

Numeryczne symulacje procesu magazynowania wodoru w częściowo wyeksploatowanym złożu gazowym

Numerical simulations of hydrogen storage in a partially depleted gas reservoir

Wiesław Szott, Krzysztof Miłek

Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: W pracy przedstawiono charakterystyki potencjalnych struktur możliwych do wykorzystania w celu magazynowania wodoru. Sformułowano kryteria wyboru optymalnej struktury, takie jak: pojemność dostępna dla wodoru, zakres historycznych ciśnień złożowych, ciśnienie szczelinowania, własności transportowe skały, aktywność wody podścielającej, rodzaj płynu złożowego, temperatura złożowa. Stosując te kryteria, wybrano strukturę złoża gazu ziemnego funkcjonującą obecnie jako PMG (podziemny magazyn gazu). Dla znalezienia charakterystyk wybranej struktury jako PMW (podziemnego magazynu wodoru) skonstruowano kompozycyjny model złożowy poprzez konwersję istniejącego modelu typu *black oil*. W tym celu model złoża uzupełniono o wieloskładnikowy model płynu złożowego opisany równaniem stanu Soave’a–Redlicha–Kwonga oraz o kompozycyjne hydrauliczne modele odwiertów. Kompletny model złoża efektywnie skalibrowano, wykorzystując wieloletnie historyczne dane eksploatacyjne obejmujące wydajności wydobywania ze złoża, zatłaczania i odbioru gazu w ramach PMG oraz ciśnienie zmierzone na spodzie odwiertów eksploatacyjnych. Zweryfikowany model wykorzystano do wielokrotnych symulacji procesu magazynowania wodoru, stosując realistyczne ograniczenia dla zatłaczania i odbioru gazu, tj. czas zatłaczania i odbioru, limity na sumaryczną ilość zatłaczanego wodoru oraz odbieranego gazu, minimalną czystość odbieranego wodoru. Rozpatrzono warianty różniące się szczegółami konwersji PMG na PMW oraz zakładanym maksymalnym stopniem zanieczyszczenia odbieranego wodoru. Podstawowe własności geologiczne wynikały z oryginalnych właściwości struktury i nie podlegały modyfikacjom, natomiast nieznany, ale istotny parametr dyspersji, decydujący o mieszanii się gazu zatłaczanego z gazem rodzimym, był przedmiotem analizy wariantowej. Wyniki ilościowe prognoz pracy PMW uzupełniono szczegółową analizą rozkładów nasycenia wodorem na różnych etapach i w różnych cyklach pracy magazynu. W pracy badano wpływ zjawiska dyspersji na wyniki pracy magazynu poprzez implementację zjawiska dyspersji numerycznej, weryfikację poprawności korelacji dyspersji z prędkością migracji oraz identyfikację wielkości dyspersji dla różnych wariantów modelu złoża.

Słowa kluczowe: struktury geologiczne złóż naftowych, podziemne magazynowanie wodoru, procesy transportu w ośrodku porowatym, dyspersja fizyczna, kompozycyjne modele złożowe.

ABSTRACT: The paper presents the characteristics of potential structures that can be used for hydrogen storage. The criteria for selecting the optimal structure were formulated. They include estimated sequestration capacity, range of historical reservoir pressures, fracturing pressure, transport properties of the rock, activity of the underlying water, type of reservoir fluid, reservoir temperature. After applying these criteria, a natural gas field structure, currently functioning as a UGS (underground gas storage) facility, was selected. In order to find the characteristics of the selected structure as a UHS (underground hydrogen storage), a compositional reservoir model was constructed. For this purpose, a multicomponent model of the formation fluid described by the Soave–Redlich–Kwong equation of state was built and supplemented with compositional hydraulic models of wells. The complete model of the field was effectively calibrated using historical operational data, including the production rate from the gas field, gas injection and withdrawal under the UGS operation and the pressures measured at the bottom of the production wells. The verified model was used for multiple simulations of the hydrogen storage process using realistic constraints for gas injection and withdrawal, i.e., injection and withdrawal times, limits for the total amount of injected hydrogen and withdrawn gas, maximum acceptable contamination of the withdrawn hydrogen. Consequently, simulation scenarios differed in the details of the UGS – UHS conversion and withdrawn gas composition. The basic geological properties resulting from the original structure properties were not subject to modification, while the unknown but significant dispersion parameter determining the mixing of the injected gas with the original gas was subject to changes. The quantitative results of the UHS operation forecasts were supplemented with a detailed analysis of the distribution of hydrogen saturation at various stages and in different operation cycles of the storage schedule. The study investigated the influence of the dispersion phenomenon on the results of storage operation by implementing the phenomenon of numerical dispersion, verifying the correctness

Autor do korespondencji: W. Szott, e-mail: wieslaw.szott@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 14.10.2021 r. Zatwierdzono do druku: 12.01.2022 r.

of the correlation between dispersion and migration speed, and identifying the dispersion values for various reservoir models. Basic conclusion was derived from the obtained simulation results.

Key words: geological structures of petroleum reservoirs, underground hydrogen storage, transport processes in porous media, physical dispersion, reservoir compositional models.

Wstęp

Dokonująca się w ostatnim czasie transformacja energetyczna oraz dalszy jej rozwój (Ciechanowska, 2020) na skalę umożliwiającą przeprowadzenie procesu dekarbonizacji obecnie pracujących systemów energetycznych wprowadzi sezonowość podaży energii, nad którą operatorzy nie będą mieć kontroli. Na przykład na obszarze Skandynawii i Bałtyku średnia miesięczna prędkość wiatru o danej porze roku może się różnić o więcej niż 20% z roku na rok (Liléo et al., 2013). Tak więc zmienna prędkość wiatru w poszczególnych miesiącach, ale też w kolejnych latach wskazuje na konieczność sezonowego magazynowania energii, które mogłoby być bardzo pomocne w łagodzeniu niedoborów energii podczas mniej wietrznych tygodni, miesięcy, a nawet lat. Wodór to jedna z opcji, która łączy w sobie wszechstronność zastosowań w wielu dziedzinach gospodarki, a w dodatku charakteryzuje się też najwyższą wartością opałową odniesioną do jednostki masy (119,9 MJ/kg) w stosunku do innych paliw, tj. benzyny (43,2 MJ/kg), ON (41,8 MJ/kg), gazu ziemnego (38,2–47,2 MJ/kg) czy metanu (50,0 MJ/kg) (Jaworski et al., 2019). Obecnie wodór jest produkowany głównie przez reforming gazu ziemnego o efektywności energetycznej 62% do 80% (Simpson i Lutz, 2007). Można go jednak również produkować bezpośrednio (Gahleitner, 2013) z odnawialnych źródeł energii poprzez elektrolizę wody, polegającą na rozszczepianiu wody na wodór i tlen w ogniach elektrochemicznych o sprawności energetycznej w zakresie od 60% do 83% – w zależności od rodzaju elektrolizy i jej parametrów (Piskowska-Wasiak, 2017). Dużą zaletą elektrolizy jest możliwość szybkiej konwersji energii na wodór i na odwrót, dzięki czemu technologia ta ma duży potencjał, jeśli chodzi o rozwój energii odnawialnej ze źródeł energii wiatru, fal morskich lub promieniowania słonecznego (Amid et al., 2016).

Wyzwaniem dla opisanej wyżej technologii jest magazynowanie wytworzonego wodoru, które może odbywać się w podziemnych magazynach gazu powstałych w kawernach solnych bądź w wyeksploatowanych złożach gazu lub ropy (Gąska et al., 2012; Tarkowski, 2017). W trakcie magazynowania zatłaczanego gazu w częściowo wyeksploatowanych złożach lub kawernach zachodzi zjawisko mieszania się tego gazu z gazem rodzimym, co zostało opisane na przykładach krajowych (Gołąbek et al., 2011a, 2011b; Miłek et al., 2013; Szott i Gołąbek, w przygotowaniu), jak i zagranicznych

(Azin et al., 2008). Choć tematyka ta obejmowała dotychczas głównie przypadki magazynowania wysokometanowego gazu ziemnego, to analogiczne przypadki znane są również dla magazynowania wodoru (Amid et al., 2016; Zivar et al., 2020). Zjawisko mieszania się gazów w znacznym stopniu wpływa na jakość odbieranego gazu, a co za tym idzie – na jego ilości, które można odebrać, jak i na potrzebny bufor gazu. Problem mieszania się gazów nie został należycie rozwiązany w dostępnych komercyjnie symulatorach złożowych używanych do modelowania wielorakich procesów zachodzących podczas transportu płynów złożowych (ropy, gazu, wody). Przykładem takiego symulatora jest powszechnie używany w branży naftowej symulator złożowy Eclipse® firmy GeoQuest (Schlumberger), zarówno w wersji Black Oil, jak i Compositional. Ponieważ modelowanie numeryczne procesów złożowych (w tym wytwarzania i funkcjonowania PMG) stało się ogólnie przyjętym standardem, użytkownicy symulatorów, w tym autorzy niniejszej pracy, zmuszeni są do stosowania specjalnych sposobów opartych na specyficznych sformułowaniach standardowych symulatorów złożowych powodujących pojawianie się zjawisk analogicznych do fizycznych procesów mieszania się gazów przepływających przez ośrodek porowaty, tzw. dyspersji numerycznej.

Niniejszy artykuł przedstawia wyniki analizy funkcjonowania PMW (Peng et al., 2016; Lysy et al., 2021) w zależności od zakładanych parametrów operacyjnych magazynu, w tym maksymalnego zanieczyszczenia wodoru odbieranego z magazynu, oraz od trudno mierzalnego parametru złożowego określającego efekty mieszania się gazów w warunkach złożowych – dyspersji fizycznej (Taylor, 1953). Podjęto próbę systematycznej analizy efektów dyspersji fizycznej modelowanej poprzez kontrolę efektów dyspersji numerycznej, wykorzystując do tego celu doświadczenia nabyte we wcześniejszych pracach (Szott i Gołąbek, 2014).

Wybór struktury geologicznej do magazynowania wodoru

W celach porównawczych umożliwiających wybór struktury do magazynowania wodoru w tabeli 1 zestawiono parametry eksploatacyjne trzech wybranych struktur, obejmujących częściowo wyeksploatowane złoża gazu ziemnego i podziemne magazyny gazu. Złoża/magazyny te spełniały wstępne kryteria

dla PMW, w tym: zakres ciśnień, wielkość pierwotnych zasobów, podstawowe parametry geologiczne oraz dostęp do cyfrowych modeli złożowych.

W celu wybrania najodpowiedniejszej struktury do magazynowania H_2 przyjęto następujące kryteria szczegółowe:

- pojemność dostępna do magazynowania – magazynowanie H_2 nie wymaga bardzo dużych pojemności, obecnie wykorzystywane PMW mają typową pojemność rzędu 10^6 Nm^3 (Zivar et al. 2020);
- ciśnienie złożowe – niskie ciśnienie magazynu pozwala na zainstalowanie systemu sprężarek o niewielkim stopniu sprężania potrzebnych do sezonowego zatłaczania H_2 , natomiast wysokie ciśnienie odbioru nie jest wymagane w przypadku wykorzystania wydobytego gazu na miejscu, bez konieczności jego transportu;
- ciśnienie szczelinowania – jego wysoki stosunek do pierwotnego ciśnienia złożowego wpływa na możliwość zwiększenia pojemności magazynowej oraz na możliwość szybkiego zatłaczania H_2 podczas okresów jego intensywnej produkcji;
- przepuszczalność pozioma oraz pionowa – wysoka przepuszczalność skał złożowych zwiększa możliwości intensywnego zatłaczania/odbioru H_2 do/ze złoża, natomiast mała anizotropia przepuszczalności (poziomej względem pionowej) ogranicza mieszanie się gazu buforowego

z zatłoczonym H_2 na skutek łatwiejszej segregacji grawitacyjnej;

- akifery – aktywne akifery mogą przyczynić się do zmniejszenia pojemności magazynowej dla H_2 ;
- płyn złożowy – obecność kondensatu w złożu ogranicza przepuszczalności fazowe dla gazów;
- temperatura – wpływa m.in. na dyfuzję gazów, a w konsekwencji na ich mieszanie się i czystość odbieranego H_2 (Baghooee et al., 2021).

Na podstawie wymienionych wyżej kryteriów do dalszej analizy wybrano strukturę nr 2, charakteryzującą się niskim ciśnieniem złożowym, niską temperaturą, brakiem kondensatu oraz oszacowaną pojemnością magazynową wynoszącą około 10–100 mln Nm^3 (Amid et al., 2016). Struktura ta obecnie funkcjonuje jako PMG (Such, 2020).

Model wybranej struktury

Konstrukcja modelu

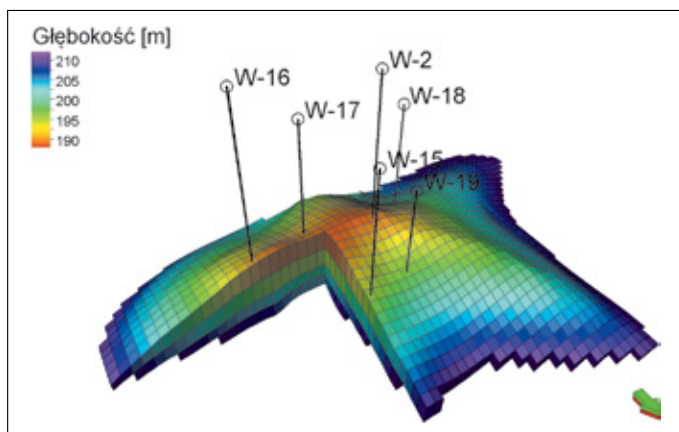
Wybrana struktura jest zlokalizowana w utworach miocenu autochtonicznego (sarmatu), a główną skałą zbiornikową są piaskowce, charakteryzujące się dużą zmiennością litologiczno-facjalną. Akumulacja gazu związana jest z pułapką strukturalną ograniczoną litologicznie. Na podstawie istniejących danych

Tabela 1. Parametry eksploatacyjne wybranych struktur

Table 1. Exploitation parameters of selected structures

Model złoża	Struktura nr 1	Struktura nr 2	Struktura nr 3
Głębokość szczytu struktury, H_{top} [m TVDss]	3118,6	394	1911
Głębokość kontaktu gaz–woda, HGWC [m TVDss]	3160,5	210	2015
Ciśnienie szczelinowania, P_{szcz} [bar]	bd.	bd.	bd.
Skały zbiornikowe	dolomit główny	piaskowce	dolomit, wapień, piaskowiec
Przepuszczalność pozioma, k_h [mD]	0–549,0	0–460	15,0–612,0
Przepuszczalność pionowa, k_v [mD]	0–54,9	0–46	1,5–61,2
Akifer analityczny	nie	tak	tak
Akifer numeryczny	tak	tak	tak
Ciśnienie początkowe, P_{ini} [bar]	566,0	42,1	235,8
Zasoby początkowe, G_{ini} [$\times 10^6 \text{ Sm}^3$]	3297,3	208,0	1389,5
Ciśnienie na koniec wydobywania, P_{end} [bar]	532,1	18,8	213,0
Data końca wydobywania [rrrr]	nd.	nd.	2003
Zasoby na datę zakończenia wydobywania, G_{min} [$\times 10^6 \text{ Sm}^3$]	3129,0	71,3	557,5
Zasoby na koniec eksploatacji, G_{end} [$\times 10^6 \text{ Sm}^3$]	3129,0	192,7	557,5
Ciśnienie minimalne w cyklach, $P_{min,c}$ [bar]	nd.	27,0	nd.
Ciśnienie maksymalne w cyklach, $P_{max,c}$ [bar]	nd.	49,0	nd.
Stan minimalny magazynu w cyklach, $G_{min,c}$ [$\times 10^6 \text{ Sm}^3$]	nd.	98,3	nd.
Stan maksymalny magazynu w cyklach, $G_{max,c}$ [$\times 10^6 \text{ Sm}^3$]	nd.	192,5	nd.
Płyn złożowy	gaz + kondensat	gaz	gaz + kondensat
Temperatura złożowa, $T_{zł}$ [°C]	115,0	25,9	69,8

geologicznych: map strukturalnych, zinterpretowanych badań geofizyki otworowej oraz pomiarów na rdzeniach, skonstruowano strukturalny i parametryczny model struktury. Model ten charakteryzuje się wielkością siatki przestrzennej $70 \times 50 \times 4$ bloków o poziomym wymiarze pojedynczego bloku wynoszącym 54 m i pionowym wymiarze nieprzekraczającym 8 m. Przestrzenny widok tego modelu przedstawiono na rysunku 1.

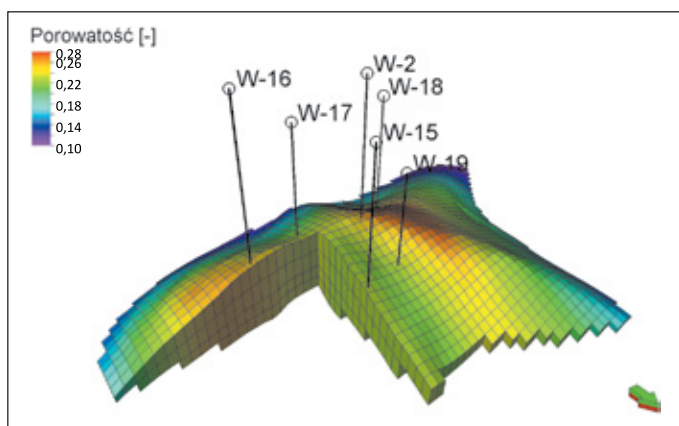


Rysunek 1. Przestrzenny widok modelu

Figure 1. 3D view of the model

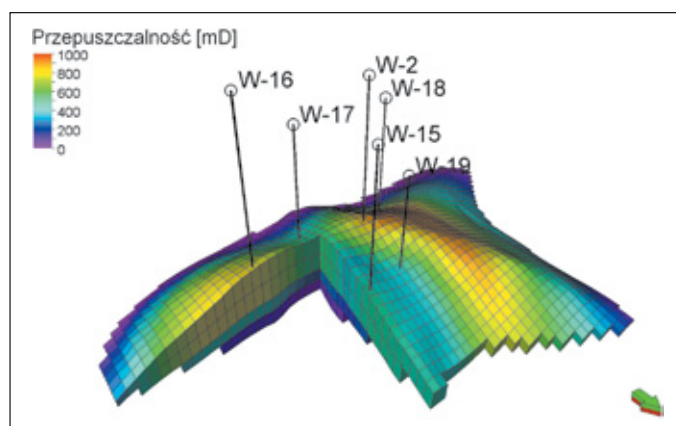
Rozkład podstawowych parametrów (porowatość, przepuszczalność, stosunek miąższości efektywnej do całkowitej – NTG) uzyskano poprzez interpolację i ekstrapolację ich wartości zmierzonych w odwiertach na obszar struktury obejmujący pierwotną czapę gazową oraz strefę wód podścielających. Rozkład porowatości i przepuszczalności w modelu przedstawiono odpowiednio na rysunkach 2 i 3.

Dla przepuszczalności pionowej zastosowano anizotropię $k_v = 0,1 \times k_h$, gdzie k_v to przepuszczalność pionowa, a k_h to przepuszczalność pozioma. Na podstawie modelu geologicznego zbudowano model dynamiczny poprzez jego uzupełnienie o typowe krzywe przepuszczalności względnych i ciśnień kapilarnych.



Rysunek 2. Rozkład porowatości w modelu

Figure 2. Porosity distribution in the model



Rysunek 3. Rozkład przepuszczalności w modelu

Figure 3. Permeability distribution in the model

W celu modelowania procesów mieszania się zatłaczanego czystego wodoru z gazem rodzimym, jak i gazem uprzednio zatłaczanym cyklicznie w ramach pracy PMG – skonstruowany model ma charakter modelu kompozycyjnego. Pozwala to uwzględnić zmienność składu gazu w złożu, a w konsekwencji – zmienne własności tego gazu wynikające z mieszania się czystego wodoru z gazem obecnym w złożu przed konwersją na PMW.

W tym celu zbudowano model płynu złożowego opisany za pomocą równania stanu (EOS) Soave’a–Redlicha–Kwonga. Dla sześciu wyróżnionych składników tego płynu (H_2 , N_2 , CO_2 , C_1 , C_2 , C_{3+} , o koncentracjach podanych w tabeli 2) parametry EOS podano w tabelach 3 i 4. W tabeli 5 przedstawiono współczynniki użytego do modelowania złożowego modelu lepkości Lorentza–Braya–Clarka.

Tabela 2. Zawartość molowa składników w złożowym płynie pierwotnym

Table 2. Molar compositions of the primary reservoir fluid

Składnik	Zawartość molowa
N_2	0,00001
CO_2	0,00001
H_2S	0,00001
C_1	0,99047
C_2	0,00600
C_{3+}	0,00350

Kalibracja modelu

Zasoby złoża były eksploatowane od roku 1970, a w latach 1979–2020 prowadzono cykliczne sezonowe zatłaczanie gazu w okresie letnim oraz jego odbiór w okresie zimowym (rysunek 4). Liczba odwiertów eksploatacyjnych była sukcesywnie zwiększana do 6.

Tabela 3. Parametry równania stanu Penga–Robinsona dla płynu o zmiennym składzie**Table 3.** Parameters of the Peng–Robinson equation of state for a fluid with variable composition

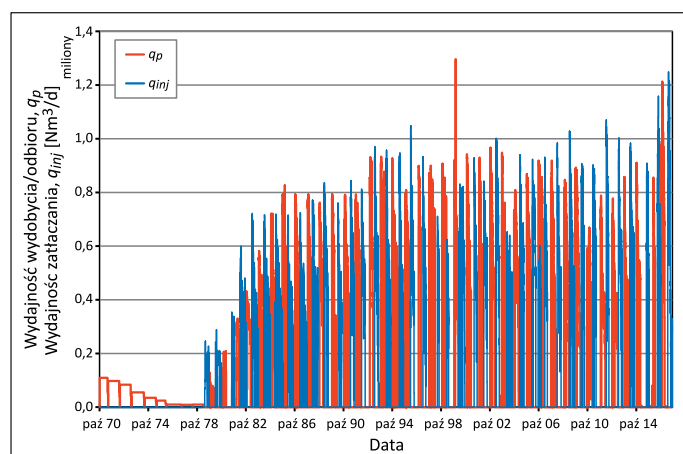
Składnik	Ciężar cząsteczkowy	Temperatura krytyczna, T_{crit}	Ciśnienie krytyczne, P_{crit}	Objętość krytyczna, V_{crit}	Krytyczny współczynnik ściśliwości, Z_{crit}	Parametr korekty objętości, V_{shift}	Współczynnik acentryczności	Parachora	Parametr Omega A	Parametr Omega B
[t]	[kmol]	[K]	[bar]	[m ³ /kmol]	[-]	[-]	[-]	[dyna/cm]	[-]	[-]
N ₂	28 014	126,2	33,9439	0,090	0,29049	0	0,040	41,0	0,42748	0,08664
CO ₂	44 010	304,2	73,7646	0,094	0,27414	0	0,225	78,0	0,42748	0,08664
H ₂ S	2 016	33,2	12,9696	0,065	0,30539	0	-0,220	0,0	0,42748	0,08664
C ₁	16 043	190,6	46,0015	0,099	0,28737	0	0,008	77,3	0,42748	0,08664
C ₂	30 070	305,4	48,8387	0,148	0,28465	0	0,098	108,9	0,42748	0,08664
C ₃₊	44 097	369,8	42,4552	0,203	0,28029	0	0,152	151,9	0,42748	0,08664

Tabela 4. Parametry równania stanu Penga–Robinsona dla płynu o zmiennym składzie – współczynniki binarne**Table 4.** Parameters of the Peng–Robinson equation of state for a fluid with variable composition – binary coefficients

Składnik	N ₂	CO ₂	H ₂ S	C ₁	C ₂	C ₃₊
N ₂						
CO ₂	0,0069					
H ₂ S	-0,0315	-0,0315				
C ₁	-0,0220	0,0278	0,1200			
C ₂	-0,1667	0,0407	0,1200	0,0000		
C ₃₊	-0,2359	0,0763	0,1200	0,0000	0,0000	

Tabela 5. Współczynniki dla modelu lepkości Lorentza–Braya–Clarka**Table 5.** Coefficients for the Lorentz–Bray–Clark viscosity model

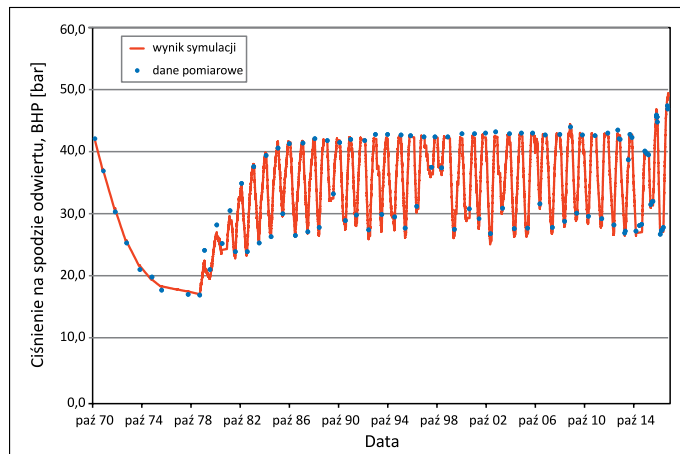
a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
0,10230	0,02336	0,05853	-0,04076	0,00933

**Rysunek 4.** Wydajność wydobycia/odbioru, q_p , oraz wydajność zatłaczania, q_{inj} **Figure 4.** Production/withdrawal rate, q_p and injection rate, q_{inj}

Model symulacyjny opisanej struktury został skalibrowany na podstawie statycznych ciśnień dennych zmierzonych w odwiertach. W wyniku kalibracji uzyskano bardzo dobre dopasowanie wyników modelu do pomiarów, o średnim odchyleniu standardowym wynoszącym 0,81 bara. Kalibracja modelu wymagała wprowadzenia modyfikacji następujących jego parametrów: nieznacznego (o 4,1%) zwiększenia objętości porowej złoża, globalnego zwiększenia (około 2-krotnego) bezwzględnej przepuszczalności złoża, dopasowania aktywności akifera podścielającego strefę gazonośną. Wyniki procesu kalibracji ciśnień dennych dla przykładowego odwiertu W-2 przedstawiono na rysunku 5.

Ze względu na niski poziom wykładników wodnych przypisany tzw. wodzie kondensacyjnej (≤ 10 g wody/m³ gazu) wielkości te nie były wykorzystane w procesie kalibracji.

Pierwotne zasoby geologiczne gazu ziemnego wyznaczone ze skalibrowanego modelu wyniosły 207,5 mln Nm³.



Rysunek 5. Ciśnienie na spodzie odwiertu, BHP. Odwiert W-2
Figure 5. Pressure at the bottom of W-2 well

Dyspersja

Zjawisko dyspersji

Występująca w strukturach węglowodorowych dyspersja fizyczna (Bijeljic i Blunt, 2006) to proces rozmycia profilu koncentracji płynu wypierającego/wypieranego wywołany niejednorodnością pola prędkości konwekcyjnej, powstałą na skutek złożonego przepływu przez ośrodek porowaty. Zdecydowana większość komercyjnych symulatorów złożowych nie umożliwia modelowania procesów dyspersji fizycznej. Jednocześnie symulatory te są obciążone niedokładnością obliczeń wynikającą z występowania efektów tzw. dyspersji numerycznej. Jej podobieństwo do dyspersji fizycznej pozwala na efektywną symulację dyspersji fizycznej w warunkach możliwej kontroli jej efektów.

Jednowymiarowy model migracji wodoru

W celu znalezienia ilościowych charakterystyk procesów wypierania mieszających się płynów z udziałem zjawiska dyspersji numerycznej przeprowadzono wielokrotne symulacje powyższych procesów na modelu jednowymiarowym (rysunek 6) o parametrach geologicznych typowych dla warunków złożowych (porowatość, przepuszczalność, NTG) oraz porównywalnych prędkościach migracji.

Wyniki symulacji porównano z analityczną krzywą będącą rozwiązaniem równania konwekcji-dyspersji używanym powszechnie w pracach dotyczących tego zjawiska (np. Szott i Gołąbek, 2014). Rozwiązanie to dla koncentracji $u(x, t)$ w jednym wymiarze przybiera postać:

$$u(x, t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - vt}{2\sqrt{Dt}} \right) + \frac{1}{2} \exp \left(\frac{vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + vt}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

dla następujących warunków początkowych i brzegowych:

$$u(x, t = 0) = 0 \text{ dla } x > 0$$

$$u(x = 0, t) = 1, u(x = \infty, t) = 0 \text{ dla } t > 0$$

gdzie:

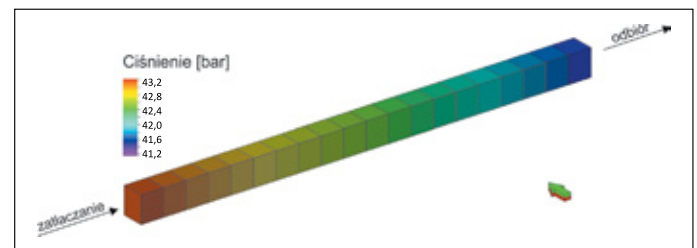
erfc – tzw. komplementarna funkcja błędu,

v – prędkość konwekcji,

D – stała dyspersji,

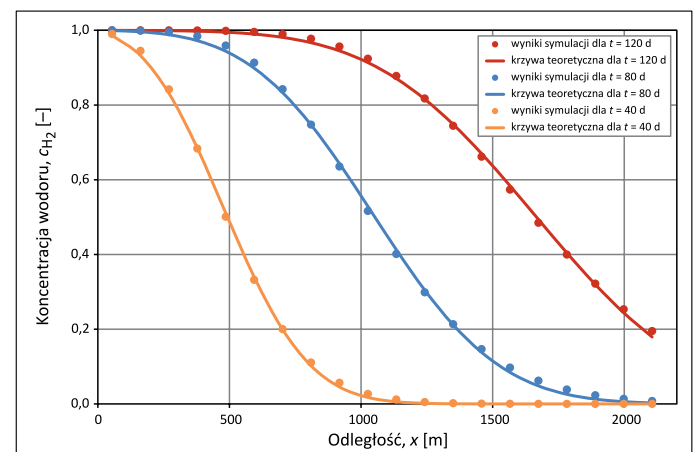
x – odległość od punktu zatłaczania,

t – czas zatłaczania.



Rysunek 6. Jednowymiarowy model migracji wodoru w poziomie
Figure 6. 1D model of hydrogen horizontal migration

Rysunek 7 przedstawia przykład dopasowania powyższej krzywej do wyników symulacji dla koncentracji wodoru, c_{H_2} , w funkcji położenia, x , dla wybranych kroków czasowych, $t = 40, 80, 120$ dni.



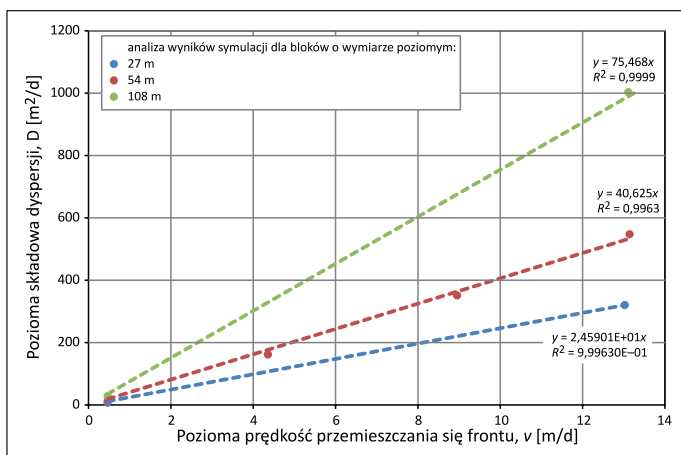
Rysunek 7. Model 1D. Rozkład koncentracji wodoru wzdłuż modelu dla $t = 40, 80, 120$ dni od rozpoczęcia zatłaczania

Figure 7. 1D model. Hydrogen concentration in the model for $t = 40, 80, 120$ days from the beginning of injection

Analogiczne badania przeprowadzono dla mieszania się w ośrodku porowatym zaazotanowanego gazu rodzimego z wysokometanowym gazem zatłaczanym, uzyskując również bardzo dobrą jakość dopasowania krzywych teoretycznych do wyników symulacji (Szott i Gołąbek, 2014). Szczegółowa analiza tych badań wykazała m.in. typową dla dyspersji fizycznej liniową zależność stałej dyspersji od prędkości migracji zatłaczanego

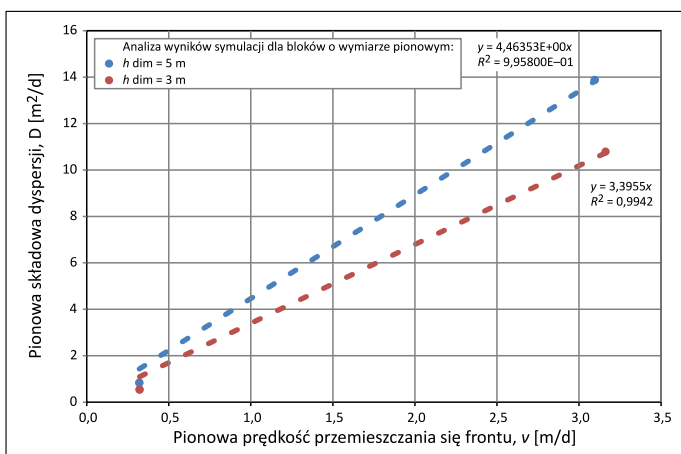
gazu: $D = \alpha v$, gdzie współczynnik proporcjonalności α to tzw. dyspersyjność. Zależność tę potwierdzono w opisywanych badaniach, co pokazuje rysunek 8 dla wariantu o ustalonych rozmiarach bloków (54 m). Na rysunku tym przedstawiono również wielkości dyspersyjności dla innych rozmiarów bloków jako współczynniki liniowych trendów stałej dyspersji, D , w funkcji prędkości, v .

Powyższe wielkości odnoszą się do dyspersji poziomej. Analogiczne zależności dla dyspersji pionowej zaprezentowano na rysunku 9.



Rysunek 8. Model 1D. Pozioma składowa dyspersji, D , w zależności od prędkości konwekcji, v , dla różnych poziomych rozmiarów bloków, L

Figure 8. 1D model. Horizontal dispersion component, D , vs convection speed, v , for different horizontal sizes, L , of simulation blocks

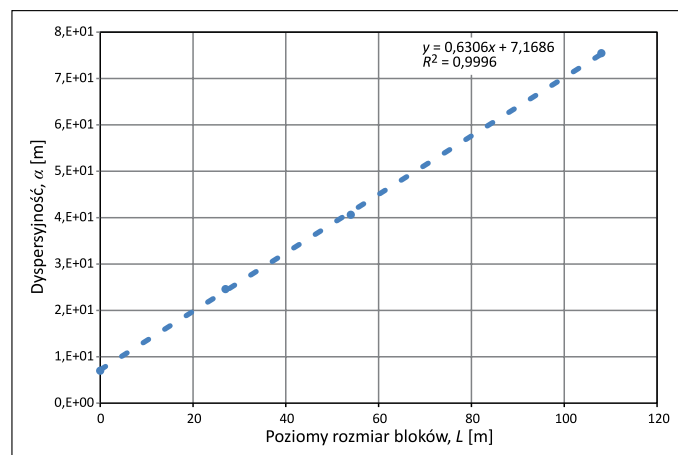


Rysunek 9. Model 1D. Pionowa składowa dyspersji, D , w zależności od prędkości konwekcji, v , dla różnych pionowych rozmiarów bloków, h

Figure 9. 1D model. Vertical dispersion component, D , vs convection speed, v , for different vertical sizes, h of simulation blocks

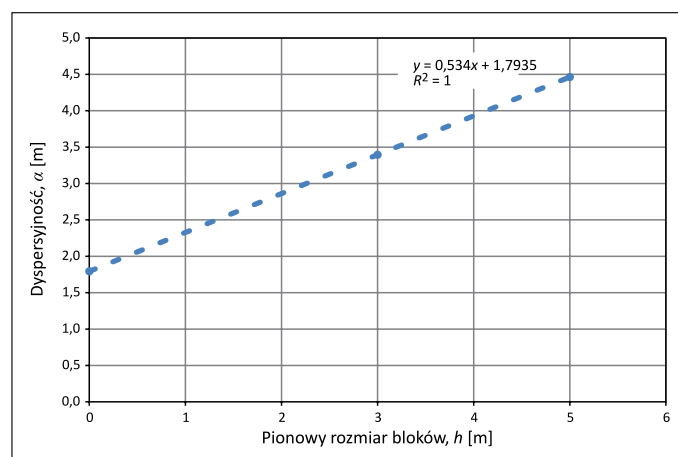
Powyższe zależności znaleziono dla różnych wariantów modelu opisanych zmiennymi rozmiarami bloków, a uzyskane wyniki przedstawiono na rysunkach 10 i 11 odpowiednio dla

migracji w kierunku poziomym i pionowym. Stwierdzono liniową zależność dyspersyjności α od rozmiarów bloków, co pozwoliło kontrolować efekt dyspersji poprzez zmianę rozmiarów bloków modelu oraz wyznaczać jej wielkość.



Rysunek 10. Model 1D. Dyspersyjność, α , dla przepływu poziomego w funkcji poziomych rozmiarów bloków, L

Figure 10. 1D model. Dispersionity, α , for horizontal flow as a function of horizontal sizes, L , of simulation blocks



Rysunek 11. Model 1D. Dyspersyjność, α , dla przepływu pionowego w funkcji pionowych rozmiarów bloków, h

Figure 11. 1D model. Dispersionity, α , for vertical flow as a function of vertical sizes, h , of simulation blocks

Powyższe analizy oparte zostały na porównaniu wyników symulacji z krzywymi teoretycznymi odnoszącymi się do dyspersji jednowymiarowej. W ogólności stała dyspersji jest wielkością tensorową, która sprowadza się do trzech wartości w układzie współrzędnych wyznaczonych przez kierunki główne tensora dyspersji.

Analizowana struktura ma właściwości anizotropowe w kierunku pionowym względem kierunku poziomego oraz izotropowe w kierunkach poziomych. Dlatego do pełnego opisu dyspersji w omawianym przypadku wystarczą dwie składowe analizowane powyżej.

Prognozy pracy magazynu

Założenia pracy magazynu

Przyjęto następujące założenia dla prognoz funkcjonowania PMW od 1.05.2021 r. do 31.12.2050 r. obejmujących konwersję PMG do PMW oraz dalszą regularną pracę magazynu:

- skład zatłaczanego gazu, $c_{H_2} = 100\%$;
- 6 odwiertów biorących udział w zatłaczaniu i odbiorze: W-2, W-15, W-16, W-17, W-18, W-19;
- nominalny czas zatłaczania, $t_{inj} = 153$ dni – od 1.05 do 30.09;
- nominalny czas odbioru, $t_{prod} = 120$ dni – od 1.11 do 28.02;
- maksymalna ilość wodoru zatłoczonego w regularnym cyklu pracy magazynu, $G_{inj,c,max} = 100$ mln Nm^3 ;
- maksymalna ilość gazu odbieranego w regularnym cyklu pracy magazynu, $G_{prod,c,max} = G_{inj,c}$;
- nominalna wydajność zatłaczania wodoru w regularnym cyklu, wynikająca z $G_{inj,c,max}$ oraz t_{inj} : $q_{inj,c} = 653\ 600$ Nm^3/d ;
- nominalna wydajność odbioru w regularnym cyklu, wynikająca z podwojonej ilości zatłoczonego wodoru, $2 \times G_{inj,c,max}$ oraz t_{prod} : $q_{prod,c,max} = 1\ 666\ 700$ Nm^3/d ;
- udziały poszczególnych odwiertów w zatłaczaniu oraz początkowe ich udziały w odbiorze wynikające z dotychczasowej pracy PMG;
- maksymalne ciśnienie denne w fazie tłoczenia, $P_{bhp,inj,max} = 60$ bar;
- minimalne ciśnienie denne w fazie odbioru gazu, $P_{bhp,prod,min} = 26$ bar;
- minimalna wydajność odbioru przez pojedynczy odwiert, $q_{prod,min} = 1$ Nm^3/min ;
- maksymalna ilość zatłoczonego wodoru w pierwszym cyklu (c1) $G_{inj,c1,max} = 150$ mln Nm^3 ;

Dodatkowo w fazie konwersji magazynu z PMG na PMW dopuszczono objętość zatłaczanego wodoru zwiększoną do $G_{inj,c1,max} = 150$ mln Nm^3 , a wydajność zatłaczania do $q_{inj1} = 980\ 400$ Nm^3/d .

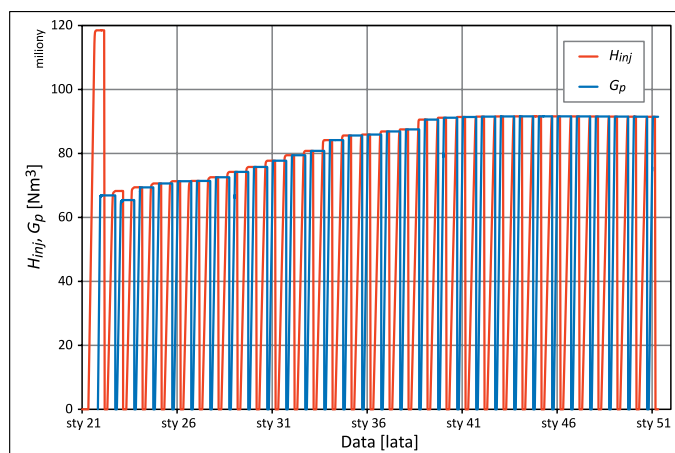
Wyniki symulacyjnych prognoz pracy magazynu w zależności od maksymalnego dopuszczalnego zanieczyszczenia odbieranego wodoru

W wariantach 1, 2, 3 założono ustaloną dyspersję skały złożowej (odpowiadającą dyspersyjności $\alpha = 40,63$ m), warunki konwersji odpowiadające początkowemu ciśnieniu złożowemu $P_{ini} = 27,09$ bar oraz zmienne dopuszczalne zanieczyszczenia odbieranego wodoru o wartościach odpowiednio: $c_{cont} = 5\%$, 10% , 20% .

Otrzymane ilościowe charakterystyki pracy magazynu, obejmujące m.in. ilość zatłoczonego wodoru, H_{inj} , i odebranego gazu, G_p , w kolejnych cyklach pracy magazynu, przedstawiono na rysunku 12, natomiast sumaryczną ilość zatłoczonego wodoru, tH_{inj} , sumaryczną ilość odebranego wodoru, tH_p , oraz

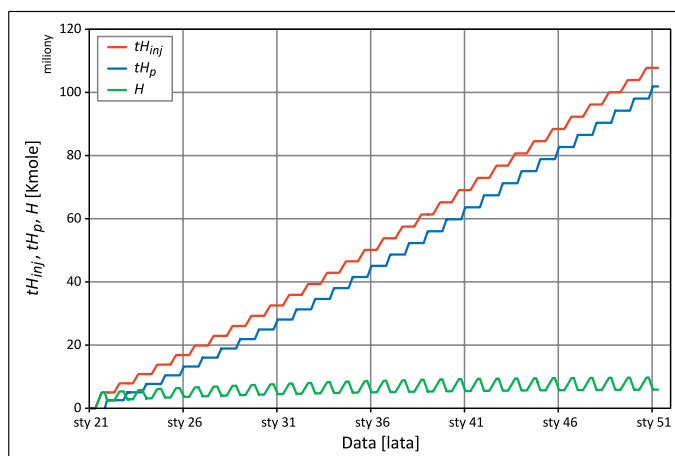
ilość wodoru obecną w złożu, H , w całym okresie pracy magazynu pokazano na rysunku 13 dla przykładowego wariantu 1.

Wyniki te pozwalają określić czas osiągnięcia, t_{ini} , i początkową wartość pojemności czynnej magazynu, $V_{s,ini}$ (np. z rysunku 12, dla wariantu 1, $t_{ini} = 3$. cykl, $V_{s,ini} = 69,40$ Nm^3), a także objętość buforu, $V_{b,ini}$ (np. z rysunku 13, dla wariantu 1, $V_{b,ini} = 53,86$ Nm^3). Szczegółowy przebieg zatłaczania i odbioru czystego wodoru dla wariantu 1 ($c_{cont} = 20\%$) przedstawiono na rysunku 14, wskazującym na stabilny bilans magazynowanego wodoru ($H_p \approx H_{inj}$) począwszy od 20. cyklu pracy. Natomiast w przypadku wariantu 3 ($c_{cont} = 5\%$) w praktyce nie osiągnięto stabilizacji magazynowania wodoru do końca analizowanego okresu (rysunek 15).



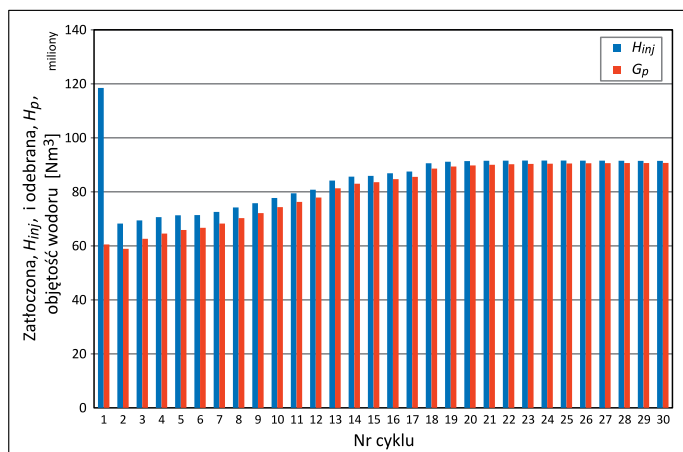
Rysunek 12. Wariant 1 ($\alpha = 40,63$ m, $p_{ini} = 27,09$ bar, $c_{cont} = 20\%$) Sumaryczne zatłaczanie, H_{inj} , i odbiór gazu, G_p , w kolejnych cyklach pracy magazynu

Figure 12. Scenario no. 1 ($\alpha = 40.63$ m, $p_{ini} = 27.09$ bar, $c_{cont} = 20\%$). Total injection, H_{inj} , and withdrawal of gas, G_p , in consecutive storage cycles



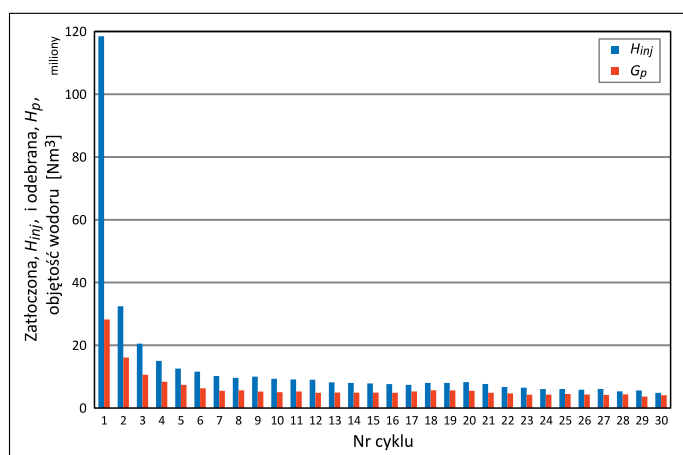
Rysunek 13. Wariant 1 ($\alpha = 40,63$ m, $p_{ini} = 27,09$ bar, $c_{cont} = 20\%$). Sumaryczna ilość wodoru: zatłoczonego, tH_{inj} , odebranego, tH_p , oraz pozostałego w złożu, H

Figure 13. Scenario no. 1 ($\alpha = 40.63$ m, $p_{ini} = 27.09$ bar, $c_{cont} = 20\%$). The total amount of hydrogen: injected, tH_{inj} , withdrawal, tH_p , and remaining in the reservoir, H



Rysunek 14. Wariant 1 ($\alpha = 40,63$ m, $p_{ini} = 27,09$ bar, $c_{cont} = 20\%$). Sumaryczne zatłaczanie i wydobywanie wodoru w kolejnych cyklach pracy magazynu

Figure 14. Scenario no. 1 ($\alpha = 40.63$ m, $p_{ini} = 27.09$ bar, $c_{cont} = 20\%$). Total injection and withdrawal of hydrogen in the consecutive storage cycles of the UHS



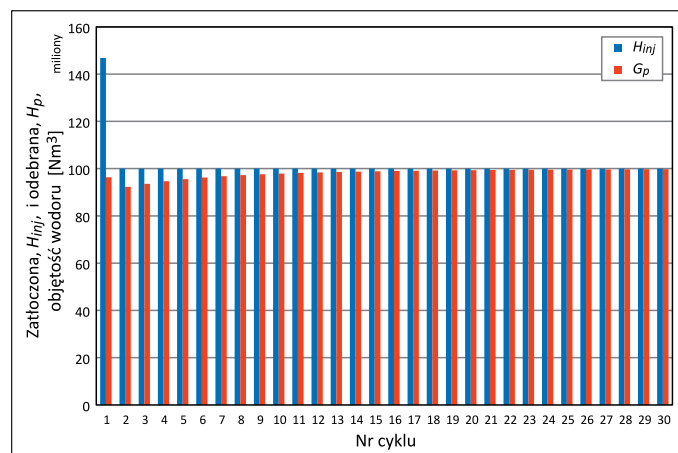
Rysunek 15. Wariant 3 ($\alpha = 40,63$ m, $p_{ini} = 27,09$ bar, $c_{cont} = 5\%$). Sumaryczne zatłaczanie i wydobywanie wodoru w kolejnych cyklach pracy magazynu

Figure 15. Variant 3 ($\alpha = 40.63$ m, $p_{ini} = 27.09$ bar, $c_{cont} = 5\%$). Total injection and withdrawal of hydrogen in the consecutive storage cycles of the UHS

Wyniki symulacyjnych prognoz pracy magazynu dla zmiennego początkowego stanu magazynu

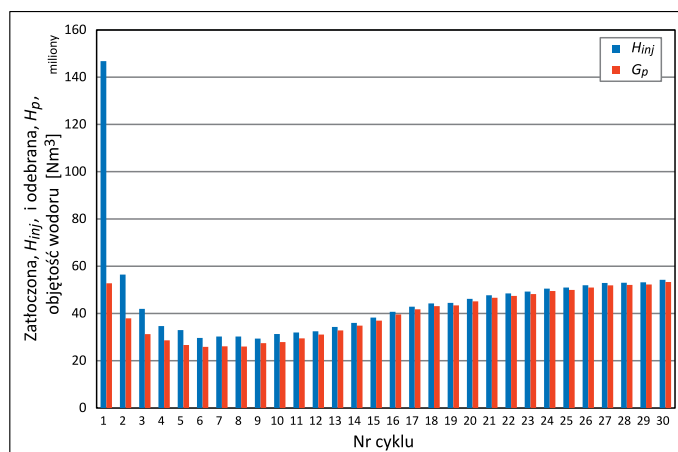
W wariantach 4, 5, 6 przeprowadzono prognozy pracy magazynu dla zwiększonej pojemności porów dostępnych do magazynowania wodoru – niższych początkowych ciśnień złożowych ($P_{ini} = 18,33$ bar) wynikających z procesu konwersji PMG na PMW (zredukowanej ilości gazu rodzimego pozostawionego w złożu). Dodatkowo w wariantach tych założono dyspersyjność skał złożowych wynoszącą $\alpha = 40,63$ m. Szczegółowe wyniki prognoz dla tych wariantów, różniących się dopuszczalnym zanieczyszczeniem odbieranego wodoru ($c_{cont} = 5\%$, 10% , 20%), przedstawiono w tabeli 6. Zmniejszona

ilość gazu rodzimego pozostawionego w złożu oraz zwiększona objętość wodoru zatłoczonego w fazie konwersji PMG na PMW (119–148 mln Nm³) powodują szybsze osiągnięcie stabilnego wodorowego bilansu pracy magazynu oraz jego większą pojemność czynną, wynoszącą 100 mln Nm³ dla wariantu 4 (rysunek 16) oraz 55 mln Nm³ z tendencją wzrostową dla wariantu 6 (rysunek 17).



Rysunek 16. Wariant 4 ($\alpha = 40,63$ m, $p_{ini} = 18,33$ bar, $c_{cont} = 20\%$). Sumaryczne zatłaczanie i wydobywanie wodoru w kolejnych cyklach pracy magazynu

Figure 16. Scenario no. 4 ($\alpha = 40.63$ m, $p_{ini} = 18.33$ bar, $c_{cont} = 20\%$). Total injection and withdrawal of hydrogen in the consecutive storage cycles of the UHS



Rysunek 17. Wariant 6 ($\alpha = 40,63$ m, $p_{ini} = 18,33$ bar, $c_{cont} = 5\%$). Sumaryczne zatłaczanie i wydobywanie wodoru w kolejnych cyklach pracy magazynu

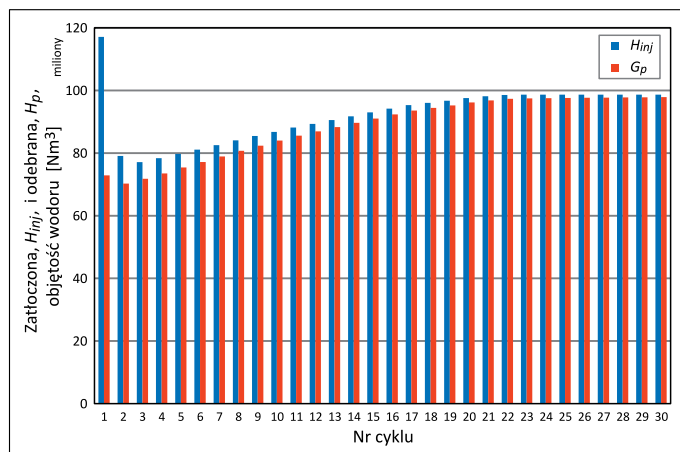
Figure 17. Scenario no. 6 ($\alpha = 40.63$ m, $p_{ini} = 18.33$ bar, $c_{cont} = 5\%$). Total injection and withdrawal of hydrogen in the consecutive storage cycles of the UHS

Wyniki symulacyjnych prognoz pracy magazynu dla zmiennych efektów mieszania się wodoru z gazem rodzimym

W wariantach 7–18 zmieniano parametry odpowiedzialne za efektywność mieszania się wodoru z gazem rodzimym (wyrażone

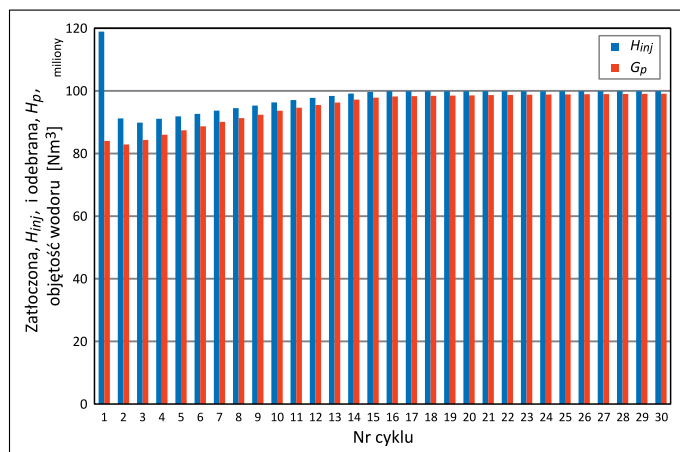
zmienną dyspersyjnością, α), a pozostałe parametry pracy magazynu przyjęto analogicznie do wariantów 1–6. W szczególności warianty 7–12 zakładają dyspersyjność zmniejszoną z $\alpha = 40,63$ m do $\alpha = 24,59$ m, a warianty 13–18 – dyspersyjność zredukowaną w większym stopniu, do $\alpha = 18,52$ m.

Warianty 7 i 13 (rysunki 18 i 19) odpowiadają założeniom wariantu 1 ($c_{cont} = 20\%$, $P_{ini} = 27,09$ bar), a ich wyniki wskazują na systematyczny wzrost pojemności czynnej (69,40 mln Nm³, 78,18 mln Nm³ i 90,24 mln Nm³ odpowiednio dla wariantów 1, 7 i 13) wraz ze zmniejszaniem się dyspersyjności skały złożowej.



Rysunek 18. Wariant 7 ($\alpha = 24,59$ m, $p_{ini} = 27,09$ bar, $c_{cont} = 20\%$). Sumaryczne zatłaczanie i wydobycie wodoru w kolejnych cyklach pracy magazynu

Figure 18. Scenario no. 7 ($\alpha = 24.59$ m, $p_{ini} = 27.09$ bar, $c_{cont} = 20\%$). Total injection and withdrawal of hydrogen in the consecutive storage cycles of the UHS

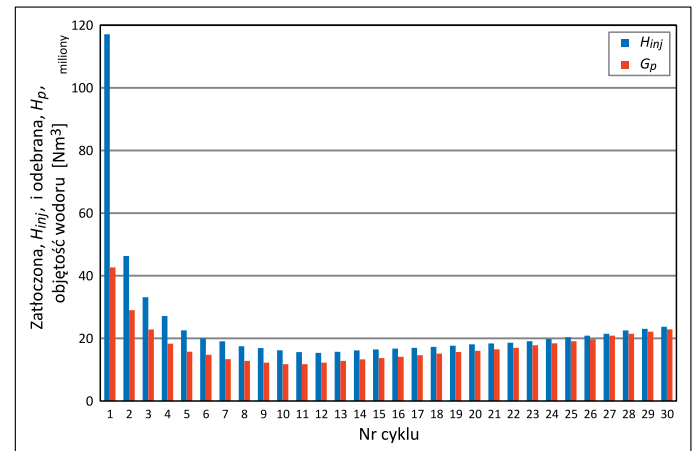


Rysunek 19. Wariant 13 ($\alpha = 18,52$ m, $p_{ini} = 27,09$ bar, $c_{cont} = 20\%$). Sumaryczne zatłaczanie i wydobycie wodoru w kolejnych cyklach pracy magazynu

Figure 19. Scenario no. 13 ($\alpha = 18.52$ m, $p_{ini} = 27.09$ bar, $c_{cont} = 20\%$). Total injection and withdrawal of hydrogen in the consecutive storage cycles of the UHS

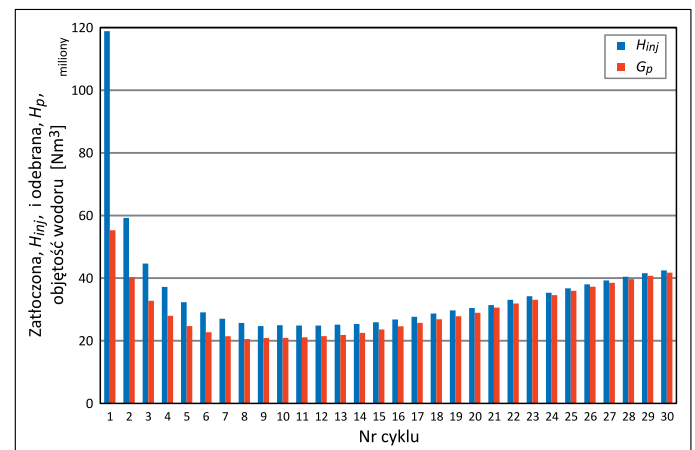
Warianty 9 i 15 (rysunki 20 i 21) odpowiadają założeniom wariantu 3 ($c_{cont} = 5\%$, $P_{ini} = 27,09$ bar), a ich wyniki oznaczają,

w odróżnieniu od wariantu 3, osiągnięcie stanu zbilansowanej pracy magazynu ($H_p \approx H_{inj} \approx V_s$) i stopniowy wzrost jego pojemności czynnej.



Rysunek 20. Wariant 9 ($\alpha = 24,59$ m, $p_{ini} = 27,09$ bar, $c_{cont} = 5\%$). Sumaryczne zatłaczanie i wydobycie wodoru w kolejnych cyklach pracy magazynu

Figure 20. Scenario no. 9 ($\alpha = 24.59$ m, $p_{ini} = 27.09$ bar, $c_{cont} = 5\%$). Total injection and withdrawal of hydrogen in the consecutive storage cycles of the UHS



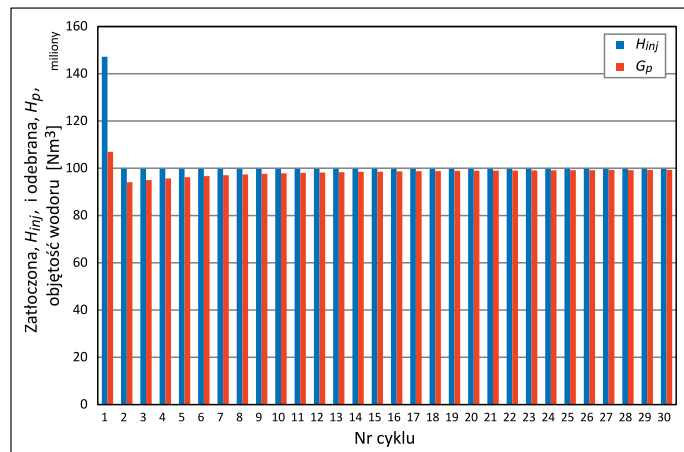
Rysunek 21. Wariant 15 ($\alpha = 18,52$ m, $p_{ini} = 27,09$ bar, $c_{cont} = 5\%$). Sumaryczne zatłaczanie i wydobycie wodoru w kolejnych cyklach pracy magazynu

Figure 21. Scenario no. 15 ($\alpha = 18.52$ m, $p_{ini} = 27.09$ bar, $c_{cont} = 5\%$). Total injection and withdrawal of hydrogen in the consecutive storage cycles of the UHS

Warianty 10 i 16 (rysunki 22 i 23) odpowiadają założeniom wariantu 4 ($c_{cont} = 20\%$, $P_{ini} = 18,33$ bar) oraz zmiennym wartościami parametru dyspersyjności, α . Warianty te zasadniczo nie różnią się podstawowymi wynikami prognoz, co oznacza możliwość realizacji przyjętych założeń niezależnie od intensywności procesu mieszania się wodoru z gazem rodzimym.

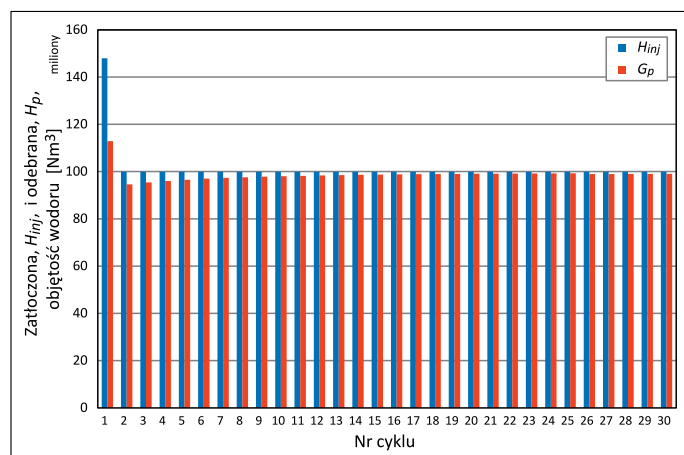
Warianty 12 i 18 (rysunki 24 i 25) odpowiadają założeniom wariantu 6 ($c_{cont} = 5\%$, $P_{ini} = 18,33$ bar) oraz zmiennym wartościami parametru dyspersyjności, α . Warianty te wykazują

podobny czasowy profil zmienności zatłaczanego i odbieranego wodoru w poszczególnych cyklach, a różnica pomiędzy nimi polega na różnych wartościach $H_p \approx H_{inj}$ w analogicznych cyklach. Wartości te zmieniają się w przybliżonych granicach: 30–50 mln Nm³, 50–80 mln Nm³, 60–90 mln Nm³.



Rysunek 22. Wariant 10 ($\alpha = 24,59$ m, $p_{ini} = 18,33$ bar, $c_{cont} = 20\%$). Sumaryczne zatłaczanie i wydobywanie wodoru w kolejnych cyklach pracy magazynu

Figure 22. Scenario no. 10 ($\alpha = 24.59$ m, $p_{ini} = 18.33$ bar, $c_{cont} = 20\%$). Total injection and withdrawal of hydrogen in the consecutive storage cycles of the UHS

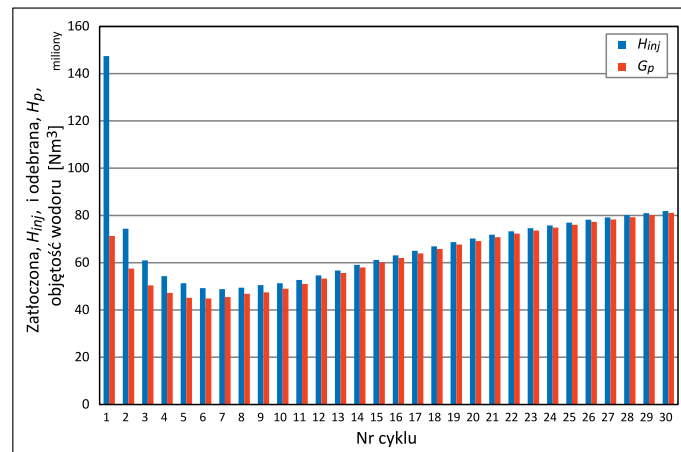


Rysunek 23. Wariant 16 ($\alpha = 18,52$ m, $p_{ini} = 18,33$ bar, $c_{cont} = 20\%$). Sumaryczne zatłaczanie i wydobywanie wodoru w kolejnych cyklach pracy magazynu

Figure 23. Scenario no. 16 ($\alpha = 18.52$ m, $p_{ini} = 18.33$ bar, $c_{cont} = 20\%$). Total injection and withdrawal of hydrogen in the consecutive storage cycles of the UHS

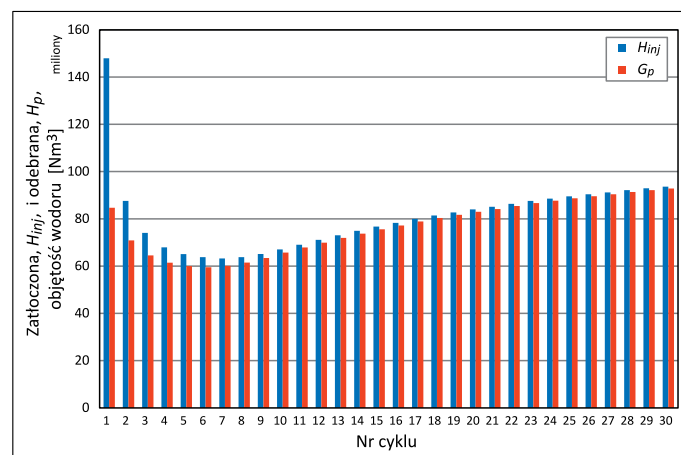
Szczegółowe założenia poszczególnych wariantów oraz wyniki symulacji prognoz przedstawiono w tabeli 6, gdzie oprócz pojemności czynnej, $V_{s,ini}$, zamieszczono: numer początkowego cyklu, n_{ini} , odpowiadającego zbilansowanej pracy magazynu ($H_p \approx H_{inj} = V_{s,ini}$), objętość buforu, $V_{b,ini}$, oraz wielkości opisujące zmienność zbilansowanej pracy magazynu (pojemność czynna po 5 cyklach od uzyskania równowagi oraz po 10 cyklach

od uzyskania równowagi), wielkości opisujące bilans wodoru (sumaryczna objętość wodoru zatłaczanego w analizowanym okresie 30 cykli, sumaryczna objętość odebranego wodoru w tym czasie, objętość wodoru w złożu na koniec każdego cyklu), średnią koncentrację wodoru w odebranym gazie.



Rysunek 24. Wariant 12 ($\alpha = 24,59$ m, $p_{ini} = 18,33$ bar, $c_{cont} = 5\%$). Sumaryczne zatłaczanie i wydobywanie wodoru w kolejnych cyklach pracy magazynu

Figure 24. Scenario no. 12 ($\alpha = 24.59$ m, $p_{ini} = 18.33$ bar, $c_{cont} = 5\%$). Total injection and withdrawal of hydrogen in the consecutive storage cycles of the UHS



Rysunek 25. Wariant 18 ($\alpha = 18,52$ m, $p_{ini} = 18,33$ bar, $c_{cont} = 5\%$). Sumaryczne zatłaczanie i wydobywanie wodoru w kolejnych cyklach pracy magazynu

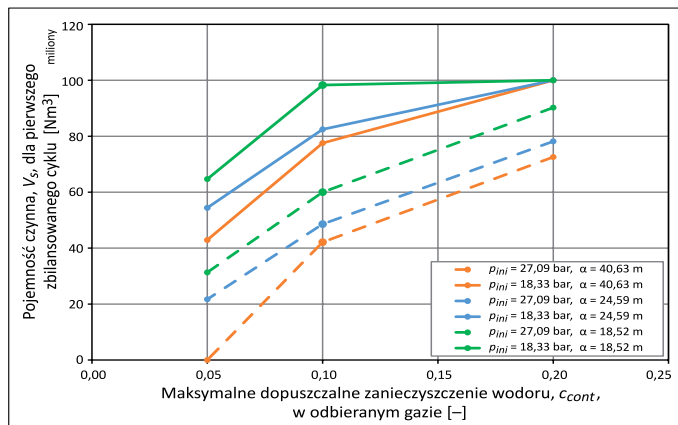
Figure 25. Scenario no. 18 ($\alpha = 18.52$ m, $p_{ini} = 18.33$ bar, $c_{cont} = 5\%$). Total injection and withdrawal of hydrogen in the consecutive storage cycles of the UHS

Zależność pojemności czynnej, V_s , magazynu i wielkości buforu, V_b , od podstawowego założenia pracy magazynu, jakim jest maksymalne dopuszczalne zanieczyszczenie, c_{cont} , odbieranego wodoru, dla wszystkich realizowanych wariantów przedstawiono na rysunkach 26 i 27. Rysunki te wykazują dodatkowo ilościową zależność pojemności czynnej oraz wielkości buforu magazynu od początkowego ciśnienia złożowego,

Tabela 6. Wyniki zbiorcze prognoz symulacyjnych pracy PMW
Table 6. Summary results of the UHS simulation forecasts

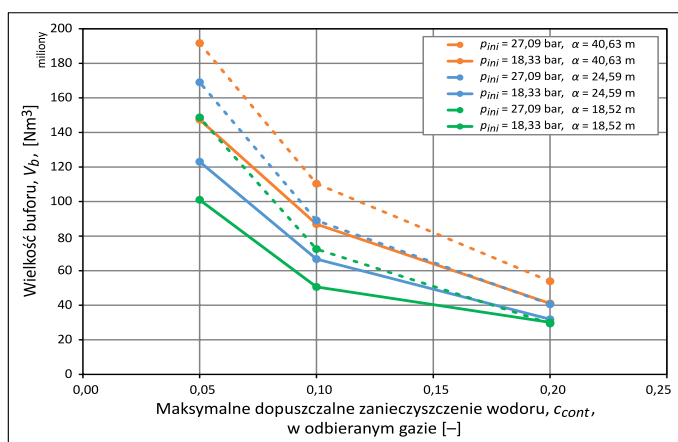
Wariant nr	Dyspersyjność, α	Ciśnienie początkowe, P_{ini}	Minimalna koncentracja H_2, C_{H_2}, \min	Początkowy cykl zbilansowanego odbioru, n_{ini}	Pojemność czynna w cyklu n_{ini} , $V_{s,ini}$	Objętość buforu w cyklu n_{ini} , $V_{b,ini}$	Pojemność czynna w cyklu n_{ini+5} , $V_{s,ini+5}$	Pojemność czynna w cyklu n_{ini+10} , $V_{s,ini+10}$	Sumaryczna objętość wodoru zatlazzonego w 30 cyklach, $H_{inf}(30)$	Sumaryczna objętość wodoru odebranego w 30 cyklach, $H_p(30)$	Objętość wodoru w złożu po 30 cyklach, $H(30)$	Średnia koncentracja wodoru dla sumarycznego odbioru, $C_{H_2,ave}$
	[m]											
1	40,63	27,09	80,0	3	69,40	53,86	72,57	80,82	2 548,6	2 408,9	139,65	96,56
2	40,63	27,09	90,0	9	31,32	110,34	42,12	50,53	1 424,9	1 262,7	162,26	96,05
3	40,63	27,09	95,0	>30	-	-	-	-	391,9	193,3	198,64	96,53
4	40,63	18,33	80,0	2	100,03	41,07	100,03	100,02	3 046,8	2 942,9	103,97	97,91
5	40,63	18,33	90,0	5	67,18	86,92	77,56	82,98	2 564,7	2 423,7	141,06	97,82
6	40,63	18,33	95,0	13	33,77	147,41	42,90	48,52	1 368,0	1 191,6	176,38	97,63
7	24,59	27,09	80,0	3	78,18	40,55	83,70	90,62	2 807,5	2 691,9	115,63	97,29
8	24,59	27,09	90,0	8	48,58	89,08	58,75	68,82	2 020,8	1 878,5	142,38	97,24
9	24,59	27,09	95,0	27	21,71	169,05	23,77	23,77	719,3	535,8	183,53	97,37
10	24,59	18,33	80,0	2	100,03	31,87	100,10	100,10	3 047,6	2 959,5	88,08	98,14
11	24,59	18,33	90,0	4	82,46	66,72	88,53	94,97	2 903,1	2 788,4	114,65	98,31
12	24,59	18,33	95,0	12	54,41	123,05	63,18	71,92	2 030,8	1 877,3	153,49	98,40
13	18,52	27,09	80,0	3	90,24	29,42	93,77	97,84	2 948,8	2 845,8	102,96	97,48
14	18,52	27,09	90,0	7	60,01	72,51	69,17	78,00	2 343,0	2 215,5	127,51	97,58
15	18,52	27,09	95,0	21	31,32	148,69	36,75	42,58	1 066,2	896,4	169,81	97,70
16	18,52	18,33	80,0	2	100,01	30,07	100,09	100,00	3 048,1	2 964,1	83,94	98,22
17	18,52	18,33	90,0	4	98,30	50,59	100,00	100,00	3 043,7	2 945,6	98,09	98,41
18	18,52	18,33	95,0	9	64,69	101,01	73,18	81,48	2 436,6	2 303,0	133,57	98,61

p_{ini} , w magazynie oraz intensywności mieszania się wodoru z gazem obecnym w złożu wyrażonej parametrem dyspersyjności, α . Wspólną cechą tych zależności jest ich malejący charakter wraz ze wzrostem osiągniętej pojemności czynnej, V_s , i spadkiem objętości buforu, V_b .



Rysunek 26. Początkowa pojemność czynna, V_s , w funkcji maksymalnego dopuszczalnego zanieczyszczenia wodoru, C_{cont} w odbieranym gazie dla modeli różniących się stanem początkowym magazynu oraz dyspersyjnością

Figure 26. The initial storage capacity, V_s as a function of the maximum allowable hydrogen contamination, C_{cont} in the withdrawn gas for models differing in the initial state and dispersivity



Rysunek 27. Wielkość buforu, V_b , w funkcji maksymalnego dopuszczalnego zanieczyszczenia wodoru, C_{cont} w odbieranym gazie dla modeli różniących się stanem początkowym magazynu oraz dyspersyjnością

Figure 27. Buffer volume, V_b as a function of the maximum allowable hydrogen contamination, C_{cont} in the withdrawn gas for models differing in the initial state and dispersivity

Analiza rozkładu nasycenia wodorem w strukturze magazynu

Zatłaczany wódór wypełnia stropowe regiony struktury, co wynika:

- ze sposobu zatłaczania wodoru w systemie, gdzie odwierty udostępniają strukturę w jej stropowej części;

- z efektu segregacji grawitacyjnej w sytuacji dużej różnicy gęstości pomiędzy zatłaczanym wodorem a rodzimym gazem węglowodorowym.

Zarówno poziomy, jak i pionowy zasięg regionu nasyconego wodorem nieznacznie zwiększa się z cyklu na cykl, natomiast poziom nasyczeń wykazuje regularne oscylacje pomiędzy dopuszczalnymi stanami pełnego napełnienia i opróżnienia magazynu wynikającymi z realizacji założeń pracy PMW. Zmiany przestrzennego rozkładu wodoru w strukturze magazynowej pokazano na rysunku 28 dla stanów: przed zatłaczaniem, po zakończeniu fazy zatłaczania i po zakończeniu fazy odbioru w 1. i 10. cyklu pracy magazynu dla przykładowego wariantu 5 powyższych symulacji.

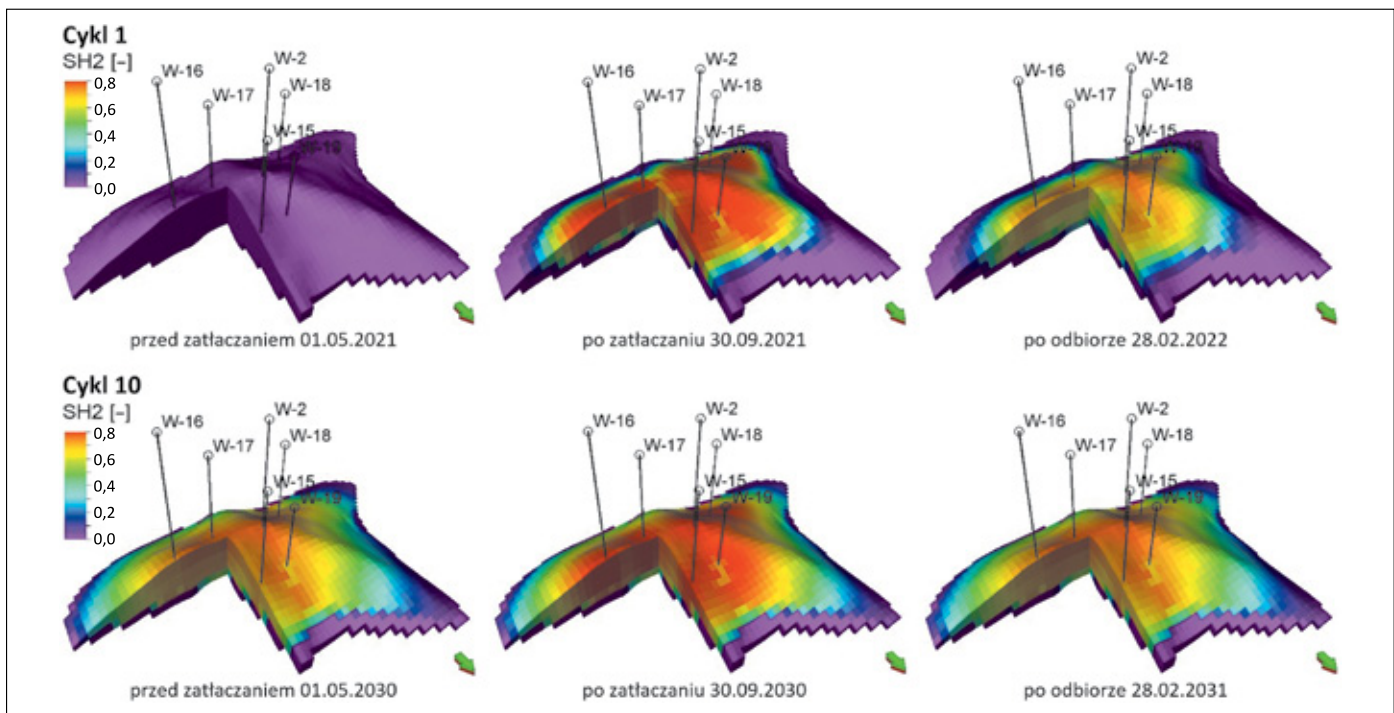
Podsumowanie i wnioski

W wyniku realizacji pracy, której celem była symulacyjna analiza magazynowania wodoru w podziemnej strukturze geologicznej, dokonano przeglądu dostępnych krajowych złóż naftowych, zidentyfikowano podstawowe kryteria struktur przeznaczonych na podziemne magazyny wodoru i zastosowano je do wyboru optymalnej spośród rozważanych struktur. Skonstruowano i skalibrowano kompozycyjny model tej struktury oraz przeprowadzono wielowariantowe symulacje procesu konwersji złoża na magazyn wodoru i regularnej jego pracy.

Uzyskane wyniki symulacji pozwoliły na wyznaczenie podstawowych charakterystyk magazynu wodoru, takich jak: pojemność czynna, wielkość buforu, ich ewolucja w kolejnych cyklach oraz wielkości bilansu wodoru i gazu rodzimego w zależności od parametrów operatorskich (maksymalne dopuszczalne zanieczyszczenie wodoru odbieranego z magazynu), od szczegółów konwersji PMG na PMW (początkowa objętość porów dostępna do magazynowania wodoru) oraz od istotnego, a jednocześnie trudno mierzalnego parametru geologicznego skały złożowej, jakim są parametry opisujące dyspersję procesu transportu gazu w złożu.

W wyniku przeprowadzonych analiz sformułowano następujące wnioski:

- wymagania dotyczące maksymalnego dopuszczalnego zanieczyszczenia, C_{cont} wodoru gazem rodzimym w istotny sposób determinują wielkość pojemności czynnej magazynu i ich spełnienie staje się niemożliwe w przypadku zbyt dużych wymagań co do czystości odbieranego wodoru ($C_{cont} \leq 5\%$);
- zwiększenie początkowej objętości buforu magazynu w istotny sposób wpływa na wielkość i szybkość osiągnięcia stabilnej pojemności czynnej magazynu;
- właściwości skały złożowej określające intensywność procesu mieszania się wodoru z gazem rodzimym (parametry



Rysunek 28. Rozkłady nasycenia wodorem dla wybranych chwil czasowych w ramach cykli nr 1 i nr 10 i wariantu 5 ($\alpha = 40,63$ m, $p_{ini} = 18,33$ bar, $c_{cont} = 10\%$)

Figure 28. Distributions of hydrogen saturation for selected time moments of cycle no. 1 and no. 10 of Scenario no. 5 ($\alpha = 40.63$ m, $p_{ini} = 18.33$ bar, $c_{cont} = 10\%$)

procesu dyspersji fizycznej) determinują charakterystyki pracy magazynu, w szczególności w przypadku ostrych wymagań co do czystości odbieranego wodoru – w konsekwencji podstawowego znaczenia nabiera znajomość tych parametrów i konieczność ich niezależnego wyznaczania w bezpośrednich pomiarach lub na podstawie oszacowań pośrednich poprzez kalibrację modeli odtwarzających wyniki odpowiednich testów.

Dodatkowo wykonane analizy potwierdzają praktyczne korzyści z zastosowania metod konstrukcji modeli złożowych oraz symulacji procesów zachodzących w ośrodkach porowatych w trakcie magazynowania wodoru w strukturach podziemnych, a równocześnie wskazują na brak alternatywnych metod pozwalających na uzyskanie wyników o porównywalnym poziomie szczegółowości.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Numeryczne symulacje procesu magazynowania wodoru w częściowo wyeksploatowanym złożu gazowym* – praca INiG – PIB na zlecenie MEiN; nr zlecenia: 0020/KZ/2021, nr archiwalny: DK-4100-0008/2021.

Literatura

Amid A., Mignard D., Wilkinson M., 2016. Seasonal storage of hydrogen in a depleted natural gas reservoir. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(12): 5549–5558. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.02.036.

Azin R., Nasiri A., Entezari A.J., Montazeri G.H., 2008. Investigation of Underground Gas Storage in a Partially Depleted Gas Reservoir. *Society of Petroleum Engineers*. DOI: 10.2118/113588-MS.

Baghooee H., Montel F., Galliero G., Yan W., Shapiro A., 2021. A new approach to thermal segregation in petroleum reservoirs: Algorithm and case studies. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 201(6): 108367. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108367.

Bijeljic B., Blunt M.J.A., 2006. Physically-Based Description of Dispersion in Porous Media. *Society of Petroleum Engineers*. DOI: 10.2118/102869-MS.

Ciechanowska M., 2020. Strategia w zakresie wodoru na rzecz Europy neutralnej dla klimatu. *Nafta-Gaz*, 76(12): 951–954. DOI: 10.18668/NG.2020.12.09 .

Gahleitner G., 2013. Hydrogen from renewable electricity: an international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications. *Int. J. Hydrogen. Energy*, 38(5): 2039–2061. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.12.010.

Gąska K., Hoszowski A., Gmiński Z., Kurek A., 2012. Monografia podziemnych magazynów gazu w Polsce. *Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Przemysłu Naftowego i Gazowniczego, Oddział Warszawa*.

Gołąbek A., Miłek K., Szott W., 2011a. Symulacyjne modelowanie procesu konwersji złoża na PMG i regularnej jego pracy, z udziałem CO₂ jako gazu buforowego. Część I – Konstrukcja i weryfikacja modelu, symulacja procesu wytwarzania buforu magazynu. *Nafta-Gaz*, 67(3): 153–162.

Gołąbek A., Miłek K., Szott W., 2011b. Symulacyjne modelowanie procesu konwersji złoża na PMG i regularnej jego pracy, z udziałem CO₂ jako gazu buforowego. Część II – Symulacyjne prognozy pracy magazynu. *Nafta-Gaz*, 67(4): 240–248.

Jaworski J., Kukulska-Zajac E., Kulaga P., 2019. Wybrane zagadnienia dotyczące wpływu dodatku wodoru do gazu ziemnego na

- elementy systemu gazowniczego. *Nafta-Gaz*, 75(10): 625–632. DOI: 10.18668/NG.2019.10.04.
- Liléo S., Berge E., Undheim O., Klinkert R., Bredesen R.E., 2013. Long-term correction of wind measurements – state-of-the-art, guidelines and future work. *Elforsk Report*, 13: 18.
- Lysy M., Fernø M., Erslund G., 2021. Seasonal hydrogen storage in a depleted oil and gas field. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(4): 25160–25174. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.05.030.
- Milek K., Szott W., Gołabek A., 2013. Symulacyjne badanie procesów wypierania metanu rozpuszczonego w wodach złożowych poprzez zatłaczanie gazów kwaśnych w ramach ich sekwestracji. *Nafta-Gaz*, 69(2): 112–122.
- Peng D.D., Fowler M., Elkamel A., Almansoori A., Walker S.B., 2016. Enabling utility-scale electrical energy storage by a power-to-gas energy hub and underground storage of hydrogen and natural gas. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 35, Part A: 1180–1199. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.09.045.
- Piskowska-Wasiak J., 2017. Doświadczenia i perspektywy procesu Power to Gas. *Nafta-Gaz*, 73(8): 597–604. DOI: 10.18668/NG.2017.08.07.
- Simpson A.P., Lutz A.E., 2007. Exergy analysis of hydrogen production via steam methane reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32: 4811–4820.
- Such P., 2020. Magazynowanie wodoru w obiektach geologicznych. *Nafta-Gaz*, 76(11): 794–798. DOI: 10.18668/NG.2020.11.04.
- Szott W., Gołabek A., 2014. Symulacyjne modelowanie procesów mieszania się gazów w warunkach złożowych. *Nafta-Gaz*, 70(3): 151–161.
- Szott W., Gołabek A., w przygotowaniu. Model dyspersji dla przepływu w ośrodku porowatym z segregacją grawitacyjną – metoda wyznaczania dyspersji poprzecznej.
- Tarkowski R., 2017. Wybrane aspekty podziemnego magazynowania wodoru. *Przegląd Geologiczny*, 65(5): 282–291.
- Taylor G.I., 1953. Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 219: 186–203. DOI: 10.1098/rspa.1953.0139.
- Zivar D., Kumar S., Foroozesh J., 2020. Underground hydrogen storage: A comprehensive review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(45): 23436–23462. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.138.



Dr Wiesław SZOTT

Adiunkt, Kierownik Zakładu Stymulacji Złóż Węglowodorów i Podziemnych Magazynów Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25A
31-503 Kraków
E-mail: wieslaw.szott@inig.pl



Mgr inż. Krzysztof MILEK

Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Symulacji Złóż Węglowodorów i Podziemnych Magazynów Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A, 31-503 Kraków
E-mail: krzysztof.milek@inig.pl

OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU SYMULACJI ZŁÓŻ WĘGLOWODORÓW I PMG

- sporządzanie ilościowych charakterystyk złóż naftowych (konstruowanie statycznych modeli złożowych);
- analizy geostatystyczne dla potrzeb projektowania modeli złóż naftowych, w tym PMG i wielofazowych obliczeń wolumetrycznych;
- konstruowanie dynamicznych symulacyjnych modeli złóż i ich kalibracja;
- wszechstronne badania symulacyjne dla potrzeb:
 - » weryfikacji zasobów płynów złożowych,
 - » metod wspomaganie wydobywania (zatłaczanie gazu lub wody, procesy WAG, procesy wypierania mieszającego, oddziaływanie chemiczne),
 - » optymalizacji rozwiercania i udostępniania złóż,
 - » prognozowania złożowych i hydraulicznych (w tym termalnych) charakterystyk odwiertów (w szczególności poziomych) dla celów optymalnego ich projektowania,
 - » sekwestracji CO₂;
- projektowanie, realizacja i wdrażanie systemów baz danych dla potrzeb górnictwa naftowego.

