

## Wodór jako paliwo przyszłości. Wyzwania dla polskiej geologii

Radosław Tarkowski



Hydrogen as the fuel of the future. Challenges for Polish geology. *Prz. Geol.*, 69: 210–217.

*Abstract.* The issue of using renewable and low-emission hydrogen is topical in the context of reducing the consumption of fossil fuels in Poland in the energy sector, industry and transport, and the transition towards a less environmentally burdensome economy. The article indicates the activities of the government and industry in the field of hydrogen use, and scientific publications in this field. The geological-economic aspects of underground hydrogen storage are presented, the main directions of future scientific activities in this field are outlined, and the tasks facing Polish geology in the context of underground hydrogen storage are presented.

**Keywords:** hydrogen strategy, underground hydrogen storage, geological and reservoir aspects, challenges for geology

Celem artykułu jest zaprezentowanie czytelnikom *Przeglądu Geologicznego* działań podejmowanych w Polsce w celu wykorzystania wodoru jako nośnika energii oraz geologiczno-złożowych aspektów dotyczących jego podziemnego magazynowania. Problematyka ta jest aktualna w kontekście ograniczania zużycia paliw kopalnych oraz przekształcania gospodarki w mniej uciążliwą dla środowiska, co jest jednym z priorytetów Unii Europejskiej (UE). Stawia to nowe wyzwania przed organami administracji rządowej i wymaga wprowadzenia uregulowań prawnych – w zakresie planowania badań naukowych ukierunkowanych na wykorzystanie wodoru, dotyczących również instytucji badawczych.

Zasoby paliw kopalnych, które dostarczają dzisiaj ok. 80% energii, są ograniczone i kiedyś ulegną wyczerpaniu. Co więcej, ich rozmieszczenie na świecie jest nierównomierne. Często są wykorzystywane do nacisków politycznych, a niekiedy są powodem otwartych konfliktów. Nie bez znaczenia jest negatywny wpływ spalania paliw kopalnych na klimat i środowisko. Wymienione fakty skłaniają rządy poszczególnych państw do dywersyfikacji źródeł energii, uniezależniania się od importu paliw, rozwoju energetyki i przemysłu z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii, a także do korzystania z innych nośników energii, takich jak wodór.

Wodór nadaje się do stosowania jako surowiec, paliwo lub nośnik czy magazyn energii. Może być wykorzystany na potrzeby dekarbonizacji procesów przemysłowych, szczególnie w tych sektorach gospodarki, w których ograniczenie emisji dwutlenku węgla jest trudne do osiągnięcia. Podczas jego spalania nie powstają emisje CO<sub>2</sub>. Jest on atrakcyjnym przekątnikiem energii, ponieważ charakteryzuje się możliwością elastycznego i efektywnego przekształcania energii i może być produkowany z zastosowaniem różnych technologii oraz źródeł energii. Intensywnie rozwijana w ostatnich latach technologia produkcji wodoru drogą elektrolizy ma zaletę prawie nieograniczonej dostępności do podstawowego surowca, jakim jest woda.

Współcześnie częściowo, a w 2050 r. całkowicie, wodór może zastąpić gaz ziemny w przemyśle chemicznym, metalurgicznym i transporcie, a w dalszej przyszłości

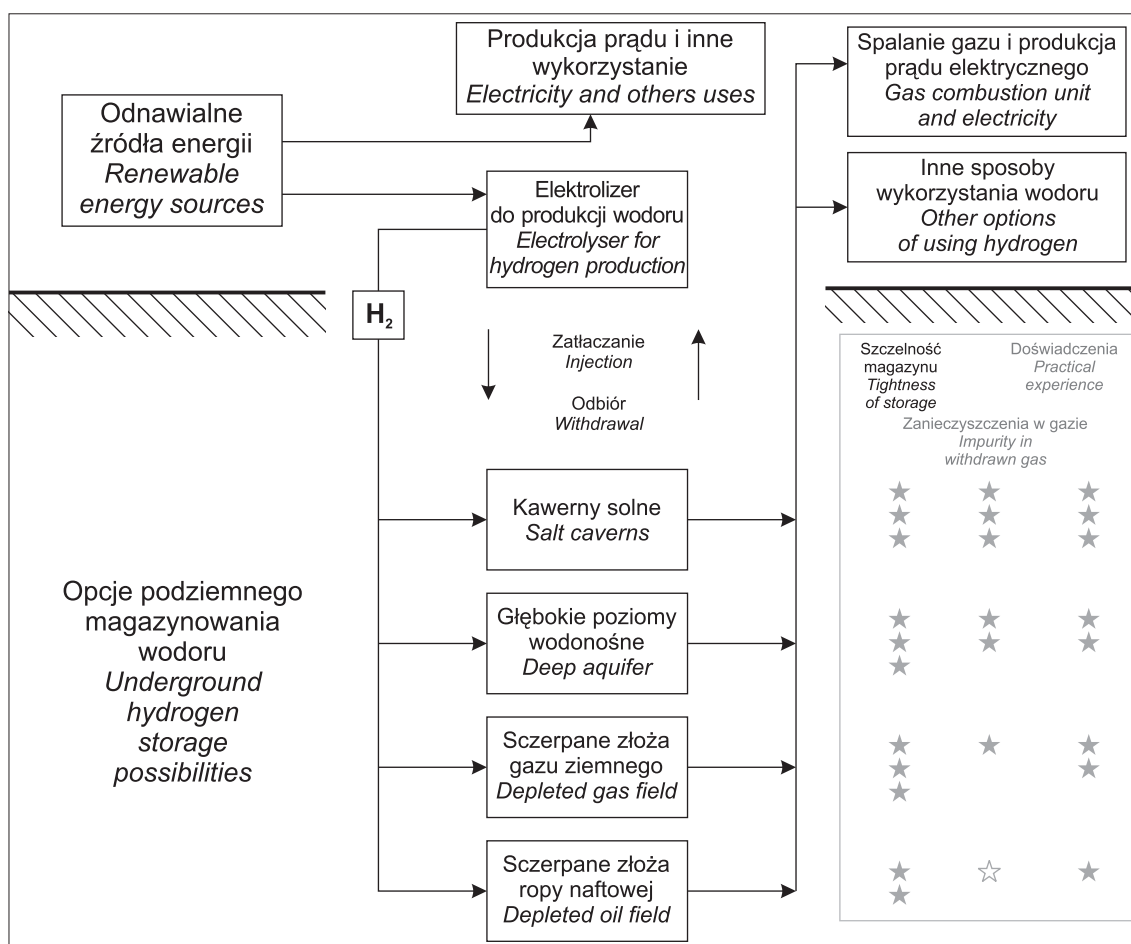
w sektorze lotniczym oraz morskim. Niezbędnym tego warunkiem będzie wytwarzanie wodoru w procesie, w którym energia wykorzystana do elektrolizy wody będzie pochodzić ze źródeł odnawialnych, czyli tzw. zielonego wodoru (tj. odnawialnego). Przejściowo będzie również produkowany niebieski wodór (tzn. wodór niskoemisyjny), wytwarzany z użyciem paliw kopalnych, przy czym dwutlenek węgla, emitowany w procesie jego produkcji, będzie unieszkodliwiany technologią wychwytywania i składowania tego gazu – w procesach CCS (*Carbon Capture and Storage*) i CCUS (*Carbon Capture Utilisation and Storage*).

Wodór odgrywa wiodącą rolę w realizacji zobowiązania UE, aby do 2030 r. znacząco ograniczyć poziom emisji dwutlenku węgla, a do 2050 r. osiągnąć neutralność pod względem emisji tego gazu, oraz w globalnych wysiłkach podejmowanych na rzecz wdrażania paryskiego porozumienia klimatycznego (COP21), zawartego w grudniu 2015 r. Gaz ten jest kluczowym ogniwem umożliwiającym osiągnięcie europejskiego zielonego Ładu i czystej transformacji energetycznej UE. Przewiduje się, że jego udział w koszyku energetycznym Europy do 2050 r. może wzrosnąć z obecnego poziomu poniżej 2% do 13–14% (COM/2020/301).

W sytuacji, gdy energetyka odnawialna, wykorzystująca głównie elektrownie wiatrowe i słoneczne, ma stać się w niedalekiej przyszłości istotnym źródłem energii, niezbędne będą systemy jej magazynowania i to wielomegawatowej mocy. Podziemne magazynowanie wodoru może okazać się interesującym rozwiązaniem w różnej skali czasowej, zarówno średnio-, jak i długoterminowej. W ciągu kilkunastu lat opcja geologicznego magazynowania wodoru może okazać się interesującym ekonomicznie rozwiązaniem wykorzystania nadmiarowej ilości energii elektrycznej pochodzącej z nieregularnej produkcji, typowej dla źródeł odnawialnych (ryc. 1).

Ostatnio Komisja Europejska (KE) opublikowała trzy komunikaty, w których przedstawiła strategię przejścia UE do 2030 i 2050 r. do gospodarki neutralnej dla klimatu. Są to: *Europejski Zielony Ład* (COM/2019/640); *Impuls dla gospodarki neutralnej dla klimatu: strategia UE dotycząca integracji systemu energetycznego* (COM/2020/299) oraz

<sup>1</sup> Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, ul. Wybickiego 7A, 31-261 Kraków, tarkowski@min-pan.krakow.pl



**Ryc. 1.** Koncepcja podziemnego magazynowania wodoru w strukturach geologicznych (Tarkowski, Czapowski, 2018 ze zmianami)

**Fig. 1.** The concept of underground hydrogen storage in geological structures (Tarkowski, Czapowski, 2018 with modifications)

*Strategia w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu* (COM/2020/301). Istotnym elementem realizacji tej strategii jest właśnie wodor.

W dokumencie *Europejski Zielony Ład*, opublikowanym w grudniu 2019 r., Komisja Europejska określiła sposoby osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2030 i 2050 r. Wskazano w nim, że należy stworzyć sektor energetyczny bazujący w dużej mierze na źródłach odnawialnych – zwiększając produkcję energii wiatrowej na obszarach morskich i jednocześnie wycofując się w szybkim tempie z wykorzystania węgla oraz obniżając emisyjność sektora gazu ziemnego (COM/2020/299). *Europejski Zielony Ład* wytycza drogę UE ku neutralności klimatycznej w 2050 r. poprzez zdecydowane zmniejszenie emisyjności wszystkich sektorów gospodarki oraz podwyższanie poziomu redukcji gazów cieplarnianych do 2030 r., natomiast w komunikacie UE *Impuls dla gospodarki neutralnej dla klimatu: strategia UE dotycząca integracji systemu energetycznego* (COM/2020/299) zaprezentowano strategię i zestaw działań, które mają zapewnić bardziej efektywny i bezpieczny system energetyczny. W strategii tej założono, że poszczególne państwa członkowskie będą korzystać z różnych ścieżek, w zależności od specyfiki sytuacji, środków finansowych i wyborów politycznych, odzwierciedlonych w odpowiednich planach dotyczących energii i klimatu. Jej istotnym elementem jest wykorzystanie odnawialnych oraz

niskoemisyjnych źródeł energii, w tym wodoru – m.in. zakłada się możliwość umieszczenia w pobliżu morskich farm wiatrowych elektrolizerów do produkcji wodoru (COM/2020/299).

W lipcu 2020 r. opublikowano kolejny komunikat – *Strategię w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu* (COM/2020/301). W strategii tej przyjęto, że wodor odnawialny (stanowiący priorytet w strategii do 2050 r.) i wodor niskoemisyjny (dopuszczony do stosowania w perspektywie krótko- i średnioterminowej) mogą się przyczynić do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych przed 2030 r. oraz do ożywienia gospodarki UE. Wykorzystanie wodoru jest kluczowym elementem tej strategii, prowadzącym do osiągnięcia gospodarki neutralnej dla klimatu, o zerowym poziomie emisji zanieczyszczeń w 2050 r. W komunikacie stwierdzono również, że produkcja wodoru odnawialnego stwarza wyjątkowe możliwości realizacji badań i innowacji, ugruntowujące wiodącą pozycję Europy w rozwoju technologii wykorzystania tego gazu.

Plan działania UE zakłada trzy etapy, w których ekosystem wodorowy w Europie będzie się rozwijał w kolejnych latach w różnym tempie, w poszczególnych sektorach i krajach (COM/2020/301):

1) 2020–2024 – celem strategicznym będzie zainstalowanie elektrolizerów o mocy co najmniej 6 GW, zasilanych

energią ze źródeł odnawialnych, które będą mogły wyprodukować w UE nawet 1 mln t odnawialnego wodoru.

2) 2025–2030 – celem strategicznym będzie zainstalowanie do 2030 r. elektrolizerów o mocy co najmniej 40 GW, zasilanych energią ze źródeł odnawialnych, które będą mogły wyprodukować w UE nawet 10 mln t odnawialnego wodoru.

3) 2030–2050 – technologie związane z wodorem odnawialnym powinny osiągnąć dojrzałość i być wdrażane na dużą skalę w celu dotarcia do wszystkich sektorów, w których trudno doprowadzić do obniżenia emisyjności.

## POLSKA DROGA DO WYKORZYSTANIA WODORU

W ostatnich latach obserwuje się w Polsce coraz większe zainteresowanie wykorzystaniem wodoru oraz jego podziemnym magazynowaniem. Znajduje to wyraz w działaniach podejmowanych przez organy administracji rządowej i przemysł oraz w publikacjach naukowych.

### Działania administracji rządowej i przemysłu

O znaczeniu wodoru dla polskiej gospodarki świadczą informacje medialne, przekazywane ostatnio zarówno przez stronę rządową, spółki, jak też instytucje naukowe. Pod koniec lipca 2020 r. ukazało się Rozporządzenie Rady Ministrów w sprawie ustanowienia pełnomocnika rządu do spraw gospodarki wodorowej w randze sekretarza stanu w Kancelarii Rady Ministrów (Rozporządzenie..., 2020). Jak zapisano w rozporządzeniu, do zadań tego pełnomocnika należy m.in.: *opracowywanie mechanizmów oraz kierunków rozwoju wykorzystania poszczególnych technologii wodorowych, w tym na potrzeby energetyki i transportu; analiza barier ograniczających rozwój technologii wodorowych i przedstawianie propozycji ich zniesienia; przedstawianie – w porozumieniu z Ministrem Klimatu oraz Ministrem Rozwoju – rekomendacji organom administracji rządowej oraz przekazywanie wniosków i opinii instytucjom i podmiotom zaangażowanym w realizację projektów i przedsięwzięć wykorzystujących technologie wodorowe; przygotowanie propozycji rozwiązań legislacyjnych eliminujących stwierdzone bariery oraz wspierających popularyzację wykorzystania technologii wodorowych.* Powołano też międzyresortowy zespół ds. wodoru, który ma wypracować krajową strategię wodorową. Członkowie tego zespołu zakładają, że działania w tym zakresie należy rozpocząć od wodoru produkowanego ze źródeł konwencjonalnych i nie czekać na zielony wodór produkowany z wykorzystaniem energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych (Gramwzielone.pl, 2020).

Zagadnienia *Polskiej Strategii Wodorowej do 2030 r.* stanowiły główny temat konferencji, która odbyła się 7 lipca 2020 r. w Warszawie. Przedstawiciele resortu klimatu oraz najważniejszych spółek sektora energetycznego i transportowego podpisali list intencyjny o ustanowieniu partnerstwa na rzecz budowy gospodarki wodorowej i zawarcia sektorowego porozumienia wodorowego. Minister klimatu i środowiska poinformował o rozpoczęciu prac nad polską strategią wodorową, której główne cele polegają na: *stworzeniu łańcucha wartości niskoemisyjnych technologii wodorowych, wzmocnieniu roli wodoru w budowaniu polskiego bezpieczeństwa energetycznego, wdrożeniu wodoru*

*jako paliwa transportowego, przygotowaniu nowych regulacji dla rynku wodoru* (Strategia..., 2020). Prace w tym zakresie prowadzi Departament Elektromobilności i Gospodarki Wodorowej Ministerstwa Klimatu i Środowiska, który przygotowuje prawo i strategię wodorową. Prace koordynuje pełnomocnik rządu do spraw gospodarki wodorowej (Jakóbiak, 2020).

Ministerstwo Klimatu i Środowiska pracuje nad projektem *Polskiej Strategii Wodorowej do roku 2030 z perspektywą do 2040 r.* (PSW). Obecnie zakończyły się konsultacje publiczne PSW, rozpoczęte w połowie stycznia 2021 r. (Ministerstwo Klimatu, 2021). Strategia ta jest częścią szerszych działań polskiego rządu w zakresie wsparcia technologii wodorowych. Dokument porusza aspekty produkcji, przesyłu, magazynowania i wykorzystania wodoru, biorąc pod uwagę uwarunkowania prawne na poziomie polskim i unijnym oraz proponując zrównoważone systemy wsparcia i mierzalne cele. Wskazano 6 koniecznych do osiągnięcia celów, wiodących do zrealizowania wizji przedstawionej w PSW: wdrożenie technologii wodorowych w energetyce, wykorzystanie wodoru jako paliwa alternatywnego w transporcie, wsparcie dekarbonizacji przemysłu, produkcja wodoru w nowych instalacjach, sprawna i bezpieczna dystrybucja wodoru, stworzenie stabilnego otoczenia regulacyjnego (Projekt..., 2021). W przygotowywanym projekcie PSW zapisano m.in. (co jest istotne dla geologii): *W horyzoncie najbliższych 5 lat podstawowym celem na rzecz wdrożenia wodoru w polskiej energetyce jest wsparcie badań i rozwoju. Warunkiem koniecznym powstania pierwszych instalacji jest stworzenie odpowiednich ram prawnych i wsparcia działań badawczych oraz wdrożeniowych. Dodatkowo w krótkiej perspektywie czasowej prowadzone będą badania w zakresie rozwoju metod magazynowania wodoru. Wykonana będzie analiza techniczna i możliwości zagospodarowania wielkoskalowych kavern solnych pod magazynowanie wodoru, co pozwoli na ich wykorzystanie w przyszłości.* Działania te wpisują się w opracowany w 2019 r. *Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021–2030* (KPEiK). Zadaniem planu jest wdrażanie zaleceń unii energetycznej, celem zaś przygotowywanej obecnie PSW (planowany termin przyjęcia projektu przez RM to 2021 r.) jest realizacja tego postulatu poprzez wdrażanie nowoczesnych technologii wodorowych. PSW wpisuje się również w działania przedstawione w projekcie *Polityki Energetycznej Polski do 2040 r.* (Powermeetings, 2021).

W 2019 r. ukazał się raport Polskiego Instytutu Ekonomicznego pt. *Kierunki rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce* (Maj, Szpor, 2019) określający optymalne kierunki rozwoju energetyki wodorowej w naszym kraju. W pierwszym rozdziale autorzy raportu rozważyli możliwości krajowej produkcji lub importu wodoru z uwzględnieniem zmniejszenia emisyjności procesów produkcyjnych. W kolejnym przeanalizowali możliwości magazynowania wodoru i rozwiązania optymalne dla Polski w tym zakresie, w tym podziemne magazynowanie wodoru. W trzecim zaprezentowali analizę rozwiązań w dziedzinie przesyłu i dystrybucji wodoru, koncentrując się na dopuszczalnej skali mieszania wodoru z gazem ziemnym. Na koniec opisali potencjalne zastosowania wodoru w gospodarce, wskazując te najbardziej korzystne dla Polski.



*Wodór – czyste paliwo dla przyszłości* to nowy kompleksowy program wodorowy PGNiG, który wystartował 12.05.2020 r. Spółka rozpoczęła zatem prace zmierzające do wykorzystania wodoru w energetyce i sektorze motoryzacyjnym. W ramach programu będzie analizowana możliwość magazynowania wodoru i transportowania go siecią gazociągów. Firma planuje zarabiać na sprzedaży wodoru i usługach z tym związanych. Program składa się z kilku projektów – dotyczących m.in. produkcji zielonego wodoru, jego magazynowania i dystrybucji, a także wykorzystania w energetyce przemysłowej (*Badawcza stacja tankowania pojazdów wodorem; Wykorzystanie wodoru w energetyce przemysłowej; Analiza czystości wodoru i badania nad paliwami alternatywnymi; Produkcja wodoru z wykorzystaniem OZE; Badanie możliwości przesyłu wodoru z wykorzystaniem sieci dystrybucyjnych gazu ziemnego; Wykorzystanie podziemnych magazynów gazu ziemnego do magazynowania wodoru*). W ramach podprojektu o nazwie *InGrid – Power to Gas* w oddziale spółki w Odolanowie powstanie instalacja, w której w 2022 r. rozpocznie się produkcja zielonego wodoru (zasilana energią elektryczną wytwarzaną przez panele fotowoltaiczne). Centralne Laboratorium Pomiarowo-Badawcze PGNiG rozbuduje zaś swoją działalność analityczną, by stać się pierwszym w Polsce laboratorium (i jednym z niewielu w Europie) badającym czystość wodoru (PGNiG, 2020). Spółka *Gas Storage Poland* ogłosiła w marcu 2021 r. przetarg na wykonanie *Studium wykonalności instalacji dla podziemnego magazynu wodoru w lokalizacji KPMG Mogilno*.

Technologie wodorowe zostały również uwzględnione w planach działalności PKN *Orlen*. Spółka zamierza zająć znaczącą pozycję w energetyce wodorowej i transporcie tego gazu. Strategia Grupy *Orlen* do 2030 r. zakłada, że będzie ona liderem w transformacji energetycznej w Polsce i w regionie, wytwarzając energię ze źródeł nisko- i zeroemisyjnych. Planowane są pilotażowe magazyny energii oraz instalacje wodorowe przy odnawialnych źródłach energii na morzu i na lądzie (Grupa *ORLEN* Strategia 2030.pdf). Jak stwierdził prezes Grupy *Orlen*, do 2030 r. spółka zamierza osiągnąć poziom 2,5 GW mocy zainstalowanych w źródłach odnawialnych, z czego 1,7 GW zapewnią morskie farmy wiatrowe, natomiast 0,8 GW źródła lądowe – elektrownie wiatrowe i fotowoltaika. Istotnym elementem będzie zwiększenie produkcji biopaliw i paliw wodorowych (wPolityce.pl, 2020).

Grupa *Lotos* S.A. w konsorcjum z instytucjami badawczymi i badawczo-rozwojowymi oraz operatorem gazociągów przesyłowych *Gaz-System* S.A. zrealizowała w latach 2015–2017 projekt *HESTOR*, którego celem było zbadanie możliwości magazynowania w kawernach solnych wodoru uzyskanego z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii, a także dalsze jego wykorzystanie do celów energetycznych, technologicznych oraz jako paliwa w transporcie. W ramach projektu rozważano takie aspekty, jak: magazynowanie energii elektrycznej z OZE w postaci wodoru, jego transport i magazynowanie oraz wykorzystanie jako zeroemisyjnego paliwa do powtórnego wytworzenia energii elektrycznej w celu pokrycia zapotrzebowania szczytowego. Istotnym aspektem było określenie ekonomicznych warunków opłacalności projektu. W założeniach projektu wodór zostanie wytworzony na drodze elektrolizy wody, z wykorzystaniem nadmiarowej energii elektrycznej

z elektrowni wiatrowych i fotowoltaicznych (Maj, Szpor, 2019; Lotos, 2020a). W 2018 r. Grupa *Lotos* S.A. rozpoczęła również realizację projektu, którego celem jest uruchomienie sprzedaży wodoru o bardzo wysokiej czystości (99,999), spełniającego wymagania norm dla paliwa wodorowego przeznaczonego do zasilania ogniw paliwowych. *Lotos* zamierza wykorzystać swój potencjał i doświadczenie w dziedzinie wytwarzania wodoru, a także promować wodór jako zeroemisyjne paliwo przyszłości. W ramach projektu *PURE H2* analizuje zastosowanie wodoru także w innych branżach przemysłowych, np. w energetyce, przemyśle spożywczym, informatycznym itp. (Lotos, 2020b).

Instytut Nafty i Gazu – PIB od 1998 r. sprawdza możliwości magazynowania mieszanin gazowo-wodorowych. Przeprowadzono już prace studialne dotyczące zakresu badań i modeli wyeksploatowanych złóż gazu ziemnego i struktur zawadzionych. W planach jest wykonanie projektu adaptacji wyeksploatowanego złoża na magazyn metanowo-wodorowy lub, w zależności od potrzeb, na magazyn wodorowy. Projekt będzie dotyczył prac związanych z badaniami skał i płynów złożowych, geomechaniki i mikrobiologii (Such, 2020).

Zespół Elektrowni *Pątnów–Adamów–Konin* podpisał umowę na dostawę elektrolizera, który ma wytwarzać wodór z udziałem energii elektrycznej pozyskiwanej ze źródeł odnawialnych. W procesie elektrolizy ma być wykorzystywana energia odnawialna pochodząca ze spalania biomasy w Elektrowni *Konin*. *Konin* będzie pierwszym w Polsce miastem ogrzewanym energią pochodzącą wyłącznie ze źródeł odnawialnych. W pobliskiej gminie *Brudzew* jest planowana budowa farmy fotowoltaicznej, która ma powstać na zrekultywowanych terenach o powierzchni ok. 110 hektarów, uprzednio eksploatowanych górnictwo (Gramzielone.pl, 2020).

### Publikacje naukowe dotyczące podziemnego magazynowania wodoru

Artykuły opublikowane w ostatnich 8 latach w Polsce dotyczą trzech zasadniczych aspektów podziemnego magazynowania wodoru: wyboru i charakterystyki struktur geologicznych do magazynowania, magazynowania w kawernach solnych wyługowanych w złożach soli (pokładowych oraz w wysadach solnych) oraz magazynowania w głębokich poziomach wodonośnych.

Tarkowski (2017a) opisał wodór jako nośnik energii, wskazując na jego specyficzne właściwości fizykochemiczne wpływające na podziemne magazynowanie, przedstawił istotne wyniki badań w zakresie podziemnego magazynowania wodoru i określił specyfikę podziemnego magazynowania tego gazu. Scharakteryzował także potencjalne struktury geologiczne odpowiednie do różnych opcji podziemnego magazynowania wodoru (Tarkowski, 2017b). Do lokalizacji magazynów wodoru wytypował (Tarkowski, 2019):

- kawerny solne w permskich złożach soli na wyniesieniu *Łęby* i na monoklinie przedsubdeckiej oraz wysady solne na Niżu Polskim;
- szcerpane złoża ropy naftowej i gazu ziemnego na Niżu Polskim, w Karpatach oraz zapadliku przedkarpackim;
- głębokie poziomy wodonośne na obszarze Niżu Polskiego, gdzie wyznaczył liczne struktury antyklinalne

ne z poziomami zbiornikowymi w warstwach dolnej kredy i dolnej jury.

Na podstawie istotnych kryteriów geologicznych, technicznych i innych Tarkowski (2019) porównał różne opcje podziemnego magazynowania wodoru oraz nakreślił mapę drogową wdrożenia podziemnego magazynowania tego gazu. Podkreślił, że przed przystąpieniem do podziemnego magazynowania wodoru w dużej skali należy pokonać przeszkody geologiczne, inżynierskie, ekonomiczne, prawne i społeczne. Wskazał też, że konieczne będzie zrealizowanie licznych projektów badawczych i demonstracyjnych w taki sposób, aby można było zrozumieć procesy interakcji pomiędzy wodorem a środowiskiem skalnym, a także instalacją do jego przesyłu oraz magazynowania, oraz ocenić potencjalne zagrożenia. Kontynuując tematykę rozpoznania i wyboru struktur do podziemnego magazynowania wodoru, Lewandowska-Śmierchalska i in. (2018) zaproponowali zastosowanie do tego celu wielokryterialnej metody hierarchicznej analizy problemów decyzyjnych AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

Możliwości magazynowania wodoru w kawernach solnych w utworach cechsztynu w rejonie nadbałtyckim oraz wstępne informacje o prowadzonych pracach dotyczących magazynowania wodoru w kawernach solnych w Polsce przedstawił Chromik (2012, 2015, 2016). Wybrane wyniki modelowania procesów termodynamicznych związanych z magazynowaniem wodoru w kawernach solnych scharakteryzował Urbańczyk (2016). Ślizowski i in. ocenili możliwość magazynowania w polskich złożach soli kamiennej – w zależności od warunków geologiczno-górnictwowych i szczelności kawern solnych – gazu ziemnego (2017a) oraz wodoru (2017b). Opisali także efektywność magazynowania gazu ziemnego oraz wodoru w kawernach solnych (Ślizowski i in., 2017c). Natomiast Lankof i in. (2016) scharakteryzowali wykorzystanie kawern solnych do magazynowania energii. Na podstawie kryteriów geologiczno-złożowych Tarkowski i Czapowski (2018) oraz Czapowski i Tarkowski (2018) przeanalizowali możliwość wykorzystania niezagospodarowanych wysadów solnych w Polsce do podziemnego magazynowania wodoru. Analiza geologiczno-złożowa dotyczyła 27 wysadów solnych na obszarze Niżu Polskiego, rozpoznanych dotychczas pod kątem możliwości przeznaczenia na podziemne kawernowe magazyny wodoru. Uwzględniając kryteria geologiczno-złożowe wskazano 7 niezagospodarowanych dotychczas wysadów (Rogóźno, Damasławek, Lubień, Łanięta, Goleniów, Izbica Kujawska i Dębina) jako obiekty najbardziej odpowiednie do tego celu. Czapowski (2019) określił perspektywy lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach soli kamiennej górnego permu w Polsce. Z wykorzystaniem map pojemności magazynowej wodoru oraz map wartości energetycznej i wartości opałowej Lankof i Tarkowski (2020) dokonali oceny potencjału podziemnego magazynowania wodoru w pokładowych wystąpieniach soli kamiennej w SW Polsce. Rezultaty tych badań wskazały na duży potencjał magazynowania wodoru w kawernach solnych.

Możliwości sezonowego (cyklicznego) magazynowania wodoru w porowatych skałach głębokiego poziomu wodonośnego Suliszewo ocenili Luboń i Tarkowski (2020). Autorzy ci, wykorzystując modelowanie numeryczne i zakładając, że nie zostanie przekroczone ciśnienie szczelności oraz ciśnienie kapilarne, oszacowali maksymalną

ilość wodoru, jaka może być zatłoczona do podziemnego magazynu w określonej jednostce czasu, oraz pojemność struktury do magazynowania wodoru. Określili także możliwości optymalizacji pracy tego podziemnego magazynu. Wyniki modelowania wskazały, że podziemne magazynowanie wodoru w tym głębokim poziomie wodonośnym może się charakteryzować korzystnymi wskaźnikami odzysku gazu.

## GEOLOGICZNO-ZŁOŻOWE ASPEKTY PODZIEMNEGO MAGAZYNOWANIA WODORU

Do podziemnego magazynowania wodoru bierze się pod uwagę przydatność struktur geologicznych w skałach porowatych – np. poziomów wodonośnych oraz szczypanych złóż ropy naftowej i gazu ziemnego – a także kawern wylugowanych w soli kamiennej. Struktury w skałach porowatych powstały w sposób naturalny i występują np. w formie antyklinalnych wyniesień w głębokich poziomach wodonośnych lub pułapek geologicznych, w których były nagromadzone węglowodory, natomiast kawerny w solach zostały wytworzone wskutek działalności człowieka (Tarkowski, 2017a, b). Szczegółowa analiza uwarunkowań geologiczno-złożowych podziemnego magazynowania wodoru w skałach porowatych oraz solnych uwzględnia charakterystykę skał zbiornikowych i skał uszczelniającego nadkładu lub przeławień innych skał niesolnych, a także ich właściwości wpływające na zdolność magazynową, szczelność oraz pracę podziemnego magazynu (Kruck, Crotogino, 2013; Tarkowski, 2017a, b, 2019; Lewandowska-Śmierchalska i in., 2018; Tarkowski, Czapowski, 2018; Zivar i in., 2021). Istotne będą te czynniki, które w największym stopniu wpływają na magazynowanie gazów. Dotyczą one w pierwszej kolejności szczelności podziemnego magazynu (Gąska i in., 2012; Wei i in., 2016; Abdala i in., 2018; Wang i in., 2019), w dalszej oddziaływały geochemicznych (Crotofino i in., 2018; Yecta i in., 2018) i mikrobiologicznych (Panfilov, 2010; Touleukhanov i in., 2015; Hageman i in., 2016) z płynami złożowymi oraz matrycą skalną, jak również aspektów ekonomiki przedsięwzięcia (np. ilości gazu roboczego, gazu poduszkowego) oraz efektywności magazynowania (Gąska i in., 2012; Kruck i in., 2013; Mathos i in., 2019; Lankof, Tarkowski, 2020; Luboń, Tarkowski, 2020).

Bezpieczeństwo podziemnego przechowywania wodoru będzie podstawowym problemem rozpatrywanym w trakcie poszukiwania miejsca odpowiedniego do budowy jego magazynu. Zależy ono od efektywności zatrzymania gazu w magazynie i wiąże się z niewielkimi stratami powodowanymi przez jego wyciek. Brak migracji gazu w okresie przechowywania będzie świadczył o szczelności podziemnego magazynu i jego prawidłowym działaniu (Amid, 2016; Verga, 2018), dlatego jakość i szczelność skał bezpośredniego nadkładu (*cap rock*) podziemnego magazynu wodoru są szczególnie istotnymi kryteriami wyboru struktury geologicznej do jego budowy. Wodór jest gazem kłopotliwym do magazynowania, dlatego wybierając miejsce jego podziemnego przechowywania należy przyjąć największe obostrzenia. Charakteryzuje się on dużą ruchliwością i przenikalnością (Tarkowski, 2017a,b; 2019) i będzie dyfundował z matrycy skalnej ku powierzchni Ziemi (Abdalla i in., 2018). Wskazuje się, że najodpowiedniejsze warunki do jego magazynowania panują w kawernach

solnych (Kruck i in., 2013; Tarkowski, Czapowski, 2018; Czapowski, Tarkowski, 2019).

Dobrą szczelnością charakteryzują się szcerpane złoża gazu ziemnego (Chen, 2014; Wei i in., 2016). W przypadku złóż ropy naftowej, jeśli nie towarzyszy im gaz ziemny, nie ma pewności co do ich naturalnej szczelności, a jej potwierdzenie wymaga dodatkowych badań. Szczelność poziomów wodonośnych musi być potwierdzona licznymi badaniami, często kosztownymi. Występowanie w ich nadkładzie skał o słabej przepuszczalności nie gwarantuje szczelności magazynu lokowanego w takiej strukturze, ponieważ istotnie wpływa na nią obecność uskoków.

Stopień rozpoznania budowy geologicznej poszczególnych typów struktur geologicznych odpowiednich do lokalizacji magazynów wodoru jest zróżnicowany. Najlepiej rozpoznane pod kątem geologiczno-złożowym są szcerpane złoża węglowodorów. Złoża soli kamiennej są dość dobrze rozpoznane w obszarach jej eksploatacji. Natomiast rozpoznanie struktur antyklinalnych w poziomach wodonośnych wymaga zazwyczaj kosztownych badań (Lankof, Tarkowski, 2020).

Największą pojemnością magazynową cechują się przeważnie struktury w poziomach wodonośnych. Pojemność magazynową wyeksploatowanych złóż węglowodorów warunkuje wielkość złoża oraz stopień jego szcerpania. Pojemność magazynowa kawern solnych zależy od ilości wyługowanej soli i miąższości pokładu solnego (Lankof, Tarkowski, 2020).

Wybierając miejsce do podziemnego magazynowania wodoru należy uwzględnić geochemiczne i mikrobiologiczne oddziaływania tego gazu z matrycą skalną i wodami złożowymi. Oddziaływania te mogą mieć skutki pozytywne i negatywne, gdyż poprawiają lub pogarszają zbiornikowe właściwości zarówno podziemnego magazynu, jak i skał uszczelniających nadkładu. W szcerpanych złożach węglowodorów oddziaływanie magazynowanego wodoru z dwutlenkiem węgla może skutkować tworzeniem się metanu (Ebigio i in., 2013; Thaysen i in., 2020), co niekiedy stanowi pozytywny aspekt magazynowania. Reaktywność soli kamiennej jest niewielka, pomijając cienkie przeławicenia skał ilastych. Rozpuszczalność wodoru w wodzie jest znikoma. Oddziaływania mikrobiologiczne będą szczególnie istotne w skałach porowatych, ponieważ mogą prowadzić do pogorszenia się parametrów zbiornikowych skał czy też kolmatacji otworów zatłaczających gaz i odbierających go z magazynu.

Rozpatrując stronę ekonomiczną i techniczne uwarunkowania budowy oraz użytkowania magazynu, należy stwierdzić, że przystosowanie szcerpanego złoża węglowodorów do potrzeb podziemnego magazynowania wodoru generuje mniejsze nakłady finansowe niż budowa magazynów w poziomach wodonośnych czy w kawernach solnych, gdyż możliwe jest wykorzystanie infrastruktury takich złóż. Magazyny w kawernach solnych zajmują za to dużo mniejszą powierzchnię niż utworzone w innych opisanych w artykule strukturach, przez co łatwiej jest je monitorować i obsługiwać, również czas ich budowy jest krótszy. Natomiast solanka wytworzona w trakcie ługowania kawerny będzie stanowiła istotny problem – musi być usunięta w sposób przyjazny dla środowiska bądź też wykorzystana w przemyśle.

## PROPOZYCJA DZIAŁAŃ NA RZECZ PODZIEMNEGO MAGAZYNOWANIA WODORU W POLSCE

Polska ma korzystne uwarunkowania geologiczne do podziemnego magazynowania wodoru. Można w tym celu wykorzystać kawerny wyługowane w złożach soli, głębokie poziomy wodonośne oraz szcerpane złoża ropy naftowej i gazu ziemnego. Przed przystąpieniem do podziemnego magazynowania wodoru trzeba pokonać przeszkody geologiczne, inżynierskie, ekonomiczne, prawne i społeczne. W tym celu należy podjąć następujące działania:

□ zbudować bazę danych określającą możliwości geologicznego magazynowania wodoru w skali kraju, poprzez uwzględnienie w istniejących bazach danych (np. dotyczących składowania CO<sub>2</sub>) tych parametrów formacji zbiornikowych, jak i uszczelniających, które są istotne dla magazynowania wodoru. Umożliwi to ocenę warunków podziemnego magazynowania wodoru w skali kraju oraz wskazanie obszarów preferowanych do tego celu, a także wybranie odpowiednich źródeł energii odnawialnej.

□ na potrzeby podziemnego magazynowania wodoru w strukturach w skałach porowatych ocenić wpływ oddziaływań geochemicznych pomiędzy wodorem a skałami zbiornikowymi oraz skałami uszczelniającymi nadkładu, a w przypadku złóż soli – z solą kamienną i skałami towarzyszącymi (przeławiczenia ilaste, anhydrytowe itp.). Trzeba wziąć pod uwagę, że wodór będzie miał tendencję do gromadzenia się w pobliżu szczytu struktury magazynowej i będzie znacznie bardziej ruchliwy niż inne składniki gazowe, co zwiększa ryzyko jego migracji poza magazyn podziemny. Szczegółowego rozpoznania wymagają reakcje wodoru z minerałami występującymi w zbiorniku i jego nadkładzie, prowadzące do rozpuszczania oraz wytrącania się minerałów, przez co skutkujące zmianami porowatości i przepuszczalności skał.

□ zbadać pod kątem inżynierii złożowej skutki mieszaniny się gazów i płynów złożowych. Dotychczasowe doświadczenia w tym zakresie są niewielkie – na świecie gaz ziemny jest magazynowany w 700 kawernach solnych, a jedynie w 6 jest przechowywany wodór. Pewne doświadczenia wynikają również z magazynowania gazu miejskiego, składającego się w ok. 50–60% z wodoru oraz z dodatkowych składników, takich jak: CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> i N<sub>2</sub>.

□ sklasyfikować i ocenić ryzyko związane z budową podziemnych magazynów wodoru w odniesieniu do sfery mikrobiologicznej. Zatłaczanie wodoru wywoła lub przyspieszy mikrobiologiczne procesy metaboliczne. W wyniku kontaktu z dwutlenkiem węgla mogą one wpłynąć na zmniejszenie ilości magazynowanego wodoru lub też spowodować problemy z jego magazynowaniem.

□ przeprowadzić badania dotyczące materiałów odpornych na działanie wodoru (np. korozję wodorową i kruchość wodorową) w celu odpowiedniego zabezpieczenia odwiertów i infrastruktury mającej kontakt z wodorem w trakcie jego magazynowania. Należy też uwzględnić oddziaływanie siarkowodoru, które może prowadzić do znacznych szkód, np. takich jak zniszczenie infrastruktury przesyłowej wodoru w wyniku korozji.

□ określić zapotrzebowanie na podziemne magazynowanie wodoru w różnych horyzontach czasowych, włącznie do 2050 r., i wyznaczyć mapę drogową podziemnego magazynowania wodoru.



❑ ocenić wykonalność techniczną oraz rentowność podziemnych magazynów wodoru w wytypowanych strukturach – tj. w kawernie solnej, głębokiej warstwie wodonośnej oraz szcerpanym złożu węglowodorów.

❑ wprowadzić uregulowania prawne dotyczące podziemnego magazynowania wodoru do *Prawa geologicznego i górnictwa*.

❑ zbudować instalację badawczą do wielkoskalowego magazynowania odnawialnego wodoru w kawernie solnej współpracującej z elektrolizerem oraz źródłem OZE. Instalacja ta mogłaby stanowić laboratorium, którego celem byłoby opracowanie i rozwój technologii magazynowania wodoru w kawernach solnych.

Artykuł jest głosem w dyskusji dotyczącej projektu Ministerstwa Klimatu i Środowiska pt. Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do 2040 r. Prof. dr hab. inż. Radosław Tarkowski jest specjalistą w zakresie podziemnego składowania dwutlenku węgla i podziemnego magazynowania wodoru zatrudnionym w Instytucie Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w Krakowie. Obecnie uczestniczy w realizacji projektu *Hydrogen Storage In European Subsurface – HyStorIES* (01.01.2021– 31.12.2022), który dotyczy podziemnego magazynowania wodoru w Europie. Projekt ten otrzymał dofinansowanie w ramach przedsięwzięcia *Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking under grant agreement No 101007176*. To przedsięwzięcie otrzymuje wsparcie z unijnego programu badań i innowacji *Horyzont 2020* oraz z programu badawczego *Hydrogen Europe and Hydrogen Europe Research*.

## LITERATURA

- ABDALLA A.M., HOSSAIN S., NISFINDY O.B., AZAD A.T., DAWOOD M., AZAD A.K. 2018 – Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review. *Energy Convers. Manag.*, 165: 602–627.
- AMID A., MIGNARD D., WILKINSON M. 2016 – Seasonal storage of hydrogen in a depleted natural gas reservoir. *Int. J. Hydrogen Energy*, 41: 5549–5558.
- CHEN Z., ZHOU F., RAHMAN S.S. 2014 – Effect of Cap Rock Thickness and Permeability on Geological Storage of CO<sub>2</sub>: Laboratory Test and Numerical Simulation. *Energy Explor. Exploit.*, 32: 943–964.
- COM/2019/640 – Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady, Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów – Europejski Zielony Ład. COM/2019/640 final; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/LSU/?uri=COM:2019:640:FIN>
- COM/2020/299 – Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów – Impuls dla gospodarki neutralnej dla klimatu: strategia UE dotycząca integracji systemu energetycznego. COM/2020/299 final; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/pl/TXT/?uri=COM:2020:0299:FIN>
- COM/2020/301 – Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów – Strategia w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu. COM/2020/301 final; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0301>
- CROTOGINO F., SCHNEIDER G-S., EVANS D.J. 2018 – Renewable energy storage in geological formations. *J. Power Energy*, 232: 100–114.
- CHROMIK M. 2012 – Perspektywy wykorzystania kawern solnych dla celów magazynowania wodoru uzyskiwanego z okresowych nadwyżek energii elektrycznej z odnawialnych źródeł. [W:] XVII Międz. Sympozjum Solne *Qvo Vadis Sal*, pt. Poeksploatacyjne zagospodarowanie wyrobisk górnictw w złożach soli, Kraków–Wieliczka, 11–13 października 2012 r.: 67–68.
- 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 kamiennej w Polsce – wstępne informacje. *Prz. Solny*, 12: 11–18.
- CZAPOWSKI G. 2019 – Perspektywy lokowania kawern magazynowych wodoru w pokładowych wystąpieniach soli kamiennych górnego permu (cechsztyń) w Polsce – ocena geologiczna. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 477: 21–54.
- CZAPOWSKI G., TARKOWSKI R. 2018 – Uwarunkowania geologiczne wybranych wysadów solnych w Polsce i ich przydatność dla budowy kawern do magazynowania wodoru. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 472: 53–82.
- 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.
- GAŚKA K., HOSZOWSKI A., GMIŃSKI Z., KUREK A. 2012 – Monografia podziemnych magazynów gazu w Polsce. *Stow. Inż. Tech. Przemysłu Naftowego i Gazowniczego*, Oddz. Warszawa II.
- GRAMWZIELONE.PL, 04.09.2020 – Nowy rządowy pełnomocnik ds. gospodarki wodorowej; <https://www.gramwzielone.pl/trendy/103755/nowy-rzadowy-pelnomocnik-ds-gospodarki-wodorowej>
- GRUPA ORLEN STRATEGIA 2030.pdf
- HAGEMANN B., RASOULZADEH M., PANFILOV M., GANZER L., REITENBACH V. 2016 – Hydrogenization of underground storage of natural gas: Impact of hydrogen on the hydrodynamic and bio-chemical behavior. *Comput. Geosci.*, 20: 595–606.
- JAKÓBIK W. 2020 – Ministerstwo klimatu tworzy już prawo wodorowe. Ma być gotowe w trzecim kwartale 2021 roku. *BiznesAlert*, 12.10.2020 r.; <https://biznesalert.pl/ustawa-prawo-wodorowe-prace-ministerstwo-klimatu-trzeci-kwartal-2021-energetyka-wodor-innowacje>
- KRUCK O., CROTOGINO F., PRELICZ R., RUDOLPH T. 2013 – Overview on all Known Underground Storage Technologies for Hydrogen; [http://hyunder.eu/wp-content/uploads/2016/01/D3.1\\_Overview-of-all-known-underground-storage-technologies.pdf](http://hyunder.eu/wp-content/uploads/2016/01/D3.1_Overview-of-all-known-underground-storage-technologies.pdf)
- KRUCK O., CROTOGINO F. 2013 – Benchmarking of Selected Storage Options: 32; [http://hyunder.eu/wp-content/uploads/2016/01/D3.3\\_Benchmarking-of-selected-storage-options.pdf](http://hyunder.eu/wp-content/uploads/2016/01/D3.3_Benchmarking-of-selected-storage-options.pdf)
- LANKOF L., POLAŃSKI K., ŚLIZOWSKI J., TOMASZEWSKA B. 2016 – Possibility of Energy Storage in Salt Caverns. *AGH Drilling, Oil, Gas*, 33: 405–415.
- LANKOF L., TARKOWSKI R. 2020 – Assessment of the Potential for Underground Hydrogen Storage in Bedded Salt Formation. *Int. J. Hydrogen Energy*, 45: 19479–19492.
- LEWANDOWSKA-ŚMIERZCHALSKA J., TARKOWSKI R., ULIASZ-MISIAK B. 2018 – Screening and ranking framework for underground hydrogen storage site selection in Poland. *Int. J. Hydrogen Energy*, 43: 4401–4414.
- LOTOS 2020a – [https://www.lotos.pl/2491/poznaj\\_lotos/projekty\\_dofinansowane\\_przez\\_ue/hestor](https://www.lotos.pl/2491/poznaj_lotos/projekty_dofinansowane_przez_ue/hestor)
- LOTOS 2020b – [https://www.lotos.pl/2840/poznaj\\_lotos/projekty\\_dofinansowane\\_przez\\_ue/pure\\_h2\\_instalacja\\_oczyszczania\\_wodoru\\_i\\_infrastruktura\\_do\\_tankowania](https://www.lotos.pl/2840/poznaj_lotos/projekty_dofinansowane_przez_ue/pure_h2_instalacja_oczyszczania_wodoru_i_infrastruktura_do_tankowania)
- LUBOŃ K., TARKOWSKI R. 2020 – Numerical simulation of hydrogen injection and withdrawal to and from a deep aquifer in NW Poland. *Int. J. Hydrogen Energy*, 45: 2068–83.
- MAJ M., SZPOR A. 2019 – Kierunki rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce. Working Paper 7. *Polski Inst. Ekonom.*; [www.cire.pl/pokaz-pdf-%252Fp-lik-%252F2%252F2020%252Fp-lik-wp7.pdf](http://www.cire.pl/pokaz-pdf-%252Fp-lik-%252F2%252F2020%252Fp-lik-wp7.pdf)
- MATOS C.R., CARNEIRO J.F., SILVA P.P. 2019 – Overview of Large-Scale Underground Energy Storage Technologies for Integration of Renewable Energies and Criteria for Reservoir Identification. *J. Energy Storage*, 21: 241–258.
- MINISTERSTWO Klimatu, 14.01.2021 – Rozpoczęły się konsultacje publiczne projektu „Polskiej Strategii Wodorowej”; <https://www.gov.pl/web/klimat/rozpoczely-sie-konsultacje-publiczne-projektu-polskiej-strategii-wodorowej>
- PANFILOV M. 2010 – Underground Storage of Hydrogen: In Situ Self-Organisation and Methane Generation. *Transp. Porous Media*, 85: 841–865.
- POWERMEETINGS 2021 – <https://powermeetings.eu/tag/polska-strategia-wodorowa>
- PGNIG 12.05.2020 – Startuje nowy program wodorowy PGNiG; <http://pgnig.pl/aktualnosci/-/news-list/id/startuje-nowy-program-wodorowy-pgnig/newsGroupId/10184>
- PROJEKT uchwały Rady Ministrów w sprawie przyjęcia *Polskiej Strategii Wodorowej do roku 2030 z perspektywą do 2040 r. (PSW)*; <https://archiwum.bip.kprm.gov.pl/kpr/form/r80086714797772,Projekt-uchwaly-Rady-Ministrow-w-sprawie-przyjecia-Polskiej-Strategii-Wodorowej>
- ROZPORZĄDZENIE Rady Ministrów z dnia 24 lipca 2020 r. w sprawie ustanowienia Pełnomocnika Rządu do spraw gospodarki wodorowej. *Dz.U.* 2020, poz. 1290.
- STRATEGIA Wodorowa Polski do 2030 r. – [kierunekenergetyka.pl](http://kierunekenergetyka.pl), 08.07.2020 r.; <https://www.kierunekenergetyka.pl/artykul,77351,strategia-wodorowa-polski-do-2030-r.html>
- SUCH P. 2020 – Magazynowanie wodoru w obiektach geologicznych. *Nafta-Gaz*, 11: 794–798.
- ŚLIZOWSKI J., URBAŃCZYK K., CZAPOWSKI G., LANKOF L., SERBIN K., ŚLIZOWSKI K., TOMASZCZYK M., URBAŃCZYK K. 2011 – Możliwości magazynowania gazu ziemnego w polskich złożach soli kamiennej w zależności od warunków geologiczno-górnictw. *Wyd. IGSMIE PAN, Kraków*.

- ŚLIZOWSKI J., LANKOF L., URBAŃCZYK K., SERBIN K. 2017a – Potential capacity of gas storage caverns in rock salt bedded deposits in Poland. *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 43: 167–78.
- ŚLIZOWSKI J., SMULSKI R., NAGY S., BURLIGA S., POLAŃSKI K. 2017b – Tightness of Hydrogen Storage Caverns in Salt Deposits. *AGH Drilling, Oil, Gas*, 34: 397–409.
- ŚLIZOWSKI J., URBAŃCZYK K., ŁACIAK M., LANKOF L., SERBIN K. 2017c – Efektywność magazynowania gazu ziemnego i wodoru w kavernach solnych. *Przem. Chem.*, 96: 994–998. d
- TARKOWSKI R. 2017a – Wybrane aspekty podziemnego magazynowania wodoru. *Prz. Geol.*, 65: 282–291.
- TARKOWSKI R. 2017b – Perspectives of using the geological subsurface for hydrogen storage in Poland. *Int. J. Hydrogen Energy*, 42: 347–355.
- TARKOWSKI R. 2019 – Underground Hydrogen Storage: Characteristics and prospects. *Renew. Sust. Energy Rev.*, 105: 86–94.
- TARKOWSKI R., CZAPOWSKI G. 2018 – Salt domes in Poland – potential sites for hydrogen storage in caverns. *Int. J. Hydrogen Energy*, 43: 21414–21427.
- THAYSEN E.M., MCMAHON S., STROBEL G., BUTLER I., NGWENYA B., HEINEMANN N., WILKINSON M., HASSANPOURYOUBAND A., MCDERMOTT CH., EDLMANN K. 2020 – Estimating Microbial Hydrogen Consumption in Hydrogen Storage in Porous Media as a Basis for Site Selection. *Int. J. of Hydrogen Energy*. doi: 10.31223/X5HC7H
- TOLEUKHANOV A., PANFILOV M., KALTAYEV A. 2015 – Storage of Hydrogenous Gas Mixture in Geological Formations: Self-Organization in Presence of Chemotaxis. *Int. J. Hydrogen Energy*, 40 (46), 15952–15962.
- URBAŃCZYK K. 2016 – Wybrane aspekty termodynamiczne magazynowania wodoru w kavernach solnych. *Prz. Solny*, 12: 92–97.
- VERGA F. 2018 – What’s Conventional and What’s Special in a Reservoir Study for Underground Gas Storage. *Energies*, 11: 1245. doi: 10.3390/en11051245
- WANG L.Y.U., ZHANG M.A. 2019 – A Risk Assessment Model of Coalbed Methane Development Based on the Matter-Element Extension Method. *Energies*, 12 (20): 3931; <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/20/3931>
- WEI L., JIE C., DEYI J., XILIN S., YINPING L., DAEMEN JJK., CHUNHE Y. 2016 – Tightness and suitability evaluation of abandoned salt caverns served as hydrocarbon energies storage under adverse geological conditions (AGC). *Appl. Energy*, 178: 703–20.
- wPoliyce.pl 2020 – <https://wpolityce.pl/gospodarka/528732-obajtek-od-transformacji-energetycznej-nie-ma-odwrotu>
- YEKTA A.E., PICHAVANT M., AUDIGANE P. 2018 – Evaluation of geochemical reactivity of hydrogen in sandstone: Application to geological storage. *Appl. Geochemistry*, 95: 182–94.
- ZIVAR D., KUMAR S., FOROPOZESH J. 2021 – Underground hydrogen storage: A comprehensive review. *Int. J. Hydrogen Energy* (w druku); <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.138>

Praca wpłynęła do redakcji 13.01.2021 r.

Akceptowano do druku 12.03.2021 r.