

Magazynowanie wodoru w szcerpanych złożach gazu ziemnego

Hydrogen storage in depleted natural gas fields

Mariusz Miziołek, Bogdan Filar, Tadeusz Kwilosz

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: W artykule podjęto próbę oceny możliwości magazynowania w szcerpanych złożach gazu ziemnego zapadliska przedkarpackiego mieszaniny składającej się z gazu ziemnego (ok. 90%) i wodoru (do 10%). Problem magazynowania wodoru pojawi się w Europie, a zapewne też i w Polsce w nieodległym czasie, gdyż zgodnie z dyrektywą wodorową ogłoszoną przez UE w 2020 r. wodór produkowany z nadwyżek energii wytwarzanych przez OZE będzie stopniowo zastępował paliwa kopalne. Część wodoru będzie używana na bieżące potrzeby, a część będzie magazynowana w zbiornikach napowierzchniowych oraz podziemnych. Podziemne magazyny wodoru (PMW) będą budowane w kawernach solnych oraz w szcerpanych złożach gazu ziemnego. Istniejące podziemne magazyny gazu (PMG) działają w Polsce m.in. w rejonie zapadliska przedkarpackiego – są to np. PMG Husów i PMG Brzeźnica, w których gaz jest magazynowany w piaskowcowych poziomach miocenu. W tym rejonie występuje też cały szereg szcerpanych horyzontów gazowych, które mogą być wykorzystane w przyszłości jako potencjalne magazyny gazu ziemnego i wodoru. Dla potrzeb artykułu wybrano jeden z takich poziomów zbiornikowych, reprezentujący złożę mioceńskie, i przeprowadzono szczegółową analizę jego parametrów geologiczno-złożowych istotnych dla magazynowania wodoru. Zestaw analizowanych parametrów sprecyzowano na podstawie literatury oraz przyjętych ogólnie kryteriów wyboru struktury na potrzeby utworzenia PMG. Analizowane parametry skał magazynowych i uszczelniających dotyczyły: ich składu mineralogicznego i petrofizycznego, składu chemicznego gazu rodzimego oraz wód złożowych, oceny parametrów petrofizycznych skał, budowy strukturalnej poziomów zbiornikowych i uszczelniających, warunków mikrobiologicznych złoża. Dokonano też oceny zjawisk fizycznych, które będą lub mogą być efektem magazynowania wodoru, takich jak np.: proces dyfuzji, mieszanie się gazów i ich ewentualna segregacja oraz możliwość tworzenia się „języków” i „palców wodorowych”. W artykule podano również przykłady magazynów wodoru działających na świecie. Szczegółowo przedstawiono wyniki doświadczalnego podziemnego magazynowania wodoru w Austrii oraz Argentynie. W obu przypadkach projekty były realizowane w ostatnich latach. Szczególnie ważny dla niniejszej pracy był projekt austriacki *Underground Sun Storage* zrealizowany w Pilsbach w Austrii. Projekt ten jest istotny, gdyż proces magazynowania wodoru został przeprowadzony w podobnych do obszaru zapadliska przedkarpackiego utworach molasowych. Wyniki analiz wytypowanych poziomów zbiornikowych dają podstawę do pozytywnej rekomendacji szcerpanych złóż gazu ziemnego na obszarze zapadliska do celów podziemnego magazynowania wodoru. Jednocześnie jednak zwraca uwagę fakt małej liczby badań istotnych dla podjęcia decyzji o magazynowaniu wodoru w strukturach szcerpanych złóż gazu, dlatego konieczne będzie przed wydaniem takiej decyzji zaplanowanie i przeprowadzenie niezbędnego zakresu badań i analiz. Innym bardzo istotnym elementem będzie też dokonanie przeglądu i analizy stanu technicznego istniejących odwiertów, w tym stanu ich zacementowania oraz analizy materiałoznawczej.

Słowa kluczowe: podziemny magazyn gazu (PMG), podziemny magazyn wodoru (PMW), wodór.

ABSTRACT: This paper presents the possibility of storing a mixture of natural gas (approx. 90%) and hydrogen (up to 10%) in depleted natural gas fields in the Carpathian Foredeep. The problem of hydrogen storage will arise in Europe, and probably also in Poland, in the near future. In accordance with the hydrogen directive announced by the EU in 2020, hydrogen produced from surplus energy from renewable energy sources is going to gradually replace fossil fuels. A part of the hydrogen will be used for current needs, and some will be stored in the surface and underground reservoirs. Underground hydrogen storage (UHS) facilities will be built in salt caverns and in depleted natural gas fields. The underground gas storage (UGS) facilities operate in Poland, e.g. in the area of the Carpathian Foredeep, (for example UGS Husów and UGS Brzeźnica), where gas is stored in the Miocene sandstone levels. This region is reach in depleted gas horizons that may be used in the future as a potential natural gas and hydrogen storage facilities. In this article, one of such reservoir horizons, representing the Miocene gas field, was selected, and its detailed analysis of geological and reservoir parameters, important for hydrogen storage, was carried out. The set of analyzed parameters was specified on the basis of the literature and generally accepted criteria for selecting a structure for UGS facilities. The analyzed parameters of storage and sealing rocks concerned: their mineralogical and petrophysical composition, chemical composition of native gas and reservoir waters, evaluation of petrophysical parameters of rocks, structure of reservoir and sealing levels, as well as microbiological conditions of the deposit. A physical phenomena that will or may be the effect of hydrogen storage, such as the diffusion process, mixing of gases and their possible segregation, and

Autor do korespondencji: M. Miziołek, e-mail: mariusz.miziolek@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 24.11.2021 r. Zatwierdzono do druku: 14.03.2022 r.

the possibility of the formation of hydrogen “tongues and fingers” were also assessed. The article also presents examples of hydrogen storage facilities operating in the world. The results of experimental underground hydrogen storage in Austria and Argentina are presented in details. In both cases, the projects were implemented in recent years. The Austrian project *Underground Sun Storage* realized in Pilsbach, Austria, was particularly important for this work. This project is significant, because the hydrogen storage process was carried out in molasses formations similar to those of the Carpathian Foredeep. The results of the analyses of the selected reservoir levels support a positive recommendation of the depleted natural gas fields in the area of the Carpathian Foredeep for the purpose of the underground hydrogen storage. However, due to the fact that there is a small amount of research relevant to making a decision on the hydrogen storage in the structures of depleted gas fields, it is necessary to plan and conduct more research and analyses. Another very important element will be the review and analysis of the technical condition of the existing wells, including the condition of their cementing and material science analysis.

Key words: underground gas storage (UGS), underground hydrogen storage (UHS), hydrogen.

Wstęp

Wzrost zainteresowania wodorem jako paliwem energetycznym wynika z konieczności szukania paliw alternatywnych dla paliw kopalnych, których zasoby są ograniczone i w ciągu najbliższych kilku dziesięcioleci będą się zmniejszać. Innym, również istotnym czynnikiem jest problem zmian klimatycznych zachodzących na całym świecie, a łączonych z emisją gazów cieplarnianych, wynikającą z działalności człowieka. Dążenie do ograniczenia emisji prowadzi do szukania paliw nisko- lub bezemisyjnych, a takim paliwem jest właśnie wodór.

W lipcu 2020 roku Komisja Europejska ogłosiła strategię wodorową spójną z założeniami Europejskiego Zielonego Ładu (Komisja Europejska, 2020) oraz wcześniejszymi wytycznymi (np. Beghi, 1979). Strategia zakłada ograniczenie wykorzystania paliw kopalnych do produkcji energii i zastępowanie ich energią odnawialną (OZE), wytwarzaną głównie przez farmy wiatrowe (Donadei i Schneider, 2016), solarne oraz wodór, produkowany właśnie przy wykorzystaniu nadmiarowej energii pozyskanej z OZE.

Według planu rozwój produkcji i rozwój rynku wodoru będzie przebiegać kilkoma etapami, a mianowicie:

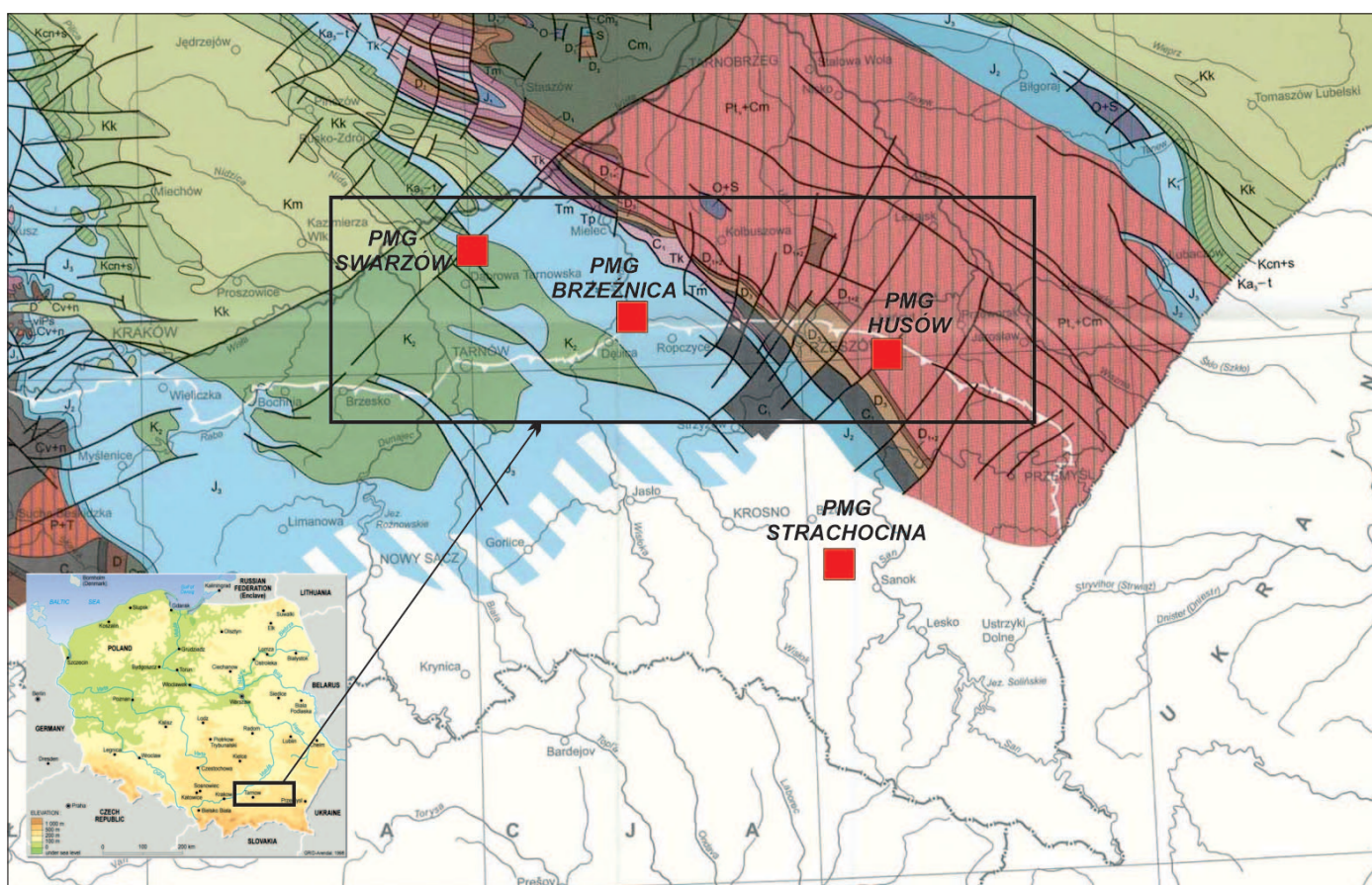
- w latach 2020–2024 powstaną elektrolizery o łącznej mocy 6 GW produkujące około 1 mln ton zielonego wodoru, co ma spowodować dekarbonizację istniejącej produkcji tzw. szarego wodoru, wykorzystywanego w przemyśle chemicznym, petrochemicznym i transporcie ciężkim;
- w latach 2025–2030 moc elektrolizerów wzrośnie do 40 GW, a produkcja wyniesie 10 mln ton zielonego wodoru. Przewiduje się, że w tej fazie produkcja wodoru stanie się konkurencyjna w stosunku do innych form produkcji; wzrost popytu na wodór będzie stymulowany przez odpowiednie polityki w odniesieniu do np. przemysłu metalurgicznego, transportu ciężarówek, transportu kolejowego itp.;
- w latach 2030–2050 produkcja wodoru osiągnie dojrzałość i konkurencyjność w stosunku do wodoru niskoemisyjnego i będzie on stosowany we wszystkich sektorach trudnych wcześniej do zdekarbonizowania.

Przedstawione plany strategii wodorowej zakładają, że oprócz rozwoju produkcji, przemysłu i dystrybucji zielonego wodoru konieczne będzie również rozwinięcie sektora usług magazynowania wodoru, i to zarówno jako źródła paliwa gazowego, jak też paliwa w postaci ciekłej. Zakładana specyfika produkcji wodoru z nadmiarowej energii wytworzonej przez OZE wymusza też opracowanie metod i miejsca magazynowania wodoru w postaci gazowej oraz płynnej. O ile stosunkowo nieduże ilości wodoru będą możliwe do magazynowania w instalacjach napowierzchniowych, to duże ilości tego gazu muszą być magazynowane w obiektach o dużej pojemności. Tego typu obiekty są już dostępne na świecie – są to podziemne magazyny gazu ziemnego (PMG) wytworzone w szcerpanych złożach gazu ziemnego w kawernach solnych oraz akiferach (należy tu wspomnieć, że naturalne złoża wodoru na świecie są bardzo rzadkie – Briere i Jerzykiewicz, 2016; Guélard et al., 2017; Deronzier i Giouse, 2020; Moretti i Webber, 2021). Wspomniane struktury mogą magazynować gaz ziemny w ilościach od milionów do dziesiątek miliardów metrów sześciennych. Jednak ze względu na różnice wynikające z nieco odmiennych parametrów fizyko-chemicznych cząsteczki wodoru od cząsteczki metanu konieczne jest dokonanie szeregu szczegółowych analiz dotyczących: szczelności struktur, składu chemicznego skał zbiornikowych i uszczelniających, możliwych reakcji chemicznych, stanu biologicznego złoża, procesów dyfuzji, procesów korozyjnych, wyposażenia wgłębnego odwiertów oraz części napowierzchniowej magazynu i innych.

Wystąpi też zapewne konieczność uruchomienia próbnych instalacji magazynowych, w których będą mogły zostać wykonane niektóre istotne badania.

Zgodnie z dotychczas prowadzonymi na świecie badaniami dotyczącymi magazynowania wodoru uważa się, że możliwe będzie budowanie podziemnych magazynów wodoru (Panfilov, 2016; Czapowski i Tarkowski, 2018; Tarkowski, 2017, 2019) w takich strukturach geologicznych jak:

- szcerpane złoża gazu ziemnego;
- wyługowane kawerny solne;
- struktury zawodnione.



Rysunek 1. Lokalizacja podziemnych magazynów gazu (PMG) w Polsce SE na tle jej budowy geologicznej, bez utworów kenozoiku
Figure 1. Locations of underground gas storage (UGS) facilities in SE Poland against its geological structure, without the Kenozoic deposits

Problem okresowego nadmiaru energii produkowanej przez OZE i metod jej zagospodarowania dotyczy również Polski.

Tak jak w innych krajach Europy, również w Polsce obserwuje się okresy dużej nadprodukcji energii z instalacji OZE, co wymusza ograniczenia ich produkcji – aż do wyłączenia niektórych instalacji. Problem ten będzie narastał, dlatego wymaga szukania rozwiązań w zakresie magazynowania nadwyżek energii, które można np. wykorzystać do produkcji zielonego wodoru w procesie elektrolizy i zatłaczania go do podziemnych struktur magazynowych, a w okresie zwiększonego zapotrzebowania wydobyć go z PMW (podziemny magazyn wodoru) i zatłoczyć do gazociągów lub przetworzyć na energię elektryczną.

W Polsce jedną z możliwości zmagazynowania wodoru będzie wykorzystanie do tego celu istniejących magazynów gazu, położonych m.in. na obszarze zapadliska przedkarpacciego i magazynujących gaz ziemny w poziomach piaskowcowych miocenu autochtonicznego (rysunek 1).

Mając na uwadze ten problem, w niniejszym artykule przedstawiono ocenę możliwości magazynowania wodoru w szcerpanych horyzontach gazu ziemnego zapadliska przedkarpacciego. Ocenę przeprowadzono dla wybranego poziomu

piaskowcowego o parametrach zbliżonych do poziomów magazynowych. W celu dokonania oceny wykonano analizę szeregu parametrów istotnych dla magazynowania wodoru, obejmującą:

- analizę składu mineralno-petrograficznego skał;
- analizę składu chemicznego gazu rodzimego oraz wód złożowych;
- analizę mikrobiologiczną złoża oraz procesów dyfuzyjnych wodoru w złożu;
- analizę geologiczno-złożową poziomu złożowego w zakresie budowy strukturalnej, wykształcenia litologicznego oraz parametrów petrofizycznych poziomu zbiornikowego i poziomów uszczelniających.

W artykule omówiono też przykłady magazynowania wodoru na świecie w XX i XXI wieku.

Przykłady magazynowania mieszaniny gazu i wodoru na świecie

Podziemne magazynowanie wodoru – a w rzeczywistości mieszanin gazowych: metanu, wodoru, CO₂ w różnym udziale procentowym lub samego wodoru – jest praktykowane na

świecie już od 1956 roku. Pierwsze zatłaczanie mieszaniny gazów w postaci gazu miejskiego (CH_4 , H_2 i CO_2) wykonano w strukturze zawodnionej w miejscowości Beynes we Francji (Blondin, 1994; Panfilov, 2016). Od tamtego czasu magazynowanie mieszanin gazów z wodorem prowadzono jeszcze w kilku innych miejscach na świecie.

W tabeli 1 zestawiono lokalizacje magazynów wodoru na świecie, które uzyskano na podstawie analizy literatury krajowej i zagranicznej (Smigan et al., 1990; Blondin, 1994; Juhlin

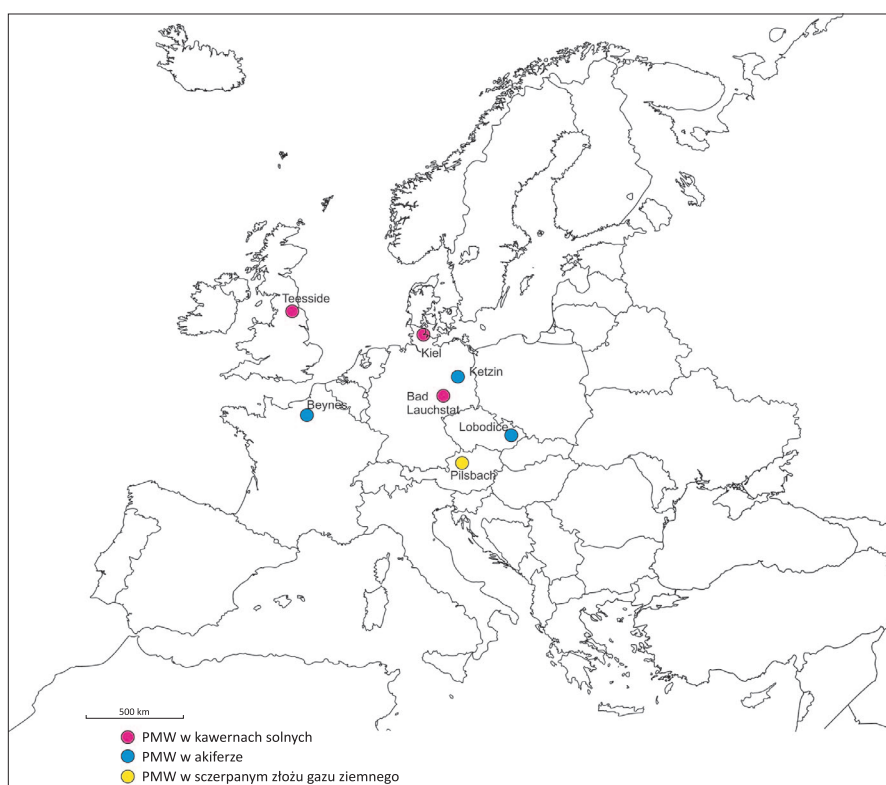
et al., 2007; Kopal et al., 2016; Panfilov, 2016; Pérez et al., 2016; DBI GUT, 2017, Cornot-Gandolphe, 2018; Tarkowski, 2019; Pilot Site Ketzin).

Zainteresowanie magazynowaniem wodoru wzrosło znacznie po 2011 roku, kiedy to Unia Europejska ogłosiła ograniczenie emisji CO_2 o 20% oraz wzrost udziału energii odnawialnej do 20% w roku 2020 (Komisja Europejska, 2011). Na rysunku 2 przedstawiono lokalizacje istniejących lub historycznych PMW w Europie.

Tabela 1. Lokalizacja PMW na świecie (historyczna i obecna)

Table 1. Location of UHS facilities in the world (historical or present)

Nazwa obiektu, kraj	Rok uruchomienia	Rodzaj struktury	Zawartość wodoru w gazie	Ciśnienie/temperatura	Pojemność robocza/geometryczna	Głębokość stropu
			[%]	[bar/°C]	[tys. m ³]	[m p.p.t.]
Bad Lauchstädt, Niemcy	b.d.	kawerna solna	b.d.	150/b.d.	b.d.	800
Kiel, Niemcy	1971	kawerna solna	60–64	80–100/b.d.	b.d./32,0	1330
Teesside, Wielka Brytania	1972	3 kawerny solne	ok. 95	50/b.d.	1000/(3 × 70)	400
Air Liquide, Texas, USA	b.d.	kawerna solna	95	>150/b.d.	b.d./600	850–1400
ConocoPhillips, Texas, USA	1980	kawerna solna 45 × 300 m	95	150/b.d.	30 000,0/580	850
Praxair, Texas, USA	b.d.	kawerna solna 45 × 300 m	b.d.	70–135/b.d.	b.d./566	850–1400
Beynes, Francja	1956–1972	akifer piaskowce	50	36,8 (max 48,7)/b.d.	385 000/1185	430
Ketzin, Niemcy	1964	akifer piaskowce	62	b.d.	b.d.	200–250
Lobodice, Czechy	1965	akifer piaskowce	50	90/34	b.d./400	430
Diodeme, Argentyna	2015	złoże gazu	10	10/50	750,0/b.d.	600
Pilsbach, Austria	2016	złoże gazu	10	30–78/40	1700/b.d.	1022



Rysunek 2. Istniejące lub historyczne podziemne magazyny wodoru (PMW) w Europie

Figure 2. Existing or historic underground hydrogen storage (UHS) facilities in Europe

Projekty magazynowania wodoru w świecie

W tabeli 1 przedstawiono projekty związane z magazynowaniem wodoru, które dotychczas były lub są realizowane na świecie.

Według danych zawartych w tabeli wodór lub mieszaniny gazów z wodorem były magazynowane w różnych strukturach geologicznych, takich jak np.:

- kawerny solne – Bad Lauchstädt (Niemcy), Kiel (Niemcy), Teesside (Wielka Brytania), Air Liquide (Texas, USA), ConocoPhillips (Texas, USA), Praxair (Texas, USA);
- struktury zawadnione – Beynes (Francja), Ketzin (Niemcy), Lobodice (Czechy);
- szcerpane złoża gazu ziemnego – Diodeme (Argentyna), Pilsbach (Austria).

Spośród przedstawionych projektów najciekawszym i jednocześnie najbliższym od strony geologicznej polskim magazynom położonym na obszarze zapadliska przedkarpacciego jest Underground Hydrogen Storage (UHS) Pilsbach w Austrii. Był to projekt realizowany w latach 2013–2017, a po jego ukończeniu został opracowany szczegółowy raport, który jest upubliczniony i dostępny w Internecie (RAG Austria AG..., 2020).

Poniżej przedstawiono krótki opis tego projektu.

Underground Sun Storage – Austria

Projekt został zrealizowany przez konsorcjum firm i placówek naukowych RAG Austria AG, Axiom Angewandte Prozesstechnik GesmbH, Verbund AG, Montanuniversität Leoben, Universität für Bodenkultur Wien, EnergieInstitut an der Johannes Kepler Universität Linz. Był on finansowany ze środków austriackiego funduszu klimatyczno-energetycznego (RAG Austria AG..., 2020).

Głównym celem projektu było przeprowadzenie próbnego magazynowania gazu ziemnego z 10-proc. domieszką wodoru w skałach zbiornikowych oligocenu, dokonanie obserwacji geologiczno-złożowych, wykonanie szeregu badań laboratoryjnych w zakresie geochemii, geofizyki, materiałoznawstwa, ruchu i przepływu płynów złożowych, szczelności, mikrobiologii, a także zastosowania technik membranowych do oczyszczania wodoru.

Podczas eksperymentu dokonano oceny ilościowej i jakościowej ryzyk związanych z magazynowaniem wodoru, uzupełnionej symulacją Monte Carlo. Zidentyfikowano oraz przeanalizowano zagrożenia, które ujawniły się podczas eksperymentu. W badaniach żadnego ze zdefiniowanych zagrożeń nie uznano za istotne.

Zdefiniowano najważniejsze elementy systemu technologicznego. Zostały też wykonane analizy systemu prawnego oraz analizy ekonomiczne, które wykazały, że przy tej skali eksperymentu proces jest nieopłacalny.

Projekt został zrealizowany w dwóch etapach:

- etap pierwszy obejmował badania laboratoryjne, które miały wykazać, czy budowa magazynu wodoru jest możliwa;
- etap drugi dotyczył wykonania małego magazynu w terenie, który w jak największym stopniu oddawałby warunki geologiczno-złożowe dużych magazynów gazu należących do firmy RAG; do magazynu miała być zatłaczana mieszanina gazów: 90% CH₄ i 10% H₂.

Projekt terenowy został zrealizowany na obszarze zapadliska przedalpejskiego (Molassezone) w miejscowości Pilsbach. Do magazynowania wybrano horyzonty piaskowcowe wieku oligoceńskiego, należące do serii Heller i Purchkirchner.

W tabeli 2 przedstawiono niektóre parametry tego podziemnego magazynu gazu ziemnego i wodoru.

Tabela 2. Parametry podziemnego magazynu gazu ziemnego i wodoru Pilsbach (Austria)

Table 2. Parameters of the underground gas and hydrogen storage facility in Pilsbach (Austria)

Parametry magazynowe złoża	Wielkość parametru
Maksymalne ciśnienie	107 bar
Temperatura	40°C
Głębokość	1027 m
Pojemność czynna	1,7 mln m ³
Pojemność całkowita	6,2 mln m ³
Elektrolizer	
Moc elektrolizera	500 kW
Wydajność H ₂ elektrolizera	100 m ³ /h

W schemacie technologicznym PMW Pilsbach występują następujące elementy:

- elektrolizer o mocy 600 kW, 100 m³/h wodoru;
- jednostka membranowa do wyłapywania H₂;
- kompresor, jednostka trzystopniowa, o napędzie elektrycznym i mocy 130 kW;
- elektrownia fotowoltaiczna o mocy 2,3 kWp (kilowatopik);
- system monitorująco-kontrolny;
- otwór zatłaczająco-odbiorczy;
- podziemny horyzont magazynujący;
- chromatograf do analizy składu gazu;
- mixer statyczny do mieszania gazu magazynowego i gazociągowego;
- stacja trafo 30 kV, 1,1 MW.

W trakcie próby terenowej eksploatacji magazynu można wyróżnić trzy etapy:

- 1) etap zatłaczania gazu – 3 miesiące;
- 2) etap stójki – 4 miesiące;
- 3) etap odbioru gazu – 3 miesiące.

W etapie zatłaczania do magazynu wtłoczono 1,22 mln m³ gazu o składzie: niemal 10% H₂ i 90% CH₄. Dokładnie wodoru

zatłoczono 115 444 m³ (czyli 9,4% całości gazu). Z magazynu odebrano natomiast 1,24 mln m³ gazu, z czego wodór stanowił 94 549 m³, a więc w złożu pozostało go 20 895 m³. Według analizy chromatograficznej oprócz H₂ i CH₄ w gazie wykryto inne składniki, takie jak: CH₂: 0,22–0,1%, azot: 0,48–0,45%, etan: 0,49–0,39%, propan: 0,3–0,13%, C₄: 0,014–0,013%, siarka całkowita 0%. Podczas odbioru gazu zawartość wodoru stopniowo spadała, tak że w końcowej fazie jego zawartość w gazie odbieranym obniżyła się do około 3%. Zmniejszanie zawartości wodoru w gazie odbieranym wskazuje na to, że podczas procesu magazynowania w złożu zachodzi proces mieszania się gazu rodzimego oraz zatłaczanego.

Według badań mikrobiologicznych przeprowadzonych na próbkach solanki, pobranych z głębokości około 1200 m w latach 2013–2017 (pięciokrotny pobór), wykryto w nich zespół bakterii składających się z:

- bakterii fermentacyjnych;
- bakterii redukujących siarkę (SRB);
- bakterii metanogennych.

W kolejnych próbkach pobieranych ze złoża nie stwierdzono istotnych różnic, dominują bakterie metanogenne – 60%. Nie stwierdzono procesu acetogenezy.

W trakcie eksploatacji magazynu wystawiono na działanie gazu różne elementy wyposażenia odwiertów oraz wyposażenia naziemnego. Nie wykryto żadnych uszkodzeń tych elementów.

Badania geofizyczne stanu zacementowania rur CBL i USIT wykonane w odwiercie również nie wykazały żadnych uszkodzeń płaszcza cementowego.

Innym ciekawym projektem w ostatnim czasie był *Underground Storage and Methanation*, realizowany przez firmę Hychico w Patagonii w Argentynie w 2015 roku (Pérez et al., 2016). Jego celem była produkcja wodoru w procesie elektrolizy przeprowadzonej za pomocą energii wytworzonej przez farmę wiatrową. Wodór po zmieszaniu z metanem w stosunku 10%:90% był zatłaczany do szcerpanego złoża gazu ziemnego. Jako podziemny poziom magazynowy wybrano szcerpane złożo ropno-gazowe, w którym skałą zbiornikową są piaskowce glaukonitowe pochodzenia morskiego, występujące w basenie Golfo de San Jorge. Wodór wytwarzano w odległości 2,3 km od złoża, dlatego był przesyłany gazociągiem zbudowanym z wielowarstwowych rur polimerowych.

Projekt realizowano trzyetapowo:

- etap I – sprawdzenie właściwości i szczelności struktury poprzez zatłoczenie gazu ziemnego z wodorem jako znacznikiem do złoża, do ciśnienia 26,5 bar;
- etap II – badania zmian właściwości skał zbiornikowych podczas magazynowania gazu ziemnego z wodorem o zawartości do 10% i ciśnieniu 10 bar;
- etap III – sprawdzenie szczelności zbiornika pod pełnym ciśnieniem 26,5 bar i przy zawartości 10% H₂.

W trakcie magazynowania pobierano próbki gazu i wody złożowej w celu stwierdzenia ewentualnych zmian zachodzących w złożu. Badania dotyczyły też oddziaływania wodoru na materiały w urządzeniach na- i podpowierzchniowych.

Parametry złoża były następujące:

- skała zbiornikowa: piaskowce glaukonitowe przykryte utworami ilastymi;
- głębokość [m]: 815;
- ciśnienie pierwotne [bary]: 26,5;
- objętość gazu pierwotnego pozostałego w złożu [m³]: 750 000;
- średnia miąższość [m]: 2,5;
- porowatość [%]: 25;
- przepuszczalność [mD]: 500;
- nasycenie wodą [%]: 55;
- temperatura [°C]: 55.

Po zakończeniu próbnego magazynowania wodoru w złożu zrealizowano w nim kolejny projekt dotyczący pilotażowej metanizacji mieszaniny gazów. Miał on na celu określenie możliwości wytwarzania metanu w mieszaninie: gaz ziemny, CO₂ i H₂ z wykorzystaniem bakterii metanogennych. W tej części projektu przeprowadzono badania dotyczące: składu gatunkowego drobnoustrojów metanogennych, temperatury, pH, warunków redox, zasolenia, obecności metali i substancji organicznych. Pierwsze wyniki badań przedstawione w literaturze wskazują, że w złożu zachodzi proces metanizacji (Pérez et al., 2016).

Oprócz omówionych powyżej projektów, których efektem było uruchomienie instalacji pilotażowych w Argentynie i Austrii, prowadzono w wielu państwach prace studialne, laboratoryjne i symulacje dotyczące magazynowania wodoru w szcerpanych złożach gazu ziemnego, między innymi w Niemczech, Francji, Holandii itp. Również w Polsce były w tym zakresie pewne prace studialne, dotyczące również wykorzystania złóż i wysadów solnych (Nowak et al., 2010; Ślizowski et al., 2011; Tarkowski, 2017, 2019; Czapowski i Tarkowski, 2018; Such, 2020).

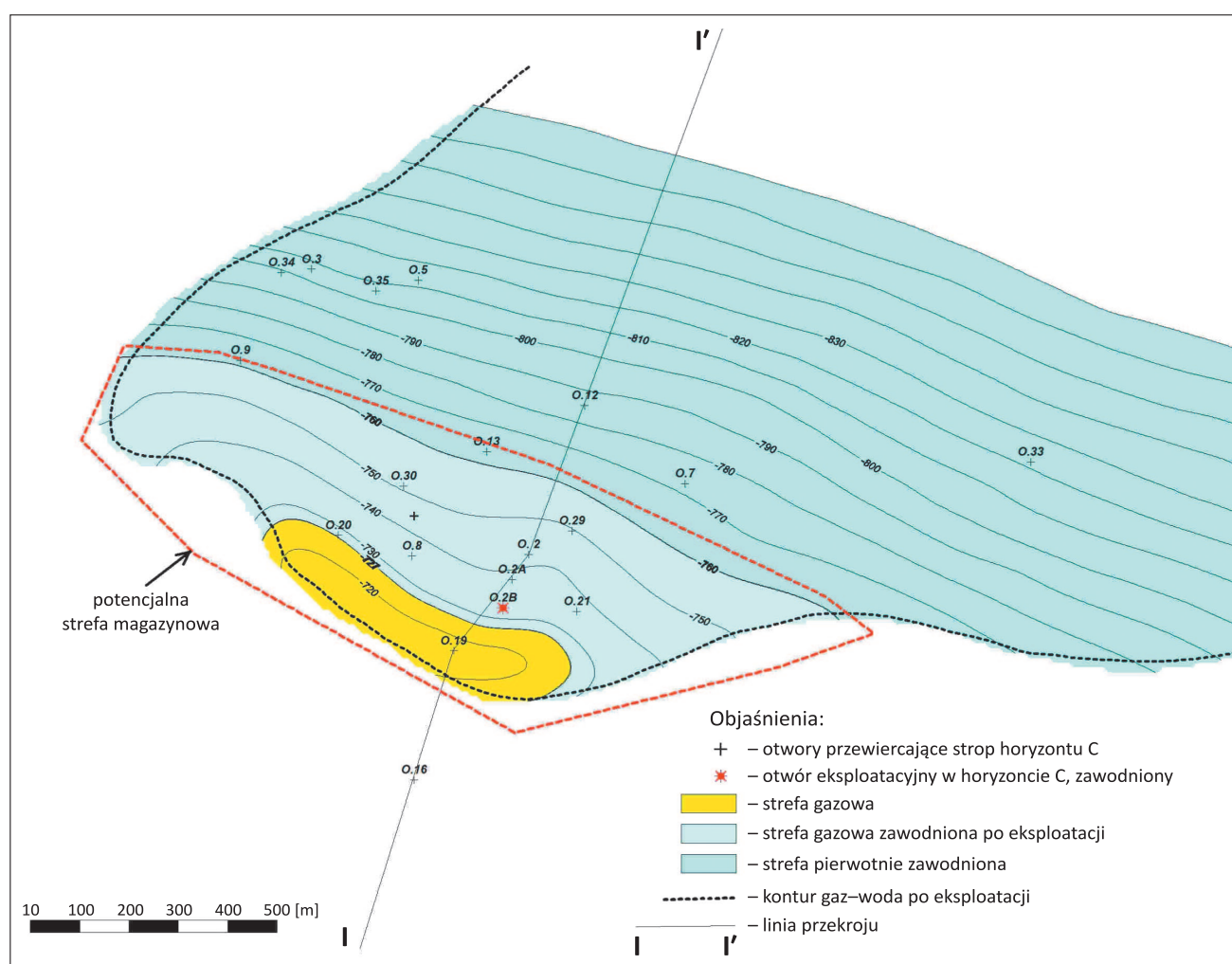
Kryteria geologiczno-złożowe konieczne do spełnienia przez poziom magazynowy pod kątem magazynowania w nim wodoru w postaci mieszaniny z gazem ziemnym

Oprócz warunków koniecznych, jakie ma spełnić poziom zbiornikowy do magazynowania gazu ziemnego, musi on również w przypadku wodoru spełniać dodatkowe warunki wynikające z cech fizyko-chemicznych cząsteczki wodoru H₂. Konieczne jest rozpoznanie lub uszczegółowienie danych w następującym zakresie:

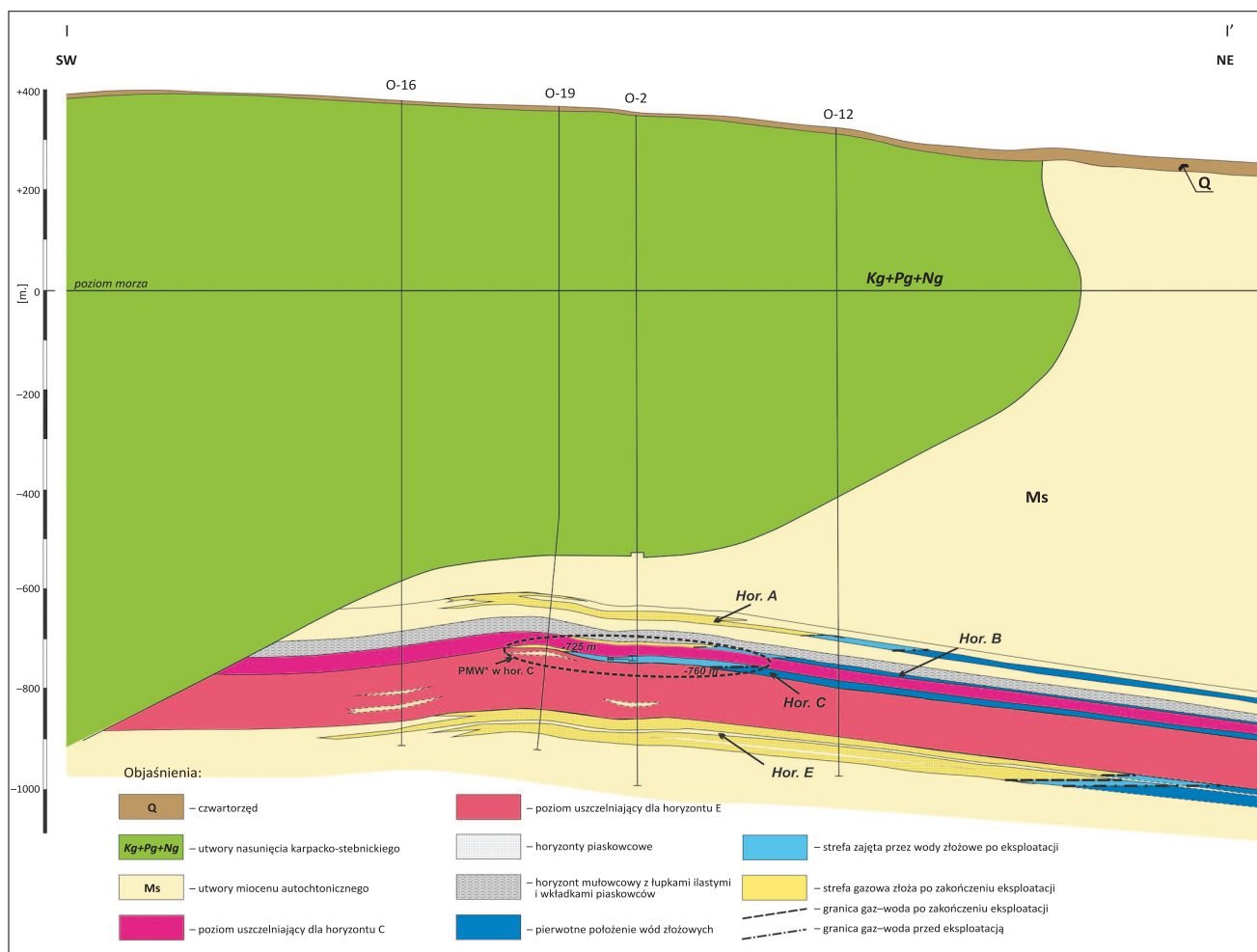
- uaktualnienie danych dotyczących parametrów technicznych otworów eksploatacyjnych w tym zarurowania, wyposażenia wgłębnego oraz szczelności zacementowania rur okładzinowych;
- uaktualnienie budowy strukturalnej poziomu magazynowego, identyfikacji pułapek złożowych, oceny zamknięcia poziomu zbiornikowego i określenia miejsc newralgicznych;
- uszczegółowienie badań petrograficznych i mineralogicznych skał zbiornikowych i uszczelniających w celu określenia możliwości potencjalnych reakcji chemicznych między skałą a wodorem;
- ocena składu chemicznego gazu pierwotnego i magazynowego oraz składu wód złożowych pod kątem możliwych reakcji z H_2 ;
- określenie potencjalnych kierunków szybkiej dyfuzji wodoru w skałach zbiornikowych (w nawiązaniu do zmian facjalnych i granulometrycznych);
- analiza warunków mikrobiologicznych w poziomie zbiornikowym i ich ewentualnego wpływu na magazynowanie gazu z domieszką H_2 .

Do analizy przydatności poziomów zbiornikowych miocenu do magazynowania wodoru wybrano rzeczywisty poziom sčerpanego złoża gazu ziemnego z rejonu S części zapadliska przedkarpackiego (rysunki 3 i 4), który jest porównywalny pod względem parametrów petrofizycznych z poziomami zbiornikowymi w miocenijskich magazynach gazu Husów czy Brzeźnica. Na potrzeby artykułu wybrany horyzont określono jako horyzont C; dodatkowo wybrano do analizy jeszcze jeden horyzont, określony jako E, co miało na celu uzupełnienie niektórych danych brakujących dla horyzontu C. W przypadku tych horyzontów przeprowadzono analizę i ocenę takich danych jak:

- skład mineralogiczny i petrograficzny skał zbiornikowych i uszczelniających;
- skład chemiczny wód złożowych;
- skład chemiczny gazu rodzimego;
- określenie możliwości dyfuzji wodoru w poziomie zbiornikowym oraz do skał uszczelniających;
- określenie pierwotnych warunków mikrobiologicznych w horyzontach C i E;



Rysunek 3. Mapa strukturalna stropu horyzontu C z zaznaczoną strefą magazynowania w potencjalnym podziemnym magazynie wodoru
Figure 3. Structural map of horizon C, with the marked storage zone in the potential underground hydrogen storage facility



Rysunek 4. Przekrój geologiczny poprzeczny przez utwory miocenu autochtonicznego z wydzielonymi horyzontami C i E z zaznaczoną strefą magazynowania wodoru w potencjalnym podziemnym magazynie wodoru

Figure 4. Geological cross-section through the autochthonous Miocene formations with a separated horizon C and E, and a marked hydrogen storage zone in the potential underground hydrogen storage facility

- budowa strukturalna i wykształcenie litologiczne poziomu zbiornikowego i skał uszczelniających oraz ich parametry petrofizyczne.

Konieczność analizy, jak już wspomniano, wynika w dużej mierze z własności fizykochemicznych wodoru, co powoduje, że w złożu może zachowywać się nieco inaczej niż metan. W tabeli 3 zestawiono wybrane własności fizykochemiczne wodoru, metanu i propanu w celu przedstawienia tych różnic.

**Przeprowadzone analizy i oceny
wybranych parametrów poziomu zbiornikowego
oraz uszczelniającego**

**Analiza i ocena składu mineralogicznego i chemicznego
skał zbiornikowych oraz uszczelniających**

Analizowane horyzonty C i E oraz poziomy uszczelniające są zbudowane pod względem litologicznym z następujących skał:

- poziomy zbiornikowe – piaskowce, mułowce, zlepieńce;
- poziomy uszczelniające – iłowce z wkładkami mułowców i sporadycznie piaskowców.

Badania mineralogiczne i petrograficzne wykonano dla horyzontu E. W przypadku leżącego powyżej horyzontu C podobnych badań nie przeprowadzono. W tabeli 4 zestawiono dane składu mineralogicznego dla rdzeni z otworów przewiercających horyzont E.

Wyniki badań rentgenograficznych przeprowadzone głównie na próbkach piaskowców i mułowców wskazują, że w składzie mineralogicznym dominują przede wszystkim kwarc, w mniejszym stopniu skaleni, a sporadycznie kalcyt, dolomit i mika.

Wśród minerałów współwystępujących z kwarcem dominują przede wszystkim skaleni, kalcyt i dolomit, a sporadycznie – miki i minerały ilaste. Wśród minerałów o niskiej zawartości występują: kaolinit, chloryt i miki oraz w postaci resztkowej: syderyt oraz piryt. Sporadycznie rolę minerałów o mniejszym udziale stanowią: skaleni, kalcyt oraz dolomit.

Tabela 3. Zestawienie wybranych własności fizykochemicznych wodoru, metanu i propanu
Table 3. Summary of selected physicochemical properties of hydrogen, methane and propane

Własności	Jednostka	Wodór	Metan	Propan
		wzór chemiczny		
		H ₂	CH ₄	C ₃ H ₈
Masa cząsteczkowa	[g/mol]	2,02	16,04	44,1
Gęstość NTP	[kg/m ³]	0,0838	0,668	1,87
Lepkość	[g · cm ⁻¹ · s ⁻¹]	8,81 E-5	1,10 E-4	8,012 E-5
Normalna temperatura wrzenia	[°C]	-253	-162	-42,1
Ciężar właściwy względem powietrza	powietrze = 1	0,0696	0,555	1,55
Temperatura zapłonu	[°C]	<-253	-162	-42,1
Zakres palności w powietrzu	[% obj.]	4-75	5-15	2,1-10,1
Temperatura samozapłonu	[°C]	585	540	490
Wartość opałowa	[MJ/m ³]	10,8-12,75	35,73	
Ekwiwalent energetyczny	[M ³]	11,93	3,32	
Średnica cząsteczki	[Å]	2,3	4,74	
Średnica atomu	[Å]	0,37		
Rozpuszczalność w wodzie	[ml/l]	18,20	33,0	
Współczynnik dyfuzji w powietrzu:				
	0°	0,611	0,16	
	25°	0,410	0,13	
Å – angstrom NTP – 20°C pod ciśnieniem 1 atm Według: https://h2tools.org (zmienione)				

Tabela 4. Skład mineralogiczny skał zbiornikowych ustalony na podstawie badań rentgenograficznych w horyzoncie E
Table 4. Mineralogical composition of reservoir rocks determined on the basis of X-ray examinations in the horizon E

Odwiert	Skład mineralogiczny		
	minerały główne	minerały współwystępujące	pozostałe minerały
O.18	kwarc, skalenie sporadycznie	skalenie często, kalcyt rzadko, dolomit sporadycznie	skalenie często, kalcyt, dolomit, chlorki, miki
O.20	kwarc	miki często	skalenie, kalcyt, dolomit, chloryty, miki
O.21	kwarc, kalcyt i miki często	skalenie, kalcyt rzadko, dolomit i miki często	dolomit i kaolinit sporadycznie, chloryty, miki rzadko
O.23	kwarc, kalcyt sporadycznie	skalenie często, dolomit sporadycznie	skalenie i kalcyt rzadko, dolomit, kaolinit, miki, syderyt rzadko
O.25	kwarc	skalenie, kalcyt, dolomit	kaolinit, chloryt, miki
O.27	kwarc	skalenie i kalcyt często, dolomit sporadycznie	skalenie i kalcyt często, dolomit, kaolinit, chloryt, miki
O.28	kwarc, skalenie bardzo często, miki i dolomit sporadycznie	skalenie rzadko, kalcyt często, kaolinit sporadycznie	skalenie i kalcyt sporadycznie, dolomit rzadko, kaolinit, chloryt, miki, piryt często
Wzory chemiczne minerałów: kwarc – SiO ₂ ; skalenie – K[AlSi ₃ O ₈] (potasowy), Na[AlSi ₃ O ₈] (sodowy); kalcyt – CaCO ₃ ; dolomit – MgCaCO ₃ ; kaolinit – Al ₄ [(OH) ₈ /Si ₄ O ₁₀]; chloryt – Al ₂ [(OH) ₂ /Si ₄ O ₁₀] · Al ₂ (OH) ₆ (donbassyt); miki – KAl ₂ [(OH, F) ₂ /AlSi ₃ O ₁₀] (muskowit); syderyt – FeCO ₃ ; piryt – FeS ₂			

Badania petrograficzne płytek cienkich piaskowców na mikroskopie polaryzacyjnym przeprowadzone były jedynie w przypadku rdzeni pobranych z otworu O.23. Według opisu mikroskopowego głównym składnikiem piaskowców są ziarna kwarcu – o udziale 40–70%, słabo wysortowane i obrobione,

często pokruszone i spękane, pochodzenia magmowego, a drugim minerałem pod względem udziału są skalenie – do 20%. Są to głównie plagioklasy, czyli skalenie sodowo-wapniowe. Główne minerały plagioklazowe to: albit – Na[AlSi₃O₈] i anortyt – Ca[Al₂Si₂O₈]. Mieszaniny tych minerałów o malejącym

udziale albitu, a rosnącym anortytu noszą kolejno nazwy: oligoklaz, andezyn, labrador i bytownit.

W płytkach cienkich rozpoznano też skalenie potasowe – $K[AlSi_3O_8]$. Stan zachowania skaleni jest różny, od dobrze zachowanych do nieco zwietrzałych – schlorotypizowanych.

Kolejnym składnikiem skał piaskowcowych rozpoznany pod mikroskopem są okruchy: skał osadowych, magmowych i metamorficznych. Ich udział może dochodzić do 20%. Są to okruchy np.: kwarcytów, piaskowców kwarcowych, wapieni, skał ilastych.

W ilościach do 1% występują inne minerały, wśród których można wyróżnić: granit, staurolit, rutyl, turmalin, cyrkon oraz piryt.

Spoiwo piaskowców według badań mikroskopowych jest na ogół ubogie i buduje go pelityczna substancja węglanowa, czasami z domieszką substancji krzemionkowych oraz ilastej. Według badań zawartość spoiwa dochodzi do 5% i najczęściej ma ono charakter spoiwa kontaktowego, rzadko występuje spoiwo porowe i niemal całkowicie brak jest spoiwa bazalnego. Badania wykazały też lokalne występowanie spoiwa kwarcowego, które jest spoiwem wtórnym. Jego zawartość dochodzi do 1%. Całkowity udział spoiwa, łącznie z frakcją granulometryczną poniżej 0,0625 mm, w skałach zbiornikowych osiąga wielkość 3–10%.

Przedstawiony skład mineralogiczny skał zbiornikowych nie zawiera żadnych minerałów, które mogłyby reagować w warunkach złożowych w temperaturze około 32–42°C z wodorem (w tej temperaturze wodór jest mało reaktywny).

Analiza składu chemicznego gazu ziemnego rodzimego w horyzontach C i E

Skład gazu rodzimego występującego w horyzontach C i E przedstawiono w tabelach 5 i 6.

Dla horyzontu C skład gazu przyjęto jako uśredniony na podstawie badań w tym horyzoncie oraz horyzontach sąsiadujących (A, B i D). Przedstawia się on następująco: metan – 98,6%, etan – 0,17%, propan – 0,31%, azot – 1,113%.

Analizy gazu rodzimego w horyzoncie E były wykonane w dość ogólnym zakresie i według tych danych jego skład był następujący: metan – około 98%, azot – 1,4%, resztę zaś stanowiły: etan – 0,3%, propan – 0,05% oraz domieszki węglowodorów C_{4+} . Tylko w jednej analizie, wykonanej na otworze O.17, wykazano obecność CO_2 . Analizy nie wykazały obecności szkodliwych substancji takich jak np. H_2S czy też CO .

W horyzontach sąsiadujących z horyzontem C skład gazu przedstawiał się następująco:

- horyzont A: metan – 98%, etan – 0,18%, propan – 0,03%, azot – 1,76%, resztę stanowią węglowodory C_{3+} ;
- horyzont B: metan – 98,8%, etan – 0,19%, propan – 0,05%, azot – 0,87%, resztę stanowią węglowodory C_{3+} ;
- horyzont D: metan – 98,6%, etan – 0,17%, propan – 0,031%, azot – 1,1%.

W przedstawionym składzie gazu brak jest substancji, które mogłyby reagować z H_2 . Należy jednak zaznaczyć, że dotychczasowe analizy są bardzo ogólne, z tego względu w przypadku podjęcia magazynowania wodoru konieczne będzie wykonanie bardziej szczegółowych analiz gazu.

Skład chemiczny wód złożowych w horyzontach C i E

Analizy chemiczne wód złożowych w badanych horyzontach były wykonywane w ograniczonej liczbie, są to zazwyczaj pojedyncze badania, dlatego mogą nie oddawać pełnego spektrum składu chemicznego.

W horyzoncie E w składzie jonowym wód złożowych dominują: Cl^- – 2,93 g/l, Na^+ – 2,12 g/l, HCO_3^- – 0,74 g/l, SO_4^{2-} – 0,16 g/l, inne jony występują w mniejszych ilościach, np.: B – 0,0021 g/l, J^- – ślady, Fe^{3+} – 0,0033 g/l, Ca^{2+} – 0,0607 g/l, Mg^{2+} – 0,0343 g/l.

W horyzoncie C skład jonowy wód złożowych przedstawiał się następująco: Cl^- – 2,02 g/l, Na^+ , HCO_3^- – 0,66 g/l.

Temperatura wód złożowych w horyzontach C i E jest taka sama jak temperatura złoża, czyli wynosi około 32–42°C, a w tych temperaturach wodór cząsteczkowy jest mało aktywny i reaguje w zasadzie jedynie z fluorem, przy udziale

Tabela 5. Średni skład chemiczny gazu rodzimego w horyzoncie C oraz horyzontach sąsiadujących obliczony na podstawie analiz gazu
Table 5. Average chemical composition of native gas in hor. C and neighboring horizons, calculated on the basis of gas analyses

Gęstość gazu względna	Skład gazu [% obj.]							
	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	i- C_4H_{10}	n- C_4H_{10}	C_5H_{12}	CO_2	N_2
0,561	98,641	0,172	0,031	0,009	0,004	0,007	–	1,113

Tabela 6. Skład chemiczny gazu rodzimego w horyzoncie E obliczony na podstawie analiz gazu
Table 6. Chemical composition of native gas in hor. E calculated on the basis of gas analyses

Skład gazu [% obj.]										
CH_4	C_2H_6	C_3H_8	i- C_4	n- C_4	i- C_5	N_2	CO_2	SORG	H_2S	H_2
98,0413	0,2956	0,0534	0,0221	0,0033	0,0040	1,4094	0,0143	0,0000	0,0000	0,0000

naświetlenia również z chlorem. Ponieważ w wodzie brak jest fluoru i naświetlenia żaden z tych procesów nie będzie miał miejsca, przynajmniej w świetle dostępnych analiz chemicznych. Niski stopień dotychczasowego rozpoznania chemizmu wód złożowych wymagać będzie przeprowadzenia dodatkowych i bardziej szczegółowych badań.

Określenie możliwości dyfuzji wodoru w obrębie poziomu zbiornikowego i w skałach uszczelniających

Zatłaczanie mieszaniny wodoru z metanem do złoża spowoduje, że w początkowym okresie magazynowania wodór będzie miał tendencję do dyfuzji, zwłaszcza w porowatej i gazowej części pułapki złożowej. Ze względu na swoje nie duże wymiary (promień jonowy H^- wynosi 2,08 Å) i masę cząsteczkową wodór jest pierwiastkiem bardziej ruchliwym niż np. metan, co wynika ze wzoru z kinetycznej teorii gazu:

$$\tilde{U} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad (1)$$

gdzie:

R – stała gazowa,

T – temperatura,

M – masa cząsteczkowa.

W tabeli 7 zestawiono prędkości przeciętne dla wodoru i innych gazów w temperaturze 20°C.

Tabela 7. Prędkości wybranych gazów (Bielański, 1976)

Table 7. Velocities of selected gases (Bielański, 1976)

Gaz	Przeciętna prędkość	Liczba zderzeń Z	Droga swobodna
	[m/s]	[liczba zd./s]	λ cząsteczki gazu
Wodór	1905	$15,74 \cdot 10^9$	$1,116 \cdot 10^{-5}$ cm
Amoniak	655		
Azot	511	$7,97 \cdot 10^9$	$0,592 \cdot 10^{-5}$ cm
Tlen	478	$6,96 \cdot 10^9$	$0,534 \cdot 10^{-5}$ cm
CO ₂	408	$9,67 \cdot 10^9$	$0,534 \cdot 10^{-5}$ cm

Faktyczna prędkość cząsteczki wodoru jest niższa, gdyż ogranicza ją bardzo duża liczba zderzeń (tabela 7). Ponadto z najwyższą prędkością porusza się jedynie około 32% cząstek (Bielański, 1976), pozostałe mają prędkość niższą.

Wielu badaczy obawia się, że ze względu na dużą ruchliwość cząsteczki wodoru może się w złożu tworzyć niekorzystne zjawisko określane jako „palce” lub „języki wodorowe” w strefie o najlepszych parametrach petrofizycznych (Ebrahimiyecka, 2017; Hagemann, 2017; Zivar et al., 2020).

Jednakże opisane powyżej prędkości cząsteczek związane z procesem dyfuzji odnoszą się do mieszanin gazów pozostających generalnie w bezruchu, gdzie ruch samych cząsteczek jest spowodowany różnicą stężeń poszczególnych składników.

Natomiast w magazynie ruch gazu będzie przede wszystkim związany z procesem zatłaczania i odbioru mieszaniny gazu, składającego się z metanu (np. 90%) i wodoru (np. 10%). Ruch tej mieszaniny będzie odbywał się w sposób jednolity bez segregacji mieszaniny na wodór oraz metan, gdyż wielkość porów w skałach piaskowcowych i mułowcowych jest na tyle duża, że nie będzie blokadą czy też filtrem dla tego gazu.

W tym miejscu można przypomnieć, że wielkość cząsteczki metanu wynosi 4,74 Å (tabela 3), cząsteczki wodoru – 2,3 Å, zaś wodoru atomowego – jedynie 0,37 Å, ale ten ostatni w warunkach naturalnych nie występuje, gdyż najczęściej tworzy cząsteczkę wodoru, która z porównania wielkości jest jedynie dwa razy mniejsza od cząsteczki metanu. Dla wyobrażenia wielkości cząsteczki na tle porów skał zbiornikowych poniżej podano wielkość porów w horyzoncie E (dla horyzontu C brak danych):

- pory >10 µm stanowią 39–40% wszystkich porów;
- pory 10–1 µm stanowią 26–33% wszystkich porów;
- pory <1 µm stanowią 28–34% wszystkich porów.

Należy pamiętać, że 1 Å = 0,0001 µm, czyli 1 µm = 10 000 Å.

Dane wskazują, że nawet najmniejsze pory piaskowców i mułowców będą w zdecydowanej większości przepuszczalne dla metanu i wodoru. Dyfuzja wodoru wobec tego będzie następować przede wszystkim do porów najmniejszych, które ze względu na duże opory nie są drogami ruchu dla zatłaczanego i odbieranego gazu. Biorąc jednak pod uwagę ich ograniczoną ilość, nie będzie to miało dużego znaczenia.

Dyfuzja wodoru w obrębie strefy gazowej będzie zachodzić przede wszystkim w pierwszych kilku cyklach pracy magazynu, licząc od pierwszego zatłaczania mieszaniny metanu i wodoru. Proces ten będzie głównie miał miejsce w strefie brzeżnej magazynu, gdzie początkowo będzie dominował gaz rodzimy wypchnięty tu przez gaz zatłaczany. Różnica w składzie gazu rodzimego i zatłaczanego spowoduje dyfuzję głównie wodoru do strefy gazu rodzimego. Proces będzie trwał przez kolejne cykle aż do całkowitego wyrównania się składów gazu.

Proces dyfuzji teoretycznie będzie miał miejsce również w wody złożowe oraz w skały uszczelniające złożo od spągu i stropu. W odniesieniu do procesu dyfuzji wodoru w wody złożowe należy sądzić, że będzie on bardzo ograniczony, gdyż rozpuszczalność wodoru w wodach złożowych jest bardzo niska, znacznie niższa od rozpuszczalności metanu (tabela 3). Z tego względu jego wnikanie w wody złożowe powinno być słabsze w porównaniu z metanem, czyli nie powinno przyczyniać się do utraty szczelności poziomu złożowego.

W przypadku horyzontów C i E kontakt strefy gazowej oraz wód złożowych ma charakter poziomy, a jego szerokość można ocenić na 250–600 m i podczas eksploatacji PMG będzie się zmieniać. Należy sądzić, że szerokość kontaktu będzie miała wpływ na dyfuzję wodoru (podobnie jak metanu), wzrost

szerokości kontaktu wody złożowej z gazem będzie sprzyjał dyfuzji wodoru, zaś spadek szerokości spowoduje jej obniżenie.

Wpływ na dyfuzję w złożu będą też miały temperatura oraz ciśnienie. W wyższej temperaturze dyfuzja będzie malała, a w niższej – rosła. Temperatura w horyzontach C i E wynosi od 32°C do 42°C. W przypadku ciśnienia jego wzrost spowoduje nasilenie procesów dyfuzji gazu do wód złożowych, natomiast obniżenie wywoła zmniejszenie dyfuzji.

Proces dyfuzji należy odnosić również do skał uszczelniających poziom zbiornikowy. Skałami uszczelniającymi poziomy zbiornikowe w przypadku horyzontów C i E są łożyska o miąższości 20–25 m dla horyzontu C oraz 30–180 m dla horyzontu E. Biorąc pod uwagę parametry petrofizyczne skał uszczelniających przedstawione w tabelach 13 i 14, dyfuzja w skały uszczelniające będzie bardzo ograniczona lub niemożliwa. Wynika to z faktu, że skały uszczelniające charakteryzują się dużym zaileniem, wynoszącym w horyzoncie C – 54,75%, a w horyzoncie E – 65,8%, i niemal całkowitym zawodnieniem porów, wynoszącym w horyzoncie C – 96,2%, a w horyzoncie E – 80,6% (przy czym większość wody wypełniającej pory to woda związana, np. w horyzoncie E stanowi ona 73,9%). Duże zailenie skał uszczelniających powoduje, że porowatość efektywna i przepuszczalność są bardzo niskie lub żadne. Dodatkowo woda występująca w tak małych porach charakteryzuje się dużym ciśnieniem kapilarnym, które w znacznym stopniu będzie przeciwdziałać procesom dyfuzji wodoru i gazów w pory skał uszczelniających. Suma przedstawionych danych wskazuje, że tak jak w przypadku gazu rodzimego, tak i w przypadku mieszaniny wodoru z gazem ziemnym poziomy uszczelniające poziom zbiornikowy pozostaną szczelne. W tabeli 8 przedstawiono wyniki badań średnic porów wykonanych na otworze O.20.

Tabela 8. Wyniki badań porów – otwór O.20

Table 8. Test results for pores – O.20 well

Próbka	Głębokość	Materiał	Porowatość całkowita	Porowatość z porozymetru	Średnica kapilarna	Powierzchnia właściwa	Pory >1 μm
	[m]	[g/cm ³]	[%]	[%]	[μm]	[m ² /g]	[%]
Pr. 1 ł*	1404,3	2,72	14,72	14,10	0,05	4,68	26
Pr. 2 ł	1404,7	2,72	12,68	12,27	0,04	4,99	7
Pr. 3 ł	1405,2	2,71	13,36	12,79	0,05	4,39	9
Pr. 4 p**	1406,4	2,69	25,16	26,64	0,45	1,09	84

* ł – łupki; ** p – piaskowce

Wyniki przedstawionych w tabeli 8 pomiarów pokazują, że w skałach łupkowych dominują pory o rozmiarach poniżej 0,1 μm oraz 0,5–0,1 μm i pomimo porowatości całkowitej tych skał rzędu 12–15% skały te są nieprzepuszczalne ze względu na wypełnienie kapilar wodą złożową.

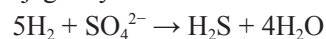
Analiza i ocena warunków mikrobiologicznych w poziomie zbiornikowym i ich ewentualnego wpływu na magazynowanie gazu ziemnego z domieszką wodoru

Bardzo istotnym elementem w procesie magazynowania gazu ziemnego z domieszką wodoru jest stan mikrobiologiczny złoża. W złożu występują najczęściej różne zespoły bakterii, które mogą współdziałać z wodorem, wodami złożowymi lub składnikami mineralnymi budującymi skały.

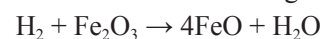
Najistotniejsze z punktu widzenia magazynowania wodoru są – według przeanalizowanej literatury – następujące grupy bakterii:

- bakterie redukujące siarkę i żelazo – SRB i IRB;
- bakterie metanogenne;
- bakterie fermentacyjne.

Bakterie z grupy SRB wykorzystują siarczany w procesie metabolizmu i w jego wyniku zachodzi reakcja:



W efekcie tego procesu mikrobiologicznego zostaje utracony wodór, a gaz zostaje zanieczyszczony dodatkowo siarkowodorem oraz przybywa wody. Bakterie z grupy IRB są to bakterie, które redukują żelazo znajdujące się w skale, przekształcając żelazo Fe³⁺ w Fe²⁺ według reakcji:

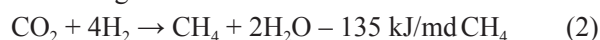


Powyższa reakcja również prowadzi do utraty wodoru oraz powstania dodatkowej wody.

W tabeli 9 przedstawiono gatunki bakterii redukujących siarczany. Bakterie metanogenne to grupa bakterii produkujących metan, wśród których można wyróżnić:

- bakterie metanotroficzne – wykorzystujące metanol i metyloaminy do produkcji CH₄;
- bakterie acetoklastyczne – wykorzystujące aceton do produkcji CH₄;

- bakterie wodorotroficzne – wykorzystujące H₂ do produkcji metanu według wzoru:



Bakterie tego typu najlepiej rozwijają się w temperaturze 30–40°C (przeżywają do 92 °C), pod ciśnieniem 90 bar

w pH 6,5–7,5. Bakterie metanogenne w procesach metabolicznych korzystają z wodoru i dwutlenku węgla. W procesie oddychania 90% wykorzystywanego CO₂ przetwarzają na metan, zaś z 10% powstaje biomasa, która pozostaje w złożu.

et al., 1990) i doświadczalnym PMW w Patagonii (Pérez et al., 2016). Bakterie fermentacyjne to grupa bakterii, która przekształca CO₂ i H₂ w kwas octowy według reakcji:



Tabela 9. Przykłady bakterii redukujących siarczany (SRB) (wg RAG Austria AG..., 2020)

Table 9. Example of sulfate reducing bacteria (SRB) (according to RAG Austria AG..., 2020)

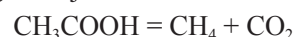
Gatunek	Zasolenie [%]		Temperatura [°C]		Całkowite utlenianie
	zakres	optimum	zakres	optimum	
<i>Archaeoglobus fulgidus</i>	0,02–3	2	60–85	76	+
<i>Desulfacinum infernum</i>	0–5	1	40–65	60	+
<i>Desulfobacter vibrioformis</i>	1–5	b.d.	5–38	33	+
<i>Desulfobacterium cetonicum</i>	>5	1	20–37	30–35	+
<i>Desulfomicrobium apsheronum</i>	0–8	b.d.	4–40	25–30	–
<i>Desulfotomaculum halophilum</i>	1–14	4–6	30–40	35	–
<i>Desulfotomaculum kuznetsovii</i>	0–3	0	50–85	60–65	+
<i>Desulfotomaculum nigrificans</i>	>4	1	40–70	60	–
<i>Desulfotomaculum thermocisternum</i>	>5	0,3–1,2	41–75	62	–
<i>Desulfovibrio gabonensis</i>	1–17	5–6	15–40	30	–
<i>Desulfovibrio longus</i>	0–8	2	10–40	35	–
<i>Desulfovibrio vietnamensis</i>	0–10	5	12–45	37	–
<i>Thermodesulfobacterium mobile</i>	b.d.	b.d.	45–85	65	–
<i>Thermodesulfurhabdus norvegicus</i>	0–5,6	1,6	44–74	60	+

W tabeli 10 przedstawiono przykładowe grupy bakterii metanogennych.

Efektom działalności bakterii metanogennych w złożu jest zatem częściowa przemiana wodoru oraz dwutlenku węgla w gazie magazynowym na metan oraz wodę z wyprodukowaniem pewnej ilości biomasy. Procesy metanogenezy w złożu obserwowane były np. w PMW Lobodice w Czechach (Smigan

Proces ten prowadzi do utraty energii wodoru oraz produkcji kwasu octowego i wody.

Kwas octowy może być następnie przetwarzany na CH₄ oraz CO₂ według reakcji:



W tabeli 11 przedstawiono przykładowe gatunki bakterii fermentacyjnych rozpoznane w złożu ropy naftowej.

Tabela 10. Bakterie metanogenne stwierdzone w złożu ropy naftowej (wg RAG Austria AG..., 2020)

Table 10. Methanogenic bacteria found in an oil field (according to RAG Austria AG..., 2020)

Gatunek	Optimum NaCl [%]	Temperatura [°C]		Użyte substraty		
		zakres	optimum	metyloaminy	octan	wodór
<i>Methanobacterium bryantii</i>	0–2	25–40	37	–	–	+
<i>Methanobacterium ivanovii</i>	0,09	10–55	45	–	–	+
<i>Methanobacterium thermoaggregans</i>	2–4	40–70	60	–	–	+
<i>Methanobacterium thermoalcaliphilum</i>	0–2	30–80	65	–	–	+
<i>Methanobacterium thermoautotrophicus</i>	0–30	40–70	60	–	–	+
<i>Methanocalculus halotolerans</i>	5	25–45	38	–	–	+
<i>Methanococcus thermolithotrophicus</i>	1,4–2,4	17–62	60	–	–	+
<i>Methanohalophilus euhalobius</i>	6	10–50	28–37	+	–	–
<i>Methanoplanus petrolearius</i>	1–3	28–43	37	–	–	+
<i>Methanosarcin amazei</i>	0,1–2	10–50	37	+	+	–
<i>Methanosarcina siciliae</i>	2,4–3,6	20–50	40	+	–	–

Tabela 11. Bakterie fermentacyjne wyizolowane w złożu ropy (wg RAG Austria AG..., 2020)

Table 11. Fermentation bacteria isolated in an oil reservoir (according to RAG Austria AG..., 2020)

Gatunek	NaCl [%]		Temperatura [°C]		Redukcja związków siarki	
	zakres	optimum	zakres	optimum	S°	S ₂ O ₃ ⁻
<i>Acetoanaerobium romashkovii</i>	ND	ND	30–60	37	ND	ND
<i>Anaerobaculum thermoterrenum</i>	0–2	1	28–60	55	+	+
<i>Dethiosulfovibrio peptidovorans</i>	1–10	3	20–45	42	+	+
<i>Geotoga petraea</i>	0,5–10	3	30–55	50	+	ND
<i>Geotoga subterranea</i>	0,5–10	4	30–60	45	+	ND
<i>Haloanaerobium acetoethylicum</i>	6–20	10	15–45	34	ND	ND
<i>Haloanaerobium congolense</i>	4–24	10	20–45	42	+	+
<i>Haloanaerobium salsugo</i>	6–24	9	22–51	40	ND	ND
<i>Petrotoga miotherma</i>	0,5–10	3	35–65	55	+	ND
<i>Spirochaeta smaragdinae</i>	1–10	5	20–40	37	+	+
<i>Thermoanaerobacter brockii</i>	0–4,5	ND	37–75	55–60	+	+
<i>Thermotoga elfii</i>	0–2,4	1,2	50–72	66	–	+
<i>Thermotoga hypogea</i>	0–1,5	0–0,2	56–90	70–75	–	+
<i>Thermotoga subterranea</i>	0–2,4	1–2	50–75	70	–	+

Bakterie fermentacyjne doprowadzają zatem do utraty wodoru, ale też powodują wzrost zawartości metanu.

W przypadku badanych horyzontów C i E dotychczas nie były wykonywane kompleksowe badania mikrobiologiczne dotyczące pełnego rozpoznania składu mikroorganizmów występujących w złożu.

Brak szczegółowych badań mikrobiologicznych nie pozwala na dokonanie dokładnej oceny zagrożeń wynikających ze stanu mikrobiologicznego złoża.

Można natomiast określić wstępnie potencjał reakcji biologicznych na podstawie składu chemicznego skał, wody złożowej oraz gazu.

Potencjał bakterii redukujących siarczany (SRB)

W składzie chemicznym gazu (tabela 5 i 6) brak jest związków siarki. W składzie chemicznym wody złożowej zawartość jonów SO₄²⁻ jest niewielka, wynosi około 0,16 g/l, a więc potencjał tworzenia się H₂S przy pomocy bakterii redukcyjnych jest niewielki.

W składzie mineralogicznym skał zbiornikowych z siarczków rozpoznano jedynie piryt FeS₂ (tabela 4), ale należy on do grupy minerałów bardzo rzadko występujących w horyzontach C i E.

Innych minerałów zawierających siarkę nie stwierdzono, dlatego należy sądzić, że potencjał tworzenia H₂S z siarczków występujących w skale jest niewielki.

Skład chemiczny gazu, wody i skał w horyzontach C i E wskazuje, że potencjał tworzenia siarkowodoru w tych poziomach magazynowych jest znikomy.

Potencjał bakterii metanogennych

Możliwości tworzenia CH₄ przez bakterie metanogenne są przede wszystkim uwarunkowane dostępem do H₂ oraz CO₂. Przewidywana ilość wodoru zatłaczanego do horyzontu magazynowego może dochodzić do 10%, natomiast zawartość CO₂ (tabela 6) w gazie rodzimym w badanych horyzontach, według dostępnych danych, jest niejednoznaczna. W większości otworów nie stwierdzono obecności CO₂, tylko jedna analiza wykazała jego zawartość – w ilości około 0,1% w horyzoncie E. Niska zawartość CO₂ w gazie ziemnym nie stwarza zatem istotnego zagrożenia przemiany wodoru w metan, a proces metanogenezy będzie nieistotny dla magazynowania wodoru w złożu.

Potencjał bakterii fermentacyjnych

Podobnie jak w przypadku bakterii metanogennych niska zawartość CO₂ w gazie magazynowym w znacznym stopniu ogranicza możliwości rozwoju bakterii fermentacyjnych. Przy bardzo niskiej zawartości CO₂ w gazie ziemnym (horyzont E: około 0,1%) rozwój bakterii fermentacyjnych oraz możliwości przetwarzania przez nie wodoru i dwutlenku węgla w octan będą znikome, tym samym zagrożenie ze strony tych bakterii związane ze zmniejszeniem ilości wodoru jest bardzo niskie.

Podsumowując tę część, należy stwierdzić, że zagrożenie dla jakości gazu ziemnego z 10-proc. zawartością wodoru jest bardzo niskie, biorąc pod uwagę aktualny stan wiedzy na temat składu gazu ziemnego w badanych horyzontach. Niemniej jednak konieczne będzie wykonanie szczegółowych badań mikrobiologicznych wód złożowych oraz gazu w celu

określenia stanu mikrobiologicznego złoża w danej chwili. Wykonane badania będą punktem odniesienia dla późniejszych badań mikrobiologicznych w trakcie magazynowania mieszaniny gazu i wodoru.

Analiza strukturalno-litologiczna horyzontu C oraz skał uszczelniających i parametry petrofizyczne

Horyzont C jest jednym z poziomów zbiornikowych złoża zlokalizowanego w S części zapadliska przedkarpackiego. Horyzont C był eksploatowany w latach 70. i 80. XX wieku. Wydobyto z niego około 70 mln m³ gazu. Przy założeniu, że pierwotne zasoby geologiczne wynosiły około 85 mln m³ gazu, w złożu pozostało go około 16 mln m³.

Złoże to jest obecnie nieeksploatowane. Ze względu na swoją wielkość mogłoby doskonale służyć jako magazyn pilotażowy dla magazynowania wodoru w złożu mioceniowym.

Pod względem strukturalnym horyzont C tworzy antyklinę, której os przebiega na kierunku NW-SE. Antyklina charakteryzuje się dobrze wykształconym skrzydłem NE i słabo wykształconym, zredukowanym przez nasunięcie karpacko-steinieckie, skrzydłem SW (rysunek 3). Strop horyzontu C w rejonie złoża występuje na głębokości 1081–1212 m p.p.t. Strefa złożowa w wartościach bezwzględnych znajduje się na głębokości 715–760 m p.p.m., a jej wysokość ponad konturem wód złożowych wynosi 45 m. Złoże w horyzoncie C powstało w pułapce typu litologiczno-strukturalnego, a jego

zapiaszczenie zanika w kierunku zachodnim, południowym oraz SE. Od północy zasięg złoża ograniczony jest konturem gaz-woda na głębokości 760 m p.p.m.

Pod względem litologicznym horyzont C zbudowany jest z piaskowców, głównie średnioziarnistych, ale występują też odmiany grubo- i drobnoziarniste; te ostatnie zapewne dominują w strefie wyklinowań piaskowców. Miąższość poziomu zbiornikowego zmienia się w zakresie 2,0–23,5 m (średnia = 10 m).

Piaskowce są barwy głównie szarej i jasnoszarej, często rozsypliwie, o spoiwie ilasto-węglanowym. Piaskowce nie były badane laboratoryjnie pod względem petrograficzno-mineralogicznym.

Horyzont C od stropu i spągu izolowany jest nieprzepuszczalnymi pakietami ilastymi oraz ilasto-mułowcowymi. Łupki ilaste są barwy szarej, ciemnoszarej zawierają blaszki miki i niekiedy smugowane są jaśniejszym pyłem lub mułowcem. Mułowce z kolei występują w postaci lamin i cienkich warstw oraz warstewek barwy jasnoszarej, zailonnych, z miką i detrytusem roślinnym, o spoiwie ilasto-wapnistym.

Miąższość stropowej warstwy uszczelniającej wynosi około 20–25 m, z kolei od spągu warstwa uszczelniająca ma miąższość od 100 m do 180 m.

Poniżej w tabelach zestawiono dane dotyczące parametrów petrofizycznych horyzontu C wyznaczonych na podstawie badań laboratoryjnych (tabela 12) i reinterpretacji pomiarów geofizycznych (tabela 13).

Tabela 12. Parametry petrofizyczne skał zbiornikowych horyzontu C obliczone na podstawie badań laboratoryjnych

Table 12. Petrophysical parameters of horizon C reservoir rocks calculated on the basis of laboratory tests

Skała	Porowatość [%]			Przepuszczalność [mD]			Nasylenie wodą związaną [%]			Zawartość CaCO ₃ [%]
	od	do	średnia	od	do	średnia	od	do	średnia	
Piaskowce	6,9	29,8	21,55	14,6	284,60	190,0	0,0	17,2	5,4	14,1
Łupki	10,0	15,2	12,53	0,18	4,57	2,3	14,8	26,0	19,0	21,3

Tabela 13. Parametry petrofizyczne skał zbiornikowych horyzontu C opracowane na podstawie reinterpretacji pomiarów geofizycznych

Table 13. Petrophysical parameters of horizon C reservoir rocks developed on the basis of reinterpretation of well logs

Odwiert	Hc*	Vil*	Kp*	Swi*	K*
	[m]	[%]	[%]	[%]	[mD]
O.2	12,0	13	23,55	14,0	287,4
O.2a	12,0	12	20,56	16,0	197,4
O.2b	11,5	23	18,54	24,0	145,9
O.3	2,0	40	10,14	47,0	24,68
O.33	23,5	39	11,73	43,0	37,22
O.34	3,0	42	9,72	18,0	14,24
O.5	6,0	24	18,90	23,0	134,1
O.35	3,0	27	22,34	17,0	225,3
O.7	17,0	23	24,02	15,0	321,0
O.8	9,5	23	18,62	26,0	187,7

cd. Tabela 13/cont. Table 13

Odwiert	Hc*	Vil*	Kp*	Swi*	K*
	[m]	[%]	[%]	[%]	[mD]
O.9	5,0	16	22,30	16,0	248,10
O.12	15,5	14	23,24	14,0	280,50
O.13	12,5	18	24,14	16,0	380,90
O.19	2,9	26	18,12	26,0	137,00
O.20	5,6	13	22,51	16,0	254,00
O.21	11,7	24	15,37	29,0	72,94
O.29	13,5	15	16,26	24,0	73,84
O.30	10,0	17	17,70	24,0	107,40
Średnia	9,8	22,8	18,80	24,3	173,90
Od-do	2–23,5	13–42	9,7–24,1	14–48	14,24–380,9

* Hc – miąższość całkowita; Vil – zawartość ilów w skale; Kp – porowatość; Swi – nasycenie wodą związaną; K – przepuszczalność skał.

Dane przedstawione w tabelach 12 i 13 wskazują, że skały zbiornikowe horyzontu C mają bardzo dobre parametry petrofizyczne: porowatość według geofizyki od 9,7% do 24,1% przy średniej 18,8%, przepuszczalność w zakresie 14,24–380,9 mD przy średniej 173,9 mD.

Nasycenie wodą związaną wynosi średnio 24,3% i mieści się w zakresie 14–48%.

Zailenie piaskowców charakteryzuje się niskim poziomem i wynosi średnio 22,8%, a zmienia się w zakresie 13–42%. W ujęciu przestrzennym w pobliżu granic zapieszczenia horyzontu C oraz w kierunku północnym (rysunek 1), wyraźnie

zaznacza się wzrost zapieszczenia, a zmniejsza porowatość i przepuszczalność.

Parametry petrofizyczne skał uszczelniających poziom zbiornikowy od stropu przedstawiono w tabeli 14.

Porowatość skał górnego, przystropowego poziomu uszczelniającego wynosi według reinterpretacji geofizycznej średnio 6,24%, a w przypadku poszczególnych otworów zmienia się w przedziale 2,77–10,92%.

Przepuszczalność wyznaczona przez geofizykę dla horyzontu C wynosi średnio 4,33 mD i zmienia się w poszczególnych otworach w zakresie 0,26–13,53 mD.

Tabela 14. Parametry petrofizyczne poziomu uszczelniającego horyzont C od stropu

Table 14. Petrophysical parameters of the roof-top sealing series from the ceiling

Nazwa otworu	Horyzont	CVps*	PHI*	CVil*	K*	Sw*	Swi*
		[%]	[%]	[%]	[mD]	[%]	[%]
O.2	powyżej hor. C	42,52	10,92	46,56	20,14	76,04	44,30
O.2a	powyżej hor. C	39,45	5,71	54,83	1,20	98,14	64,18
O.2b	powyżej hor. C	36,68	5,91	57,41	1,37	98,74	63,79
O.5	powyżej hor. C	39,58	7,39	53,02	2,62	–	–
O.35	powyżej hor. C	37,76	5,10	57,14	0,68	99,33	54,42
O.7	powyżej hor. C	33,82	3,30	62,88	0,26	100,00	76,47
O.9	powyżej hor. C	38,65	5,96	55,39	1,23	98,15	49,40
O.12	powyżej hor. C	41,49	8,51	50,00	7,05	100,00	53,23
O.13	powyżej hor. C	34,31	2,77	62,92	0,29	100,00	79,51
O.19	powyżej hor. C	37,86	5,74	56,40	3,59	96,79	96,79
O.20	powyżej hor. C	43,30	8,95	47,68	13,53	94,77	39,52
O.21	powyżej hor. C	37,67	5,05	57,28	3,38	–	–
O.29	powyżej hor. C	41,58	5,18	53,25	1,48	–	–
O.30	powyżej hor. C	41,34	6,86	51,80	3,86	–	–
	Średnia	39,01	6,24	54,75	4,33	96,2	62,15

* CVps – zawartość piaskowców w skale; PHI – porowatość skał; CVil – zawartość ilów w skale; K – przepuszczalność skał; Sw – nasycenie wodą; Swi – nasycenie wodą związaną.

Zapiaszczenie górnego poziomu uszczelniającego wynosi średnio około 39,01% i zmienia się w zakresie 33,82–42,52%.

Skały uszczelniające strop horyzontu C w zdecydowanej większości według reinterpretacji pomiarów geofizycznych charakteryzują się dużym nasyceniem wodą całkowitą i związaną.

Stropowa warstwa uszczelniająca poziom złożowy ma pod względem sedymentologicznym charakter facji ilastej oraz ilasto-mułowcowej. Rzadko w tym interwale występują wkładki bardziej zapiaszczonych skał, w tym piaskowców. Jeśli już występują, są to z reguły bardzo cienkie warstewki piaskowców. Miąższość górnego pakietu uszczelniającego zmienia się w zakresie 20–25 m. Takie wykształcenie lito-logiczne oraz obecność wody wypełniającej pory i kapilary pakietu łupkowego powinny zapewnić wystarczającą szczelność poziomu złożowego dla magazynowania wodoru.

Rozpoznanie procesów chemicznych, fizycznych i biochemicznych związanych z magazynowaniem wodoru w horyzontach C i E i ich znaczenie dla bezpieczeństwa magazynowania oraz ocena geologiczna szczelności horyzontu C

Na podstawie przeprowadzonych analiz i ocen wybranych parametrów poziomu zbiornikowego C i jego poziomu uszczelniającego określono możliwość wystąpienia w tych poziomach procesów chemicznych, fizycznych i biochemicznych wywołanych obecnością w gazie magazynowym wodoru. Wyniki przedstawiono poniżej.

Procesy chemiczne i biochemiczne

Skład chemiczny skał, gazu i wód złożowych w horyzontach C i E oraz ich temperatura złożowa w zakresie 32–42°C nie stwarzają możliwości zaistnienia w złożu niebezpiecznych reakcji chemicznych pomiędzy ich składnikami a mieszaniną gazu ziemnego i wodoru. Również reakcje biochemiczne nie powinny być istotnym zagrożeniem dla złoża i składu gazu, choć wymaga to – jak wykazano powyżej – przeprowadzenia szczegółowych badań mikrobiologicznych. Na niewielką skalę może zachodzić proces metanogenezy, ale to będzie zależeć od zawartości CO₂, którego udział w gazie rodzimym jest znikomy. Pewna ilość CO₂ może występować w gazie zatłaczanym. Inne procesy biochemiczne, takie jak procesy fermentacyjne lub działalność bakterii siarkowych (SRB), mogą zachodzić jedynie w bardzo ograniczonym stopniu.

Procesy fizyczne

Z procesów fizycznych rozpatrywano takie zjawiska jak: dyfuzja wodoru, tworzenie się „języków” i „palców wodorowych”, segregacja wodoru i gazu ziemnego, mieszanie gazu.

Dyfuzja wodoru

Zawartość wodoru w gazie zatłaczanym będzie dochodzić do 10% i będzie wyższa niż zawartość w gazie rodzimym lub magazynowym, w którym przed rozpoczęciem zatłaczania zawartość wodoru wynosi 0%. Różnica w stężeniach wodoru spowoduje, że zostanie zainicjowany w złożu proces dyfuzji wodoru z gazu zatłaczanego do gazu rodzimego. Proces rozpocznie się już od pierwszego zatłaczania mieszaniny gazu ziemnego oraz wodoru do złoża. W pierwszym rzędzie dyfuzja H₂ będzie zachodzić do strefy obejmującej część gazową złoża, a następnie do strefy zawodnionej złoża oraz w skały uszczelniające.

O ile dyfuzja wodoru i mieszanie gazów zatłaczanego i rodzimego w strefie gazowej będą postępować wraz z każdym cyklem tłoczenia mieszaniny gazu i wodoru, to jego dyfuzja do wody złożowej, a tym bardziej do skał uszczelniających będzie w znacznym stopniu ograniczona lub bardzo utrudniona. Rozpuszczalność wodoru w wodach złożowych jest bardzo niska rzędu około 1,64% w jednostce objętości. Dyfuzja wodoru do skał uszczelniających będzie jeszcze bardziej utrudniona, gdyż w skałach ilastych, z natury zawierających wodę, występuje wysokie ciśnienie kapilarne w porach skały, które stanowi dodatkową barierę przed dyfuzją wodoru w głąb skał uszczelniających. Dyfuzja wodoru w wodzie w temperaturze 25°C wynosi 5×10^{-9} m²/s, a w przypadku łupków nasyconych wodą: 3×10^{-11} m²/s.

Według danych literaturowych (Carden i Paterson, 1979) należy się liczyć, że w okresie całego procesu magazynowania może dojść do utraty ze względu na dyfuzję około 2% zatłaczanego wodoru. Przedstawione dane pozwalają twierdzić, że proces dyfuzji nie powinien zagrażać szczelności magazynu, a straty H₂ będą ograniczone do około 2%.

Tworzenie się „języków” i „palców wodorowych”

W wielu publikacjach podnoszono obawy związane z tym, że wodór, jako bardziej ruchliwy pierwiastek niż metan, podczas zatłaczania może tworzyć „języki” i „palce wodorowe” w strefach złożowych charakteryzujących się lepszymi parametrami petrofizycznymi, czyli porowatością i przepuszczalnością (Panfilov, 2016; Tarkowski, 2017, 2019). Proces taki nie wydaje się jednak możliwy, gdyż gaz ziemny i wodór jeszcze przed zatłaczaniem będą ze sobą mieszane. Do złoża będą więc zatłaczane w postaci wspólnej mieszaniny, dzięki czemu w złożu podczas zatłaczania i odbioru utworzą jeden, wspólny front gazu, który będzie przemieszczał się przez pory skały, napędzany siłą depresji ciśnień. Z tego powodu podczas przemieszczania mieszaniny metanu i wodoru prędkość własna wodoru nie będzie odgrywała żadnej roli.

Tworzenie się „języków” i „palców gazowych” będzie możliwe tylko w tych partiach złoża, gdzie występują znacząco

lepsze parametry petrofizyczne (wyższa porowatość i przepuszczalność) niż w sąsiednich rejonach złoża, i to przy bardzo intensywnym procesie zatłaczania lub odbioru. Takie warunki mogą powodować szybszą ekspansję gazu w strefach stawiających najmniejszy opór. Natomiast w warunkach normalnego zatłaczania, kiedy gaz spokojnie przemieszcza się szerokim frontem, jego czoło może być co najwyżej zafalowane.

Próby magazynowania mieszaniny wodoru (10%) i gazu ziemnego (90%) w Austrii (Underground Sun Storage w Pilsbach) nie wykazały tworzenia się „języków” i „palców wodorowych” (RAG Austria AG..., 2020).

Segregacja metanu i wodoru

Proces segregacji składników gazu w magazynie polegałby na grawitacyjnym oddzieleniu CH_4 od H_2 , co miałyby być związane z ich różnym ciężarem właściwym. Podczas procesu magazynowego wódór, jako lżejszy, gromadziłby się w górnej części złoża, a CH_4 , jako cięższy, zbierałby się poniżej wodoru. Zjawisko takie, gdyby rzeczywiście zachodziło w złożu, byłoby niekorzystne, gdyż odbierany gaz miałby zróżnicowany skład procentowy metanu i wodoru, czyli różną kaloryczność. Jak wykazały jednak doświadczenia wykonane w próbnym magazynie wodoru w Pilsbach w Austrii (RAG Austria AG..., 2020), nie zaobserwowano zjawiska segregacji gazów. Obserwacje i badania składu gazu przeprowadzono najpierw w stacjonarnych kolumnach symulujących złożo, a później również podczas próby magazynowej na rzeczywistym złożu. Wyniki obserwacji oraz badań wykazały, że żadne zjawisko typu segregacja gazów nie miało miejsca ani w kolumnach stacjonarnych, ani na rzeczywistym złożu (RAG Austria AG..., 2020).

Wobec tego można stwierdzić, że tego rodzaju zjawisko nie wystąpi również podczas magazynowania gazu ziemnego i wodoru w horyzoncie C.

Mieszanie gazu

Zjawisko mieszania gazu zatłaczanego i gazu rodzimego jest naturalnym procesem, który zachodzi w złożu, kiedy następuje w nim zetknięcie gazów o różnym składzie chemicznym, jak stanie się to w przypadku horyzontu C. Mieszanina gazu ziemnego i wodoru będzie otworami zatłaczana do złoża, w którym znajduje się gaz rodzimy. Gaz zatłaczany będzie wypierał gaz rodzimy najpierw ze stref przyodwiertowych, a następnie będzie się łączył z gazem zatłaczanym na innych otworach. W ten sposób powstanie połączony front gazowy, początkowo z enklawami gazu rodzimego, który będzie się rozszerzał w stronę konturu złoża (zakładamy, że tłoczenie następuje od szczytu struktury), wypychając gaz rodzimy właśnie w kierunku konturu. Podczas stójek pomiędzy okresem zatłaczania i odbioru będzie zachodziła stopniowa dyfuzja

gazów i następował proces mieszania. W początkowych cyklach odbioru gazu należy się liczyć z tym, że zawartość wodoru w gazie odbieranym będzie mniejsza niż w gazie zatłaczanym i będzie dalej malała wraz z odbiorem. Proces ten będzie się powtarzał podczas kolejnych cykli, przy czym różnica w składzie procentowym gazu zatłaczanego będzie coraz mniejsza, a zawartość wodoru w gazie odbieranym będzie z każdym cyklem magazynowym zbliżała się do jego zawartości z fazy zatłaczania. Szybkość mieszania obu gazów będzie zależała przede wszystkim od ilości gazu rodzimego w buforze oraz ilości zatłaczanego i odbieranego gazu zmieszanego. Proces mieszania gazów w tym przypadku należy uznać za korzystny, gdyż w poszczególnych cyklach pracy magazynu będzie odbierany gaz o większej kaloryczności niż gaz zatłaczany (kaloryczność metanu jest wyższa niż wodoru), a więc proces ten nie stanowi żadnego zagrożenia dla magazynu.

Ocena szczelności horyzontu C

Aktualny stan wiedzy dotyczący budowy strukturalnej horyzontu C pozwala stwierdzić, że pułapka pierwotnie była szczelna i pozwoliła na powstanie złoża gazu ziemnego. Granice pułapki od W, S i E mają charakter litologiczny i wiążą się z zanikiem piaskowców przechodzących w facje ilasto-mułowcową i ilastą. Od północy granicę złoża stanowi woda złożowa o charakterze naporowym, o czym świadczy zawadnianie się kolejnych otworów podczas eksploatacji.

Kształt pułapki, jej charakter litologiczny i obecność wód złożowych gwarantują szczelność strukturalną pułapki przynajmniej do pierwotnej głębokości położenia konturu gaz-woda.

Ewentualne nieszczelności złoża w horyzoncie C mogłyby jedynie wynikać z przewiercenia horyzontu przez dość liczne otwory udostępniające ten lub niższe horyzonty. W przypadku słabego lub złego stanu zacementowania tych otworów mogłyby one być nieszczelne.

Pierwotną strefę złożową w horyzoncie C przewierca 10 otworów, a w strefie pierwotnie zawodnionej zlokalizowanych jest kolejnych 10 otworów. Z tego względu przed przystąpieniem do magazynowania mieszaniny metanu i wodoru w tym horyzoncie konieczne jest wykonanie badań stanu zacementowania otworów, szczególnie tych, które znajdują się w pierwotnej strefie gazowej, czyli powyżej izohipsy około 760 m p.p.m. Niezbędne będzie również wytypowanie odwiertów obserwacyjno-piezometrycznych w horyzoncie C oraz w nadległym poziomie piaskowcowym, czyli w horyzoncie B. W horyzoncie C odwierty piezometryczne powinny być zlokalizowane w strefie gazowej (obserwacje ciśnienia) i strefie przemieszczania się konturu gaz-woda (obserwacje zmian ciśnienia złożowego oraz konturu gaz-woda). W pierwszym poziomie piaskowcowym, położonym powyżej horyzontu C, czyli w horyzoncie B, odwiert piezometryczny powinien być

zlokalizowany w szczycie struktury (najlepiej w strefie gazowej), a jego zadaniem będzie pomiar ciśnienia oraz możliwość wykonywania w odwiercie kontrolnych pomiarów geofizycznych i poboru próbek gazu lub wody do badań ich składu chemicznego.

Ze względu na to, że w gazie magazynowym będzie obecny wodór, wystąpi konieczność dokonania przeglądu wyposażenia węgłnego oraz napowierzchniowego pod kątem odporności użytych stali i innych materiałów na korozję wodorową (Pietkun-Greber i Janka, 2010). Dotyczy to zarówno otworów eksploatacyjnych, jak i otworów przewiercających horyzont. W tym ostatnim przypadku istotnym elementem będzie ocena stanu zacementowania rur okładzinowych w interwale horyzontu C.

Ustalony dla horyzontu C skład chemiczny skał zbiornikowych i uszczelniających, skład chemiczny gazu oraz wód złożowych pozwala stwierdzić, że w złożu nie dojdzie do szkodliwych reakcji chemicznych oraz negatywnych zjawisk fizycznych. Natomiast trzeba się liczyć ze zjawiskiem dyfuzji wodoru w strefie gazowej poziomu magazynowego, a częściowo również do wód złożowych, podścielających strefę gazową. Łączna ilość wodoru, która może ulec dyfuzji, jest szacowana na do 2% objętości gazu zatłoczonego. Proces dyfuzji będzie ciągły, więc szacowana ilość utraty wodoru będzie rozłożona w czasie na cały okres eksploatacji magazynu.

Nie przewiduje się tworzenia się „języków gazowych” lub odrębnych „języków wodorowych” w horyzoncie C, co wynika z jego dość wysokich i wyrównanych parametrów porowatości oraz przepuszczalności w obrębie całego złoża. Ich równomierne rozłożenie powinno umożliwić rozchodzenie się zatłoczonego gazu w złożu w sposób jednolity, wspólnym frontem.

Przed przystąpieniem do zatłaczania mieszaniny gazu i wodoru konieczne będzie pobranie próbek gazu i wody złożowej z poziomu zbiornikowego w celu wykonania szczegółowych badań mikrobiologicznych i ustalenia stanu bakteriologicznego złoża oraz określenia rodzaju występujących grup bakterii. Na bazie badań należy dokonać oceny zagrożeń związanych z występującymi w złożu grupami bakterii.

W początkowej fazie pracy magazynu należy się liczyć z występowaniem procesu mieszania gazu rodzimego pozostałego w horyzoncie C z gazem do niego zatłaczanym (o składzie: 90% gaz ziemny + 10% H₂). Mieszanie wiąże się z tym, że podczas każdej fazy odbioru początkowo będziemy odbierać gaz o składzie zbliżonym do zatłoczonego, a w miarę odbioru ilość H₂ będzie malała, natomiast będzie rosła zawartość metanu (pierwotny gaz to niemal 99% CH₄). Z każdym cyklem jednak zawartość wodoru będzie wzrastać – do wartości coraz bliższej 10%.

W przypadku horyzontu C mieszanie gazu rodzimego z zatłaczanym będzie korzystne, gdyż gaz odbierany będzie miał wyższą kaloryczność od gazu zatłoczonego.

Wstępne parametry magazynowania dla PMW w horyzoncie C

Na podstawie pierwotnych i aktualnych parametrów złożowych dotyczących zasobów geologicznych, ciśnień, wydobywania oraz parametrów petrofizycznych skał złożowych opracowano wstępne parametry magazynowania wodoru w horyzoncie C (tabela 15).

Tabela 15. Oszacowanie wstępnych parametrów magazynowania wodoru w horyzoncie C
Table 15. Estimation of the initial parameters of hydrogen storage in horizon C

Parametry	Dane szacunkowe
Pierwotne zasoby geologiczne	85 mln m ³
Wydobycie	69,0 mln m ³
Aktualne zasoby geologiczne	16,0 mln m ³
Ciśnienie złożowe pierwotne, P_{ds}	9,65 MPa
Ciśnienie złożowe aktualne, P_{dsa}	4,25 MPa
Pierwotna pojemność porów, V_{pp}	0,87 mln m ³
Aktualna pojemność porów, V_{pa}	0,45 mln m ³
Projektowana pojemność porów, V_{ppr}	0,66 mln m ³
Zakres pracy ciśnień PMW	6,4–9,7 MPa
Pojemność czynna PMW, V_a	25,0 mln m ³
Pojemność buforowa PMW, V_b	41,0 mln m ³
Pojemność całkowita PMW, V_c	66 mln m ³
Udział metanu*	61 mln m ³
Udział wodoru*	5 mln m ³

* Przyjęto uproszczenie, że metan i wodór stanowią 100% gazu zatłoczonego.

Według danych przedstawionych powyżej obecnie pozostało w horyzoncie 16 mln m³ gazu (dla uproszczenia przyjęto, że jest to w 100% metan), czyli do osiągnięcia pełnej pojemności całkowitej trzeba będzie zatłoczyć 50 mln m³ gazu. Z tej ilości 25 mln m³ gazu będzie stanowić uzupełnienie projektowanej pojemności buforowej (41 mln m³), zaś kolejne 25 mln m³ gazu będzie stanowić pojemność czynną PMW. Przy założeniu, że do magazynu od początku tłoczmy gaz w proporcji: 90% metanu i 10% wodoru, to po zatłoczeniu 50 mln m³ gazu, do osiągnięcia pojemności całkowitej, czyli 66 mln m³, w magazynie będzie 61 mln m³ metanu (wliczając gaz rodzimy) i 5 mln m³ wodoru. Ta sytuacja wystąpi oczywiście przy założeniu, że magazyn zostanie zatłoczony do końcowej pojemności bez odbioru gazu.

Wnioski

W szcerpanych horyzontach piaskowcowych miocenu autochtonicznego będzie istniała możliwość magazynowania mieszaniny gazu ziemnego i wodoru w podziemnych magazynach wodoru (PMW).

Przeznaczony do magazynowania horyzont złożowy musi spełniać wszystkie kryteria konieczne do budowy w nim PMG oraz dodatkowo kryteria dotyczące magazynowania wodoru i przekształcenia go w PMW.

W związku z ograniczoną liczbą badań w zakresie składu chemicznego skał, gazu rodzimego, wód złożowych, parametrów petrofizycznych, badań mikrobiologicznych, geofizycznych wykonanych dotychczas w horyzoncie C wymagane będzie przeprowadzenie dodatkowych badań i pomiarów koniecznych do określenia wymaganych parametrów złoża.

Konieczny będzie audyt stanu technicznego odwiertów oraz stanu ich zacementowania.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Ocena możliwości magazynowania wodoru gazowego w eksploatowanych PMG w Polsce SE* – praca INiG – PIB na zlecenie MEiN; nr zlecenia: 0034/KP/2021, nr archiwalny: DK-4101-0022/2021.

Literatura

Beghi G., 1979. Energy Storage and Transportation. Prospect for New Technologies. *Commission of the European Communities*.
 Bielański A., 1976. Podstawy chemii nieorganicznej. *Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa*.
 Blondin E., 1994. Underground Gas Storage Facilities in France. *Environmental Science*: 51–62.
 Briere D., Jerzykiewicz T., 2016. On generating a geological model for hydrogen gas in the southern Taoudeni Megabasin (Bourakebougou area, Mali). *International Conference & Exhibition, Barcelona, Spain*. DOI: 10.1190/ice2016-6312821.1.
 Carden P.O., Paterson L., 1979. Physical, chemical, and energy aspects of underground hydrogen storage. *Int. J. Hydrogen Energy*, 4(6): 559–569. DOI: 10.1016/0360-3199(79)90083-1.

Cornot-Gandolphe S., 2018. Underground Gas Storage in the World – 2018 Status. *Report prepared for Cedigaz*: 1–19.
 Czapowski G., Tarkowski R., 2018. Uwarunkowania geologiczne wybranych wysadów solnych w Polsce i ich przydatność do budowy kawern do magazynowania wodoru. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 472: 53–81. DOI: 10.5604/01.3001.0012.6905.
 DBI GUT, 2017. The effects of hydrogen injection innatural gas networks for the Dutch underground storages'. Final Report. Commissioned by the ministry of Economic Affairs. *Netherlands Enterprise Agency*: 1–74.
 Deronzier J.F., Giouse H., 2020. Vaux-en-Bugey (Ain, France): the first gas field produced in France, providing learning lessons for natural hydrogen in the sub-surface? *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 191(7). DOI: 10.1051/bsgf/2020005.
 Donadei S., Schneider G.S., 2016. Compressed air energy storage in underground formations. [W:] Letcher T.M. *Storing Energy*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands: 113–133. DOI: 10.1016/B978-0-12-803440-8.00006-3.
 Ebrahimiyehta A., 2017. Characterization of geochemical interactions and migration of hydrogen in sandstone sedimentary formations: application to geological storage. *Earth Sciences, Université d'Orléans*: 1–177.
 Guélard J., Beaumont V., Rouchon V., Guyot F., Pillot D., Jézéquel D., Ader M., Newell K.D., Deville E., 2017. Natural H₂ in Kansas: deep or shallow origin? *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 18(5): 1841–1865. DOI: 10.1002/2016GC006544.
 Hagemann B., 2017. Numerical and Analytical Modeling of Gas Mixing and Bio-Reactive Transport During Underground Hydrogen Storage. Reactive fluid environment. *Université de Lorraine*: 1–224.
 Juhlin Ch., Rüdiger G., Zinck-Jørgensen K., Cosma C., Kazemeini H., Juhojuntti N., Lüth S., Norden B., Förster A., 2007. 3D baseline seismics at Ketzin, Germany: The CO₂ SINK project. *Geophysics*, 72(5): B121–B132. DOI: 10.1190/1.2754667.
 Komisja Europejska, 2011. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. Plan działania prowadzący do przejścia na konkurencyjną gospodarkę niskoemisyjną do 2050 r. Bruksela, 8.03.2011 r., KOM(2011) 112 wersja ostateczna.
 Komisja Europejska, 2020. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego, Komitetu Regionów. Strategia w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu. Bruksela, 8.07.2020 r. COM(2020) 301 final.
 Kopal L., Čížek P., Milička J., 2016. Geological model of Lobodice underground gas storage facility based on 3D seismic interpretation. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 46(2): 125–135. DOI: 10.1515/congeo-2016-0009.
 Moretti I., Webber M.E., 2021. Natural hydrogen: a geological curiosity or the primary energy source for a low-carbon future. *Renewable Matter*, 34.
 Nowak J., Olszewska K., Pawłowski A., 2010. Stan zaawansowania budowy podziemnych magazynów gazu w obszarze działania PGNiG S.A. Oddziału w Zielonej Górze. *Nafta-Gaz*, 66(8): 681–690.
 Panfilov M., 2016. Underground and pipeline hydrogen storage. [W:] Gupta R.B., Basile A., Veziroğlu T.N. (eds.). *Compendium of Hydrogen Energy*: 91–115. DOI: 10.1016/B978-1-78242-362-1.00004-3.
 Pérez A., Pérez E., Dupraz S., Bolcic J., 2016. Patagonia Wind – Hydrogen Project: Underground Storage and Methanation. *21st World Hydrogen Energy Conference 2016. Zaragoza, Spain*.

- Pietkun-Greber I., Janka R.M., 2010. Oddziaływanie wodoru na metale i stopy. *Proceedings of ECOpole*, 4(2): 472–475.
- Pilot Site Ketzin. Geology. <<https://www.co2ketzin.de/en/pilot-site-ketzin/geology>> (dostęp: 04.03.2021).
- RAG Austria AG, Axiom Angewandte Prozesstechnik Gesmbh, Verbund AG, Montanuniversität Leoben, Universität für Bodenkultur Wien, EnergieInstitut an der Johannes Kepler Universität Linz, 2020. Underground Sun Storage: Final Report Public, 13 January 2020: 1–172.
- Smigan P., Greksak M., Kozankova J., Buzek F., Onderka V., Wolf I., 1990. Methanogenic bacteria as a key factor involved in changes of town gas stored in an underground reservoir. *FEMS Microbiology and Ecology*, 73: 221–224.
- Such P. 2020. Magazynowanie wodoru w obiektach geologicznych. *Nafta-Gaz*, 76(11): 794–798. DOI: 10.18668/NG.2020.11.04.
- Ślizowski J., Urbańczyk K., Lankof L., Serbin K., 2011. Analiza zmienności polskich pokładów soli kamiennej w aspekcie magazynowania gazu. *Wiertnictwo, Nafta, Gaz*, 28(1–2): 431–442.
- Tarkowski R., 2017. Wybrane aspekty podziemnego magazynowania wodoru. *Przegląd Geologiczny*, 65(5): 282–291.
- Tarkowski R., 2019. Underground hydrogen storage. Characteristics and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 105: 86–94. DOI: 10.1016/j.rser.2019.01.051.
- Zivar D., Sunil K., Foroosh J., 2020. Underground hydrogen storage: A comprehensive review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(45): 23436–23462.



Mgr inż. Bogdan FILAR
Starszy specjalista badawczo-techniczny;
kierownik Zakładu Podziemnego Magazynowania Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: bogdan.filar@inig.pl



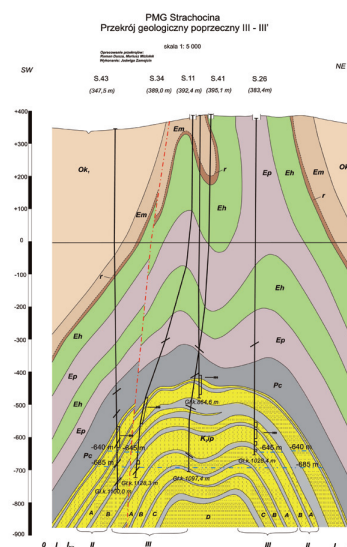
Dr Tadeusz KWIŁOSZ
Adiunkt w Zakładzie Podziemnego Magazynowania Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: tadeusz.kwilosz@inig.pl



Mgr Mariusz MIZIOŁEK
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Podziemnego Magazynowania Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: mariusz.mizolek@inig.pl

OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU PODZIEMNEGO MAGAZYNOWANIA GAZU

- analiza struktur geologicznych złóż gazu ziemnego, ropy naftowej oraz obiektów zawodniczych, pod kątem możliwości ich przekształcenia w PMG;
- szczegółowa analiza warunków geologiczno-złożowych, ocena dotychczasowej eksploatacji złoża, warunków hydrodynamicznych, zdolności wydobywczych odwiertów;
- ocena stanu technicznego istniejącej infrastruktury w aspekcie jej wykorzystania w pracy PMG;
- wykonywanie cyfrowych modeli geologicznych PMG, złóż gazu ziemnego i ropy naftowej;
- wykonywanie projektów budowy PMG;
- analiza dotychczasowej pracy istniejących PMG w celu optymalizacji parametrów dalszej eksploatacji magazynów na bazie symulacji komputerowej;
- opracowanie projektów prac geologicznych, dotyczących poszukiwania i rozpoznawania złóż gazu ziemnego i ropy naftowej;
- opracowanie dokumentacji geologicznych złóż ropy naftowej i gazu ziemnego;
- opracowanie programu optymalnej eksploatacji złoża, wydajności poszczególnych odwiertów, tempa szczypania itp.



Kierownik: mgr inż. Bogdan Filar Adres: ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno
Telefon: 13 436 89 41 w. 5202 Faks: 13 436 79 71 E-mail: bogdan.filar@inig.pl



INSTYTUT NAFTY I GAZU
– Państwowy Instytut Badawczy