

Effect of cement sheath thickness on hydrogen migration – long-term integrity tests

Wpływ grubości przegrody z kamienia cementowego na migrację wodoru – długofalowe testy szczelności



DOI: 10.15199/62.2026.6.4

The results of long-term H_2 leakage tests conducted on cement stone samples of varying thickness under conditions representative of potential underground H_2 storage were presented. Samples were placed in a core holder and subjected to extended breakthrough expts., enabling measurement of H_2 arrival time and subsequent flow characteristics. The results demonstrate a strong dependence of sealing performance on cement barrier thickness. Thinner samples showed significantly shorter breakthrough times and higher flow rates after hydrogen onset. These findings provide a basis for design recommendations for well cementing intended for geol. H_2 storage.

Keywords: hydrogen, underground hydrogen storage (UHS), leakage tests, gas migration

Przedstawiono wyniki długofalowych badań szczelności próbek kamienia cementowego o zróżnicowanej grubości w odniesieniu do migracji wodoru w warunkach zbliżonych do parametrów panujących w potencjalnych podziemnych magazynach wodoru. Próbkę umieszczano w komorze rdzeniowej i poddawano wielogodzinnym testom migracji wodoru, rejestrując czas pojawienia się wodoru za barierą oraz jego dalszą dynamikę przepływu. Analiza wykazała silną zależność skuteczności bariery cementowej od grubości przegrody. Cieńsze próbki charakteryzowały się krótszym czasem przebicia oraz większą intensywnością wzrostu przepływu wodoru. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do sformułowania zaleceń dotyczących projektowania cementowania odwiertów przeznaczonych do podziemnego magazynowania wodoru.

Słowa kluczowe: wodór, podziemne magazynowanie wodoru, testy szczelności, migracja gazu.

Postępująca transformacja energetyczna oraz wzrost udziału odnawialnych źródeł energii intensyfikują znaczenie wodoru jako nośnika energii i medium magazynującego nadwyżki energetyczne. Szczególne znaczenie przypisuje się zielonemu wodorowi, którego rozwój w Polsce, jako jednego z głównych producentów wodoru konwencjonalnego w Europie, wymaga wdrożenia efektywnych technologii magazynowania^{1,2}.

Jednym z najbardziej perspektywicznych rozwiązań jest geologiczne magazynowanie wodoru (UHS), umożliwiające sezonowe bilansowanie systemów energetycznych^{3,4}. Rozważane struktury obejmują kawerny solne, akifery oraz

szczerpane złoża węglowodorów^{1,2}. Specyficzne właściwości wodoru, takie jak mała gęstość, mała lepkość oraz wysoka dyfuzyjność powodują zwiększone wymagania w zakresie szczelności systemu magazynowego³.

Kluczowym elementem zapewnienia integralności UHS jest trwałość materiałów uszczelniających odwierty, w szczególności kamienia cementowego. Dotychczasowe badania wskazują na niejednoznaczny wpływ wodoru na cementy. W części prac nie obserwuje się istotnych zmian geochemicznych i strukturalnych⁵, natomiast inne wskazują na wzrost porowatości i przepuszczalności w warun-



Dr inż. Marcin WARNECKI (ORCID: 0000-0002-1200-7678) w roku 2000 ukończył studia na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH w Krakowie. W 2016 r. uzyskał stopień doktora nauk o ziemi w Państwowym Instytucie Geologicznym – Państwowym Instytucie Badawczym w Warszawie. Jest adiunktem w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym w Krakowie O/Krosno. Kieruje Zakładem Badania Złóż Ropy i Gazu. Specjalność – inżynieria złożowa, eksploatacja, badania właściwości fazowych płynów złożowych (PVT), tematyka wspomaganie wydobywania ropy (EOR), sekwestracja CO_2 (CCS/CCUS), symulacje procesów złożowych na symulatorze komputerowym oraz na fizycznych modelach złoża.



Mgr inż. Jerzy KUŚNIERCZYK (ORCID: 0000-0002-6579-605X) w roku 2008 ukończył studia na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH w Krakowie. Obecnie jest starszym specjalistą badawczo-technicznym w Zakładzie Badania Złóż Ropy i Gazu w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym w Krakowie O/Krosno. Specjalność – inżynieria złożowa, eksploatacja, badania własności fazowych płynów złożowych (PVT) oraz symulacje procesów złożowych.

*** Adres do korespondencji:**

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy O/Krosno, ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno, tel.: (13) 434-96-41, e-mail: marcin.warnecki@inig.pl

kach długotrwałej i cyklicznej ekspozycji⁶. Równocześnie raportowane są zmiany mineralogiczne mogące wpływać na właściwości uszczelniające⁷.

Dodatkowym zagrożeniem są procesy zachodzące na styku cement-orurowanie-skała, gdzie mogą powstawać preferencyjne ścieżki migracji gazu⁸. Ryzyko to potęgują zjawiska degradacyjne, w tym kruchość wodorowa, oraz oddziaływania mikrobiologiczne⁹. W konsekwencji integralność płaszcza cementowego stanowi jeden z kluczowych czynników bezpieczeństwa magazynowania.

Stan wiedzy w zakresie UHS został szeroko przedstawiony w pracach przeglądowych i raportach, które potwierdzają wykonalność technologii, wskazując jednocześnie na istotne niepewności związane z długoterminową trwałością materiałów odwiertowych^{3, 4, 8}. Szczególnie podkreślany jest niedobór badań długookresowych i prowadzonych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych¹⁰.

Transport wodoru w ośrodkach porowatych determinowany jest jego właściwościami międzyfazowymi oraz zachowaniem w układach wielofazowych, analizowanych z wykorzystaniem metod PVT (*pressure-volume-temperature*)^{11, 12}. Wykazano, że wodór jest fazą niezwilżalną względem solanki, co prowadzi do jego migracji w postaci pęcherzyków oraz zjawiska pułapkowania resztkowego¹³. Ma to bezpośredni wpływ na mobilność gazu i bezpieczeństwo magazynowania. Jednocześnie wodór może uczestniczyć w reakcjach geochemicznych wpływających na strukturę porowatą skał i materiałów cementowych¹⁴.

Badania eksperymentalne wskazują, że przepuszczalność cementów dla wodoru jest większa niż dla takich gazów, jak metan i azot¹⁵, a stosowanie gazów zastępczych (typu azot) może prowadzić do błędnych wniosków¹⁶. Właściwości cementów mogą być modyfikowane poprzez dodatki ograniczające rozwój sieci porowej¹⁷, jednak ich skuteczność w warunkach długoterminowych pozostaje niewystarczająco rozpoznana.

Pomimo znaczącego postępu badań, analiza literatury wskazuje na wyraźną lukę poznawczą. Dotychczasowe prace koncentrują się głównie na składzie, mikrostrukturze i warunkach termobarycznych, natomiast w niewielkim stopniu uwzględniają wpływ geometrii bariery cementowej. W szczególności brak jest systematycznych badań dotyczących wpływu długości drogi migracji (grubości płaszcza cementowego) na transport wodoru^{10, 15}. Jest to istotne ograniczenie, ponieważ w rzeczywistych warunkach otworowych geometria płaszcza cementowego jest zmienna i może krytycznie wpływać na szczelność systemu. W konsekwencji istnieje potrzeba badań ukierunkowanych na ilościową ocenę wpływu grubości kamienia cementowego na migrację wodoru w warunkach długotrwałych i cyklicznych.

Część doświadczalna

Materiał badawczy

Do badań wykorzystano kamień cementowy opracowany w INiG-PIB (Zakład Technologii Wiercenia), przygotowany



Fig. 1. Samples of hardened cement slurry prepared for testing

Rys. 1. Próbkki kamienia cementowego przygotowywane do badań

zgodnie z obowiązującymi normami i praktyką laboratoryjną, z myślą o potencjalnym zastosowaniu w magazynach wodoru w kawernach solnych. Próbkki formowano jako walce o średnicy 1 cala i długości ok. 7 cm (rys. 1), dostosowane do instalacji w komorze rdzeniowej. Po uformowaniu poddawano je kondycjonowaniu przez 8–12 miesięcy w solance NaCl ($\rho = 1,2 \text{ g/cm}^3$) w temp. 50°C. Następnie próbki wyjmowano, przygotowywano powierzchnie czołowe i kierowano do badań migracji wodoru.

Aparatura

Długoterminowe badania migracji wodoru przez kamień cementowy prowadzono z wykorzystaniem zmodyfikowanej aparatury PVT, umożliwiającej odtworzenie warunków termobarycznych złoża i odwiertu (rys. 2). Układ pozwalał na prowadzenie eksperymentów w zakresie ciśnień 0–100 MPa i temp. -20–200°C oraz precyzyjny pomiar i rejestrację parametrów (p , V , T) z wykorzystaniem przeznaczonego do tych pomiarów oprogramowania sterującego.

Kluczowym elementem stanowiska była komora rdzeniowa (*core holder*), w której umieszczano próbki kamienia cementowego w postaci walców o średnicy 1 cala i długości 7–25 cm. Próbkki instalowano w elastycznym rękawie odpornym na wysokie ciśnienia, temperatury i agresywne media, a następnie w stalowej obudowie komory. Naciski wody zapewniało szczelne przyleganie rękawa do próbki, eliminując przepływ gazu poza analizowanym materiałem. Pomiar przepływu prowadzono za pomocą gazomierza laboratoryjnego (dokładność 0,001 dm³). Stanowisko uzupełniał system kontroli temperatury (kriostat), aparatura pomiarowa (manometry, termometry) oraz układ zaworów i połączeń wysokociśnieniowych.

Metodyka badań

Przygotowanie układu badawczego. Próbkki kamienia cementowego umieszczano w komorze rdzeniowej. Dla zbadania wpływu grubości przegrody cementowej wykonywano 3 warianty doświadczeń: (i) przegroda cienka – poje-



Fig. 2. Integrated fluid and rock testing equipment for reservoir PT conditions, Chandler Eng. PVT System and VINCI Fluid Eval

Rys. 2. Zintegrowane aparaty do badań płynów i skał w warunkach PT złożowych, Chandler Eng. PVT System oraz VINCI Fluid Eval

dyncza próbka kamienia w formie walca o długości 7 cm, (ii) przegroda średniej grubości – dwie próbki kamienia (zestawione 2 walce) o łącznej długości 14 cm i (iii) przegroda gruba – 3 próbki kamienia o łącznej długości 21 cm.

Uszczelnienie układu. Próbkę uszczelniano w gumowym rękawie poprzez zastosowanie nadciśnienia w układzie wodnym w stosunku do ciśnienia wodoru (testu).

Doprowadzenie wodoru. Do jednej strony zestawu, składającego się z 1–3 rdzeni, doprowadzano wodór o stałym ciśnieniu $P_1 = 130$ bar.

Pomiar przepływu gazu. Po przeciwnej stronie bariery, pod ciśnieniem atmosferycznym, mierzono przepływ wodoru za pomocą precyzyjnego gazomierza w układzie tzw. wolnego wypływu.

Warunki temperaturowe. Badania prowadzono przy utrzymaniu stałej temperatury komory rdzeniowej 50°C , odpowiadającej temperaturze uprzedniego kondycjonowania próbek.

Wyniki badań

Założono, że ocena dynamiki migracji wodoru przez barierę ze stwardniałego kamienia cementowego wymaga wykonania serii długofalowych eksperymentów. Zrealizowano 9 eksperymentów obejmujących po 3 testy dla każdej grubości przegrody.

Na rys. 3 przedstawiono przebieg migracji wodoru przez próbkę o grubości 7 cm. Linie ciągłe (V1A, V1B,

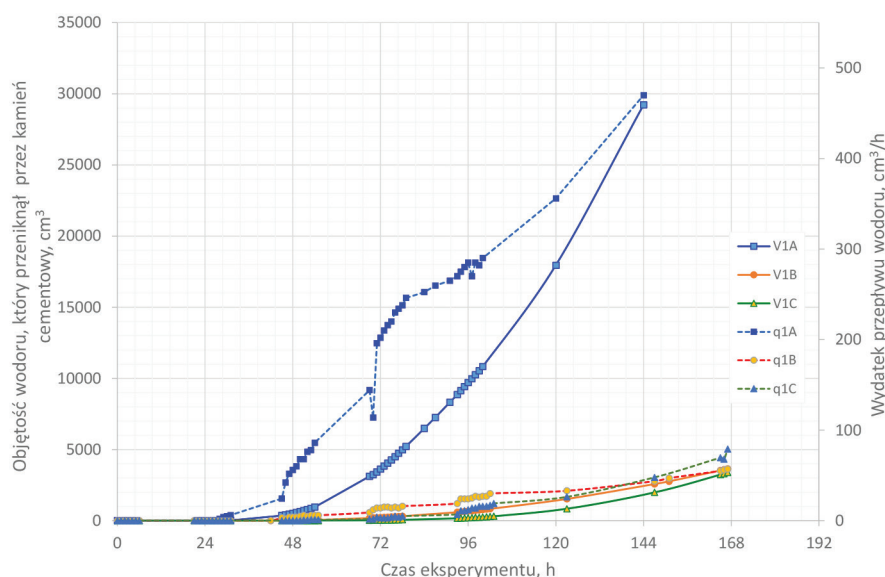


Fig. 3. Results of hydrogen migration tests through a 7-cm-thick barrier (1 core)

Rys. 3. Wyniki testów migracji wodoru przez barierę o grubości 7 cm (1 rdzeń)

V1C) obrazowały objętość gazu (w cm^3) w czasie, a punkty momenty odczytu. Linia przerywaną (oś pomocnicza) oznaczono średni wydatek przepływu (q , cm^3/h), obrazujący dynamikę procesu. W celu precyzyjnego wyznaczenia momentu „przebicia” bariery, na rys. 4 zestawiono zmierzone objętości w skali logarytmicznej. Na tej podstawie ustalono następujące czasy przebicia: (i) eksperyment V1A – 16 h, (ii) eksperyment V1B – 41 h i (iii) eksperyment V1C – 51 h.

Zanotowano duży rozrzut wyników, zwłaszcza dla testu V1A. W związku z tym i przy niemożności wykonania

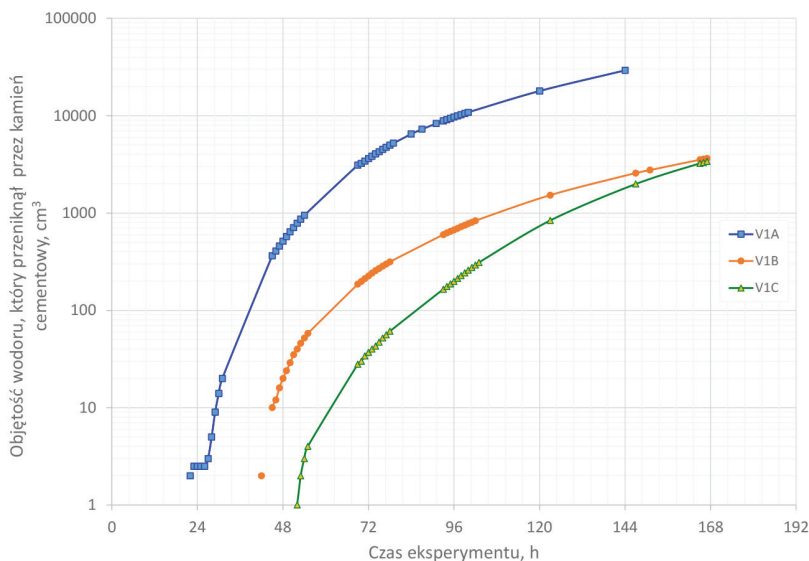


Fig. 4. Results of hydrogen migration tests through a 7-cm-thick barrier – logarithmic scale

Rys. 4. Wyniki testów migracji wodoru przez barierę o grubości 7 cm – skala logarytmiczna

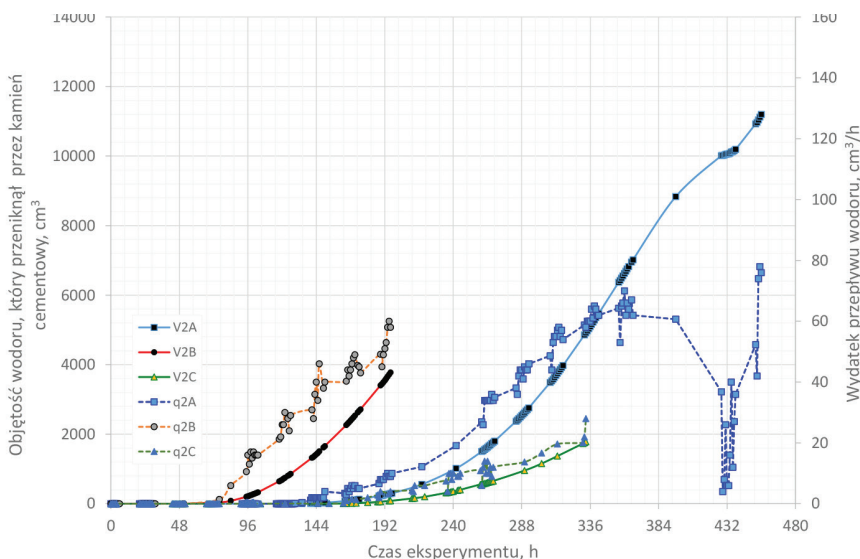


Fig. 5. Results of hydrogen migration tests through a 14-cm-thick barrier (2 cores)

Rys. 5. Wyniki testów migracji wodoru przez barierę o grubości 14 cm (2 rdzenie)

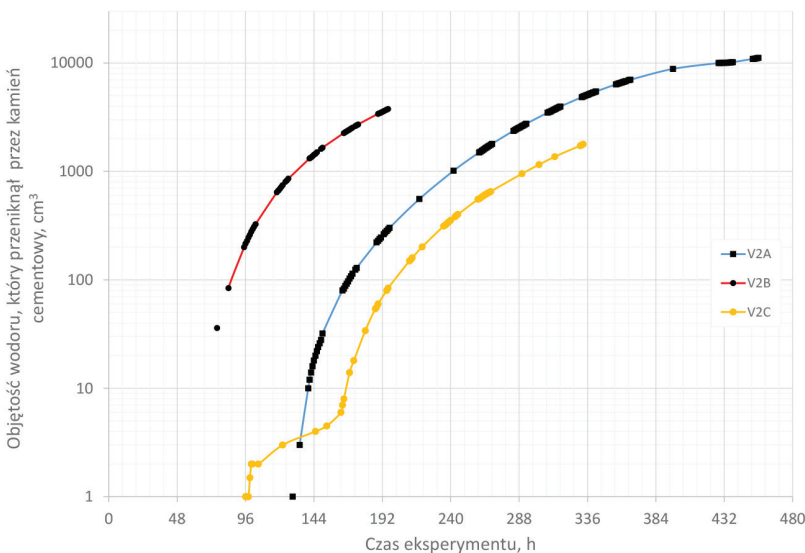


Fig. 6. Results of hydrogen migration tests through a 14-cm-thick barrier – logarithmic scale

Rys. 6. Wyniki testów migracji wodoru przez barierę o grubości 14 cm – skala logarytmiczna

większej liczby analogicznych testów, do dalszych rozważań przyjęto konieczność posługiwania się średnim czasem „przebiecia” wodoru (T_{sr}), obliczonym z wykorzystaniem wyników z każdego pojedynczego eksperymentu. Obliczony średni czas dla serii 3 eksperymentów z barierą o grubości 7 cm wynosił $T_{\text{sr}(1)} = 36$ h. W kolejnym etapie badano barierę o grubości 14 cm, złożoną z 2 szczelnie połączonych rdzeni (2×7 cm). Wyniki zestawiono na rys. 5. Eksperymenty A i B miały przebieg standardowy, natomiast w teście C (V2C, q2C) odnotowano anomalię ok. 400. h. Zaobserwowane chwilowe wyhamowanie wydatku przepływu mogło wynikać z okresowej blokady głównego kanału migracji. Zjawisko to wystąpiło w końcowej fazie testu, nie wpływając na wyznaczony czas przebiecia.

Na rys. 6 przedstawiono wyniki pomiarów objętości w skali logarytmicznej. Na podstawie 3 kolejnych badań określono czasy „przebiecia” wodoru: (i) eksperyment V2A – 66 h, (ii) eksperyment V2B – 98 h i (iii) eksperyment V2C – 129 h. Podobnie jak w poprzedniej serii odnotowano znaczny rozrzut uzyskanych wyników, szczególnie w teście A (krzywa V2A), w którym przebiecie wodoru nastąpiło niemal 2-krotnie szybciej niż w eksperymencie C (krzywa V2C). Na podstawie 3 kolejnych eksperymentów obliczono średni czas przebiecia wodoru, który wyniósł $T_{\text{sr}(2)} = 98$ h.

W trzecim, ostatnim etapie badań wykonano testy z przegrodą złożoną z 3 próbek kamienia połączonych w 1 baterię o długości 21 cm. Uzyskane wyniki przedstawiono kompleksowo na rys. 7. Choć w 2 eksperymentach (A i B) uzyskano zbliżone czasy migracji, to w 3. (krzywa V3C) czas potrzebny na pokonanie przegrody wydłużył się ponad 3-krotnie, osiągając 524 h. Mogło to wynikać z faktu, że każdy z 3 elementów przegrody charakteryzował się bardzo dobrą jakością i nie zawierał defektów ułatwiających migrację małych cząsteczek wodoru. W innych zestawach próbek mogły występować trudne do wykrycia mikrouszkodzenia. Wykonanie prześwietleń (np. tomografia komputerowa) próbek mogłoby w przyszłości

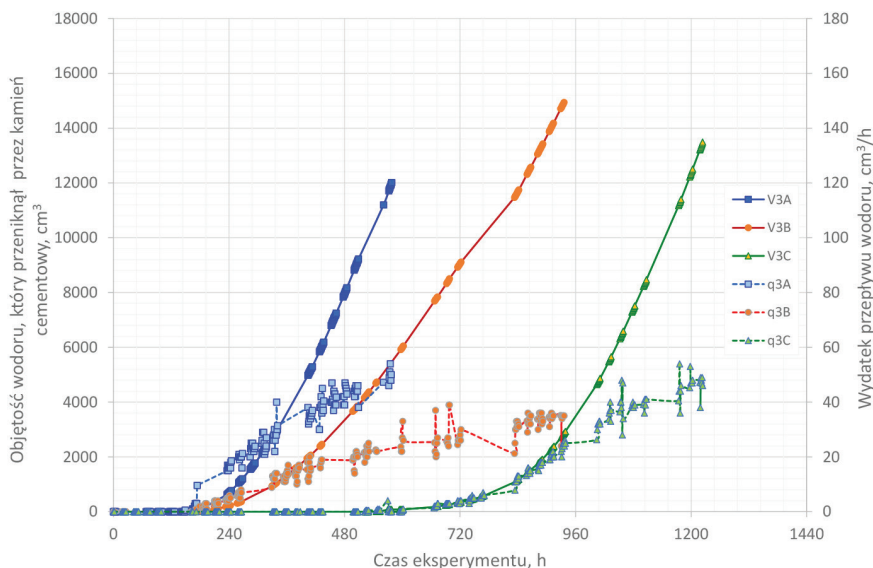


Fig. 7. Results of hydrogen migration tests through a 21-cm-thick barrier (3 cores)

Rys. 7. Wyniki testów migracji wodoru przez barierę o grubości 21 cm (3 rdzenie)

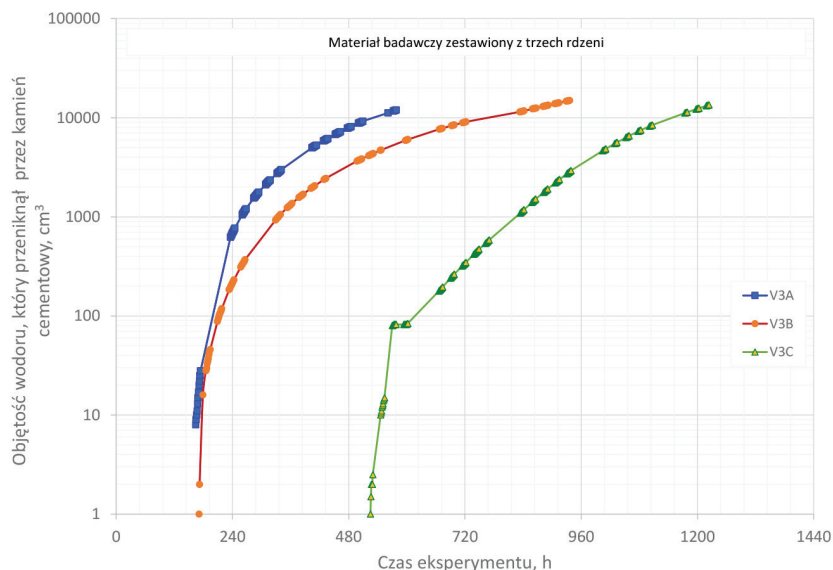


Fig. 8. Results of hydrogen migration tests through a 21-cm-thick barrier – logarithmic scale

Rys. 8. Wyniki testów migracji wodoru przez barierę o grubości 21 cm – skala logarytmiczna

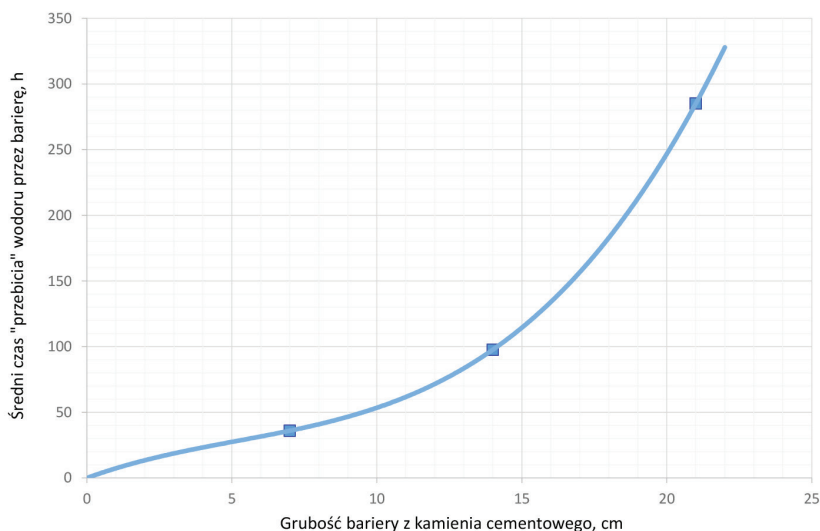


Fig. 9. Summary of the test results

Rys. 9. Podsumowanie wyników badań

pomóc w pełniejszym zrozumieniu i właściwej interpretacji uzyskanych wyników. Na rys. 8, dla uwydatnienia momentu przebiecia wodoru, zastosowano skalę logarytmiczną.

Na podstawie 3 kolejnych badań określono następujące czasy „przebiecia” wodoru: (i) eksperyment V3A – 160 h, (ii) eksperyment V3B – 171 h i (iii) eksperyment V3C – 524 h. Następnie dla bariery o grubości 21 cm obliczono średni czas przebiecia wodoru, który wyniósł $T_{\text{sr}(3)} = 285$ h. Podsumowanie wyników przedstawiono na rys. 9.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzono 9 długofalowych testów migracji wodoru przez barierę ze stwardniałego kamienia cementowego zaprojektowanego pod kątem potencjalnego zastosowania w magazynach wodoru w kawernach solnych. W celu zapewnienia powtarzalności, próbki wykonano w jednej serii i kondycjonowano w nasyconej solance (NaCl, 50°C) przez min. 8 miesięcy. Badania zrealizowano w identycznych warunkach termobarycznych dla 3 grubości bariery: 7, 14 oraz 21 cm (po 3 powtórzenia dla każdego wariantu). Ze względu na rozrzut wartości cząstkowych, do oceny dynamiki migracji przyjęto średni czas przebiecia wyznaczony jako średnia arytmetyczna z 3 pomiarów.

Szczelność kamienia cementowego wzrastała wraz ze wzrostem grubości przegrody. Średni czas przebiecia wodoru zwiększał się z 36 h dla bariery o grubości 7 cm do 98 h przy 14 cm oraz 285 h dla 21 cm. Uzyskane wyniki wskazują na wyraźną zależność pomiędzy długością drogi migracji wodoru a właściwościami barierowymi cementu.

Transport wodoru przez kamień cementowy ma charakter dyfuzyjno-przepływowy i jest zależny od mikrostruktury materiału. Zaobserwowane różnice w czasie przebiecia wodoru pomiędzy próbkami o identycznej geometrii sugerują, że lokalne mikropęknięcia, nieciągłości lub porowatość

struktury mogą istotnie wpływać na intensywność migracji gazu.

Długotrwała ekspozycja kamienia cementowego na wodór nie spowodowała degradacji makroskopowej. Nie stwierdzono uszkodzeń strukturalnych próbek ani utraty integralności mechanicznej. Zarejestrowane efekty miały charakter ilościowy (zróznicowana przepuszczalność), a nie jakościowy (zmiana struktury materiału).

Zastosowany układ badawczy typu PVT okazał się efektywnym narzędziem do badań szczelności. Umożliwił on precyzyjną kontrolę warunków termobarycznych oraz pomiarów przepływu wodoru z dużą dokładnością, co zapewniło wiarygodność uzyskanych wyników.

Rezultaty badań stanowią podstawę do opracowania modeli predykcyjnych szczelności cementu w funkcji grubości przegrody i warunków operacyjnych. Uzyskane dane mogą być wykorzystane przy projektowaniu i weryfikacji technologii cementowania otworów dla podziemnych magazynów wodoru w kawernach solnych i/lub wyeksploatowanych złożach węglowodorowych.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. „Długofalowe badania szczelności kamieni cementowych względem wodoru” – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia 0060/KB, nr archiwalny: DK-4100-0038/2025.

Otrzymano: 27-04-2026

Zrecenzowano: 01-05-2026

Zaakceptowano: 04-05-2026

Opublikowano: 18-06-2026

LITERATURA

- [1] M. Warnecki, M. Wojnicki, J. Kuśnierczyk i in., *Przem. Chem.* 2024, **103**, nr 1, 9, DOI: 10.15199/62.2024.1.6.
- [2] M. Warnecki, J. Kuśnierczyk, S. Szuflika, *Przem. Chem.* 2025, **104**, nr 1, 119, DOI: 10.15199/62.2025.1.8.
- [3] M. Ali, A. Isah, N. Yekeeni in., *Energy Environ. Sci.* 2025, **18**, 5740, DOI: 10.1039/D4EE04564E.
- [4] L. Zeng, R. Sander, Y. Chen i in., *Engineering* 2024, **40**, 211, DOI: 10.1016/J.ENG.2024.03.011.
- [5] A. Aftab, A. Hassanpouryouzband, A. Martin i in., *Environ. Sci. Technol. Lett.* 2023, **10**, 551, DOI: 10.1021/ACS.ESTLETT.3C00303.
- [6] A. Hussain, H. Emadi, S.R. Thiyagarajan i in., *Appl. Sci.* 2024, **14**, 7973, DOI: 10.3390/APP14177973.
- [7] E.R. Ugarte, D. Tetteh, S. Salehi, *Int. J. Hydrogen Energy* 2024, **51**, 473, DOI: 10.1016/J.IJHYDENE.2023.07.037.
- [8] A. Corina, V. Zikovic, V. Soustelle i in., Review of current practices and existing experimental data for well and rock materials under cyclic hydrogen injection and withdrawal, H2020 HyUSPRe project report, Utrecht 2022.
- [9] B. Sun, M. Zhang, Q. Sun i in., *Nat. Commun.* 2025, **16**, 369, DOI: 10.1038/S41467-024-55773-Y.
- [10] P. Kekäläinen, Y. Gu, Hydrogen and concrete. Literature review, Research Report VTT-R-00318-24, Finland 2024.
- [11] M. Wojnicki, M. Warnecki, S. Szuflika i in., *Nafta-Gaz* 2018, **74**, 919, DOI: 10.18668/NG.2018.12.06.
- [12] M. Warnecki, M. Wojnicki, J. Kuśnierczyk i in., *Nafta-Gaz* 2020, **76**, 784, DOI: 10.18668/NG.2020.11.03.
- [13] Z. Jangda, H. Menke, A. Busch i in., *J. Colloid Interface Sci.* 2023, **629**, 316, DOI: 10.1016/j.jcis.2022.09.082.
- [14] H. Braid, K. Taylor, E. Hough i in., *Earth-Sci. Rev.* 2024, **259**, 104975, DOI: 10.1016/J.EARSCIREV.2024.104975.
- [15] B. Kutcho, R. Spaulding, D. Tapriyal i in., *SSRN* 2025, 5177320, DOI: 10.2139/SSRN.5177320.
- [16] S. Manoorkar, G.K. Pakkaner, H. Omar i in., *arXiv* 2024, arXiv:2411.14122v2[physics.flu-dyn].
- [17] A. Nasiri, K. Ravi, M. Prohaska-Marchriedi in., Mat. Konf. SPE EuropeC – Europe Energy Conference featured at the 84th EAGE Annual Conference & Exhibition, June 2023, Vienna, Austria, Paper No. SPE-214423-MS, DOI: 10.2118/214423-MS.

Kalendarz wydarzeń w 2026 r.

Miesiąc	Data	Wydarzenie	Miejsce	Organizator
Czerwiec	25–26.06.	XIX Kopernikańskie Seminarium Doktoranckie	Toruń	Wydział Chemii, UMK w Toruniu
	30.06.–2.07.	European Technical Coating Congress „ETCC 2026”	Praga	FATIPEC
Wrzesień	14–18.09.	68. Zjazd PTChem	Bydgoszcz	PTChem
	17.09.	XVII Konferencja Ochrona i Inżynieria Środowiska – Zrównoważony Rozwój	Kraków	AGH w Krakowie
Październik	19–21.10.	XVI Konferencja Naukowo-Techniczna Środki Smarowe 2026	Zakopane	INiG-PIB
Listopad	3–5.11.	Kujawsko-Pomorskie Forum Innowacji, Nauki, Biznesu i Samorządu	Toruń	KPCNT
	22–25.11.	50. Międzynarodowe Seminarium Naukowo-Techniczne „Chemistry for Agriculture and Human Health”	Wrocław	CNB Agrophos
Grudzień	2–4.12.	Konferencja Przemysł Chemiczny 2026 Gala konkursu o tytuł „Inżynier Przemysłu Chemicznego” 2026	Warszawa	ZG SITPChem