativsky are regions.

The bulk of the objects of potassium ores is concentrated in the area of Kalush-Holynska structure that is singled out into the ore region of the same name.

According to categories A +B+C_1, reserves of explored fields and areas of potassium salts of Precarpathian region came to 2.3 bln. t (recounting on K_2O – 0.3), according to category C_2 – 1.9 bln.t (K_2O – 0.2 overbalanced – 0.7 bln.t (K_2O – 0.07). Total perspective and estimated resources of potassium salts in the whole salt-bearing basin are 3.9 bln.t. The Stebnyk and Kalush-Holynska group of fields were explored in detail. Reserves of potassium ore of A +B categories of the Kalush-Holynska group of deposits account about 40% of their total amount, and Stebnyk one: 20,5%.

The Ukraine has a massive ore base for the development of potassium industry. Despite the existing necessity in potassium fertilizers and favorable ore conditions, potassium industry of our country is on the brink of full decay.

Estimates of available salt resources in the Precarpathian basin, prospects for their growth on the basis of exploring criteria and new data on geological structure, the improvement of methods and trends of exploring-prospecting works is the basic task for regeneration of the production of potassium ores in Ukraine.

For this purpose, it is necessary:

- *To analyze materials of all exploring-prospecting and other works for different kind of minerals conducted in the Pracarpathian region.*
- *To study geological and geophysical materials as to depicted fields and areas of potassium and rock salts.*
- *To analyze qualitative indicators of deposits of rock and potassium salt.*

Referat będzie opublikowany w formie artykułu w Przeglądzie Solnym 2026

Full text will be published in Salt Review 2026

WYSTĘPOWANIE TRIASOWYCH SOLI KAMIENNYCH W POŁUDNIOWO-ZACHODNIEJ I CENTRALNEJ POLSCE

OCCURRENCE OF THE TRIASSC ROCK SALTS IN THE SOUTH-WESTERN AND CENTRAL POLAND

Jacek CHEŁMIŃSKI[1], Łukasz NOWACKI[1], Marta HODBOD[1], Grzegorz CZAPOWSKI[1]

[1]Państwowy Instytut Geologiczny-Państwowy Instytut Badawczy, Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa;
e-mail: jacek.chelminski@pgi.gov.pl

Utwory solne okresu triasowego w Polsce budują **kompleks skał osadowych,** obejmujący **pokłady soli kamiennej przewarstwione iłowcami i mułowcami z domieszką dolomitu i anhydrytu oraz dolomitem z anhydrytem** (Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2016). Sedymentacja ewaporatów w triasie występowała w dwóch interwałach czasowych: dolnym triasie (górny pstry piaskowiec, piętro olenek, dawniej ret) oraz w późnym triasie (górny trias, dawniej kajper, piętro karnik).

Sole kamienne dolnego triasu występują na obszarze monokliny przedsudeckiej oraz w pojedynczych lokalizacjach na terenie województwa wielkopolskiego, pomorskiego, zachodniopomorskiego i łódzkiego. Zrejestrowano ich występowanie w profilach 62 otworów wiertniczych na głębokości 701-2847 m, a ich miąższość waha się od 2 m do 38 m.

Z kolei sole kamienne górnego triasu występują na obszarze centralnej Polski na terenie województw: wielkopolskiego, zachodniopomorskiego, łódzkiego i kujawsko-pomorskiego. Obecność ich udokumentowano w profilach 49 otworów wiertniczych na głębokości 930-3581 m, a ich miąższość waha się od **2,5 m do ponad 206 metrów**.

Słowa kluczowe: sole kamienne triasu, występowanie, Polska

*The Triassic rock salt deposits in Poland formed **the sedimentary deposits complexes**, including **halite layers interbedded by claystones and siltstones with dolomite and anhydrite admixtures as well as dolomite with anhydrite layers** (Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2016). Triassic evaporite sedimentation occurred during two periods: in late Lower Triassic (Upper Buntsandstein, Rethian, Olenekian stage).*

The Lower Triassic salts occur in the Fore-Sudetic Monocline area and in single locations in areas of Wielkopolska, Pomerania, West Pomerania and Łódź provinces They were found in 62 boreholes at the depth interval from 701m to 2847 m and their thickness varies from 2 m to 38 m.

*The Upper Triassic halites were hitherto found in the central Poland area, in Wielkopolska, West Pomerania, Łódź and Kujavy-Pomerania provinces. They were registered in 49 boreholes at the depth interval from 930 m to 3581 m and their thickness changes from **2,5 m to more than 206 m**.*

***Keywords**: Triassic rock salts, occurrence, Poland*

LITERATURA/*REFERENCES:*

- CZAPOWSKI G., TOMASSI-MORAWIEC H., 2016 - Baseny solne triasu na obszarze Polski. Przegląd Solny (Salt Review), 12: 51-55. Kraków.

WYKORZYSTANIE MODUŁU „STATYSTYKA” OPROGRAMOWANIA GEOSTAR DO INTERPRETACJI DANYCH STRUKTURALNYCH

APPLICATION OF THE GEOSTAR "STATISTICS" MODULE TO INTERPRET STRUCTURAL DATA

Jacek CHEŁMIŃSKI[1], Łukasz NOWACKI[1], Mirosław LUDWINIAK[1], Anna GŁOWACKA[1]

[1]Państwowy Instytut Geologiczny, Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa;
e-mail: jacek.chelminski@pgi.gov.pl

Użytkowana do 2020 roku baza danych Geostar, której podstawowym zadaniem było przedstawienie budowy geologicznej w punkcie dokumentacyjnym (profilu) na Niżu Polskim została rozbudowana o moduł uwzględniający opis budowy geologicznej starszego podłoża rejonów wyżynnych i górskich.

Moduł posiada atrybuty umożliwiające opis geologiczny oraz lokalizacje punktów, przynależność do jednostki tektonicznej, nazwę wydzielenia, określenie wieku skał, jej typów, miąższości ławic itp. Jednocześnie moduł tektonika punktu dokumentacyjnego zawiera elementy opisu skał, położenia warstw, orientacji fałdów, uskoków, nasunięć oraz spękań.

Posiadając powyższe dane zapisane w module „starszego podłoża” zaprojektowano i utworzono „moduł statystyczny”, który korzystając z danych geologicznych zgromadzonych w bazie Geostar umożliwia ich wizualizację w formie diagramów kołowych (np. konturowych, punktowych, rozetowych, łukowych, Angeliera) skonstruowanych na bazie siatki stereograficznej. Taka forma przedstawienia danych geologicznych (np. tektonicznych, sedymentologicznych) umożliwia analizę jakościową i ilościową opracowywanych parametrów z uwzględnieniem ich orientacji przestrzennej, co jest bardzo istotne w kontekście późniejszej interpretacji danych umożliwiając m.in. wykonanie rekonstrukcji niektórych procesów geologicznych.

Jednocześnie moduł umożliwia interpretację danych zewnętrznych (.xls, .csv), które nie są zapisane w bazie danych Geostar (**Tab.1**)

Database Geostar, being used until 2020 and primarily designed to present the geological structure for documenting well profiles drilled in the Polish Lowlands, has been expanded to include a module that accounts for the description of the geological structure of the older basement in upland and mountainous regions.

The features of module attributes enable to record - among others - the following data: the geological description and location of recording points, tectonic unit affiliation, the name of each geological unit, the rock age definition, rock types and bed thickness. At the same time, the tectonics module of the documented point includes elements describing rocks as: layer attitudes (bedding orientation) as well as orientation of folds, faults, overthrusts, and fractures.

Using the data stored in the "older basement" module, a "statistical module" was designed and created; this module utilizes geological data from the Geostar database to visualize them via various diagrams (e.g., contour, point, rose, arc, and Angelier plots) constructed on a stereographic grid. Presenting geological data (such as tectonic or sedimentological information) in this manner allows for the qualitative and quantitative analysis of parameters with regard to their spatial orientation—a crucial factor for subsequent data interpretation, as it enables, among other things, the reconstruction of specific geological processes.

*At the same time, the module supports the interpretation of external data files (.xls, .csv) that are not stored in the Geostar database (**Tab. 1**).*

Tab. 1. Przykładowy zapis danych geologicznych z wykorzystaniem modułu „starszego podłoża”

***Tab. 1**. The exemplified records of geological data using the „older basement” module*

Lokalizacja/location:
Kacwiński Potok

data: 2015.07.03

nr punktu / *number*	Litologia / *lithology*	Foto / *photo*	Położenie warstw / *bedding*				Fałdy / *folds*					Uskoki / *faults*							Spękania / *fractures*						Uwagi / *remarks*
												Powierzchnia/ *plane*			Rysy/ *striae*										
			Bieg / *strike*	Upad / *dip*	Kierunek zapadania / *sense*	Normalne / *normal* odwrócone / *overturned*	Rodzaj / *type*	Skrzydła / *limbs*	Oś / *axis*	płaszczyzna środkowa/ *bisecting plane*	kąt zbieżności / *interlimb angle*	Bieg / *strike*	Upad / *dip*	kierunek zapadania / *sense*	Azymut / *azimuth*	Kąt zanurzania / *plunge*	Typ / *type*	wielkość przemieszczenia (cm) / *displacement*	Bieg / *strike*	Upad / *dip*	Kierunek zapadania / *sense*	charakter powierzchni / *surface character*	drobne struktury spękaniowe / *small brittle structures*	Mineralizacja / *mineralization*	
45	piaskowce średnioławicowe, łupki	45_1-2	160	6	S	n	-	-	-	-	-	90	60	N	0	60	n	50	-	-	-	-	-	-	rysy silnie zniszczone
46	piaskowce drobno i średnioławicowe, łupki	46_1-3	150	10	S	n	-	-	-	-	-	78	68	N	350	68	n	25	120	86	N	nierówna	-	-	odsł. ciągłe 15 m
46	piaskowce drobno i średnioławicowe, łupki	46_1-3	150	10	S	n	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	155	78	N	równa, gładka	szereg kulisowy prawo-skrętny	$CaCO_3$	-
46	piaskowce drobno i średnioławicowe, łupki	46_1-3	150	10	S	n	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35	86	S	równa, gładka	spękania typu R	$CaCO_3$	-
47	piaskowce średnioławicowe	47_1-2	95	20	N	n	antyklina	95/20 Nn	96/1	98/89N	135	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	amplituda fałdu +/- 1m
47	piaskowce średnioławicowe		100	25	S	n		100/25Sn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	piaskowce średnioławicowe, łupki	48_1-5	82	80	N	o	-	-	-	-	-	+/-80	+/-50	N	-	-	o	?	-	-	-	-	-	-	lokalne zaburzenia przyuskokowe (warstwy w położeniu odwróconym); uskok słabo czytelny

REAKTYWNOŚĆ GEOCHEMICZNA WODORU W KAWERNACH SOLNYCH CECHSZTYNU: EKSPERYMENTY REAKCJI WSADOWYCH

GEOCHEMICAL REACTIVITY OF HYDROGEN IN ZECHSTEIN SALT CAVERNS: BATCH REACTION EXPERIMENTS

Marianna SKUPINSKA[1], Katriona EDLMANN[1], Rachel BRACKENRIDGE[2], Victoria SPOONER[3], Andrew KILPATRICK[1]

[1] University of Edinburgh, UK; 2 University of Aberdeen, UK; 3 SSE Thermal, UK
email: marianna.skupinska@ed.ac.uk

Wytworzenie wielkoskalowych podziemnych magazynów wodoru jest kluczowe dla bilansowania popytu na energię. Ze względu na niską przepuszczalność i wysoką stabilność, kawerny solne stanowią najbardziej dojrzałą technologicznie opcję magazynowania. Choć halit jest geochemicznie obojętny, nierozpuszczalne minerały siarczanowe i ilaste kumulują się na dnie kawern, tworząc rząpie (ang. sump), które mogą wchodzić w reakcje z wodorem. W ramach niniejszej pracy przeprowadzono 35-dniowe eksperymenty reakcji wsadowych w reaktorach Parr (58 °C, 100 bar H_2/N_2), wykorzystując rdzenie z cechsztyńskich utworów ewaporatowych. Ekspozycja na wodór doprowadziła do znaczącego spadku potencjału redoks (Eh), jednak wartości pH oraz stężenia siarki i siarczanów pozostały stabilne. Wyniki wskazują na ograniczoną reaktywność geochemiczną próbek w badanych warunkach abiotycznych.

Słowa kluczowe: kawerny solne, magazynowanie wodoru, geochemia, eksperymenty

Global hydrogen demand is projected to increase five- to seven-fold by 2050, reaching 500-800 Mt/year. This creates an urgent requirement for large-scale, subsurface energy storage to balance seasonal supply and demand. Salt caverns are currently the most technologically mature option (TRL 9) for underground hydrogen storage due to their low permeability, effective containment, and the ability to withstand repeated injection and withdrawal cycles. In the UK, hydrogen has been stored in salt caverns since the 1970s (e.g., Teesside), primarily for chemical manufacturing rather than energy storage. However, future demand for underground hydrogen storage is expected to scale from 1-2.5 TWh/year by 2030 to ~49 TWh/year by 2050.

While halite (NaCl) walls are largely geochemically inert, evaporite sequences are commonly heterogeneous, often containing sulphate-bearing minerals (e.g., anhydrite, polyhalite) and clays. During cavern leaching, these insoluble components accumulate at the base to form a cavern sump. The sump represents a localised zone of enhanced fluid-rock interaction. Under high-pressure hydrogen exposure, reducing conditions could facilitate reactions such as microbial or abiotic (geochemical) sulphate reduction, generating hazardous H_2S gas. This would compromise gas quality and complicate cavern operations. Despite these risks, the geochemical behaviour of heterogeneous sump systems remains poorly constrained. This study uses real Zechstein core samples as a cavern proxy to investigate potential fluid-rock-gas interactions, focusing on pH, redox potential (Eh), and sulphur/sulphate dynamics.

Experimental approach

Batch reaction experiments were conducted using a high-pressure Parr reactor. Each system contained 5 g of insoluble sump material and 150 mL of sump brine. The reactors were maintained at 58 °C and pressurised to 100 bar H_2 and N_2 to simulate realistic cavern conditions. Two configurations were operated in parallel: a hydrogen-exposed system and an inert nitrogen control reference.

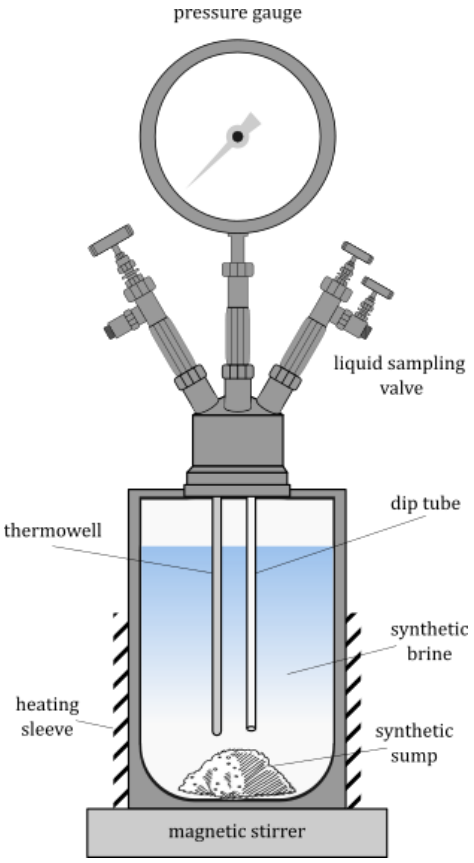
*The experimental setup is illustrated in **Fig. 1**. Reactors were equipped with a thermowell, a gas-release valve, and a dip tube connected to a sampling valve, allowing fluid extraction without opening the main reactor vessel. Continuous heating and intermittent magnetic stirring were maintained throughout.*

Fluid samples collected at defined intervals were analysed for pH and Eh. Elemental and ionic concentrations were determined using inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) and ion chromatography (IC) to monitor potential sulphate reduction. A parallel experimental series using a sealed, non-sampled configuration is currently underway to assess whether fluid withdrawal or sampling disturbances influenced the primary results.

Results and discussion

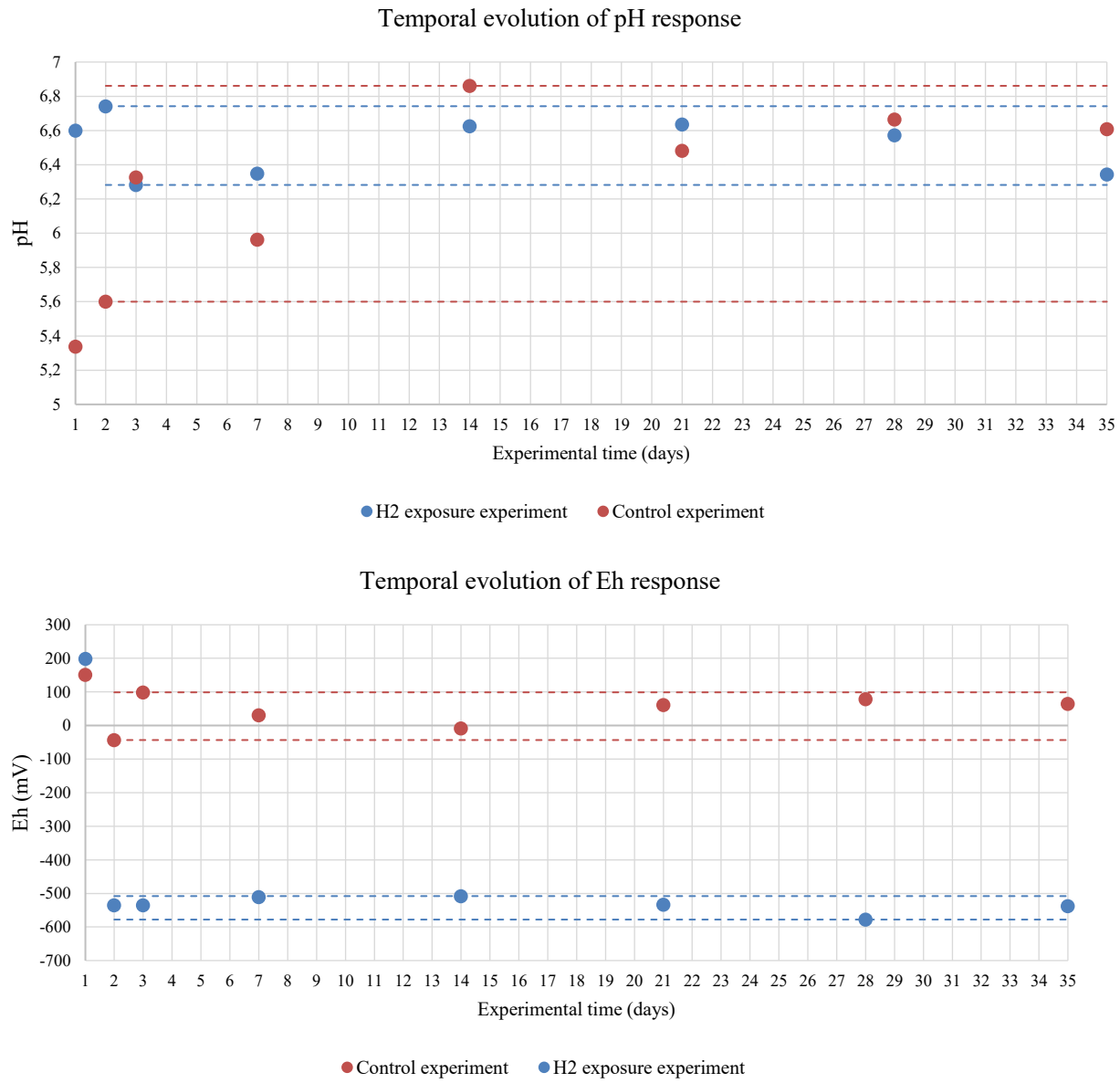
*Over the 35-day H_2 exposure period, limited differences in measured geochemical parameters were observed between the hydrogen-exposed and control systems. The most pronounced difference was observed in redox potential. Eh decreased substantially in the H_2-exposed reactor relative to the nitrogen control, indicating the development of more reducing conditions under hydrogen exposure (**Fig. 2**).*

Despite this change in redox conditions, pH showed broadly comparable temporal behaviour in the H_2-exposed and N_2 control systems. Other kinetic curves also showed similar trends between the two experiments, with no pronounced divergence developing over the experimental period.



Ryc. 1. Układ doświadczalny do prowadzenia eksperymentów reakcji wsadowych

***Fig. 1**. Experimental setup for batch reaction experiments*



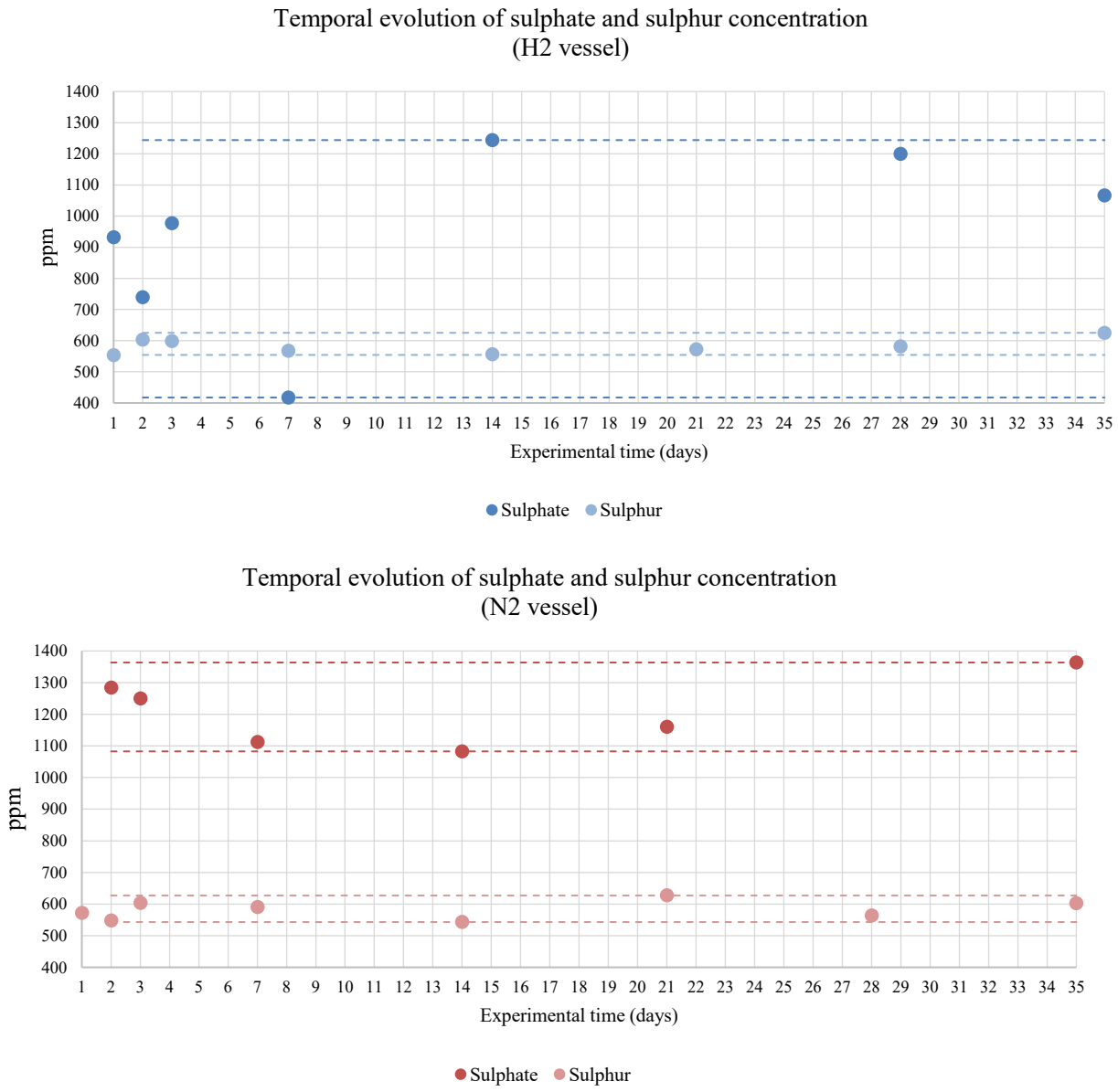
Ryc. 2. Zmiany wartości pH i Eh w systemie eksponowanym na H2 oraz kontrolnym układzie z N2 podczas 35-dniowego eksperymentu reakcji wsadowych

***Fig. 2**. Evolution of pH and Eh in the H2-exposed and N2 control systems during the 35-day batch reaction experiment*

*The measured sulphur and sulphate concentrations did not show a clear difference between the H_2-exposed and N_2 control systems over the 35-day experimental period (**Fig. 3**). No systematic sulphate depletion accompanied by an increase in dissolved sulphur was observed in the H_2-exposed system relative to the control. Within the analytical resolution of the measurements, the data therefore provide no clear evidence for substantial sulphate reduction during the experiment.*

The limited divergence between the systems suggests that 35 days of hydrogen exposure did not extensively modify the aqueous geochemistry. While hydrogen successfully altered the redox environment (Eh), this shift was not accompanied by corresponding changes in pH or sulphur-sulphate behaviour that would indicate substantial reaction of the sump material.

Identifying this stability is vital for storage operators, as the sump represents the most chemically diverse and potentially reactive zone within a salt cavern asset.



Ryc. 3. Zależność między stężeniami rozpuszczonej siarki i siarczanów w systemie eksponowanym na H2 oraz kontrolnym układzie z N2 podczas 35-dniowego eksperymentu reakcji wsadowych

***Fig.* 1.** Relationship between dissolved sulphur and sulphate concentrations in the H2-exposed and N2 control systems during the 35-day experiment

Conclusions

Abiotic (geochemical) batch reactions simulating Zechstein salt cavern conditions demonstrate that 35 days of high-pressure hydrogen exposure significantly lowers brine redox potential (Eh) but induces limited macro-geochemical reactivity. The stable pH and sulphur-sulphate trends provide no evidence of rapid sulphate reduction. Ongoing, non-sampled experiments will further clarify the impacts of sampling disturbances, ultimately establishing a robust geochemical baseline for risk-assessing insoluble sump interactions during large-scale underground hydrogen storage.

***Keywords**: salt caverns, hydrogen storage, geochemistry, experiments*

MODELOWANIE GEOMECHANICZNE KAWERN SOLNYCH W ŚRODOWISKU COMSOL MULTIPHYSICS

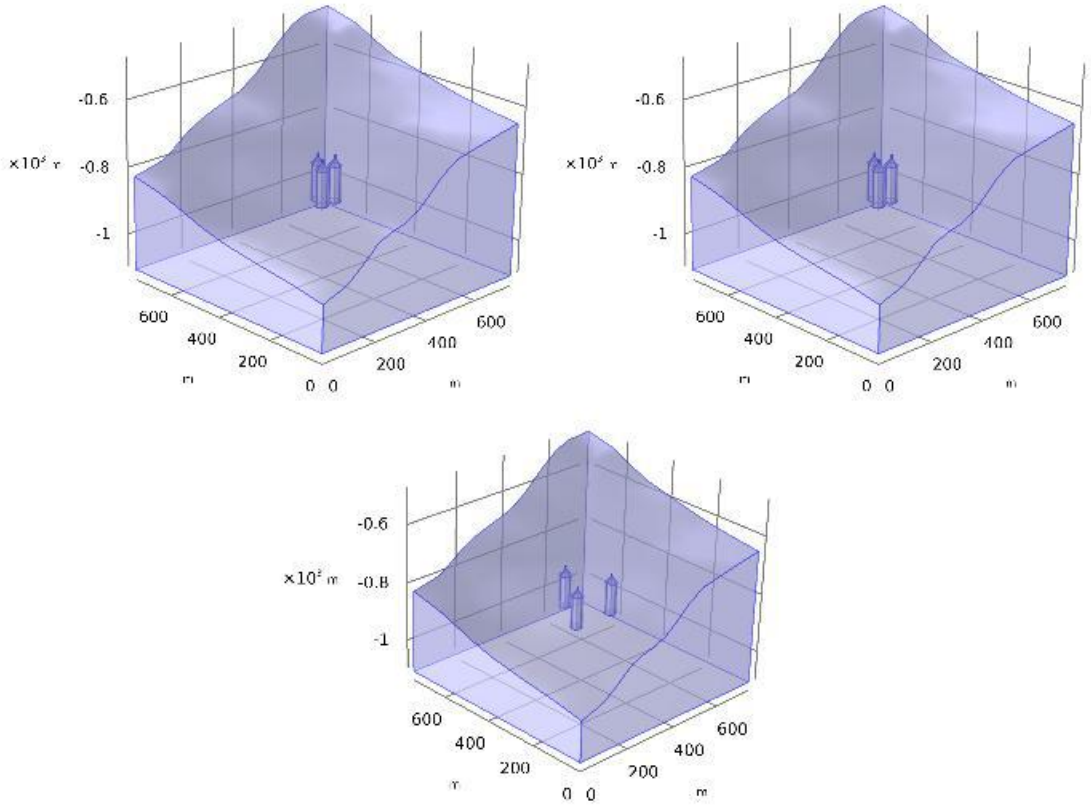
GEOMECHANICAL MODELING OF SALT CAVERNS USING COMSOL MULTIPHYSICS

Mariusz CHROMIK[1], Małgorzata GIEREK[1], Piotr SKUBISZ[1], Tomasz NOWAK[1], Tomasz KOSOWSKI[1]

[1]Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych „CHEMKOP" Sp. z o. o., ul. Józefa Wybickiego 7, 31-261 Kraków, e-mail: mariusz.chromik@chemkop.pl

W niniejszej pracy skoncentrowano się na wykorzystaniu modelowania numerycznego w środowisku COMSOL Multiphysics do oceny stateczności komór magazynowych oraz otaczającego je górotworu. Oprogramowanie umożliwia prowadzenie analiz zarówno dla pojedynczych komór, jak i układów wielokomorowych, a także uwzględnia długotrwałe zmiany zachodzące w górotworze solnym. Modelowanie geomechaniczne może dzięki temu stanowić narzędzie wspomagające ocenę przyjętych rozwiązań projektowych oraz porównywanie alternatywnych wariantów geometrii i warunków eksploatacyjnych magazynu.

Przedstawiony na posterze przykład badawczy obejmuje układ trzech komór magazynowych, rozmieszczonych w układzie trójkąta równobocznego. Analizę przeprowadzono dla trzech rozstawów komór, wynoszących 50, 100 i 150 m przedstawionych na rycinie 1.



Ryc. 1. Model geometryczny dla trzech rozstawów komór, wynoszących 50, 100 i 150 m (materiał własny)

Fig. 1. *Geometric model for three cavern spacings of 50, 100, and 150 m (own work)*

Dla każdego wariantu geometrycznego rozpatrzono zróżnicowane warunki ciśnieniowe odpowiadające komorom wypełnionym solanką, ropą naftową, gazem ziemnym oraz niesprężonym powietrzem, reprezentującym stan komory pustej przedstawione w tabeli 1. Zastosowanie różnych kombinacji warunków ciśnieniowych w sąsiadujących komorach pozwoliło przeanalizować ich wzajemne oddziaływanie oraz wpływ zmian ciśnienia na zachowanie przestrzeni międzykomorowej i otaczającego górotworu.

Tab. 1. Warianty obliczeniowe analizowanego układu (materiały własne)

Tab. 1. *Calculation variants for the analyzed system (own work)*

Medium/gradient ciśnienia *Medium/pressure gradient*	50 m	100 m	150 m
Solanka – 0,01177 MPa/m *Brine*	S50	S100	S150
Gaz ziemny – 0,0184 MPa/m *Natural gaz*	G50	G100	G150
Ropa naftowa – 0,008436 MPa/m *Crude oil*	R50	R100	R150
Powietrze – 0,0000114 MPa/m *Air*	P50	P100	P150

Modelowanie przeprowadzono w funkcji czasu, przyjmując trzyletni okres analizy. Szczególną uwagę zwrócono na zmiany wybranych parametrów geomechanicznych w charakterystycznych punktach zlokalizowanych na ociosach komór. Pierwszy punkt to P1 (strop szyi komory) położony na styku szyi komory z ostatnią cementowaną kolumną rur. Jest to obszar szczególnie istotny z punktu widzenia integralności i szczelności połączenia otwór-komora. Drugim punktem jest P2 (spąg szyi komory) zlokalizowany w miejscu przejścia pionowego ociosu szyi w ocios kopuły komory. Występuje tu znaczna zmiana nachylenia powierzchni ociosu, mogąca powodować lokalną koncentrację naprężeń. Trzecim punktem jest P3 (przejście kopuły w pionowy ocios komory) zlokalizowany w miejscu kolejnej istotnej zmiany geometrii ociosu – przejścia powierzchni kopuły w zasadniczy, prawie pionowy ocios komory. Dla poszczególnych wariantów przeanalizowano przebieg tych zmian w czasie, co umożliwiło bezpośrednie porównanie zachowania układu komora–filar–komora przy różnych szerokościach filara oraz odmiennych warunkach ciśnieniowych. Do oceny stateczności analizowanego układu zastosowano dwa wskaźniki:

- **SF (Safety Factor)** – współczynnik bezpieczeństwa związany z progiem dylatancji (**SF > 1,5** – warunek bezpieczny),
- **SSR (Strength-Stress Ratio)** – wskaźnik wytężenia oparty na kryterium Coulomba–Mohra (**SSR > 3,0** – warunek bezpieczny).

Uzyskane wyniki umożliwiły porównawczą ocenę wpływu geometrii układu oraz warunków pracy komór na ich wzajemne oddziaływanie i stateczność górotworu. Zestawienie przebiegów czasowych w wybranych punktach pozwoliło ocenić, w jakim stopniu zmiana szerokości filara oraz kombinacji ciśnień w sąsiadujących komorach wpływa na odpowiedź geomechaniczną analizowanego układu. Modelowania potwierdzają zasadność stosowania szyi komory. Punkty P1 i P2 są zlokalizowane w dwóch sąsiednich strefach zmiany geometrii. Brak szyi powodowałby ich przestrzenne zbliżenie, a w konsekwencji nakładanie się stref koncentracji naprężeń i większe wytężenie górotworu w rejonie stropu komory. Największe wartości wytężenia występują bezpośrednio na ociosie komory, gdzie zlokalizowano punkty P2. Już w niewielkiej odległości od ociosu wartości SF i SSR są korzystniejsze, co dobrze widać na mapach rozkładu. Obszary, w których kryteria spadają poniżej wartości progowych, mają charakter lokalny i

ograniczony przestrzennie. Lokalne przekroczenie kryteriów nie musi oznaczać utraty stateczności całej komory. Zgodnie z obserwacjami eksploatacyjnymi w takich miejscach może dochodzić do wykruszania się górotworu i stopniowego kształtowania bardziej regularnego, korzystniejszego geomechanicznie konturu komory. Taką interpretację przyjęto również w analizie danych rzeczywistych, gdzie miejscowe przekroczenia w rejonie szyi, kopuły i nieregularności ociosu wiązano z lokalnym niszczeniem i korektą kształtu, a nie z utratą globalnej stateczności. Najbardziej wrażliwe są miejsca gwałtownej zmiany geometrii komory – strop szyi, spąg szyi oraz przejście kopuły w pionowy ocios. Taki dobór punktów P1–P3 jest więc uzasadniony zarówno geometrią modelu, jak i obserwowanym rozkładem kryteriów SF i SSR.

Badania wykazały, że rozstaw komór i warunki ciśnieniowe istotnie wpływają na stateczność układu komór i filarów międzykomorowych, modelowanie 3D pozwala ocenić wzajemne oddziaływanie komór oraz wskazać najbardziej niekorzystne warianty ich pracy a kryteria SF i SSR są użytecznym narzędziem do weryfikacji geometrii komór i założeń projektowych przed eksploatacją.

Przedstawiony przykład badawczy pokazuje możliwości zastosowania COMSOL Multiphysics jako narzędzia wspomagającego projektowanie podziemnych magazynów ropy naftowej i paliw w złożach soli kamiennej. Modelowanie numeryczne umożliwia analizę wzajemnego oddziaływania sąsiednich komór, ocenę wpływu szerokości filarów międzykomorowych oraz porównanie różnych scenariuszy pracy magazynu przed rozpoczęciem jego eksploatacji. Szczegółowe wyniki porównania rozpatrywanych wariantów oraz wynikające z nich wnioski projektowe stanowią główny przedmiot prezentowanego referatu.

Słowa kluczowe: COMSOL Multiphysics, kawerny solne, geomechanika

This study focuses on the use of numerical modeling in the COMSOL Multiphysics environment to assess the stability of storage caverns and the surrounding rock mass. The software enables analyses of both individual caverns and multi-cavern systems, while also accounting for long-term changes occurring in the salt rock mass. Geomechanical modeling can therefore serve as a tool to support the assessment of the adopted design solutions and the comparison of alternative cavern geometries and storage operating conditions.

The research example presented on the poster comprises a system of three storage caverns arranged in an equilateral triangle configuration. The analysis was carried out for three cavern spacings of 50, 100, and 150 m, as shown in Figure 1.

For each geometric configuration, different pressure conditions were considered, corresponding to caverns filled with brine, crude oil, natural gas, and uncompressed air representing an empty cavern, as presented in Table 1. The application of different combinations of pressure conditions in adjacent caverns made it possible to analyze their mutual interaction and the influence of pressure changes on the behavior of the inter-cavern rock pillar and the surrounding rock mass.

The modeling was performed as a function of time, assuming a three-year analysis period. Particular attention was paid to changes in selected geomechanical parameters at characteristic points located along the cavern walls. The first point, P1 (cavern neck roof), is located at the junction between the cavern neck and the last cemented casing string. This area is particularly important from the perspective of the integrity and tightness of the well–cavern connection. The second point, P2 (cavern neck floor), is located at the transition from the vertical wall of the cavern neck to the wall of the cavern dome. A significant change in the inclination of the cavern wall occurs at this location, which may result in local stress concentration. The third point, P3 (transition from the dome to the vertical cavern wall), is located at another significant change in cavern geometry, namely the transition from the dome surface to the main, nearly vertical cavern wall. For each variant, the evolution of these changes over time was analyzed, enabling a direct comparison of the behavior of the cavern– pillar–cavern system for different pillar widths and pressure conditions.

Two indicators were used to assess the stability of the analyzed system:

- ***SF (Safety Factor)** – a safety factor related to the dilatancy threshold (SF > 1.5 – safe condition),*
- ***SSR (Strength–Stress Ratio)** – a stress-to-strength ratio based on the Mohr–Coulomb criterion (**SSR > 3.0** – safe condition).*

The obtained results enabled a comparative assessment of the influence of system geometry and cavern operating conditions on their mutual interaction and the stability of the surrounding rock mass. Comparison of the time histories at the selected points made it possible to assess the extent to which changes in pillar width and pressure combinations in adjacent caverns affect the geomechanical response of the analyzed system.

The modeling results confirm the validity of using a cavern neck. Points P1 and P2 are located in two adjacent zones of geometric transition. In the absence of a cavern neck, these points would be spatially closer to each other, resulting in an overlap of stress concentration zones and increased rock mass stress in the cavern roof area. The highest stress levels occur directly at the cavern wall, where point P2 is located. Even at a short distance from the cavern wall, the SF and SSR values become more favorable, as clearly demonstrated by the distribution maps.

The areas in which the criteria fall below the threshold values are local and spatially limited. A local exceedance of the criteria does not necessarily indicate a loss of stability of the entire cavern. Based on operational observations, such areas may undergo localized rock mass spalling and gradual development of a more regular cavern contour that is more favorable from a geomechanical perspective. This interpretation was also adopted in the analysis of real-world data, where local exceedances in the vicinity of the cavern neck, dome, and wall irregularities were associated with localized failure and subsequent modification of the cavern shape rather than with a loss of global stability.

The most sensitive locations are those characterized by abrupt changes in cavern geometry: the roof of the cavern neck, the floor of the cavern neck, and the transition from the dome to the vertical cavern wall. The selection of points P1–P3 is therefore justified both by the geometry of the model and by the observed distribution of the SF and SSR criteria.

The study demonstrated that cavern spacing, and pressure conditions have a significant influence on the stability of the cavern and inter-cavern pillar system. Three-dimensional modeling makes it possible to assess the mutual interaction of caverns and identify the most unfavorable operating scenarios, while the SF and SSR criteria provide useful tools for verifying cavern geometry and design assumptions prior to operation.

The presented research example demonstrates the potential of COMSOL Multiphysics as a tool supporting the design of underground storage facilities for crude oil and fuels in rock salt formations. Numerical modeling enables the analysis of interactions between adjacent caverns, assessment of the influence of inter-cavern pillar width, and comparison of different storage operating scenarios before the start of operation. Detailed results of the comparison of the analyzed variants and the resulting design implications are the main subject of the presented paper.

***Keywords:** COMSOL Multiphysics, salt caverns, geomechanics*

Firmy i instytucje

Companies and institution

1	Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
2	Antea Polska S.A.
3	CFT Polska Sp. z o. o.
4	Inowrocławskie Kopalnie Soli „Solino” S.A.
5	Instytut Geologii i Geochemii Paliw Kopalnych NAN Ukrainy
6	K+S Polska sp. z o. o.
7	K2O Potash Corp. Ltd.
8	KGHM Cuprum Sp z.o.o. Centrum Badawczo-Rozwojowe
9	KGHM METRACO S.A.
10	KGHM Polska Miedź S.A.
11	KGHM Polska Miedź S.A. O /ZG Polkowice - Sieroszowice
12	Kopalnia Soli „Bochnia" S.A.
13	Kopalnia Soli „Kłodawa" S.A.
14	Kopalnia Soli „Wieliczka” S. A.
15	Muzeum Żup Krakowskich Wieliczka
16	Operator Gazociągów Przesyłowych GAZ-SYSTEM S.A.
17	Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych „CHEMKOP" Sp. z o. o.
18	Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy
19	Polskie Stowarzyszenie Geologów Górniczych
20	Polskie Stowarzyszenie Górnictwa Solnego
21	TORPOL Energy sp. z o.o.
22	Ubroservice
23	Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Instytut Geologii
24	University of Edinburgh
25	Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie
26	Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych
27	Wyższy Urząd Górniczy

KGHM
POLSKA MIEDŹ

PROJEKT PUCK

Naturalny potencjał
Strategiczny kierunek



Łączymy odpowiedzialne górnictwo
z potrzebami przyszłego rolnictwa

kghm.com

SÓL KŁODAWSKA

KŁODAWSKA SÓL KAMIENNA JODOWANA

Zdrowie i smak prosto z natury

Źródło jodu (jodek potasu) wspiera prawidłową pracę tarczycy

Polski produkt premium
Kopalnia Soli „Kłodawa" S.A.

Bez antyzbrylaczy
100% naturalna sól kamienna

Czysta i bezpieczna
wolna od mikroplastików

- Powstała 200–250 milionów lat temu z pradawnych mórz i oceanów.
- Wydobywana i pakowana w Kopalni Soli „Kłodawa" S.A.
- Bez współczesnych zanieczyszczeń.
- Bez kompromisów.



Idealna do:



• sałatek • surówek • twarogów • kanapek

(dodawaj pod koniec gotowania, by zachować jod)

* Osoby z chorobami tarczycy powinny skonsultować spożycie soli jodowanej z lekarzem lub dietetykiem

Zeskanuj i kup online:

ODKRYJ NATURALNĄ MOC KŁODAWSKIEJ SOLI KAMIENNEJ

Zdrowie i smak w Twojej kuchni

KOPALNIA SOLI „KŁODAWA" S.A. 62-650 Kłodawa, Aleja 1000-lecia 2
Tel. 63 27 33 200, fax 63 27 31 560, e-mail:sprzedaz@sol-klodawa.com.pl, www.sol-klodawa.com.pl

GAZ system

Strategiczne inwestycje, realna niezależność.



www.gaz-system.pl



Odwiedź Kopalnię Soli „Wieliczka”

Trasa Turystyczna - zachwycająca podróż przez historię i kulturę. Idealna na rodzinną wyprawę.

Trasa Górnicza - prawdziwy ekwipunek, realne zadania i niezapomniana przygoda dla odkrywców.

Kup bilet online
bilety.kopalnia.pl

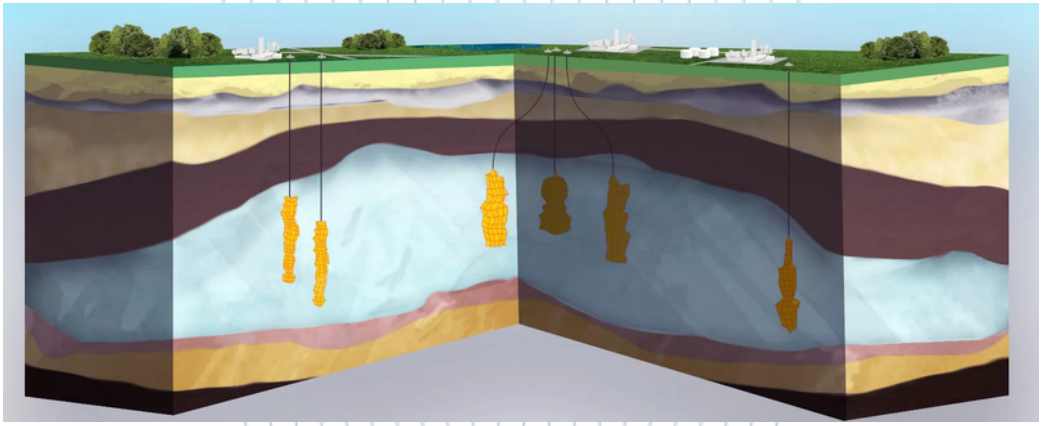
Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych „CHEMKOP” Sp. z o.o.

UL. J. WYBICKIEGO 7, 31-261 KRAKÓW

Oferta firmy CHEMKOP

- Udział w projektach B+R i innowacyjnych pracach w szczególności związanych z wodorem
- Dokumentowanie złóż, uzyskiwanie koncesji
- Prowadzenie nadzorów nad inwestycjami górniczymi
- Badanie składu i zawartości substancji aktywnych w produktach leczniczych oraz jakości tych produktów
- Kompleksowe projektowanie podziemnych, kawernowych magazynów paliw i gazów
- Specjalistyczne laboratoryjne badania soli
- Analiza, ocena, optymalizacja projektów związanych z górnictwem solnym
- Badania oddziaływania eksploatacji górniczej na środowisko
- Kompleksowe projektowanie otworowe kopalń soli
- Pomiary echometryczne komór magazynowych i eksploracyjnych

Działamy już na rynku od ponad 50 lat



Tel.: +48 12 633 60 755 E-mail: sekretariat@chemkop.pl www.chemkop.pl

REGON:120904600 NIP:6750001780 KRS:0000327569
SĄD REJONOWY ŚRÓDMIEŚCIA W KRAKOWIE, XI WYDZIAŁ GOSPODARCZY KRS
Kapitał zakładowy: 2 831 150,00 zł
spółka zależna w Grupie Spółek Gas Storage Poland sp. z o.o.

Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych „CHEMKOP” Sp. z o.o.

UL. J. WYBICKIEGO 7, 31-261 KRAKÓW

Specjalizujemy się w dziedzinie zaawansowanych badań, projektowania i ekspertyz inżynieryjnych. Łączymy wieloletnie doświadczenie z nowoczesnym zapleczem laboratoryjnym i naukowym, wyznaczając standardy w branży surowcowej i geologicznej.

Nasze kompetencje skupiają się w dwóch wyspecjalizowanych filarach:

Dział Geofizyki i Geodezji Górniczej

- Sekcja Pomiarów Geofizycznych
- Sekcja Budowy i Serwisu Aparatury Geofizycznej
- Sekcja Pomiarów Górniczych oraz Geodezyjnych

dr inż. Tomasz Kubacka
Kierownik Działu Geofizyki i Geodezji Górniczej
Tel: +48 734 412 074
E-mail: tomasz.kubacka@chemkop.pl

Dział Projektowo-Badawczy

- Laboratorium Chemiczne
- Laboratorium Górnicze
- Sekcja Górnictwa i Geologii
- Pracownia badań numerycznych

mgr inż. Tomasz Kosowski
Kierownik Działu Projektowo-Badawczego
Tel: +48 734 420 089
E-mail: tomasz.kosowski@chemkop.pl

Podziemne magazyny w kawernach solnych w Polsce zaczęły się od nas!

Tel.: +48 12 633 60 755 E-mail: sekretariat@chemkop.pl www.chemkop.pl

REGON:120904600 NIP:6750001780 KRS:0000327569
SĄD REJONOWY ŚRÓDMIEŚCIA W KRAKOWIE, XI WYDZIAŁ GOSPODARCZY KRS
Kapitał zakładowy: 2 831 150,oo zł
spółka zależna w Grupie Spółek Gas Storage Poland sp. z o.o.