

Magazyny gazu ziemnego w cechsztyńskich formacjach solnych elementem bezpieczeństwa energetycznego Polski

Dagmara Zeljaś¹



Natural gas storages in Zechstein salt formations as an element of energy safety in Poland. *Prz. Geol.*, 68: 824–832.

Abstract. Based on the formal and legal regulations, the need to increase the capacity of cavern underground gas storage in Poland is demonstrated. The author raised the problem of country's energy security, which is partly based on intervention reserves of energy carriers. A description of the state of actual storage capacities and strategic reserves of natural gas in Poland is presented, and the level of reserves is assessed based on applicable law. Focusing on the advantages of salt deposits in the context of underground gas storage, the author presents safe conditions for underground gas storage and the possible location of cavern underground gas storage in two prospective salt deposits: the Damastawek salt dome and the layer salt deposit of the Fore-Sudetic Monocline. The article

draws attention to the complexity of the issue of geomechanical stability of caverns for underground gas storage, taking into account the type of deposit (layer/dome).

Keywords: underground gas storage, energy security, Zechstein salt deposits and domes, salt caverns

Polska gospodarka energetyczna w głównej mierze jest uzależniona od dostaw węgla kamiennego, jednak w programie działań na rzecz wzmacniania bezpieczeństwa energetycznego kraju uwzględniono także wykorzystanie innych paliw kopalnych, tj. gazu ziemnego i ropy naftowej (Ustawa..., 2007).

Utrzymanie bezpieczeństwa energetycznego kraju zależy od (Ustawa..., 1997):

- możliwości własnego wydobycia surowców energetycznych;
- możliwości importu surowców energetycznych na korzystnych warunkach umów i z zachowaniem dywersyfikacji źródeł dostaw;
- modernizacji i budowy nowych sieci przesyłowych w celu zapewnienia stałych dostaw obecnym i przyszłym odbiorcom gazu ziemnego;
- tworzenia rezerw surowców energetycznych.

Realizacja tego zadania z zachowaniem równowagi pomiędzy dbałością o środowisko a ekonomiczną opłacalnością podejmowanych działań jest trudna do osiągnięcia i jest kwestią priorytetową.

W 2018 r. zużycie gazu ziemnego w Polsce wyniosło ok. 19,7 mld m³ (tab. 1). Zapotrzebowanie na gaz ziemny jest pokrywane przez import (13,5 mld m³) i wydobycie ze źródeł krajowych (4,5 mld m³). Część gazu (3 mld m³) jest przechowywana w magazynach stanowiących rezerwy interwencyjne (PGNiG, 2018). W stosunku do ubiegłych lat ilość gazu ziemnego importowana z kierunku wschodniego (9 mld m³) zmniejszyła się o ok. 20%, co jest skutkiem dywersyfikacji dostaw gazu i wygasania długoterminowej umowy z Federacją Rosyjską. Gaz ziemny jest sprowadzany do Polski również z zachodu (1,4 mld m³) i południa Europy (0,4 mld m³), a także z USA, Kataru i Norwegii (2,7 mld m³) – poprzez terminal LNG w Świnoujściu (PGNiG, 2018). Struktura zaopatrzenia Polski w gaz ziemny, pomimo zmniejszenia dostaw ze wschodu, nadal wyka-

Tab. 1. Bilans gazowy w Polsce na koniec 2018 r. (wg PGNiG, 2018)
Table 1. Gas balance in Poland at the end of 2018 (after PGNiG, 2018)

Zapotrzebowanie [mld m ³] Demand [mld m ³]	Źródła dostaw [mld m ³] Supply sources [mld m ³]		
Zużycie gazu w Polsce Gas consumption in Poland	19,7	Wydobycie własne Domestic production	4,5
		Import Import	13,5
		Gaz w magazynach gazu Gas in gas storage facilities	3,0
Razem Total	19,7	Razem Total	21,0

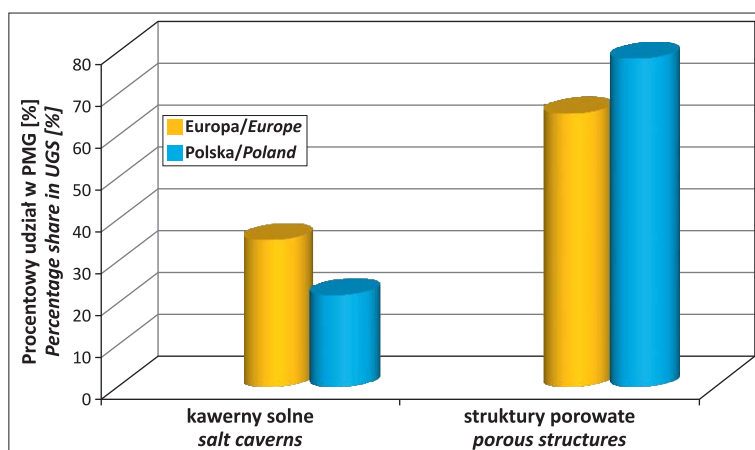
zuje zbyt wysoki udział jednego dostawcy w sumarycznym imporcie tego surowca.

Stabilny kraj to kraj odporny na zachwiania na rynku energetycznym, kraj, który musi sobie poradzić, zwłaszcza w obliczu kryzysu gospodarczego, a tworzenie rezerw nośników energetycznych poprawia bezpieczeństwo energetyczne kraju – zarówno długo-, jak i krótkoterminowe. Duże rezerwy paliw wpływają na stabilność cen energii w okresach wzmożonego zapotrzebowania na jej podaż. Rezerwy ciekłych i gazowych surowców energetycznych tworzy się w formacjach skalnych.

STRATEGICZNE REZERWY GAZU ZIEMNEGO W POLSCE

Pod koniec 2018 r. 671 podziemnych magazynów gazu (PMG) było czynnych na świecie (Cornot-Gandolphe, 2019). Większość gazu ziemnego magazynowanego pod ziemią (aż 85%) przechowuje się w strukturach porowatych w szcerpanych złożach węglowodorów, a pozostałą część (15%) – w kawernach solnych (Cornot-Gandolphe, 2019). W Europie udział gazu ziemnego magazynowanego w kawernach solnych jest większy – stanowi 35%, a zasoby

¹ Wydział Wiertnictwa Nafty i Gazu, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, 30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30; dagzel@agh.edu.pl



Ryc. 1. Struktura podziemnego magazynowania gazu ziemnego w Polsce i Europie (wg Cornot-Gandolphe, 2019)

Fig. 1. Underground gas storage in Poland and Europe (after Cornot-Gandolphe, 2019)

tego paliwa przechowywane w strukturach porowatych wynoszą 65% (ryc. 1). W Polsce gaz ziemny stanowi drugi, po węglu, nośnik energii. Rezerwy tego paliwa są lokowane głównie w strukturach porowatych (78%), a podrzędnie w kawernach solnych (22%; Cornot-Gandolphe, 2019). Sezonowość zużycia energii sprawia, że większość państw coraz częściej tworzy nowe PMG w kawernach solnych, ponieważ łatwiej i szybciej można z nich odzyskać gaz niż ze struktur porowatych (Cornot-Gandolphe, 2019).

Utworzenie podziemnego magazynu gazu w kawernie solnej wymaga poniesienia większych nakładów finansowych niż przystosowanie do tego celu wyeksploatowanego złoża węglowodorów. Jednak niższe koszty odbioru gazu z kawern solnych, możliwość przeprowadzenia wielu cykli zatłaczania i odbioru gazu w ciągu roku oraz elastyczne umowy z operatorem systemu magazynowania sprawiają, że środki zainwestowane w budowę kawernowych podziemnych magazynów gazu (KPMG) szybko się zwracają i w związku z tym budowa tego typu magazynów jest lepiej opłacalna (<https://ipi.gasstorageland.pl/pl/menu/wiedza/#jak-magazynujemy-gaz>). Specyfika KPMG umożliwia szybką reakcję w przypadku krótkotrwałych wahań zapotrzebowania na gaz ziemny w skali krajowej i lokalnej, co odnotowano w 2017 i 2019 r., gdy w Rosji zaczął płynąć zawodniony gaz, którego pobór szybko wstrzymano. Polska gospodarka nie odczuła wówczas niedoboru tego surowca dzięki poborowi gazu z KPMG *Mogilno* (PGNiG, 2019).

W celu zbilansowania zapotrzebowania na gaz ziemny należy zapewnić dostawy gazu z różnych źródeł, takich jak własne wydobyte, import i nabycie wewnątrzspółnotowe oraz zasoby zmagazynowane. W ostatnich latach bilans krajowego rynku gazowego jest dodatni (tab. 1), jednak należy się liczyć ze wzrostem zużycia gazu ziemnego do produkcji energii elektrycznej. Obecnie udział elektrowni gazowych w całkowitym zużyciu gazu ziemnego wynosi ok. 16%, ale w perspektywie dwóch dekad ma on wzrosnąć do 26% (Minister Energii, 2019).

Zgodnie z ustawą z dnia 16 lutego 2007 r. o zapasach ropy naftowej, produktów naftowych i gazu ziemnego oraz zasadach postępowania w sytuacjach zagrożenia bezpieczeństwa paliwowego państwa i zakłóceń na rynku naftowym należy w Polsce utrzymywać rezerwy paliwowe

odpowiadające co najmniej 30-dniowemu, średniemu dziennemu zużyciu krajowemu brutto ekwiwalentu ropy naftowej w poprzednim roku kalendarzowym (Ustawa..., 2007; Minister Energii, 2019). Według obwieszczenia Ministra Energii z dnia 16.03.2019 r. strategiczne rezerwy gazu ziemnego powinny stanowić 4,3 mld m³. Zapasy interwencyjne należy utrzymywać w magazynach, których parametry techniczne – wraz z parametrami technicznymi połączonych z nimi systemów przesyłowych – umożliwiają interwencyjne uwolnienie całości zmagazynowanych zapasów, w tym ich wytlóczenie w okresie 90 dni (Ustawa..., 2007).

Łączna pojemność polskich PMG wynosi 3,074 mld m³. Jest zatem mniejsza niż wymagane prawem rezerwy strategiczne (4,3 mld m³; Ustawa..., 2007). Według danych spółki *Gas Storage Poland* w dniu 20.01.2020 r. stan napełnienia instalacji magazynowych wynosił 26361,6 GWh, co odpowiada 2,4 mld m³ gazu ziemnego, a podziemne magazyny były wypełnione w 77% (<https://ipi.gasstorageland.pl/pl/menu/wiedza/#jak-magazynujemy-gaz>).

Zapasy gazu ziemnego można utrzymywać również za granicą, pod warunkiem że w celu gwarancji ciągłości dostaw w określonym czasie zostanie zapewniona odpowiednia przepustowość interkonektorów w sieci przesyłowej gazu do kraju. Niestety, w sytuacji kryzysowej magazynowanie gazu poza granicami kraju może okazać się problematyczne, dlatego PGNiG dąży do zwiększenia krajowych rezerw magazynowych i rozbudowuje PMG *Mogilno*, *Kosakowo* i *Wierzchowice*. Po zakończeniu tych prac pojemność polskich PMG wzrośnie do 4,1 mld m³, co nadal nie rozwiąże problemu. W związku z tym całkowite bezpieczeństwo energetyczne może zapewnić jedynie budowa nowych magazynów gazu, ale decyzja odnośnie ich lokalizacji i czasu realizacji nie została jeszcze podjęta. Jak już wspomniano, magazyny te powinny umożliwiać odpowiednio szybkie tempo poboru gazu. Taki warunek spełniają jedynie wielkogabarytowe magazyny gazu wylugowane w formacjach solnych metodą otworową.

KRYTERIA WYBORU ODPOWIEDNIEJ LOKALIZACJI KPMG

Projektując bezpieczne KPMG należy uwzględnić: bezpieczeństwo ludzi, ochronę środowiska i ekonomiczne uzasadnienie przedsięwzięcia. Należy też wziąć pod uwagę wszystkie niebezpieczne sytuacje, jakie mogą wystąpić w trakcie budowy i eksploatacji wielkogabarytowych obiektów podziemnych. Według Kunstman i in. (2009) kawerny magazynowe wykonane techniką lugowania i pełniące funkcję podziemnych zbiorników muszą mieć odpowiednią:

- szczelność;
- pojemność;
- długotrwałą stateczność geomechaniczną;
- ciśnienie i temperaturę magazynowania;
- wydajność zatłaczania i poboru magazynowanych substancji.

Utwory solne są nieprzepuszczalne i dlatego umożliwiają odpowiednią izolację magazynowanego w nich medium. Ogromny wpływ na objętość i kształt kawern uzyskiwanych

w procesie ługowania, a także szczelność i stateczność komór magazynowych ma wybór do konstrukcji magazynu odpowiedniej formacji solnej (Kunstman i in., 2002). Najlepiej nadają się do tego celu formacje solne o niezróżnicowanym składzie mineralnym, o odpowiednich warunkach hydrogeologicznych, właściwościach fizykomechanicznych, fizykochemicznych i termicznych skały solnej (Lankof, 2018).

Pokładowe formacje solne o niezaburzonej tektonice i jednorodnej litologii zazwyczaj gwarantują lepsze warunki do wykonania kavern magazynowych niż wysady, mimo że miąższość pokładu solnego ogranicza wysokość kavern. W celu zapewnienia szczelności warstw i braku łączności hydraulicznej z poziomami wodonośnymi zarówno w wysadach, jak i w formacjach pokładowych pole magazynowe należy zlokalizować poza strefami nieciągłości tektonicznych, w obszarach izolowanych w nadkładzie skałami nieprzepuszczalnymi, zachowując nie naruszone calizny ochronne w postaci półek stropowych (złoża wysadowe i pokładowe), spągowych (złoża pokładowe) i filarów brzeżnych (złoża wysadowe).

Zróznicowane wykształcenie warstw solnych w strukturach wysadowych i ich silne zaburzenia tektoniczne mogą komplikować proces ługowania. Zmienność litologiczna, strome ułożenie warstw i zawartość skał nierozpuszczalnych utrudniają bądź uniemożliwiają uzyskanie pożądanego kształtu kawerny, a w skrajnych przypadkach mogą powodować obrywy w stropie i ociosach kavern lub niekontrolowane wylugowanie w przypadku występowania wkładek łatwo rozpuszczalnych soli potasowo-magnezowych.

Znajomość termicznych właściwości skał występujących w formacji solnej wytypowanej do podziemnego magazynowania gazu jest bardzo istotna ze względu na ich wpływ na:

- zaciskanie się kavern i geomechaniczną stateczność wielkogabarytowych obiektów podziemnych;
- przebieg procesu ługowania;
- warunki termodynamiczne występujące w kawernie gazowej w trakcie jej eksploatacji.

Powierzchniowe kryteria lokalizacji KPMG są następujące: 1) lokalizacja magazynu nie może mieć negatywnego wpływu na obszary chronione; 2) należy zapewnić dostęp do infrastruktury gazociągowej, umożliwiającej doprowadzenie gazu do magazynu, a następnie jego odbiór; 3) na etapie budowy magazynu konieczny jest dostęp do słodkiej wody technologicznej, niezbędnej do procesu ługowania. Należy też sporządzić plan zagospodarowania solanki powstałej w wyniku ługowania (tj. zapewnić jej odbiorców w niedalekiej odległości).

Obecnie wszystkie polskie PMG są własnością PGNiG S.A. Koncern ten utworzył spółkę celową *Gas Storage Poland*, której podstawowym przedmiotem działalności jest wykonywanie zadań operatora systemu magazynowania. Potencjalnych inwestorów spółka ta może szukać wśród operatorów przesyłowych (GIE Storage Map, 2018). Przykładem może być firma *Gaz-System* (inwestująca ostatnio w rozpoznanie jednego z wysadów solnych na Niżu Polskim, wytypowanego do budowy KPMG), koncerny paliwowo-energetyczne oraz inne spółki Skarbu Państwa, które działają w sektorze energetycznym i wydobywczym.

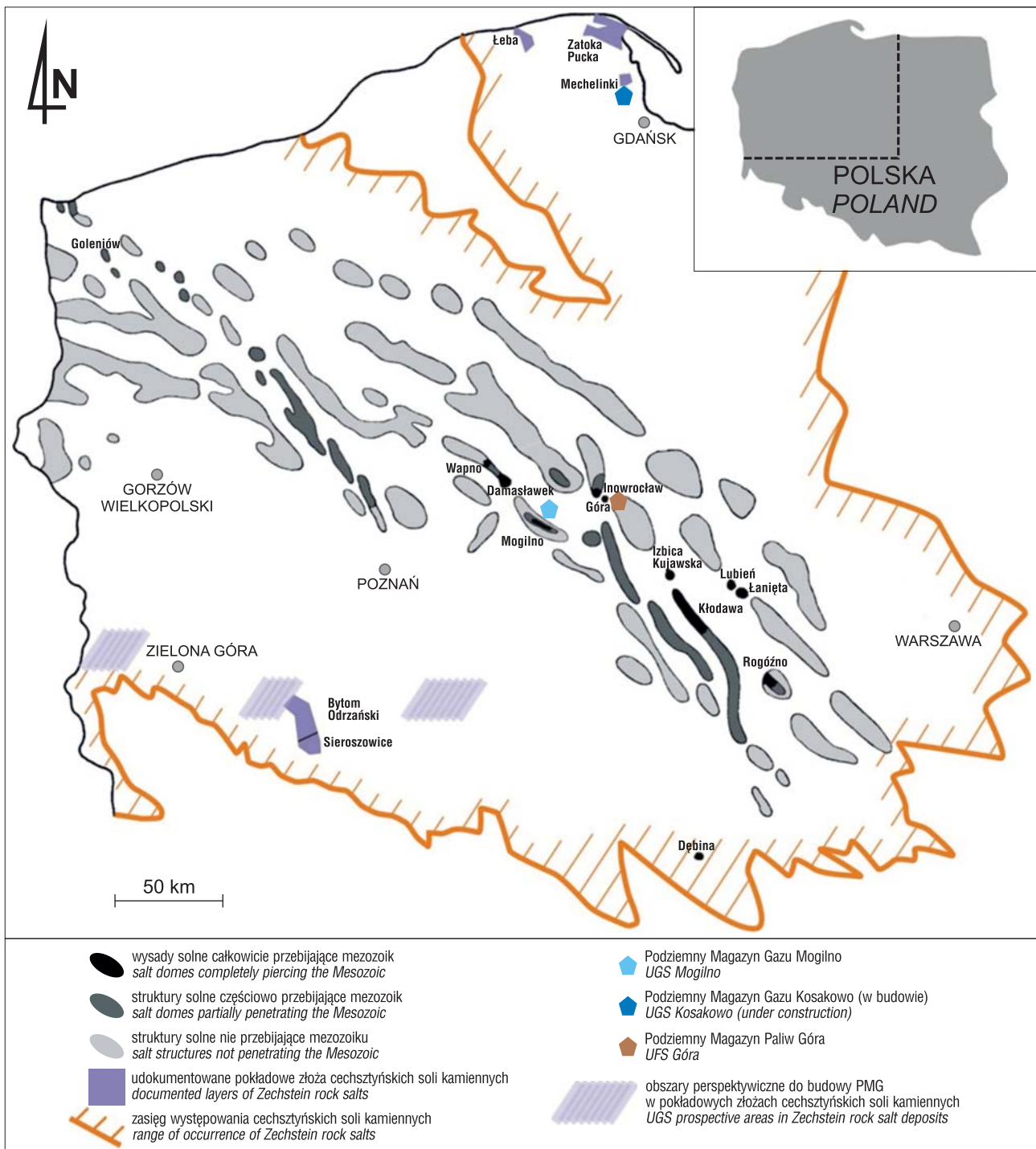
POTENCJALNE LOKALIZACJE NOWYCH KPMG W POLSCE

Sole mają specyficzne właściwości fizyczne i chemiczne, które od lat są obiektem zainteresowania ze względu na możliwość tworzenia w nich wielkogabarytowych kavern służących do podziemnego magazynowania lub składowania substancji (np. Ślizowski, 1983; Brańka, 1992; Czapowski i in., 2006; Ślizowski, Urbańczyk, 2011; Lankof, 2018). Formacje solne występują pod powierzchnią ok. 2/3 obszaru Polski (Czapowski, Bukowski, 2009). Żadna inna skała nie została objęta tak szerokim programem badań laboratoryjnych, w tym geomechanicznych, jak właśnie sól. Struktury solne są rozpoznawane pod kątem: oddziaływania soli na właściwości paliwa, wpływu planowanych podziemnych magazynów gazu na procesy zachodzące w górotworze i zachowanie jego stateczności. W celu określenia geomechanicznych właściwości soli i warunków górniczych w formacjach solnych opracowano wiele modeli matematycznych (Flisiak, Tajduś, 1994; Kłeczek, Flisiak, 1994; Ślizowski, Urbańczyk, 2011; Kłeczek, Zeljaś, 2012).

W Polsce warunki odpowiednie do budowy KPMG istnieją zarówno w wysadach solnych, jak i w pokładowych złożach soli (np. Krzywiec, 2009; Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2012; Czapowski i in., 2013). Perspektywicznie pokładowe złoża soli znajdują się na wyniesieniu Łeby – w rejonie Białogardy, Głuszewa i Jastrzębiej Góry (Ślizowski, Urbańczyk, 2011) oraz na monoklinie przedsubdeckiej – k. Bytomia Odrzańskiego, Nowej Soli i Przyborowa (ryc. 2). Na Niżu Polskim w pobliżu terminalu LNG w Świnoujściu są wskazywane do tego celu takie struktury solne, jak: Goleniów, Wolin i Przytór oraz wysady Lubień, Łanięta, Damasławek, Rogoźno, Bełchatów i Izbica Kujawska. Największe nadzieje wiąże się z utworzeniem KPMG w wysadzie Damasławek. W 2018 r. struktura ta została poddana dodatkowemu rozpoznaniu dwoma otworami wiertniczymi (Bodzów i Bonów), z których pobrano próbki rdzenia do dalszych badań.

W planach zagospodarowania złóż soli w Polsce uwzględnia się wartość złoża oraz perspektywiczne inwestycje w jego pobliżu i tak np.:

- wysadowe złoża soli w północno-zachodniej Polsce można potraktować jako magazyny skroplonego gazu odbieranego w gazoporcie w Świnoujściu (Czapowski, Tomassi-Morawiec, 2012).
- pokładowe złoża soli na wyniesieniu Łeby, zawierające sole potasowo-magnezowe i przewarstwienia polihalitowo-anhydrytowe (które mogą utrudniać wykonywanie wyrobisk metodą ługowania) jest zlokalizowane w sąsiedztwie obszaru wskazywanego jako miejsce budowy elektrowni atomowej. W związku z tym można przypuszczać, że w przyszłości będzie ono stanowić podziemne składowisko odpadów z energetyki jądrowej.
- wysadowe złoża soli kamiennej na Niżu Polskim: Lubień i Łanięta, były rozpatrywane jako potencjalnie interesujące lokalizacje budowy podziemnego magazynu produktów naftowych (Chemkop, 2003, 2005).
- w wysadach Bełchatów i Rogoźno wokół złoża solnego panują niekorzystne warunki hydrogeologiczne. Diapiry te charakteryzują się bardzo skomplikowaną tektoniką, a w ich bezpośrednim sąsiedztwie stwierdzono występowanie solanek pod znacznym



Ryc. 2. Potencjalne lokalizacje KPMG w Polsce w cechsztyńskich formacjach solnych (wg Czapowski i in., 2017)
Fig. 2. Potential locations of UGS in Poland in Zechstein salt formations (after Czapowski et al., 2017)

ciśnieniem (Ślizowski i in., 2004; Czapowski, Tarkowski, 2018). Ponadto w pobliżu tych struktur znajdują się udokumentowane zasoby węgla brunatnego, które mają być w przyszłości eksploatowane, co mogłoby mieć niekorzystny wpływ na PMG.

- wysad Izbica Kujawska jest zaburzony tektonicznie i ma zbyt małą powierzchnię, by mógł być brany pod uwagę przy planowaniu PMG, a nadkład tego wysadu jest zawadniony (Czapowski, Tarkowski, 2018; Lankof, 2018).

- wysad solny Damasławek został dobrze rozpoznany pod względem geologicznym (Lankof, 2018) i pozytywnie oceniono jego przydatność do budowy KPMG, który mógłby osiągnąć pojemność magazynową rzędu 820 mln m³.
- złożo soli w rejonie Bytomia Odrzańskiego znajduje się poza obszarem oddziaływania LGOM, pokład soli ma odpowiednią miąższość, nie jest zaburzony tektonicznie i został dobrze rozpoznany (np. Kłeczek, 1999; Czapowski, 2017).

CHARAKTERYSTYKA STRUKTUR SOLNYCH WYTYPOWANYCH DO BUDOWY PMG W POLSCE

Wysad Damasławek

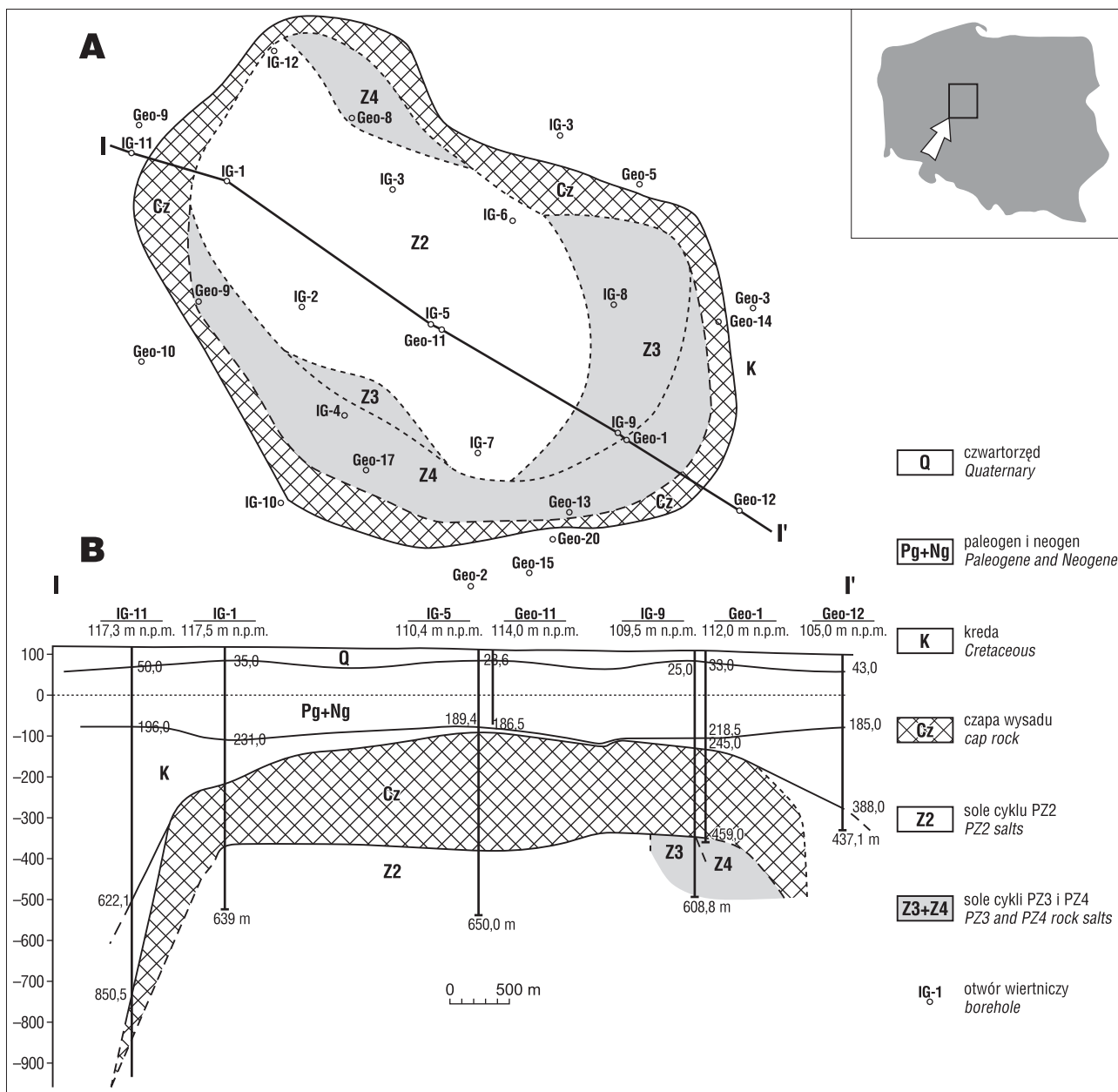
Wysad cechsztyńskich utworów solnych Damasławek (w woj. kujawsko-pomorskim) został rozpoznany 20 głębokimi otworami wiertniczymi i udokumentowano w nim złożę soli w kategorii rozpoznania C2 (Koronowska, 1983). Diapir ten przebija spąg paleogenu. Jego zwierciadło solne, o powierzchni 16,4 km², występuje na głębokości ok. 475 m p.p.t. i ma kształt nieregularnej elipsy o wymiarach 5,5 × 3,5 km. Nad wysadem na głębokości 184–398 m p.p.t. zalega czapa iłowo-gipsowa o miąższości 85–295 m (ryc. 3). Wysad otaczają utwory jury i kredy, a nadkład stanowią utwory kredy, paleogenu, neogenu i czwartorzędu (ryc. 4). Sole należą do cyklotemów PZ2, PZ3 i PZ4. W nadkładzie i otoczeniu zidentyfikowano cztery piętra wodonośne:

czwartorzędowe, paleogeńsko-neogeńskie, kredowe i permskie (Krzywiec i in., 2000; Twarogowski i in., 2002).

Wysad Damasławek jest otoczony strefami dyslokacji w utworach mezozoicznych, które wygasają w pokrywie kenozoicznej. Wzdłuż dyslokacji na południowym obrzeżu czapy gipsowej są obserwowane stromo wyklinowane osady kredy. Sieć uskoków występuje również w utworach paleogenu i neogenu. Niektóre z nich przecinają wysad solny (Ślizowski, Urbańczyk, 2011; Lankof, 2018).

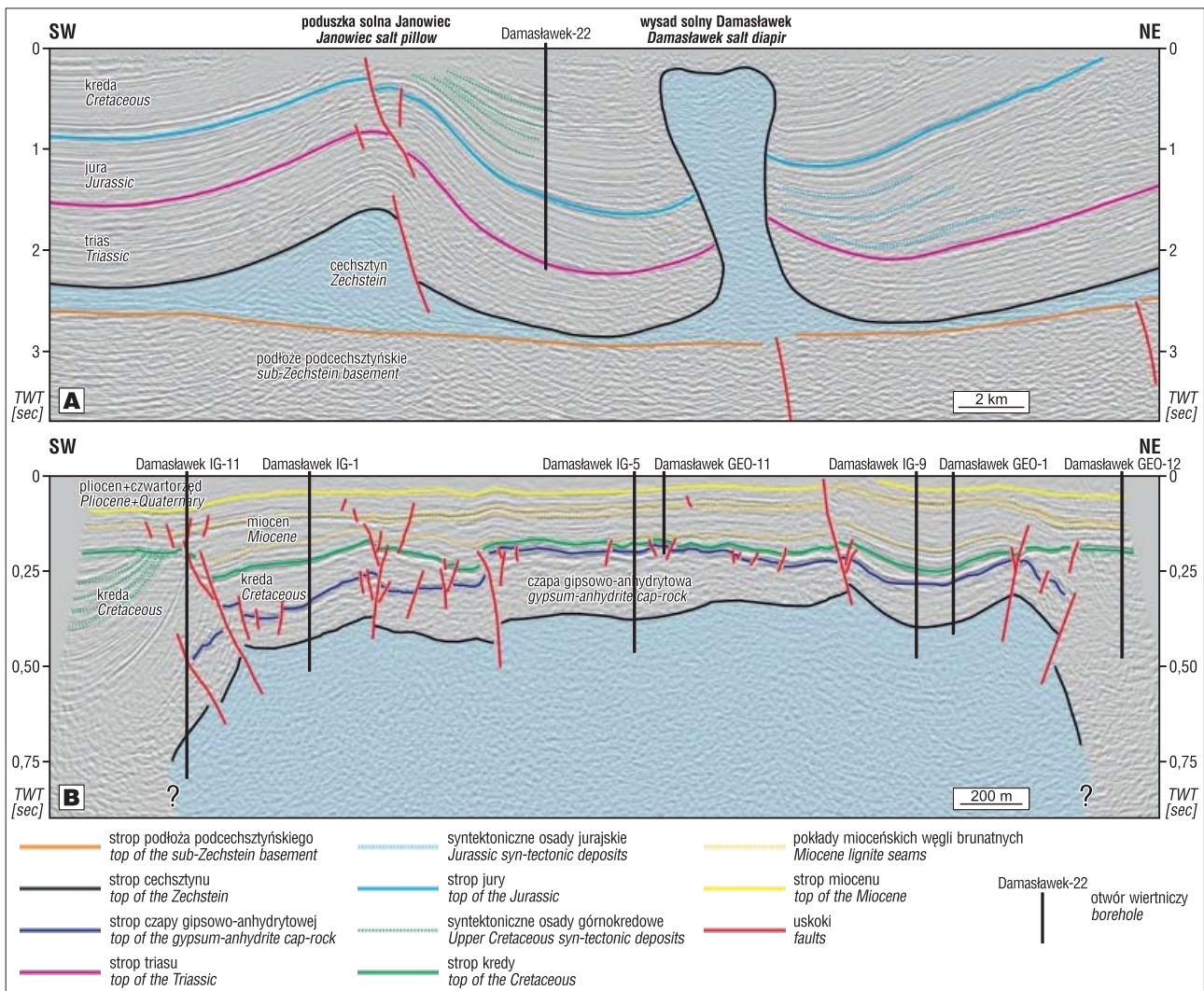
Źródło potrzebnej do ługowania wody technologicznej jest oddalone o 20 km od wysadu Damasławek, możliwość odbioru solanki o 40 km, a sieć przesyłowa gazu o 75 km (Ślizowski, Urbańczyk, 2011).

Zaawansowanie prac ukierunkowanych na utworzenie magazynu gazu ziemnego w wysadowej strukturze solnej Damasławek budzi nadzieje, że pierwsze komory magazynowe zostaną oddane do eksploatacji do 2025 r. Przyszły operator magazynu zakończył już rozpoznanie złoża, wykonał prace koncepcyjno-projektowe budowy KPMG i kopalni



Ryc. 3. Mapa geologiczna i przekrój przez wysad solny Damasławek (Koronowska, 1983)

Fig. 3. Geological map and cross-section through the Damasławek salt dome (Koronowska, 1983)



Ryc. 4. Profile sejsmiczne wysadu Damasławek (wg Krzywiec, 2009)
Fig. 4. Seismic profiles of the Damasławek salt diapir (after Krzywiec, 2009)

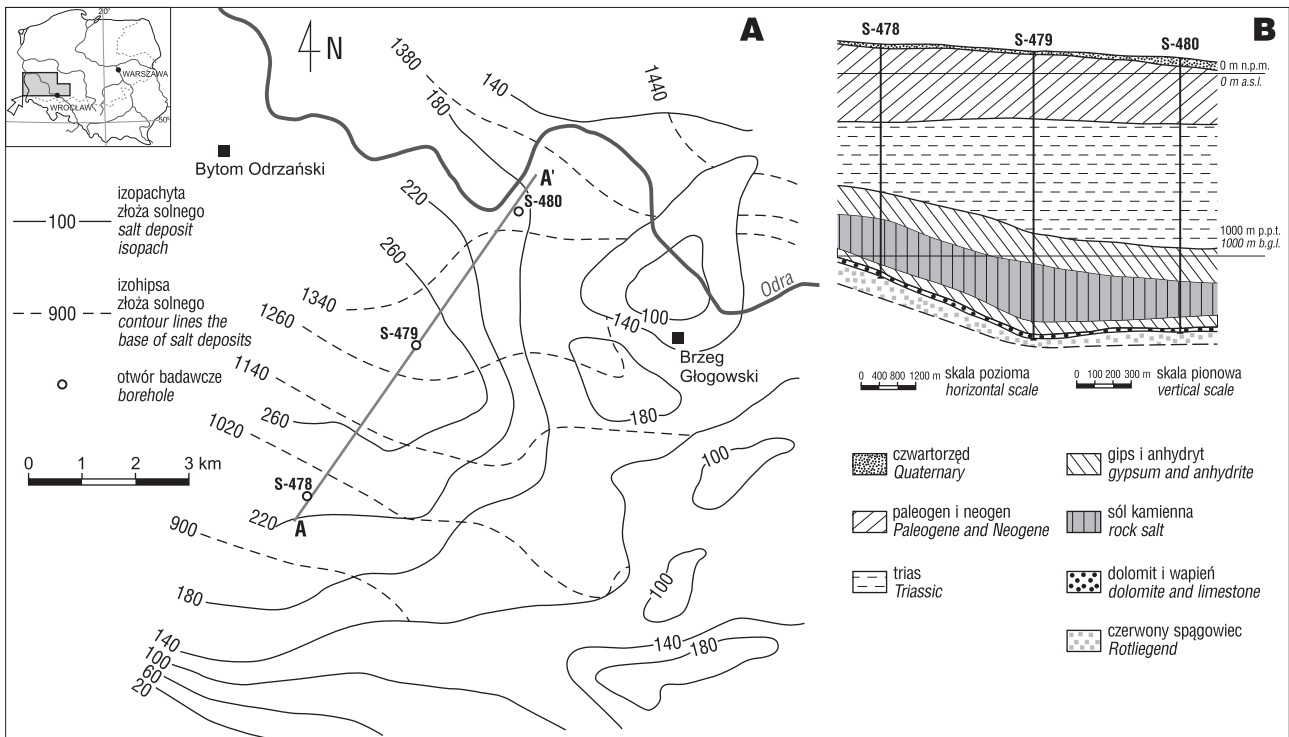
solu w Damasławku, rozwiązał kwestie logistyczne oraz odbioru solanki przez zakłady produkcyjne CIECH Soda Polska S.A. (Raport CIECH, 2019; GAZ-SYSTEM, 2018, 2019).

Pokładowe złożo soli kamiennej Bytom Odrzański

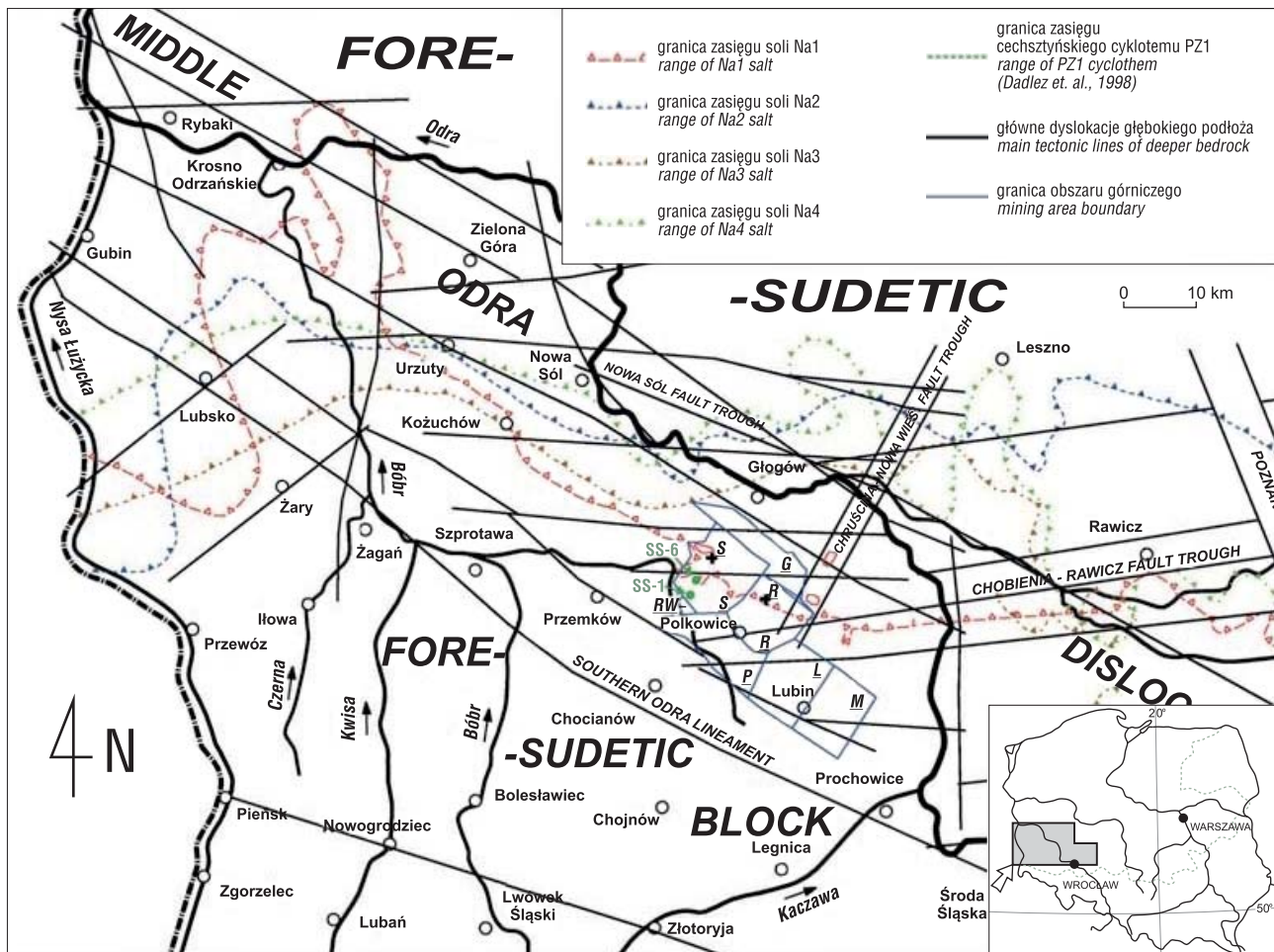
Przy okazji prac dokumentujących złoża miedzi na monoklinie przedsudeckiej, w okolicy Bytomia Odrzańskiego dobrze rozpoznano pokładowe złożo soli kamiennej w czerwonym spągowcu (Preidl, 1990; Czapowski, 2017). Zostało ono udokumentowane w kategorii C1 w obszarach górniczych Sieroszowice i Rudna oraz jako kopalina towarzysząca rudom miedzi na obszarze górniczym Bytom Odrzański (Preidl, 1990; Czapowski, 2017). Złożo to charakteryzuje się stosunkowo dużą miąższością formacji solnej, dochodzącą do 300 m, i korzystnymi warunkami hydrogeologicznymi. Sól kamienna jest dobrej jakości, ma dobre właściwości geomechaniczne, jej warstwy są nieprzepuszczalne i cechują się korzystnymi właściwościami ługowniczymi (ryc. 5). Strop złoża znajduje się na głębokości 900–1130 m p.p.t., a spąg na gł. 1030–1200 m p.p.t. Odległość od eksploatacji prowadzonej w LGOM wynosi ok. 12 km (ryc. 5). Warstwy solne zapadają ku NE pod kątem 2–5°. Zaburzenia tektoniczne w utworach permu na obszarze LGOM (rowy, zręby, systemy schodowe, uskoki) zanikają w rejonie złoża soli. Cechsztyń jest reprezentowany

przez cyklotemy PZ1, PZ2, PZ3 i PZ4 (ryc. 6). Podłożem pokładu soli są utwory anhydrytu dolnego, wapień cechsztyński i łupek miedzionośny, podścielone osadami czerwonego spągowca. Nadkład tworzą: anhydryt górny, utwory triasu, paleogenu, neogenu oraz czwartorzędu (Preidl, 1990; Czapowski, 2017). Strefa złożowa jest stosunkowo słabo zaburzona tektonicznie (zaznacza się występowanie kilku stref zuskokowanych) i jest odizolowana od stref wodonośnych. Takie warunki są odpowiednie do utworzenia kawern magazynowych i dlatego złożo soli kamiennej Bytom Odrzański jest rekomendowane do bezzbiornikowego magazynowania w Polsce substancji ropopochodnych (Lankof, 2018; Ślizowski, Urbańczyk, 2011).

Pod budowę KPMG przeznaczono obszar o powierzchni ok. 25 km² w gminie Bytom Odrzański w północno-zachodniej części Niziny Śląskiej. Teren ten należy do lewobrzeźnego dorzecza środkowej Odry, która płynie w odległości ok. 2 km na północny wschód od granic obszaru. Od północy graniczy on z obszarem Natura 2000, a jego połowę zajmują kompleksy leśne. Rozpoznanie geofizyczne i wiertnicze wskazuje, że w pobliżu planowanego KPMG przebiega uskoki Bytomia Odrzańskiego o zrzucie ok. 95 m (Markiewicz, 2003). Jednak przy zachowaniu strefy ochronnej (filaru bezpieczeństwa) o odpowiedniej szerokości nie stanowi on przeszkody do budowy komór magazynowych.



Ryc. 5. A – Fragment mapy złoża soli Na1 k. Bytomia Odrzańskiego (wg Szybist, 1994); B – Przekrój A–A przez otwory S-478, S-479 i S-480 (opracowanie własne na podstawie Centralnej Bazy Danych Geologicznych – Otwory wiertnicze)
 Fig. 5. A – Part of the map of the Na1 salt deposit in the area of Bytom Odrzański (after Szybist, 1994); B – the A–A section through the S-478, S-479 and S-480 boreholes (own study based on Boreholes in Central Geological Database)



Ryc. 6. Zasięg pokładów soli cechsztyńskich na obszarze południowo-zachodniej części monokliny przedsudeckiej (Markiewicz, Becker, 2009)
 Fig. 6. Extent of Zechstein salt beds in the area of southwestern part of the Fore-Sudetic Monocline (Markiewicz, Becker, 2009)

Jednym z podstawowych warunków bezzbiornikowego magazynowania substancji w formacjach solnych jest zagospodarowanie solanki powstałej na etapie budowy magazynu i wykorzystywanej w czasie jego eksploatacji. Wymogi ochrony środowiska uniemożliwiają zrzut solanki do cieków powierzchniowych (w tym przypadku do Odry). Solankę powstałą w procesie ługowania KPMG w złożu solnym k. Bytomia Odrzańskiego można zagospodarować poprzez zbycie jej zakładom przemysłu chemicznego, np. PCC Rokita (Maciejewski, 2008). Obszar wytypowany pod budowę KPMG k. Bytomia Odrzańskiego jest oddalony od źródła wody technologicznej potrzebnej do ługowania kawern o 2,5 km. Zakład chemiczny, w którym można by było zbyć solankę, znajduje się w odległości 90 km od tego obszaru, a sieć przesyłowa gazu jest oddalona od niego o 54 km (Ślizowski, Urbańczyk, 2011). Budowa kawernowego podziemnego magazynu gazu lub energii w pokładowym złożu soli kamiennej k. Bytomia Odrzańskiego byłaby pierwszą tego typu inwestycją na Dolnym Śląsku i przyczyniłaby się do poprawy zaopatrzenia w gaz ziemny mieszkańców województwa dolnośląskiego.

ZASADY PROJEKTOWANIA KPMG

Kawerny wykorzystywane do podziemnego magazynowania gazu ziemnego są wielkogabarytowymi wyrobiskami górniczymi, wykonywanymi w formacjach solnych metodą otworową z zastosowaniem ługowania. Obiekty tego typu powinny zachowywać długotrwałą stateczność oraz szczelność i umożliwiać zatłaczanie i wytlaczanie magazynowanego medium (gazowego lub ciekłego) w określonym czasie (Kunstman i in., 2002). Projektowanie pola magazynowego polega na odpowiednim usytuowaniu kawern w górotworze, właściwym związaniu pojedynczych wyrobisk oraz określeniu ich wzajemnego rozmieszczenia, a także na wyznaczeniu bezpiecznych filarów pomiędzy nimi oraz określeniu filarów bezpieczeństwa względem granic złoża (wysadowego lub pokładowego).

Uwzględniając geologiczne i hydrogeologiczne warunki w rejonie pól magazynowych planowanych w wysadowym złożu soli Damasławek oraz w pokładzie solnym k. Bytomia Odrzańskiego należy ocenić stateczność tych górotworów. W ocenie tej należy określić właściwości soli (wyznaczone laboratoryjnie) i wykonać *in situ* pomiary konwergencji kawern (tzn. tempa ich zaciskania się), a także wylczyć parametry wytrzymałościowe górotworu solnego w sąsiedztwie wyrobisk, z uwzględnieniem geometrii złoża (tzn. głębokości zalegania czapy wysadu, stropu złoża i jego miąższości).

Maksymalna pojemność komory magazynowej i minimalne ciśnienie gazu, jakie należy w niej utrzymywać w celu zachowania jej stateczności, są uzależnione od głębokości posadowienia tego obiektu. Im głębiej jest posadowiony taki magazyn, tym większe siły oddziałują na jego ściany i powodują szybsze tempo konwergencji ociosów (Kłeczek, 1994; Kortas, 2008). Stateczność ścian podziemnych wyrobisk jest też ściśle związana z reżimem pracy magazynu. Jednak o finalnym stanie odkształceniowo-naprężeniowym ośrodka skalnego stanowiącego materiał konstrukcyjny podziemnych obiektów geoinżynierskich decydują jego właściwości reologiczne i intensywność procesu pełzania (Kunstman i in., 2002).

Do przeprowadzenia prawidłowej analizy stateczności pola magazynowego, zarówno z zastosowaniem metod analitycznych, jak i analiz numerycznych, niezbędna jest znajomość geomechanicznych właściwości górotworu, w tym sprężystości, plastyczności i lepkości utworów sol-

nych. Wiedza o parametrach wytrzymałościowych skały w trójosiowym stanie naprężenia oraz o parametrach reologicznych wyznaczonych na podstawie badań trójosiowego pełzania soli w podwyższonych temperaturach wspomaga proces projektowy i umożliwia precyzyjne przewidywanie przekształceń projektowanego obiektu i ich wpływu na górotwór. Należy wziąć pod uwagę, że pełzanie soli spowoduje zmiany objętości wyrobiska. Pod wpływem zmian ciśnienia wewnątrz kawerny kontury wyrobiska będą miały tendencję do przemieszczania się w kierunku przestrzeni, w której panuje niższe ciśnienie, oznacza to, że kawerna będzie się zaciskać.

Kawerny pracują w pewnym zakresie ciśnień. W trakcie zatłaczania gazu ziemnego do kawerny podniesie się ciśnienie w jej wnętrzu. Ciśnienie to, wywierane przez gaz na kontur wyrobiska, będzie przeciwdziałać ciśnieniu górotworu – to korzystna sytuacja, jednak należy zachować ostrożność ze względu na możliwość wytworzenia szczelin w górotworze. Natomiast w trakcie wytłaczania gazu ciśnienie w kawernie spada. Jednak nie można go obniżyć poniżej pewnej wartości, by nie został przekroczony warunek wyężeniowy i nie pojawiły się naprężenia rozciągające górotwór (szczególnie niebezpieczne są te usytuowane w stropie komory). Niskie ciśnienie wewnętrzne zwiększa tempo konwergencji, dlatego też okresy, kiedy w kawernie jest mało gazu, powinny być stosunkowo krótkie, by nie rozwinęły się nadmiernie procesy reologiczne w górotworze i nie osiągnęły fazy pełzania progresywnego.

Wraz z upływem czasu lepkie pełzanie soli prowadzi do zaciskania się wyrobisk i przez to utraty ich objętości. Proces ten powoduje zatem, że zmniejsza się użyteczność magazynu. Tempo pełzania soli zależy od temperatury górotworu w otoczeniu kawerny. W związku z tym zmiany temperatury pod wpływem sprężania i rozprężania gazu w kawernie mogą przyspieszać lub spowalniać proces pełzania (Kunstman i in., 2002).

Prognozowanie stateczności kawerny magazynowej jest wysoce skomplikowane. Obejmuje ono rozpatrywanie możliwych zmian właściwości górotworu w długim czasie z uwzględnieniem zmian temperatury i ciśnienia wewnątrz kawerny. Zjawisko konwergencji nie wpływa na utratę stateczności komór magazynowych i nie rzutuje na bezpieczną eksploatację pola magazynowego, ale ubytek objętości kawerny uszczupla rezerwy magazynowe (Kunstman i in., 2002). Badania reologicznych właściwości soli są czasochłonne. W rejonie magazynu planowanego k. Bytomia Odrzańskiego reologiczne właściwości soli zostały rozpoznane w dostatecznym stopniu, natomiast w rejonie złoża Damasławek jeszcze nie (Kłeczek, Zeljaś, 2012).

PODSUMOWANIE

Wzrost zużycia innych nośników energii nieodnawialnej niż węgiel oraz ich magazynowanie pozytywnie wpływa na sektor przemysłowy, a poprzez zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych także na środowisko przyrodnicze. Strategiczne rezerwy gazu ziemnego muszą spełniać wymogi ustawy z 16 lutego 2007 r. o zapasach ropy naftowej, produktów naftowych i gazu ziemnego oraz zasadach postępowania w sytuacjach zagrożenia bezpieczeństwa paliwowego państwa i zakłóceń na rynku naftowym (Ustawa..., 2007), nakazujące zapewnienie odpowiedniego poziomu odbioru nośnika energii przez sieć przesyłową lub dystrybucyjną. Takie założenia spełniają KPMG.

Polska ma duże złoża soli kamiennej, wykształcone w formie wysadów i pokładów. Warunki geologiczne, tekto-

niczne i hydrogeologiczne tych złóż zostały stosunkowo dobrze rozpoznane i stwarzają bogate możliwości lokowania w nich KPMG. Spośród wielu potencjalnych lokalizacji magazynów tego typu najpoważniejszą są brane pod uwagę dwa złoża, które gwarantują bezpieczeństwo zachowania szczelności magazynu oraz uzyskanie odpowiedniego kształtu i objętości kawern, a także pewność, że nie występuje kolizja z inną działalnością górniczą. Są to wysad solny Damasławek na Niżu Polskim oraz pokładowe złożo soli k. Bytomia Odrzańskiego na monoklinie przedsudeckiej.

Kieruję podziękowania do Recenzentów za wsparcie merytoryczne oraz do Redakcji za wsparcie techniczne i edytorskie. Pracę zrealizowano w ramach subwencji AGH Akademia Górniczo-Hutnicza 16.16.190.779.

LITERATURA

- BRAŃKA S. 1992 – Budowa kawernowego, podziemnego magazynu gazu Mogilno i perspektywy lokalizacyjne tego typu magazynów w Polsce. Mat. konf. Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego – Niekonwencjonalne wykorzystanie złóż soli, Zakopane, 1992.
- CENTRALNA Baza Danych Geologicznych – Otwory wiertnicze; <http://otworywiertnicze.pgi.gov.pl>
- CHEMKOP SP. Z O.O. 2003 – 2004 – opracowanie – Studium budowy podziemnych magazynów węglowodorów ciekłych w złożach soli Lubień Kujawski i Łanięta; Inowrocławskie Kopalnie Soli S.A.
- CHEMKOP SP. Z O.O. 2005 – Koncepcja budowy komór magazynowych na etylen w wysadach solnych Lubień Kujawski i Łanięta, Polski Koncern Naftowy Orlen.
- CORNOT-GANDOLPHE S. 2019 – Underground gas storage in the world – 2018 status. CEDIGAZ; [https://cdn2.hubspot.net/hubfs/1982707/Overview-of-underground-gas-storage-in-the-world-2018-\(1\).pdf](https://cdn2.hubspot.net/hubfs/1982707/Overview-of-underground-gas-storage-in-the-world-2018-(1).pdf)
- CZAPOWSKI G. 2006 – Możliwości bezpiecznego podziemnego magazynowania węglowodorów w strukturach geologicznych na obszarze Polski. *Prz. Geol.*, 54 (8): 658–659.
- CZAPOWSKI G. 2017 – Potencjał zasobowy soli kamiennej i soli potasowo-magnezowych obszaru przedsudeckiego. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 469: 105–127.
- CZAPOWSKI G., BUKOWSKI K. 2009 – Złoża soli w Polsce – stan aktualny i perspektywy zagospodarowania. *Prz. Geol.*, 57: 798–811.
- 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. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 448 (1): 145–156.
- CZAPOWSKI G., KASIŃSKI J., KRZYWIEC P., POLECHOŃSKA O., TOMASSI-MORAWIEC H., WRÓBEL G. 2006 – Metodyka oceny kierunków zagospodarowania nieudostępnionych górniczo cechsztyńskich struktur solnych na obszarze Niżu Polskiego w świetle danych geologicznych. *Nar. Arch. Geol. PIG-PIB Warszawa* [1882/2006].
- CZAPOWSKI G., BLIŹNIUK A., ADAMCZAK-BIAŁY T., FELTER A., FRANKOWSKI Z., JAROSIŃSKI M., KOSTRZ-SIKORA P., MAJER E., PIETRZYKOWSKI P., ROSOWIECKA O., SOBIEŃ K., SOKOŁOWSKI J., TOMASSI-MORAWIEC H., MASSAKA V., SZYSZKA Ł. 2013 – Projekt robót geologicznych w celu lepszego rozpoznania budowy geologicznej wysadu solnego Damasławek w gminach: Janowiec Wielkopolski i Żnin (powiat Żnin, woj. kujawsko-pomorskie) oraz jego otoczenia pod kątem przyszłego podziemnego bezzbiornikowego magazynowania węglowodorów. *Arch. Gaz-System S.A.*, Warszawa.
- CZAPOWSKI G., ALEKSANDROWSKI P., JAROSIŃSKI M. 2017 – Struktury solne 1 : 5000 000. [W:] J. Nawrocki, A. Becker (red.), *Atlas Geologiczny Polski*. Państw. Inst. Geol.-PIB.
- GAZ-SYSTEM 2018 – Magazyn Gazu Damasławek; https://www.gaz-system.pl/fileadmin/centrum_prasowe/wydawnictwa/PL/Podziemny_Magazyn_Gazu_Damaslawek.pdf
- GAZ-SYSTEM 2019 – 5 grudnia br. GAZ-SYSTEM podpisał list intencyjny z firmą CIECH w zakresie współpracy przy budowie podziemnego magazynu gazu ziemnego i kopalni soli *Damasławek*; <https://www.gaz-system.pl/centrum-prasowe/aktualnosci/informacja/artykul/203066/>
- GIE Storage Map 2018 – https://www.gie.eu/download/maps/2018/GIE_STOR_2018_AO_1189x841_FULL_FINAL.pdf
- <https://ipi.gasstoragepoland.pl/pl/menu/wiedza/#jak-magazynujemy-gaz>
- FLISIAK D., TAJDUŚ A. 1994 – Weryfikacja niektórych hipotez wytyżeńowych dla soli kamiennej w świetle laboratoryjnych badań wytrzymałościowych. *Pr. Nauk. Inst. Geotechniki i Hydrotechniki*, Pol. Wrocław.
- KŁECZEK Z. 1994 – Geomechanika Górnictwa. Śl. Wyd. Tech., Katowice.
- KŁECZEK Z. 1999 – Wytyżenie górotworu solnego wokół podziemnych kawernowych magazynów gazu. *Cuprum*, 12.
- KŁECZEK Z., FLISIAK D. 1994 – Geomechanical Research of the Rock Salt in Aspect of its Utilisations for Building Underground Storage. *Wyd. AGH, Rozpr. Monogr.*, 19.
- KŁECZEK Z., ZELJAŚ D. 2012 – Naukowe podstawy i praktyczne zasady budowy w Polsce podziemnego składowiska odpadów niebezpiecznych. ITG KOMAG, Gliwice.
- KORONOWSKA L. 1983 – Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w wysadzie Damasławek kat C2. *CAG Państw. Inst. Geol.*, nr 3725/377.
- KORTAS G. 2008 – Ruch górotworu w rejonie wysadów solnych. *WIGSMiE PAN*, Kraków.
- KRZYWIEC P. 2009 – Geometria i ewolucja wybranych struktur solnych z obszaru Niżu Polskiego w świetle danych sejsmicznych. *Prz. Geol.*, 57 (9): 81–812.
- KRZYWIEC P., JAROSIŃSKI M., TWAROGOWSKI J., BURLIGA S., SZEWCZYK J., WYBRANIEC S., CZAPOWSKI G., ZIENTARA P., PETECKI Z., GARLICKI A. 2000 – Geofizyczno-geologiczne badania stropu i nadkładu wysadu solnego Damasławek. *Prz. Geol.*, 48 (11): 1005–1014.
- KUNSTMAN A., POBORSKA-MŁYNARSKA K., URBAŃCZYK K. 2002 – Zarys otworowego ługownictwa solnego – Aktualne kierunki rozwoju. *AGH*.
- KUNSTMAN A., POBORSKA-MŁYNARSKA K., URBAŃCZYK K. 2009 – Geologiczne i górnicze aspekty budowy magazynowych kawern solnych. *Prz. Geol.* 57 (9): 000–000.
- LANKOF L. 2018 – Klasyfikacja polskich złóż soli kamiennej w aspekcie magazynowania i składowania substancji. *WIGSMiE PAN*.
- MACIEJEWSKI A. 2008 – Podziemne magazynowanie paliw płynnych. *Gosp. Sur. Miner.*, 24 (3/2): 39–53.
- MARKIEWICZ A. 2003 – Tektonika cechsztyńskiej soli kamiennej w LGOM i jej znaczenie dla działalności gospodarczej. *Arch. Zakł. Złóż Rud i Soli AGH*, pr. doktorska, Kraków.
- MARKIEWICZ A., BECKER R. 2009 – Pierwotny zasięg występowania najstarszej soli kamiennej (Na1) w południowej części monokliny przedsudeckiej (SW Polska). *Geologia*, 35 (3): 327–348.
- MINISTER Energii 2019 – Sprawozdanie z wyników monitorowania bezpieczeństwa dostaw paliw gazowych za okres od dnia 1 stycznia 2018 r. do dnia 31 grudnia 2018 r.; <https://www.gov.pl/web/aktywa-panstwowe/sprawozdanie-z-wynikow-monitorowania-bezpieczenstwa-dostaw-paliw-gazowych-za-2018-r>
- PGNiG 2018 – Raport Roczny 2018; <http://pgnig.pl/documents/101-84/2687346/PGNiG-Raport-Roczny-2018-PL.pdf/3a49f7ee-8db6-4918-a2f9-eac9687a975d>
- PGNiG 2019 – Zawodniony gaz z Rosji nie jest już zagrożeniem dla Polski – Spółka PGNiG SA rozpoczyna ruch instalacji osuszania gazu; <http://pgnig.pl/aktualnosci/-/news-list/id/zawodniony-gaz-z-rosji-nie-jest-juz-zagrozeniem-dla-polski-spolka-rozpoczyna-rozruch-instalacji-osuszania-gazu/newsGroupId/10184>
- PREIDL M. (red.) 1990 – Dokumentacja geologiczna soli kamiennej występującej ponad złożem rud miedzi Kopalni *Sieroszowice* (zasoby w kategorii C1 i szacunkowe). *Arch. Państw. Inst. Geol.-PIB*.
- RAPORT CIECH S.A. nr 49/2019 – Podpisanie listu intencyjnego w sprawie inwestycji polegającej na budowie kopalni soli i podziemnego magazynu gazu oraz dostawach solanki do zakładów produkcyjnych Grupy CIECH; <https://ciechgroup.com/relacje-inwestorskie/raporty/raporty-biezace/2019/482019>
- SZUFLICKI M., MALON A., TYMIŃSKI M. 2019 – Bilans zasobów złóż kopalni w Polsce wg stanu na 31.12.2018 r. *Państw. Inst. Geol.-PIB*.
- SZYBIST A. 1994 – Mapa izopachytowa złoża soli kamiennej najstarszej w LGOM. *AGH*.
- ŚLIZOWSKI K. 1983 – Warunki geologiczno-górniczne w cechsztyńskich złożach soli w Polsce dla wykonywania podziemnych zbiorników cieczy i gazu. *Zesz. Nauk. AGH, Górnictwo*, 121: 829–838.
- ŚLIZOWSKI J., URBAŃCZYK K. 2011 – Możliwości magazynowania gazu ziemnego w polskich złożach soli kamiennej w zależności od warunków geologiczno-górnicznych. *WIGSMiE PAN*, Kraków.
- ŚLIZOWSKI K., KOHSLING J., LANKOF L. 2004 – Uwarunkowania podziemnego składowania odpadów niebezpiecznych w Polsce. *WIGSMiE PAN*, Kraków.
- TWAROGOWSKI J., BRUSZEWSKA B., CZAPOWSKI G., DĄBROWSKA B., ZIENTARA P. 2002 – Kompleksowe badanie budowy geologicznej struktur przypowierzchniowych z zastosowaniem analizy danych geologiczno-geofizycznych na przykładzie rozpoznania wysadu solnego Damasławek i jego otoczenia. *Prz. Geol.*, 50 (12): 1169–1176.
- USTAWA z dnia 10 kwietnia 1997 r. – *Prawo energetyczne*. *Dz.U.* 1997 nr 54 poz. 348.
- USTAWA z dnia 16 lutego 2007 r. o zapasach ropy naftowej, produktów naftowych i gazu ziemnego oraz zasadach postępowania w sytuacjach zagrożenia bezpieczeństwa paliwowego państwa i zakłóceń na rynku naftowym. *Dz.U.* 2007 nr 52 poz. 343.

Praca wpłynęła do redakcji 4.02.2020 r.
Akceptowano do druku 10.07.2020 r.