



Koncepcja magazynowania nadwyżek energii elektrycznej w postaci wodoru w kawernach w złożach soli kamiennej w Polsce – wstępne informacje

Conception of storage of electricity surplus in the form of hydrogen in rock salt caverns in Poland – preliminary information

Mariusz CHROMIK

Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych „CHEMKOP” Sp z o.o.
ul. J. Wybickiego 7, 31 - 261 Kraków; e-mail: m.chromik@chemkop.pl

STRESZCZENIE

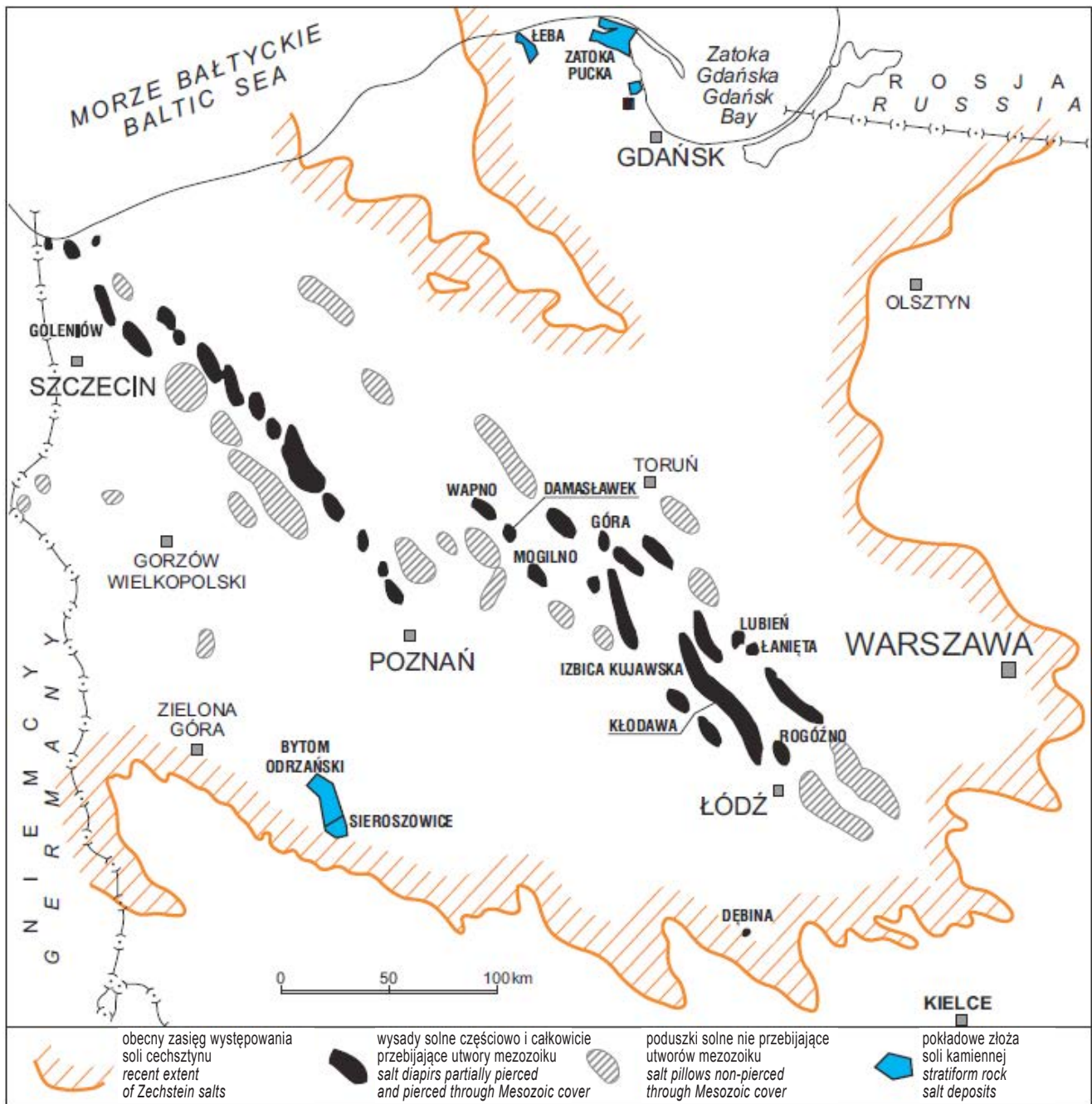
Koncepcja wykorzystania wodoru do magazynowania energii nie jest nowa. W Niemczech od wielu lat prowadzone są prace nad magazynowaniem wodoru w kawernach solnych, także w Polsce prowadzone są od niedawna prace w tej dziedzinie. Artykuł ten przybliżyć ma główne elementy tej koncepcji a także przedstawić krótko przeprowadzone do tej pory prace nad tą koncepcją w Polsce. Pierwsza część to krótkie scharakteryzowanie podstawowych elementów koncepcji tzn. możliwości pozyskiwania energii, opis złóż soli kamiennej w Polsce oraz schemat magazynowania energii w postaci wodoru. Energia elektryczna przeznaczona do magazynowania pochodziła by głównie z OZE lub nadwyżek energii z konwencjonalnych elektrowni. Jedynymi złożami soli kamiennej nadającymi się do tworzenia w nich podziemnych magazynów są te z formacji cechsztyńskiej. Magazynowanie energii elektrycznej w postaci wodoru polega na sprzężeniu w kawernie solnej wodoru, powstałego z procesu elektrolizy wody. W roku 2013 powstało konsorcjum składające się z Grupy LOTOS (lider), Gaz-Systemu, AGH, CHEMKOP-u, Politechniki Śląskiej i Politechniki Warszawskiej. Konsorcjum to otrzymało w ramach programu GEKON prowadzonego przez NCBiR dofinansowanie prac badawczych i w roku 2015 rozpoczęło prace nad projektem HESTOR „Magazynowanie energii w postaci wodoru w kawernach solnych”. W ramach projektu zostały przeanalizowane różne lokalizacje w których mogłyby powstać kawerny solne magazynujące wodór. Dla najbardziej obiecujących lokalizacji zostały zapro-

jektowane odpowiednie kształty kawern oraz przeprowadzono obliczenia termodynamiczne. Krótkie podsumowanie tych prac przedstawione zostanie w tym artykule. Ostatnia część artykułu dotyczy korzyści jakie daje magazynowanie wodoru.

Słowa kluczowe: magazynowanie energii, wodór, kawerny solne, HESTOR, OZE

ABSTRACT

The concept of using hydrogen for storing energy is not new. In Germany, for many years, works on hydrogen storage in salt caverns have been proceeded, recently also in Poland such a work started. This article is to introduce the main elements of this concept and present a short description of work on this idea carried out up to now in Poland. The first part contains a brief characterization of the basic elements of the concept, i.e. the possibility of generating energy, the description of the salt rock deposits in Poland and the scheme of energy storage in the form of hydrogen. Electricity designed to store should come mainly from Renewable Energy Sources (RES) or from surplus of power from conventional power stations. The only deposits suitable for creating in them the underground storage are those of the Zechstein formation. Electricity will be stored in the salt cavern in the form of compressed hydrogen which will be obtained in the process of electrolysis of water. In 2013 a consortium containing LOTOS Group SA (leader), Gaz-System, AGH University of Science and Technology, CHEMKOP, Silesian University of Technology, and



Ryc. 2. Rozmieszczenie ważniejszych wysadowych struktur solnych i pokładowych złóż soli kamiennej w Polsce (Czapowski i Bukowski, 2009)

Fig. 2. Distribution of salt diapirs and stratiform rock salt deposits in Poland (Czapowski & Bukowski, 2009)

możliwej do wytworzenia energii elektrycznej pochodzącej z Odnawialnych Źródeł Energii (OZE). Magazynowanie takiej energii zapewni jej stały dopływ, nawet podczas braku produkcji przez wiatraki czy kolektory słoneczne, pozytywnie wpłynie na środowisko, zmniejszy udział konwencjonalnych źródeł wytwarzania energii elektrycznej.

Założenie to osiągnięte będzie poprzez zmagazynowanie niewykorzystanej energii. Do osiągnięcia tego celu posłużą wodór wyprodukowany z nadwyżki energii elektrycznej w procesie elektrolizy wody i zatłoczony w kawerny solne. Wodór z kawerny przesłany bezpośrednio do elektrowni

gazowej zostanie w niej zamieniony na energię elektryczną w okresach, kiedy źródła OZE nie będą dostarczały dostatecznej ilości energii lub kiedy energia nie będzie w ogóle produkowana (brak wiatru, słońca).

Pomysł wykorzystania wodoru do magazynowania energii nie jest nowy. W Niemczech od wielu lat prowadzone są prace nad magazynowaniem wodoru w kawernach solnych, także w Polsce prowadzone są prace w tej dziedzinie. Pomysły te dotyczą jednak wykorzystania dużych pojemności magazynowych. W sprzyjających uwarunkowaniach istnieje jednakże możliwość lokalnego wykorzystania wspomnianej koncepcji.

ENERGIA ELEKTRYCZNA Z OZE

W Polsce energia elektryczna produkowana jest głównie z węgla. W obecnym przemyśle energetycznym stawia się jednak coraz bardziej na pozyskiwanie energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych takich jak siła wiatru, wody, energia słoneczna, biogaz i biomasa. W Polsce wg Głównego Urzędu Statystycznego (GUS) wskaźnik udziału energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto w 2014 r. wyniósł 11,45%. Wszystkie te źródła są w większości przyjazne środowisku, bo przy produkcji takiej energii nie są emitowane żadne gazy ani zanieczyszczenia, szczególnie tlenki węgla, siarki, azotu, pyły, itp.

Największymi problemami w wytwarzaniu energii ze źródeł odnawialnych jest brak ciągłości jej produkcji, a także marnowanie dużej ilości energii, która mogłaby być wyprodukowana, ale nie jest ze względu na chwilowy brak zapotrzebowania lub bardzo niskie zapotrzebowanie na nią. Zależy to głównie od tego czy jest to sezon zimowy czy letni, ale także pora dnia ma wpływ na ilość zużywanej energii, której wykorzystuje się mniej w nocy niż w dzień. W elektrowniach z OZE energia produkowana jest tylko gdy świeci słońce (elektrownie fotowoltaiczne) lub gdy wieje wiatr (turbiny wiatrowe), jednakże nie zawsze może ona być wykorzystana w tym czasie.

ZŁOŻA SOLI KAMIENNEJ W POLSCE

Sole kamienne w Polsce zajmują prawie 70% powierzchni kraju. Występują w dwóch formacjach salinarnych: neogeńskiej (mioceńskiej) i górnopermskiej (cechsztyńskiej) (Ryc.1. Czapowski & Bukowski, 2009).

Cechsztyńską formację solonośną tworzą 4 kompleksy ewaporatowe tj. kolejne cyklotemy cechsztynu od PZ1 do PZ4. Występują one na głębokości od kilkuset metrów w Polsce Północnej do 7 km w środkowej części Niżu Polskiego. Utwory solne w centralnej Polsce to przede wszystkim: wysady, kopuły, słupy, poduszki i grzebienie solne, natomiast w Polsce północnej i na monoklinie przedsudeckiej sól zalega w postaci pokładów (Czapowski i Bukowski, 2009; Czapowski, i in., 2008a).

Złoża pokładowe serii cechsztyńskiej charakteryzują się prostą budową, bez istotnego zaangażowania tektonicznego o dość jednorodnym składzie mineralnym i wykształceniu. Największe złoża pokładowe, których miąższość zbliża się do 300 m występują na Monoklinie Przedsudeckiej oraz w Północnej Polsce, o miąższości większej od 220 m (Czapowski & Bukowski, 2009; Dadlez, i in., 1995).

Wysadowe złoża soli cechsztyńskiej występują w środkowej Polsce - udokumentowano dotychczas dziewięć wysadów solnych (Ryc. 1, 2). Wysady te cechują się bardzo skomplikowaną budową wewnętrzną, która wynika z dużej zmienności litologicznej utworów i złożonej tektoniki (Czapowski i Bukowski, 2009; Burliga, 1997).

W mioceńskiej formacji solonośnej udokumentowano 7 złóż soli kamiennej z czego tylko trzy są ujęte w rejestrze zasobów, natomiast na pozostałych 4 złożach zakończono eksploatację (Ryc. 1). Wyeksploatowane złoża takie jak Wieliczka i Bochnia udostępniane są jako obiekty turystyczno-muzealne.

Dwa mioceńskie złoża soli kamiennej ujęte w rejestrze zasobów (Wojnicz i Siedlec-Moszczenica) reprezentują typ pokładowo-fałdowy, natomiast złożo Rybnik-Żory-Orzesze jest typowym złożem pokładowym. Wszystkie te złoża charakteryzują się skomplikowaną budową geologiczną, zmienną miąższością, wykształceniem i głębokością zalegania a także dużym zagrożeniem wodnym i gazowym. (Czapowski i Bukowski, 2009).

Obecnie eksploatowane i mające znaczenie ekonomiczne w Polsce są tylko złoża formacji cechsztyńskiej. Eksploatowane są trzy złoża wysadowe (Góra, Mogilno, Kłodawa) oraz jedno pokładowe (Bądzów).

Z wymienionych powyżej złóż pozyskiwana jest sól kamienna metodą otworową (ługowniczą) z wysadów Góra i Mogilno, natomiast na pozostałych dwóch złożach eksploatacja odbywa się metodami górnictwymi.

Obecnie większe znaczenie dla gospodarki krajowej ma wykorzystanie złóż soli kamiennej jako obiektów geologicznych do budowy podziemnych magazynów węglowodorów (ropa naftowa, gaz ziemny, paliwa) (Kunzman, i in., 2002).

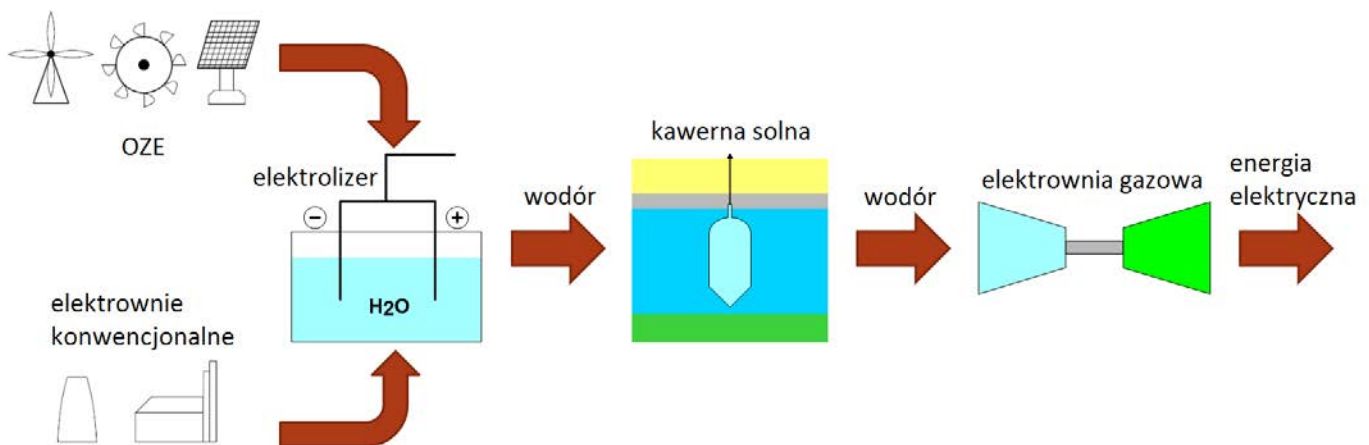
Aktualnie w Polsce działają trzy podziemne magazyny w strukturach solnych. Najstarszy jest zlokalizowany na wysadzie Mogilno i służy do magazynowania gazu ziemnego. Następny magazyn znajduje się na wysadzie Góra (koło Inowrocławia), gdzie magazynowane są paliwa i ropa naftowa. Natomiast najmłodszym magazynem jest podziemny magazyn gazu ziemnego w Kosakowie (koło Gdyni), który w przeciwieństwie do dwóch pozostałych powstał w złożu pokładowym.

Trwają prace nad wykorzystaniem kolejnych złóż soli kamiennej zarówno pokładowych jak i wysadowych, nie tylko do magazynowania węglowodorów, ale także do składowania odpadów albo magazynowania energii w postaci wodoru.

MAGAZYNOWANIE ENERGII

Wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną jaki jest przewidywany w najbliższych dekadach można pokryć poprzez budowę nowych elektrowni lub modernizację obecnych. Drugą drogą jest magazynowanie energii, dzięki któremu ilość niewykorzystanej energii znacznie zmalałaby, a jednocześnie mogłaby być ona wykorzystana do pokrycia niedoborów energii w czasie zwiększonego zapotrzebowania.

Obecnie na świecie na szeroką skalę prowadzone są prace umożliwiające magazynowanie energii elektrycznej. W skali przemysłowej jedynym z istniejącym dotąd rozwiązań jest magazynowanie poprzez sprężone powietrze. Instalacje takie



Ryc. 3. Schemat koncepcji magazynowania wodoru w kawernie w złożu soli kamiennej

Fig. 3. Schema conception of storage hydrogen in rock salt caverns

znajdują się w Niemczech (HUNTORF) oraz w USA (MCINTOSH). Obie te instalacje bazują na wykorzystaniu nadmiarowej energii do sprężania powietrza w kawernach solnych.

Dużo lepszy do magazynowania w kawernach od powietrza jest wodór, posiadający dużo większą od niego gęstość magazynowania energii. Sam wodór magazynowany jest w kilku kawernach solnych na świecie (USA i Wielka Brytania), ale na razie tylko do wykorzystania w przemyśle. Prace nad wykorzystaniem wodoru do magazynowania energii prowadzone są od lat w Niemczech, a także ostatnio w Polsce.

Magazynowanie energii elektrycznej w postaci wodoru polega na sprężeniu w kawernie solnej wodoru, powstałego z procesu elektrolizy wody. W procesie elektrolizy wody niezbędna jest energia elektryczna, która pochodziłaby głównie z niewykorzystanej produkcji z OZE, a także z nadwyżek wyprodukowanej energii w innych typach elektrowni. Wodór z kawerny byłby spalany w elektrowni gazowej w celu uzyskania energii elektrycznej (Ryc. 1). Sprawność całego procesu określana jest na 40-60%.

POLSKIE PRACE NAD MAGAZYNOWANIEM WODORU W KAWERNACH SOLNYCH

Nad technologią umożliwiającą magazynowanie wodoru w celach energetycznych w Polsce pierwsze prace wykonane były w Ośrodku Badawczo - Rozwojowym Górnictwa Surowców Chemicznych „CHEMKOP” Sp. z o.o. w Krakowie. Jest to jedyny w Polsce ośrodek badawczy specjalizujący się w pracach badawczych, projektowych i wdrożeniowych dla górnictwa solnego i budowy podziemnych magazynów w złożach soli.

Udział w konferencjach SMRI (Solution Mining Research Institute) i przedstawiane na nich doświadczenia niemieckie w magazynowaniu wodoru zainspirowały pracowników CHEMKOP-u do rozpoczęcia prac nad wykorzystaniem polskich złóż soli kamiennej do magazynowania wodoru. Ośrodek nawiązał współpracę z AGH w Krakowie, dzięki czemu

możliwe było powołanie konsorcjum, na którego czele stała Grupa LOTOS i otrzymanie dofinansowania z NCBiR w Programie GEKON.

W roku 2015, konsorcjum rozpoczęło prace nad projektem HESTOR „Magazynowanie energii w postaci wodoru w kawernach solnych”. Konsorcjum składa się z Grupy LOTOS (lider), Gaz-Systemu, AGH, CHEMKOP-u, Politechniki Śląskiej i Politechniki Warszawskiej. Zakończenie prac w projekcie planowane jest w 2017 roku.

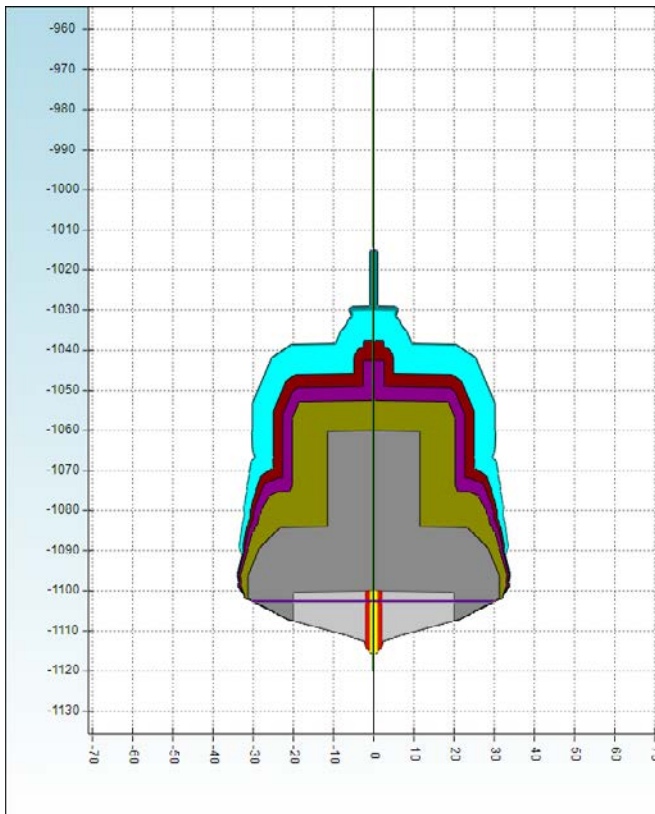
W ramach wspomnianego projektu HESTOR w CHEMKOP-ie określono możliwości lokalizacji kawern magazynujących wodór na terenie Polski. Przeprowadzono geologiczną analizę złóż nadających się pod taką inwestycję a także analizę lokalizacji i otoczenia tych złóż pod kątem potrzeb potencjalnych użytkowników kawern wodorowych.

Generalnie, z wielu rozpatrzonych lokalizacji wybrano 9 potencjalnych możliwości lokowania kawern wodorowych na złożach soli - z czego 6 w złożach pokładowych w rejonie Północnej Polski oraz 3 na wysadach solnych.

Spośród tych potencjalnych możliwości lokowania kawern wodorowych na złożach soli w Polsce, wybrano cztery lokalizacje, które wydają się być najbardziej obiecujące lub charakterystyczne.

Dla każdej wybranej lokalizacji wykonano komputerowym modelem procesu ługowania WinUbro szereg symulacji różnych wariantów technologii ługowania kawern magazynujących na wodór, zmierzając do wyboru najodpowiedniejszej technologii ługowania tych kawern.

W celu wykorzystania zmagazynowanego w kawernie solnej wodoru do produkcji energii elektrycznej, objętość geometryczna kawerny powinna być jak największa. Duża objętość bowiem nie tylko pozwoli zmagazynować więcej energii, ale także pozwoli na większą jej produkcję, ze względu na możliwość stosowania większych wydajności odbioru wodoru z kawerny.



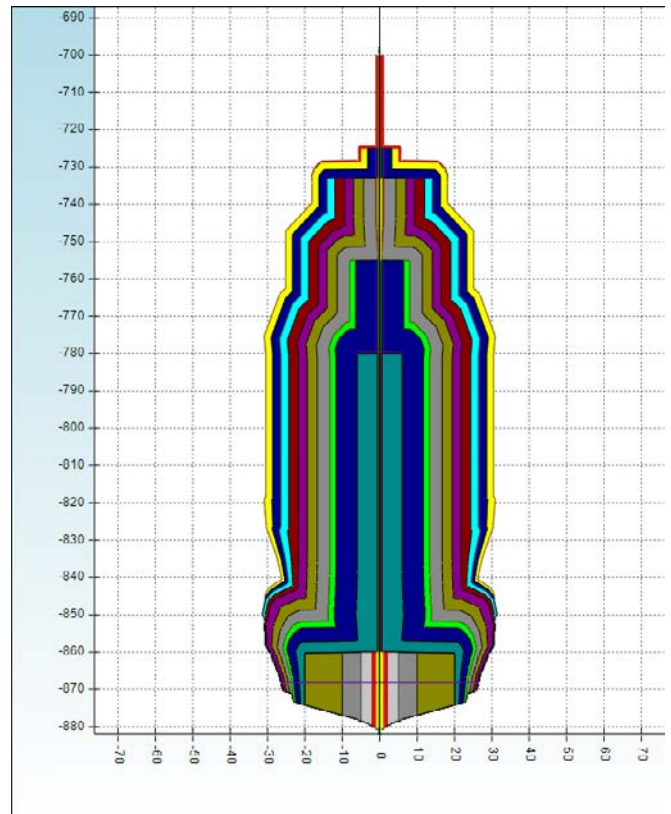
Ryc. 4. Kształt kawerny o objętości geometrycznej 190 tys. m³
 Fig. 4. Cavern shape of geometric volume 190 th. m³

Największe możliwe do wyługowania kawerny w danej lokalizacji, będą mogły mieć objętość geometryczną od 190 tys. m³ do 350 tys. m³, mieszcząc od 2 tys. ton do 3 tys. ton wodoru w kawernie. Na ryc. 4 i ryc. 5 przedstawione są kształty kawern dla dwóch skrajnych objętości geometrycznych kawern. W pierwszym przypadku jest to najmniejsza z maksymalnych możliwych do wykonania kawern do celów energetycznych z wszystkich lokalizacji, natomiast w drugim przypadku - największa kawerna maksymalna. Oczywiście w obu wypadkach można wyługować w danej lokalizacji kawerny mniejsze, gdyby zachodziła akurat taka potrzeba.

Pobierając z kawerny wodór dla celów energetycznych, w zależności od lokalizacji można by wyprodukować w godzinach szczytu od 33 GWh do 43 GWh energii elektrycznej z jednej pełnej kawerny.

W ramach projektu HESTOR zostały także wykonane obliczenia geomechaniczne i termodynamiczne dla wybranych kawern z każdej lokalizacji. Przy obliczeniach tych posłużono się różnymi scenariuszami pracy kawern, a jeden z nich uzależniony był od ilości produkowanej energii elektrycznej z energetyki wiatrowej.

Trwają dalsze prace nad optymalizacją pracy magazynu składającego się na razie z jednej kawerny wodorowej. Przeprowadzana jest także analiza ekonomiczna wykorzystania wodoru magazynowanego w kawernach nie tylko do celów energetycznych, ale też rafineryjnych oraz w transporcie.



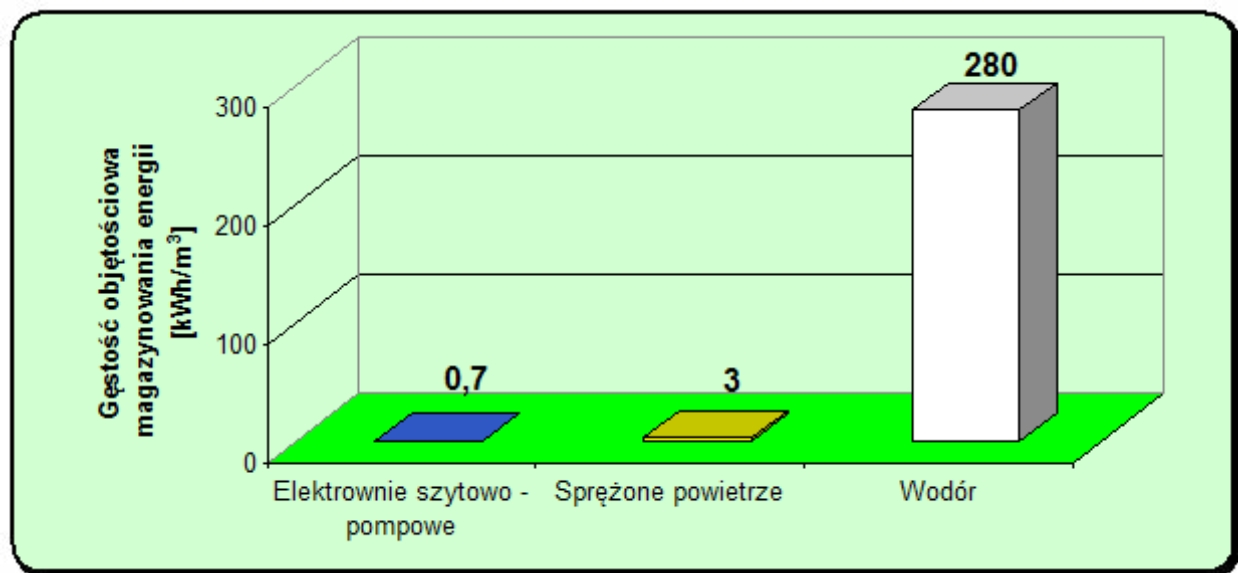
Ryc. 5. Kształt kawerny o objętości geometrycznej 350 tys. m³
 Fig. 5. Cavern shape of geometric volume 350 th. m³

KORZYŚCI Z MAGAZYNOWANIA WODORU

Za wykorzystaniem kawern solnych do magazynowania energii przemawia przede wszystkim ich duża elastyczność (wysokie wydatki zatłaczania i wytłaczania, wielocyklowość), mały wpływ na środowisko, stosunkowo małe koszty budowy i obsługi, a także wysoka gęstość objętościowa magazynowania energii w przypadku wodoru. Wynosi ona ok. 280 kWh/m³ objętości magazynowej kawerny dla wodoru (Ryc. 6) i tylko 3 kWh/m³ dla magazynowania powietrza (Kepplinger, i in., 3–4 October 2011).

W wodnych elektrowniach szczytowo-pompowych, które obecnie są także wykorzystywane w celu magazynowania energii, gęstość ta jest rzędu 0,7 kWh/m³ objętości zbiornika wodnego. Koszty budowy takiego obiektu są bardzo wysokie, a wpływ na środowisko w polskich uwarunkowaniach jest raczej negatywny. (Kepplinger, i in., 3–4 October 2011)

Alternatywą dla elektrowni typu CAES (Compressed Air Energy Storage) byłaby elektrownia wykorzystująca zamiast sprężonego powietrza sprężony wodór, gdzie jak już wcześniej wspomniano gęstość magazynowania energii w kawernie solnej w postaci wodoru jest niewspółmiernie wyższa niż powietrza. Poza tym kawerny na sprężone powietrze mogą być tworzone tylko w niewielkim przedziale głębokości (500 – 1300 m) (Kepplinger, i in., 3–4 October 2011). Taki przedział głębokości wynika głównie z faktu, że wydajności dla sprężonego powietrza są wysokie, co powoduje, że otwór ma



Ryc. 6. Porównanie gęstości objętościowej magazynowania energii elektrycznej

Fig. 6. Comparison of volume density the electrical energy storage

specyficzną konstrukcją tzn. rury eksploatacyjne mają bardzo duże średnice. Tym samym koszty wykonania otworu są bardzo wysokie dla dużych głębokości. Natomiast dla wodoru przedział mógłby być o wiele większy. Zwiększa to potencjalnie ilość możliwych regionów do budowy takich magazynów.

Ilość energii elektrycznej jaką można zmagazynować w kawernie wodorowej o objętości 90 tys. m³ odpowiada ilości energii jaką magazynowało by 7 elektrowni szczytowo-pompowych, wielkości elektrowni na zaporze wodnej w Solinie (1,3 GWh). Powierzchnia terenu jaką zajmowałaby taka kawerna jest 280 razy mniejsza od zbiornika wodnego (22 km²) przy wspomnianej wcześniej elektrowni (Chromik, 2015).

Powstanie podziemnych kawern magazynujących nadwyżkową energię w postaci wodoru pozwoliłoby także na:

- zmagazynowanie nadwyżek energii i jej późniejszy odzysk w sposób ekologiczny – bez dodatkowej emisji, gdyż wodór jest najczystszy nośnikiem energii;
- lepsze techniczne i ekonomiczne wykorzystanie okresowych nadwyżek mocy klasycznych elektrowni i elektrociepłowni i związany z tym realny spadek emisji CO₂;
- prostsze włączanie w system energetyczny dużych farm wiatrowych i fotowoltaicznych, ograniczenie potencjalnych problemów z dużym udziałem OZE w bilansie energetycznym kraju;
- ograniczenie spalania konwencjonalnych paliw kopalnych;
- wykorzystanie zmagazynowanego wodoru w przemyśle petrochemicznym;
- możliwość dodawania wodoru do gazu ziemnego w sieci dystrybucyjnej tego gazu;
- umożliwienie rozwoju ogniw paliwowych (wodór) w motoryzacji, spadek emisji spalin;

PODSUMOWANIE

Wspomniana koncepcja wykorzystania wodoru do magazynowania energii elektrycznej skierowana jest nie tylko dla dużych firm energetycznych, które mogą sobie pozwolić na budowę dużych magazynów z kilkoma kawernami solnymi, ale także do mniejszych firm, które chciałyby lokalnie wykorzystywać tę technologię, gdyż już jedna niewielka kawerna jest w stanie zaspokoić potrzeby lokalne.

Z ekonomicznego punktu widzenia kawerny solne do magazynowania wodoru powinny powstawać przy istniejących lub planowanych magazynach węglowodorów w złożach soli kamiennej. Drugą możliwością jest powstanie kawern przy budowie farm wiatrowych lub fotowoltaicznych. Taka kawerna przy instalacjach OZE idealnie służyłaby do wyrównywania nierównomierności produkcji dziennej energii, jak i pozwalałaby na 100% wykorzystanie nadwyżek energii generowanej przez te elektrownie.

Jak wynika z przeprowadzonych prac w projekcie HESTOR najlepszymi lokalizacjami do budowy kawern na wodór jest obszar północnej Polski. W rejonie tym zalega pokład soli kamiennej cechsztyńskiej formacji solonośnej, w którym udokumentowano kilka złóż soli kamiennej (m.in. Mechelinki, Łeba). W pokładzie tym można wyznaczyć wiele lokalizacji, w których możliwe było by wyługowanie kawern solnych. Takie lokalizacje zostały przeanalizowane w projekcie HESTOR jak również w wcześniejszym artykule autora (Chromik, 2015).

Polska jest więc krajem o ogromnym potencjale, jeżeli chodzi o możliwości magazynowania energii elektrycznej. Jak wynika z prac wykonanych przez konsorcjum w projekcie HESTOR największa objętość geometryczna kawerny to 350 tys. m³, w której można zmagazynować ok. 3 tys. m³ wo-

doru, tj. ok 43 GWh energii elektrycznej co odpowiada energii, którą może zmagazynować ok. 33 typowych elektrowni szczytowo-pompowych występujących w Polsce.

LITERATURA / REFERENCES

- BURLIGA S., 1997. *Ewolucja wysadu solnego Kłodawy*. Uniejów, 23-25.10.1997, WIND.
- CHROMIK M., 2015. Możliwości magazynowania energii elektrycznej w soli kamiennej w postaci wodoru w regionie nadbałtyckim. *Przegląd Solny*, Tom 11, pp. 44-50.
- CZAPOWSKI G. i BUKOWSKI K., 2009. Złóża soli w Polsce - stan aktualny i perspektywy zagospodarowania. *Przegląd Geologiczny*, 57(9), pp. 798-811.
- CZAPOWSKI G., Bukowski K. i Gientka M., 2008a. Aktualny stan rozpoznania geologicznego złóż soli kamiennej w Polsce. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, Tom 429, pp. 27-36.
- DADLEZ R. i inni, 1995. Atlas geologiczny południowego Bałtyku. *Państwowy Instytut Geologiczny*.
- KEPPLINGER J., CROTOGINO F. i DONADEI S., 3-4 October 2011. *Present Trends in Compressed Air Energy and Hydrogen Storage in Germany*. York, United Kingdom, SMRI Fall 2011 Technical Conference.
- KUNSTMAN A., POBORSKA-MŁYNARSKA K. i URBAŃCZYK K., 2002. *Zarys otworowego ługownictwa solnego*. Kraków: Wydawnictwa AGH.