



I. ARTYKUŁY / PAPERS

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

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

Grzegorz CZAPOWSKI

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

STRESZCZENIE

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

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

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

ABSTRACT

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

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

WSTĘP

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

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

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

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

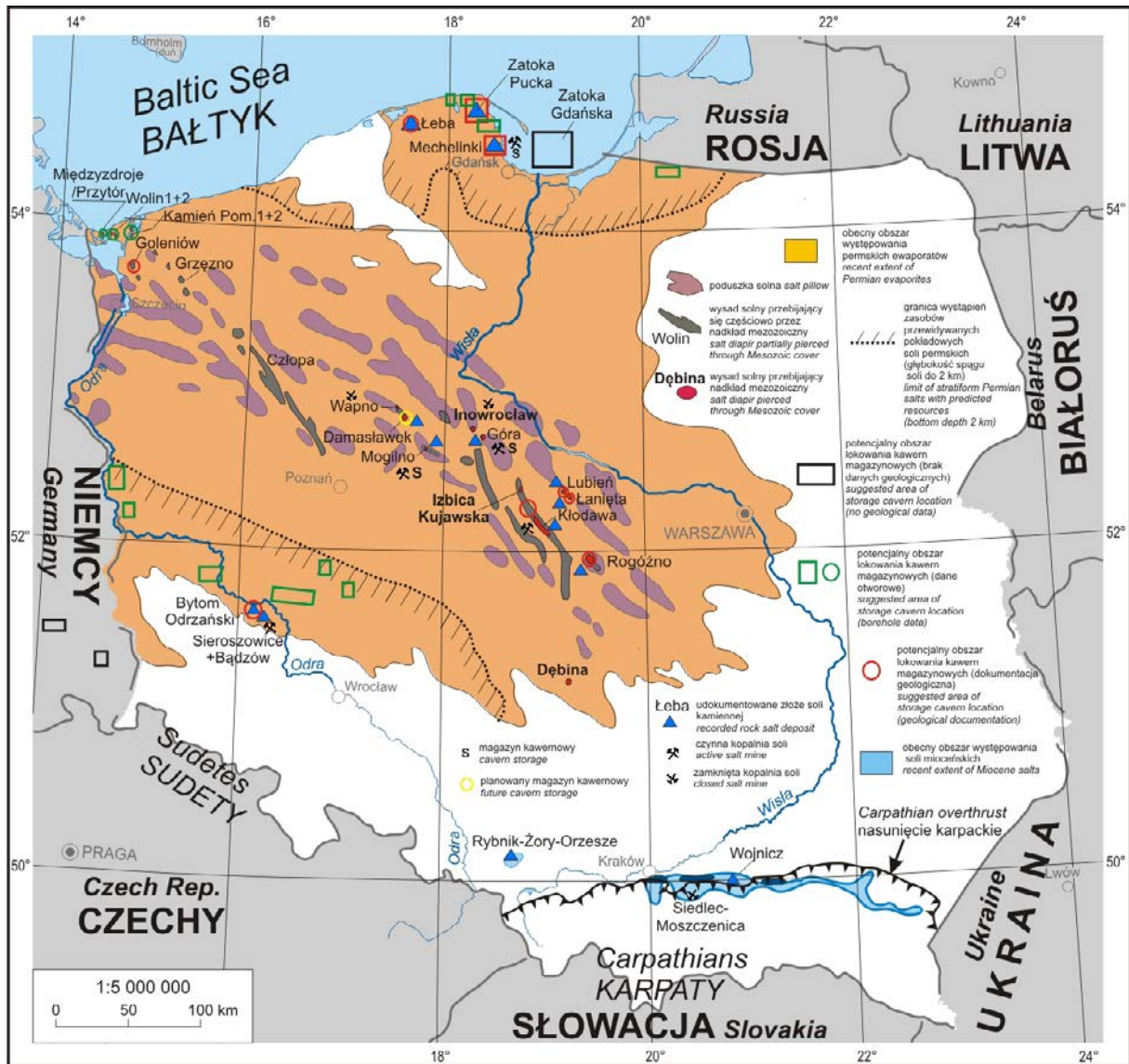
INTRODUCTION

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

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

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

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



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

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

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

GEOLOGIA I KWERNY SOLNE

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

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

GEOLOGICAL CONSIDERATIONS FOR SALT CAVERN SITE SELECTION

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

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

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

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

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

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

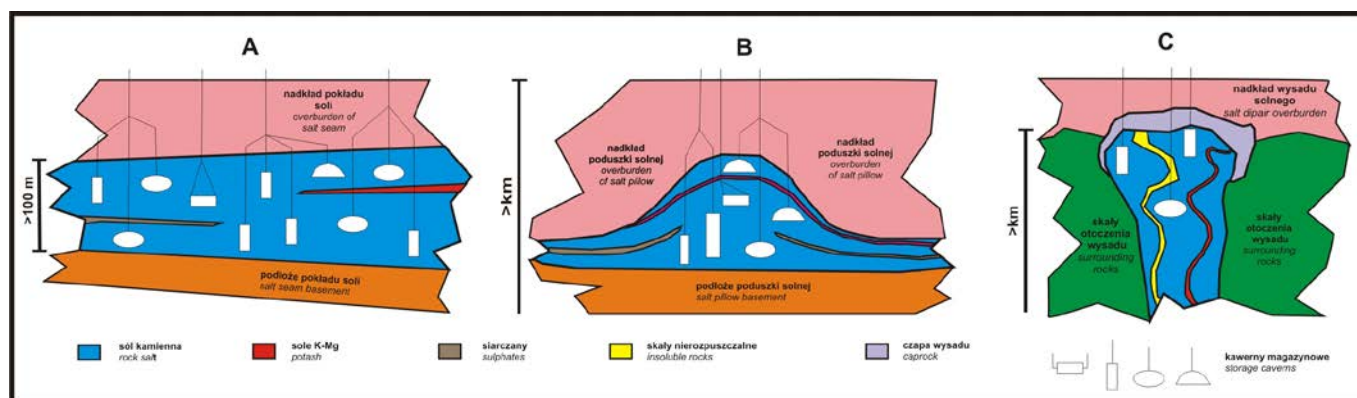
and PZ3, occurring on nearly 2/3 of the territory of Poland, in the form of beds, pillows, or salt domes (e.g. Czapowski 2019; Czapowski, Tomassi-Morawiec 2012; Czapowski, Tarkowski 2018, 2020; Lankof, Tarkowski 2020; Ślizowski, Urbańczyk 2011; Tarkowski, Czapowski 2018, 2019). A number of such rock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

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

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

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

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



Ryc. 2. Rozmieszczenie kawern magazynowych w trzech typach wystąpień solnych: A – pokład solny, B – poduszka solna, C – wysad solny.
Fig. 2. Locations of storage caverns, within three types of salt rock structures: A – salt seam, B – salt pillow, C – salt dome.

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

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

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

POTENCJALNE MIEJSCA LOKOWANIA KAWERN MAGAZYNOWYCH W UTWORACH SOLNYCH

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

WYSTĄPIENIA POKŁADOWE

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

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

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

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

POTENTIAL SITES FOR UNDERGROUND STORAGE FACILITIES WITHIN SALT FORMATIONS

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

STRATIFORM ROCK SALT DEPOSITS

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

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

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

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

PROSPECTIVE SITES OF CAVERN LOCATIONS	TYPE OF ROCK SALT OCCURRENCE	GEOLOGICAL DATA	REFERENCES	DEGREE OF GEOLOGICAL RECOGNITION	
Międzyzdroje/Przytór	salt dome	boreholes	borehole documentation; Czapowski, Tomassi-Morawiec 2012	low	
Wolin 1 and 2					
Wicko-Wapnica					
Kamień Pomorski 1 and 2					
Goleniów		geological documentation	Czochal 2013	good	
Lubień			Pisiewicz 2018		
Łanięta			Parecka 1980	medium	
Kłodawa-Izbica Kujawska			Mazurek et al. 2016	good	
Rogóżno			Dębski et al. 1963	medium	
Białogóra-Dębki-Żarnowiec Area	PZ1 (Na1) bed, northern Poland	boreholes	borehole documentation; Czapowski 2019	medium	
Darżlubie-Puck-Żelistrzewo Area				low	
Karwia Area			borehole documentation; Czapowski 1998	none	
Bay of Gdańsk Area				low	
Gałąjny-Basze Area		geological documentation	Werner 1979	good	
19 boreholes					
rock salt deposits in the Bay of Puck					
rock salt deposits at Mechelinki					
rock salt deposits at Łeba		SW Poland	boreholes	borehole documentation; Czapowski 2017, 2019	low
Chęciny-Nowa Rola Area					
Garki-Uciechów Area					
Nowa Sól-Kielcz Area	PZ1 (Na1) bed				medium
Wilków-Żuchlów-Załęcze-Stupia Area					good
7 boreholes					
3 Areas	PZ2 (Na2) bed				low
1 borehole					
Nowa Sól Area	PZ3 (Na3) bed				
Przyborowice-Kaniów Area					
Strużka-Niwiska Area					
Załęcze Area					
Grąbkowo-Rogożewo Area					
Nowa Sól-Konradowo Area					
Rybaki Area					
Sękowice-Nowa Wioska Area					
1 borehole					
rock salt deposits at Bytom Odrzański	PZ1-PZ3 (Na1, Na2, and Na3) beds	geological documentation	Gruszecki 2008; Neumann 1995	good	

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

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

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

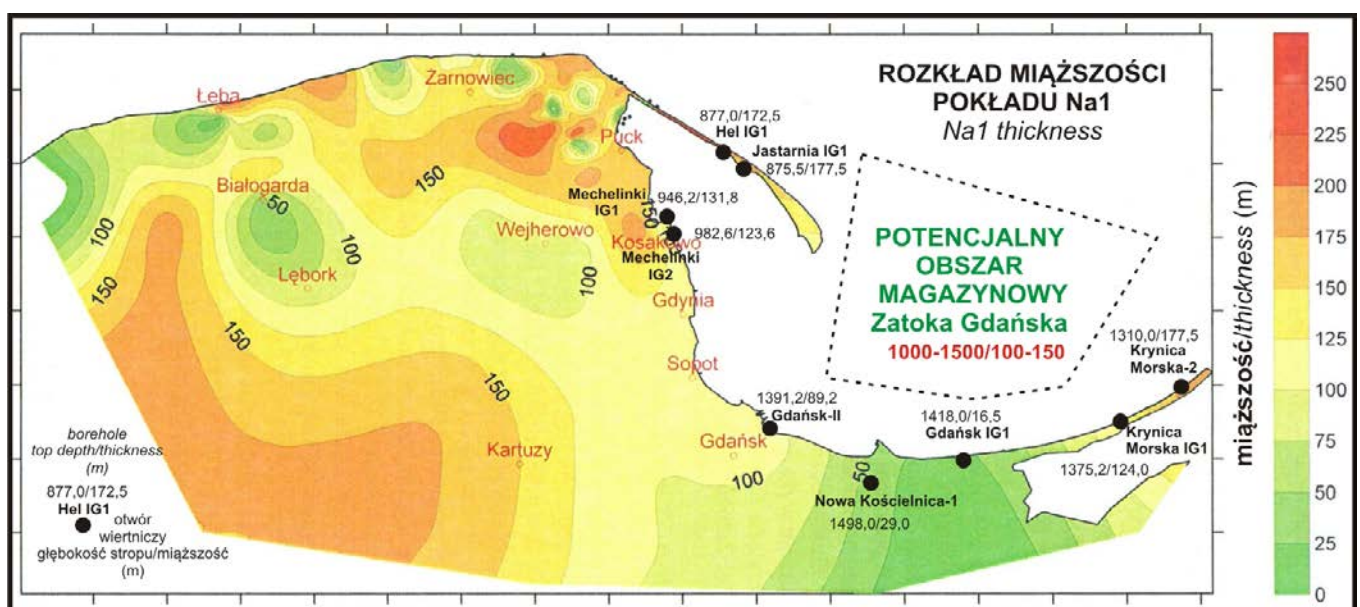
W północno-wschodniej Polsce (Ryc. 1) wskazano jeden potencjalny obszar Gałajny-Basze i pojedynczy otwór wiertniczy (Czapowski, 2019), jednak budowa tam kawernowego

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

W opisanych wystąpieniach pokładowych możliwe jest zbudowanie kawern o różnym kształcie, ale stosunkowo niewielkiej pojemności np. 170 tys. m³ w PMG Kosakowo (Gąska i in., 2012). Sumaryczna pojemność takiego kawernowego magazynu może być bardzo duża dzięki wykonaniu licznych kawern, gdyż ich rozmieszczenie ogranicza jedynie miąższość i rozciągłość pokładu soli.

WYSADY SOLNE

Kawerny magazynowe wyługowane w wysadach solnych są stosunkowo nieliczne (ograniczeniem jest zmienna budowa geologiczna i wielkość wysadu) ale cechuje je bardzo duża objętość np. ok. 400 tys. m³ w KPMG Mogilno w wysadzie solnym Mogilno (Kunstman i in., 2002).

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

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

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

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

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

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

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

It is possible to leach caverns with various shapes, within the above described salt deposits, although the caverns would have fairly low volumes, e.g. 170,000 m³ as in the case of the PMG Kosakowo (Gąska et al. 2012). The total volume of the underground storage facility could be large if a complex of caverns is leached, since the cavern distribution would be limited only by the salt deposit thickness and extent.

SALT DOMES

There are few caverns leached within salt domes since such caverns are restricted by the changeable geological structures and dome sizes, but they are characterised by large volumes of e.g. ca. 400,000 m³ each, in the case of KPMG Mogilno, located within the Mogilno salt dome (Kunstman et al. 2002).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Wystąpienia mioceńskiej soli kamiennej w południowej Polsce (Ryc. 1) nie były zasadniczo rozpatrywane jako miejsca lokalizacji kawernowych magazynów. W końcu lat 90. ubiegłego wieku planowano (<https://dziennikpolski24.pl/siedlec-pod-mlotek/ar/c3-2212638>) wykorzystanie podziemnych wyrobisk likwidowanej kopalni soli kamiennej Siedlec-Moszczenica na podziemny magazyn gazu o pojemności 10 mln m³ (Stecka, Włodarczyk-Żurek, 2018). Dwa inne udokumentowane złoża soli kamiennej: Rybnik-Żory-Orzesze (złożo pokładowe; Majewski, Listkowski, 1969) i Wojnicz (złożo fałdowe; Makowska, 1982), charakteryzuje zmienny i miejscami wysoki udział skał płonnych (siarczany i klastyki), utrudniający wykonanie kawern.

PODSUMOWANIE

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

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

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

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

The occurrences of Miocene rock salt in southern Poland (Fig. 1) were not basically considered as the sites for underground storage facilities. By the end of the 1990's, the workings of the liquidated Siedlec-Moszczenica Salt Mine were contemplated to be used as a storage facility (<https://dziennikpolski24.pl/siedlec-pod-mlotek/ar/c3-2212638>), with the volume of 10 million m³ (Stecka, Włodarczyk-Żurek 2018). Two other documented rock salt deposits, Rybnik-Żory-Orzesze (stratiform deposit; Majewski, Listkowski 1969) and Wojnicz (folded deposit; Makowska 1982), are characterised by changeable and locally high proportion of gangue (sulphates and clastics) that would make such projects difficult to build.

SUMMARY

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

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

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

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

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

LITERATURA/REFERENCES

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

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

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