

I. ARTYKUŁY / PAPERS

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?

Krzysztof POLAŃSKI¹

¹ 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

Kawernowe Podziemne Magazyny w złożach soli znane są na świecie od wielu lat. Magazyny tego typu uznawane są za jedne z najlepszych do przechowywania zarówno gazu ziemnego jak i paliw płynnych. W dobie trwającej transformacji energetycznej i rosnącego udziału Odnawialnych Źródeł Energii (OZE) w bilansie energetycznym kraju konieczne jest poszukiwanie możliwości magazynowania energii elektrycznej z OZE, gdyż jej produkcja nie jest skorelowana z aktualnym zapotrzebowaniem w sieci energetycznej. Stąd też konieczne jest znalezienie sposobu na wielkoskalowe magazynowanie nadwyżek energii elektrycznej dające jednocześnie możliwość szybkiego jej oddania w przypadku nagłego wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną w sieci. Jednym ze sposobów zmagazynowania energii elektrycznej jest jej zamiana na energię pod inną postacią, ale umożliwiającą w łatwy i względnie ekonomiczny sposób jej trwałe przechowanie zarówno w krótkich jak i dłuższych przedziałach czasowych. W przypadku wykorzystania wielkoskalowego magazynowania energii w kawernach solnych można rozpatrywać tutaj zarówno energię zmagazynowaną w postaci gazu ziemnego, wodoru, jak również energię sprężonego powietrza.

Słowa kluczowe: kawerny solne, magazynowanie energii, magazynowanie energii sprężonego powietrza, magazynowanie wodoru

1. WPROWADZENIE

Kawernowe Podziemne Magazyny Gazu (KPMG) funkcjonują na całym świecie od ponad 50ciu lat, pełniąc rolę

ABSTRACT

Underground cavern storage in salt deposits has been known worldwide for many years. Storage facilities of this type are considered among the most suitable for storing both natural gas and liquid fuels. In the era of ongoing energy transformation and the increasing share of renewable energy sources (RES) in the national energy balance, it has become necessary to seek solutions for storing electricity generated from RES, as its production is not correlated with current demand in the power grid. Consequently, there is a need to identify methods for large-scale storage of surplus electricity that also allow for its rapid release in the event of sudden increases in electricity demand. One method of storing electricity involves converting it into another form of energy that enables relatively simple, durable, and cost-effective storage over both short and long time periods. In the case of large-scale energy storage in salt caverns, energy stored in the form of natural gas, hydrogen, as well as compressed air may be considered.

Key words: salt caverns, energy storage, compressed air energy storage, hydrogen storage.

1. INTRODUCTION

Cavern underground gas storage facilities (CUGS) have been operating worldwide for over 50 years, serving both as seasonal storage facilities and, due to their operating parameters, as peak storage facilities used to balance gas transmission networks during daily fluctuations in natural gas demand. Owing to their relatively high deliverability rates (compared

zarówno magazynów sezonowych, jak i dzięki swoim parametrom, magazynów szczytowych służących do bilansowania sieci gazowniczej w trakcie dobowych wahań na zapotrzebowanie dla gazu ziemnego. Dzięki stosunkowo wysokim wydajnościom (w porównaniu do magazynów w szerpanych złożach gazu i warstwach wodonośnych) tego typu magazyny bardzo dobrze nadają się do dobowego bilansowania nadwyżek i uzupełniania braku odpowiednich ilości gazu w sieci w bardzo krótkim czasie (kilkadziesiąt minut). Właśnie dzięki temu, że można je stosunkowo szybko napełnić i opróżnić, pod koniec lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia, kawerny solne wykorzystano w do magazynowania energii sprężonego powietrza w instalacji CAES (Compressed Air Energy Storage) w Huntorf (Niemcy). W tym samym okresie w Teesside (Wielka Brytania) uruchomiono pierwszy magazyn wodoru dla celów przemysłowych zlokalizowany w kawernach solnych (Dzierżanowski, 2011).

2. CEL PRZEGLĄDU

Celem niniejszego przeglądu jest wskazanie możliwości wykorzystania kawern solnych do magazynowania szeroko pojętej energii (pod postacią gazu ziemnego, w postaci wodoru, w sprężonym powietrzu) w polskich warunkach (Ryc. 1). Ze względu na znajdujące się na terenie naszego kraju zarówno pokładowe jak i wysadowe złoża soli, należy wskazać, że Polska posiada dość duży potencjał (na tle innych krajów europejskich) w kwestii możliwości budowy magazynów kawernowych. W artykule skupiono się na trzech „nośnikach energii” możliwych do zmagazynowania w komorach w złożach soli, które zdaniem autora w najbliższych latach będą odgrywały największą rolę w transformacji energetycznej Polski i dążeniu do osiągnięcia celu jakim jest gospodarka zeroemisyjna. Należy tutaj nadmienić, że pełna transformacja energetyczna nie jest możliwa do realizacji w Polsce w ciągu kilku czy kilkunastu lat. Tzw. okres przejściowy będzie procesem długotrwałym i należy spodziewać się, że w najbliższych dziesięcioleciach to właśnie odpowiednio dobrany miks ener-

to storage facilities in depleted gas reservoirs and aquifers), such storage sites are particularly well suited for daily balancing of surpluses and for rapidly compensating gas shortages in the network within very short time frames (tens of minutes).

Precisely because salt caverns can be filled and withdrawn relatively quickly, they were used in the late 1970s for compressed air energy storage (CAES) at the Huntorf facility in Germany. During the same period, the first hydrogen storage facility for industrial purposes, located in salt caverns, was commissioned in Teesside, United Kingdom (Dzierżanowski, 2011).

2. AIM OF THE REVIEW

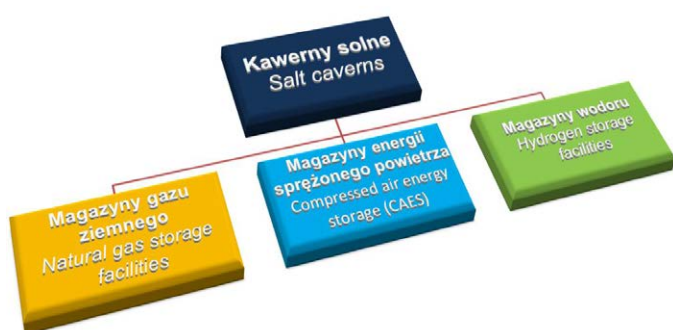
The aim of this review is to indicate the potential for using salt caverns for the storage of energy in a broad sense (in the form of natural gas, hydrogen, and compressed air) under Polish geological conditions (Fig. 1). Due to the presence of both bedded and diapiric salt deposits within Poland, the country possesses relatively high potential—compared to other European countries—for the development of cavern storage facilities.

The article focuses on three energy carriers that can be stored in caverns within salt deposits and which, according to the author, are expected to play the most significant role in Poland's energy transformation and its pursuit of a zero-emission economy in the coming years. It should be emphasized that a complete energy transformation cannot be achieved in Poland within just a few or even several years. The so-called transition period will be a long-term process, and it can be expected that in the coming decades an appropriately designed energy mix (i.e. the share of different energy carriers) will enable flexible balancing of national energy networks.

3. NATURAL GAS CAVERN STORAGE FACILITIES IN POLAND

At present, two cavern underground gas storage facilities (CUGS) operate in Poland, primarily balancing peak demand in the gas transmission network. According to Gas Storage Poland (ipi.gasstoragepoland.pl), the working capacity of the Mogilno CUGS currently amounts to 580.92 million m³ (a total of 14 storage caverns). The maximum injection rate is 9.60 million m³/day, while the maximum withdrawal rate reaches 18.00 million m³/day.

For the Kosakowo CUGS, the corresponding parameters are as follows: a working capacity of 296.80 million m³ (distributed across eight caverns), a maximum injection rate of 2.40 million m³/day, and a maximum withdrawal rate of 9.60 million m³/day.



Ryc. 1. Możliwości wykorzystania kawern solnych do magazynowania energii (opracowanie własne).

Fig. 1. Possibilities of using salt caverns for energy storage (own study).

getyczny (udział różnych nośników energii) pozwoli na elastyczne bilansowanie krajowych sieci energetycznych.

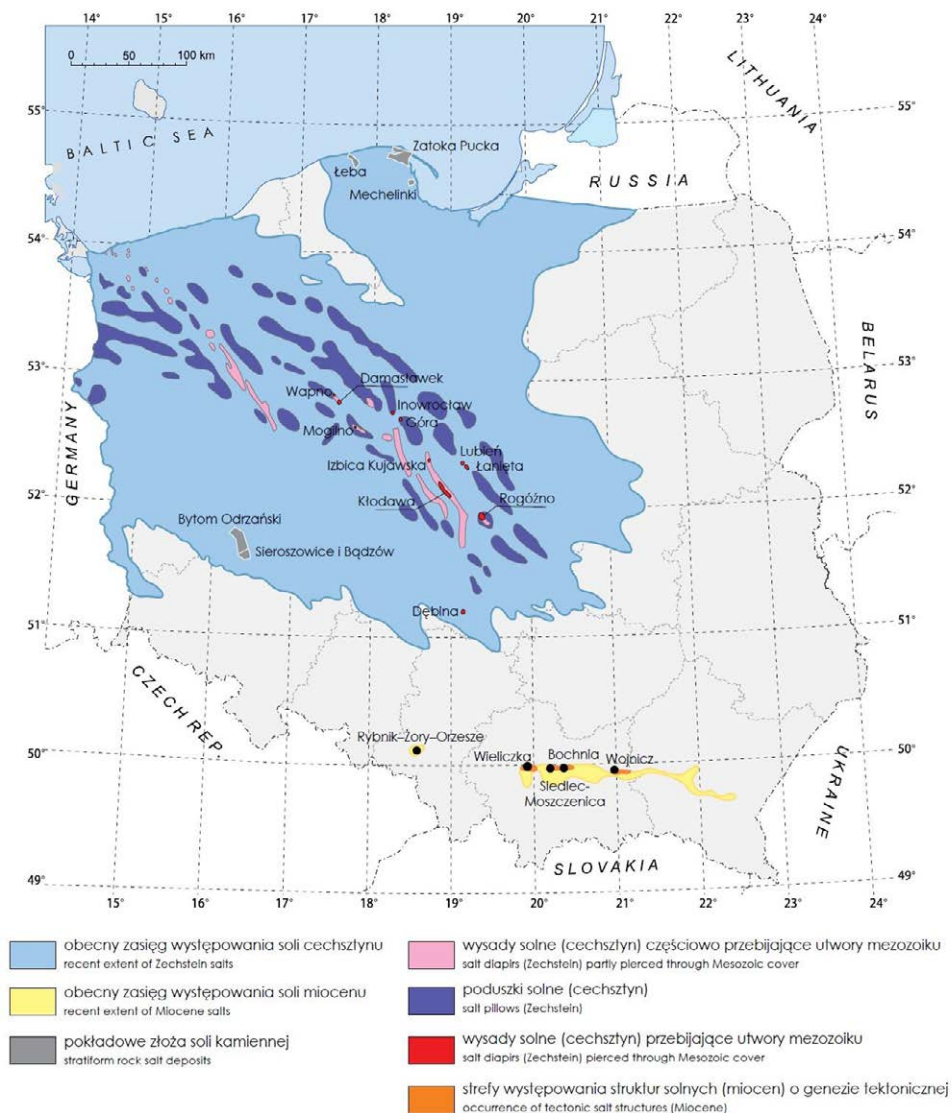
3. KAWERNOWE MAGAZYNY GAZU ZIEMNEGO W POLSCE

Obecnie w Polsce funkcjonują dwa Kawernowe Podziemne Magazyny Gazu (KPMG), bilansujące przede wszystkim szczytowe zapotrzebowanie sieci gazowej. Jak podaje Gas Storage Poland na swoim portalu internetowym (ipi.gasstoragepoland.pl), pojemność czynna KPMG Mogilno wynosi obecnie 580,92 mln m³ (łącznie pojemność 14 kawern magazynowych). Maksymalna wydajność załaczania do komór wynosi 9,60 mln m³/dobę natomiast maksymalna wydajność odbioru z komór wynosi 18,00 mln m³/dobę. Dla KPMG Kosakowo parametry te wynoszą odpowiednio: 296,80 mln m³ pojemności czynnej (łącznie w 8 kawernach), maksymalna wydajność załaczania: 2,40 mln m³/dobę, maksymalna wydajność odbioru: 9,60 mln m³/dobę.

4. COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE IN SALT CAVERNS (CAES)

The CAES technology offers significant energy savings due to the fact that all generated electricity is supplied directly to the power grid. In conventional gas turbine installations, a substantial portion of energy is consumed by compressors supplying air to the turbine. The possibility of energy storage means that electricity generation does not have to coincide with immediate grid demand.

An important advantage of CAES installations is the ability to rapidly fill and empty storage caverns, which allows them to effectively compensate for electricity surpluses in the grid and to relatively quickly address electricity shortages. Salt caverns for CAES were used in 1978 at the Huntorf facility in Germany, where the installation served as an emergency power supply for a nuclear power plant. According to SSS Gears, the current capacity of the installation is 320 MW (www.sssgears.co.uk). A similar facility was com-



Ryc. 2. Struktury solne w utworach cechsztynu w Polsce (Czapowski i in., 2017).

Fig. 2. Salt structures in the Zechstein formations in Poland (Czapowski i in., 2017).

4. MAGAZYNY SPRĘŻONEGO POWIETRZA W KAWERNACH SOLNYCH - CAES (COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE)

Rozwiązanie zaproponowane w technologii CAES daje znaczne oszczędności w kwestii zapotrzebowania na energię dzięki temu, że całość produkowanej energii elektrycznej oddawana jest bezpośrednio do sieci. W klasycznej instalacji z turbiną gazową, duża część energii konsumowana jest przez napęd sprężarek zasilających turbinę w powietrze. Możliwość magazynowania sprawia, że produkowana energia elektryczna nie musi być oddawana do sieci w chwili wytworzenia.

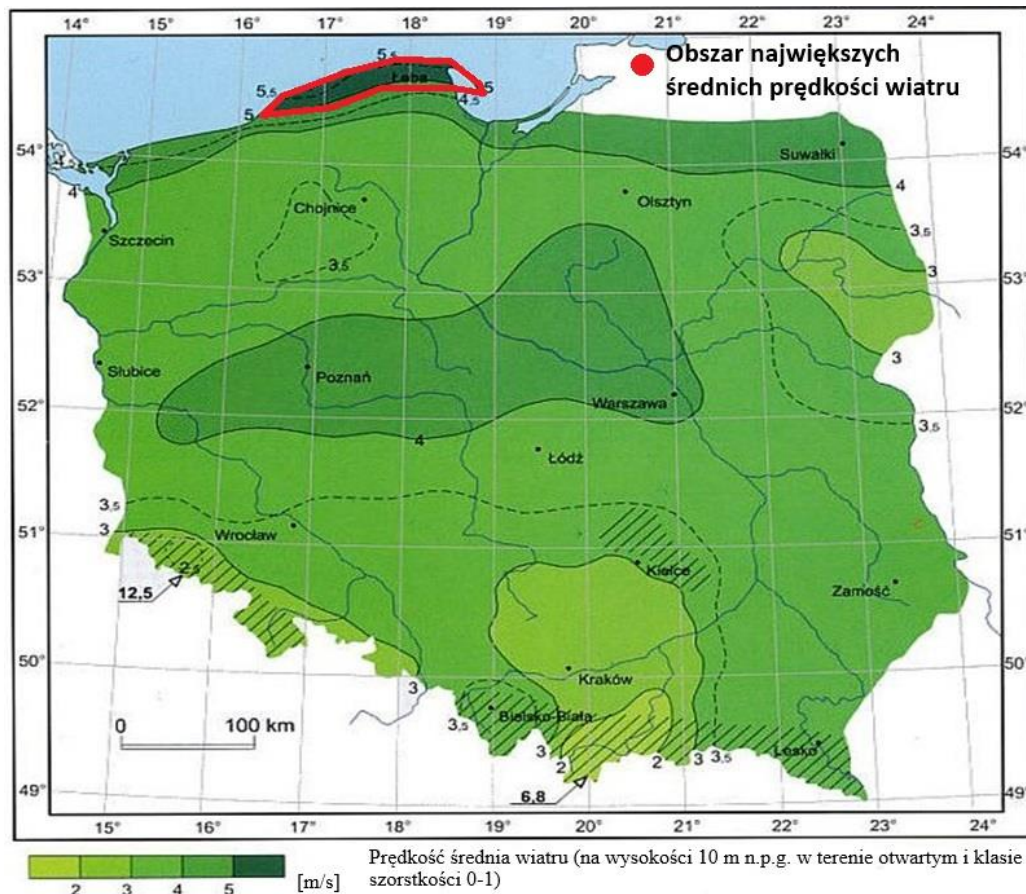
Zaletą tego typu instalacji jest możliwość szybkiego napełniania i opróżniania przez co magazyny tego typu mogą z powodzeniem być wykorzystywane do kompensowania nadwyżek energii elektrycznej w sieci oraz stosunkowo szybkiego uzupełniania jej braków. Kawerny solne CAES wykorzystano w 1978 roku w Huntorf w Niemczech, gdzie instalacja wykorzystywana była jako zasilanie awaryjne elektrowni jądrowej - jak podaje na swojej stronie firma SSSGears obecna moc instalacji wynosi 320 MW (www.sssgears.co.uk). Instalacja tego typu powstała również w McIntosh w Stanach Zjednoczonych w 1991 r. (110 MW), a w 2012 roku uruchomiona

została w McIntosh, USA, w 1991 (110 MW), a w 2012 roku uruchomiona została mała instalacja CAES pracująca w warunkach bliskich izotermicznym w Gaines, Teksas (Crotogino, 2006; Dzierżanowski, 2011).

The long-term, failure-free operation of these installations confirms the technical feasibility of using salt caverns as peak energy storage facilities that can be rapidly filled or depleted within tens of minutes or several hours.

By comparing the map of salt deposits in Poland (Fig. 2) with the map of average wind speeds in Poland (Fig. 3), it can be observed that the areas characterised by the highest average wind speeds coincide with the occurrence of the bedded salt deposits of the Łeba Elevation and the Puck Bay. In the author's opinion, the Łeba Elevation and the Puck Bay region offer the most favourable conditions for the construction of CAES power plants, which could balance peak electricity demand in the power grid, particularly in the context of the development of large offshore wind farms in the Baltic Sea and the resulting increase in the share of RES in the national energy balance.

CAES storage facilities make it possible, to a large extent, to make electricity production independent of constant access to a renewable energy source (e.g. wind). If the wind



Ryc. 3. Wiatr - prędkości średnie 10-min. (m/s) (na wysokości 10 m n.p.g. w terenie otwartym i klasie szorstkości 0-1) (Na podstawie: <https://www.brasit.pl/elektrownie-wiatrowe/wiatr-w-polsce/>)

Fig. 3. Wind - average speeds 10-min. (m/s) (at a height of 10 m above sea level in open terrain and roughness class 0-1) (Based on: <https://www.brasit.pl/elektrownie-wiatrowe/wiatr-w-polsce/>).

miono w Gaines (Teksas, USA) małą instalację CAES, pracującą w warunkach bliskich izotermicznym (Crotogino, 2006; Dzierżanowski, 2011). Wieloletnia bezawaryjna praca przytoczonych instalacji potwierdziła możliwości techniczne wykorzystania kawern solnych jak magazyny szczytowe energii, które można szybko (kilkadziesiąt minut/kilka godzin) opróżnić lub napełnić.

Zestawiając ze sobą mapę złóż soli w Polsce (Ryc. 2) oraz mapę średnich prędkości wiatru w Polsce (Ryc. 3) zauważyć można, że na obszarach gdzie występują największe wartości średnich prędkości wiatru występują złoża pokładowe Łeba i Zatoka Pucka. Zdaniem autora rejon wyniesienia Łeby oraz Zatoki Puckiej wskazuje na najkorzystniejsze warunki do budowy elektrowni CAES, która mogłaby bilansować szczytowe zapotrzebowanie na energię elektryczną w sieci, w kontekście budowy wielkich farm wiatrowych (turbin wiatrowych) na Morzu Bałtyckim i tym samym zwiększania udziału OZE w bilansie energetycznym kraju.

Magazyny CAES pozwalają w dużym stopniu uniezależnić produkcję energii elektrycznej od stałego dostępu do źródła odnawialnego (np. wiatr). Jeżeli siła wiejącego wiatru nie osiąga zadanego minimum potrzebnego do napędu turbiny wiatrowej przez całą dobę, w okresach „wyciszenia wiatru” możliwe jest wykorzystanie do produkcji elektryczności w turbinie gazowej energii zgromadzonej w sprężonym powietrzu. Dzięki temu rozpatrywać można technologię CAES jako uzupełnienie energetyki wiatrowej na czas, kiedy produkcja energii z turbin wiatrowych nie jest możliwa. Jednakże podstawowym celem stosowania systemu CAES jest zaspokajanie zapotrzebowania szczytowego, stąd też pod uwagę należy brać lokalizację, gdzie średnia prędkość wia-

speed does not reach the required minimum necessary to drive a wind turbine throughout the day, during periods of so-called “wind calm” it is possible to use the energy stored in compressed air to produce electricity in a gas turbine. Thanks to this, CAES technology can be considered as a supplement to wind power during periods when electricity production from wind turbines is not possible. However, the primary purpose of CAES systems is to meet peak demand; therefore, locations where average wind speeds are the highest should be taken into account, as such areas are considered the most favourable for the construction of wind turbines, which serve as the driving source for the compressors.

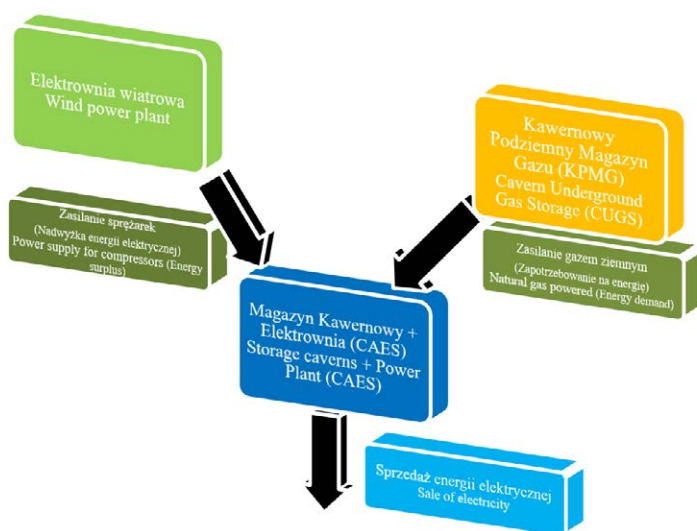
In the author’s opinion, in order to use the advantages of a CAES installation in the most effective way, it would be most favourable to combine it with a natural gas storage facility (Fig. 4), so that the storage potential of this medium could also be utilised. Therefore, potential locations where the construction of a compressed air storage facility in Poland would be possible are primarily sites adjacent to existing cavern underground gas storage facilities, i.e. KPMG Kosakowo; however, favourable wind conditions in central Poland (Fig. 3) also allow the KPMG Mogilno area to be considered.

5. HYDROGEN STORAGE IN SALT CAVERNS

The ongoing energy transition has resulted in an increasing number of countries conducting research into the possibility of storing hydrogen as an energy carrier for the purpose of balancing energy demand in modern low-emission energy systems. These studies confirm that pure hydrogen, as an energy carrier, can be stored in salt caverns (Ghorbani et al., 2023; Evans & Shaw, 2021).

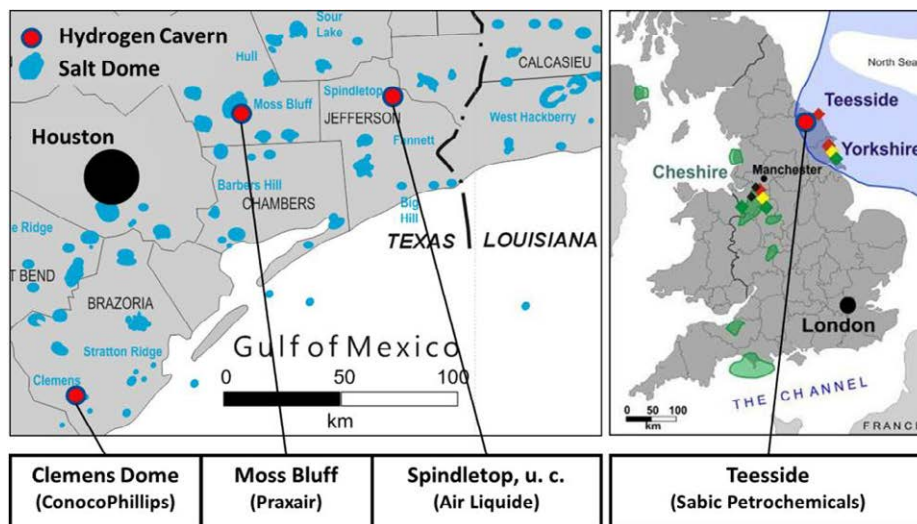
To date, hydrogen caverns have been used as storage facilities for the chemical and petrochemical industries. Such installations have been in operation since 1972 in Teesside, United Kingdom, where the storage facility consists of three caverns with a total geometric volume of approximately 210,000 m³. It is worth noting that this storage facility operates under isobaric conditions at a pressure of 45 bar. In addition, in Texas, United States, there are three hydrogen storage caverns operating in a manner similar to natural gas storage caverns: Clemens, with a geometric volume of approximately 580,000 m³; Moss Bluff, with a volume of approximately 566,000 m³; and Spindletop, with a volume exceeding 580,000 m³ (Acht & Donadei, 2012) (Fig. 5).

Hydrogen produced in electrolyzers during periods of surplus electricity generation from RES can be stored in salt caverns and subsequently used to generate electricity in fuel cells or through combustion when needed (Fig. 6). An example of such an installation is a 12 MW facility in Fusina, Italy (Gąsior & Kaleta, 2016).



Ryc. 4. Koncepcja współpracy elektrowni wiatrowej, elektrowni CAES i magazynu gazu ziemnego w kawernie (KPMG) – opracowanie własne.

Fig. 4. The concept of cooperation between a wind farm, a CAES power plant and a natural gas storage facility in a cavern (KPMG) – own study.



Ryc. 5. Lokalizacje istniejących komór magazynowych na wodór (Na podstawie: Acht, Donadei, 2012).

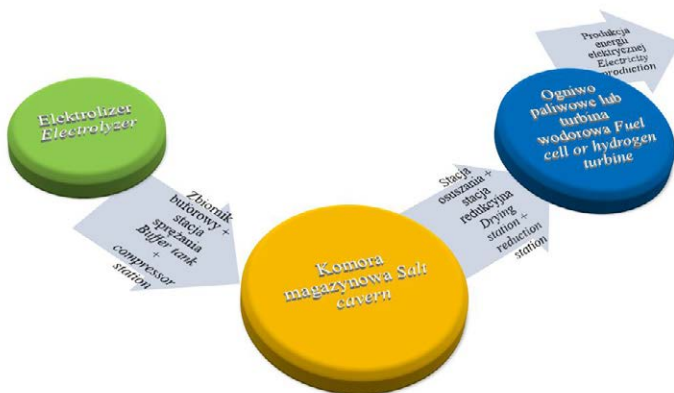
Fig. 5. Locations of existing hydrogen storage caverns (Based on: Acht, Donadei, 2012).

trów jest jak największa, dzięki czemu taki obszar typowany był jako najkorzystniejszy pod budowę turbin wiatrowych, będących źródłem napędu kompresorów.

Zdaniem autora, aby najefektywniej wykorzystać zalety instalacji CAES najkorzystniej byłoby ją połączyć z magazynem gazu ziemnego (Ryc. 4), aby możliwe było wykorzystanie również potencjału magazynowania tego medium. Stąd też potencjalnymi miejscami, gdzie możliwe byłoby wybudowanie magazynu na sprężone powietrze w Polsce są przede wszystkim lokalizacje przy istniejących już kawernowych magazynach gazu ziemnego tj. KPMG Kosakowo, ale również dobre warunki wietrzne w centralnej Polsce (Ryc. 3) pozwalają rozważać rejon KPMG Mogilno.

5. MAGAZYNOWANIE WODORU W KAWERNACH SOLNYCH

Trwająca transformacja energetyczna powoduje, że coraz więcej krajów prowadzi badania nad możliwością magazyn-



Ryc. 6. Koncepcja magazynowania wodoru w kawernach solnych – opracowanie własne

Fig. 6. The concept of hydrogen storage in salt caverns - own study

It is also possible to consider combining all of the above-mentioned concepts of using storage caverns within a single facility and thereby creating a hybrid energy storage system that takes advantage of compressed air energy, natural gas energy, and energy stored in hydrogen. Such a storage facility would be the most desirable solution in the era of the ongoing energy transition for the purpose of balancing renewable energy sources (electricity storage).

6. SUMMARY AND CONCLUSION

Based on the above brief review of the possibilities for storing energy in various forms in salt caverns, it can be stated that this type of storage appears to be the most desirable solution in the era of growing demand for storage capacity for electricity produced from RES, during periods when its direct supply to the grid is not possible (lack of demand for given amounts of electricity). In the author's opinion, over the next 20–30 years the most universal solutions will be hybrid installations enabling the use of various energy carriers, as in the case of Poland a direct transition from fossil fuels to “zero-emission” sources without a relatively long transition period is not possible.

Cavern underground storage in salt deposits has been known around the world for many years and is considered one of the best solutions for storing both natural gas and liquid fuels. The aim of this paper was to explore the potential use of salt caverns for storing energy in various forms, including natural gas, hydrogen, and compressed air, under Polish conditions (Fig. 1).

Compressed air energy storage (CAES) offers significant savings in terms of energy demand because all electricity produced is fed directly into the grid. The possibility of storage means that the produced electricity does not have to be

nowania wodoru jako nośnika energii w celach bilansowania zapotrzebowania na energię w nowoczesnych niskoemisyjnych systemach energetycznych. Badania te potwierdzają, że czysty wodór jako nośnik energii może być magazynowany w kavernach solnych (Ghorbani i in., 2023; Evans, Shaw, 2021).

Do tej pory kawerny na wodór służyły jako magazyny dla przemysłu chemicznego i petrochemicznego. Takie instalacje działają już od 1972 roku w Teeside w Wielkiej Brytanii, gdzie magazyn stanowią trzy kawerny o łącznej objętości geometrycznej ok. 210 000 m³. Co warte zaznaczenia, magazyn ten pracuje w warunkach izobarycznych przy ciśnieniu 45 bar. Oprócz tego w Teksasie w Stanach Zjednoczonych istnieją 3 kawerny magazynowe na wodór pracujące podobnie jak kawerny magazynowe na gaz ziemny (Clemens o objętości geometrycznej ok. 580 000 m³, Moss Bluff o objętości ok. 566 000 m³ oraz Spindletop o objętości ponad 580 000 m³) (Acht, Donadei, 2012) (Ryc. 5).

Wodór wyprodukowany np. w elektrolizerze w czasie tzw. nadwyżki w produkcji energii elektrycznej w Odnawialnych Źródłach Energii (OZE), można zmagazynować w kavernie, a następnie w razie potrzeby wykorzystać do produkcji energii elektrycznej w ogniowach paliwowych lub poprzez spalanie (Ryc. 6). Przykładem takiej „elektrowni” może być mała instalacja w Fusinie (Włochy) o mocy 12 MW (Gąsior, Kalęta, 2016).

Można również zastanowić się nad połączeniem wszystkich wymienionych powyżej koncepcji wykorzystania kavern magazynowych w obrębie jednego magazynu i stworzyć niejako hybrydowy magazyn energii wykorzystujący zarówno zalety energii sprężonego powietrza, energii gazu ziemnego i energii zmagazynowanej w wodrze. Tego typu magazyn byłby najbardziej pożądanym rozwiązaniem w dobie trwającej transformacji energetycznej celem bilansowania OZE (magazynowania energii elektrycznej).

6. PODSUMOWANIE

Na podstawie powyższego krótkiego przeglądu możliwości magazynowania energii pod różną postacią w kavernach solnych należy stwierdzić, że tego typu magazyny wydają się być najbardziej pożądanymi rozwiązaniami w dobie rosnącego zapotrzebowania na pojemności magazynowe dla energii elektrycznej produkowanej w OZE w czasie, kiedy nie jest możliwe jej bezpośrednie oddanie do sieci (brak popytu na dane ilości energii elektrycznej). Zdaniem autora najbardziej uniwersalnymi w najbliższych 20-30 latach będą instalacje hybrydowe umożliwiające wykorzystanie różnych nośników energii, gdyż w przypadku Polski nie jest możliwe bezpośrednie przejście z paliw kopalnych na źródła „zero emisyjne” z pominięciem stosunkowo długiego okresu przejściowego.

fed into the grid at the time of production. An additional advantage of this type of installation is the possibility of quick filling and emptying, allowing these storage facilities to be successfully used to compensate for electricity surpluses in the network and to replenish shortages relatively quickly. CAES salt caverns were already used in 1978 in Huntorf, Germany, as well as in McIntosh in the United States, and in 2012 a small CAES installation was launched in Gaines (Texas, USA), operating under near-isothermal conditions. Many years of failure-free operation of the above-mentioned installations have confirmed the technical feasibility of using salt caverns as peak energy storage facilities. Based on the analysis of salt deposits (Fig. 2) and wind speeds in Poland (Fig. 3), the most favourable conditions for the construction of CAES power plants occur in the area of the Łeba Elevation and the Bay of Puck. However, according to the author, in order to make the most effective use of the advantages of CAES installations, it would be best to connect them with a natural gas storage facility (Fig. 4), so that the storage potential of this medium could also be utilised. Therefore, potential locations for this type of storage in Poland are primarily sites adjacent to existing cavern underground gas storage facilities (KPMG Mogilno and KPMG Kosakowo).

In the case of hydrogen as an energy carrier, salt caverns have so far served as storage facilities for the chemical and petrochemical industries (in Teesside in the UK and in Texas in the United States: Clemens, Moss Bluff and Spindletop) (Fig. 5). Within the concept of using hydrogen as an energy carrier, it may be produced, for example, in an electrolyser during periods of surplus electricity generation from Renewable Energy Sources (RES), then stored in a cavern, and finally, when needed, used to generate electricity in fuel cells or through combustion (Fig. 6). An example of such a “power plant” is a small installation in Fusina (Italy) with a capacity of 12 MW. It is also possible to consider combining all the above-mentioned concepts of using storage caverns within a single facility and creating a hybrid energy storage system that utilises the advantages of compressed air energy, natural gas energy, and energy stored in hydrogen. This type of storage would be the most desirable solution in the era of ongoing energy transformation for balancing renewable energy sources (electricity storage).

An analysis of the possibilities of storing energy in various forms in salt caverns in Poland indicates that this type of storage will be among the most desirable solutions in the era of growing demand for storage capacity for electricity produced from renewable energy sources. According to the author, over the next 20–30 years the most universal solutions will be hybrid installations enabling the use of various energy carriers, because in the case of Poland it is not possible to directly transition from fossil fuels to “zero-emission” sources without a relatively long transition period.

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.*
- 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.*
- GAŚSIOR 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.*
- GHOORBANI B., ZENDEHBOUDI S., SAADY NMC., DUSSE-AULT MB., 2023. Hydrogen storage in North America: Status, prospects, and challenges. *J Environ Chem Eng.* 11(3), 109957.
- Strona internetowa: <https://www.brasit.pl/elektrownie-wiatrowe/wiatr-w-polsce/> Data wejścia: 17.06.2024r.
- Strona internetowa: <https://ipi.gasstoragepoland.pl/pl/menu/transparency-template/?page=uslugi-i-infrastruktura/parametry-techniczne/gim-kawerna/> Data wejścia: 17.06.2024r.
- Strona internetowa: <https://www.sssgears.co.uk/en/case-studies/huntorf/> Data wejścia: 17.06.2024r.