

Wybrane aspekty podziemnego magazynowania wodoru

Radosław Tarkowski¹



Some aspects of underground hydrogen storage. *Prz. Geol.*, 65: 282–291.

A b s t r a c t. The article describes the subject of underground hydrogen storage in the context of energy storage using hydrogen as a carrier, and shows its role in the Polish energy policy. The review of the most recent papers was performed to provide the information about hydrogen properties and options for underground hydrogen storage (salt caverns, depleted hydrocarbons fields, deep aquifers) in Poland. Analysis of the literature indicates small practical experiences in the underground hydrogen storage. The behaviour of underground-stored hydrogen is more complex than expected. Previous results indicate that this option may in future become the preferred solution for storing excess electricity related to the irregular supply from renewable sources. Geological formations can provide the possibility of storing energy on a medium- and long-term time scale. Knowledge of the underground storage of carbon dioxide and other gases will be useful for searching of sites for underground storage of this gas. Due to the planned increasing share of renewable energy in electricity production in Poland, the issue of underground hydrogen storage will become increasingly relevant.

Keywords: underground hydrogen storage, renewable energy, Polish energy policy, geologic structures, salt caverns, depleted hydrocarbons fields, deep aquifers

Z geologicznego punktu widzenia podziemna przestrzeń nadaje się do wykorzystania w celu zmagazynowania energii w postaci wodoru, wyprodukowanej w okresach nadwyżek zapotrzebowania oraz uwalniania jej do sieci w godzinach szczytu, wtedy gdy jest ona bardziej wartościowa. Rozważa się różne opcje podziemnego magazynowania wodoru. Można w tym celu wykorzystywać struktury geologiczne, takie jak: kawerny solne, szczypane złoża węglowodorów, czy też głębokie poziomy wodonośne. Magazynowanie wodoru w kawernach solnych jest już dzisiaj technicznie wykonalne. Pozwala na przechowywanie tego nośnika energii przez tygodnie czy miesiące. Nie różni się znacząco od podziemnego magazynowania gazu ziemnego czy też podziemnego składowania dwutlenku węgla.

Celem prezentowanego artykułu jest zapoznanie polskiego czytelnika z problematyką podziemnego składowania wodoru w kontekście magazynowania energii, której nośnikiem jest wodór. W celu pokazania wzrastającego zainteresowania tym zagadnieniem, mającego również odzwierciedlenie w założeniach polityki energetycznej Polski, oraz złożoności tejże problematyki, dokonano przeglądu najnowszych literatury w tym zakresie. Scharakteryzowano opcje oraz przedstawiono właściwości wodoru w aspekcie podziemnego magazynowania. Zwrócono uwagę na możliwości podziemnego składowania wodoru w Polsce.

PODZIEMNE MAGAZYNOWANIE ENERGII

Podziemne magazynowanie energii w postaci ciepła, sprężonego powietrza czy wodoru (np. elektrownie szczytowo-pompowe), magazynowanie sprężonego powietrza (*Compressed Air Energy Storage* – CAES), magazynowanie energii cieplnej (*Underground Thermal Energy Storage* – UTES, *Aquifer Thermal Energy Storage* – ATEs, *Borehole Thermal Energy Storage* – BTES) oraz podziemne magazynowanie wodoru (*Hydrogen Underground Storage* – HUS), pozwala na jej przechowywanie w zróżnicowanej ilości na godziny, tygodnie czy nawet miesiące. Jest ono

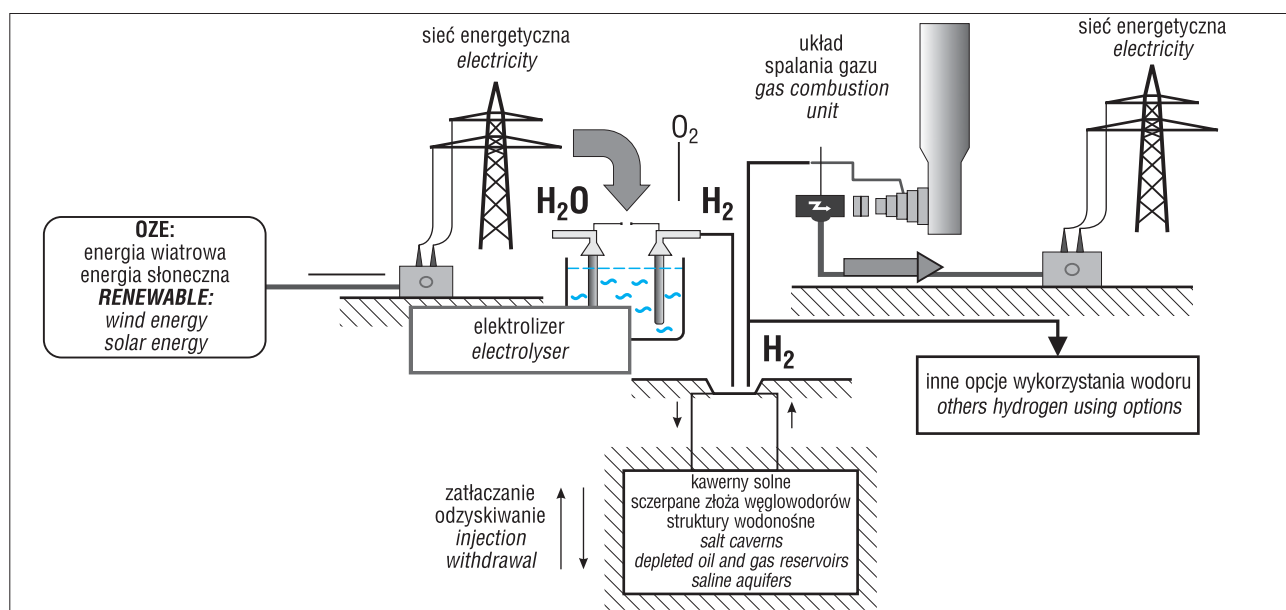
dzisiaj uznawane za kluczowy element nowoczesnego łańcucha dostaw energii. Przyczynia się do zwiększenia stabilności sieci energetycznych, zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii (OZE), poprawy wydajności systemów energetycznych, ochrony kopalnych źródeł energii, zmniejszenia wpływu produkcji energii na środowisko (por.: Mokrzycki, 2011; Jacquelin & Bader, 2013; Mirowski i in., 2015; Delmastro i in., 2016; Miecznik, 2016; Sgobbi i in., 2016; Zhang i in., 2016).

Zwiększający się udział energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych (jej udział w miksie energetycznym takich krajów jak Niemcy czy Dania jest już dzisiaj znaczący) stawia wyzwanie jej integracji do systemu energetycznego. W tym znaczeniu wodór może stanowić jeden ze sposobów, który może to ułatwić. Może być elastycznym rozwiązaniem pozwalającym na implementację wahających się dostaw energii elektrycznej pochodzącej z OZE do systemu energetycznego. Wodór, jako konwertowalny na energię elektryczną lub ciepło, może stać się wydajnym nośnikiem energii zdolnym do jej transportu i magazynowania.

Podziemne magazynowanie wodoru stanowi element cyklu energetycznego: produkcja energii → konwersja do wodoru → magazynowanie wodoru → rekonwersja wodoru na inne rodzaje energii → zużycie energii (ryc. 1). Główne cele wykorzystania tego rozwiązania to: regulowanie podaży i popytu na energię w przypadkach, w których ilość wytwarzanej energii przekracza potrzeby konsumentów, regulowanie cen energii oraz oferowanie różnym działom przemysłu, np. rafineriom itp., natychmiastowej rezerwy wodoru (Panfilov, 2016). Struktury geologiczne mogą zapewnić tę możliwość i to dla różnej skali czasowej (średnio- i długoterminowej), są jedynym sposobem na przechowywanie tak dużych ilości wodoru. Ponadto zapewniają bezpieczeństwo jego magazynowania w związku z brakiem kontaktu z tlenem atmosferycznym.

Zainteresowanie podziemnym magazynowaniem wodoru wzrosło znacząco w latach 2011–2012, na co w szczególności miały wpływ decyzje polityczne Komisji Europejskiej, mające na celu zmniejszenie zużycia energii, redukcję

¹ Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, ul. Wybickiego 7, 31-261 Kraków; tarkowski@min-pan.krakow.pl.



Ryc. 1. Idea podziemnego magazynowania wodoru w strukturach geologicznych (na podstawie Ozarslana, 2012, ze zmianami autora)
Fig. 1. Scheme of an energy system with a hydrogen underground storage facility (based on Ozarslan, 2012 with author's adjustments)

emisji CO₂ oraz zwiększenie udziału OZE we wszystkich rodzajach produkcji energii do roku 2020 oraz w kolejnych latach. W ramach tej polityki wódór przyciąga szczególną uwagę jako ekologiczny nośnik energii, który nie emituje CO₂ w cyklach jego konwersji do i z energii elektrycznej. Podkreślić należy, że magazynowanie nadmiaru energii elektrycznej samo w sobie nie jest jeszcze uzasadnieniem budowy podziemnych magazynów wodoru. Ten rodzaj przechowywania powinien umożliwić różne komercyjne sposoby jego wykorzystania również w przemyśle i transporcie (Assesment..., 2014; Audigane i in., 2014; Bai i in., 2014; Lord i in., 2014; Bünger i in., 2016; Panfilov, 2016).

Konkurencyjność podziemnego magazynowania wodoru w celu przechowywania energii będzie w dużym stopniu zależała od: pomyslnego wdrażania polityki niskiej emisji CO₂ dla nośników energii w innych sektorach gospodarki, wzrostu cen certyfikatów na emisję CO₂, obniżenia kosztów procesu elektrolizy wody dominującej w całkowitych kosztach produkcji oraz w podziemnym magazynowaniu wodoru, konkurencyjności ekonomicznej z węglem, gazem ziemnym i innymi nośnikami energii, rozwoju technologii wodorowych w transporcie, czy też wykorzystania synergii pomiędzy różnymi sektorami energetycznymi. W okresie kilkunastu i więcej lat, należy oczekiwać komercyjnie zintegrowanej elektrolizy połączonej z podziemnym magazynowaniem wodoru. Korzystna polityka wsparcia ze strony państwa może przyczynić się do wzrostu konkurencyjności rozważanej opcji w zestawieniu z węglem kamiennym (szczególnie w Polsce), gazem ziemnym czy innymi nośnikami energii (Assesment..., 2014; Sgobbi i in., 2016; Zhang i in., 2016).

ZAŁOŻENIA POLITYKI ENERGETYCZNEJ POLSKI A PODZIEMNE MAGAZYNOWANIE WODORU

Zgodnie z projektem dokumentu „Polityka energetyczna Polski do 2030 r.” (Ocena realizacji..., 2015) jednym z priorytetowych kierunków polskiej polityki energetycznej jest wzrost bezpieczeństwa dostaw paliw i energii. Główne cele i kierunki zawarte w tym dokumencie odnoszą

się pośrednio do magazynowania wodoru i dotyczą: poprawy efektywności energetycznej, rozwoju wykorzystania OZE, ograniczenia oddziaływania energetyki na środowisko. W sferze wzrostu bezpieczeństwa dostaw paliw i energii znajdują się działania mające na celu rozbudowę oraz budowę magazynów na ropę naftową i paliwa płynne w kawernach solnych. Mogą one służyć również do magazynowania wodoru. Planuje się w tym celu stworzenie odpowiednich regulacji ustawowych, eliminujących istniejące w tym zakresie bariery.

Z raportu dotyczącego polityki energetycznej Polski do 2050 r. przygotowanego przez Ministerstwo Gospodarki (Wnioski z analiz..., 2015) wynika, że polityka energetyczna będzie zmierzać do konieczności inwestycji w źródła mniej emisyjne. Wysokie ceny uprawnień do emisji CO₂ zadecydują o opłacalności wymiany bloków węglowych na nowe o wysokiej sprawności, skali/wzroście udziału gazu ziemnego oraz odnawialnych źródeł energii. Rola OZE będzie uzależniona od osiągnięcia przez te źródła energii ekonomicznej konkurencyjności w porównaniu z innymi technologiami wytwarzania energii. Prognozy wykazują, że zróżnicowane technologie produkcji energii ze źródeł odnawialnych osiągną razem w 2050 r. udział zbliżony do energetyki węglowej. To wszystko wskazuje na przewidywany wzrost zainteresowania wodorem jako nośnikiem energii i możliwością jego magazynowania na dużą skalę w podziemnych strukturach geologicznych.

Zwiększający się udział w miksie energetycznym naszego kraju (obecny w prognozach do 2030 i do 2050 r.) odnawialnych źródeł energii skłania do podjęcia prac nad rozpoznaniem struktur geologicznych kraju do podziemnego magazynowania wodoru. W kilkunastoletniej perspektywie, po przetestowaniu instalacji demonstracyjnych, ich wyniki mogą zostać wykorzystane na skalę przemysłową.

WODÓR JAKO NOŚNIK ENERGII

Wódór jest atrakcyjnym przekładnikiem energii, wolnym od zanieczyszczeń, o dużej entalpii spalania, charakteryzuje się możliwością elastycznego i efektywnego przekształcania energii. Technologia jego produkcji jest dobrze rozwinięta,

ciągle udoskonalana i ma zaletę praktycznie nieograniczonej dostępności do jego podstawowego surowca. Zainteresowanie wykorzystaniem wodoru jako uniwersalnego nośnika magazynowania energii w ostatnich latach stale wzrasta. Wodór cechuje się również licznymi opcjami magazynowania energii, dobrze nadaje się do równoważenia nieciągłych dostaw pochodzących z OZE. Znajduje on zastosowanie jako paliwo w transporcie, czy w przemyśle (Kijewski, 2005; Tomczyk, 2009; Kochański i in., 2013).

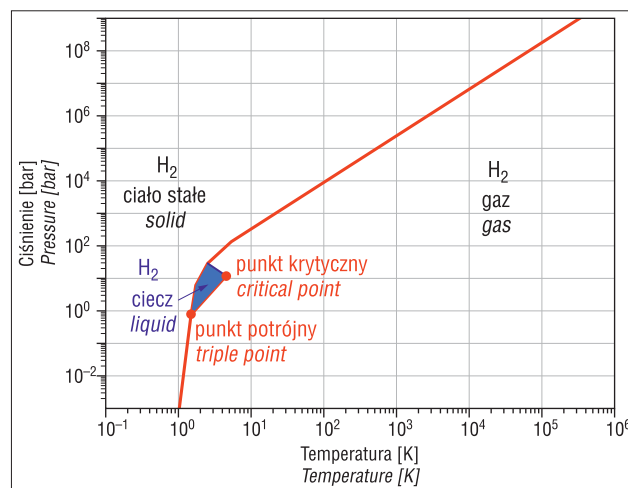
Tematyka energetycznego wykorzystania wodoru staje się kluczowa dla przyszłości energetycznej świata. Obecnie jest ona przedmiotem intensywnych badań i znacznych nakładów finansowych w licznych wysoko rozwiniętych krajach. Zainteresowanie wodorem jako nośnikiem energii wynika z jego szczególnie korzystnych cech: reagując z tlenem, wodór uwalnia znaczną ilość energii, a jedynym produktem reakcji jest woda (nie są uwalniane żadne zanieczyszczenia do środowiska), wykazuje predyspozycje do bezpośredniego przetwarzania energii w reakcji z tlenem na energię elektryczną w ogniach paliwowych, istnieją też potencjalne możliwości wytwarzania wodoru metodami bezemisyjnymi i niskoemisyjnymi (Molenda, 2008).

Problematyka wykorzystania wodoru jako nośnika energii (energetyka wodorowa), w tym: przegląd jego źródeł surowcowych, technologie produkcji, wykorzystanie zgazowania węgla do produkcji wodoru, magazynowanie i transport, szanse i bariery rozwoju energetyki wodorowej, jest w Polsce dobrze rozpoznana (Kijewski, 2005; Sobieściak-Jeczeń & Skonieczny, 2005; Marzec, 2007; Zarębska & Pernak-Miśko, 2007; Tomczyk, 2009; Kochański i in., 2013).

Prezentując tematykę podziemnego magazynowania wodoru, nie można pominąć jego szczególnych cech i właściwości. Procesy produkcji wodoru wymagają stosowania wysokich temperatur, a więc spalania surowców kopalnych, co jest związane z emisją dwutlenku węgla. We wszystkich procesach jego produkcji CO₂ jest podstawowym produktem ubocznym. Dlatego też wytwarzanie wodoru należałoby skojarzyć z sekwestracją dwutlenku węgla (CCS). Bez tego nie może być mowy o tym, że stosowanie wodoru jako paliwa przyczyni się znacząco do obniżenia emisji dwutlenku węgla do atmosfery.

Wodór może występować w różnych postaciach, w zależności od temperatury i ciśnienia (ryc. 2). Ponieważ cząsteczka wodoru jest najmniejszą spośród znanych cząsteczek chemicznych, gazowy wodór charakteryzuje się również znacznie większą przenikalnością. Molekuły wodoru mają zdolność dyfundowania przez materiały porowate, gumę, a w podwyższonych temperaturach nawet przez stal. W ciałach stałych dyfunduje on kilka razy szybciej niż na przykład metan (tab. 1). W przypadku kontaktu wodoru ze skałami, problemem mogą okazać się reakcje mineralne, a wzrost ciśnienia (obecny na większych głębokościach) może powodować ich znaczne przyspieszenie (Truche i in., 2010).

Należy podkreślić, że rozpuszczalność wodoru w wodzie jest bardzo niska. W temperaturze 25°C tylko 0,00002 (ułamek molowy H₂) rozpuszcza się w wodzie przy ciśnieniu 10 barów i 0,00018 przy 100 barach. Dla porównania, rozpuszczalność CO₂ w tych samych warunkach jest ok. 300–400 razy wyższa. Współczynnik dyfuzji wodoru wynosi 5×10^{-9} m²/s w czystej wodzie i 3×10^{-11} m²/s w skałach ilastych nasyconych wodą w temperaturze 25°C (Panfilov, 2016).



Ryc. 2. Diagram fazowy wodoru (na podstawie Züttela, 2004)
Fig. 2. Hydrogen phase diagram (based on Züttel, 2004)

Tab. 1. Porównanie fizykochemicznych właściwości wodoru, metanu oraz benzyny (na podstawie Alcocka i in., 2001)
Table 1. Comparison of physicochemical properties of hydrogen, methane and gasoline (based on Alcock et al., 2001)

Właściwości Properties	Wodór Hydrogen	Metan Methane	Benzyna Gasoline
Masa molowa Molar mass	2,016	16,043	107
Gęstość w warunkach normalnych [kg/m ³] Density at NTP [kg/m ³]	0,0838	0,6512	4,4
Ciepło spalania [kJ/g] Heating value [kJ/g]	119,9–141,9	50,0–55,5	44,5–48
Lepkość w warunkach normalnych [g/cm·s×10 ⁻³] Viscosity at NTP [g/cm·s×10 ⁻³]	8,9	11,7	5,0
Limit palności [% obj. w powietrzu] Flammability limits [vol. % in air]	4–75	5,3–15	1,0–7,8
Minimalna energia zapłonu [mJ] Minimum ignition energy [mJ]	0,02	0,29	0,24
Minimalna temperatura samozapłonu [°C] Minimum autoignition temperature [°C]	585	540	228–471
Granica wybuchowości [% obj. w powietrzu] Detonability limits [vol. % in air]	11–59	6,3–13,5	1,1–3,3
Współczynnik dyfuzji par w powietrzu w warunkach normalnych [cm ² /s] Diffusion coefficient in air at NTPa [cm ² /s]	0,61	0,16	0,005

Również trwałość rur metalowych może drastycznie się zmniejszać, gdy są one wystawione w długich okresach czasu na działanie wodoru, zwłaszcza o wysokim stężeniu i pod wysokim ciśnieniem. Wpływ wodoru na właściwości stopów stalowych jest znany w formie kruchości wodorowej (Kanezaki i in., 2008). Współczynnik przenikania wodoru jest ok. czterech do pięciu razy wyższy niż w przypadku metanu dla typowych rur polimerowych stosowanych w systemach dystrybucji gazu ziemnego (por. Melaina i in., 2013). Transport i zatłaczanie wodoru odwiertami do struktur geologicznych będą wymagać więc odpowiednio przygotowanej infrastruktury. Nie można zapominać o skłonności wodoru do wybuchu (w mieszaninie z tlenem lub innymi gazami). Wszystko to wymaga udoskonalania i rozwijania nowych koncepcji oraz nowych rozwiązań technicznych.

PODZIEMNE MAGAZYNOWANIE GAZÓW A PODZIEMNE MAGAZYNOWANIE WODORU

Do magazynowania wodoru wykorzystuje się dziś liczne technologie dostępne komercyjnie. Najpopularniejszą metodą jest użycie wysokociśnieniowych zbiorników o różnych rozmiarach, wykorzystywanych w odmiennych zakresach ciśnień. Wiele rodzajów wodorków metali chętnie absorbuje i desorbują na swojej powierzchni wodór w temperaturze pokojowej i pod ciśnieniem atmosferycznym, a przechowywanie wodoru w postaci wodorków metali jest dziś przedmiotem intensywnych badań. Wodór można również magazynować w rurach umieszczonych na niewielkiej głębokości pod powierzchnią ziemi, takich samych, jakich używa się do transportu gazu, czy też w głębokich strukturach geologicznych (Spiegel, 2007).

Według CEDIGAZ (Natural gaz..., 2016), z końcem 2015 r. było 680 podziemnych magazynów gazu o całkowitej pojemności 413 mld m³. Większość tej pojemności magazynowej jest skoncentrowana na trzech rynkach gazu ziemnego: Ameryka Północna (38%), Kraje Wspólnoty Niepodległych Państw – CIS (29%) oraz Europa (27%). Na Azję i Oceanie oraz Środkowy Wschód przypada zaledwie po kilka procent globalnej pojemności magazynowej. W podziale na miejsca geologicznego magazynowania dominują szcerpane złoża węglowodorów (80%), przy znacznie mniejszym udziale poziomów wodonośnych (12%) i kawern solnych (8%).

Budowa i działanie podziemnych magazynów zarówno dla gazu ziemnego, jak i wodoru są podobne. Główna różnica jest związana z doborem materiału do wykorzystywanego sprzętu w przypadku magazynowania wodoru oraz z aspektami bezpieczeństwa na powierzchni. Podziemne magazyny gazu (PMG) w Polsce były przedmiotem monograficznego opracowania (Gaska i in., 2012). Przedstawiono w nim przegląd możliwości magazynowania gazów (uwarunkowania geologiczne, technologiczne i ekonomiczne) w czterech rodzajach PMG (struktury w wyeksploatowanych złożach gazu ziemnego, struktury zawodnione, kawerny solne oraz podziemne wyrobiska górnicze), szczegółowo omówiono również działające w Polsce podziemne magazyny gazu. Kunstamn i in. (2009) scharakteryzowali geologiczne i górnicze aspekty budowy magazynowych kawern solnych. Tematyka podziemnych zbiorników gazu i ich wykorzystania do magazynowania

węglowodorów była również przedmiotem kilku innych prac, np.: Ślizowskiego i in. (2004), Kłeczka i in. (2005), Maciejewskiego (2008), Laskowskiej i in. (2009), Pieńkowskiego (2009), Ślizowskiego i Urbańczyka (2011), Kaliskiego i Sikory (2013). Górowska (2014) wskazuje, że w nakładach inwestycyjnych główne pozycje stanowią koszty kapitałowe instalacji sprężania oraz koszty wyługowania kawerny, pozostałe nakłady dotyczą (w podobnych proporcjach) kosztów poduszki gazowej oraz otworu wiertniczego. Należy podkreślić, że spółka LOTOS pracuje nad technologią magazynowania energii w postaci wodoru. Jako lider, konsorcjum to realizuje projekt badawczy HESTOR w ramach projektu NCBiR. Jego celem jest zbadanie efektywności magazynowania wodoru pozyskiwanego z nadwyżek energii ze źródeł odnawialnych. Pozyskany w ten sposób wodór mógłby być magazynowany w kawernach solnych i wykorzystywany do procesów technologicznych w rafinerii oraz do wytwarzania energii elektrycznej. Spodziewanym, dodatkowym efektem ma być obniżenie emisji gazów cieplarnianych (LOTOS 2016). Możliwości magazynowania wodoru w kawernach solnych w pokładzie cechsztyńskiej soli kamiennej w rejonie nadbałtyckim oraz wstępne informacje o polskich pracach dotyczących magazynowania wodoru w kawernach solnych (projekt HESTOR) przedstawił Chromik (2015, 2016), natomiast Urbańczyk (2016) scharakteryzował wybrane wyniki modelowania termodynamicznych procesów związanych z magazynowaniem wodoru w kawernach solnych.

MIEJSCA PODZIEMNEGO MAGAZYNOWANIA WODORU

Możliwe jest magazynowanie wodoru pod powierzchnią ziemi, w głębokich strukturach geologicznych, pod bardzo słabo przepuszczalnymi skałami nadkładu. Rozważane są trzy opcje (miejsca) podziemnego magazynowania wodoru (HUS): w kawernach solnych, w szcerpanych złożach ropy naftowej i gazu ziemnego oraz w głębokich poziomach wodonośnych (Panfilov, 2010; Ebigbo i in., 2013; Assessment..., 2014; Bai i in., 2014; Iordache i in., 2014;). Podziemne wyrobiska górnicze (opuszczone kopalnie soli, wapieni oraz kawerny skalne) zostały tutaj pominięte ze względu na ich wątpliwą szczelność oraz techniczny charakter prac związanych z ich adaptacją na magazyn, przy niewielkim znaczeniu kryteriów geologicznych. Działalność podziemnego magazynu powinna zapewnić, że gaz zatłoczony do złoża zostanie odebrany w jak największej ilości i bez strat spowodowanych ucieczkami.

Wskazane powyżej opcje HUS, żeby mogły zostać zaadoptowane na podziemny magazyn wodoru, muszą spełniać określone warunki (każdy z nich posiada swoją specyfikę). Pierwsze dwa typy są obiektami typu porowato-szczelinowatego, w których decydującą rolę w magazynowaniu odgrywają czynniki i aspekty geologiczne, a czynniki techniczne są drugorzędne. W obiektach typu kawernowego istotną rolę odgrywają natomiast względy techniczne.

Podziemne kawerny solne to sztuczne komory utworzone przez wyługowanie soli ze złóż pokładowych lub w wysadach solnych. Tego typu komory są stosowane na całym świecie do przechowywania gazu ziemnego i produktów ropopochodnych. Sól ma dobre właściwości fizyczne, odpowiednie dla podziemnego magazynowania wodoru.

Ściany kawerny solnej są zasadniczo nieprzepuszczalne dla tego gazu przez okres eksploatacji magazynu, a plastyczne właściwości soli chronią takie kawerny przed pojawieniem się i rozprzestrzenianiem pęknięć oraz utratą szczelności zbiornika. Wielkości magazynowania i odbioru wodoru są bardzo elastyczne, a w jednym miejscu można wyługować kilka kawern, tak żeby dostosować ogólną pojemność magazynu do potrzeb rynkowych.

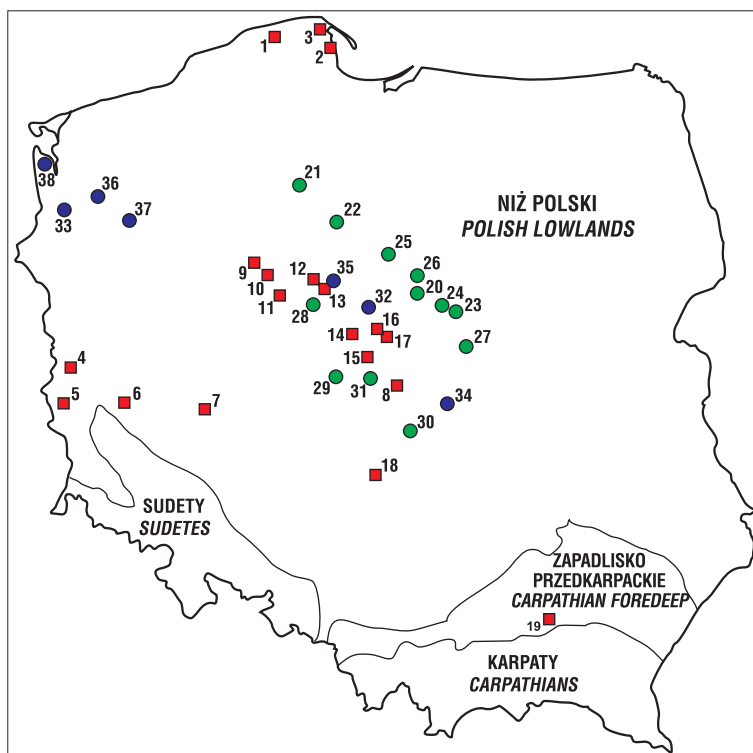
Szczerpane złoża ropy i gazu mogą być również wykorzystane do magazynowania wodoru. Poziom przeznaczony do jego składowania musi mieć odpowiednią porowatość i przepuszczalność, a skały nadkładu muszą zapewnić szczelność przed wyciekami gazu na powierzchnię. Podkreśla się, że kiedy skały nadkładu są nasycone wodą, stanowią praktycznie nieprzepuszczalną barierę dla wodoru. Zaletą takiego rozwiązania jest również to, że właściwości geologiczne wyeksploatowanego złoża są dobrze znane, a istniejące otwory i wyposażenie napowierzchniowe mogą być (przynajmniej częściowo) ponownie wykorzystane.

Magazynowanie wodoru w głębokich poziomach wodonośnych polega prawie na tym samym, co w szczypanych złożach ropy czy gazu, z tą jednak różnicą, że porowata matryca skalna jest wypełniona solanką, a nie węglowodarami. Zaletą tego typu magazynu jest względnie niezniszczona struktura geologiczna. Istniejącymi ograniczeniami są wyższe koszty rozpoznania geologicznego, większe nakłady inwestycyjne i koszty eksploatacji oraz zwiększone ryzyko wycieku gazu (Bai i in., 2014; Gąska i in., 2012; Sørensen, 2007).

Określenie wymogów i warunków decydujących o wyborze złoża lub struktury geologicznej z przeznaczeniem na podziemny magazyn wodoru powinno się odbywać na podstawie wnikliwej analizy geologicznej z wykorzystaniem inżynierii złożowej. Istotnymi parametrami są: budowa geologiczna struktury (głębokość, powierzchnia i miąższość, szczelność, ciśnienie złożowe, właściwości zbiornikowe – porowatość i przepuszczalność, właściwości geomechaniczne) oraz odpowiednia charakterystyka skał uszczelniającego nadkładu. Podstawowym kryterium dla struktury przeznaczonej na podziemny magazyn wodoru jest szczelność geologiczna podziemnego magazynu, zapewniona również przez szczelność nadległych warstw.

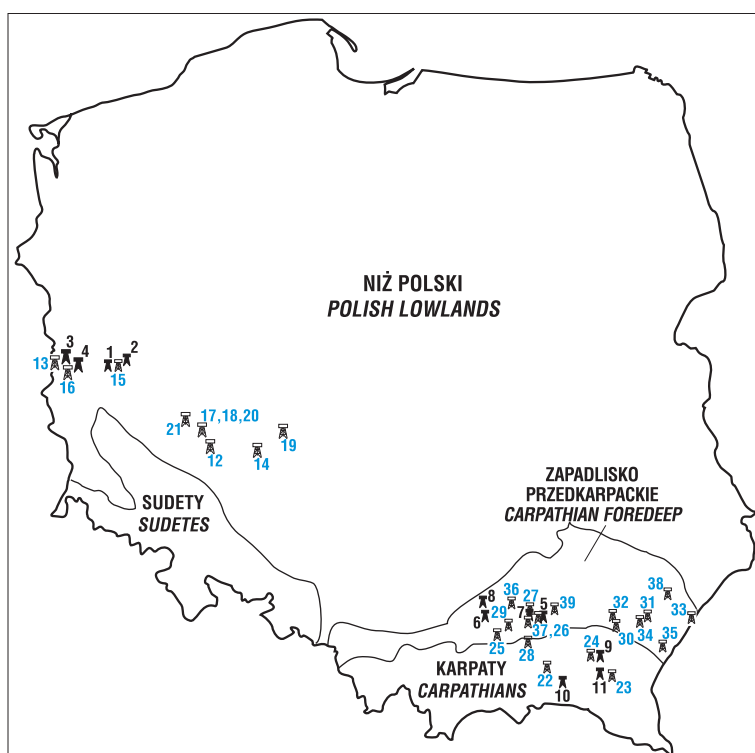
W dalszej kolejności istotne są kryteria techniczne, środowiskowe, prawne, ekonomiczne itd. Ważna jest szczelność techniczna instalacji, która obejmuje szczelność wykonanych otworów na złożo, urządzeń napowierzchniowych, w tym rurociągów transportujących gaz. Kluczowy jest również odpowiedni dobór warunków eksploatacji, uwzględniający specyfikę złoża oraz dobór właściwego ciśnienia zatłaczania i odbioru gazu, tak żeby nie przekroczyć ciśnienia szczelinowania górotworu (przy którym następuje rozwarstwienie skały).

Musimy również wykazać, że obiekt jest potrzebny, a jego budowa jest ekonomicznie opłacalna. Lokalizacja podziemnego magazynu wodoru musi uwzględniać ograniczenia w możliwościach przestrzennego zagospodarowania terenu, jak chociażby występowanie obszarów chronionych, możliwości zagospodarowania solanki w czasie budowy i eksploatacji magazynów w kawernach solnych. Założenia lokalizacyjne muszą być tworzone na podstawie koncepcji zrównoważonego rozwoju, przy uwzględnieniu ograniczeń przyrodniczych, potrzeb gospodarki oraz oczekiwań społeczności lokalnej.



Ryc. 3. Lokalizacja potencjalnych obszarów do składowania wodoru w pokładach soli kamiennej i wysadach solnych (1–19) oraz w głębokich poziomach wodonośnych Niżu Polskiego (20–38) (na podstawie Tarkowski, 2017). Wyniesienie Łeba: 1 – złożo Łeba; 2 – złożo Mechelinki; 3 – złożo Zatoki Puckiej. Monoklina przedsudecka: 4 – rejon Gubina; 5 – rejon Nowa Rola; 6 – rejon Nowa Sól; 7 – rejon Góra. Wysady solne: 8 – Rogoźno; 9 – Wapno; 10 – Damasławek; 11 – Mogilno; 12 – Inowrocław; 13 – Góra; 14 – Izbica Kujawska; 15 – Kłodawa; 16 – Lubień; 17 – Łanięta; 18 – Dębina. Zapadlisko przedkarpaccie: 19 – złożo Wojnicz. W głębokich poziomach wodonośnych Niżu Polskiego – struktury w utworach dolnej kredy: 20 – Bielsko–Bodzanów; 21 – Bysław; 22 – Chełmża; 23 – Dzierżanów; 24 – Kamionki; 25 – Lipno; 26 – Sierpc; 27 – Sochaczew; 28 – Strzelno; 29 – Turek; 30 – Tuszyn; 31 – Wartkowice; struktury w utworach dolnej jury: 32 – Brześć Kujawski; 33 – Chabowo; 34 – Jeżów; 35 – Konary; 36 – Marianowo; 37 – Suliszewo; 38 – Trzebież

Fig. 3. Location of potential areas for hydrogen storage in rock salt beds and salt structures (1–19) and in deeply seated aquifers of the Polish Lowlands (20–38) (based on Tarkowski, 2017). Łeba Elevation: 1 – Łeba salt deposit; 2 – Mechelinki salt deposit; 3 – Puck Bay salt deposit. Fore-Sudetic Monocline: 4 – Gubin area; 5 – Nowa Rola area; 6 – Nowa Sól area; 7 – Góra area. Salt structures in the Polish Lowlands: 8 – Rogoźno; 9 – Wapno; 10 – Damasławek; 11 – Mogilno; 12 – Inowrocław; 13 – Góra; 14 – Izbica Kujawska; 15 – Kłodawa; 16 – Lubień; 17 – Łanięta; 18 – Dębina. Carpathian Foredeep: 19 – Wojnicz salt deposit. In deeply seated aquifers of the Polish Lowlands – structures in Lower Cretaceous deposit: 20 – Bielsko–Bodzanów; 21 – Bysław; 22 – Chełmża; 23 – Dzierżanów; 24 – Kamionki; 25 – Lipno; 26 – Sierpc; 27 – Sochaczew; 28 – Strzelno; 29 – Turek; 30 – Tuszyn; 31 – Wartkowice; structures in Lower Jurassic deposits: 32 – Brześć Kujawski; 33 – Chabowo; 34 – Jeżów; 35 – Konary; 36 – Marianowo; 37 – Suliszewo; 38 – Trzebież



Ryc. 4. Lokalizacja potencjalnych obszarów do składowania wodoru w wyczerpanych złożach węglowodorów: złoża ropy naftowej (1–11) oraz gazu ziemnego (12–39) (na podstawie Tarkowski, 2017): 1 – Kije; 2 – Kije NE, 3 – Breslack-Kosarzyn; 4 – Rybaki; 5 – Brzezówka; 6 – Grobla; 7 – Jastrząbka Stara; 8 – Pławowice; 9 – Wola Jasieniecka; 10 – Mrukowa; 11 – Węglówka; złoża gazu ziemnego: 12 – Borzęcin; 13 – Breslack-Kosarzyn; 14 – Brzostowo; 15 – Kije NE; 16 – Kosarzyn N; 17 – Wiewierz W; 18 – Wiewierz E; 19 – Wysocko; 20 – Załęcze; 21 – Żuchłów; 22 – Gorlice-Glinik; 23 – Sanok-Zabłotce; 24 – Wola Jasienicka; 25 – Brzezowiec; 26 – Brzeźnica; 27 – Czarna Sędziszowska; 28 – Dąbrówka; 29 – Grądy Bocheńskie; 30 – Husów-Albigowa-Krasne; 31 – Jarosław; 32 – Kańczuga; 33 – Lubaczów; 34 – Miocin; 35 – Przemyśl; 36 – Swarzędz; 37 – Tarnów (jura); 38 – Uszkowce; 39 – Wygoda

Fig. 4. Location of potential areas for hydrogen storage in depleted oil and gas deposits: oil deposits (1–11) and gas deposits (12–39) (based on Tarkowski, 2017): 1 – Kije; 2 – Kije NE, 3 – Breslack-Kosarzyn; 4 – Rybaki. Carpathian Foredeep and the Carpathians: 5 – Brzezówka; 6 – Grobla; 7 – Jastrząbka Stara; 8 – Pławowice; 9 – Wola Jasieniecka; 10 – Mrukowa; 11 – Węglówka. Gas deposits: 12 – Borzęcin; 13 – Breslack-Kosarzyn; 14 – Brzostowo; 15 – Kije NE; 16 – Kosarzyn N; 17 – Wiewierz W; 18 – Wiewierz E; 19 – Wysocko; 20 – Załęcze; 21 – Żuchłów. 22 – Gorlice-Glinik; 23 – Sanok-Zabłotce; 24 – Wola Jasienicka; 25 – Brzezowiec; 26 – Brzeźnica; 27 – Czarna Sędziszowska; 28 – Dąbrówka; 29 – Grądy Bocheńskie; 30 – Husów-Albigowa-Krasne; 31 – Jarosław; 32 – Kańczuga; 33 – Lubaczów; 34 – Miocin; 35 – Przemyśl; 36 – Swarzędz; 37 – Tarnów (Jurassic); 38 – Uszkowce; 39 – Wygoda

Potencjalne miejsca do podziemnego magazynowania wodoru w Polsce zostały przedstawione ostatnio przez Tarkowskiego (2017). Dla złóż soli kamiennej w utworach permu górnego (cechsztynu) oraz neogenu (miocenu) zaproponowano pokłady soli kamiennej wyniesienia Łeby i monokliny przedsudeckiej, w zapadlisku przedkarpackim oraz struktury solne (wysady solne) Nizu Polskiego (ryc. 3).

Dla podziemnych magazynów wodoru w głębokich poziomach wodonośnych zaproponowano wybrane struktury geologiczne, wytypowane wcześniej do podziemnego składowania CO₂ na Nizu Polskim, w utworach kredy dolnej oraz jury dolnej (ryc. 3).

W szcerpanych złożach ropy naftowej i gazu ziemnego, ujętych w aktualnym Bilansie zasobów... (2015), do podziemnego magazynowania wodoru dla Nizu Polskiego, Karpat i zapadliska przedkarpackiego, wskazano kilkanaście złóż ropy naftowej oraz liczne złoża gazu ziemnego (ryc. 4). Przedstawiona lista złóż ropy naftowej i gazu ziemnego w Polsce, na dzień dzisiejszy, może stanowić podstawę do dalszych, szczegółowych rozważań mających na celu wskazanie najlepszych i najodpowiedniejszych do podziemnego magazynowania wodoru.

DOŚWIADCZENIA W ZAKRESIE PODZIEMNEGO MAGAZYNOWANIA WODURU

Do tej pory czysty wodór był magazynowany w trzech kawernach solnych w Teesside w Wielkiej Brytanii od 1972 r. oraz w dwóch w pobliżu US Gulf Coast w Teksasie od 1983 r. (tab. 2). Praktyka składowania wodoru w tych kawernach wykazała, że może być on bezpiecznie magazynowany przez długi okres czasu.

Gaz miejski, wytwarzany przez zgazowanie węgla, może być postrzegany jako dobry odpowiednik magazynowania wodoru, ponieważ składa się z ok. 50–60% wodoru (dodatkowe jego składniki to: CO, CO₂, CH₄ i N₂). Gaz ten był powszechnie stosowany w Europie w pierwszej połowie XX w., zanim został zastąpiony przez gaz ziemny w drugiej połowie XX w. Przez dziesięciolecia jego magazynowanie od-

Tab. 2. Kawerny solne do magazynowania wodoru w Stanach Zjednoczonych oraz w Wielkiej Brytanii (na podstawie Assessment..., 2014)
Table 2. Existing hydrogen storage caverns in the US and the UK (based on Assessment..., 2014)

	Clemens (USA)	Moss Bluff (USA)	Teesside (UK)
Geologia / Geology	wysad solny / domal salt	wysad solny / domal salt	złożo pokładowe / bedded salt
Operator / Operator	Conoco Phillips	Praxair	Sabic Petroleum
Magazynowany płyn / Stored fluid	wodór / hydrogen	wodór / hydrogen	wodór / hydrogen
Data powstania [rok] / Commissioned [year]	1983	2007	~1972
Objętość [m ³] / Volume [m ³]	580 000	566 000	3 × 70 000
Głębokość [m] / Reference depth [m]	930	>822	350
Zakres ciśnienia [bar] / Pressure range [bar]	70–135	55–152	~45
Możliwa pojemność gazu właściwego [mln kg] / Possible working gas capacity H ₂ Mio [kg]	2,56	3,72	0,83

bywało się zarówno w kawernach solnych, jak i w warstwach wodonośnych. Na przykład we Francji (Beynes) w latach 1956–1972 firma Gaz de France w celu regulowania wahań produkcji i popytu przechowywała wyprodukowany gaz, zawierający 50% wodoru, w solankowych warstwach wodonośnych. W ciągu 18 lat działalności magazynu nie stwierdzono problemów z bezpieczeństwem, zaobserwowano jednak intensywną aktywność bakteryjną i transformację składu gazu. W Czechach (Lobodice), gaz miejski składający się z 50% H₂ i 25% CH₄ jest przechowywany w poziomie wodonośnym (Panfilov, 2016).

Doświadczenia związane z magazynowaniem gazu miejskiego wykazały jednak, że po kilku miesiącach magazynowania duża część wodoru uległa przekształceniu w metan (zjawisko biodegradacji wodoru reagującego z CO i CO₂ do metanu) (Assesment..., 2014).

PRZEGLĄD WYNIKÓW BADAŃ W ZAKRESIE PODZIEMNEGO MAGAZYNOWANIA WODORU

Pierwsze oszacowania możliwości podziemnego magazynowania wodoru pojawiały się w literaturze pod koniec lat 70. XX w. W 1979 r. Instytut Technologii Gazowniczej w Stanach Zjednoczonych opublikował wyniki badań dotyczących masowego podziemnego magazynowania wodoru (Foh i in., 1979), które potwierdzały jego wykonalność techniczną i ekonomiczną. Od lat 90. XX w. problematyka podziemnego magazynowania masowych ilości wodoru jest przedmiotem dyskusji oraz coraz liczniejszych artykułów i opracowań. To rosnące zainteresowanie przekłada się na istniejące, choć jeszcze niewielkie, praktyczne doświadczenia w podziemnym magazynowaniu tego gazu. Zaprezentowane poniżej publikacje (ograniczono się do tych najnowszych) wskazują na znaczący wzrost zainteresowania prezentowaną tematyką oraz przedstawiają istotne problemy, z którymi się ono wiąże.

Rozważając wykorzystanie podziemnej przestrzeni (górotworu) do magazynowania energii, Delmastro i in. (2016) scharakteryzowali ważne aspekty, takie jak: konkurencja w użytkowaniu podziemnej przestrzeni, bezpieczeństwo zarządzania nośnikami energii, potrzeba dużej infrastruktury dla transportu energii, wymogi bezpieczeństwa wobec zjawisk sejsmicznych, względy ekonomiczne i środowiskowe. Dla takich ujęć współzależność pomiędzy systemami energetycznymi i przestrzenią podziemną jest niezwykle istotna. W zakresie podziemnego zagospodarowania górotworu pod obszarami miejskimi podkreślili oni potrzebę długoterminowych zintegrowanych planów zagospodarowania przestrzennego. Bartel & Jansen (2016) przedstawili aktualny stan przepisów w zakresie planowania wykorzystania przestrzeni podziemnej w Niemczech oraz wyniki prac dotyczące możliwych rozwiązań planistycznych dla skoordynowania działań. Autorzy podkreślili, że planowanie wykorzystania górotworu powinno uwzględniać wspólne procedury wyznaczania obszarów przeznaczonych wyłącznie do określonych celów, dla zapewnienia zrównoważonego zagospodarowania przestrzeni podziemnej (por. Uliasz-Misiak & Przybycin, 2016).

Zhang i in. (2016) podkreślali rolę wodoru jako cennego wektora składowania energii, w szczególności ze źródeł odnawialnych. Przedstawili stan wiedzy najważniejszych technologii w systemie magazynowania energii z wodoru oraz kierunki ich przyszłego rozwoju. Sgobbi i in. (2016)

wskazali na wodór jako obiecujące rozwiązanie dla dekarbonizacji systemów energetycznych oraz dla zapewnienia ich elastyczności działania. Z rozpatrywanych scenariuszy wynikają sugestie, że wodór ze względu na swoją niskiemisyjność może stać się istotnym źródłem energii już ok. 2030 r. Amid i in. (2016) omówili techniczną wykonalność sezonowego przechowywania wodoru w szcerpanym złożu gazu ziemnego. Autorzy podkreślali, że podziemne magazynowanie wodoru oferuje możliwość sezonowego przechowywania energii ze źródeł odnawialnych cechujących się zmiennością w dostawach, poprzez elektrolizę wody w okresach nadmiernej produkcji energii elektrycznej. Wskazali również na straty wodoru związane z jego przechowywaniem (z tytułu rozpuszczania i dyfuzji, interakcji z CO₂, biologicznej redukcji minerałów siarczkowych do siarkowodoru).

Audigane i in. (2014) na przykładzie Francji omówili rolę podziemnych magazynów gazu w przechowywaniu dużych ilości energii, wskazali na znaczenie doboru odpowiednich formacji geologicznych w tym celu oraz możliwość podziemnego magazynowania wodoru w połączeniu z innymi zastosowaniami (geotermia, podziemne składowanie CO₂, magazynowanie ciepła).

Przegląd technologii oraz perspektyw podziemnego składowania wodoru w Chinach, a także podsumowanie doświadczeń w tym zakresie w innych krajach przedstawili Bai i in. (2014).

Na wieloletnie doświadczenia Niemiec w magazynowaniu gazu ziemnego w kawernach solnych i formacjach porowatych wskazywali Bauer i in. (2013). Podkreślali oni potrzebę opracowania nowych metod i technologii magazynowania energii, konieczność poznania wielorakich procesów zachodzących podczas podziemnego przechowywania wodoru, w celu zrozumienia skutków złożoności i interakcji z innymi rodzajami użytkowania (podpowierzchniowego i powierzchniowego). Scenariusze składowania wodoru opracowane przez Pfeiffer i Bauer (2015) na podstawie modelu numerycznego podziemnego magazynu wykazały, że takie przechowywanie może dostarczyć ok. 20% średniego zapotrzebowania na energię elektryczną w landzie Szlezwig-Holsztyn w Niemczech, dla tygodniowego okresu zasilania.

Panfilov (2016) omówił istotne aspekty podziemnego magazynowania wodoru na dużą skalę – jego opcje oraz potencjał składowania w Europie, potrzebną infrastrukturę, a także czynniki ekonomiczne. Pottier i Blondin (1995) przedstawili wybrane techniczne zagadnienia magazynowania wodoru w kawernach solnych oraz w warstwach wodonośnych, zilustrowali ekonomikę dla dwóch przypadków: roczne magazynowanie w warstwach wodonośnych oraz dzienne magazynowanie w kawernach solnych.

Ozarlan (2012) na przykładzie Turcji przeanalizował metody i aspekty konstrukcyjne podziemnych składowisk gazu w kawernach solnych.

Podziemne magazynowanie wodoru oddziałuje na górotwór i środowisko powierzchniowe. Podkreśla się niewielkie doświadczenie w tym zakresie. Mamy zaledwie kilka przykładów wielkoskalowego geologicznego magazynowania wodoru. Dlatego też, jak wskazują autorzy, (Hagemann i in., 2015; Panfilov, 2016) w celu określenia wpływu (skomplikowanych i połączonych) efektów magazynowania wodoru na inne rodzaje użytkowania górotworu jest wymagany odpowiedni system monitoringu oraz rozpoznanie i zrozumienie licznych procesów geologicznych, złożowych czy środowiskowych. Zachowanie się pod ziemią

składowanego wodoru jest bardziej złożone niż oczekiwano, inne niż w przypadku magazynowania gazu ziemnego. Wynika ono z jego wysokiej mobilności i lekkości.

Audigane i in. w 2015 r. omówili także rezultaty badań laboratoryjnych geochemicznej reaktywności rozpuszczonego wodoru z minerałami ilastymi pod kątem oceny właściwości skał zbiornikowych oraz jej wpływu na ocenę pojemności formacji osadowych przeznaczonych do magazynowania wodoru. Bai i in. (2014), analizując właściwości fizyczne i chemiczne wodoru oraz metanu, przedstawili potencjalne bariery związane z jego podziemnym magazynowaniem. Bauer i in. (2013) wskazywali, że wykorzystanie wielkoskalowego magazynowania energii może wywoływać skutki uboczne w górotworze (wzrost ciśnienia, migrację płynów złożowych, zmiany geochemiczne oraz biologiczne, naprężenia geomechaniczne, jak również ewentualny wyciek zatłoczonych płynów lub gazów do warstw wodonośnych).

Wyniki projektu R&D H2STORE w zakresie reaktywności minerałów z wodorem i dwutlenkiem węgla, z wykorzystaniem metod analitycznych oraz badań eksperymentalnych w warunkach złożowych, wykazały wpływ H_2/CO_2 na rozpuszczanie i wytrącanie się minerałów oraz jakość zbiornika (porowatość, preferencyjne ścieżki przepływu gazu) (Henkel i in., 2014). Podkreśla się, że wykorzystanie wielkoskalowego magazynowania energii może wywoływać skutki uboczne w górotworze: wzrost ciśnienia, migrację płynów złożowych, zmiany geochemiczne oraz biologiczne, naprężenia geomechaniczne czy też wyciek zatłoczonych płynów lub gazów do wyżej zalegających warstw wodonośnych (Bai i in., 2014; Bauer i in., 2013).

Reitenbach i in. (2015) zwracali uwagę, że zatłaczanie gazu zawierającego wodór do istniejących zbiorników UGS (*Underground Gas Storage*) powoduje zmiany wydajności i efektywności ich pracy, wpływa na geologiczną integralność zbiornika i skał nadkładu oraz na trwałość materiałów użytych do konstrukcji otworów.

W licznych publikacjach wskazywano na aktywność mikrobiologiczną bakterii metanogennych w trakcie podziemnego magazynowania wodoru. Ebigbo i in. (2013) oraz Toleukhanov i in. (2015) podkreślali zachowanie się tych bakterii, zdolnych do wykorzystywania wodoru i dwutlenku węgla w przemianie materii. Bakterie metanogenne zużywają wodór i dwutlenek węgla, przekształcając go w metan i wodę (generator metanu), co może powodować znaczne jego straty w podziemnym magazynie (Ebigbo i in., 2013; Hagemann i in., 2015a, b; Panfilov, 2010; Toleukhanov, 2015).

Iordache i in. (2014) przedstawili analizę wykorzystania kawern solnych do HUS w Rumunii, potencjalne kierunki rozwoju, interesariuszy oraz ogólne aspekty. Autorzy wskazali na doświadczenia rumuńskiego przemysłu naftowego w podziemnym magazynowaniu gazów. Podkreślali konieczność podjęcia prac w celu oceny możliwości podziemnego magazynowania wodoru, na podstawie których mogłyby być podjęte dalsze decyzje makroekonomiczne.

Simon i in. (2015) omówili hiszpańskie studium przypadku projektu HyUnder, które miało na celu ocenę potencjału podziemnego magazynowania wodoru na dużą skalę, jako opcji dla zapasów energii w Europie. Poza Hiszpanią, przeanalizowali oni przypadki dotyczące Francji, Niemiec, Holandii, Rumunii oraz Wielkiej Brytanii. Brano przy tym pod uwagę takie aspekty jak: konkurencyjność składowania

wodoru wobec innych wielkoskalowych koncepcji magazynowania energii, potencjał geologiczny gromadzenia wodoru w rozważanym regionie, umiejscowienie magazynowania energii wodoru na rynku energii oraz przypadki biznesowe w czterech różnych zastosowaniach (transporte, konwersji energii na gaz, reelektryfikacji i przemyśle). Analiza aspektów ekonomicznych dla dwóch perspektyw czasowych (2025 r. i 2050 r.) wykazała, że średnia cena energii elektrycznej będzie głównym kosztem decydującym o opłacalności podziemnego magazynowania wodoru. Lord i in. (2011) podkreślali, że Departament Energii USA (DOE) był zainteresowany oceną geologiczną i rentownością ekonomiczną dla różnych opcji podziemnego magazynowania wodoru. Wykorzystując wiedzę z podziemnych geologicznych składowisk gazu ziemnego i ropy naftowej w USA oraz CCS, autorzy przedstawili metodologię analizy ekonomicznej dla oceny kosztów budowy i eksploatacji podziemnych magazynów wodoru. Wyniki badań Lord i in. (2014) dotyczące magazynowania wodoru w celu pokrycia ewentualnych zakłóceń w zasilaniu lub zmieniających się potrzeb sezonowych, wykonane dla Detroit i Los Angeles, wykazały, że ograniczenia geologiczne bardziej wpływają na zróżnicowanie kosztów magazynowania wodoru dla różnych miast, aniżeli wielkość miejskiego zapotrzebowania.

Dotychczasowe doświadczenia w podziemnym magazynowaniu wodoru dotyczą kilku instalacji przemysłowych oraz wyników nielicznych jeszcze projektów zrealizowanych w tym zakresie. Projekt H2STORE w Niemczech oraz europejski projekt HyUnder (Assesment... 2014) miały na celu ocenę technicznego, ekonomicznego i społecznego punktu widzenia podziemnego magazynowania wodoru jako potencjalnie atrakcyjnego rozwiązania.

W Austrii projekt Underground SUN.STORAGE zrealizował badania i analizy wpływu wodoru na zbiorniki przeznaczone do magazynowania metanu. Audigane i in. (2015) opisali wyniki kilku projektów badawczych dotyczących możliwości składowania wodoru w strukturach porowatych. W Patagonii, w Argentynie spółka Hychico SA prowadzi działalność zmierzającą do konwersji energii elektrycznej wytworzonej na farmie wiatrowej Diadema na wodór, który miałby być zatłaczany do szczypanego złoża ropy naftowej przekształconego w magazyn gazu (Audigane i in., 2014; Panfilov, 2016).

Odnosnie gospodarki Polski opartej na węglu i konieczności ograniczenia emisji CO_2 technologie wodorowe stanowią potencjalnie zrównoważoną opcję dla polskiego systemu energetycznego. W tym zakresie Stygar i Brylewski (2013) omówili kierunki rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce. Globalne zmiany w polityce energetycznej, w tym wzrost udziału OZE w całkowitej produkcji energii, są wskazywane jako istotne elementy w kontekście rozwoju energetyki wodorowej w Polsce. Murray i in. (2008) przedstawili postrzeganie interesariuszy odnośnie gospodarki wodorowej w Polsce. Dokonali przeglądu istniejącego polskiego systemu energetycznego, zasobów, polityki i środków w perspektywie planowania przejścia do gospodarki opartej na wodrze. Wskazali, że gaz koksoowniczy i zgazowanie węgla będą w perspektywie długoterminowej głównymi krótko- i średniookresowymi źródłami wodoru, a podziemna konwersja złóż węgla połączona ze zintegrowa-

nym wychwytywaniem i składowaniem dwutlenku węgla jest tutaj niezwykle istotna.

PODSUMOWANIE

Podziemne magazynowanie wodoru jest jedną z opcji magazynowania energii, w której stanowi on atrakcyjny, choć dzisiaj jeszcze trudny do pełnego wykorzystania przekładnik energii. Może ono w przyszłości odegrać istotną rolę w drodze do bezemisyjnej produkcji energii. W celu wykorzystania w pełni tego potencjału, wodór powinien stać się integralną częścią systemu energetycznego, jako uniwersalny nośnik energii (obok energii elektrycznej), z dodatkową możliwością jej magazynowania. Jego konkurencyjność będzie zależała w dużym stopniu od pomyślnego wdrażania polityki niskiej emisji CO₂ dla nośników energii w innych sektorach gospodarki, obniżenia kosztów procesu elektrolizy wodoru, czy też korzystnej polityki wsparcia ze strony państwa. Dotychczasowe wyniki badań wskazują, że opcja ta może stać się w przyszłości (w perspektywie kilkunastu lat) korzystnym rozwiązaniem dla magazynowania nadmiaru energii elektrycznej związanej z nieregularnością dostaw ze źródeł odnawialnych, a struktury geologiczne mogą zapewnić możliwości magazynowania energii w średnio- i długoterminowej skali czasowej.

Z literatury dotyczącej podziemnego magazynowania wodoru wynika, że problematyka ta jest na początkowym etapie rozważań. Posiadamy niewielkie praktyczne doświadczenia w magazynowaniu tego gazu ograniczające się do kilku instalacji przemysłowych oraz wyniki ciągle nielicznych projektów badawczych. Zachowanie się zmagazynowanego pod ziemią wodoru jest bardziej skomplikowane niż oczekiwano. Liczne problemy dotyczące doboru w tym celu odpowiednich struktur geologicznych, poznania złożonych procesów geologiczno-złożowych zachodzących podczas podziemnego przechowywania, opracowania systemów monitoringu magazynowania wodoru, interakcji z innymi rodzajami użytkowania podpowierzchniowego i powierzchniowego, aspektów prawnych i wielu innych, czekają na rozwiązanie.

Jeżeli podziemne magazynowanie wodoru ma odegrać znaczącą rolę w przyszłych odnawialnych systemach energetycznych, istnieje zapotrzebowanie na praktyczne doświadczenia operacyjne i instalacje demonstracyjne, w celu przygotowaniu przyszłych rynków. Może to potrwać kilkanaście i więcej lat od momentu decyzji opracowywania pierwszych projektów do rozpoczęcia magazynowania na skalę przemysłową. Obserwując zainteresowanie tą problematyką, można sądzić, że wiele przeszkód (w tym technologicznych) zostanie szybko rozwiązanych, co znacząco przyspieszy wdrożenie tej opcji magazynowania energii.

Ze względu na wzrastający udział OZE w produkcji energii elektrycznej w Polsce (w perspektywie do 2030 r. i 2050 r.) oraz zapotrzebowanie na wodór w sektorze transportu, tematyka podziemnego magazynowania wodoru będzie coraz bardziej aktualna. W poszukiwaniu lokalizacji do tego typu przedsięwzięć przydatna będzie wiedza w zakresie rozpoznania budowy geologicznej kraju, jak również ta dotycząca podziemnego magazynowania gazów oraz składowania dwutlenku węgla. Polska posiada korzystne uwarunkowania geologiczne do podziemnego magazynowania wodoru.

Przekształcenie przestrzeni geologicznej w przestrzeń zajęta przez zmagazynowany wodór będzie stanowiło wyzwanie dla sektora publicznego i prywatnego. Geologiczne, inżynierskie, ekonomiczne, prawne i społeczne przeszkody będą musiały zostać pokonane przed przystąpieniem do realizacji podziemnego magazynowania wodoru w pełnej skali. Dla przyszłych zastosowań konieczne będzie przeprowadzenie licznych projektów badawczych oraz demonstracyjnych w taki sposób, żeby ocenić potencjalne zagrożenia oraz opracować plany ograniczania jakiegokolwiek ryzyka.

Artykuł opracowano w ramach badań statutowych IGSMiE PAN.

LITERATURA

- ALCOCK J., SHIRVILL L., CRACKNELL R. 2002 – Compilation of Existing Safety Data on Hydrogen and Comparative Fuels. Raport.
- AMID A., MIGNARD D. & WILKINSON M. 2016 – Seasonal storage of hydrogen in a depleted natural gas reservoir. *Int. J. Hydrog. Energy*, 41: 5549–5558.
- 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 – HyUnder. Grant agreement no. 303417. Executive Summary 23 JUNE 2014; http://hyunder.eu/wp-content/uploads/2016/01/D8.1_HyUnder-Executive-Summary.pdf [Dostęp: 04.10.2016].
- AUDIGANE P., BADER A.G., GENTIER S., BECCALETTO L. & BELLENFANT G. 2014 – The role of the underground for massive storage of energy: a preliminary glance of the French case. EGU General Assembly, Vienne, Austria; <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00968155> [Dostęp: 2.10.2016].
- AUDIGANE P., EBRAHIMIYEKTA A. & PICHAVANT M. 2015 – Evaluation of Hydrogen migration and geochemical reactivity into underground. 6th International Conference on Fundamentals & Development of Fuel Cells, Toulouse, France; <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-01100370> [Dostęp: 2.10.2016].
- BAI M., SONG K., SUN Y., HE M., LI Y. & SUN J. 2014 – An overview of hydrogen underground storage technology and prospects in China. *J. Pet. Sci. Eng.*, 124: 132–136. Doi:10.1016/j.petrol.2014.09.037.
- BARTEL S. & JANSSEN G. 2016 – Underground spatial planning – Perspectives and current research in Germany. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 55: 112–117.
- BAUER S., BEYER C., DETHLEFSEN F., DIETRICH P., DUTTMANN R., EBERT M., FEESER V., GÖRKE U., KÖBER R., KOLDITZ O., RABBEL W., SCHANZ T., SCHÄFER D., WÜRDEMANN H. & DAHMKE A. 2013 – Impacts of the use of the geological subsurface for energy storage: an investigation concept. *Environ. Earth Sci.*, 70: 3935–3943. Doi: 10.1007/s12665-013-2883-0.
- BILANS ZASOBÓW... 2015 – Bilans zasobów złóż kopalni w Polsce wg stanu na 31 XII 2014 r. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy.
- BÜNGER U., MICHALSKI J., CROTOGINO F. & KRUCK O. 2016 – Large-scale underground storage of hydrogen for the grid integration of renewable energy and other applications. [W:] *Compendium of Hydrogen Energy*: 133–163.
- CHROMIK M. 2015 – Możliwości magazynowania energii elektrycznej w soli kamiennej w postaci wodoru w regionie nadbałtyckim. *Prz. Solny*, 11: 44–50.
- CHROMIK M. 2016 – Koncepcja magazynowania nadwyżek energii elektrycznej w postaci wodoru w kawernach w złożach soli w Polsce – wstępne informacje. *Prz. Solny*, 12: 11–18.
- DELMASTRO Ch., LAVAGNO E. & SCHRANZ L. 2016 – Energy and underground. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 55: 96–102.
- EBIGBO A., GOLFIER F., & QUINTARD M. 2013 – A coupled, pore-scale model for methanogenic microbial activity in underground hydrogen storage. *Adv. Water Resour.* 61: 74–85. Doi:10.1016/j.advwatres.2013.09.004.
- FOH S., NOVIL M., ROCKAR P. & RANDOLPH P. 1979 – Underground hydrogen storage. Final report, Institute of Gas Technology, Chicago, s. 268.
- GĄSKA K., HOSZOWSKI A., GMIŃSKI Z. & KUREK A. 2012 – Monografia podziemnych magazynów gazu w Polsce. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Przemysłu Naftowego i Gazowniczego Oddział Warszawa II, Warszawa 2012.
- GÓROWSKA K. 2014 – Kawerna dla wodoru. *Chemia przemysłowa*, 6: 36–40.

- HAGEMANN B., RASOULZADEH M., PANFILOV M., GANZER L. & REITENBACH V. 2015a – Hydrogenization of underground storage of natural gas. Impact of hydrogen on the hydrodynamic and bio-chemical behavior. *Comput. Geosci.*: 1–12. Doi: 10.1007/s10596-015-9515-6.
- HAGEMANN B., RASOULZADEH M., PANFILOV M., GANZER L., & REITENBACH V. 2015b – Mathematical modeling of unstable transport in underground hydrogen storage. *Environ. Earth Sci.*, 73: 6891–6898. Doi: 10.1007/s12665-015-4414-7.
- HENKEL S., PUDLO D., WERNER L., ENZMANN F., REITENBACH V., ALBRECHT D., WÜRDEMANN H., HEISTER K., GANZER L. & GAUPP R. 2014 – Mineral reactions in the geological underground induced by H₂ and CO₂ injections. *Energy Procedia* 63: 8026–8035. Doi: 10.1016/j.egypro.2014.11.839.
- IORDACHE L., SCHITEA D., GHEORGHE A. V., & IORDACHE M. 2014 – Hydrogen underground storage in Romania, potential directions of development, stakeholders and general aspects. *Int. J. Hydrog. Energy*, 39: 11071–11081. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.067.
- JACQUELIN L.-M. & BADER A.-G. 2013 – Le stockage souterrain de l'énergie. *Geosciences*: 100–107.
- KALISKI M. & SIKORA A. 2013 – Wodór a podziemne magazynowanie energii w strukturach solnych. *Prz. Solny*, 9: 26–32.
- KANEZAKI T., NARAZAKI C., MINE Y., MATSUOKA S. & MURAKAMI Y. 2008 – Effects of hydrogen on fatigue crack growth behavior of austenitic stainless steels. *Int. J. Hydrog. Energy*, 33 (10): 2604–2619.
- KIJEŃSKI J. 2005 – Dlaczego wodór. *Przemysł Chemiczny* 84 (11): 799–807.
- KŁECZEK Z., RADOMSKI A. & ZELJAŚ D. 2005 – Podziemne magazynowanie. CMG KOMAG, Prace Naukowe – Monografie, 9: 1–98.
- KOCHAŃSKI M., KORCZAK K., DYBIŃSKI O., KWAS M., OSIPOWICZ K., PATEJUK A., SAWICKA A. & SWOCZYNA B. 2013 – Techniczne i ekonomiczne perspektywy produkcji i magazynowania wodoru w Polsce. *Acta Innovations*, 8: 51–65.
- KUNSTMAN A., POBORSKA-MŁYNARSKA K. & URBAŃCZYK K. 2009 – Geologiczne i górnicze aspekty budowy magazynowych kawern solnych. *Prz. Geol.*, 57 (9): 819–828.
- LASKOWSKA T., SZCZEBYŁO J., GAŚKA K. & WILKOSZ P. 2009 – Polskie magazyny gazu ziemnego – od Mogilna do Kosakowa. *Prz. Geol.*, 57 (9): 755–756.
- LORD A. S., KOBOS P. H., KLISE G. T. & BORNS D. J. 2011 – A Life Cycle Cost Analysis Framework for Geologic Storage of Hydrogen: A User's Tool. Sandia Report SAND2011-6221. Prepared by Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550, s. 60.
- LORD A.S., KOBOS P.H. & BORNS D.J. 2014 – Geologic storage of hydrogen: Scaling up to meet city transportation demands. *Int. J. Hydrog. Energy*, 39(28): 15570–15582. doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.07.121
- LOTOS 2016 – <http://www.lotos.pl/322/p,174,n,4290/> [Dostęp: 03.10.2016 r.].
- MACIEJEWSKI A. 2008 – Podziemne magazynowanie paliw płynnych. *Gosp. Sur. Miner.*, 24 (3/2): 39–54.
- MARZEC A. 2007 – Energetyka wodorowa – co to oznacza dla roli węgla? *Karbo*, 2: 109–111.
- MELAINA M.W., ANTONIA O. & PENEV M. 2013. Blending hydrogen into natural gas Pipeline Networks?: A review of key issues blending hydrogen into natural gas Pipeline Networks?: A review of key issues, available at: <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/51995.pdf>.
- MIECZNIK M. 2016 – Podziemne magazynowanie energii cieplnej – metody i zastosowania. *Prz. Geol.*, 7, s. 464–471.
- MIROWSKI T., MOKRZYCKI E., & NEY R. – Energetyka wiatrowa – stan obecny i perspektywy rozwoju, 2015 Kraków. Wyd. IGSMiE PAN.
- MOKRZYCKI E. (red.) 2011 – Rozproszone zasoby energii w systemie elektroenergetycznym, 2011 Kraków: Wydawnictwo IGSMiE PAN.
- MOLENDĄ J. 2008 – Energetyka Wodorowa – Technologie i Perspektywy, Raport Ekspertów Sektora OZE 2008.
- MURAY M.L., SEYMOUR E.H., ROGUT J. & ZECHOWSKA S. 2008 – Stakeholder perceptions towards the transition to a hydrogen economy in Poland. *Int. J. Hydrog. Energy*, 33: 20–27.
- NATURAL GAS IN THE WORLD – 2016 <http://www.cedi-gaz.org/documents/2016/NGW2016/NGW2016-ABSTRACT.pdf>
- OCENA realizacji Polityki energetycznej Polski do 2030 roku. Załącznik 1 do Polityki energetycznej Polski do 2050 roku, Warszawa, czerwiec 2015.
- OZARSLAN A. 2012 – Large-scale hydrogen energy storage in salt caverns. *Int. J. Hydrog. Energy*, 37 (19): 14265–14277. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.07.111
- PANFILOV M. 2010 – Underground Storage of Hydrogen: In situ self-organisation and methane generation. *Transp. Porous Media*, 85 (3): 841–865. Doi: 10.1007/s11242-010-9595-7
- PANFILOV M. 2016 – 4 – Underground and pipeline hydrogen storage. [W:] GUPTA R.B., BASILE A. & VEZIROGLU T.N. (red.), Compendium of hydrogen energy, Volume 2: Hydrogen Storage. Distribution and infrastructure. Woodhead Publishing: 91–115.
- PFEIFFER W.T. & BAUER S. 2015 – Subsurface porous media hydrogen storage – Scenario development and simulation. *Energy Procedia*, 76: 565–572.
- PIEŃKOWSKI G. 2009 – Podziemne magazynowanie węglowodorów w kawernach solnych w Polsce – wymiar strategiczny i możliwości poprawy stanu środowiska naturalnego. *Prz. Geol.*, 57 (9): 769–797.
- POTTIER J.D. & BLONDIN E. 1995 – Mass storage of hydrogen. [W:] *Hydrogen Energy System*, vol. 295 of the series NATO ASI Series: 167–179.
- REITENBACH V., GANZER L., ALBRECHT D. & HAGEMANN B. 2015 – Influence of added hydrogen on underground gas storage: a review of key issues. *Environ. Earth. Science*, 73 (11): 6927–6937. Doi:10.1007/s12665-015-4176-2
- SGOBBI A., NIJS W., MIGLIO DE R., CHIODI A., GARGIULO M. & THIEL CH. 2016 – How far away is hydrogen? Its role in the medium and long-term decarbonisation of the European energy system. *Int. J. Hydrog. Energy*, 41: 19–35.
- SIMON J., FERRIZ A.M. & CORREAS L.C. 2015 – HyUnder – Hydrogen Underground Storage at Large Scale: Case Study Spain. *Energy Procedia*, 73: 136–144. Doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.661
- SØRENSEN B. 2007 – Underground hydrogen storage in geological formations, and comparison with other storage solutions. *Hydrogen Power Theoretical and Engineering Int. Symp*, 2007.
- SPIEGEL C. 2007 – Designing and building fuel cells. *Colleen Spiegel*. – 1st ed.
- STYGAR M. & BRYLEWSKI T. 2013 – Towards a hydrogen economy in Poland. *Int. J. Hydrog. Energy*, 38: 1–9. Doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.10.056
- ŚLIZOWSKI J. & URBAŃCZYK K. (red.) 2011 – Możliwości magazynowania gazu ziemnego w polskich złożach soli kamiennej w zależności od warunków geologiczno-górnictwowych. Wyd. IGSMiE PAN. Kraków.
- ŚLIZOWSKI K., KÖHSLING J. & LANKOF L. 2004 – Uwarunkowania podziemnego składowania odpadów niebezpiecznych w Polsce. *Studia, Rozprawy, Monografie nr 129*. Wyd. IGSMiE PAN. Kraków: 1–264.
- SOBIEŚCIAK-JECZEŃ M. & SKONIECZNY O. 2005 – Przyszłość wodoru w polskiej energetyce zawodowej. *Nowe Technologie*: 17–22.
- TARKOWSKI R. 2017 – Perspectives of using the geological subsurface for hydrogen storage in Poland. *Int. J. Hydrog. Energy*, 42(1): 347–355.
- TOLEUKHANOV A., PANFILOV M. & KALTAYEV A. 2015 – Storage of hydrogenous gas mixture in geological formations: Self-organisation in presence of chemotaxis. *Int. J. Hydrog. Energy*, 40 (46): 15952–15962.
- TOMCZYK P. 2009 – Szanse i bariery rozwoju energetyki wodorowej. *Polityka energetyczna* 12 (2/2): 593–607.
- TRUCHE L., BERGER G., DESTRIGNEVILLE Ch., GUILLAUME D. & GIFFAUT E. 2010 – Kinetics of pyrite to pyrrhotite reduction by hydrogen in calcite buffered solutions between 90 and 180°C: Implications for nuclear waste disposal. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 74 (10): 2894–2914.
- ULIASZ-MISIAK B. & PRZYBYCIN A. 2016 – Present and future status of the underground space use in Poland. *Environmental Earth Sciences* 75 (22): 1–15.
- URBAŃCZYK K. 2016 – Wybrane aspekty termodynamiczne magazynowania wodoru w kawernach solnych. *Prz. Solny*, 12: 92–97.
- WNIOŚKI Z ANALIZ prognostycznych na potrzeby Polityki Energetycznej Polski do 2050 roku. Załącznik 2. do Polityki energetycznej Polski do 2050 roku. Ministerstwo Gospodarki, Warszawa, czerwiec 2015 r.
- ZARĘBSKA K. & PERNAK-MIŚKO K. 2007 – Zgazowanie węgla – perspektywa dla gospodarki wodorowej. *Gosp. Sur. Miner.*, 23(3): 243–255.
- ZHANG F., ZHAO P., NIU M. & MADDY J. 2016 – The survey of key technologies in hydrogen energy storage. *Int. J. Hydrog. Energy*, 41(33): 14535–14552.
- ZÜTTEL A. 2004 – Hydrogen storage methods. *Naturwissenschaften* 91 (4): 157–172.