



# Możliwości magazynowania gazu ziemnego i energii w utworach solnych na terenie Polski

Wacław ANDRUSIKIEWICZ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> dr hab. inż., prof. AGH; Department of Mining Engineering & Occupational Safety, Faculty of Civil Engineering and Resource Management, AGH University of Krakow; email: andus@agh.edu.pl; ORCID: 0000-0002-4845-1404

<http://doi.org/10.29227/IM-2024-01-103>

Submission date: 13-05-2024 | Review date: 25-06-2024

## Abstrakt

Bezpieczeństwo energetyczne państwa to m.in. zabezpieczenie potrzeb odbiorców w zakresie paliw i energii. Jednym z elementów polityki energetycznej jest infrastruktura magazynowa, która umożliwi przechowywanie zapasów gazu ziemnego oraz paliw. Jest realizowana poprzez magazyny powierzchniowe i podziemne. Szczególnie ważna jest rola tych drugich z uwagi na oferowane pojemności, ale też możliwe do uzyskania parametry technologiczne procesu magazynowania.

Jednym z dogodnych miejsc do budowy magazynów podziemnych gazu i paliw są złoża soli kamiennej, w których wykonywane są kawerny magazynowe. Polska z racji korzystnego dostępu do solnych formacji geologicznych posiada w tym zakresie duże możliwości budowy podziemnej bazy magazynowej zarówno dla gazu ziemnego, jak i dla paliw płynnych.

Proces dekarbonizacji sektora energetycznego zmusza do poszukiwania nowych źródeł energii, które z czasem zastąpią w systemie energetycznym paliwa kopalne. Odpowiedzią na to wyzwanie stają się odnawialne źródła energii (woda, wiatr, słońce), których zaletą jest niewyczerpywalność, z drugiej zaś wadą ich niesterowalność z uwagi na uzależnienie od warunków klimatycznych/pogodowych.

W artykule omówiono możliwości budowy kawernowych podziemnych magazynów gazu oraz energii, zwracając uwagę na te drugie, jako przyszłościowe rozwiązania konieczne do wykorzystania w systemie energetycznym. Na tle bazy zasobowej soli kamiennej wskazano miejsca potencjalnej lokalizacji przyszłych magazynów kawernowych.

**Słowa kluczowe:** złoża soli, kawerny solne, podziemne magazyny gazu, podziemne magazyny energii

## Wprowadzenie

Ustawowym celem polityki energetycznej państwa (PEP) jest zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego rozumianego jako stan gospodarki, który umożliwi pokrycie bieżącego i perspektywicznego zapotrzebowania odbiorców na paliwa i energię w sposób technicznie i ekonomicznie uzasadniony, przy zachowaniu wymagań ochrony środowiska [16]. W 2021 r. został ogłoszony dokument Polityka energetyczna Polski do roku 2040 (PEP2040), w którym sprecyzowano 8 celów szczegółowych, obejmujących cały łańcuch dostaw energii – od pozyskania surowców, przez wytwarzanie i dostawy energii (przesył i rozdział), po sposób jej wykorzystania i sprzedaży [13]. Jednym z celów szczegółowych jest dywersyfikacja dostaw i rozbudowa infrastruktury sieciowej gazu ziemnego, ropy naftowej i paliw ciekłych.

W celu dalszego wzrostu bezpieczeństwa energetycznego państwa, założenia polityki energetycznej zakładają, że do sezonu zimowego 2030/2031 nastąpi rozbudowa podziemnych magazynów gazu. Planowane jest uzyskanie pojemności min. 4 mld m<sup>3</sup> (obecnie jest to ok. 3,3 mld m<sup>3</sup>, tj. wzrost o blisko 1/3 aktualnej pojemności) oraz zwiększenie maksymalnej mocy odbioru gazu z instalacji magazynowych – z obecnych 53,5 mln m<sup>3</sup>/dobę do min. 60 mln m<sup>3</sup>/dobę (wzrost o ok. 1/6).

Gwałtowna zmiana sytuacji geopolitycznej w Europie, do której doszło na początku 2022 r., zmusiła wiele państw, w tym Polskę, do zweryfikowania stanu bezpieczeństwa energetycznego kraju. To z kolei wymusza aktualizację PEP2040, uwzględniając wcześniejsze założenia związane z dekarbonizacją energetyki. Miejsce węgla jako surowca energetycznego ma przejść na pewien czas gaz ziemny, który docelowo będzie również eliminowany z rynku energii na rzecz odnawialnych źródeł energii (OZE) oraz energetyki jądrowej.

W tej perspektywie ważnym elementem mającym wpływ na bezpieczeństwo energetyczne państwa są zgromadzone rezerwy (zapasy) kluczowych nośników energii, w tym gazu ziemnego. Temu celowi służą podziemne magazyny gazu (PMG). Podejmowane są pierwsze próby przekształcania magazynów gazu na magazyny energii – w tym przypadku magazynowanym medium będzie wodór oraz powietrze.

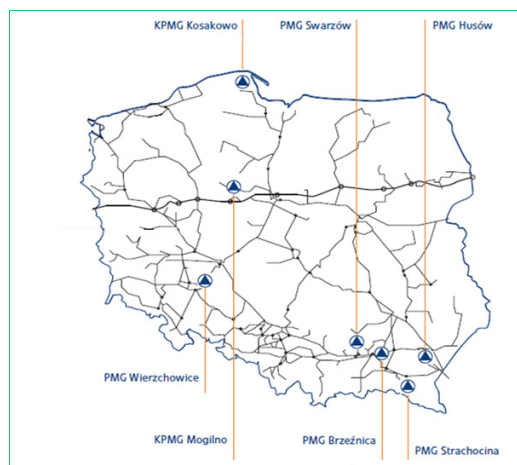
## Podziemne magazyny gazu

Magazynowanie gazu ziemnego może mieć charakter długoterminowy ze względów strategicznych na wypadek kryzysów (np. wojna, embargo, katastrofa), koniunkturalnych (związanych z ceną gazu na rynkach światowych) bądź sezonowy (wyrównanie popytu i podaży w zależności od pory roku). Może mieć też charakter krótkoterminowy (wyrównanie popytu szczytowego w okresie dobowym bądź kilkudniowym).

Klasyczne magazynowanie gazu ziemnego sprowadza się do budowy powierzchniowych zbiorników gazu [dotyczy tylko gazu w postaci skroplonej (LNG – Liquefied Natural Gas)], które narażone są na różnego rodzaju zagrożenia np. strategiczno-militarne. Zajmują przy tym tereny, które mogłyby być wykorzystane w inny sposób. Ponadto same w sobie stanowią potencjalne zagrożenie ekologiczne dla przyległego obszaru. Nie bez znaczenia są też koszty budowy i utrzymania takich magazynów, przy relatywnie niewielkiej kubaturze magazynowej.

Powyższe argumenty przemawiają za budową magazynów podziemnych różnych formacjach geologicznych, w tym złożach soli kamiennej.

Podziemny magazyn gazu to zbiornik o dużej pojemności magazynowej. Celem podziemnych magazynów gazu jest



Rys. 1. Lokalizacja magazynów gazu w Polsce [5]  
 Fig. 1. Location of gas storage facilities in Poland [5]

Tab. 1. Podstawowe parametry magazynów gazu w Polsce [4]  
 Tab. 1. Basic parameters of gas storage facilities in Poland [4]

Magazyn	Pojemność czynna		Dobowa maksymalna moc		Dobowa maksymalna moc	
	mln m <sup>3</sup>	GWh	mln m <sup>3</sup>	GWh	mln m <sup>3</sup>	GWh
PMG Wierzchowice	1 300	14 729	9,60	107,5	14,40	158,4
PMG Husów	500	5 650	4,15	46,7	5,76	64,6
PMG Strachocina	460	5 212	3,84	43,7	3,36	37,9
PMG Brzeźnica	100	1 126	1,44	16,2	1,44	16,1
PMG Swarzędz	90	1 013	1,00	11,2	0,93	10,4
<b>PMG razem</b>	<b>2 450</b>	<b>27 730</b>	<b>20,03</b>	<b>225,3</b>	<b>25,89</b>	<b>287,4</b>
KPMG Mogilno	581	6 471	9,60	106,9	18,00	200,5
KPMG Kosakowo	295	3 291	2,40	26,8	9,60	107,0
<b>KPMG razem</b>	<b>876</b>	<b>9 762</b>	<b>12,00</b>	<b>132,7</b>	<b>27,60</b>	<b>307,5</b>
<b>Ł A C Z N I E</b>	<b>3 326</b>	<b>37 492</b>	<b>32,03</b>	<b>358,0</b>	<b>53,49</b>	<b>594,9</b>

PMG – podziemny magazyn gazu w szczerpanym złożu gazu ziemnego  
 KPMG – kawernowy podziemny magazyn gazu w złożu soli kamiennej

sezonowe oraz strategiczne przechowywanie gazu ziemnego, co przyczynia się do zwiększenia niezawodności systemów gazowniczych i bezpieczeństwa energetycznego regionu oraz kraju.

Wyróżnia się trzy rodzaje zbiorników [19]:

- porowo-szczelinowe, do których zalicza się przestrzenie w szczerpanych lub częściowo wyeksploatowanych złożach węglowodorów oraz zawadnione struktury geologiczne;
- kawernowe, wykonane w pokładowych lub wysadowych utworach solnych;
- kubaturowe, poprzez wykorzystanie wyeksploatowanych kopalń np. węgla kamiennego, ale także w groty skalne.

Do tych zbiorników może być wtłaczany gaz pod odpowiednim ciśnieniem, który w normalnych warunkach zajmuje objętość miliardów metrów sześciennych.

W świetle ustawy [15] ten sposób magazynowania określany jest jako „...podziemne bezzbiornikowe magazynowanie substancji...” i dotyczy nie tylko gazu ziemnego, ale także np. ropy naftowej, wodoru, powietrza itp.

Pierwszy podziemny magazyn gazu powstał w 1915 r. w rejonie Ontario (Kanada). W krótkim czasie powstało ich kilkanaście na terenie USA. Polska w tym zakresie była pierwszym państwem europejskim, która już w 1954 r. stworzyła podziemny magazyn gazu w wyeksploatowanym złożu gazu ziemnego

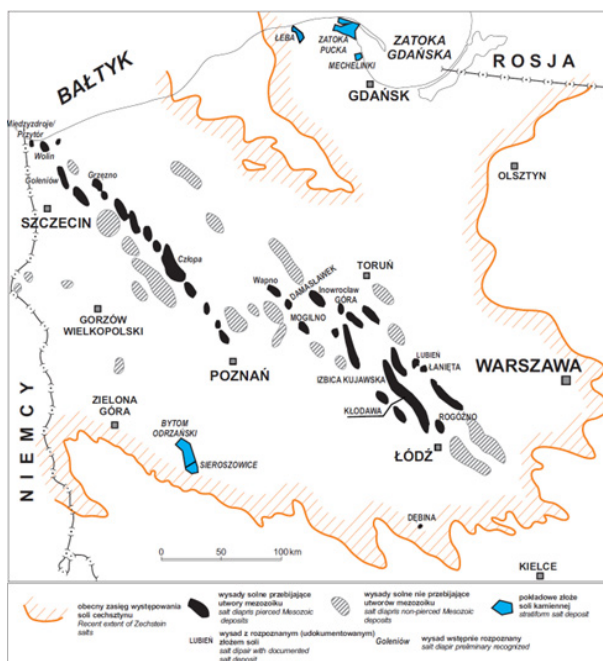
Roztoki koło Jasła. Utworzony wówczas magazyn miał pojemność ok. 35,5 mln m<sup>3</sup> gazu i funkcjonował do 1980 r.

Na koniec 2023 r. na świecie działało 678 podziemnych magazynów gazu, z czego 446 w Ameryce Północnej, a 139 w Europie. Łączna pojemność wszystkich zbiorników wynosiła 429 mld m<sup>3</sup>, z czego 38% na terenie Ameryki Północnej, a 26% w Europie [2]. Na podstawie analizy dostępnych źródeł [2] [1] szacuje się, że w kawernach solnych zlokalizowano ok. 100 magazynów gazu (na kawernowy podziemny magazyn gazu może składać się od jednej do nawet kilkudziesięciu kawern) stanowiących ok. 8% globalnej pojemności PMG. Aktualnie w Polsce działa 7 magazynów – Rys. 1, a ich łączna pojemność wynosi ok. 3,3 mld m<sup>3</sup> – Tab. 1.

#### Formacje solne i ich rozmieszczenie na terenie Polski

Na terenie Polski wyróżnia się trzy formacje solonośne: mioceńską, triasową oraz cechsztyńską [10]. Nie jest przesadą stwierdzenie, że sól kamienna zalega niemal na całym terytorium kraju, kwestią jest tylko głębokość, na jakiej występuje.

Mioceńskie sole kamienne występują w zapadlisku przedkarpaccim i są reprezentowane przez 7 złóż, w tym złoża Wieliczka, Barycz, Łęzkowice i Bochnia, gdzie eksploatacja została zakończona. Pozostałe 3 – Rybnik, Siedlec i Wojnicz, z racji dużej głębokości, skomplikowanej budowy geologicznej, zmiennej miąższości, zagrożenia wodnego i gazowego nie są brane pod uwagę jako potencjalnie możliwe do wykorzystania w kierunku magazynów gazu ziemnego [8].



Rys. 2. Rozmieszczenie cechsztyńskich złóż soli w Polsce [7]

Fig. 2. Distribution of Zechstein salt deposits in Poland [7]

Złoża triasowe są zlokalizowane w dwóch rejonach Polski: pomiędzy Gorzowem Wielkopolskim i Zieloną Górą oraz pomiędzy Poznaniem i Łodzią. Zalegają na głębokości co najmniej 1100 m, a ich miąższość nie przekracza 25 m. Z tych dwóch powodów złoża te nie są uwzględniane w bilansie surowcowym Polski, jako że nie mają znaczenia gospodarczego, a z racji niewielkiej miąższości nie nadają się do budowania w nich kawern magazynowych gazu [10].

Cechsztyńska formacja solonośna stanowi około 93% udokumentowanych zasobów bilansowych soli kamiennej w Polsce. Osady solne tej formacji zajmują 2/3 powierzchni Polski i stanowią podstawowe źródło jej pozyskiwania. Złoża cechsztyńskie o znaczeniu gospodarczym można podzielić na trzy podstawowe rejony występowania: północny – obejmujący wyniesienie Łęby, środkowopolski pomiędzy Łodzią a Szczecinem, oraz południowo-zachodni obejmujący obszar Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego – Rys. 2.

Sole cechsztyńskie występują w postaci dwóch form złożowych: pokładowej oraz jako wysady. Forma pokładowa jest charakterystyczna dla rejonu północnego oraz południowo-zachodniego, natomiast rejon środkowopolski stanowią wysady solne.

Największe złoża pokładowe rozpoznano w rejonie północnym [9]. Są to głównie sole najstarsze (Na1) budujące pokład o miąższości ponad 220 m, zalegający na głębokości od 490 do 1285 m. W obrębie tego pokładu rozpoznano w kategorii C1 i C2 trzy jego fragmenty: złożo Łęba o powierzchni około 50 km<sup>2</sup>, złożo Zatoka Pucka o powierzchni około 100 km<sup>2</sup> oraz złożo Mechelinki o powierzchni około 9 km<sup>2</sup>.

Złożo w rejonie północnym charakteryzuje się stosunkowo prostą budową i niewielkim stopniem zaangażowania tektonicznego. Zlokalizowane pomiędzy dwoma warstwami anhydrytu stanowiącego bardzo dobre horyzonty izolacyjne posiada dość jednolity stan mineralny.

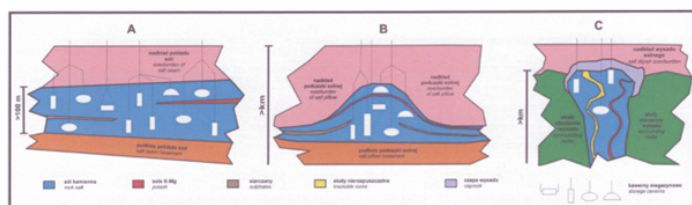
W chwili obecnej zagospodarowywane jest jedynie złożo Mechelinki (rejon Kossakowa) w kierunku kawernowego

podziemnego magazynu gazu. Perspektywnie istnieje możliwość zagospodarowania złoża w kierunku KPMG w rejonie Władysławowa, Jastrzębiej Góry, Łebcza, Lisewa, Pucka i Białogardy. W rejonach tych miąższość złoża wynosi od 130 do 200 m, a głębokość zalegania mieści się w przedziale od 620 do 820 m.

Drugim rejonem występowania soli cechsztyńskich w formie pokładowej jest rejon południowo-zachodni (por. Rys. 2). Jest to monoklina przedsudecka, a sól kamienna występuje w nadkładzie rud miedzi na obszarze LGOM. W kategorii B rozpoznano fragment tej formacji należącej do złoża Kaźmierzów na obszarze górniczym Sieroszewice I. Na obszarze tym występują najstarsze sole kamienne (Na1). Pokład o zmiennej miąższości, od kilkunastu do 200 m zawiera czystą sól kamienną o zawartości NaCl od 75,56 do 99,82%, średnio 98%. Pokład zalega na głębokości od 830 do 1270 m, nad pokładem rudy miedzi, od którego odizolowany jest warstwą anhydrytu dolnego (A1d), natomiast strop pokładu zamyka anhydryt górny (A1g). Pokład soli jest silnie zaburzony tektonicznie z pojawiającym się anhydrytem śródsolnym (A1s).

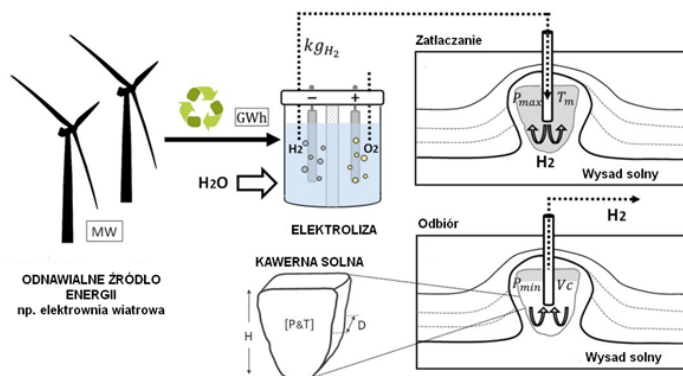
Na terenie LGOM w jego północno-zachodniej części występują jeszcze trzy złoża soli młodszych o miąższości 30–110 m występujących na głębokości około 1230 m (Na3) oraz 1340–1380 m (Na2), natomiast złożo soli (Na4) o miąższości do 44 m zalega 1100–1280 m poniżej poziomu terenu. Pokłady te – podobnie jak pokład soli najstarszych (Na1) – charakteryzują się skomplikowaną budową i tektoniką. Złoża te nie są obecnie zagospodarowane górniczo, choć najbardziej miąższe części pokładów soli mogą być brane pod uwagę jako potencjalne miejsce do KPMG, np. [14].

Trzeci rejon – środkowopolski – w istotny sposób odbiega w swojej formie i budowie od złóż tej samej formacji występujących w rejonach północnym i południowo-zachodnim. Jest to pas wysadów solnych rozciągających się od Łodzi po Szczecin (por. Rys. 2). Udokumentowano 9 wysadów, wśród których dwa zostały wykreślone z rejestru zasobów, a to za



Rys. 3. Kawerny solne w trzech typach wystąpień solnych: A – pokład, B – poduszka solna, C – wysad [6]

Fig. 3. Salt caverns in three types of salt occurrences: A – seam, B – salt cushion, C – diapir [6]



Rys. 4. Schemat wytwarzania, zatlaczenia i odbioru wodoru [17]

Fig. 4. Scheme of hydrogen production, injection and collection [17]

przyczyną istniejących wcześniej, a obecnie zlikwidowanych kopalń w Wapnie i Inowrocławiu.

Aktualnie roboty górnicze prowadzone są na trzech wysadach: Mogilno, Góra i Kłodawa.

W dwóch pierwszych Inowrocławskie Kopalnie Soli „Solino” S.A. prowadzi eksploatację otworową „na mokro”, a powstałe kawerny ukierunkowane są na podziemne magazyny paliw płynnych i gazu. W wysadzie kłodawskim od 1956 r. nieustannie wydobywa sól metodą „na sucho” Kopalnia Soli „Kłodawa” S.A., prowadząc roboty górnicze w 6 polach na głębokości od 475 do 820 m.

Możliwość budowy kawerny magazynowej w złożu soli zależy od wielu czynników. Ponieważ są to przestrzenie powstałe w procesie ługowania, istotnym czynnikiem jest podatność skał solnych na ługowanie. O ile sole kamienne i potasowo-magnezowe charakteryzują się wysoką lub bardzo wysoką podatnością na ten proces, tak występujące w złożach solnych skały węglanowe, siarczanowe itp. już ługowalne nie są. W związku z tym pierwszą przesłanką w wyborze lokalizacji kawerny będzie brak występowania soli potasowo-magnezowych (z uwagi na zbyt dużą podatność na ługowanie w stosunku do soli kamiennych) oraz skał nieługowalnych.

Równie istotną kwestią jest forma złoża. Złoża solne występują w formie pokładów, poduszek solnych i wysadów (diapirów) – Rys. 3.

Projektując kawernę w złożu pokładowym należy przy ustalaniu jej lokalizacji znaleźć takie miejsce, w których nie będą występowały sole potasowo-magnezowe oraz skały nieługowalne. Należy przy tym zwrócić uwagę na konieczność pozostawienia calizn solnych wokół kawerny, stanowiących filary międzykawernowe oraz stropową i spągową półkę bezpieczeństwa (por. Rys. 3A). Złoża pokładowe umożliwiają lokalizację wielu kawern w danym rejonie, jednak ich pojemność będzie uzależniona od miąższości pokładu, co prze-

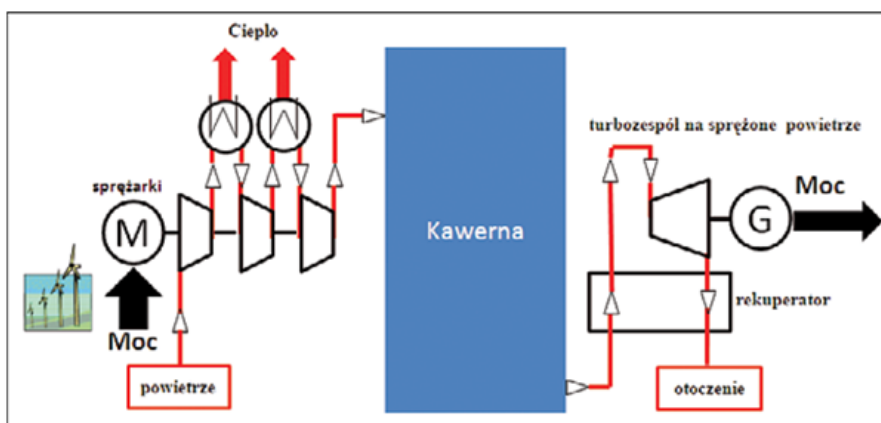
kłada się na wysokość kawerny. Złoża pokładowe wydają się być atrakcyjną lokalizacją dla kawern magazynowych z uwagi na stosunkowo prostą budowę geologiczną. Ograniczeniem może być na ogół miąższość pokładu. W chwili obecnej eksploatowanych jest 10 kawern składających się na KPMG Kosakowo, wykonanych w złożu pokładowym.

Forma złożowa w postaci poduszki solnej wydaje się atrakcyjniejsza z uwagi na lokalnie zwiększoną miąższość pokładu (por. Rys. 3B), co może mieć bezpośredni wpływ na pojemność kawerny. Jest to jednak forma o bardziej skomplikowanej budowie wewnętrznej niż pokład – można spodziewać się wystąpień soli potasowo-magnezowych oraz utworów nieługowalnych. Kolejną trudność sprawia szczegółowe rozpoznanie geologiczne z uwagi na dużą głębokość zalegania oraz nieregularność złoża w rejonie poduszki. Z tych powodów obecnie nie przewiduje się wykonywania kawern w poduszkach solnych.

Atrakcyjną formą złożową dla posadowienia kawern magazynowych są wysady (diapiry) solne (por. Rys. 3C). Choć charakteryzują się skomplikowaną budową wewnętrzną, w tym wystąpieniami soli potasowo-magnezowych oraz utworów skalnych nieługowalnych, to wskutek rozpoznania robotami wiertniczymi można znaleźć lokalizacje, w których w całym profilu przyszłej kawerny występują mięzsze i mniej więcej jednorodne utwory soli kamiennej. W takiej sytuacji możliwe jest wykonanie kawerny o znacznej wysokości, nawet ok. 1 km. Obecnie działający KPMG Mogilno eksploatuje 14 kawern wykonanych w wysadzie solnym.

#### Kawerna solna jako magazyn gazu ziemnego

Magazynowanie ciekłych węglodorów w kawernach solnych uzyskanych w procesie ługowania zostało opatentowane w Niemczech w 1916 r., ale po raz pierwszy zastosowane dopiero w połowie XX w. (USA i Wielka Brytania). Techno-



Rys. 5. Schemat sprężania powietrza i jego wykorzystania w turbinach [20]

Fig. 5. Diagram of air compression and its use in turbines [20]

logia ta zaczęła się gwałtownie rozwijać, a magazynowanym medium stał się również gaz ziemny. Szacuje się, że w chwili obecnej na świecie eksploatowanych jest ok. 1,5 tys. kawern ługowniczych w złożach soli. W Europie wykorzystywane są głównie na potrzeby magazynowania gazu ziemnego.

Niewątpliwie zalety tego sposobu magazynowania wynikają z szeregu czynników, które wskazują właśnie złoża soli kamiennej jako najkorzystniejsze środowisko, a wynikają z [11]:

- powszechności występowania złóż soli w wielu krajach;
- specyficznych warunków hydrogeologicznych panujących w złożach solnych – szczelność górotworu solnego;
- korzystnych właściwości geomechanicznych soli kamiennej, tj. zwięzłość, nieprzepuszczalność, plastyczność odkształceń;
- obojętności chemicznej soli względem większości magazynowanych substancji;
- dużej miąższości złóż solnych, umożliwiającą budowę magazynów podziemnych znacznej objętości.

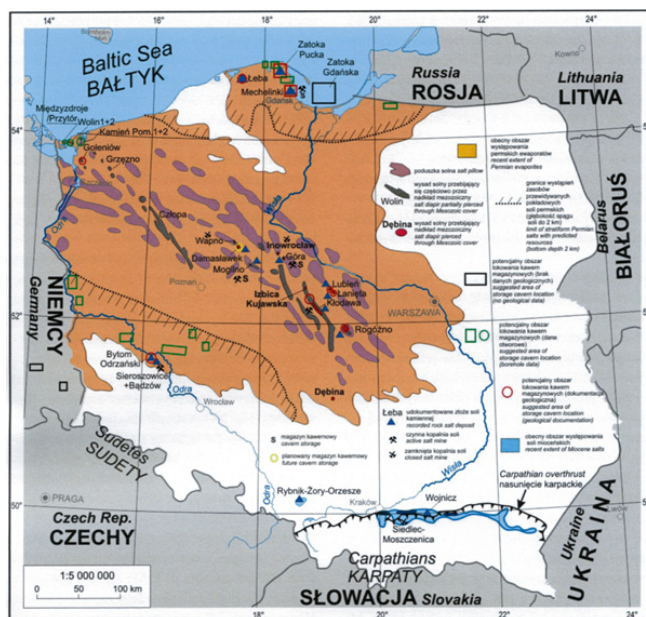
Magazynowanie podziemne w znacznym stopniu eliminuje bądź ogranicza niebezpieczeństwa i uciążliwość dla środowiska, jaką stwarza magazynowanie powierzchniowe. Szczególnie istotne są trzy aspekty:

- bezpieczeństwo – podziemny magazyn jest mniej wrażliwy na pożar, atak terrorystyczny czy działania wojenne;
- ochrona terenu – w porównaniu ze zbiornikami na powierzchni mającymi pomieścić podobne ilości produktu co magazyny podziemne, muszą zająć duże powierzchnie. W odniesieniu do zbiorników podziemnych, efektem powierzchniowym są jedynie niewielkie instalacje obsługujące te zbiorniki, które stosunkowo łatwo można wkomponować w krajobraz lub w infrastrukturę – dotyczy to zwłaszcza magazynów gazu. W przypadku podziemnych magazynów produktów ciekłych sprawa jest bardziej złożona, gdyż na powierzchni muszą pozostać zbiorniki na solankę manewrową;
- finansowy – koszty inwestycyjne i później eksploatacyjne magazynów podziemnych, w porównaniu z kosztami budowy i eksploatacji tradycyjnych zbiorników podobnej pojemności na powierzchni są znacznie mniejsze.

Podstawowymi parametrami opisującymi KPMG są: pojemność czynna, moc zatłaczania gazu, moc odbioru gazu, wielkość bufora (poduszki gazowej) oraz możliwość wykonania wielu cykli w ciągu roku [19]. Jak wynika z dotychczasowych doświadczeń, magazyny kawernowe stwarzają najlepsze warunki w zakresie zatłaczania i odbioru gazu przy równoczesnym zapewnieniu wielocykliczności pracy (por. Tab. 1). Prócz wymienionych czynników technologicznych oczekuje się, że kawerna magazynowa będzie szczelna, zapewni odpowiednią temperaturę i ciśnienie magazynowania oraz zachowa długotrwałą stateczność geomechaniczną.

Kawerny przeznaczone na potrzeby magazynowania substancji użytecznych, w tym gazu ziemnego, muszą być szczelne. Niespełnienie tego warunku w przypadku magazynowania węglowodorów ciekłych może prowadzić do skażenia wód podziemnych, a w przypadku wydostania się gazu ziemnego może doprowadzić do eksplozji na powierzchni (wypadek taki miał miejsce w 2001 r. w Hutchinson, Kansas, USA, zginęły wówczas 2 osoby). Sól kamienna jako ośrodek o właściwościach plastyczno-lepkich oraz o przepuszczalności w normalnych warunkach rzędu 10–21 m<sup>2</sup> zapewnia szczelność podziemnego magazynu, jeśli tylko człowiek swą działalnością jej nie zniszczy. Zagrożeniem dla szczelności mogą być porowate przewarstwienia skał niesolnych w obrębie serii solnej, a także przewarstwienia szybko rozpuszczalnych soli magnezowo-potasowych, które mogą stworzyć drogi migracji magazynowanego produktu poza złożo soli. Dlatego kawerny magazynowe należy lokować w strefach złoża spełniających odpowiednie warunki geologiczne.

Magazynowanie gazu związane jest z wykorzystaniem jego ściśliwości. Kawerny solne po opróżnieniu z solanki wypełniane są gazem zmiennym ciśnieniem, ok. 10–20 MPa. W związku z tym pojemność robocza oznacza ilość gazu, jaka może być wtłoczona do kawerny. W związku z tym istotne są wartości minimalnego i maksymalnego ciśnienia gazu w kawernie. Utrzymywanie zbyt niskiego ciśnienia w kawernie będzie skutkowało przyspieszonym procesem konwergencji, a w konsekwencji zmniejszeniem objętości magazynowej. W skrajnym przypadku może doprowadzić do utraty przez kawernę stateczności geomechanicznej. Z kolei maksymalne ciśnienie gazu w kawernie nie może przekroczyć wytrzymałości skały solnej, co z kolei w przypadku zbyt wysokiego ciśnienia może doprowadzić do mikroszczelinowania górotworu, a tym samym do



Rys. 6. Potencjalne miejsca lokowania kawern Magazynowych w utworach soli kamiennych w Polsce [6]

Fig. 6. Potential locations for locating storage caverns in rock salt formations in Poland [6]

utruty szczelności. Ponieważ rocznie odbywa się kilka, a czasem nawet kilkanaście cykli zatłaczania i odbioru gazu, należy liczyć się z postępującą konwergencją objętościową kawerny, wynikającą z własności reologicznych górotworu solnego. Szacuje się, że po 15 latach eksploatacji objętość kawern zmniejsza się średnio o ok. 13%, natomiast po 30 latach o ok. 24% [12].

### Kawerna solna jako magazyn energii

Proces dekarbonizacji sektora energetycznego spowodował w ostatnich latach gwałtowny rozwój odnawialnych źródeł energii (OZE). Źródła oparte na energii słonecznej i energii wiatru są jednak niestabilne, silnie uzależnione od warunków pogodowych, ale także od pory dnia i pory roku. Na rynku pojawiają się nadwyżki energetyczne, w związku z czym operatorzy są zmuszeni do ograniczania produkcji energii elektrycznej w elektrowniach konwencjonalnych oraz jej pobór z OZE [3].

Częściowym remedium na te problemy jest magazynowanie energii elektrycznej, które może być realizowane m.in. w kawernach solnych. Nośnikiem energii elektrycznej w tym przypadku może być wodór, który jest traktowany jako paliwo przyszłości, zastępując w najbliższych latach paliwa kopalne. Obecnie trwają prace nad metodami jego szybkiej i wydajnej produkcji (z uwzględnieniem kwestii ekonomicznych), transportu oraz magazynowania.

Konwersja energii elektrycznej na wodór odbywa się w procesie elektrolizy wody, a więc w procesie wymagającym energii elektrycznej. Do tego procesu można wykorzystać nadwyżki energii z bieżącej produkcji przez OZE. Proces elektrolizy nie jest zbyt skomplikowany, jest procesem bezpiecznym, a co najistotniejsze, jest procesem ekologicznym. Tak pozyskany wodór otrzymał przydomek „zielonego” wodoru, gdyż cykl produkcyjny jest zeroemisyjny. W kontekście energetyki odnawialnej tak pozyskany wodór wydaje się być bardzo atrakcyjny. Wodór można magazynować w kawernach solnych, które wg obecnej wiedzy są najlepszym rozwiązaniem w przypadku konieczności przechowania dużej ilości wodo-

ru w dłuższym horyzoncie czasowym. Tak zmagazynowany wodór można wykorzystać do produkcji energii elektrycznej z wykorzystaniem np. turbin wodorowych napędzających generatory prądu czy też wodorowych ogniw paliwowych. Ten proces wytwarzania energii elektrycznej również jest zeroemisyjny. Schemat wytwarzania i magazynowania wodoru w kawernach solnych przedstawiono na Rys. 4.

W 2021 r. w Wielkiej Brytanii funkcjonowały 3 kawerny solne posadowione na głębokości 350–450 m o łącznej objętości 210 tys. m<sup>3</sup>. 3 kolejne w USA na głębokości 800 m (strop kawerny) o objętości ponad 500 tys. m<sup>3</sup>. Szacuje się, że kawerna solna o objętości 200 tys. m<sup>3</sup>, posadowiona na głębokości 1000–1200 m p.p.t. i maksymalnym dziennym ciśnieniu magazynowania 17 MPa pozwoli na zmagazynowanie około 2200–2400 Mg wodoru, tj. około 82,5 GWh [18].

Alternatywą dla wodoru jako nośnika energii może być sprężone powietrze. Nośnik ten jest uważany jako jeden z najdroższych, ponieważ proces sprężania jest niezwykle energochłonny. W związku z tym sprężanie powietrza może odbywać się w okresach, w których energia elektryczna jest tania (noc, weekendy) lub można wykorzystać energię pochodzącą z nadwyżek OZE. Do magazynowania energii w postaci sprężonego powietrza CAES (ang. Compressed Air Energy Storage) można wykorzystać kawerny solne. Pierwsza tego typu instalacja powstała w 1980 r. w Niemczech zapewniając wytwarzanie 250 MW mocy elektrycznej [20].

Kawerny wykorzystywane obecnie do magazynowania gazu ziemnego mogą być w przyszłości wykorzystane jako magazyny energii w postaci wodoru lub sprężonego powietrza, pod warunkiem utrzymania dotychczasowych parametrów technologicznych takich jak: ciśnienie magazynowania nośnika energii, temperatura, dopuszczalne przepływy itp. Co najwyżej pewnym modyfikacjom będzie musiała ulec część naziemna, jak np. wymiana sprężarek gazowych na elektryczne, uzupełnienie instalacji o ekspander gazu sprężony z generatorem, układy magazynowania ciepła i chłodu, układ połączeń.

## Możliwość budowy nowych magazynów energii w polskich złożach soli kamiennej

Polska posiada bardzo duży potencjał magazynowania energii w utworach soli kamiennych, zarówno w złożach pokładowych, jak i wysadowych – Rys. 6. Potencjał ten ogranicza się do złóż cechsztyńskich, które występują na znacznych obszarach Polski. Złoża mioceńskie i triasowe z racji skomplikowanej budowy wewnętrznej i niewielkich miąższości nie są brane pod uwagę.

Miejsca potencjalnych lokalizacji kawern w formach pokładowych występują w północnej Polsce (5 obszarów, 3 udokumentowane złoża soli i 18 pojedynczych otworów wiertniczych), w części południowo-zachodniej kraju (11 obszarów, jedno udokumentowane złożo soli i 9 pojedynczych otworów wiertniczych). Potencjalne lokalizacje w formach wysadowych to północno-zachodnia Polska, region szczeciński (7 struktur wysadowych) oraz w Polsce centralnej (4 wysady).

Szczególnie atrakcyjne wydają się lokalizacje blisko wybrzeża Bałtyku, a to z racji możliwości poboru wody morskiej do ługowania kawern oraz zrzutu solanki do morza. W przypadku pozostałych lokalizacji głównym problemem może być odbiór solanki, ale też możliwości poboru wody do celów technologicznych na czas budowy kawerny.

Wskazane na Rys. 6 potencjalne lokalizacje w wielu przypadkach wymagają udokumentowania, gdyż są rozpoznane jedynie otworami wiertniczymi.

Z uwagi na skomplikowaną sytuację geopolityczną w Europie konieczne jak najszybsze podjęcie decyzji budowy kolejnych magazynów kawernowych, mając na uwadze, że proces budowy trwa ok. 5–10 lat.

### Podsumowanie

Polska posiada doskonałą bazę zasobową złóż soli kamiennej, która z powodzeniem może być wykorzystana na potrzeby budowy podziemnych magazynów gazu i energii. Obecnie w strukturach solnych funkcjonuje jeden Podziemny Magazyn Ropy i Paliw (Góra k/Inowrocławia) oraz dwa Kawernowe Podziemne Magazyny Gazu (Mogilno k/Inowrocławia i Kosakowo k/Gdyni). W najbliższych latach przewiduje

się budowę kolejnych kawernowych magazynów gazu. Niewątpliwie będzie to mieć korzystny wpływ na bezpieczeństwo energetyczne państwa, w szczególności w kontekście dekarbonizacji systemu energetycznego. Magazyny w złożach soli kamiennej, oprócz dużej pojemności operacyjnej, pozwalają na szybkie załadowanie i odbiór magazynowanego medium. Ma to istotne znaczenie w okresie, w którym węgiel brunatny i kamienny będzie zastępowany gazem ziemnym, co z kolei będzie wymagało stworzenia odpowiedniego zaplecza do magazynowania gazu.

Docelowo energetyka ma zostać oparta na odnawialnych źródłach energii, których wadą jest okresowość produkcji wynikająca głównie z warunków klimatycznych/pogodowych. W związku z tym będzie istniała konieczność budowy nowych magazynów energii, których zadaniem będzie buforowanie nadwyżek produkcyjnych energii i jej zwrot do systemu w okresach niedoboru. Oprócz nowych magazynów energii zajdzie konieczność przekształcenia na ten cel istniejących magazynów gazu, co jest technicznie możliwe.

Rozwój magazynów energii pozwoli na efektywny odbiór i konwersję energii elektrycznej pozyskiwanej za pośrednictwem odnawialnych źródeł energii. W wyniku przeprowadzonej konwersji medium magazynowym może zostać wodór lub sprężone powietrze. Odwrócenie procesu konwersji pozwoli za pomocą turbin gazowych i generatorów na wytworzenie energii elektrycznej.

Ponieważ odnawialne źródła energii postrzegane są jako przyszłość energetyczna Europy, eliminując z systemu energetycznego paliwa kopalne, niewątpliwie przyczyni się to do ochrony środowiska naturalnego. W tym kontekście Polska w perspektywie najbliższych lat może stworzyć pokaźną bazę magazynową energii w złożach soli kamiennej, która pozwoli na zachowanie bezpieczeństwa energetycznego państwa. Wskazanie potencjalnych lokalizacji przyszłych kawern magazynowych pokazuje, że część z nich może być zrealizowana bez istotnych szkód środowiskowych (dotyczy kawern zlokalizowanych w pasie nadmorskim). W przypadku pozostałych lokalizacji konieczna będzie budowa infrastruktury związanej z odbiorem i przeróbką uzyskanej solanki.

### Literatura – References

1. 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) (01.06.2024)
2. Cornot-Gandolphe S. 2024 – Underground Gas Storage in the world – 2023 status. CEDIGAZ. [www.europeangashub.com/underground-gas-storage-in-the-world-2023-status.html](http://www.europeangashub.com/underground-gas-storage-in-the-world-2023-status.html) (01.06.2024)
3. <https://globenergia.pl/czy-wylaczyli-ci-fotowoltaike-kolejne-wylaczenia-mocy-z-pv/> (01.06.2024)
4. <https://ipi.gasstoragepoland.pl/pl/menu/transparency-template/?page=uslugi-i-infrastruktura/parametry-techniczne> (01.06.2024)
5. <https://pgnig.pl/podziemne-magazyny-gazu> (01.06.2024)

6. Czapowski G., 2021: Lokalizacja kawern magazynowych w utworach solnych w Polsce – stare i nowe opcje. *Przegląd Solny*, (16), pp. 5-19.
7. Czapowski G., Bukowski K., (2012), Salt resources in Poland at the beginning of the 21st century, *Geology, Geophysics & Environment*, vol. 38, No. 2.
8. Czapowski G., Bukowski K., Gientka M., (2008), Aktualny stan rozpoznania geologicznego złóż soli kamiennej w Polsce, *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, nr 429.
9. Czapowski G., Tomassi-Morawiec H., Chelmiński J., Tomaszczyk M., (2008b), Stopień rozpoznania i perspektywy zagospodarowania cechsztyńskich złóż soli w rejonie Zatoki Gdańskiej, *Górnictwo Odkrywkowe*, rocznik XLIX/2, nr 2-3.
10. Garlicki A., (1999): Złóża soli w Polsce i perspektywy ich wykorzystania, *Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego*, nr 1809.
11. Kunstman A., Poborska-Młynarska K., Urbańczyk K., 2009: Geologiczne i górnicze aspekty budowy magazynowych kawern solnych, *Przegląd Geologiczny*, vol. 57, nr 9, 2009.
12. Lankof L., Tarkowski R. 2022. Potencjał magazynowy wodoru w permskich złożach soli kamiennej w Polsce. *Przegląd Solny*, (16), pp. 29-42.
13. Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 2 marca 2021 r. w sprawie polityki energetycznej państwa do 2040 r. (*Monitor Polski* z 2021 r., poz. 264)
14. Ślizowski J., Urbańczyk K., Wiewiórka D., Kowalski M., Serbin K., (2011), Stateczność wyrobisk w pokładach ewaporatów LGOM w aspekcie budowy podziemnego laboratorium badawczego, seria „Studia, Rozprawy, Monografie”, nr 168, Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.
15. Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze (t.j. Dz. U. z 2023 r. poz. 633 ze zm.)
16. Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. – Prawo energetyczne (Dz. U. z 2020 r. poz. 833 ze zm.) – wersja obowiązująca w chwili przyjęcia PEP2040
17. Valle-Falcones, L.M.; Grima-Olmedo, C.; Mazadiego-Martínez, L.F.; Hurtado-Bezos, A.; Eguilior-Díaz, S.; Rodríguez-Pons, R. Green Hydrogen Storage in an Underground Cavern: A Case Study in Salt Diapir of Spain. *Appl. Sci.* 2022, 12, 6081. <https://doi.org/10.3390/app12126081>.
18. Wilkosz P., Grzybowski Ł. 2021. Kawerny solne – najlepszy sposób wielkoskalowego podziemnego magazynowania wodoru. *Przegląd gazowniczy*, (9), pp. 46-47.
19. Wittman B., Wilkosz P., 2022: Bezpieczeństwo energetyczne – rola podziemnych magazynów gazu ziemnego. W: *W służbie społeczeństwu. Polska w obronie praw człowieka na świecie i w kraju*, red. J. Stala, M. Butrymowicz, Uniwersytet Papieski Jana Pawła II w Krakowie Wydawnictwo Naukowe, Kraków 2022, s. 159–182. DOI: <https://doi.org/10.15633/9788374389891.10>
20. Wojciechowski H. 2017. Technologie magazynowania energii. Cz. II. Instal, (3): pp. 16-27.

### *Possibilities of Storing Natural Gas and Energy in Salt Formations in Poland*

*The state's energy security includes, among others: securing customers' fuel and energy needs. One of the elements of energy policy is storage infrastructure, which enables the storage of natural gas and fuel stocks. It is carried out through surface and underground warehouses. The role of the latter is particularly important due to the capacities offered, but also the technological parameters of the storage process that can be obtained.*

*One of the convenient places to build underground gas and fuel storage facilities are rock salt deposits, where storage caverns are constructed. Due to favorable access to salt geological formations, Poland has great opportunities to build an underground storage base for both natural gas and liquid fuels.*

*The process of decarbonization of the energy sector forces us to look for new energy sources that will, over time, replace fossil fuels in the energy system. The answer to this challenge are renewable energy sources (water, wind, sun), the advantage of which is inexhaustibility, but on the other hand, the disadvantage is that they are uncontrollable due to their dependence on climate/weather conditions.*

*The article discusses the possibilities of building cavern underground gas and energy storage facilities, paying attention to the latter as future solutions necessary for use in the energy system. Against the background of the rock salt resource base, potential locations of future cavern storage facilities were indicated.*

**Keywords:** salt deposits, salt caverns, underground gas storage facilities, underground energy storage facilities