

Kawerny jako podziemne magazyny wodoru – kluczowe zagadnienia

Caverns as underground hydrogen storage – key issues

Krzysztof POLAŃSKI

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Katedra Inżynierii Gazowniczej,
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: polanski@agh.edu.pl

STRESZCZENIE

Wykorzystanie Kawernowych Podziemnych Magazynów w złożach soli do magazynowania energii pod różną postacią jest znane i rozpatrywane od wielu lat. Jeżeli chodzi o wielkoskalowe krótko- i średnioterminowe magazynowanie energii to magazyny w kawernach solnych są oceniane jako efektywne i bezpieczne. Przy stale rosnącym udziale Odnawialnych Źródeł Energii (OZE) w bilansie energetycznym krajów UE poszukiwane są możliwości zmagazynowania dużych ilości energii elektrycznej pochodzącej z OZE. Przyczyną tego jest brak możliwości korelacji produkcji energii w OZE z aktualnym zapotrzebowaniem na energię w sieci. Jedną z koncepcji na magazynowanie nadwyżek energii elektrycznej pochodzącej z OZE jest jej zamiana na energię pod postacią wodoru - produkcja wodoru w elektrolizerach zasilanych nadwyżkami energii elektrycznej. Dzięki przechowywaniu w kawernach solnych, możliwe jest jej zmagazynowanie pod postacią wodoru zarówno w krótkich jak i dłuższych okresach czasowych. W najbliższych kilkudziesięciu latach magazyny wodoru mają szansę odegrać istotną rolę w transformacji energetycznej naszego kraju pomagając bilansować sieci elektroenergetyczne zasilane z Odnawialnych Źródeł Energii. Jednak należy zauważyć, że budowa kawernowego magazynu energii w postaci wodoru i późniejsza jego eksploatacja stanowi wyzwanie zarówno technologiczne jak i ekonomiczne. W artykule przeanalizowano i wskazano najistotniejsze aspekty konieczne do rozwiązania na etapie planowania koncepcyjnego związane z wykorzystaniem kawern solnych jako magazynów energii w postaci wodoru w Polsce.

Słowa kluczowe: kawerny solne, magazynowanie energii, magazynowanie wodoru, energia z OZE

ABSTRACT

The utilization of underground cavern storage in salt formations for energy in various forms has been recognized and studied for many years. Salt cavern storage is considered an effective and safe solution for large-scale short- and medium-term energy storage. With the steadily increasing share of Renewable Energy Sources (RES) in the energy mix of EU countries, there is a growing need to store substantial amounts of electricity generated from RES. This need arises from the inherent mismatch between energy production from RES and the immediate demand on the power grid.

One proposed solution for storing surplus electricity from RES is its conversion into hydrogen through electrolyzers powered by excess electricity. Salt caverns enable the storage of hydrogen over both short and extended periods. Over the coming decades, hydrogen storage is expected to play a key role in the energy transition of Poland, supporting the balancing of power grids predominantly supplied by renewable sources.

Nevertheless, the construction and operation of a hydrogen cavern storage facility present significant technological and economic challenges. This paper analyzes the critical aspects that must be addressed during the conceptual planning stage for the implementation of salt caverns as hydrogen energy storage in Poland.

Keywords: salt caverns, energy storage, hydrogen storage, RES energy

1. INTRODUCTION

The efforts of EU member states to achieve climate neutrality by increasing the share of Renewable Energy Sources (RES) in the national energy mix have led to a growing need

1. WPROWADZENIE

Dążenie państw członkowskich UE do osiągnięcia neutralności klimatycznej poprzez zwiększanie udziału Odnawialnych Źródeł Energii (OZE) w krajowym bilansie energetycznym powoduje, że coraz częściej szuka się sposobu bilansowania zapotrzebowania na energię w sieciach elektroenergetycznych. Spowodowane jest to stochastycznością pracy OZE przekładającą się na coraz większe nadwyżki energetyczne, których „sieć” nie jest w stanie skonsumować, jak również niedobory energii w okresach kiedy zapotrzebowanie gwałtownie wzrasta (Polański, 2024; Polański, 2025).

Dlatego w nowoczesnych, niskoemisyjnych systemach energetycznych coraz częściej spogląda się z nadzieją na różne sposoby krótko- i średniookresowego „zmagazynowania prądu”. O ile w przypadku krótkookresowego magazynowania energii doskonale sprawdzają się magazyny akumulatorowe, to ich wysokie nakłady inwestycyjne, stosunkowo niewielkie pojemności (rzędu kilkunastu/kilkudziesięciu MW) oraz dość szybka utrata pojemności magazynowej w czasie, powodują poszukiwanie alternatywnych możliwości magazynowania jeszcze większych ilości energii (rzędu kilkunastu/kilkudziesięciu GW) w krótko- i średniookresowych magazynach (kilkanaście godzin/kilkanaście dni) (Polański, 2025). Jednym z pomysłów na „zmagazynowanie prądu” jest konwersja jego nadwyżek w sieci elektroenergetycznej na energię skumulowaną w „zeroemisyjnym” nośniku energii (paliwie - np. wodorze), cel ten może zostać osiągnięty poprzez elektrolizę wody do wodoru i tlenu przy udziale energii elektrycznej. Następnie w momencie konieczności uzupełnienia zapotrzebowania na prąd w sieci, następuje z powrotem konwersja wodoru na energię elektryczną poprzez spalanie w turbinie lub poprzez produkcję energii w ogniwie paliwowym.

2. CEL PRZEGLĄDU

Artykuł ma na celu wskazanie najistotniejszych aspektów związanych z wykorzystaniem kawern solnych do magazynowania energii w postaci wodoru w Polsce. Ponieważ znajdujące się na obszarze dużej części naszego kraju złoża soli (pokładowe i wysadowe) stanowią duży potencjał do budowy kawernowych magazynów energii (Ryc. 1).

Zdaniem autora w najbliższych kilkunastu latach mają one szansę odgrywać istotną rolę w transformacji energetycznej naszego kraju bilansując sieci elektroenergetyczne zasilane z coraz większej ilości Odnawialnych Źródeł Energii. Jednak należy tutaj wyraźnie wskazać, że o ile sama budowa kawernowego magazynu energii w postaci wodoru nie powinna stanowić już większego wyzwania technologicznego, to jego późniejsza eksploatacja i komercyjne wykorzystanie może okazać się na dzień dzisiejszy sporym wyzwaniem. Dlatego starano się wskazać główne aspekty związane z kawernowymi magazynami wodoru, które stanowią najistot-

for balancing electricity demand within power grids. This is driven by the stochastic nature of RES generation, which results in increasing energy surpluses that the grid cannot fully absorb, as well as energy shortages during periods of rapidly rising demand (Polański, 2024; Polański, 2025).

Therefore, in modern low-emission energy systems, increasing attention is being given to various methods for short- and medium-term electricity storage. While battery storage performs well for short-term energy needs, its high investment costs, relatively limited capacities (on the order of several to a few dozen MW), and relatively rapid loss of storage capacity over time drive the search for alternative solutions capable of storing much larger amounts of energy (on the order of several to tens of GW) in short- and medium-term storage systems (ranging from several hours to several days) (Polański, 2025).

One proposed approach for “storing electricity” is the conversion of surplus power from the grid into energy stored in a zero-emission carrier, such as fuel – hydrogen, for example. This can be achieved through the electrolysis of water, producing hydrogen and oxygen using electricity. When additional power is required in the grid, the stored hydrogen can then be converted back into electricity either by combustion in a turbine or through a fuel cell.

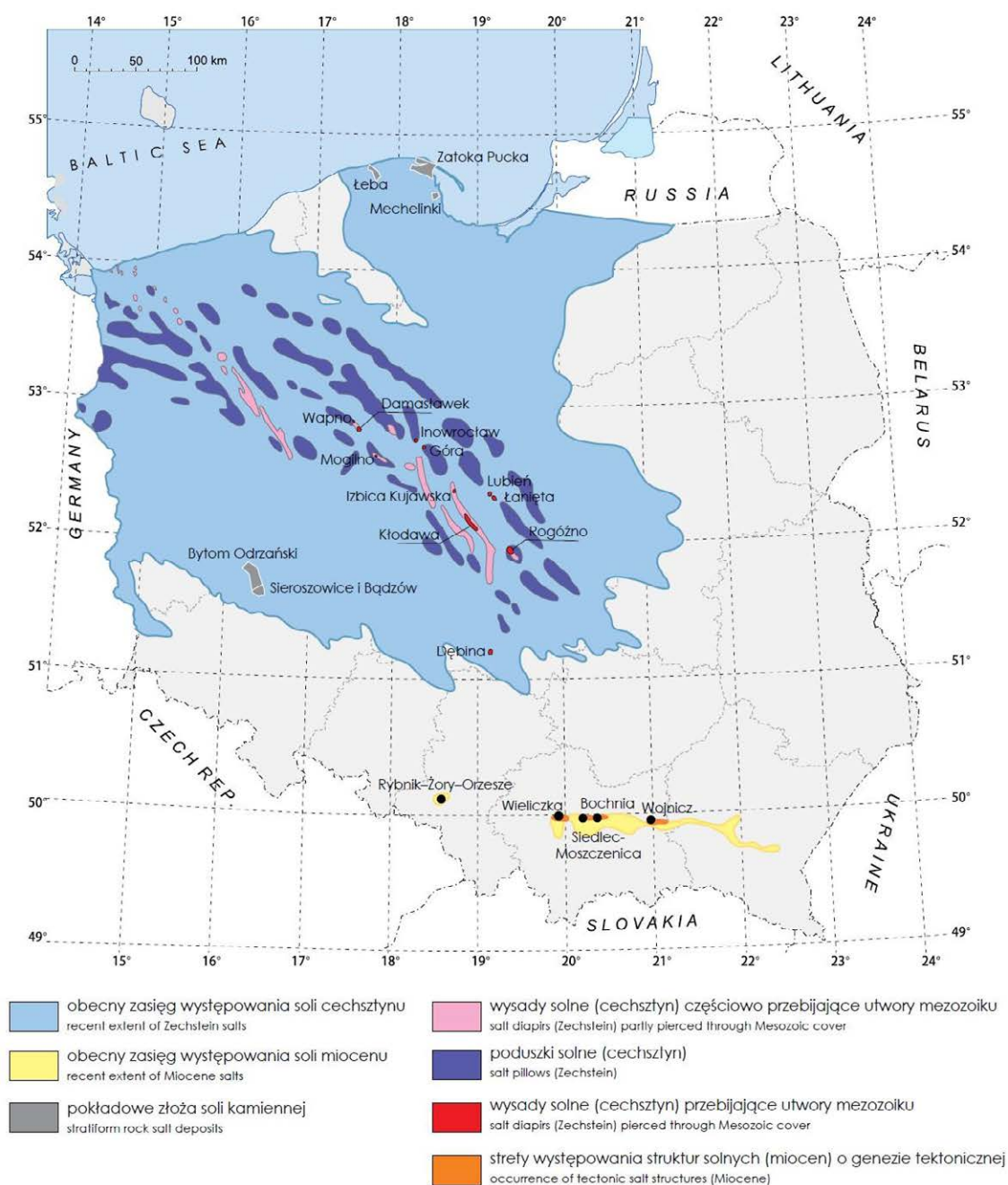
2. OBJECTIVE OF THE REVIEW

This article aims to highlight the most critical aspects related to the use of salt caverns for hydrogen energy storage in Poland. Large salt deposits (both bedded and diapiric), which are present across much of the country, represent a significant potential for the development of cavern-based energy storage systems (Fig. 1).

According to the author, over the coming decades, salt caverns have the potential to play a significant role in the energy transition of Poland by helping to balance power grids increasingly supplied by Renewable Energy Sources. However, it should be clearly noted that, while the construction of a cavern-based hydrogen storage facility may no longer pose a major technological challenge, its subsequent operation and commercial utilization may still represent a considerable challenge today. Therefore, this review aims to identify the main aspects of hydrogen cavern storage that constitute the most critical issues to be addressed during the conceptual planning stage of a hydrogen energy storage facility in a cavern.

3. POTENTIAL USES OF SALT CAVERNS FOR ENERGY STORAGE

The most widespread application of salt caverns worldwide is in Cavern Underground Gas Storage (CUGS), serving both seasonal and peak storage needs. Due to their abil-



Ryc. 1. Złoża soli kamiennej występujące na obszarze Polski (Czapowski i in., 2017)

Fig. 1. Rock salt deposits in Poland (Czapowski i in., 2017).



Ryc. 2. Możliwości wykorzystania kawern solnych do magazynowania energii (Na podstawie Polański, 2024).

Fig. 2. Possibilities of using salt caverns for energy storage (Based on: Polański, 2024).

niejsze zagadnienia konieczne do rozwiązania na etapie planowania koncepcyjnego magazynu energii w postaci wodoru w kawernie.

3. MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA KAWERNACH SOLNYCH DO MAGAZYNOWANIA ENERGII

Najbardziej rozpowszechnioną formą wykorzystania kawern solnych na świecie są Kawernowe Podziemne Magazyny Gazu (KPMG), pełniące rolę magazynów sezonowych jak i szczytowych. Ponieważ można je szybko napełniać i opróżniać z dużymi wydajnościami, kawerny solne postanowiono również wykorzystać do magazynowania energii sprężonego powietrza w instalacjach CAES (Compressed Air Energy Storage) (Crotogino, 2006). Jednakże technologia CAES nie znalazła szerokiego wykorzystania na świecie i obecnie istnieje tylko kilka instalacji tego typu (Dzierżanowski, 2011, Polański 2025). Również w przypadku wykorzystania kawern solnych do magazynowania wodoru, na świecie wybudowano dosłownie kilka instalacji (Moss Bluff, Clemens Dome, Spindletop (USA), Teesside (GB)), które opisano w kolejnym rozdziale (Ghorbani i in., 2023). Na Ryc. 2 przedstawiono schematycznie 3 główne możliwości wykorzystania kawern solnych do magazynowania energii.

4. MAGAZYNOWANIE WODORU W KAWERNACH SOLNYCH NA ŚWIECIE

Przeglądając historię eksploatacji czterech istniejących kawernowych magazynów służących do przechowywania wodoru, zauważyć można, że instalacje te służą głównie jako magazyny wodoru dla przemysłu chemicznego i petrochemicznego. Ich lokalizacje przedstawia Ryc. 3. Jeden z nich działa nieprzerwanie od 1972 roku w Teesside (UK), gdzie magazyn składa się z trzech kawern po ok. 70 000 m³ objętości geometrycznej każda (łącznie ok. 210 000 m³). Kawerny wykonano w złożu pokładowym na głębokości ok. 365 m p.p.t. Warto podkreślić, że magazyn ten jako jedyny z przywołanych czterech pracuje w warunkach izobarycznych przy ciśnieniu 45 bar. Ciśnienie utrzymywane jest za pomocą operowania solanką – tzw. kawerny mokre (Kruck i in., 2013).

Pozostałe trzy magazyny znajdują się w Teksasie (USA) i każdy z nich stanowi pojedyncza komora wyługowana w złożu wysadowym. Są to kawerny „oddychające”, czyli pracujące podobnie jak kawerny magazynowe na gaz ziemny. Magazyn w Clemens, uruchomiony w roku 1983, którego kawerna posadowiona na głębokości ok. 1000 m p.p.t. ma objętość geometryczną ok. 580 000 m³ pracuje w zakresie ciśnień pomiędzy 7 - 13,5 MPa. Magazyn w Moss Bluff, uruchomiony został w 2007 roku, a jego kawerna posadowiona jest na głębokości ok. 1200 m p.p.t. ma objętość ok. 566 000 m³ i pracuje w zakresie ciśnień pomiędzy 5,5 - 15,2 MPa (Kruck i in., 2013).

ity to be filled and emptied rapidly at high capacities, salt caverns have also been considered for storing energy in the form of compressed air in Compressed Air Energy Storage (CAES) systems (Crotogino, 2006). However, CAES technology has not found widespread adoption globally, and only a few such facilities currently exist (Dzierżanowski, 2011; Polański, 2025). Similarly, in the case of hydrogen storage in salt caverns, only a handful of installations have been built worldwide (e.g., Moss Bluff, Clemens Dome, Spindletop in the USA, and Teesside in the UK), which are described in the following chapter (Ghorbani et al., 2023). Figure 2 schematically presents the three main potential applications of salt caverns for energy storage.

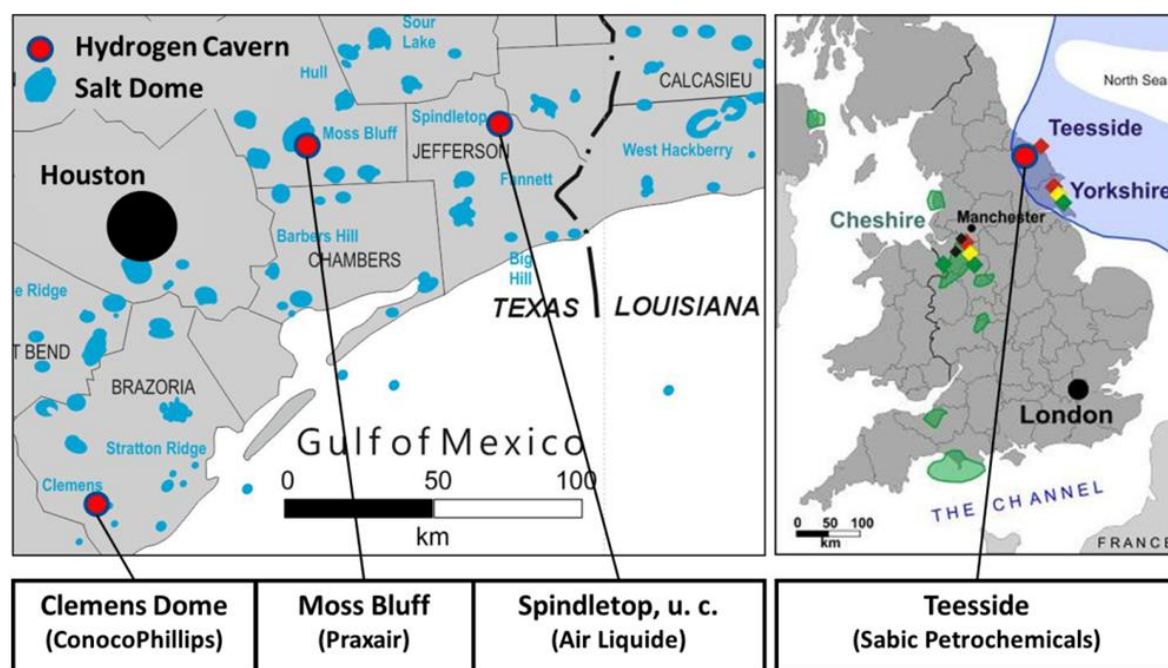
4. HYDROGEN STORAGE IN SALT CAVERNS WORLDWIDE

A review of the operational history of the four existing hydrogen cavern storage facilities shows that these installations are primarily used for supplying hydrogen to the chemical and petrochemical industries. Their locations are shown in Figure 3.

One of these facilities has been in continuous operation since 1972 in Teesside (UK), where the storage system consists of three caverns, each with an approximate geometric volume of 70,000 m³ (a total of about 210,000 m³). The caverns were constructed in a bedded salt formation at a depth of approximately 365 m below ground level. It is noteworthy that this facility is the only one among the four mentioned that operates under isobaric conditions at a pressure of 45 bar. The pressure is maintained by brine management, classifying these as “wet caverns” (Kruck et al., 2013).

The remaining three storage facilities are located in Texas (USA), each consisting of a single cavern leached in a diapiric salt formation. These are “breathing” caverns, operating similarly to natural gas storage caverns. The Clemens facility, commissioned in 1983, features a cavern located at a depth of approximately 1,000 m below ground level with a geometric volume of about 580,000 m³, operating at pressures ranging from 7 to 13.5 MPa. The Moss Bluff facility, commissioned in 2007, has a cavern situated at a depth of approximately 1,200 m with a volume of about 566,000 m³, operating at pressures between 5.5 and 15.2 MPa (Kruck et al., 2013).

The Spindletop facility is the newest, having been commissioned in 2014. Its cavern is located at a depth of approximately 1,340 m below ground level, with a volume exceeding 580,000 m³, and operates at pressures ranging from 6.8 to 20.2 MPa (Kruck et al., 2013). The parameters of the described storage facilities are summarized in Table 1.



Ryc. 3. Lokalizacje istniejących komór magazynowych na wodór (Na podstawie: Acht, Donadei, 2012).

Fig. 3. Locations of existing hydrogen storage caverns (Based on: Acht, Donadei, 2012).

Natomiast magazyn w Spindletop jest najmłodszy, bo został uruchomiony w 2014 roku, a jego kawerna posadowiona jest na głębokości ok. 1340 m p.p.t. i ma o objętość ponad 580 000 m³, pracuje przy ciśnieniach 6,8 – 20,2 MPa (Kruck i in., 2013). Parametry opisywanych magazynów zestawiono w tabeli 1.

5. POTENCJALNE LOKALIZACJE W POLSCE

Analizując występujące złoża soli w Polsce (Tarkowski R., Czapowski G., 2018; Czapowski G., Tarkowski R., 2018) (Ryc. 1), najkorzystniejsze warunki do budowy magazynów kawernowych występują w rejonie środkowopolskich wy-

5. POTENTIAL LOCATIONS IN POLAND

Analyzing the existing salt deposits in Poland (Tarkowski & Czapowski, 2018; Czapowski & Tarkowski, 2018) (Fig. 1), the most favorable conditions for the development of cavern storage facilities are found in the central Polish salt diapirs, as well as on the Łeba Uplift and in the Puck Bay region.

According to the author, when constructing the first hydrogen storage cavern (the first cavern-based hydrogen energy storage facility in Poland), priority should be given to locations near existing underground gas storage caverns, such as the Mogilno and Kosakowo CUGS facilities. This recommendation is primarily based on the well-established geo-

Tabela 1. Parametry istniejących na świecie podziemnych magazynów wodoru w kawernach solnych na podstawie projektu HyUnder (Na podstawie: Kruck i in., 2013).

Table 1. Parameters of existing underground hydrogen storage salt caverns in the world based on the HyUnder project (Based on: Kruck et al., 2013).

Lokalizacja	Geologia	Typ magazynu	Rok uruchomienia	Objętość geometryczna [tys. m ³]	Ciśnienie pracy [MPa]	Głębokość posadowienia
Clemens (USA)	Złoże wysadowe	Suchy (oddychający)	1983	580	7 - 13,5	1000
Moss Bluff (USA)	Złoże wysadowe	Suchy (oddychający)	2007	566	5,5 - 15,2	1200
Spindletop (USA)	Złoże wysadowe	Suchy (oddychający)	2014	>580	6,8 - 20,2	1340
Teesside (UK)	Złoże pokładowe	Mokry (stałe ciśnienie)	~1972	3 x 70	4,5	365

sadów solnych oraz na wyniesieniu Łeby i w rejonie Zatoki Puckiej.

Zdaniem autora przy budowie pierwszej kawerny do magazynowania wodoru (pierwszego w Polsce kawernowego magazynu energii w postaci wodoru) należy w pierwszej kolejności rozpatrywać lokalizacje przy istniejących już kawernowych magazynach gazu ziemnego tj. KPMG Mogilno i KPMG Kosakowo przede wszystkim ze względu na dobre rozpoznanie geologiczne oraz dostęp do niezbędnej infrastruktury (instalacja ługownicza, możliwość zrzutu solanki z procesu ługowania), jak również możliwość łatwego połączenia z OZE (dobre warunki wietrzne w północnej oraz centralnej Polsce) (Polański, 2024, Polański, 2025).

6. WYKORZYSTANIE MAGAZYNOWANIA WODORU W KAWERNIE SOLNEJ JAKO MAGAZYNOWANIA ENERGII

W dobie trwającej transformacji energetycznej, coraz częściej prowadzone są badania nad magazynowaniem wodoru jako nośnika energii, celem zbilansowania systemów energetycznych, w których duży udział stanowią OZE (Ghorbani i in., 2023; Evans, Shaw, 2021). Do tej pory opisywane wcześniej kawerny na wodór służyły jako magazyny dla przemysłu chemicznego i petrochemicznego, jednak potwierdza to tylko techniczną możliwość magazynowania wodoru w kawernach.

Według ogólnej koncepcji magazynu energii w postaci wodoru, wodór produkowany w elektrolizerze zasilanym z OZE (w czasie nadwyżek energetycznych), będzie magazynowany w kawernie. W momencie wzrostu popytu w sieci na energię elektryczną (dolina energetyczna) wodór wykorzystany zostanie do produkcji energii elektrycznej poprzez spalanie w turbinie wodorowej lub w ogniwach paliwowych

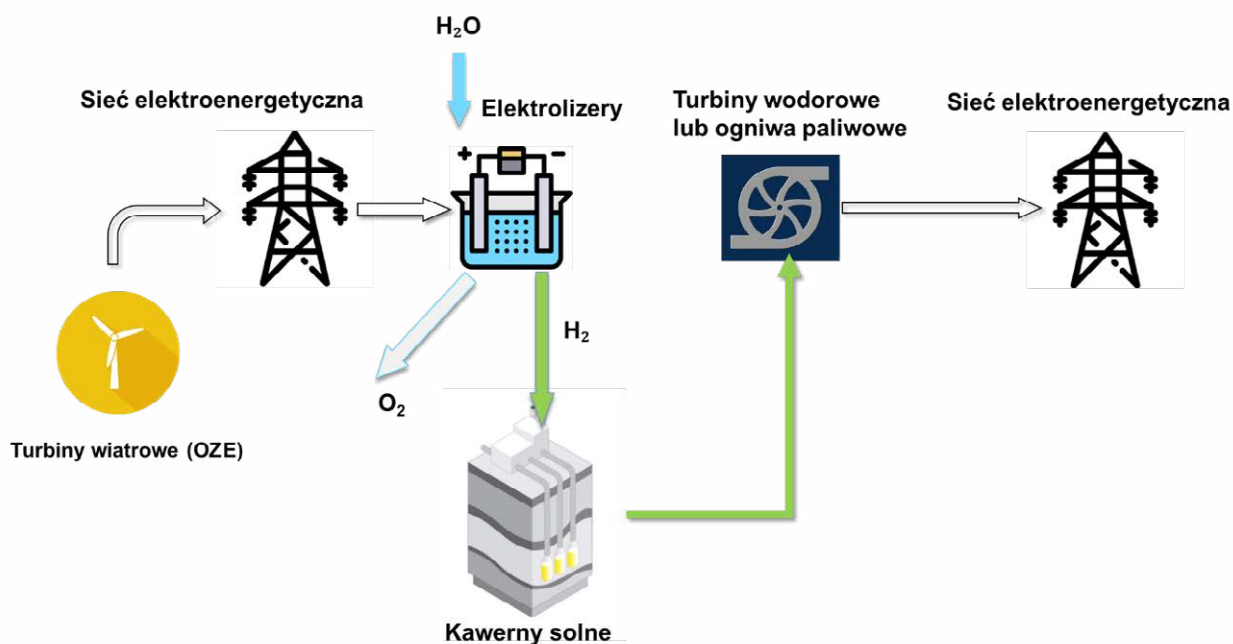
logical knowledge of these sites and the availability of necessary infrastructure (leaching facilities, brine disposal from the leaching process), as well as the possibility of convenient integration with renewable energy sources, given the favorable wind conditions in northern and central Poland (Polański, 2024; Polański, 2025).

6. USE OF A HYDROGEN CAVERNS AS AN ENERGY STORAGE FACILITY

In the era of ongoing energy transition, research on hydrogen storage as an energy carrier is increasingly being conducted to balance energy systems with a high share of renewable energy sources (Ghorbani et al., 2023; Evans & Shaw, 2021). Until now, the hydrogen caverns described earlier have primarily served the chemical and petrochemical industries; however, this only confirms the technical feasibility of storing hydrogen in caverns.

According to the general concept of a hydrogen-based energy storage system, hydrogen produced in an electrolyzer powered by renewable energy sources (during periods of energy surplus) would be stored in a cavern. When electricity demand in the grid rises (energy valley), the stored hydrogen would be used to generate electricity, either through combustion in a hydrogen turbine or in fuel cells (Fig. 4). An example of such a facility is the project implemented in Fusina, Italy, with a capacity of 12 MW (Gąsior & Kaleta, 2016; Polański, 2024).

However, the technical feasibility of the installation itself represents only part of the success in creating an energy storage system. A critical aspect of the commercial use of such a facility is the economic viability of the entire investment,



Ryc. 4. Koncepcja magazynowania wodoru w kawernach solnych (opracowanie własne).

Fig. 4. The concept of hydrogen storage in salt caverns (own study).

(Ryc. 4). Przykładem takiej instalacji może być projekt zrealizowany w Fusinie (Włochy) o mocy 12 MW (Gąsior, Kaleta, 2016; Polański, 2024).

Jednakże techniczna wykonalność samej instalacji stanowi tylko część sukcesu w postaci stworzenia magazynu energii. Istotnym aspektem związanym z komercyjnym wykorzystaniem takiego magazynu jest opłacalność ekonomiczna całej inwestycji co powiązane jest z odpowiednim dobraniem mocy instalacji oraz zaprojektowaniem scenariusza eksploatacji takiego magazynu.

Niestety ze względu na stochastyczność OZE nie jest to proste przedsięwzięcie i bez zastosowania zaawansowanych narzędzi do odpowiedniego prognozowania cykli pracy może okazać się trudnym do zrealizowania założonych celów przedsięwzięciem.

Kluczowymi z punktu widzenia projektowania magazynu okazują się m.in. aspekty związane z odpowiednim doborem elementów instalacji związanych przede wszystkim z:

- profilem pracy OZE (np. profil pracy turbin wiatrowych),
- gotowością elektrolizerów do wytwarzania wodoru,
- scenariusza pracy magazynu,
- dostępnością technologii wodorowej dla instalacji napowierzchniowej,
- sprawnością całego procesu,
- zaopatrzenie w wodę do elektrolizy.

Profil pracy OZE:

Jeśli założyć, że głównym odnawialnym źródłem energii elektrycznej do zasilania elektrolizerów będą turbiny wiatrowe pojawia się kwestia dostępności energii. Tzn. ile i w którym momencie, będziemy w stanie wykorzystać energii do produkcji wodoru w elektrolizerach? Zagadnienie to jest dość skomplikowane, bo tak naprawdę zależy od aktualnej sytuacji pogodowej (wietrzności) połączonej z zapotrzebowaniem na energię w sieci – czy w tym samym czasie kiedy mamy możliwość produkować energię elektryczną występują jej nadwyżki w sieci. Ponieważ dopiero wtedy tą nadmiarową energię można wykorzystać do produkcji wodoru w elektrolizerach. Aktualnie analizy wskazują, że w najbardziej optymistycznym wariantcie dla farm wiatrowych usytuowanych na morzu, będzie to maksymalnie 4000 h w skali roku (wg. AXPO za wysokie napięcie.pl). Jednak należy tu zaznaczyć, że nie jest to dostępność ciągła tylko łączna co oznacza, że przewiduje się przerwy w nadwyżkach np. 1-2 h kilka razy w ciągu doby.

Gotowość elektrolizerów do pracy

Obecnie najbardziej rozwinięte są technologie elektrolizerów AWE (elektroliza alkaliczna) oraz PEM (elektroliza z wymianą protonów). Przy czym warto zwrócić uwagę, że koszt elektrolizerów PEM jest prawie dwukrotnie większy niż elektrolizerów AWE. Jednak ma to przełożenie na gotowość do pracy. W przypadku zimnego elektrolizera PEM jest to kilka minut natomiast AWE kilkadziesiąt minut. W przypadku roz-

which is closely linked to the appropriate sizing of the installation and the design of an operational scenario for the storage system.

Unfortunately, due to the stochastic nature of renewable energy sources, this is not a straightforward task. Without the use of advanced tools for accurate forecasting of operational cycles, achieving the planned objectives of the project may prove challenging.

From the perspective of designing a hydrogen storage facility, key aspects include the appropriate selection of installation components, primarily related to:

- the operational profile of renewable energy sources (e.g., the performance profile of wind turbines),
- the readiness of electrolyzers for hydrogen production,
- the operational scenario of the storage system,
- the availability of hydrogen technology for above-ground installations,
- the overall efficiency of the process,
- the supply of water for electrolysis.

Operational Profile of RES

If wind turbines are assumed to be the primary renewable energy source for powering electrolyzers, the issue of energy availability arises. Specifically, how much energy, and at what times, can be used for hydrogen production in electrolyzers? This question is complex, as it depends on the current weather conditions (wind patterns) combined with electricity demand in the grid – i.e., whether surplus electricity is available at the same time as it can be generated. Only under such conditions can excess electricity be utilized for hydrogen production in electrolyzers. Current analyses indicate that, in the most optimistic scenario for offshore wind farms, this would amount to a maximum of approximately 4,000 hours per year (according to AXPO, via wysokie-napiecie.pl). It should be noted, however, that this figure represents total availability rather than continuous operation, meaning that periods of surplus energy are expected to be intermittent, typically 1–2 hours several times per day.

Readiness of electrolyzers for operation

Currently, the most developed electrolyzer technologies are Alkaline Water Electrolysis (AWE) and Proton Exchange Membrane (PEM) electrolysis. It is important to note that the cost of PEM electrolyzers is almost twice that of AWE systems. However, this has a direct impact on operational readiness. For a cold PEM electrolyzer, start-up time is a few minutes, whereas for an AWE electrolyzer, it takes several tens of minutes. For a preheated electrolyzer, PEM systems can reach operational readiness in a few seconds, while AWE systems require several minutes (Godula-Jopek, 2015).

Operational Scenario of the Storage System

A fundamental question in managing the operational scenario of the storage system is determining when and how

grzanego elektrolizera PEM gotowość do pracy to kilka sekund, a w AWE kilkanaście minut (Godula-Jopek A., 2015).

Scenariusz pracy magazynu

Podstawowe pytanie przy zarządzaniu scenariuszem pracy magazynu to kiedy i ile energii możemy wykorzystać do produkcji wodoru w elektrolizerach (nadwyżki energetyczne). Następnie kiedy i ile energii potrzebujemy oddać do sieci (doliny energetyczne). Jak wspomniano wcześniej będzie to ok. 4000 h w skali roku, ale z naprzemiennymi nadwyżkami i dolinami energetycznymi w sieci (wg. AXPO za wysokie-napięcie.pl). Stąd pojawia się konieczność naprzemiennego doładowywania i opróżniania kawerny. Częściowym rozwiązaniem w tym wypadku mogłoby być wykorzystanie kilku kawern magazynowych, gdzie część byłaby zatłaczana, a część opróżniana.

Dostępność technologii wodorowej

Stale rozwijane technologie związane z wodorem powinny spowodować spadek cen produkcji urządzeń do produkcji wodoru jak i urządzeń do produkcji energii elektrycznej z wodoru. Obecnie w przypadku elektrolizery PEM i AWE koszt waha się w granicach 500-2500 USD/kW. W przypadku ogniw paliwowych: 1800 - 2200 USD/kW. Jednak odrębną kwestią jest to czy cena rzeczywiście spadnie tak jak to pokazują prognozy, ponieważ jednocześnie wzrośnie popyt na tego typu urządzenia. W przypadku turbiny na wodór o dużej mocy pojawia się jeszcze pytanie czy będzie ona dostępna tak jak obiecują producenci już w 2035 roku (Tekin i in., 2018).

Sprawność całego procesu magazynowania energii

Sprawność samego elektrolizera to ok. 50-80%, przy czym jeśli uwzględnimy konieczność zastosowania układu przygotowania wody do elektrolizy sprawność należy szacować na poziomie ok. 60% dla całego układu elektrolizy.

Sprawność turbiny (na podstawie sprawności turbin gazowych) - w układzie prostym jest to ok. 40%, do 60% układ z odzyskiem ciepła (Giampaolo A., 2006). Należy założyć, że dla wodoru będzie podobnie.

Jeśli do tego dodamy straty na sprężarkach (ładowanie kawerny)), układzie oczyszczania wodoru, itd. to ogólna sprawność całego procesu magazynowania wynosić będzie na poziomie ok. 30 - 35%. Jednak przy uwzględnieniu, że w przypadku pojawienia się nadwyżek w sieci elektroenergetycznej nie możemy ich w żaden sposób „przechować” na później stosowanie magazynowania energii w postaci wodoru w kawernach przy wykorzystaniu „darmowej” energii może dawać wymierne korzyści nawet przy stosunkowo niskiej sprawności całego procesu.

Zaopatrzenie w wodę do procesu elektrolizy

Dostarczenie odpowiednich ilości wody do procesu produkcji wodoru (elektroliza) stanowi duże wyzwanie ze względu na zapotrzebowanie. Jak podaje hydrogentechworld (<https://hydrogentechworld.com>) na 1 kg wyprodukowanego

much energy can be used for hydrogen production in electrolyzers (energy surpluses) and, conversely, when and how much energy needs to be returned to the grid (energy valleys). As mentioned earlier, this corresponds to approximately 4,000 hours per year, but with alternating periods of surplus and deficit in the grid (according to AXPO, via wysokie-napięcie.pl). This situation necessitates alternating charging and discharging of the cavern. A partial solution could involve the use of multiple storage caverns, with some being filled while others are emptied.

Availability of Hydrogen Technology

Ongoing developments in hydrogen technologies are expected to reduce the cost of both hydrogen production equipment and devices for generating electricity from hydrogen. Currently, the cost of PEM and AWE electrolyzers ranges from approximately 500 to 2,500 USD/kW, while fuel cells cost between 1,800 and 2,200 USD/kW. However, a separate issue is whether prices will actually decrease as projected, given that the demand for such devices is simultaneously expected to rise. In the case of high-capacity hydrogen turbines, there is also the question of whether they will be commercially available as promised by manufacturers by 2035 (Tekin et al., 2018).

Overall Efficiency of the Energy Storage Process

The efficiency of the electrolyzer itself ranges from approximately 50% to 80%. When accounting for the need to implement a water treatment system for electrolysis, the overall efficiency of the electrolysis unit is estimated at around 60%.

Turbine efficiency (based on gas turbine performance) in a simple system is approximately 40%, increasing up to 60% in a system with heat recovery (Giampaolo, 2006). It is reasonable to assume that similar values will apply for hydrogen turbines.

When additional losses are considered – such as those from compressors used for charging the cavern, hydrogen purification systems, and other auxiliary components – the overall efficiency of the entire energy storage process is estimated to be around 30–35%. However, considering that electricity surpluses in the grid cannot be stored for later use by any other means, hydrogen storage in caverns utilizing “free” surplus energy can provide tangible benefits even at a relatively low overall process efficiency.

Water Supply for the Electrolysis Process

Providing sufficient water for hydrogen production via electrolysis represents a significant challenge due to high demand. According to HydrogenTechWorld (<https://hydrogentechworld.com>), producing 1 kg of hydrogen requires 9 liters of “ultrapure” water, i.e., water treated to the appropriate purity level. This, in turn, necessitates supplying varying

wodoru potrzeba 9 litrów wody „ultraczystej” czyli doczyszczanej do odpowiedniego poziomu. To z kolei przekłada się na konieczność dostarczenia (w zależności od źródła) odpowiednich ilości wody do wyprodukowania wody ultraczystej. W przypadku wody:

- gruntowej jest to 1.4 l na 1 l wody ultraczystej,
- 1.5 l wody powierzchniowej/oczyszczonych ścieków na 1 l wody ultraczystej,
- a w przypadku wykorzystania wody morskiej jest to już 3.3 l na 1 l wody ultraczystej.

7. PODSUMOWANIE

Stochastyczność pracy OZE, a w efekcie coraz większe nadwyżki energetyczne w sieci w okresach małego zapotrzebowania na energię elektryczną u konsumentów oraz deficyty energii w okresach kiedy zapotrzebowanie gwałtownie wzrasta powodują konieczność poszukiwania sposobów krótko- i średniookresowego magazynowania energii. „Magazynowanie prądu” poprzez jego zamianę na energię w postaci wodoru, którą można następnie „odzyskać” poprzez konwersję wodoru na energię elektryczną jest jednym ze sposobów na zagospodarowanie nadwyżek energii elektrycznej w sieci. Jednak o ile budowa kawerny magazynowej dla wodoru nie stanowi większego wyzwania technologicznego – na świecie istnieją od kilkudziesięciu lat takie magazyny, to jego późniejsza eksploatacja i komercyjne wykorzystanie okazuje się być sporym wyzwaniem. Kluczowe zagadnienia związane z eksploatacją takich magazynów to profil pracy OZE, gotowością elektrolizerów do produkcji wodoru, scenariusz pracy magazynu, dostępność technologii wodorowej dla instalacji napowierzchniowej, sprawnością całego procesu.

W przypadku eksploatacji magazynu energii w postaci wodoru nie bez znaczenia jest również zaopatrzenie całej inwestycji w ogromne ilości wody potrzebnej do produkcji wodoru w procesie elektrolizy. Zapewnienie odpowiedniego jej wolumenu, który następnie musi być doczyszczony do parametrów wymaganych przez elektrolizery stanowi również istotne wyzwanie technologiczne.

Dlatego odpowiednie zaplanowanie i dostosowanie parametrów całej instalacji do aktualnych i prognozowanych potrzeb lokalnego rynku energetycznego, z uwzględnieniem możliwości wykorzystania nadwyżek z OZE stanowi podstawę sukcesu komercyjnego wprowadzenia tego typu magazynów. Niestety dopasowanie możliwości produkcyjnych instalacji z aktualnym dostępem do nadwyżek z OZE, z jednoczesnym uwzględnieniem zapotrzebowania na energię elektryczną w sieci stanowi największe wyzwanie technologiczne.

amounts of source water to produce the required volume of ultrapure water, depending on its origin:

- Groundwater: 1.4 liters per 1 liter of ultrapure water,
- Surface water or treated wastewater: 1.5 liters per 1 liter of ultrapure water,
- Seawater: 3.3 liters per 1 liter of ultrapure water.

7. SUMMARY

The stochastic nature of renewable energy sources, resulting in increasing energy surpluses during periods of low electricity demand and energy deficits when demand rises sharply, necessitates the search for short- and medium-term energy storage solutions. One approach is “storing electricity” by converting it into hydrogen, which can later be recovered through the conversion of hydrogen back into electricity. While the construction of a hydrogen storage cavern does not pose a major technological challenge – such facilities have existed worldwide for several decades – their subsequent operation and commercial utilization present significant challenges. Key issues in the operation of such storage systems include the operational profile of renewable energy sources, the readiness of electrolyzers for hydrogen production, the operational scenario of the storage system, the availability of hydrogen technology for above-ground installations, and the overall efficiency of the process.

In the operation of a hydrogen-based energy storage system, the supply of large volumes of water required for hydrogen production via electrolysis is also a critical factor. Ensuring an adequate water volume, which must then be purified to meet the specifications required by the electrolyzers, represents a significant technological challenge.

Therefore, careful planning and adjustment of the entire installation's parameters to the current and projected needs of the local energy market, while taking advantage of potential surpluses from renewable energy sources, is essential for the commercial success of such storage systems. Unfortunately, aligning the production capacity of the installation with the availability of renewable energy surpluses, while simultaneously accounting for electricity demand in the grid, remains the greatest technological challenge.

LITERATURA/REFERENCES

- ACHT A., DONADEI S., 2012. Hydrogen storage in salt caverns – state of the art. *New developments and R&D projects. Solution Mining Research Institute Fall 2012 Technical Conference Bremen, Germany, 1-2 October 2012.*
- CROTOGINO F., 2006. Compressed Air Storage. *First International Renewable Energy Storage (IRES I) Conference, Gelsenkirchen. Oktober 2006.*
- CZAPOWSKI G., ALEKSANDROWSKI P., JAROSIŃSKI M., 2017. Struktury solne. [W:] Nawrocki J., Becker A. (red.) *Atlas geologiczny Polski. Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa.*
- CZAPOWSKI G., TARKOWSKI R., 2018. Uwarunkowania geologiczne wybranych wysadów solnych w polsce i ich przydatność do budowy kawern do magazynowania wodoru. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 472: 53–82. DOI: 10.5604/01.3001.0012.6905
- DZIERŻANOWSKI Ł., 2011. Elektrownie CAES. *Energia Elektryczna* (nr 2-3/2011).
- EVANS J., SHAW T., 2021. Storage of Hydrogen in Solution Mined Salt Caverns for Long Duration Energy Storage. *SMRI Spring 2021 Virtual Technical Conference. Solution Mining Research Institute; 2021. p. 1–20.*
- GHORBANI B., ZENDEHBOUDI S., SAADY NMC., DUSSEAU MB., 2023. Hydrogen storage in North America: Status, prospects, and challenges. *J Environ Chem Eng.* 11(3), 109957.
- GĄSIOR P., KALETA J., 2016. Wodór jako paliwo w zastosowaniach cywilnych i militarnych - hydrogen as a fuel in civil and military applications. *Problemy Techniki Uzbrojenia; Volume 138 No 2/2016, pp. 101 – 117.*
- GIAMPAOLO A., 2006. Gas Turbine Handbook: Principles and Practices, (3-rd ed.). *Fairmont Press, CRC Press, Boca Raton.*
- GODULA-JOPEK A., 2015. Hydrogen production: by electrolysis. *John Wiley & Sons.*
- KRUCK O., CROTOGINO F., PRELICZ R., 2013. Overview on all Known Underground Storage Technologies for Hydrogen - Assessment of the potential, the actors and relevant business cases for large scale and seasonal storage of renewable electricity by hydrogen underground storage in Europe. *Grant agreement no.: 303417 HyUnder.*
- POLAŃSKI K., 2025. CAES as a Way for Large-Scale Storage of Surplus Energy in Poland from Renewable Energy Sources. *Energies* 2025, 18, 803. <https://doi.org/10.3390/en18040803>
- POLAŃSKI K., 2024. Wielkoskalowe magazyny energii w kawernach solnych: do czego wykorzystać kawerny solne? — Large-scale energy storage in salt caverns : what should salt caverns be used for? *Quo vadis sal: rola soli w Polsce i Europie w dobie kryzysu geopolitycznego : XXVIII międzynarodowe sympozjum solne: Wieliczka, 16.10-18.10.2024 - Quo vadis sal: the role of salt in Poland and Europe in the age of geopolitical crisis: XXVIII international salt symposium/ red. Paulina Cyran. Kraków: Polskie Stowarzyszenie Górnictwa Solnego, [2024]. — S. 15–16. — Bibliogr. s. 16.*
- TARKOWSKI R., CZAPOWSKI G., 2018. Salt domes in Poland - Potential sites for hydrogen storage in caverns. *International Journal of Hydrogen Energy* 43 (2018) 21414-21427.
- TEKIN, N., ASHIKAGA, M., HORIKAWA, A., FUNKE, H., 2018. Enhancement of fuel flexibility of industrial gas turbines by development of innovative hydrogen combustion systems. *Gas for Energy*
- Strona internetowa: <https://hydrogentechworld.com/water-treatment-for-green-hydrogen-what-you-need-to-know> Data wejścia: 30.07.2025r.
- Strona internetowa: <https://wysokienapiecie.pl/107229-wszyskichca-produkowac-wodor-ale-kto-bedzie-go-kupowac/> Data wejścia: 30.07.2025r.