



Polska Akademia Nauk
Oddział w Krakowie
Komisja Nauk Geologicznych

Referat wygłoszony w dniu 16 kwietnia 2025 r. na posiedzeniu Komisji Nauk Geologicznych PAN Oddział w Krakowie

Prof. dr hab. inż. Barbara Uliasz-Misiak

Katedra Inżynierii Naftowej

Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

E-mail: uliasz@agh.edu.pl

Podziemne magazynowanie wodoru - aspekty geologiczne i złożowe

Wodór może być paliwem, które przyczyni się do redukcji emisji gazów cieplarnianych i poprawy bezpieczeństwa energetycznego (Matos et al. 2019, Noussan et al. 2021). Gaz ten może pomóc w zastąpieniu paliw kopalnych odnawialnymi źródłami energii w energetyce, transporcie i w przemyśle (Amez Arenillas et al. 2021, Chapman et al. 2019). Wodór może nie tylko zaspokoić zapotrzebowanie na energię, ale także umożliwić jej długotrwałe magazynowanie. Potrzeba magazynowania wodoru wynika z kilku istotnych przesłanek: rozwoju energetyki odnawialnej, dekarbonizacji sektora energetycznego i przemysłu, ograniczania emisji CO₂, dywersyfikacji źródeł energii, rosnącego zapotrzebowania na H₂ w gospodarce, bezpieczeństwa energetycznego oraz stabilizacji systemu energetycznego (Andersson & Grönkvist 2019, Elberry et al. 2021, Reda et al. 2024).

Efektywne wykorzystanie wodoru wymaga opracowania technologii jego wielkoskalowego magazynowania. Metody przechowywania wodoru można podzielić na fizyczne (w zbiornikach naziemnych w postaci skompresowanej, ciekłej w temperaturze kriogenicznej lub sprężonej w temperaturze kriogenicznej) (Usman 2022) oraz metody chemiczne (magazynowanie w adsorbentach, w wodorkach metali, ciekłych wodorkach organicznych) (Al Zohbi et al. 2023). Jednym ze sposobów magazynowania wodoru jest jego przechowywanie w formacjach geologicznych, takich jak kawerny solne czy porowate skały zbiornikowe (Talukdar et al. 2024, Ernesto et al. 2023).

Poszczególne struktury geologiczne, rozpatrywane jako miejsca magazynowania wodoru, mają zróżnicowane cechy wpływające na proces przechowywania tego gazu. Kawerny solne charakteryzują się dużą szczelnością, możliwością pracy wielocyklowej w roku

oraz dużymi mocami zatłaczania i odbioru gazu. Ich główną wadą jest jednak ograniczona dostępność związana z ilością i rozmieszczeniem odpowiednich złóż solnych, wysokie koszty i możliwy negatywny wpływ na środowisko związany z ługowaniem kawern (Miocic et al. 2022, Tackie-Otoo & Haq 2024). Skały wodonośne potencjalnie pozwalają zmagazynować największe ilości wodoru, ponieważ mają znaczne rozprzestrzenienie. Struktury te jednak zazwyczaj są słabo rozpoznane, wymagają kosztownych prac poszukiwawczych i rozpoznawczych (Hematpur et al. 2023, Okoroafor et al. 2022, Uliasz-Misiak & Misiak 2024). Z kolei złoża węglowodorów to struktury o potwierdzonej szczelności geologicznej, dobrze udokumentowane, zazwyczaj o znacznej pojemności. Do wad można zaliczyć możliwość wycieków przez infrastrukturę zlokalizowaną na złożu oraz ograniczoną liczbę cykli napełniania i odbioru w ciągu roku (Muhammed et al. 2023).

Podziemne magazynowanie wodoru znajduje się obecnie w fazie wczesnego rozwoju i testów pilotażowych. Technologia ta jest przedmiotem intensywnych badań naukowych i technologicznych. Wciąż brakuje pełnoskalowych komercyjnych instalacji, a istniejące projekty koncentrują się na testach laboratoryjnych, modelowaniu geologicznym oraz pilotażowych magazynach w Niemczech, USA czy Wielkiej Brytanii. Główne wyzwania związane z wdrożeniem tej technologii dotyczą bezpieczeństwa, strat wodoru oraz opłacalności magazynowania w różnych formacjach geologicznych.

Kluczowe aspekty podziemnego magazynowania wodoru obejmują bezpieczeństwo, szczelność geologiczną i techniczną, oddziaływania na środowisko oraz efektywność ekonomiczną (Shahriar et al. 2024, Ernesto et al. 2023, Tarkowski & Uliasz-Misiak 2022).

Wodór cząsteczkowy ma najmniejszą masę cząsteczkową spośród wszystkich gazów, małą gęstość, dużą przenikalność oraz niską lepkość dynamiczną. Parametry te wpływają na szybkość przemieszczania się gazu, wyższe ryzyko jego wycieku oraz niestabilny front zatłaczania gazu.

Geochemiczne i mikrobiologiczne procesy, a także oddziaływania geomechaniczne związane z magazynowaniem będą miały istotny wpływ na przebieg podziemnego magazynowania wodoru. Reakcje te będą zachodzić zarówno w kawernach solnych, jak i porowatych formacjach skalnych. Mogą one prowadzić do rozpuszczania i wytrącania się nowych minerałów, powstawania gazów, zmian porowatości i przepuszczalności (Hemme & van Berk 2017, Zivar et al. 2021), deformacji skał (Peng et al. 2020, Pijnenburg et al. 2019), zmian wytrzymałości skał (Reitenbach et al. 2015, Truche et al. 2013) oraz wielu innych zjawisk. Zatłaczanie wodoru do podziemnego magazynu może prowadzić do wzrostu ciśnienia, a tym samym do zmian układu naprężeń w podziemnym magazynie oraz w jego otoczeniu (Rutqvist 2012, Vilarrasa et al. 2016, Song et al. 2023). Proces ten może spowodować powstanie uskoków i propagację szczelin (van Gesse & Hajibeygi 2023). Zjawiska te należy uwzględnić w planowaniu podziemnego magazynowania wodoru.

Struktury geologiczne rozważane jako potencjalne magazyny wodoru będą się różniły pojemnością magazynowania. Pojemność magazynowania wodoru w skałach solnych jest uwarunkowana wielkością i liczbą kawern. W kawernach o wysokości 50-500 m i średnicy 50-

100 m może być zmagazynowane ok. 1 mln m³ wodoru i więcej (Hévin 2019, Lankof & Tarkowski 2020, Kumar et al. 2023). Pojemność magazynu H₂ można zwiększyć ługując kilka kawern obok siebie. Poziomy wodonośne oraz szcerpane złoża węglowodorów umożliwiają magazynowanie wodoru w ilościach znacznie większych (o rząd wielkości lub więcej), niż kawerny solne. Ze względu na większe rozprzestrzenienie geograficzne stanowią one bardziej elastyczną opcję wielkoskalowego magazynowania wodoru niż kawerny solne (Heinemann et al. 2021, Tarkowski 2019). Pojemność magazynów w poziomach wodonośnych jest uwarunkowana nie tylko rozmiarami struktury (rozciągłością i miąższością skały zbiornikowej), ale również innymi czynnikami, do których zalicza się m. in.: parametry petrofizyczne, wypieranie wielofazowego płynu, zmiany ciśnienia związane z zatłaczaniem wodoru (Zivar et al. 2021). Wykonano szereg prac mających na celu rozpoznanie i ocenę pojemności lub potencjału magazynowania wodoru w strukturach geologicznych w Europie. W projekcie Hystories oszacowano całkowitą teoretyczną pojemność magazynowania wodoru dla 750 pułapek zlokalizowanych w skałach porowatych w krajach Unii Europejskiej i Zjednoczonego Królestwa na 6 925 TWh, z czego 2 725 TWh znajduje się w 506 pułapkach lądowych w Europie (Réveillère & Le Gallo. 2023). Oszacowane pojemności magazynowania wodoru w złożach gazu ziemnego zlokalizowanych w NW Polsce wahają się od 0,01 do 42,4 TWh równoważnika energii wodoru (Uliasz-Misiak et al. 2024). Oceny pojemności magazynowania wodoru w warstwach wodonośnych na terenie Polski wykazały, że wahają się one w zakresie od 0,016 do 4,46 TWh (Tarkowski et al. 2024), w zależności od lokalizacji. Teoretyczny potencjał magazynowania wodoru w kawernach solnych w Europie oszacowano na 84,8 PWh równoważnika energii wodoru (27% na lądzie), z czego 42% znajduje się w Niemczech (35,6 PWh równoważnika energii wodoru) (Caglayan et al. 2020). Oceny potencjału magazynowania wodoru dla 3 struktur w poziomach wodonośnych oraz 7 wysadach solnych i pokładowych złożach soli na terenie Polski (Tarkowski et al. 2024). Zdolność magazynowania wodoru w kawernach solnych w złożach soli kamiennej, średnia pojemność energetyczna na kawernę wynosi od 0,047 do 0,094 TWh równoważnika energii wodoru, co przekłada się na 1400-2800 Mg wodoru, podczas gdy w przypadku kopuł solnych jest to od 0,06 do 0,20 TWh, co odpowiada odpowiednio 1800 i 5900 Mg wodoru. W przypadku głębokich warstw wodonośnych zdolność magazynowania, w zależności od rozważanej struktury, wynosi od 0,016 do 4,5 TWh równoważnika energii wodoru, co przekłada się na około 470-133 600 Mg wodoru. Oceny pojemności magazynowej wodoru w wyeksploatowanych złożach gazu, kawernach solnych i poziomach wodonośnych wykazały, że mogą pomieścić 30% zużycia energii w każdym stanie regionu I-WEST (USA) (Chen et al. 2023). Oszacowania wykazały, że w podziemnych magazynach gazu w USA można zmagazynować 327 TWh równoważnika energii wodoru (Lackey et al. 2023).

Literatura:

- Amez Arenillas, I., Ortega, M.F., García Torrent, J., and Llamas Moya, B. (2021) 'Hydrogen as an Energy Vector: Present and Future'. in *Sustaining Tomorrow via Innovative Engineering*. WORLD SCIENTIFIC, 83–129
- Andersson, J. and Grönkvist, S. (2019) 'Large-Scale Storage of Hydrogen'. *International Journal of Hydrogen Energy* 44 (23), 11901–11919
- Caglayan, D.G., Weber, N., Heinrichs, H.U., Linßen, J., Robinius, M., Kukla, P.A., and Stolten, D. (2020) 'Technical Potential of Salt Caverns for Hydrogen Storage in Europe'. *International Journal of Hydrogen Energy* 45 (11), 6793–6805
- Chapman, A., Itaoka, K., Hirose, K., Davidson, F.T., Nagasawa, K., Lloyd, A.C., Webber, M.E., Kurban, Z., Managi, S., Tamaki, T., Lewis, M.C., Hebner, R.E., and Fujii, Y. (2019) 'A Review of Four Case Studies Assessing the Potential for Hydrogen Penetration of the Future Energy System'. *International Journal of Hydrogen Energy* 44 (13), 6371–6382
- Chen, F., Ma, Z., Nasrabadi, H., Chen, B., Saad Mehana, M.Z., and Van Wijk, J. (2023) 'Capacity Assessment and Cost Analysis of Geologic Storage of Hydrogen: A Case Study in Intermountain-West Region USA'. *International Journal of Hydrogen Energy* 48 (24), 9008–9022
- Elberry, A.M., Thakur, J., Santasalo-Aarnio, A., and Larmi, M. (2021) 'Large-Scale Compressed Hydrogen Storage as Part of Renewable Electricity Storage Systems'. *International Journal of Hydrogen Energy* 46 (29), 15671–15690
- Ernesto, J., Fuentes, Q., and Santos, D.M.F. (2023) 'Technical and Economic Viability of Underground Hydrogen Storage'. *Hydrogen* 4 (4), 975–1000
- van Gesse, S. and Hajibeygi, H. (2023) *Hydrogen TCP-Task 42: Underground Hydrogen Storage - Technology Monitor Report 2023* [online] available from <<https://www.ieahydrogen.org/task/task-42-underground-hydrogen-storage/>> [25 June 2024]
- Heinemann, N., Alcalde, J., Miocic, J.M., Hangx, S.J.T., Kallmeyer, J., Ostertag-Henning, C., Hassanpouryouzband, A., Thaysen, E.M., Strobel, G.J., Schmidt-Hattenberger, C., Edlmann, K., Wilkinson, M., Benthams, M., Haszeldine, R.S., Carbonell, R., and Rudloff, A. (2021) 'Enabling Large-Scale Hydrogen Storage in Porous Media – the Scientific Challenges'. *Energy & Environmental Science* 14 (2), 853–864
- Hematpur, H., Abdollahi, R., Rostami, S., Haghighi, M., and Blunt, M.J. (2023) 'Review of Underground Hydrogen Storage: Concepts and Challenges'. *Advances in Geo-Energy Research* [online] 7 (2), 111–131. available from <<https://www.sciopen.com/article/10.46690/ager.2023.02.05>> [16 December 2023]
- Hemme, C. and van Berk, W. (2017) 'Potential Risk of H₂S Generation and Release in Salt Cavern Gas Storage'. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 47 (November), 114–123
- Hévin, G. (2019) 'Underground Storage of Hydrogen in Salt Caverns'. in *European Workshop on Underground Energy Storage November 7th-8th 2019*. held 2019 at Paris
- Kumar, Sunil, Regassa Jufar, S., Kumar, Sirish, Foroozesh, J., Kumari, S., and Bera, A. (2023) 'Underground Hydrogen Storage and Its Roadmap and Feasibility in India toward Net-Zero Target for Global Decarbonization'. *Fuel* 350, 128849
- Lackey, G., Freeman, G.M., Buscheck, T.A., Haeri, F., White, J.A., Huerta, N., and Goodman, A. (2023) 'Characterizing Hydrogen Storage Potential in U.S. Underground Gas Storage Facilities'. *Geophysical Research Letters* 50 (3), e2022GL101420

- Lankof, L. and Tarkowski, R. (2020) 'Assessment of the Potential for Underground Hydrogen Storage in Bedded Salt Formation'. *International Journal of Hydrogen Energy* 45 (38), 19479–19492
- Maggio, G., Nicita, A., and Squadrito, G. (2019) 'How the Hydrogen Production from RES Could Change Energy and Fuel Markets: A Review of Recent Literature'. in *International Journal of Hydrogen Energy*. vol. 44 (23). Elsevier Ltd, 11371–11384
- Matos, C.R., Carneiro, J.F., and Silva, P.P. (2019) 'Overview of Large-Scale Underground Energy Storage Technologies for Integration of Renewable Energies and Criteria for Reservoir Identification'. *Journal of Energy Storage* 21 (February), 241–258
- Miocic, J., Heinemann, N., Edlmann, K., Scafidi, J., Molaei, F., and Alcalde, J. (2022) 'Underground Hydrogen Storage: A Review'. *Geological Society, London, Special Publications* 528 (1), 2022
- Muhammed, N.S., Haq, M.B., Al Shehri, D.A., Al-Ahmed, A., Rahman, M.M., Zaman, E., and Iglauer, S. (2023) 'Hydrogen Storage in Depleted Gas Reservoirs: A Comprehensive Review'. *Fuel* 337, 127032
- Noussan, M., Raimondi, P.P., Scita, R., and Hafner, M. (2021) 'The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—a Technological and Geopolitical Perspective'. *Sustainability* 13 (298), 1–26
- Okoroafor, E.R., Kim, T.W., Nazari, N., Watkins, H.Y., Saltzer, S.D., and Kovscek, A.R. (2022) 'Assessing the Underground Hydrogen Storage Potential of Depleted Gas Fields in Northern California'. *Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition* 2022-Octob
- Peng, H., Fan, J., Zhang, X., Chen, J., Li, Z., Jiang, D., and Liu, C. (2020) 'Computed Tomography Analysis on Cyclic Fatigue and Damage Properties of Rock Salt under Gas Pressure'. *International Journal of Fatigue* 134, 105523
- Pijnenburg, R.P.J., Verberne, B.A., Hangx, S. J.T., and Spiers, C.J. (2019) 'Inelastic Deformation of the Slochteren Sandstone: Stress-Strain Relations and Implications for Induced Seismicity in the Groningen Gas Field'. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 124 (5), 5254–5282
- Reda, B., Elzamar, A.A., Alfazzani, S., and Ezzat, S.M. (2024) 'Green Hydrogen as a Source of Renewable Energy: A Step towards Sustainability, an Overview'. *Environment, Development and Sustainability* 1–21
- Reitenbach, V., Ganzer, L., Albrecht, D., and Hagemann, B. (2015) 'Influence of Added Hydrogen on Underground Gas Storage: A Review of Key Issues'. *Environmental Earth Sciences* 73 (11), 6927–6937
- Réveillère, A. and Le Gallo, Y. (2023) *Ranking and Selection of Geological Stores*.
- Rutqvist, J. (2012) 'The Geomechanics of CO₂ Storage in Deep Sedimentary Formations'. *Geotechnical and Geological Engineering* 2012 30:3 30 (3), 525–551
- Shahriar, M.F., Khanal, A., Khan, M.I., and Pandey, R. (2024) 'Current Status of Underground Hydrogen Storage: Perspective from Storage Loss, Infrastructure, Economic Aspects, and Hydrogen Economy Targets'. *Journal of Energy Storage* 97, 112773
- Song, Y., Jun, S., Na, Y., Kim, K., Jang, Y., and Wang, J. (2023) 'Geomechanical Challenges during Geological CO₂ Storage: A Review'. *Chemical Engineering Journal* 456, 140968
- Tackie-Otoo, B.N. and Haq, M.B. (2024) 'A Comprehensive Review on Geo-Storage of H₂ in Salt Caverns: Prospect and Research Advances'. *Fuel* 356, 129609
- Talukdar, M., Blum, P., Heinemann, N., and Miocic, J. (2024) 'Techno-Economic Analysis of

- Underground Hydrogen Storage in Europe'. *iScience* 27 (1), 108771
- Tarkowski, R. and Uliasz-Misiak, B. (2022) 'Towards Underground Hydrogen Storage: A Review of Barriers'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 162, 112451
- Tarkowski, R. (2019) 'Underground Hydrogen Storage: Characteristics and Prospects'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 105 (May), 86–94
- Tarkowski, R., Lankof, L., Luboń, K. and Michalski, J. (2024) 'Hydrogen Storage Capacity of Salt Caverns and Deep Aquifers versus Demand for Hydrogen Storage: A Case Study of Poland'. *Applied Energy* 355 (1 February), 122268
- Truche, L., Jodin-Caumon, M.C., Lerouge, C., Berger, G., Mosser-Ruck, R., Giffaut, E., and Michau, N. (2013) 'Sulphide Mineral Reactions in Clay-Rich Rock Induced by High Hydrogen Pressure. Application to Disturbed or Natural Settings up to 250 °C and 30 Bar'. *Chemical Geology* 351, 217–228
- Uliasz-Misiak, B., Lewandowska-Śmierzchalska, J., and Matuła, R. (2024) 'Hydrogen Storage Potential in Natural Gas Deposits in the Polish Lowlands'. *Energies* 2024 [online] 17 (2), 374. available from <<https://www.mdpi.com/1996-1073/17/2/374/htm>> [25 January 2024]
- Uliasz-Misiak, B. and Misiak, J. (2024) 'Underground Gas Storage in Saline Aquifers: Geological Aspects'. *Energies* 17 (7), 1666
- Usman, M.R. (2022) 'Hydrogen Storage Methods: Review and Current Status'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 167, 112743
- Vilarrasa, V., Makhnenko, R., and Gheibi, S. (2016) *Geomechanical Analysis of the Influence of CO₂ Injection Location on Fault Stability*. [online] 8 (6), 805–818. available from <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.06.006>> [18 December 2023]
- Zivar, D., Kumar, Sunil, and Foroozesh, J. (2021) 'Underground Hydrogen Storage: A Comprehensive Review'. *International Journal of Hydrogen Energy* 46 (45), 23436–23462
- Al Zohbi, G., Almoaikel, A., and AlShuhail, L. (2023) 'An Overview on the Technologies Used to Store Hydrogen'. *Energy Reports* 9, 28–34