

Wodór naturalny w Polsce

Krystian Wójcik¹



Natural hydrogen in Poland. *Prz. Geol.*, 72: 584–596; doi: 10.7306/2024.37

Abstract. Natural hydrogen occurs as admixtures in Polish gas fields, reaching max. 10.4% vol. As a free gas, gas dissolved in waters/brines, gas from mud degassing or desorbed gas, it has been found in numerous wells in Cambrian, Devonian, Carboniferous, Rotliegend, Zechstein Limestone, Main Dolomite, and Triassic rocks, as well as in the Paleozoic-Mesozoic basement of the Carpathian units, Miocene of the Carpathian Foredeep and in the Outer Carpathians. In a similar form, hydrogen has also been found in copper and salt mines. So far, the content and distribution of the natural hydrogen in individual stratigraphic units, as well as hydrogen resources and potential for exploration, have not been determined. The origin of the accumulations is also unknown, although several possibilities of hydrogen generation should be considered on the territory of Poland: migration from deeper parts of the crust or Earth's mantle/core along deep faults, serpentinization of mafic/ultramafic rocks, radiolysis of water, hydrolysis in iron-rich formations, Variscan magmatism and volcanism, metamorphism of coal beds, and biogenic decomposition of organic matter. These issues will be the subject of the Polish Geological Survey investigations planned beginning from 2025. The article describes the research plan for natural hydrogen exploration in Poland. This work is therefore a review of ideas and questions, which will hopefully find an answer or will be at least considered in later publications of various authors.

Keywords: natural hydrogen, hydrogen occurrences and origin, research strategy

W niniejszym artykule nakreślono problematykę i plan poszukiwań naturalnego wodoru w Polsce. Praca ta ma więc charakter przeglądowy i porządkowy, a przedstawione tutaj rozważania, pomysły i stawiane pytania być może znajdą odpowiedź (lub przynajmniej odbiją się echem) dopiero w przyszłych publikacjach. Wodór naturalny jest coraz częściej zauważany jako (dodatkowe) źródło surowca, jednak o geologicznych aspektach jego powstawania i występowania wiemy jeszcze stosunkowo niewiele.

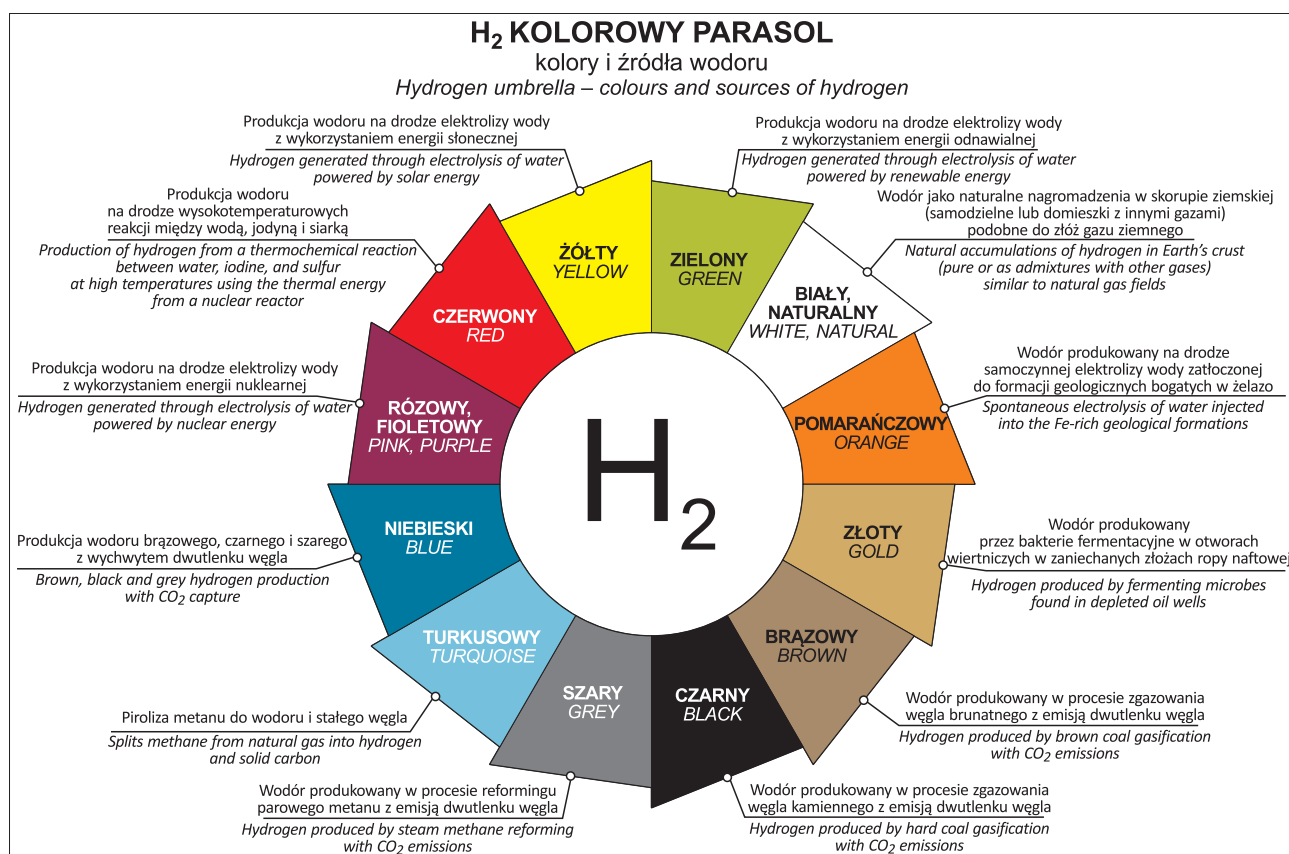
Zwiększenie udziału energii elektrycznej wytwarzanej z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii (OZE) w bilansie energetycznym jest wielkim wyzwaniem rozwojowym nie tylko Polski, ale większości rozwiniętych gospodarek świata [...]. Wodór, pełniąc rolę magazynu energii, może odegrać istotną rolę w procesie osiągnięcia neutralności klimatycznej [...]. Ten cytat pochodzi ze strategicznego dokumentu rządowego, opracowanego w 2021 r. w Ministerstwie Klimatu i Środowiska – *Polskiej Strategii Wodorowej do roku 2030 z perspektywą do roku 2040* (PSW, 2021). Strategia ta wspiera dążenia Unii Europejskiej, w tym także Polski, do osiągnięcia gospodarki neutralnej dla klimatu do 2050 r., zgodnie z celem określonym w Europejskim Zielonym Ładzie. Przejawy tych dążeń możemy ostatnio odnajdywać w coraz to nowych regulacjach, transformujących nasze otoczenie i funkcjonowanie w aspektach wytwarzania i korzystania z energii. Według autorów PSW: *Na 2030 r. przewidziano dążenie do osiągnięcia mocy zainstalowanej z niskoemisyjnych źródeł i procesów na poziomie 2 GW, która umożliwi produkcję 193 634,06 ton wodoru rocznie, co pokryje 99,4% zapotrzebowania na wodór w gospodarce narodowej.* Chodzi tutaj oczywiście o zapotrzebowanie na wodór niepozostawiający śladu węglowego. Tymczasem w 2018 r. w Polsce wyprodukowano ok. 1,3 mln tzw. szarego wodoru – otrzymanego w procesie reformingu parowego gazu ziemnego. Plasuje to nasz kraj na trzeciej pozycji w Europie i siódmej pozycji

na świecie pod względem produkcji (Chiny, kraje Bliskiego Wschodu, Stany Zjednoczone, Indie, Niemcy i Holandia były największymi producentami wodoru w 2023 r. wg danych IEA, 2024 i EHO, 2024), niestety w tym przypadku nie mamy do czynienia z wodorem czystym, bo w toku jego wytwarzania jest emitowany także dwutlenek węgla.

Produkcja wodoru w procesie elektrolizy wody z wykorzystaniem energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych (tzw. wodór zielony, wodór żółty) czy też przeróbka gazu ziemnego lub węgla (tzw. wodór szary, wodór czarny) to tylko niektóre z wielu sposobów otrzymywania tego gazu (zobacz ryc. 1). Do niedawna zupełnie niedostrzeganym na świecie, jak również niewymienionym w PSW źródłem surowca był wodór geologiczny, czyli zakumulowany w skorupie ziemskiej, podobnie jak złoża gazu ziemnego. Możliwość pozyskiwania wodoru z głębi ziemi jako alternatywnej, czystej dla środowiska i (w pewnych przypadkach) odnawialnej kopaliny energetycznej wzbudza coraz więcej emocji w świecie nauk geologicznych, szeroko rozumianym przemyśle i instytucjach finansujących poszukiwania złóż, a także w państwowej administracji. Ostatnio znalazło to wyraz chociażby w nowelizacji ustawy z dnia 9 czerwca 2011 r. *Prawo geologiczne i górnicze* (Ustawa, 2011, 2023), w której wodór został uznany za kopalinę objętą własnością górniczą (art. 10), a przepisy regulujące zasady jego poszukiwania i wydobywania są takie same jak w przypadku węglowodorów (np. art. 49).

Warto jeszcze na wstępie wyjaśnić Czytelnikowi pewne kwestie dotyczące nomenklatury geologicznego wodoru i podkreślić subtelne różnice, na które trzeba zwracać uwagę, czytając coraz obszerniejszą literaturę problemu. W ujęciu potocznym, publicystyce, ale czasami także w publikacjach naukowych wodor nagromadzony w skałach jest nazywany także wodorem naturalnym (najczęściej), wodorem białym, wodorem złotym, wodorem pomarańczowym,

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; kwoj@pgi.gov.pl; ORCID ID: 0000-0002-4856-0619.



Ryc. 1. Wodorowy kolorowy parasol – różne kolory wodoru odnoszą się do różnych sposobów otrzymywania surowca oraz emisyjności/czystości procesów produkcji wodoru różna dla środowiska (na podstawie SPECTRA, 2024; popularną formą ilustracji kolorów wodoru jest również tęcza, choć w prawdziwej tęczy trudno oczekiwać koloru czarnego)

Fig. 1. Hydrogen colour umbrella – different hydrogen colours related to different methods of hydrogen production and its environmental impact (SPECTRA, 2024; another way of hydrogen colour illustration is hydrogen rainbow, although in a real rainbow the black is absent)

czy wodorem rodzimym (ryc. 1), które to określenia często są traktowane jako synonimy (np. Tian i in., 2022; Hand, 2023a; Wójcik, 2024), nie do końca poprawnie i świadomie. Nawet zakumulowany w skorupie ziemskiej wodór ma sporą różnorodność – może powstawać na drodze różnych naturalnych lub nawet indukowanych przez człowieka procesów. W tej pierwszej grupie, w której wodór jest produktem naturalnie zachodzących zjawisk przyrody, mamy do czynienia z wodorem naturalnym, względnie białym. Jeśli proces powstawania wodoru został wywołany przez człowieka (raczej nieintencjonalnie), np. poprzez zakażenie złóż węglowodorów bakteriami fermentującymi podczas eksploracji naftowej, wówczas mówimy o wodorze złotym (SPECTRA, 2024). Jeśli natomiast udałoby się produkować wodór intencjonalnie, wywołując jego generację w skorupie ziemskiej, taki wodór nazwiemy pomarańczowym (*op. cit.*). Należy unikać jednak używania określenia „wodór rodzimy” (jak zdarzyło mi się to np. tutaj: Wójcik,

2024), choć pierwiastek ten rzeczywiście występuje w przyrodzie, tworząc jednorodną cząsteczkę H₂, nie jest minerałem ani nawet gazem szlachetnym, jest wysoce reaktywny i łatwo miesza się z innymi gazami (podobnie trudno jest mówić, że w przyrodzie występuje tlen czy azot rodzimy).

CZY WODÓR TWORZY ZŁOŻA I JAK JE ZNALEŹĆ?

Geologia wodoru naturalnego – poszukiwanie jego akumulacji i obliczanie potencjalnych zasobów, zwłaszcza jednak jego geneza – to zagadnienia w Polsce nowe (zobacz: Twaróg, 2024a; Wójcik, 2024)², a i na świecie rozwijane od niedawna³. Jak już na wstępie w swej doniosłej pracy zaznaczył Zgonnik (2020)⁴: [...] było tak z powodu panującego przekonania, że wolny wodór występuje rzadko w środowisku naturalnym, a opisy kilku zaledwie jego naturalnych wystąpień były traktowane dość anegdotycznie i z jakichś

² Warto zwrócić jednak uwagę na pokrewną problematykę magazynowania wodoru w kawernach solnych, która cieszy się w Polsce dość dużym zainteresowaniem, zwłaszcza ze względu na doświadczenie w budowie tego typu obiektów pod magazyny gazu ziemnego (zob. np.: Ślizowski i in., 2017; Małachowska i in., 2022; Miziołek i in., 2022; Uliasz-Misiak i in., 2022, 2024; Piech, Szurlej, 2023; Tarkowski i in., 2024).

³ Z tej przyczyny wodór naturalny jest niezwykle wdzięcznym obiektem badań, nie tylko z powodu dziewiczej problematyki wymuszającej wykonanie badań podstawowych w geologii, ale również ze względu na nietrzywalny i niewysublimowany ich cel, jakim jest znalezienie złóż nowego surowca, zwanego marketingowo paliwem przyszłości.

⁴ Praca Zgonnika (2020) niewątpliwie uporządkowała i zgromadziła dotychczasową wiedzę o wodorze naturalnym, wzbudzając zainteresowanie i inicjując badania naukowe na całym świecie (w sierpniu 2024 r. w bazie Scopus praca miała 172 cytowania). I zwłaszcza do niej odsyłam Czytelnika, który, chcąc rozpocząć swą pracę nad zagadnieniem wodoru naturalnego, znajdzie tam m.in. przegląd miejsc i sposobów występowania wodoru oraz możliwej jego genezy w skorupie ziemskiej.

powodów nie przyciągnęły większej uwagi. Dlatego, jeśli nikt nie oczekiwał znalezienia wodoru naturalnego, nikt nie pobierał w tym celu próbek [...]. Trudno oszacować jak wiele razy wodór nie został zidentyfikowany w bogatych w ten gaz próbkach z powodu braku odpowiednich technik detekcji umożliwiających pomiar jego koncentracji. W takim kontekście przełomowym było odkrycie złoża niemal czystego (98% obj.) wodoru w Bourakebougou w Mali w 2012 r. (pierwszy otwór wiertniczy został co prawda wykonany w 1987 r., jednak dopiero 25 lat później, na zlecenie malijskiego biznesmena i szefa firmy naftowej *Petroma* – Aliou Diallo, kanadyjscy technicy z *Chapman Petroleum* stwierdzili, że zarzucony niegdyś projekt wierceń za wodą natrafiał na złożo wodoru; zobacz: Hand, 2023a). Złożo w Afryce jest jak dotąd jedynym zagospodarowanym i udokumentowanym geologicznie złożem wodoru na świecie (szczegółowy jego opis geologiczny można znaleźć w pracy Maiga i in., 2023; zobacz również: Prinzhofer i in., 2018). Ma budowę podobną do typowych złóż gazu ziemnego: skałą zbiornikową są tutaj poziomy neoproterozoicznych piaskowców (wstęgowe formacje żelaziste) i skał węglanowych, przeciętych przez silne mezozoicznych dolerytów, pełniących rolę skały uszczelniającej. Wodór w stanie wolnym wypełnia pory piaskowców i kawerny skrasowaniałych dolomitów, tworząc pierwsze ekonomiczne akumulacje już na głębokości ok. 100 m TVD (*true vertical depth*; głębokość pionowa, faktyczna). Właśnie na jedną z nich natrafiono podczas wiercenia za wodą w 1987 r., a szacowana wydajność z otworu dochodziła do 1500 m³ H₂/dobę. W złożu Bourakebougou poniżej głębokości ~800 m TVD wodór występuje wyłącznie jako składnik rozpuszczony w wodzie. Wydaje się zatem, że złożo tworzy jeden system hydrodynamiczny, w którym gaz rozpuszczony w wodzie podścielającej jest uwalniany i akumulowany w czapie gazowej. W jaki sposób dochodzi jednak do jego generacji? Czyli co jest skałą macierzystą, jeśli znów szukać odniesień do systemów naftowych? Jedną z koncepcji jest utlenianie bogatych w Fe²⁺ wstęgowych formacji żelazistych, w których dochodzi do rozkładu wody z wydzielaniem wodoru (Maiga i in., 2023). Ponieważ ciśnienie złożowe, pomimo 11 lat eksploatacji, nie uległo zmianie i nadal wynosi 4,5–5,0 barów, wydaje się, że złożo jest cały czas „ładowane”, przynajmniej dopóki nie wyczerpie się jego żelazna bateria. Samooodnawialność złoża malijskiego, czyli ciągła, nieprzerwana generacja wodoru, skłoniła nawet część środowiska naukowego do uznania wodoru naturalnego za surowiec odnawialny! Przynajmniej w skali życia ludzkiego (np. Maiga i in., 2023; Prinzhofer, Cacas-Stentz, 2023, str. 21611).

Przypadek malijskiego złoża wodoru jeszcze do niedawna nie przyciągał większej uwagi. Aż do 15 maja 2023 r., kiedy FDE – francuski niezależny koncern multienergetyczny – ogłosił odkrycie w Lotaryngii największego na świecie złoża białego wodoru o zasobach szacowanych na 46 mln t (Pironon, de Donato, 2023). Ta wiadomość (FDE, 2023), choć dość enigmatyczna w treści, zelektryzowała środowisko naukowe i przedsiębiorstwa produkujące energię nie tylko w Europie, ale i na całym świecie. Stało się wówczas jasne, że występowanie złóż wodoru nie jest czymś wyjątkowym, a ich eksploatacja może być dodatkowym źródłem czystego dla środowiska surowca (np. Ball, Czado, 2022, 2024; Ellis, 2024). Co prawda we Francji nie odkryto wolnego wodoru, a jedynie 15-procentową koncentrację gazu rozpuszczonego w wodzie na głębokości

1093 m MD (*measured depth*; głębokość wiertnicza) i przewidywanej jedynie zawartości 98% na głębokości 3000 m MD w warstwach karbońskich piaskowców. Można jednak doszukiwać się pewnych podobieństw do złoża malijskiego pod względem systemu hydrochemicznego, choć „bateria” zasilająca złożo jest prawdopodobnie inna.

Datę 15 maja 2023 r. można przyjąć jako początek boomu wodorowego w Europie: ponownego ożywienia poszukiwań geologicznych, podobnie jak miało to miejsce na przełomie pierwszej i drugiej dekady XXI w. podczas boomu łupkowego. Jest to też spora szansa dla sektora nafty i gazu, którego transformację w kierunku rozwiązań sprzyjających redukcji emisji CO₂, np. inwestycje w technologie CCS (*carbon capture and storage* – procesy wychwytywania i składowania dwutlenku węgla w strukturach geologicznych) wymusza Unia Europejska. Francuskie odkrycie było z pewnością najbardziej doniosłe, inicjując poszukiwania naturalnego wodoru w wielu krajach, w tym także w Polsce. Trzeba jednak pamiętać, że równolegle rozwijały się inne, tak samo ważne projekty (zobacz np. Peacock, 2022; Hand, 2023b), których rezultaty rzucają o wiele jaśniejsze światło na poszukiwania wodoru w głębokich formacjach geologicznych. Na przykład w północnej Hiszpanii, w basenie Ebro, w otworze Monzon-1 odkryto dwa poziomy nasyczone mieszaniną metanu i wodoru w postaci gazowej (Atkinson i in., 2022). Głębszy z nich, w interwale 3683,0–3714,6 m MD dolnego triasu, zawierał 25% wodoru. Jest to o tyle ciekawe, że otwór został wykonany w latach 60. XX w. Obecnie obszar jest badany przez przedsiębiorstwo *Helois Aragón Pte Ltd*.

Na obszarach, na których wglębna budowa geologiczna została dobrze rozpoznana za pomocą głębokich wierceń, poszukiwania złóż naturalnego wodoru powinny się skoncentrować, w pierwszej kolejności, właśnie na sprawdzeniu, czy wodór został stwierdzony w próbkach gazów pozyskanych z testów złożowych, próbkach gazów z desorpcji rdzeni wiertniczych oraz próbkach gazów z degazacji wód (porównaj: Lévy i in., 2023b). Będzie to dotyczyć głównie otworów wiertniczych wykonanych na potrzeby prospekcji naftowej, ale nie tylko. Użyteczne są też próbki z kopalni węgla i rud metali (np. Kotarba i in., 2017; zobacz też przykłady u Zgonnika, 2020), w których wodór często występuje jako składnik rozpuszczony w wodzie lub jako gaz wolny wypełniający pory czy pustki skalne. Taką strategię powinny obrać kraje europejskie, a szczególnie Polska, co może szybko doprowadzić do znalezienia mniejszych lub większych akumulacji naturalnego wodoru lub jego mieszaniny z innymi gazami. Wówczas, mając już realne, fizyczne obiekty badań, należałoby sprawdzić, czy akumulacje te są zauważalne dla narzędzi geofizycznych – geofizyki wiertniczej i sejsmiki 2D i 3D.

Co jednak w przypadkach, kiedy brak wystarczającej ilości danych wiertniczych, albo gdy obszar jest zupełnie nierozpoznany geologicznie? Obecność wodoru w głębszych warstwach geologicznych manifestuje się na powierzchni w różnoraki sposób (porównaj: Zgonnik, 2020; Lévy i in., 2023b; McMahan i in., 2023). Pominę tutaj, choć może najbardziej spektakularne, przykłady emanacji wodoru w głębokomorskich kominach hydrotermalnych (białych i czarnych smokersach w strefach ryftów śródoceanicznych), ekshalacji wulkanicznych i gejzerów. Współcześnie największe zainteresowanie wzbudzają naturalne wysięki wodoru na powierzchni terenu. Występują

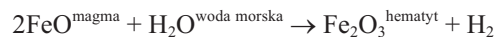
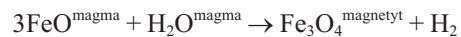
one w postaci mniej lub bardziej skoncentrowanych strumieni gazu wydostającego się szczelinami ze skał lub uwalnianego z porów osadu, co niekiedy objawia się jako palne flary (np. w miejscowości Chimaera w tureckiej Anatolii; Zgonnik, 2020; link 1) lub bąbelki gazu ulatujące z dna zbiornika wodnego (np. w omańskich źródłach w pobliżu Al Hayalayn w Jebel Akdar – link 2, czy na Bałkanach w Albanii i Kosowie – Lévy i in., 2023a; w obu przypadkach emanacje wodoru są związane z masywami ofiolitowymi). Przejawem występowania wgłębnej akumulacji wodoru (lub przynajmniej aktywnego systemu generującego wodór) i jego przesiąkania na powierzchnię są też podwyższone zawartości gazu w glebie. Niekiedy objawiają się one w postaci dość charakterystycznych, choć niedokładnie jeszcze opisanych struktur o genezie prawdopodobnie diagenetycznej – pozbawionych roślinności koncentrycznych kręgów/zapadlisk o głębokości ok. 1 m, płaskim dnie i średnicy najczęściej kilkunastu-kilkudziesięciu metrów. Przypominają one nieco wyschnięte jeziora solne (Aimar i in., 2023). Wodór wysiaka wzdłuż krawędzi kręgów, gdzie jego zawartość w glebie jest kilkadziesiąt do kilkuset razy większa (25–200 ppm) niż tła geochemicznego wewnątrz i na zewnątrz kręgów (0–3 ppm). Struktury te są coraz częściej notowane w różnych częściach świata, np.: Australii (Frery i in., 2021; Aimar i in., 2023), Brazylii (Prinzhofer i in., 2019; Donzé i in., 2020; Moretti i in., 2021), Francji (Halas i in., 2021), Kolumbii (Ramierz i in., 2023), Namibii (Moretti i in., 2022; Roche i in., 2024), Republice Południowej Afryki (Geymond i in., 2022), Rosji (Larin i in., 2015), Urugwaju (Korchagin, Yakymchuk, 2023) czy USA (Zgonnik i in., 2015; Hand, 2023a), zostały również stwierdzone w Polsce (Twaróg i in., 2024). Ekshalacje i wysięki wodoru są więc zjawiskami dość powszechnymi, podobnymi do naturalnych wysięków metanu, jakie możemy obserwować choćby w polskich Karpatach zewnętrznych (np. Sozański i in., 2006). Z tą jednak różnicą, że ekshalacje wodoru są objętościowo nawet 5-krotnie większe niż wysięki metanu (Prinzhofer, Cacas-Stentz, 2023). Dzieje się tak, ponieważ cząsteczka wodoru, jako najmniejsza molekula w środowisku naturalnym, znacznie szybciej migruje z miejsca generacji ku powierzchni i znacznie trudniej uwięzić ją w pułapce złożowej. Stąd największe ekshalacje wodoru mogą występować na wczesnym etapie formowania złóż gazu ziemnego (*op. cit.*). Objawy wodoru na powierzchni Ziemi, w różnorodnej formie, często występują w strefach głębokich uskoku/rozłamów skorupy ziemskiej, które pełnią rolę ścieżek migracji gazu. Jeśli strefy te, dochodząc do powierzchni terenu, są przykryte odpowiednią ilością luźnego osadu, wówczas wysięki wodoru mogą przybierać formę kręgów koncentrycznych lub nieregularnych stref o podwyższonej koncentracji gazu w osadzie, ułożonych wzdłuż rozciągłości strefy uskokuwej.

JAK I GDZIE POWSTAJE WODÓR NATURALNY?

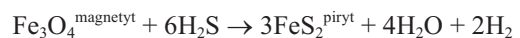
Problematyka genezy wodoru naturalnego, a więc poszukiwania skał macierzystych zdolnych do jego generacji czy rekonstrukcja procesów generowania (poprzez analogię do systemu naftowego, wszak ropa naftowa, gaz ziemny i wodór są zaliczane do grupy kopalin energetycznych), to zagadnienia tak samo nowe jak i fascynujące środowisko

naukowe. Daleko jednak jeszcze do sformułowania spójnego modelu i wyciągnięcia ostatecznych wniosków, które ułatwiłyby poszukiwania złóż wodoru nie tylko na podstawie jego objawów, ale także na podstawie przesłanek genetycznych. Znow można posłużyć się tutaj analogią do złóż ropy naftowej i gazu ziemnego: w przypadku wodoru nie znamy pełnego zakresu skał macierzystych zdolnych go wygenerować ani warunków, w jakich ten proces zachodzi, nie znamy najlepszych skał macierzystych do akumulacji wodoru ani najlepszych skał uszczelniających, wreszcie drogi migracji samego medium mogą być zupełnie inne lub mieć zupełnie inną drożność dla wodoru. Do tego dochodzi jeszcze czas geologiczny, w tym konieczność wzięcia pod uwagę zjawisk przyrody, które obecnie na danym obszarze nie występują. Przykład złoża Bourakebougou w Mali wydaje się być, jak dotąd, najlepiej rozpoznany pod względem zjawisk fizykochemicznych, które doprowadziły do powstania złoża i jego autoregeneracji. Najważniejsze procesy chemiczne zarówno abiotyczne, jak i biologiczne, których produktem jest wolny wodór zostały ostatnio zebrane przez Hassanpouryouzbanda i in. (2024). Gdyby powiązać je z procesami geologicznymi, można wymienić (porównaj: Zgonnik, 2020):

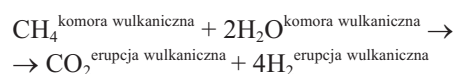
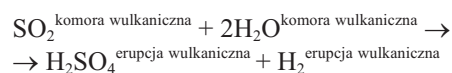
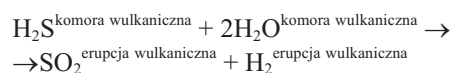
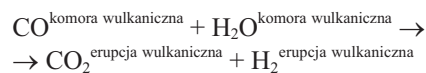
- migrację wodoru z głębi Ziemi (płaszcz lub jądra), czy może bardziej ogólnie – głębokie źródło wodoru, w którym płaszcz i jądro Ziemi są uważane za rezerwuary pierwiastka, uwięzionego w związkach chemicznych na etapie formowania planety, a obecnie przedostającego się na powierzchnię wzdłuż głębokich rozłamów skorupowych (np. Prinzhofer i in., 2024; zobacz też dyskusję, argumenty i przykłady u Zgonnika, 2020);
- magmatyzm (krystalizacja magmy) oraz stygnięcie lawy w warunkach podmorskich:



- procesy hydrotermalne, np. migrację roztworów redukcyjnych sprzyjających wytrącaniu siarczków żelaza:



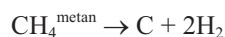
- wulkanizm:



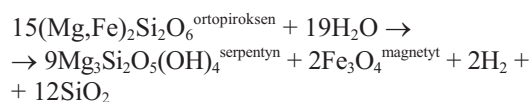
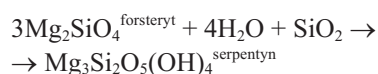
- naturalny rozpad promieniotwórczy – radioliza wody, zachodząca pod wpływem promieniowania jonizującego w skałach wzbogaconych w pierwiastki promieniotwórcze (np. ^{40}Ca , ^{40}K , ^{235}U); Hassanpouryouzbanda i in. (2024) wymieniają również rozpad ropy nafto-

wej/materii organicznej/kerogenu wywołany promieniowaniem, którego efektem jest generacja wodoru (zobacz również: Leila i in., 2022);

- metamorfizm węgla kamiennego w obecności roztworów hydrotermalnych lub wód gruntowych;
- metamorfizm/termiczne przeobrażenie (grafityzacja) metanu:

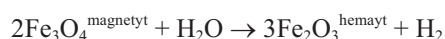
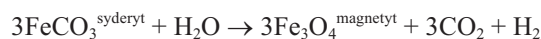


- wietrzenie skał zasadowych/serpentyzacja skał maficznych/ultramaficznych, w których dochodzi do rozkładu fajalitu i forsterytu oraz niektórych piroksenów np. w strefach wietrzenia ofiolitów (np. Lévy i in., 2022, 2023a; Pasquet i in., 2022, 2023; Moretti i in., 2023; Ramierz i in., 2023):



(proces rozkładu fajalitu jest najbardziej efektywny w temperaturach 200–310°C, a więc w strefach metamorfizmu temperaturowego np. bazaltów);

- wietrzenie skał kwaśnych/hydroliza w skałach bogatych w żelazo na II stopniu utlenienia, a więc bogatych np. w syderyt i magnetyt – proces ten zachodzi np. podczas wietrzenia wstęgowych formacji żelazistych (np. Geymond i in., 2022; Maiga i in., 2023; Roche i in., 2024):



- procesy biologiczne – mikrobialny rozkład materii organicznej, utlenianie fosforanów, fermentacja (zobacz: Hassanpouryouzbanda i in., 2024).

Powyższe procesy zachodzą w różnych środowiskach geotektonicznych. Akumulacje wodoru i jego potencjalne złoża mogą mieć więc bardzo różną, niewykluczone, że często mieszaną genezę.

W POLSCE WYSTĘPUJE WODÓR NATURALNY...

Powyższe stwierdzenie jest odkrywcze tylko pozornie, ponieważ o obecności wodoru naturalnego wśród gazów soli potasowo-magnezowych oraz w gazowych próżniach w skałach zasadowych wspominali już Polański i Smulikowski (1955, str. 308). Nieco później Depowski (1966) podsumował najbogatsze wystąpienia wodoru na Niżu Polskim i Górn Śląskim Zagłębiu Węglowym, podejmując próbę określenia możliwej jego genezy. Zauważył wówczas (Depowski, 1966, str. 194): [...] *obecność wodoru w wielu typowych gazach węglowodorowych, zwanych zwykle gazami ziemnymi oraz w gazach złóż węgla, gazach złóż rud metali, w gazach obecnych w kawernach i szczelinach skał magmowych, wylewnych i metamorficznych. Biorąc pod uwagę genezę gazów, można stwierdzić, że wol-*

ny wodór występuje dość często obok innych składników w gazach pochodzenia biochemicznego, juwenilnego i metamorficznego oraz w gazach pochodzenia radiochemicznego. Depowski (op. cit.) zwrócił szczególną uwagę na występowanie wodoru w gazach z odgazowania rdzeni melafirów dolnego czerwonego spągowca na monoklinie przedsudeckiej, a także na domieszki wodoru wśród azotu i metanu przyływających z białego spągowca w rejonie Uciechowa-Sulmierzyc. Obecność wodoru stwierdzono również w gazach występujących w południowej części Górn Śląskiego Zagłębia Węglowego, gdzie znajdują się pokłady węgla koksujących [...]. Gazy węglowodorowe z zawartością większych ilości wodoru mogą powstawać przy termicznym rozłożeniu węgla. Wodór zauważono też w gazach otrzymanych z degazacji solanki przyływającej z utworów kajpru w otworze Sulechów IG 1 oraz prekambriu i kambriu w otworze Thuszcz IG 1 na Lubelszczyźnie. Zresztą właśnie Lubelszczyzna, przeszło pół wieku później, stała się miejscem poszukiwań akumulacji wodoru naturalnego, którego obecność w głębszych partiach skorupy wydają się potwierdzać powierzchniowe wysięki i koncentracje wodoru w gazach glebowych, sięgające maksymalnie 3070 ppm przy średniej 155 ppm (Sechman i in., 2015). Ball i in. (2022) próbowali je wiązać z wodorem rozpuszczonym w solankach nasycających utwory prekambriu, kambriu i jury, które zauważono chociażby w otworze Busówno IG 1. Ciekawe wyniki przynoszą również prace prowadzone w Karpatach przez zespół Anny Twaróg i Henryka Sechmana z Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, którzy w gazach glebowych zaobserwowali podwyższone zawartości wodoru, koncentrujące się zwłaszcza w pobliżu głębokich rozłamów (Ball i in., 2022; Twaróg i in., 2024a, b; Sechman, Twaróg, 2024; zobacz również Sechman i in., 2020; Maślanka i in., 2023). Próbę poszukiwania objawów wodoru na powierzchni terenu przy pomocy detektora gazowego podjęli ostatnio także Jasielski i in. (2024) w Sude tach – wokół metamorficznego kompleksu sowiogórskiego i we wschodniej części kopuły orlicko-śnieżnickiej. Przeprowadzone pomiary nie wykazały co prawda obecności wodoru, jednakże autorzy zdefiniowali obszary dalszych poszukiwań na podstawie sprzyjających uwarunkowań geologicznych.

...ALE NIE WIADOMO CZY TWORZY SAMODZIELNE ZŁOŻA I JAKIE SĄ EWENTUALNE ZASOBY

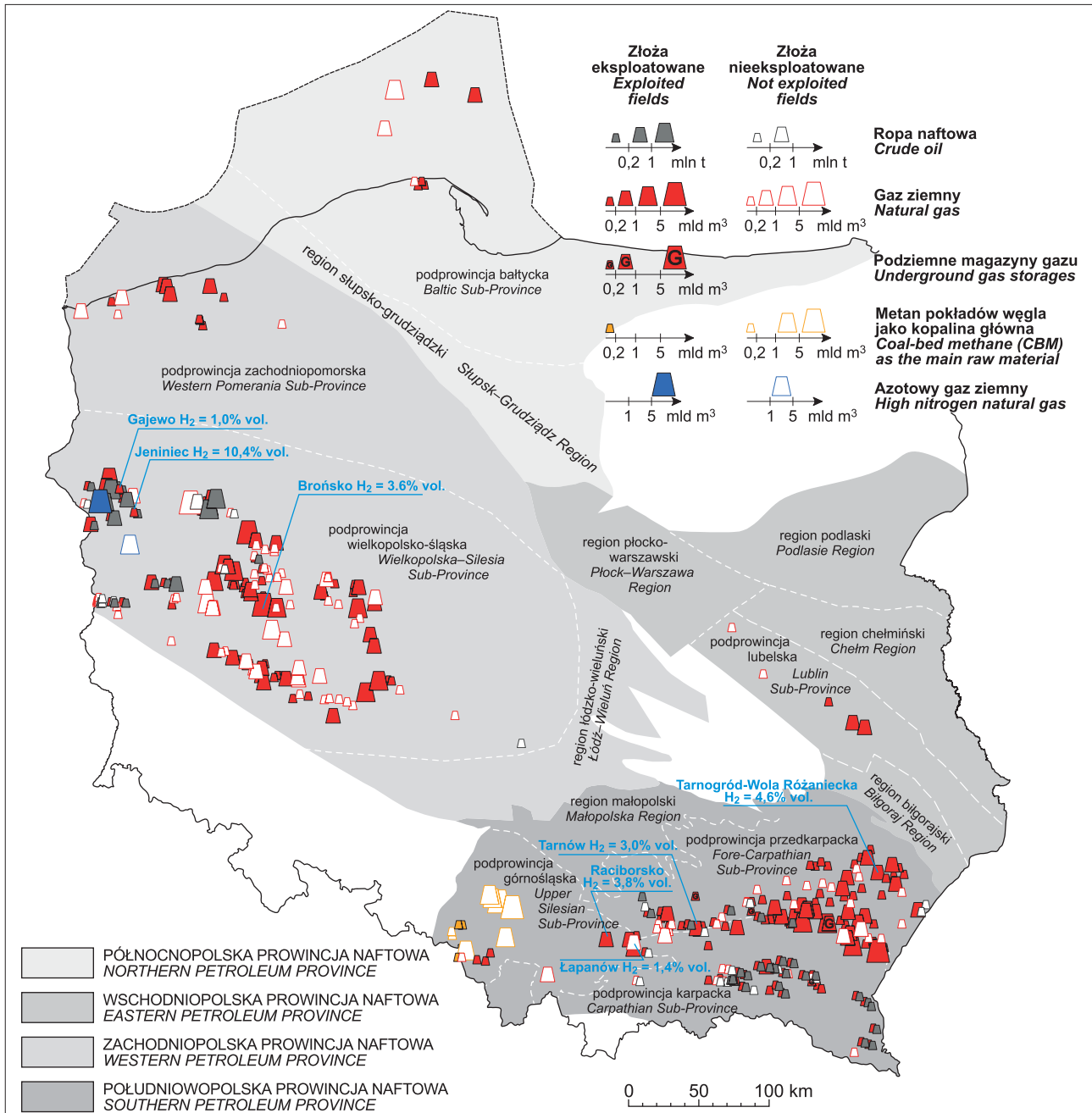
Na podstawie przytoczonych powyżej wzmianek trudno obecnie rozpoznać jakiegokolwiek prawidłowości w występowaniu wodoru naturalnego na obszarze Polski, a tym bardziej wyznaczyć strefy perspektywiczne dla jego komercyjnych akumulacji, czy określić zasoby geologiczne, nie mówiąc już o genezie. To prawda, że zagadnienia te mogą być przedmiotem indywidualnych dociekań w obrębie różnych, mniejszych lub większych jednostek geologicznych naszego kraju, jednak, zwłaszcza na potrzeby organów państwa, wymagają znacznie szerszego, systematycznego i uporządkowanego podejścia. Z tego właśnie powodu, począwszy od 2025 r., będą przedmiotem prac państwowej służby geologicznej (PSG) w ramach zadania pt. *Potencjał rozpoznania i zagospodarowania złóż wodoru*

naturalnego w Polsce⁵. Projekt zakłada zgromadzenie wszelkich danych na temat występowania wodoru naturalnego:

- w złożach węglowodorów (ryc. 2; przedmiotem analizy będzie 324 złoża gazu ziemnego wymienionych w *Bilansie zasobów złóż kopalni w Polsce* wg stanu na 31.12.2023 r. oraz złoża historyczne – obecnie wyeksploatowane i wybilansowane; już teraz można stwier-

dzić, że wodór występuje w co najmniej 152 złożach jako domieszka sięgająca maksymalnie 10,4% wśród metanu, etanu, cięższych węglowodorów, azotu i części helu);

- w otworach wiertniczych (ryc. 3; chodzi zarówno o objawy i przyływy wolnego gazu, gazu z odgazowania wód/solanek, gazu z odgazowania płuczek wiertniczych, jak i gazu desorbowanego; w tym przypadku



Ryc. 2. Regionalizacja naftowa Polski – lokalizacja złóż węglowodorów, które należy zweryfikować pod względem występowania domieszek wodoru (na podstawie Wójcika i in., 2022a, b). Na mapie zaznaczono złoża, w których wodór przekracza zawartość 1% obj. wg bazy MIDAS (2024)

Fig. 2. Petroleum provinces of Poland – location of oil and gas fields investigated in terms of occurrences of hydrogen admixtures (after Wójcik et al., 2022a, b). Gas fields with hydrogen admixtures >1% vol. are indicated acc. to the MIDAS (2024) database

⁵ Należy wyraźnie podkreślić, że badania wodoru naturalnego przez państwową służbę geologiczną zainicjowali pracownicy ówczesnego Departamentu Geologii i Koncesji Geologicznych Ministerstwa Klimatu i Środowiska w połowie 2022 r. To właśnie państwowa służba geologiczna wydawała się, słusznie zresztą, podmiotem szczególnie predysponowanym do systematycznego określenia perspektywiczności wodorowej Polski, mając formalny dostęp do wszelkich informacji geologicznych zgromadzonych w Centralnym Archiwum Geologicznym, działając ponadto bezpośrednio w imieniu organów państwa.





Ryc. 3. Lokalizacja 15 262 głębokich otworów wiertniczych >500 m MD (wg CBDG, 2024) na tle mapy geologicznej ścięcia poziomego na głębokości 5000 m p.p.m. (Kotąński, 1997), które będą przedmiotem analizy pod względem objawów i zawartości wodoru. Na mapie zaznaczono wybrane otwory wiertnicze, w których zawartość wodoru otrzymanego z degazacji płuczki lub wody/solanki przekraczała 70%. Mapa nie uwzględnia 5377 otworów o głębokości >250 m MD wykonanych na obszarze Karpat, zapadliska przedkarpacciego, Górnego i Dolnego Śląska i regionu opolskiego (zobacz tekst)

Fig. 3. Location of 15 262 deep wells >500 m MD (acc. to CBDG, 2024) on the geological map of horizontal cutting at a depth of 5000 m b.s.l. (Kotąński, 1997). The wells will be the subject of hydrogen shows and hydrogen content analysis. The map shows also selected wells with a hydrogen content >70% vol. obtained from water/brine/mud degasation. The map does not include 5377 wells >250 m MD drilled in the Carpathians, Carpathian Foredeep, Upper and Lower Silesia and the Opole region (see the text)

konieczne jest sięgnięcie do dokumentacji z ponad 4500 otworów wiertniczych o głębokości >500 m MD wykonanych na Niżu Polskim oraz niemal 16 000 otworów wiertniczych o głębokości >250 m MD wykonanych w Karpatach oraz na Górnym i Dolnym Śląsku i w Opolskiem);

- w gazach kopalnianych z kopalni węgla kamiennego, rud miedzi oraz soli (biorąc pod uwagę zarówno wpływ czystego gazu, gaz z odgazowania wód/solanki, jak i gaz desorbowany z rdzeni wiertniczych).

Rezultatem pierwszego etapu projektu – prospekcji wodorowej – będzie wykreślenie map zawartości wodoru w poszczególnych jednostkach stratygraficznych, z uwzględnieniem formy jego występowania – jako gazu wolnego, gazu rozpuszczonego w wodach/solankach, gazu z degazacji płuczki czy gazu desorbowanego z rdzeni wiertniczych. Już teraz dość wyraźnie widać pewną prawidłowość, wedle której największe zawartości wodoru osiąga w próbkach gazu desorbowanego i degazacji płuczki, najmniejsze zaś w gazie wolnym. Oczywiście należy też jasno podkreślić, że wyniki tych analiz będą uwzględniać tylko niektóre fragmenty profilu geologicznego, przede wszystkim utwory kambru, dewonu, karbonu, czerwonego spągowca, dolomitu głównego, wybrane fragmenty paleozoiczno-mezozoicznej sukcesji podłoża Karpat, miocenu zapadliska przedkarpacciego i wybrane poziomy/formacje sukcesji fliszowej Karpat zewnętrznych (ryc. 4–5). Nie będą obejmować tych fragmentów profilu stratygraficznego, które nie cieszyły się dotąd zainteresowaniem przemysłu naftowego czy innej prospekcji złożowej, stąd nie były prowadzone w nich testy złożowe, obserwacje objawów naftowych, albo pobierane próbki (jest to duża część triasu, jury i kredy Niżu Polskiego).

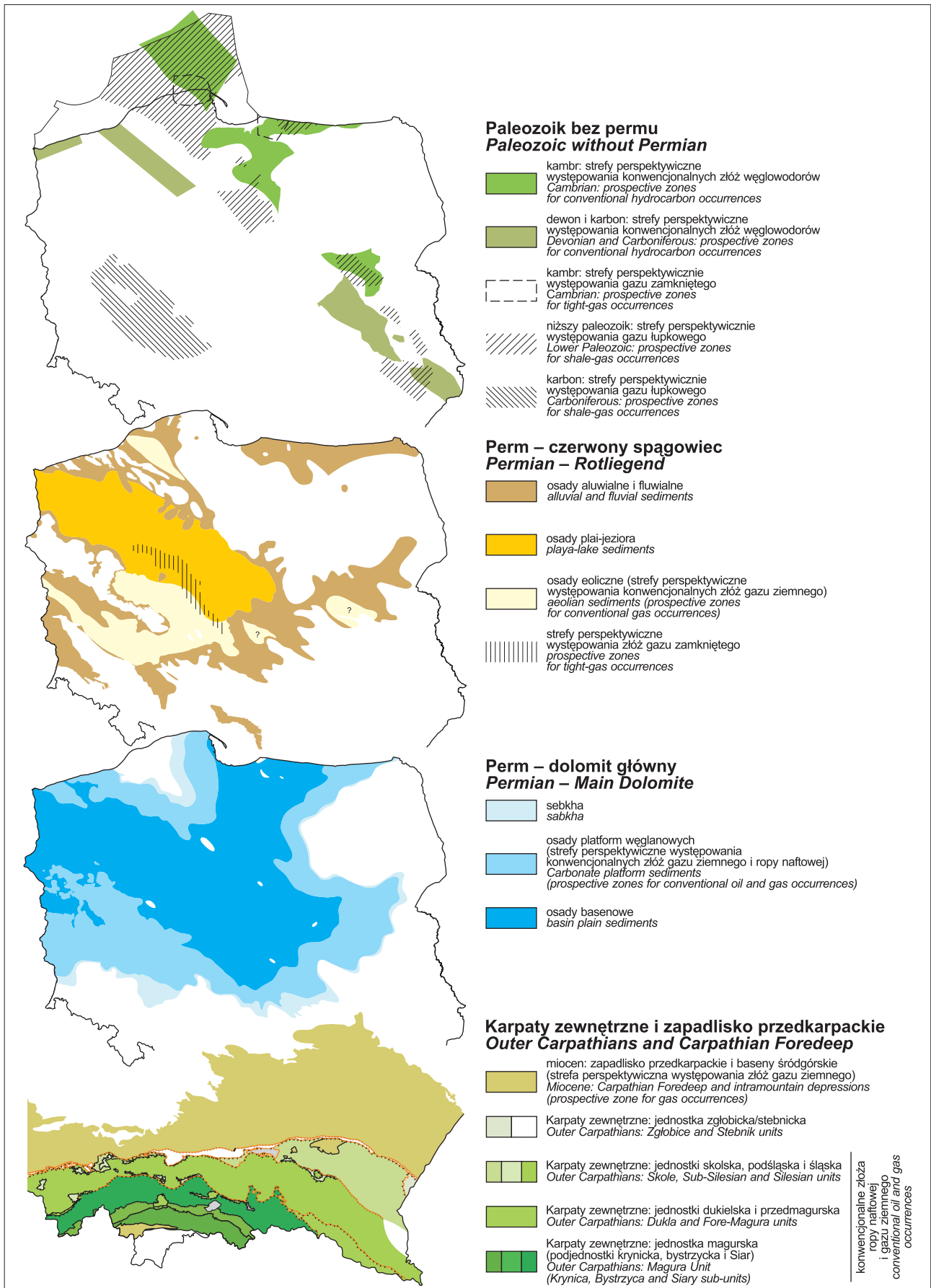
W drugim etapie projektu – eksploracji wodorowej – miejsca wskazane jako najbardziej zasobne w wodór w określonych poziomach stratygraficznych powinny zostać poddane szczegółowym analizom z wykorzystaniem narzędzi geofizycznych. Chodzi zwłaszcza o geofizykę otworową, która może być z powodzeniem wykorzystywana do identyfikacji poziomów nasyconych wodorem w interwałach nietestowanych, czyli zwyczajnie przewierconych bez wykonywania jakichkolwiek prób złożowych. Trudno jednak obecnie stwierdzić, czy wzrost wartości promieniowania na krzywej neutronowej i spadek prędkości fali P, wyraźnie widoczne w warstwach nasyconych czystym wodorem na złożu Bourakebougou (Maiga i in., 2023), będą równie wyraźnie czytelne poziomach wodoronośnych w Polsce, w których spodziewamy się raczej mieszaniny różnych proporcji wodoru, metanu i azotu. Jak na razie pozostaje to kwestią otwartą, warto jednak zadbać o rozwój także i tych gałęzi systematycznych badań i analiz

naturalnego wodoru, które są związane nie tylko z samą metodyką interpretacji krzywych geofizycznych, ale także rozwojem nowych narzędzi detekcji geofizycznej.

GENEZA NAGROMADZEŃ WODORU NATURALNEGO W POLSCE

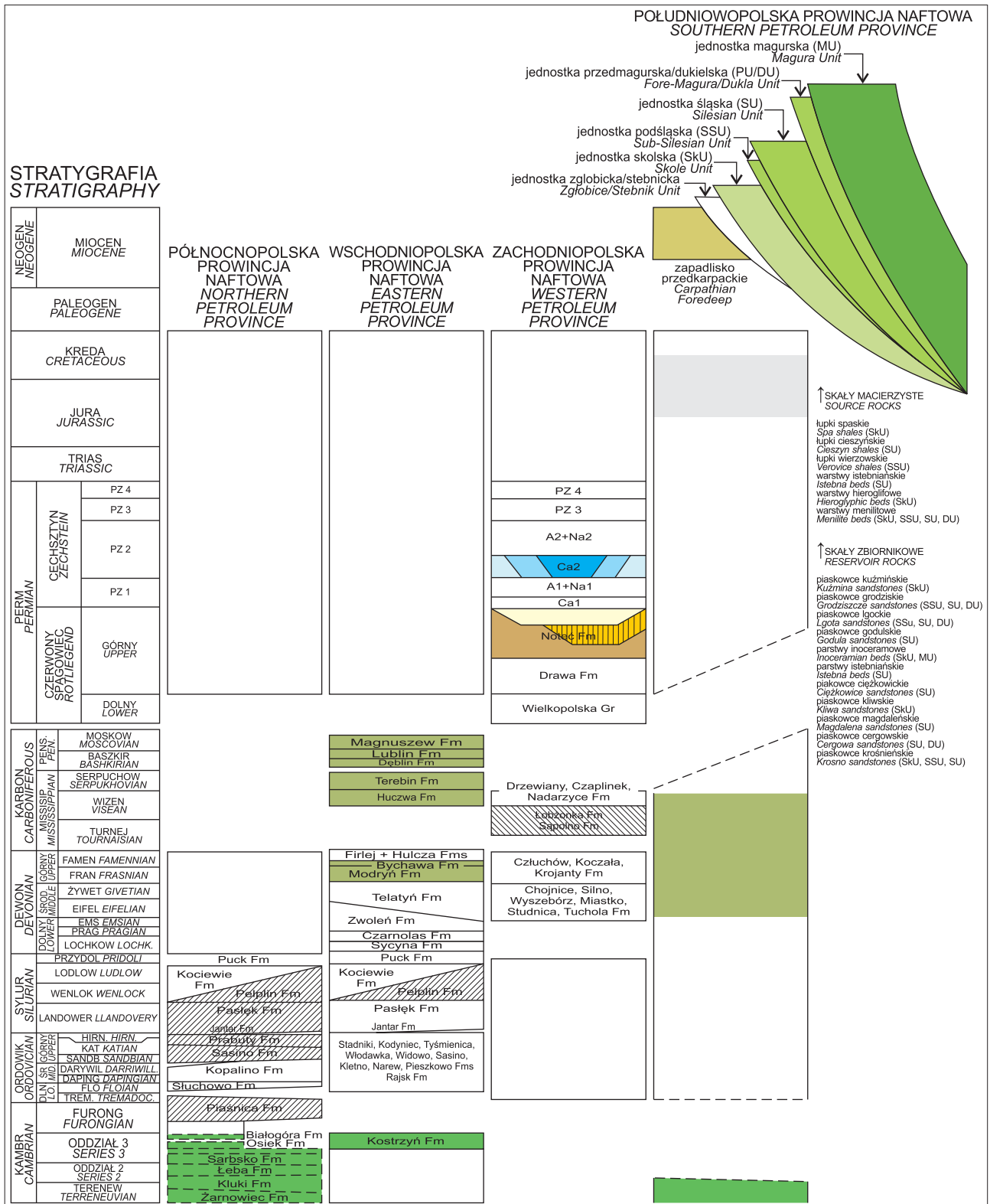
Skąd wzięły się (mniejsze lub większe) nagromadzenia wodoru naturalnego w utworach kambru, dewonu, karbonu, czerwonego spągowca, dolomitu głównego, triasu, miocenu zapadliska przedkarpacciego i w skałach Karpat zewnętrznych (oraz, być może, w innych poziomach stratygraficznych)? Choć zagadnienie to jest na pewno ciekawe, trudno obecnie udzielić jednoznacznej odpowiedzi, nie znając chociażby rozkładu zawartości wodoru czy miejsc jego koncentracji w poszczególnych warstwach geologicznych. Jeszcze raz można odwołać się tutaj do systemu naftowego, traktując te poziomy jako skały zbiornikowe, tym razem dla wodoru. Jeśli miejsca wystąpień akumulacji wodorowych pokryją się z zasięgiem skał (macierzystych) zdolnych generować wodór w bezpośrednim podłożu lub z uskokami, które mogły być drogami migracji wodoru z głębszych partii Ziemi, będzie to niewątpliwie przesłanką do rekonstrukcji systemu wodorowego, a więc systemu generacji, migracji i akumulacji wodoru oraz procesów tym zjawiskom towarzyszących. Takich systemów wodorowych może być w Polsce wiele (ryc. 6), podobnie jak wiele jest skał zdolnych wygenerować i gromadzić wodór. Poniżej znajduje się krótka charakterystyka (i ogólny zarys badań weryfikujących istnienie i funkcjonowanie) tylko tych systemów, które obecnie wydają się najbardziej efektywne i zdolne do wygenerowania akumulacji o znaczeniu ekonomicznym.

1. Migracja wodoru generowanego w płaszczu/jądrze Ziemi wzdłuż głębokich rozłamów skorupowych – to przypadek, który warto rozważyć na obszarze całego kraju, zwłaszcza wzdłuż stref uskokuw Teisseyre’a-Tornquista, Środkowej Odry, uskokuw północno- i śródsudeckiego, uskokuw w podłożu jednostek karpaccich i nasunięć karpaccich oraz mniejszych uskokuw sięgających cokołu krystalicznego lub skonsolidowanego podłoża. Kluczowe są tutaj ścieżki migracji, którymi mogą być zasilane dowolne poziomy stratygraficzne; za takim źródłem wodoru mogłaby przemawiać pozytywna korelacja wodoru z helem i/lub gazami szlachetnymi.
2. Magmatyzm i wulkanizm waryscyjski to system, który mógł być źródłem wodoru w przeszłości geologicznej, zwłaszcza w miejscach, gdzie utwory osadowe karbonu, czerwonego spągowca (zwłaszcza dolnego) i wapienia cechsztyńskiego kontaktują z intruzjami



Ryc. 4. Strefy perspektywiczne dla występowania konwencjonalnych i niekonwencjonalnych złóż węglowodorów w Polsce (na podstawie Wójcika i in., 2022a, b i literatury tam cytowanej), rozpoznawane pod względem obecności i zawartości wodoru

Fig. 4. Areas prospective for an occurrence of conventional and unconventional oil and gas fields in Poland (acc. to Wójcik et al., 2022a, b and citations therein), investigated in terms of hydrogen content

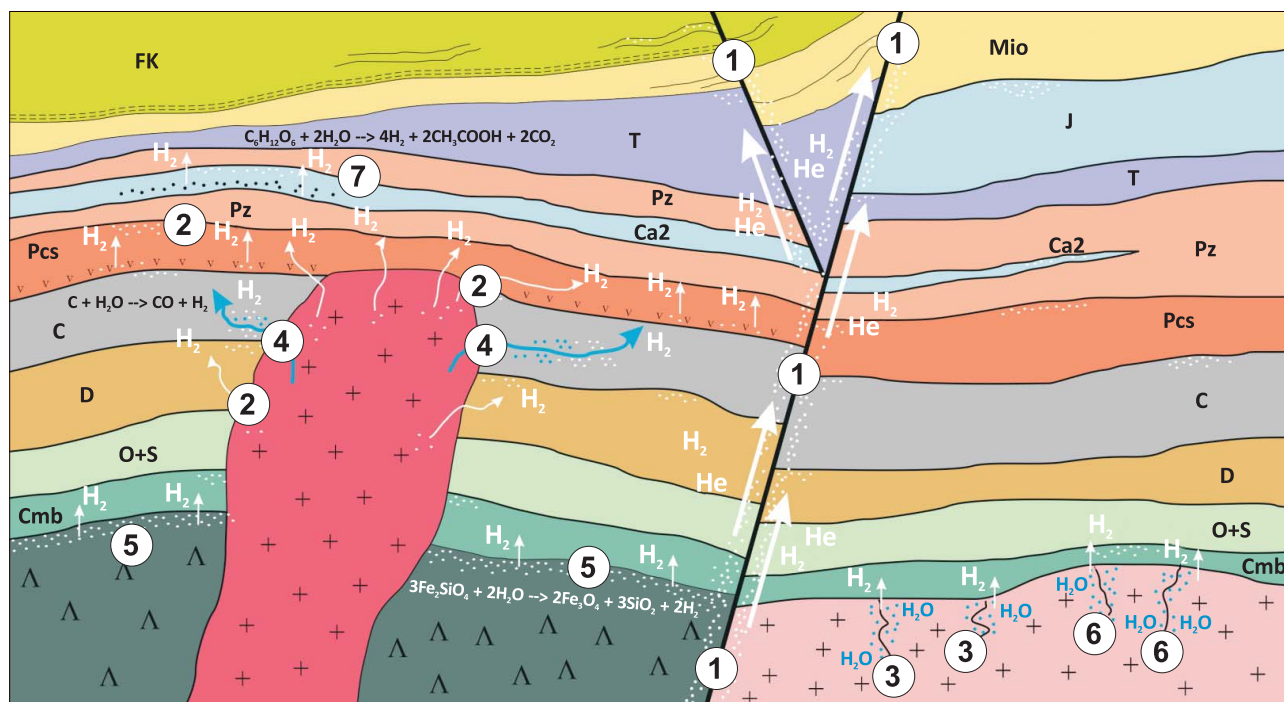


Ryc. 5. Formacje/poziomy perspektywiczne (oznaczone kolorem lub szrafurą) dla występowania konwencjonalnych i niekonwencjonalnych złóż węglowodorów w Polsce (na podstawie Wójcicka i in., 2022a, b i literatury tam cytowanej), rozpoznawane pod względem obecności i zawartości wodoru (zobacz ryc. 4)

Fig. 5. Stratigraphic formations/layers prospective for an occurrence of conventional and unconventional oil and gas fields in Poland (acc. to Wójcik et al., 2022a, b and citations therein), investigated in terms of hydrogen content (see Fig. 4)

waryscyjskimi. Współczesne erupcje wulkaniczne, odgazowanie magmy i roztworów hydrotermalnych są obecnie całkiem wydajnym źródłem wodoru, zatem powinniśmy się zastanowić, czy wodór generowany w trakcie tożsamych procesów podczas orogenezy wa-

racyjskiej zakumulował i zachował się w jakichś stwarzanych warstwach geologicznych? Pomocne byłoby tutaj porównanie składu izotopowego wodoru w metanie i wodorze pozyskanych np. z akumulacji gazu ziemnego w dolnym czerwonym spągowcu.



Ryc. 6. Schemat ilustrujący hipotetyczne systemy generacji, migracji i akumulacji wodoru w Polsce. **1** – migracja z głębokich źródeł wzdłuż rozłamów tektonicznych; **2** – magmatyzm i wulkanizm waryscyjski; **3** – radioliza wody; **4** – metamorfizm/hydrotermalne zgazowanie pokładów węgla; **5** – serpentynizacja i wietrzenie skał maficznych/ultramaficznych; **6** – hydroliza w skałach bogatych w Fe^{2+} i nasyconych wodą; **7** – termogeniczne i bakteryjny rozkład materii organicznej w warstwach ropo- i gazonośnych (patrz również komentarz w tekście). **Cmb** – kambr, **O+S** – ordowik i sylur, **D** – dewon, **C** – karbon, **Pcs** – perm czerwony spągowiec, **Pz** – perm cechsztyń, **Ca2** – dolomit główny, **T** – trias, **J** – jura, **Mio** – miocen zapadliska przedkarpackiego, **FK** – Karpaty zewnętrzne

Fig. 6. Scheme illustrating hypothetical hydrogen generation, migration and accumulation systems in Poland. **1** – migration from deep sources along tectonic faults; **2** – Variscan magmatic and volcanic activity; **3** – radiolysis of water; **4** – metamorphism/hydrothermal gasification of coal seams; **5** – serpentization and weathering of mafic/ultramafic rocks; **6** – hydrolysis in rocks rich in Fe^{2+} and saturated with water; **7** – thermogenic and bacterial decomposition of organic matter in oil- and gas-bearing layers (see also comments in the text). **Cmb** – Cambrian, **O+S** – Ordovician and Silurian, **D** – Devonian, **C** – Carboniferous, **Pcs** – Permian Rotliegendes, **Pz** – Permian Zechstein, **Ca2** – Main Dolomite, **T** – Triassic, **J** – Jurassic, **Mio** – Miocene of the Carpathian Foredeep, **FK** – Outer Carpathians

3. Radioliza wody – proces ten zachodzi w skałach bogatych w pierwiastki promieniotwórcze i nasycone wodą; warto szukać tego systemu znów na obszarze masywu sudeckiego oraz na kratonie wschodnioeuropejskim i jego pokrywie osadowej. Strefy z podwyższonym promieniowaniem i nasycone wodą można zidentyfikować w otworach wiertniczych na krzywych geofizycznych, a obecność izotopu trytu dowodziłaby młodej generacji wodoru i ciągłego działania systemu (Leszek Latacz, inf. ustna).
4. Metamorfizm, czy bardziej precyzyjnie, hydrotermalne zgazowanie pokładów węgla, które również jest związane z magmatyzmem waryscyjskim, można rozważyć na obszarze monokliny przedsudeckiej, niecki śródsudeckiej czy bloku górnośląskiego (intruzje profirowe i granitoidowe).
5. Serpentynizacja skał maficznych/ultramaficznych i wietrzenie bazaltów – system, który warto rozważyć np. na obszarze masywu dolnośląskiego oraz w podłożu i obrębie monokliny przedsudeckiej, jak również na obszarze syneklizy podlaskiej (zob. Krzemińska i in., 2017). Ważne byłoby tutaj skorelowanie objawów wodoru z zasięgiem wychodni skał ultramaficznych i maficznych oraz ich parametry geochemiczne, w tym zwłaszcza badania izotopowe wodoru.
6. Hydroliza w skałach bogatych w żelazo to system związany z obecnością skał zawierających znaczne ilości minerałów zawierających pierwiastek na dru-

gim stopniu utlenienia, np. magnetyt. Systemu należy szukać na obszarze masywu sudeckiego, bloku górnośląskiego oraz na kratonie wschodnioeuropejskim i w ich pokrywach osadowych.

7. Rozkład materii organicznej obejmuje procesy generowania wodoru bezpośrednio w systemie naftowym, w którym wodór powstaje jako produkt bakteryjnych i termogenicznych przemian materii organicznej. Taką genezę mogą mieć akumulacje wodoru w utworach dolomitu głównego oraz w jednostkach karpaccich.

Oczywiście nie są to wszystkie możliwości, zapewne też niektóre z wymienionych okazały się nietrafione. Należy mieć nadzieję, że przynajmniej część z tych propozycji zostanie wkrótce zweryfikowana.

PODSUMOWANIE

W Polsce występuje wodór naturalny jako gaz wolny w złożach gazu ziemnego w postaci domieszki sięgającej maksymalnie 10,4%. Jako gaz wolny, gaz rozpuszczony w wodzie/solance, gaz pozyskany z degazacji płuczki czy gaz desorbowany został stwierdzony w licznych otworach wiertniczych na obszarze całej Polski w utworach kambru, dewonu, karbonu, permu – czerwonego spągowca, wapienia cechsztyńskiego i dolomitu głównego, triasu, paleozoiczno-mezozoicznego podłoża jednostek karpaccich, miocenie zapadliska przedkarpackiego i w skałach Karpat zewnętrznych. W podobnej formie wodór został też stwier-

dzony w polskich kopalniach miedzi i soli. Jak dotąd nie zostały rozpoznane zawartości ani prawidłowości w występowaniu wodoru w poszczególnych poziomach stratygraficznych, ani tym bardziej zasoby wodoru i potencjał poszukiwań jego złóż w Polsce. Nieznana jest też geneza nagromadzeń, choć pod uwagę brane są możliwości migracji wodoru z głębokich partii skorupy/płaszczajądra wzdłuż głębokich rozłamów, magmatyzm i wulkanizm waryscyjski, radioliza wody, metamorfizm pokładów węgla, serpentynizacja i wietrzenie skał zasadowych/ultrasasadowych, hydroliza w skałach bogatych w żelazo czy rozkład materii organicznej. Te kwestie cieszą się coraz większym zainteresowaniem środowisk naukowych w Polsce, będą też przedmiotem prac państwowej służby geologicznej, które od początku 2025 r. będą finansowane przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (NFOŚiGW). Jest to tym bardziej istotne, skoro wódór zaczyna być postrzegany się jako jeden z głównych surowców energetycznych w kontekście transformacji gospodarki w kierunku rozwiązań nieemitujących netto dwutlenku węgla do atmosfery. Jego geologiczne źródła mogą pokryć częściowe zapotrzebowanie rynku, choć na razie nie wiemy w jakim stopniu.

Składam serdeczne podziękowanie swoim koleżankom i kolegom z Państwowego Instytutu Geologicznego, którzy inspirują mnie swoją pomysłowością i z których doświadczenia, nie tylko zawodowego, ośmielam się czerpać każdego dnia. Recenzentom – Annie Wysockiej i Łukaszowi Grzybowskiemu, dziękuję za cenne uwagi, które dodały pracy większej przejrzystości. Ta praca nie ukazałaby się również bez rzetelnej i sprawnej opieki redakcyjnej Joanny Rotnickiej-Dłużewskiej, za co składam wyrazy uznania.

LITERATURA

- AIMAR L., FRERY E., STRAND J., HEATH C., KHAN S., MORETTI I., ONG C. 2023 – Natural hydrogen seeps or salt lakes: how to make a difference? Grass Patch example, Western Australia. *Front Earth Sci.*, 11 (1236673): 1–14.
- ATKINSON C., MATCHETTE-DOWNES C., GARCIA-CURIEL S. 2022 – Natural hydrogen in the Monzon-1 well, Ebro basin, northern Spain. *Géologues*, 213: 96–102.
- BALL P., CZADO K. 2022 – Natural hydrogen: the new frontier. *GEOscientist. The magazine of the Geological Society of London*; <https://geoscientist.online/sections/unearthed/natural-hydrogen-the-new-frontier/> (dostęp 7.09.2024 r.).
- BALL P., CZADO K. 2024 – Natural hydrogen: the race to discovery and concept demonstration. *GEOscientist. The magazine of the Geological Society of London*; <https://geoscientist.online/sections/unearthed/natural-hydrogen-the-race-to-discovery-and-concept-demonstration/> (dostęp 7.09.2024 r.).
- BALL P., CZADO K., TWARÓG A. 2022 – Poland: A research on geologic hydrogen. Keele University. H-NAT Summit, 21–22 czerwca 2022 r.; [https://vimeo.com/725587243?embedded=true&source=vimeo\)logo&owner=127802004](https://vimeo.com/725587243?embedded=true&source=vimeo)logo&owner=127802004) (dostęp 2.08.2024 r.).
- BILANS zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31.12.2023 r. Państw. Inst. Geol., Warszawa, 2024.
- CBDG, 2024 – Centralna Baza Danych Geologicznych; <https://baza.pgi.gov.pl/> (dostęp 8.09.2024 r.).
- DEPOWSKI S. 1966 – Wódór w gazach ziemnych Niziny Polskiego w świetle ogólnych warunków występowania wolnego wodoru. *Kwart. Geol.*, 10 (1): 194–202.
- DONZÉ F.V., TRUCHE L., SHEKARI NAMIN P., LEFEUVRE N., BAZARKINA E.F. 2020 – Migration of natural hydrogen from deep-seated sources in the São Francisco Basin, Brazil. *Geosciences*, 10 (346): 1–16.
- EHO, 2024 – European Hydrogen Observatory. <https://observatory.cle-an-hydrogen.europa.eu/> (dostęp 8.10.2024 r.).
- ELLIS G.S. 2024 – Understanding the potential for geologic hydrogen resources. https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review23/arpaec005_ellis_2023_o-pdf.pdf?Status=Master (dostęp 7.09.2024 r.).
- FDE, 2023 – <https://www.francaisedelenergie.fr/en/blog/2023/05/15/fde-announces-the-discovery-of-natural-hydrogen-in-the-lorraine-mining-basin/> (dostęp 2.08.2024 r.).
- FRERY E., LANGHI L., MASION M., MORETTI I. 2021 – Natural hydrogen seeps identified in the North Perth Basin, Western Australia. *Int. J. Hydrogen Energ.*, 46 (61): 31158–31173.
- GEYMOND U., RAMANAIDOU E., LÉVY D., OUAYA A., MORETTI I. 2022 – Can Weathering of Banded Iron Formations Generate Natural Hydrogen? Evidence from Australia, Brazil and South Africa. *Minerals*, 12 (163): 1–28.
- HAND E. 2023a – Hidden Hydrogen. Does Earth hold vast stores of a renewable carbon-free fuel? *Science*, 379 (6633): 630–636.
- HAND E. 2023b – Geological hydrogen wins first major founding. *Science*, 381 (6662): 1036–1037.
- HALAS P., DUPUY A., FRANCESCHI M., BORDMANN V., FLEURY J.-M., DUCLERC D. 2021 – Hydrogen gas in circular depressions in South Gironde, France: Flux, stock, or artefact? *Appl. Geochem.*, 127 (104928): 1–9.
- HASSANPOURYOUBAND A., WILKINSON M., HASZELDINE S. 2024 – Hydrogen energy futures - foraging or farming? *Chem. Soc. Rev.*, 53: 2258–2263.
- IEA, 2024 – Global Hydrogen Review 2024. International Energy Agency; <https://iea.blob.core.windows.net/assets/89c1e382-dc59-46ca-aa47-9f7d41531ab5/GlobalHydrogenReview2024.pdf> (dostęp 08.10.2024 r.).
- JASIELSKI J., LIS W., WOJTULEK P. 2024 – Ocena potencjału występowania geologicznego wodoru na terenie bloku dolnośląskiego. *Prz. Geol.*, 72 (9): 427–438.
- KORCHAGIN I., YAKYMCHUK M. 2023 – About prospectives of natural hydrogen accumulations detecting by direct-prospecting method on Uruguay territory. EAGE XVII International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 7–10 listopada 2023 r., Kijów, Ukraina.
- KOTAŃSKI Z. 1997 – Atlas geologiczny Polski. Mapy geologiczne ścięcia poziomego w skali 1 : 750 000. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- KOTARBA M., BILKIEWICZ E., MANECKI M., PAWLIK W., CIESIELCZYK A., SELEROWICZ T. 2017 – Pochodzenie i zagrożenia siarkowodorem i wysokociśnieniowym gazem ziemnym w złożu kopalni rud miedzi Polkowice-Sierszowice i Rudna – wstępne badania izotopowe i mineralogiczne. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 469: 9–34.
- KRZEMIŃSKA E., KRZEMIŃSKI L., PETECKI Z., WISZNIEWSKA J. 2017 – Mapa geologiczna podłoża krystalicznego polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- LARIN N.V., ZGONNIK V., RODINA S., DEVILLE E., PRINZHOFER A., LARIN V.N. 2015 – Natural molecular hydrogen seepage associated with surficial, rounded depressions on the European craton in Russia. *Nat. Resour. Res.*, 24: 369–383.
- LEILA M., LOISEAU K., MORETTI I. 2022 – Controls on generation and accumulation of blended gases (CH₄/H₂/He) in the Neoproterozoic Amadeus Basin, Australia. *Marine and Petrol. Geol.*, 140 (105643).
- LÉVY D., CALLOT J.-P., MORETTI I., DUTTINE M., DUBREUIL B., DE PARSEVAL P., BOUDOUMA O. 2022 – Successive phases of serpentinization and carbonation recorded in the Sivas ophiolite (Turkey), from oceanic crust accretion to post-obduction alteration. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 193/1 (12): 1–21.
- LÉVY D., BOKA-MENE M., MESHİ A., FEJZA I., GUERMONT T., HAUVILLE B., PELISSIER N. 2023a – Looking for natural hydrogen in Albania and Kosova. *Front. Earth Sci.*, 11 (1167634): 1–13.
- LÉVY D., ROCHE V., PASQUET G., COMBAUDON V., GEYMOND U., LOISEAU K., MORETTI I. 2023b – Natural H₂ exploration: tools and workflows to characterize a play. *Sci. Technol. Energy Transit.*, 78 (27): 1–34.
- LINK 1. Natural hydrogen in eternal flames in Chimaera. <https://www.bing.com/videos/riverview/relatedvideo?q=chime-ra+hydrogen+seepage+zgonnik+youtube&mid=1AFE53CB7A1B513C746F1AFE53CB7A1B513C746F&FORM=VIR> E. (dostęp 7.09.2024 r.).
- LINK 2. Natural hydrogen seeps in Oman: 82% pure H₂; https://www.youtube.com/watch?v=9Qnt_XENDrI (dostęp 7.09.2024 r.).
- MAIGA O., DEVILLE E., LAVAL J., PRINZHOFER A., DIALLO A. 2023 – Characterization of the spontaneously recharging natural hydrogen reservoirs of Bourakebougou in Mali. *Sci. Rep.*, 13 (11876): 1–13.
- MAŁACHOWSKA A., ŁUKASIK N., MIODUSKA J., GEBICKI J. 2022 – Hydrogen Storage in Geological Formations – The Potential of Salt Caverns. *Energies*, 15 (5038): 1–19.
- MAŚLANKA A., SECHMAN H., TWARÓG A., CICHOSTĘPSKI K., WOJAS A., DURLEJ M. 2023 – Integrated surface geochemical and seismic surveys for hydrocarbon exploration – A case study from southern Poland. *Marine and Petrol. Geol.*, 158 (B, 106553): 1–20.
- MCMAHON C.J., ROBERTS J.J., JOHNSON G., EDLMANN K., FLUDE S., SHIPTON Z.K. 2023 – Natural hydrogen seeps as analogues

- to inform monitoring of engineered geological hydrogen storage. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 528: 461–489.
- MIDAS, 2024 – System Gospodarki i Ochrony Bogactw Mineralnych Polski; <https://geoportal.pgi.gov.pl/midas-web> (dostęp 15.01.2023 r.).
- MIZIOLEK M., FILAR B., KWIŁOSZ T. 2022 – Magazynowanie wodoru w szczerpanych złożach gazu ziemnego. *Nafta-Gaz*, 2022 (3): 219–239.
- MORETTI I., BABY P., ALVAREZ ZAPATA P., MENDOZA R.V. 2023 – Subduction and Hydrogen Release: The Case of Bolivian Altiplano. *Geosciences (Switzerland)*, 13 (4): 109.
- MORETTI I., GEYMOND U., PASQUET G., AIMAR L., RABAUTE A. 2022 – Natural hydrogen emanations in Namibia: Field acquisition and vegetation indexes from multispectral satellite image analysis. *Int. J. Hydrog. Energy*, 47 (84): 35588–35607.
- MORETTI I., PRINZHOFER A., FRANCOLIN J., PACHECO C., ROSANNE M., RUPIN F., MERTENS J. 2021 – Long-term monitoring of natural hydrogen superficial emissions in a Brazilian cratonic environment. Sporadic large pulses versus daily periodic emissions. *Int. J. Hydrog. Energy*, 46: 3615–3628.
- PASQUET G., HASSAN R.H., SISSMANN O., VARET J., MORETTI I. 2022 – An Attempt to Study Natural H₂ Resources across an Oceanic Ridge Penetrating a Continent: The Asal-Ghoubbet Rift (Republic of Djibouti). *Geosciences*, 12/1 (16): 1–31.
- PASQUET G., DUTTINE M., MORETTI I. 2023 – Early onshore basaltic alteration and its natural hydrogen potential in the Asal-Ghoubbet rift, Republic of Djibouti. *EGU, Wiedeń, Austria*, 23–28 kwietnia 2023 r. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-2867>
- PEACOCK B. 2022 – Natural hydrogen exploration 'boom' snaps up one third of South Australia. *PV Magazine*. <https://www.pv-magazine.com/2022/02/02/natural-hydrogen-exploration-boom-snaps-up-one-third-of-south-australia/> (dostęp 2.08.2024 r.).
- PIECH M., SZURLEJ A. 2023 – Wykorzystanie kawern solnych do wielkoskalowego magazynowania wodoru w kontekście dalszego rozwoju wykorzystania energii wytwarzanej z OZE. *Rynek Energii*, 168: 36–42.
- PIRONON J., de DONATO P. 2023 – World's largest white hydrogen deposit found in France. *Energy Transition*, 15.09.2023 <https://www.weforum.org/agenda/2023/09/white-hydrogen-deposit-france/> (dostęp 02.08.2024 r.).
- POLAŃSKI A., SMULIKOWSKI K. 1955 – *Geochemia*. Wydaw. Geol., Warszawa.
- PRINZHOFER A., CACAS-STENTZ M-C. 2023 – Natural hydrogen and blend gas: a dynamic model of accumulation. *Int. J. Hydrog. Energy*, 48: 21610–21623.
- PRINZHOFER A., MORETTI I., FRANCOLIN J., PACHECO C., D'AGOSTINO A., WERLY J., RUPIN F. 2019 – Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: The example of a Brazilian H₂-emitting structure. *Int. J. Hydrog. Energy*, 44 (12): 5676–5685.
- PRINZHOFER A., RIGOLLET C., LEFEUVRE N., FRANCOLIN J., DE MIRANDA P.E.V. 2024 – Maricá (Brazil), the new natural hydrogen play which changes the paradigm of hydrogen exploration. *Int. J. Hydrog. Energy*, 62: 91–98.
- PRINZHOFER A., TAHARA CISSÉ C.S., DIALLO A.B. 2018 – Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakeboougou (Mali). *Int. J. Hydrog. Energy*, 43: 19315–19326.
- PSW, 2021 – Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040. Załącznik do uchwały nr 149 Rady Ministrów z dnia 2 listopada 2021 r. (poz. 1138). Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Warszawa.
- RAMIERZ A.C., PENAGOS F.G., RODRIGUEZ G., MORETTI I. 2023 – Natural H₂ Emanations in Colombian Ophiolites: Firsts Findings. *Geosciences*, 13 (358): 1–17.
- ROCHE V., GEYMOND U., BOKA-MENE M., DELCOURT N., PORTIER E., REVILLON S., MORETTI I. 2024 – A new continental hydrogen play in Damara Belt (Namibia). *Sci. Rep.*, 14 (11655): 1–11.
- SECHMAN H., GZUY P., KASZUBA P., WOJAS A., MACHOWSKI G., TWARÓG A., MAŚLANKA A. 2020 – Direct and indirect surface geochemical methods in petroleum exploration: a case study from eastern part of the Polish Outer Carpathians. *Int. J. Earth Sci.*, 109: 1853–1867.
- SECHMAN H., IZYDOR G., GUZY P., DZIENIEWICZ M. 2015 – Surface geochemical exploration for hydrocarbons in the area of prospective structures of the Lublin Trough (Eastern Poland). *Mar. Petrol. Geol.*, 61: 22–38.
- SECHMAN H., TWARÓG A. 2024 – Natural hydrogen in soil gas samples of sedimentary basins of Poland – preliminary result. *AAPG Europe Regional Conference, Kraków 28–29 czerwca 2024 r.*
- ŚLIZOWSKI J., URBANČZYK K., ŁACIAK M., LANKOF L., SERBIN K. 2017 – Efektywność magazynowania gazu ziemnego i wodoru w kawernach solnych. *Przem. Chem.*, 96 (5): 994–998.
- SOZAŃSKI J., KUK S., JARACZ C., DZIADZIO P. 2006 – How the modern oil and gas industry was born: Historical remarks. [W:] Golonka J., Picha F.J. (red.), *The Carpathians and their foreland: Geology and hydrocarbon resources*. *AAPG Memoir*, 84: 811–834.
- SPECTRA, 2024 – The hydrogen color wheel is expanding. *Mitsubishi Heavy Industries Group*; <https://spectra.mhi.com/the-colors-of-hydrogen-expanding-ways-of-decarbonization> (dostęp 31.07.2024 r.).
- TARKOWSKI R., LANKOF L., LUBOŃ K., MICHALSKI J. 2024 – Hydrogen storage capacity of salt caverns and deep aquifers versus demand for hydrogen storage: A case study of Poland. *Appl. Energy*, 355 (122268): 1–17.
- TIAN Q., YAU S., SHAO M., ZHANG W., WANG H. 2022 – Origin, discovery, exploration and development status and prospect of global natural hydrogen under the background of “carbon neutrality”. *China Geology*, 5: 722–733.
- TWARÓG A. 2024 – Nieodkryty potencjał naturalnego wodoru. *Energia i Recykling*, 6: 8–11.
- TWARÓG A., SECHMAN H., KWIATKOWSKI K. 2024a – Distribution of hydrogen and alkane concentrations in the vicinity of fairy circle structure in Poland – preliminary result. *AAPG Europe Regional Conference, Kraków, 28–29 czerwca 2024 r.*
- TWARÓG A., STARZEC K., SECHMAN H., SCHNABEL W. 2024b – Surface geochemistry as a key to understanding the petroleum system in regions of complex geology – Polish Outer Carpathians. *Marine and Petrol. Geol.*, 170 (107155): 1–19.
- ULIASZ-MISIAK B., LEWANDOWSKA-ŚMIERZCHALSKA J., MATUŁA R. 2024 – Hydrogen Storage Potential in Natural Gas Deposits in the Polish Lowlands. *Energies*, 17 (374): 1–17.
- ULIASZ-MISIAK B., LEWANDOWSKA-ŚMIERZCHALSKA J., MATUŁA R., TARKOWSKI R. 2022 – Prospects of Underground Hydrogen Storage in the EU. *Energies*, 15 (9515): 1–17.
- USTAWA, 2011 – Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze. *Dz.U. z 2011 r. poz. 981*.
- USTAWA, 2023 – Ustawa z dnia 16 czerwca 2023 r. o zmianie ustawy – Prawo geologiczne i górnicze oraz niektórych innych ustaw. *Dz.U. z 2023 r. poz. 2029*.
- WÓJCIK K. 2024 – Przesłanki poszukiwań złóż białego wodoru w Polsce. [W:] Rotnicka-Dłużewska J., Michalska D. (red.), *IV Polski Kongres Geologiczny, Poznań, 10–14 czerwca 2024 r. Streszczenia referatów i posterów*: 181.
- WÓJCIK K., ZACHARSKI J., ŁOJEK M., WRÓBLEWSKA S., KIERNOWSKI H., WAŚKIEWICZ K., WÓJCICKI A., LASKOWICZ R., SOBIEŃ K., PERYT T., CHYLIŃSKA-MACIOS A., SIENKIEWICZ J. 2022a – Poszukiwanie i rozpoznawanie złóż ropy naftowej i gazu ziemnego w Polsce – szósta runda przetargowa. *Prz. Geol.*, 70 (5): 363–372.
- WÓJCIK K., ZACHARSKI J., ŁOJEK M., WRÓBLEWSKA S., KIERNOWSKI H., WAŚKIEWICZ K., WÓJCICKI A., LASKOWICZ R., SOBIEŃ K., PERYT T., CHYLIŃSKA-MACIOS A., SIENKIEWICZ J. 2022b – New Opportunities for Oil and Gas Exploration in Poland-A Review. *Energies*, 15 (5): 1–25.
- ZGONNIK V., BEAUMONT V., DEVILLE E., LARIN N., PILLOT D., FARRELL K.M. 2015 – Evidence for natural molecular hydrogen seepage associated with Carolina bays (surficial, ovoid depressions on the Atlantic Coastal Plain, Province of the USA). *Earth Planet. Sci.*, 2 (31): 1–15.
- ZGONNIK V. 2020 – The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth Sci. Rev.*, 203 (103140): 1–51.

Praca wpłynęła do redakcji 2.09.2024 r.

Akceptowano do druku 10.10.2024 r.