



**343** DISSERTATIONS  
MONOGRAPHS

**JACEK Blicharski**

Analytical modeling of the gas storage process  
in depleted natural gas reservoirs –  
selected aspects



ROZPRAWY  
MONOGRAFIE **343**

**JACEK Blicharski**

Modelowanie analityczne  
procesu magazynowania gazu  
w częściowo szcerpanych złożach gazu ziemnego –  
wybrane zagadnienia



WYDAWNICTWA AGH

KRAKÓW 2018

Wydawnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

Redaktor Naczelny Wydawnictw AGH  
*Jan Sas*

Komitet Naukowy Wydawnictw AGH:  
*Andrzej Pach* (przewodniczący)  
*Jan Chłopek*  
*Barbara Gąciarz*  
*Bogdan Sapiński*  
*Stanisław Stryczek*  
*Tadeusz Telejko*

Recenzenci: *prof. dr hab. inż. Stanisław Rychlicki*  
*dr hab. inż. Czesław Rybicki, prof. AGH*

Afiliacja autora:  
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu  
Katedra Inżynierii Gazowniczej  
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Redakcja: *Małgorzata Koch*

Skład komputerowy: *MarDruk, Marcin Herzog*  
tel. 0 602 130 104, <http://www.mardruk.pl>

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2018

ISSN 0867-6631  
ISBN 978-83-66016-53-8

---

Wydawnictwa AGH  
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
tel. 12 617 32 28, 12 636 40 38  
e-mail: [redakcja@wydawnictwoagh.pl](mailto:redakcja@wydawnictwoagh.pl)  
<http://www.wydawnictwa.agh.edu.pl>

---



*Nauki i umiejętności dopiero stają się użytecznymi,  
gdy są w praktyce do użytku publicznego zastosowane*

Stanisław Staszic



# Spis treści

Streszczenie.....	9
Summary .....	10
Spis oznaczeń.....	11
<b>Wstęp.....</b>	<b>15</b>
<b>1. Nierównomierność zapotrzebowania na gaz i sposoby ich pokrywania .....</b>	<b>19</b>
<b>2. Przegląd istniejących rozwiązań w zakresie magazynowania gazu ziemnego.....</b>	<b>23</b>
2.1. Magazyny gazu w częściowo szcerpanych złożach gazu .....	25
2.2. Magazyny gazu w kawernach solnych .....	26
2.3. Magazyny gazu w warstwach wodonośnych.....	28
2.4. Magazyny gazu w wyrobiskach górniczych .....	31
2.5. Proces zatłaczania i odbioru gazu z PMG.....	31
2.6. Charakterystyka podziemnych magazynów gazu w Polsce.....	33
<b>3. Magazynowanie gazu w częściowo szcerpanych złożach gazu.....</b>	<b>38</b>
3.1. Szczelność magazynu gazu.....	39
3.1.1. Utrata szczelności skał nadkładu wskutek pokonania ciśnienia kapilarnego .....	41
3.1.2. Ucieczki gazu przez uskoki i szczeliny .....	44
3.1.3. Ucieczki gazu wskutek nieszczelności odwiertów.....	44
3.2. Ocena szczelności magazynu gazu – histereza pracy PMG .....	46
<b>4. Modelowanie matematyczne pracy PMG w wolumetrycznym złożu gazu.....</b>	<b>50</b>
4.1. Podstawy teoretyczne modelowania pracy magazynu.....	50
4.1.1. Metoda bilansu masowego .....	50
4.1.2. Ocena warunków energetycznych złóż gazu metodami bilansu masowego .....	52
4.1.3. Wskaźniki energii złożowej .....	54
4.1.4. Modelowanie dopływu gazu do odwiertów pionowych i poziomych przy zatłaczaniu gazu do PMG i odbiorze gazu z PMG .....	54
4.1.5. Modelowanie przepływu gazu w odwiercie .....	56
4.2. Wyznaczanie wydajności odwiertu przy zatłaczaniu gazu do PMG i odbiorze gazu z PMG – analiza węzłowa.....	57
4.3. Modelowanie procesu podziemnego magazynowania gazu .....	60
4.4. Określenie parametrów pracy podziemnego magazynu gazu.....	62

<b>5. Modelowanie matematyczne pracy PMG w złożu z aktywną strefą wodonośną ...</b>	<b>71</b>
5.1. Metody określania wielkości dopływu wody do złoża/PMG .....	71
5.1.1. Metoda van Everdingena–Hursta .....	72
5.1.2. Metoda Fetkovicha .....	75
5.1.3. Algorytm obliczania zmian ciśnienia złożowego oraz wielkości dopływu wody do złoża.....	77
5.1.4. Kalibracja modelu bilansowego – wyznaczenie parametrów strefy wodonośnej.....	80
5.2. Badania laboratoryjne przepływów dwufazowych woda-gaz w ośrodku porowatym .....	82
5.2.1. Stanowisko badawcze.....	82
5.2.2. Metodyka badań wypierania w układzie woda–gaz, gaz–woda.....	86
5.3. Określenie parametrów pracy podziemnego magazynu gazu kontaktującego się z aktywną strefą wodonośną .....	89
5.3.1. Statyczny model geologiczny złoża .....	90
5.3.2. Dynamiczny model symulacyjny złoża.....	93
5.3.3. Analiza eksploatacji i magazynowania gazu w syntetycznym złożu na podstawie modelu analitycznego .....	101
5.3.4. Prognoza budowy magazynu gazu .....	105
<b>Podsumowanie.....</b>	<b>109</b>
<b>Literatura.....</b>	<b>113</b>

JACEK BLICHARSKI

## **Modelowanie analityczne procesu magazynowania gazu w częściowo szcerpanych złożach gazu ziemnego – wybrane zagadnienia**

### **Streszczenie**

W pracy przedstawiono wybrane zagadnienia modelowania procesu magazynowania gazu w częściowo szcerpanych złożach gazu ziemnego pracujących w różnych warunkach energetycznych. Omówiono również zagadnienia związane z nierównomiernością zapotrzebowania na gaz, przyczynami ich powstawania oraz sposobami ich pokrywania. Dokonano przeglądu aktualnych rozwiązań w zakresie magazynowania gazu ze szczególnym uwzględnieniem podziemnych magazynów gazu, ich roli i zadań, jakie pełnią w systemie przesyłowym gazu. Na tym tle scharakteryzowano podziemne magazyny w Polsce. Istotną sprawą poruszoną w pracy było zagadnienie szczelności magazynu, tej w rozumieniu geologicznym, jak również szczelności i integralności odwiertów udostępniających złożo.

Zasadniczą część pracy stanowią rozdziały 4 i 5, w których pokazano modelowanie matematyczne procesu magazynowania gazu w złożach wolumetrycznych i niewolumetrycznych z zastosowaniem odwiertów horyzontalnych. Na przykładzie rzeczywistego złoża gazu przedstawiono analizę możliwości wytworzenia w nim magazynu gazu. Określono możliwą do uzyskania pojemność czynną magazynu w zależności od przyjętych założeń dotyczących minimalnego ciśnienia głowicowego odbioru gazu i liczby odwiertów. W przypadku złoża gazu kontaktującego się z aktywną strefą wodonośną badania wykonano w trzech etapach. Pierwszym etapem były eksperymenty przeprowadzone na skonstruowanym w tym celu stanowisku laboratoryjnym do badania przepływów dwufazowych w ośrodku porowatym w warunkach przepływowych odpowiadających rzeczywistym warunkom panującym w złożu. Wyniki badań w postaci uzyskanych krzywych przepuszczalności względnych gazu i wody wykorzystano przy budowie symulacyjnego modelu dynamicznego złoża. W drugim etapie przeprowadzono symulację eksploatacji syntetycznego złoża, którego statyczny model geologiczny skonstruowano na bazie rzeczywistego złoża. Następnie na podstawie przyjętego scenariusza wykonano symulację rozbudowy i magazynowania gazu w kilku cyklach. Symulację komputerową przeprowadzono za pomocą profesjonalnego symulatora złożowego ECLIPSE. Ostatnim etapem badań było wykonanie prognozy podziemnego magazynowania gazu za pomocą analitycznych modeli obliczeniowych. Wykorzystując dane z przebiegu eksploatacji syntetycznego złoża, najpierw dokonano kalibracji modelu bilansowego z dopływem wody do złoża, po czym przeprowadzono prognozę magazynowania gazu zgodnie ze scenariuszem przyjętym w symulacji komputerowej. Uzyskane wyniki obliczeń za pomocą modelu analitycznego porównano z wynikami symulacji, uzyskując bardzo dobrą zgodność.

JACEK BLICHARSKI

**Analytical modeling of the gas storage process  
in depleted natural gas reservoirs –  
selected aspects**

## **Summary**

The monograph contains selected aspects of the gas storage process modelling in depleted gas reservoirs, operating at various energy conditions. The issue of irregularity of gas demand over the year has been described, as well as its reasons and ways of covering. The current solutions in the field of the gas storage were reviewed with particular emphasis of underground storage facilities, its role and tasks they perform in the gas transmission system. Against this background, underground gas storage facilities in Poland were characterized. An important issue raised in this work is the matter of tightness regarding its geological aspects as well as the integrity of wells working on the site. Essential part of the monograph are chapters 4 and 5 which present mathematical modelling of the gas storage process in volumetric and non-volumetric reservoirs with the use of horizontal wells. On the example of a real gas field, the possibility analysis were made concerning transforming the reservoir into a storage facility. The active storage capacity was determined depending on assumptions regarding minimum well-head pressure and the number of wells. In the case of a reservoir operating in the conditions of active aquifer, the research was conducted in three stages. The first one was an experimental research carried out on a laboratory stand designed to study two-phase flow in a porous medium under flow conditions corresponding to the in-situ conditions. The results in the form of relative permeability curves for gas and water were used during the construction of the simulation dynamic model of the reservoir. In the second stage, the simulation of the synthetic reservoir exploitation was conducted. The static geological model was constructed on the basis of the real gas reservoir. Thereafter, based on the adopted scenario, simulation of gas storage in several cycles was performed. Computer simulations were conducted by the use of professional ECLIPSE reservoir simulator. The last stage of the research was to carry out a forecast of the underground storage performance using analytical calculation models. With the use of history data from the exploitation of the synthetic deposit, the material balance model with the water inflow was first calibrated against simulation data, and then the forecast of the storage facility operation was performed in the accordance with the selected scenario in the computer simulation. The results obtained using analytical calculations were compared with the simulation results obtaining very good agreement.

## Spis oznaczeń

- $a$  – współczynnik równania formuły dwuczłonowej [ $\text{Pa}^2 \cdot \text{s}/\text{m}^3$ ]  
 $b$  – współczynnik równania formuły dwuczłonowej [ $\text{Pa}^2 \cdot \text{s}^2/\text{m}^6$ ]  
 $B_g, B_{g_i}$  – współczynniki objętościowe gazu przy ciśnieniu  $p$  i  $p_i$  [–]  
 $C_f$  – współczynnik ściśliwości przestrzeni porowej skały [ $1/\text{Pa}$ ]  
 $C_t$  – całkowity współczynnik ściśliwości układu woda–skała [ $1/\text{Pa}$ ]  
 $C_w$  – współczynnik ściśliwości wody [ $1/\text{Pa}$ ]  
 $D$  – średnica rur wydobywczych [m]  
 $D_h$  – średnica rur wydobywczych odwiertu poziomego [m]  
 $D_t$  – współczynnik turbulencji przepływu gazu w złożu – odwiert pionowy [ $\text{s}/\text{m}^3$ ]  
 $D_{th}$  – współczynnik turbulencji przepływu gazu w złożu – odwiert poziomy [ $\text{s}/\text{m}^3$ ]  
 $D_v$  – średnica rur wydobywczych odwiertu pionowego [m]  
 $E_g$  – współczynnik ekspansji gazu [–]  
 $E_{f,w}$  – współczynnik ekspansji skały i wody [–]  
 $f$  – współczynnik niepełnej geometrii radialnej [–]  
 $g$  – przyspieszenie ziemskie [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]  
 $GIP$  – zasoby gazu w złożu/PMG [ $\text{Nm}^3$ ]  
 $G$  – zasoby początkowe gazu w złożu [ $\text{Nm}^3$ ]  
 $G_p$  – skumulowana ilość wydobytego gazu ze złoża [ $\text{Nm}^3$ ]  
 $G_z$  – sumaryczna ilość gazu zatłoczona do magazynu [ $\text{Nm}^3$ ]  
 $h$  – miąższość skały [m]  
 $H$  – głębokość odwiertu [m]  
 $J$  – indeks wydajności strefy wodonośnej [ $\text{m}^3/(\text{Pa} \cdot \text{s})$ ]  
 $k$  – współczynnik przepuszczalności skały [ $\text{m}^2$ ]  
 $k_h$  – współczynnik przepuszczalności skały w kierunku poziomym [ $\text{m}^2$ ]  
 $k_{rgcw}$  – przepuszczalność względna dla gazu przy nasyceniu wodą związaną [–]  
 $k_{rwcg}$  – przepuszczalność względna dla wody przy nasyceniu gazem resztkowym [–]  
 $k_v$  – współczynnik przepuszczalności skały w kierunku pionowym [ $\text{m}^2$ ]  
 $L$  – długość odcinka poziomego odwiertu horyzontalnego [m]  
 $M_g$  – masa molowa gazu [ $\text{kg}/\text{kmol}$ ]  
 $n_g, n_w$  – wykładniki równania Coreya [–]  
 $p$  – ciśnienie średnie w złożu [Pa]  
 $p_a$  – średnie ciśnienie w strefie wodonośnej [Pa]

- $p_g$  – ciśnienie głowicowe dynamiczne [Pa]  
 $p_{gmax}$  – maksymalne ciśnienie głowicowe zatłaczania [Pa]  
 $p_{gmin}$  – minimalne ciśnienie głowicowe odbioru [Pa]  
 $p_i$  – ciśnienie początkowe w złożu/ strefie wodonośnej [Pa]  
 $p_n$  – ciśnienie normalne (101 325 Pa)  
 $p_{pc}$  – ciśnienie pseudokrytyczne gazu [Pa]  
 $p_{pr}$  – ciśnienie pseudozredukowane gazu [–]  
 $p_r$  – średnie ciśnienie złożowe (ciśnienie na konturze ropa–woda lub gaz–woda) [Pa]  
 $p_w$  – ciśnienie denne dynamiczne [Pa]  
 $\Delta p = (p - p_a)$  – różnica ciśnień w złożu i strefie wodonośnej [Pa]  
 $P_{nw}$  – ciśnienie fazy niezwilżającej [Pa]  
 $P_w$  – ciśnienie fazy zwilżającej [Pa]  
 $\Delta P = (p_i - p)$  – spadek ciśnienia w złożu [Pa]  
 $q, q_g$  – wydajność przepływu gazu [Nm<sup>3</sup>/s]  
 $q_w$  – wydajność przepływu wody [m<sup>3</sup>/s]  
 $r$  – promień kanału porowego [m]  
 $r_a$  – promień strefy wodonośnej [m]  
 $r_b$  – średni promień złoża [m]  
 $r_e$  – promień strefy zasięgu odwiertu [m]  
 $r_{eh}$  – efektywny promień drenażu odwiertu poziomego [m]  
 $r_w$  – promień odwiertu [m]  
 $R$  – indywidualna stała gazowa [J/(kg · K)],  $R = R_u/M_g$   
 $R_u$  – uniwersalna stała gazowa,  $R_u = 8314$  [J/(kmol · K)]  
 $S_g$  – nasycenie gazem [–]  
 $S_{gc}$  – nasycenie resztkowe gazem [–]  
 $S_m$  – skin efekt mechaniczny [–]  
 $S_w$  – nasycenie wodą [–]  
 $S_{wi}$  – nasycenie początkowe wodą [–]  
 $t_{Dn}$  – całkowity bezwymiarowy czas [–]  
 $T$  – temperatura gazu [K]  
 $T_n$  – temperatura normalna (273,15 K)  
 $T_{pc}$  – temperatura pseudokrytyczna gazu [K]  
 $T_{pr}$  – temperatura pseudozredukowana gazu [–]  
 $W_D(t_D)$  – bezwymiarowa funkcja dopływu wody [–]  
 $W_e$  – skumulowana ilość wody dopływającej do złoża [m<sup>3</sup>]  
 $W_i$  – początkowa ilość wody w strefie wodonośnej [m<sup>3</sup>]  
 $W_p$  – skumulowana ilość wydobytej ze złoża wody [m<sup>3</sup>]  
 $z$  – współczynnik ściśliwości gazu rzeczywistego [–]  
 $\lambda$  – współczynnik oporów liniowych [–]  
 $\mu$  – współczynnik lepkości gazu [Pa·s]  
 $\mu_w$  – współczynnik lepkości wody [Pa·s]  
 $\rho_w$  – gęstość wody [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_g$  – gęstość gazu [kg/m<sup>3</sup>]



- $\rho_r$  – gęstość zredukowana gazu [-]  
 $\sigma$  – napięcie powierzchniowe na granicy faz [N/m]  
 $\theta$  – kąt zwilżania powierzchni skały wodą [°]  
 $\phi$  – współczynnik porowatości skały [-]



# Wstęp

Gaz ziemny jako surowiec energetyczny odgrywa coraz większą rolę w Polsce i w świecie. Ze względu na swoje właściwości wykorzystywany jest w wielu gałęziach przemysłu m.in. do produkcji energii elektrycznej, ciepłej czy też w przemyśle chemicznym. Znaczenie tego nośnika energii wzrasta także wśród odbiorców indywidualnych. Rosnąca popularność tego paliwa pociąga za sobą wzrost zapotrzebowania na gaz. Znaczne wahania temperatury w ciągu roku wpływają istotnie na zużycie gazu w Polsce zwłaszcza w sektorze komunalnym, gdzie gaz wykorzystywany jest głównie do celów grzewczych. Z powodu tego, że dostawy gazu zarówno ze źródeł krajowych, jak i z importu utrzymują się na mniej więcej stałym poziomie w ciągu roku, powstają znaczne niedobory w okresie zimowym oraz nadwyżki w okresie letnim. Oprócz nierównomierności sezonowych w zapotrzebowaniu na gaz w systemie gazowniczym mają miejsce także krótkotrwałe okresy zwiększonego zużycia gazu – dobowe czy też kilkudniowe – występujące np. w porze świąt czy też znacznych spadków temperatury otoczenia. Aby możliwe było pokrywanie zmiennego zapotrzebowania na gaz przez system przesyłowy, niezbędne jest posiadanie dodatkowych źródeł zaopatrzenia w okresach zwiększonego zużycia oraz możliwości przechowywania jego nadwyżek w okresach niskiego zapotrzebowania. Funkcję takiego bufora pełnią magazyny gazu ziemnego, które z jednej strony pozwalają na efektywne wykorzystanie możliwości przesyłowych sieci gazowniczej, a z drugiej zapewniają bezpieczeństwo dostaw gazu do odbiorców. Zużycie gazu ziemnego w Polsce w ostatnich latach sukcesywnie wzrasta. W roku 2014 wynosiło 13,73 mld Nm<sup>3</sup>, w 2016 – 15,4 mld Nm<sup>3</sup>, natomiast w roku 2017 przekroczyło 17,5 mld Nm<sup>3</sup>, z czego ze złóż krajowych w roku 2014 wydobyto ok. 4 mld Nm<sup>3</sup>, a obecnie wydobyte jest na poziomie ok. 3,8 mld Nm<sup>3</sup> [1]. Oznacza to, że coraz więcej gazu pochodzi z importu i to głównie z kierunku wschodniego. W roku 2014 całkowity import tego surowca wynosił 9,7 mld Nm<sup>3</sup>, z kolei trzy lata później wzrósł do poziomu 13,7 mld Nm<sup>3</sup>. Tutaj pojawia się kolejna istotna funkcja magazynów gazu, a mianowicie zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego państwa. Aby spełnić ten wymóg, niezbędne jest posiadanie magazynów gazu o dużych pojemnościach i w odpowiedniej liczbie. Gaz może być magazynowany na kilka sposobów. Magazyny gazu mogą być naziemne lub podziemne. Ze względu na ograniczone pojemności, koszty i względy bezpieczeństwa użytkowania magazyny naziemne są stosunkowo rzadko budowane. Najistotniejszą rolę w magazynowaniu gazu odgrywają magazyny podziemne wykonywane w strukturach geologicznych oraz sztucznie wytworzonych wyrobiskach. Najczęściej do tego celu wykorzystuje się częściowo szczerpane złoża gazu i ropy, głębokie struktury wodonośne oraz kawerny solne. Możliwe jest też magazynowanie gazu

w wyrobiskach pokopalnianych i kawernach skalnych. Polska posiada dziewięć podziemnych magazynów gazu (PMG), z czego siedem to magazyny tzw. systemowe, pracujące na potrzeby systemu przesyłowego, a dwa – magazyny o znaczeniu lokalnym, współpracujące z podsystemami gazu zaazotowanego. Pięć magazynów systemowych wykonanych zostało w częściowo szcerpanych złożach gazu ziemnego, są to: PMG Wierchowice, PMG Husów, PMG Strachocina, PMG Brzeźnica oraz PMG Swarzów, dwa zbudowano w kawernach solnych: KPMG Mogilno i KPMG Kosakowo [2]. Magazyny w częściowo szcerpanych złożach gazu są magazynami sezonowymi, których zadaniem jest pokrywanie nierównomierności zużycia gazu w okresach zimowych i letnich, natomiast magazyny w kawernach solnych mają za zadanie pokrywanie nierównomierności krótkotrwałych, dobowych i kilkudniowych, są to tzw. magazyny szczytowe, umożliwiające dostarczenie do systemu gazowniczego w krótkim czasie znacznych ilości gazu.

W ostatnich latach pojemność magazynów gazu w Polsce znacząco wzrosła. W sezonie 2012/13 pojemność czynna łącznie wszystkich magazynów gazu w Polsce wynosiła 1,82 mld Nm<sup>3</sup> [3], co wystarczało na pokrycie ok. 45-dniowego średniego krajowego zapotrzebowania na gaz, natomiast aktualnie wzrosła do poziomu blisko 3 mld Nm<sup>3</sup>, co pozwala na pokrycie ok. 63-dniowego średniego zapotrzebowania na gaz. Sytuacja uległa znacznej poprawie, niemniej jednak w aspekcie wzrastającego zużycia gazu oraz zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego Polski konieczne będzie dalsze zwiększenie pojemności magazynowych. Przykładowo w największych krajach Unii Europejskiej będących dużymi importerami gazu ziemnego, takich jak Niemcy, Francja czy Włochy, stopień pokrycia zapotrzebowania na gaz w pojemności czynnej PMG wynosi około 30% i więcej, co pozwala na zaspokojenie zużycia gazu niemal przez cztery miesiące [3].

W niniejszej pracy będącej podsumowaniem dotychczasowych badań autora skupiono się na problematyce magazynowania gazu w częściowo szcerpanych złożach gazu ziemnego. Ten sposób magazynowania gazu jest najczęściej stosowany zarówno w świecie, jak i w Polsce i jednocześnie stwarza możliwości zwiększenia pojemności magazynowych, a tym samym poprawy bezpieczeństwa energetycznego kraju.

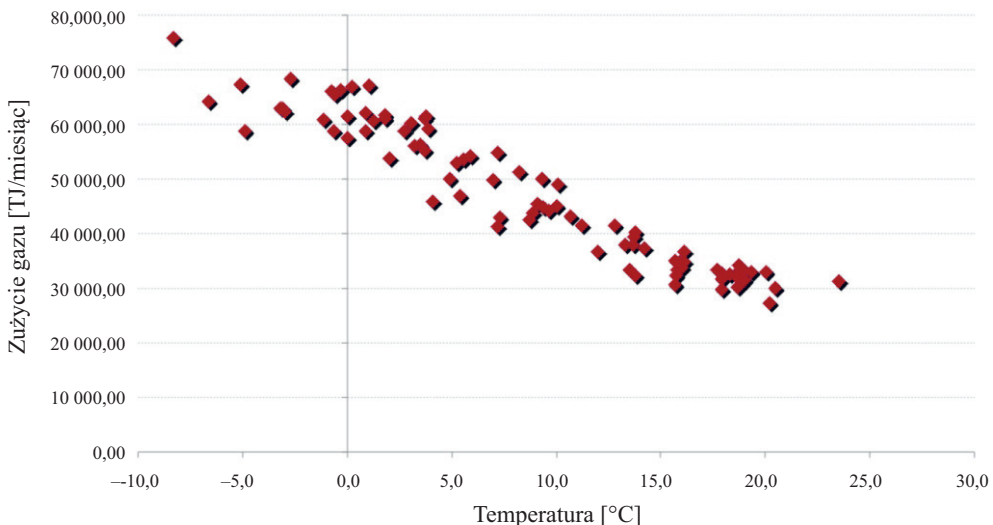
W pracy analizie poddano przyczyny powstawania nierównomierności zapotrzebowania na gaz oraz dokonano przeglądu rozwiązań w zakresie jego magazynowania, koncentrując się w szczególności na podstawowym sposobie magazynowania w strukturach geologicznych występujących naturalnie lub wytworzonych sztucznie. Zasadniczą część stanowią rozdziały 4 i 5 dotyczące modelowania pracy podziemnych magazynów gazu z wykorzystaniem rozwiązań analitycznych. W rozdziale 4 przedstawiono analityczny model oparty na równaniach bilansu masowego, wydajności złoża oraz przepustowości odwiertu. Model ten rozszerzono o możliwość zastosowania odwiertów poziomych z wykorzystaniem równania Joshiego [4]. Na podstawie stworzonego algorytmu obliczeniowego wyznaczono główne parametry podziemnego magazynu gazu wytwarzanego w częściowo szcerpanym złożu gazu ziemnego pracującym w warunkach wolumetrycznych. Określono możliwe do osiągnięcia wielkości pojemności czynnej magazynu w zależności od liczby wykorzystanych odwiertów poziomych. W rozdziale 5 pokazano modelowanie pracy podziemnego magazynu gazu wytwarzanego w częściowo szcerpanym złożu gazu, kontaktującego się z aktywną strefą wodonośną (ang. *aquifer*). Wykorzystując znane w inżynierii metody określania wielkości dopływu wody do złoża, zbudowano algorytmy obliczeniowe, które następnie poddano walidacji przez porównanie z wynikami symulacji komputerowej. Ważnym elementem tej części

rozważań były badania eksperymentalne przepływów dwufazowych w układzie gaz–woda, których celem było wyznaczenie przepuszczalności efektywnych gazu i wody przy wzajemnym wypieraniu się tych faz w ośrodku porowatym, jak ma to miejsce w procesie magazynowania gazu w złożach z aktywną strefą wodonośną. W tym celu na zbudowanym stanowisku przeprowadzono serię eksperymentów, których wynikiem było wyznaczenie krzywych przepuszczalności względnych wody i gazu w funkcji nasycenia skały wodą. Otrzymane wyniki zostały następnie zaimplementowane w dynamicznym modelu symulacyjnym. Wyniki symulacji pracy magazynu gazu uwzględniono przy prognozowaniu jego pracy z wykorzystaniem narzędzi analitycznych. Uzyskane wyniki obliczeń wykazują bardzo dobrą zgodność z wynikami symulacji komputerowej.



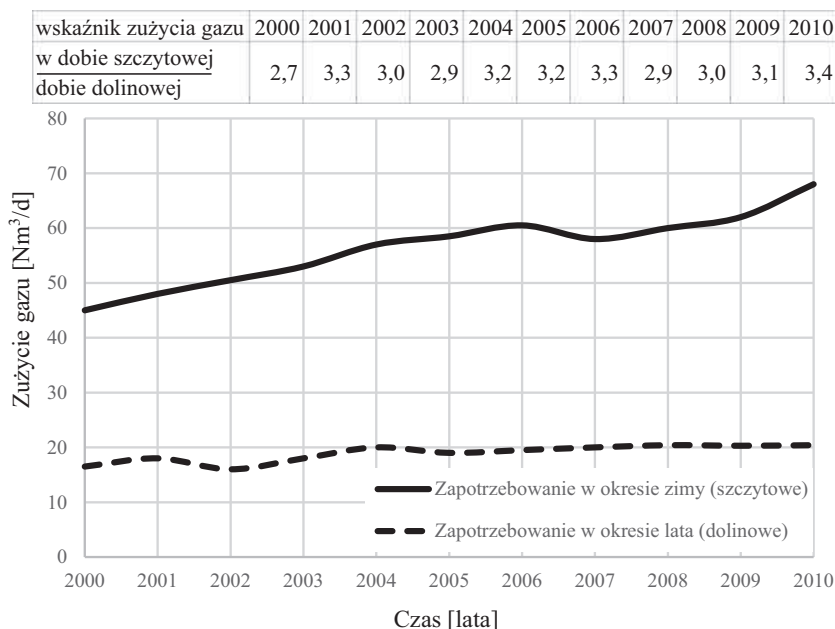
# 1. Nierównomierności zapotrzebowania na gaz i sposoby ich pokrywania

Zużycie gazu ziemnego w Polsce w ostatnich latach charakteryzuje się stopniowym wzrostem. W roku 2014 wynosiło ono niecałe 14 mld  $\text{Nm}^3$ , z kolei w roku 2017 wzrosło do poziomu 17,5 mld  $\text{Nm}^3$  [1]. Jednocześnie obserwuje się rosnące zróżnicowanie zapotrzebowania na gaz w ciągu roku oraz coraz większe wahania zużycia w okresach krótkoterminowych (zapotrzebowanie szczytowe). Maksimum zużycia gazu przypada na miesiące zimowe, z kolei minimalne zapotrzebowanie na miesiące letnie, co ściśle wiąże się ze zmianami temperatury otoczenia. Na rysunku 1.1 pokazano zależność zużycia gazu od temperatury otoczenia. Widoczna jest duża zmienność zużycia gazu w funkcji temperatury. Największe zużycie ma miejsce przy niskich temperaturach (okres zimowy), z kolei najniższe przy wysokich temperaturach otoczenia (okres letni). Różnica pomiędzy zużyciem gazu w okresie letnim i zimowym w analizowanym okresie wynosi ponad 250%.



**Rys. 1.1.** Zależność zużycia gazu w Polsce od temperatury otoczenia w latach 2003–2009 [5]  
(zużycie gazu podane w jednostkach energii – TJ, gdzie ciepło spalania gazu wysokometanowego to  $38,147 \text{ MJ/Nm}^3$ )

Duże zróżnicowanie w zapotrzebowaniu na gaz wynika ze struktury odbiorców, których można ogólnie podzielić na dwie grupy, tj. odbiorców przemysłowych oraz indywidualnych. Pobór gazu przez odbiorców przemysłowych charakteryzuje się stosunkowo niewielką nierównomiernością w ciągu roku, z kolei największe wahania w zużyciu gazu generują odbiorcy indywidualni. Z roku na rok nierównomierności te pogłębiają się. Od początku obecnego wieku obserwuje się także znaczący wzrost szczytowego zapotrzebowania na gaz, co jest powodem wysokiego wskaźnika nierównomierności poboru gazu, wyrażanego jako stosunek zużycia w ciągu doby przy maksymalnym zapotrzebowaniu na gaz do zużycia dobowego gazu w okresie minimalnego zapotrzebowania. Charakter zmian tego wskaźnika pokazano na rysunku 1.2. Jak widać, wskaźnik ten osiągnął w roku 2010 wartość 3,4 i obserwuje się dalszy trend wzrostowy, co wskazuje na narastającą różnicę pomiędzy zapotrzebowaniem na gaz w okresie letnim i zimowym.

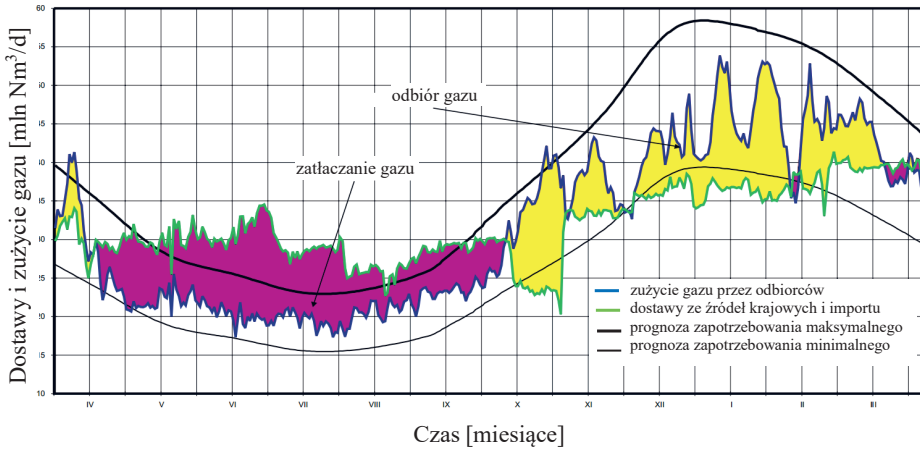


**Rys. 1.2.** Trend zmian sezonowej nierównomierności zużycia gazu w Polsce w latach 2000–2010 [6]

Powstające nierównomierności w zapotrzebowaniu na gaz wobec pozostających na względnie stałym poziomie w ciągu roku dostaw gazu do polskiego systemu gazowniczego muszą być zaspokajane gazem zgromadzonym w podziemnych magazynach. Magazyny o odpowiednio dużej pojemności mają zatem za zadanie odbieranie z systemu nadwyżek gazu powstających w okresie niskiego zapotrzebowania (lato) oraz oddawanie gazu do systemu w trakcie jego deficytu (zima). Proces ten dla jednego sezonu magazynowania gazu zobrazowano na rysunku 1.3. Obszar zamknięty pomiędzy liniami zużycia gazu przez odbiorców (kolor niebieski) oraz dostaw gazu do systemu przesyłowego (kolor zielony) oznacza etapy napełniania i odbioru gazu z PMG. Kolorem żółtym oznaczono okres odbioru gazu z magazynu, który przypada na miesiące jesienno-zimowe, natomiast kolorem bordowym



okres napełniania magazynów przypadający na miesiące letnie. W okresie odbioru gazu z magazynu można zauważyć charakterystyczne piki w zużyciu gazu, w których do systemu muszą być dostarczone w krótkim czasie znaczne ilości gazu.



**Rys. 1.3.** Przebieg zużycia i dostaw gazu do polskiego systemu przesyłowego w ciągu roku [7]

Mając na uwadze coraz większe dysproporcje pomiędzy zapotrzebowaniem szczytowym i dolinowym, można stwierdzić, że istnieje uzasadniona potrzeba posiadania nie tylko magazynów gazu o odpowiednio dużych pojemnościach, ale także posiadania magazynów pozwalających na odbiór dużych ilości gazu w krótkim okresie tak, aby możliwe było pokrycie zapotrzebowania szczytowego przez kilka czy kilkanaście dni. Do tego celu wykorzystywane są tzw. szczytowe podziemne magazyny gazu, wytwarzane w kawernach solnych. Ze względu na sposób magazynowania gazu (puste przestrzenie w wysadach solnych) mają one znacznie większą wydajność zatlaczania, a przede wszystkim odbioru gazu, co w powiązaniu z dużymi pojemnościami czynnymi pozwala na szybkie oddawanie dużych ilości gazu do systemu gazowniczego.

Oprócz nierównomierności sezonowych i dobowych w systemie przesyłowym gazu występują także nierównomierności godzinowe. Nierównomierności te wynikają ze zróżnicowanego zapotrzebowania na gaz przez odbiorców indywidualnych w zależności od pory dnia. Ogólnie przyjmuje się, że okres maksymalnego obciążenia gazociągu zarówno przy typowej komunalnej strukturze zbytu, jak i przy równoczesnym zasilaniu trwa od godziny około 6:00 do 21:00. W tym czasie następuje największy pobór gazu, który ma szczyt między godziną 18:00 a 20:00. Nierównomierności tego typu mogą być z powodzeniem kompensowane przez właściwe sterowanie pracą systemu przesyłowego z wykorzystaniem jego zdolności magazynowych. Przy czym taka forma magazynowania gazu ma znaczne ograniczenia wynikające z jednej strony z możliwości zwiększenia ciśnienia gazu w sieci gazociągów i objętości samych gazociągów, a z drugiej bieżącego zużycia gazu. Jeżeli zwiększone zapotrzebowanie na gaz utrzymuje się przez kilka czy też kilkanaście dni (np. przy utrzymujących się dłużej ujemnych temperaturach zewnętrznych), wówczas możliwości wykorzystania pojemności magazynowej systemu gazociągów przesyłowych są znacznie ograniczone.

Pojemność gazociągów wysokiego ciśnienia w skali całego kraju pozwala na magazynowanie gazu w ilości 0,8 mln Nm<sup>3</sup>/0,1 MPa. System przesyłowy pozwala na utrzymanie średniej rezerwy ciśnieniowej na poziomie 0,8 MPa, tak więc pojemność magazynowa polskiego systemu przesyłowego wynosi ok. 6 mln Nm<sup>3</sup>. Porównując tę wartość z wielkością zapotrzebowania na gaz w okresie zimowym, na podstawie rysunku 1.3 można stwierdzić, że pozwala to na pokrycie jedynie nierównomierności godzinowych. Niewątpliwą zaletą tej formy magazynowania gazu jest stosunkowa łatwość i szybkość napełniania i odbioru tak rozumianego magazynu, gdyż lokalizacja pojemności i jej dostępność jest rozproszona. Jednocześnie jest to jeden z najdroższych sposobów magazynowania gazu. Innym sposobem pokrywania nierównomierności zapotrzebowania na gaz jest zmiana dostaw gazu ze źródeł zasilania, co w praktyce może być realizowane jedynie w ograniczonym zakresie. Regulacja przez zmianę wydobycia ze złóż krajowych może odbywać się w niewielkim stopniu i jest nieefektywna ekonomicznie. Z kolei regulacja dostaw gazu z importu jest ograniczona kontraktami i skutkuje zwykle wyższą ceną zakupu gazu. Formuła *take or pay* przewiduje wprawdzie 15-procentową elastyczność dostaw, przy czym większe dostawy są możliwe zazwyczaj w okresie niskiego zapotrzebowania na gaz. Optymalny i zarazem najbardziej pożądanym sposobem regulacji nierównomierności zużycia gazu to podziemne magazynowanie gazu.

Malejące wydobycie gazu ze złóż krajowych przy wzrastającym zużyciu gazu w Polsce, zwłaszcza w ostatnich latach, wymaga zwiększania importu tego paliwa. Mając na uwadze bezpieczeństwo energetyczne, należy z jednej strony dążyć do dywersyfikacji źródeł pozyskania tego nośnika energii, a z drugiej ciągłego zwiększania pojemności czynnej magazynów przez rozbudowę istniejących już magazynów lub budowę nowych. Rozważając budowę bądź rozbudowę istniejących już magazynów, należy jednak pamiętać, że bardzo istotnym elementem ze względu na zapewnienie bezpieczeństwa ciągłości dostaw gazu do odbiorców jest nie tylko pojemność czynna PMG, ale także możliwość odbioru gazu z PMG w jak najkrótszym czasie [8–10].

## 2. Przegląd istniejących rozwiązań w zakresie magazynowania gazu ziemnego

Dążenie do osiągnięcia bezpieczeństwa energetycznego kraju ze względu na zaopatrzenie w gaz ziemny jest możliwe przez stworzenie odpowiedniej infrastruktury, której nieodłącznym elementem są magazyny gazu. Magazynowanie gazu może być realizowane na kilka sposobów, tj.:

- w systemie przesyłowym,
- w zbiornikach naziemnych,
- w podziemnych magazynach gazu.

Magazynowanie gazu w gazociągach przesyłowych jest ściśle związane z istniejącą siecią gazową, przez którą gaz jest dostarczany odbiorcom, zarówno indywidualnym, jak i przemysłowym. Ilość gazu, jaka może być zmagazynowana w sieci przesyłowej gazu, zależy od objętości gazociągów będącej funkcją długości i średnicy gazociągów oraz zakresu ciśnień pracy. Ten sposób magazynowania pozwala jednak na niwelowanie jedynie dobowych oraz godzinowych wahań zapotrzebowania na gaz, zatem nie może być brany pod uwagę przy strategicznym magazynowaniu gazu [11].

Magazynowanie gazu w zbiornikach naziemnych może być realizowane w zbiornikach niskiego ciśnienia o zmiennej objętości z uszczelnieniem mokrym lub suchym oraz w zbiornikach średniego ciśnienia o stałej objętości w kształcie kulistym bądź walcowym. Magazyny niskociśnieniowe różnią się konstrukcją i sposobem uszczelnienia. W zbiornikach z uszczelnieniem mokrym gaz magazynowany jest pod nadciśnieniem wywieranym przez uszczelnione teleskopowo ruchome człony płaszczki zanurzone w basenie z wodą, które unoszą się w trakcie napełniania magazynu. Zbiorniki tego typu charakteryzuje względna łatwość obsługi oraz bezpieczeństwo. Do wad należą korozja stalowych elementów konstrukcyjnych oraz konieczność osuszania odbieranego gazu. W zbiornikach suchych, które zwykle budowane są w kształcie walca bądź graniastosłupa, uszczelnienie stanowi ruchomy tłok oddzielający dolną część wypełnioną gazem od przestrzeni górnej kontaktującej się z atmosferą. Uszczelnienie tłoka ma decydujący wpływ na konstrukcję i bezpieczeństwo pracy zbiornika. Zbiorniki magazynowe średniego ciśnienia umożliwiają magazynowanie gazu przy nadciśnieniu wynoszącym kilka barów i są budowane ze stali o wysokiej wytrzymałości i odporności na kruche pęknięcia powłoki zbiornika. Pojemności magazynów naziemnych w zależności od użytej technologii i ciśnienia gazu pozwalają na zmagazynowanie od kilkudziesięciu do kilkuset tysięcy metrów sześciennych gazu [12]. Magazynowanie dużych ilości gazu wymagałoby zatem budowy baterii kilku bądź kilkunastu zbiorników zlokalizowanych blisko odbiorców, co w powiązaniu z wysokimi kosztami budowy i konserwacji zbiorników

oraz względami bezpieczeństwa spowodowało, że ten sposób magazynowania gazu w praktyce nie znalazł szerszego zastosowania.

Do grupy naziemnych magazynów gazu należy także zaliczyć zbiorniki LNG (ang. *Liquefied Natural Gas* – skroplony gaz ziemny), pozwalające na przechowywanie znacznych ilości gazu pod niskim ciśnieniem w postaci skroplonej. Terminal LNG w Świnoujściu ma dwa zbiorniki magazynowe umożliwiające na składowanie gazu w postaci skroplonej po 160 tys. m<sup>3</sup> każdy [13]. Łącznie jest to 320 tys. m<sup>3</sup> ciekłego LNG, co w przeliczeniu na postać gazową daje ok. 200 mln Nm<sup>3</sup> gazu przy pełnym stanie obydwu zbiorników.

Największe magazyny gazu o znaczeniu strategicznym pozwalające na zmagazynowanie dużych ilości gazu rzędu setek milionów, a nawet kilkudziesięciu miliardów metrów sześciennych gazu wytwarzane są w strukturach geologicznych. Podziemne magazyny gazu są jednym z zasadniczych elementów prawidłowego funkcjonowania sieci gazowniczej, pozwalającym na bezawaryjne i ciągłe dostawy gazu do odbiorców.

Do głównych funkcji podziemnych magazynów gazu należy zaliczyć:

- równoważenie nierównomierności sezonowego i szczytowego zapotrzebowania na gaz,
- stworzenie rezerw strategicznych w celu kompensowania potencjalnych przerw w dostawach gazu z importu (zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego kraju).

Poza główną funkcją, jaką jest wyrównanie nierównomierności dostaw gazu do systemu przesyłowego, podziemne magazyny gazu:

- zapewniają pełne i ciągłe dostawy gazu do odbiorców,
- umożliwiają efektywne wykorzystanie przepustowości gazociągów, co przekłada się na niższe koszty przesyłania gazu,
- umożliwiają stabilną eksploatację krajowych złóż gazu przez odbiór wydobywanego gazu ziemnego, bez względu na aktualne zapotrzebowanie rynku na to paliwo,
- umożliwiają odbiór zakontraktowanych ilości gazu importowanego,
- zapewniają podtrzymanie przesyłu gazu przez niwelowanie lokalnych ograniczeń przepustowości systemu lub krytycznych dopuszczalnych wielkości ciśnień,
- pozwalają na optymalizację transakcji zakupów i sprzedaży gazu ziemnego pod kątem zmienności jego cen.

Podziemny magazyn gazu charakteryzują następujące parametry techniczne [4]:

- pojemność czynna – ilość gazu jaka jest możliwa do zatłoczenia i odebrania w jednym cyklu pracy PMG; jej wartość jest warunkowana ciśnieniem maksymalnym i minimalnym pracy magazynu;
- pojemność buforowa – ilość gazu stale pozostająca w magazynie mająca za zadanie utrzymanie odpowiedniego ciśnienia i wydajności odbioru gazu; wielkość tej pojemności uzależniona jest od aktywności strefy wodonośnej oraz od rezerw strategicznych gazu;
- ciśnienie maksymalne – ciśnienie w magazynie na koniec cyklu zatłaczania; ciśnienie to generalnie nie powinno przekraczać ciśnienia początkowego w złożu; w uzasadnionych przypadkach można przekroczyć ciśnienie początkowe, jeśli pozwala na to odpowiednie rozpoznanie skał nadkładu i wytrzymałości skały zbiornikowej;
- ciśnienie minimalne – ciśnienie odpowiadające ciśnieniu przy pojemności buforowej magazynu; ciśnienie to powinno być wyższe od minimalnego ciśnienia odbioru gazu z PMG;

- moc odbioru – ilość gazu jaka może zostać odebrana z magazynu w ciągu doby, zwykle wyrażona w milionach metrów sześciennych na dobę; wielkość ta zależy jest od aktualnego ciśnienia w PMG (tj. ilości gazu aktualnie znajdującej się w magazynie) oraz przepustowości instalacji powierzchniowej;
- moc zatłaczania – ilość gazu jaka może zostać zatłoczona do magazynu w ciągu doby; największa moc zatłaczania ma miejsce w początkowej fazie napełniania magazynu, gdy ciśnienie w złożu jest niskie i maleje ze wzrostem ciśnienia w PMG.

Podziemne magazynowanie gazu jest możliwe jedynie w odpowiednich strukturach geologicznych, zalegających na odpowiednio dużej głębokości. Do tego celu wykorzystywane są:

- częściowo szcerpane złoża gazu ziemnego lub ropy naftowej,
- kawerny solne,
- warstwy wodonośne,
- wyrobiska górnicze (wyeksploatowane kopanie węgla lub soli kamiennej).

## **2.1. Magazyny gazu w częściowo szcerpanych złożach gazu**

Podziemne magazyny gazu istniejące w świecie w większości budowane są w częściowo szcerpanych złożach gazu. Częściowo szcerpane złoża gazu są naturalnymi obiektami wykorzystywanymi na cele magazynowania. Charakteryzują się dużymi pojemnościami, dobrymi własnościami kolektorskimi skał zbiornikowych. Jednakże najważniejszym czynnikiem, który decyduje o tym, że magazyny gazu są budowane w szcerpanych złożach jest potwierdzona szczelność geologiczna struktury, w której gaz pod wysokim ciśnieniem znajdował się przez długi czas. Za tego typu strukturami przemawia wiele czynników, tj. istniejąca infrastruktura powierzchniowa umożliwiająca zatłaczanie i odbiór gazu z magazynu, instalacja kondycjonowana gazu odbieranego z PMG, siatka odwiertów eksploatacyjnych, połączenia gazociągowe z siecią przesyłową i inne. Budowa magazynu gazu w częściowo szcerpanym złożu wymaga odpowiednio wczesnego wyłączenia złoża z eksploatacji, tak aby nie nastąpiło zbyt duże wyeksploatowanie jego zasobów. Pozostały w złożu gaz tworzy pojemność buforową magazynu i jest niezbędny do prawidłowego funkcjonowania magazynu. Gaz ten ma za zadanie m.in. umożliwić odbiór dużych ilości gazu w krótkim czasie i pod odpowiednio wysokim ciśnieniem. Ponadto w przypadku złóż gazu kontaktujących się z aktywną strefą wodonośną zabezpiecza magazyn przed niekontrolowanym dopływem wody do złoża. Tak więc wielkość bufora wpływa bezpośrednio na ilość gazu, jaka może być magazynowana w złożu, to jest pojemność czynną magazynu. Z ekonomicznego punktu widzenia wytworzenie magazynu gazu w częściowo szcerpanym złożu gazu wymaga poniesienia stosunkowo najniższych kosztów w porównaniu z pozostałymi formami podziemnego magazynowania gazu. Magazyny w wyeksploatowanych złożach charakteryzują się dużą pojemnością czynną przy stosunkowo niewielkich mocach napełniania i odbioru gazu. Wymagają jednak utrzymania tzw. pojemności buforowej utworzonej z gazu rodzimego lub zatłoczonego, co stanowi znaczny koszt inwestycyjny magazynu.

Szerzej ten sposób magazynowania gazu został omówiony w rozdziale 3.

## 2.2. Magazyny gazu w kawernach solnych

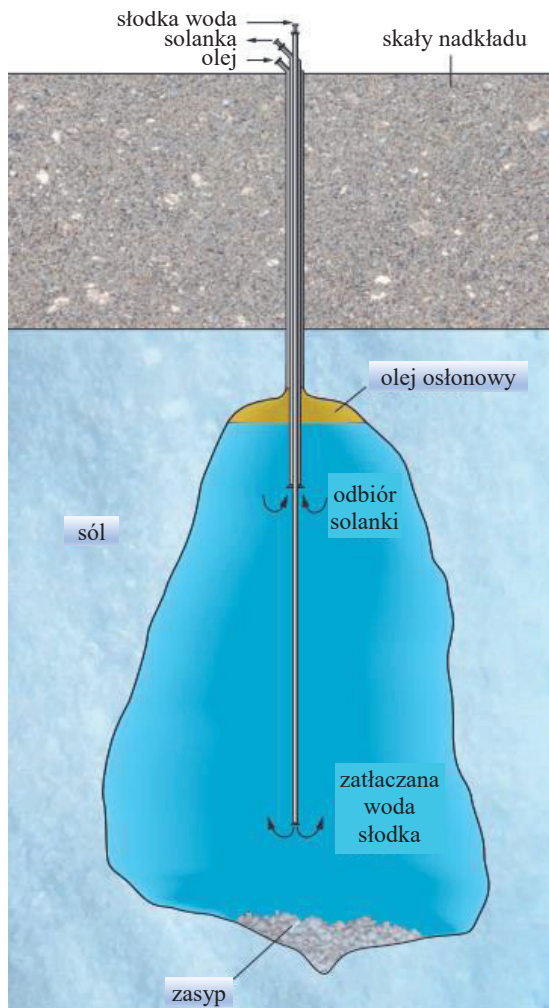
Kawernowe podziemne magazyny gazu (KPMG) powstają w ten sposób, że w złożach soli w procesie ługowania wytwarzane są wolne przestrzenie. Wykorzystanie złóż soli do długoterminowego magazynowania gazu umożliwiają następujące cechy soli kamiennej, tj. nieprzepuszczalność w odniesieniu do gazów i cieczy, łatwa urabialność górnicza oraz szczególne własności sprężysto-plastyczne. Z technicznego punktu widzenia – chodzi o szczelność magazynu – korzystną cechą soli są jej własności sprężysto-plastyczne, które niwelują ruchy górotworu, zapobiegając powstawaniu nieszczelności struktury. Ujemnym skutkiem odkształceń plastycznych i pełzania jest konwergencja komory polegająca na zmniejszaniu jej objętości wskutek zaciskania. W płytkich komorach nie przekracza ona 0,1% na rok. W głębokich może sięgać 1% w ciągu roku [14].

Formacje geologiczne, w których są lokalizowane magazyny kawernowe, występują w naturze w dwóch formach, tj. w wysadach solnych oraz złożach warstwowych lub soczewkowych. Po to, aby było możliwe wytworzenie magazynu gazu w tego typie strukturach, muszą one mieć dużą miąższość i zalegać na odpowiednio dużych głębokościach. Dla wysadów solnych są to głębokości rzędu od 500 m do 2000 m, w przypadku złóż soli głębokości zmieniają się w zakresie od 500 m do 1000 m. Ponadto istotnym aspektem budowy takich magazynów jest także pozyskanie znacznych ilości wody słodkiej niezbędnej do ługowania kawerny oraz zagospodarowanie uzyskiwanej w procesie ługowania solanki. Złoża soli kamiennej typowane na magazyny gazu powinny spełniać określone warunki geologiczne, mieć odpowiednią formę, wielkość i głębokość zalegania oraz sól powinna mieć odpowiedni skład. Niezmiernie istotnym uwarunkowaniem jest również usytuowanie innych warstw w złożu i otaczającym górotworze. Wielkość złoża powinna umożliwiać rozmieszczenie w nim wymaganej liczby komór z zachowaniem odpowiedniej wielkości filarów ochronnych. Rozmiary komór określane są przez dwa podstawowe parametry, tj. średnicę i wysokość kawerny. Projektowane średnice komór zależą od własności i miąższości złoża soli i mieszczą się w przedziale 50–80 m, z kolei wysokość kawerny powinna mieć min. 1,5 średnicy. Wysokości największych kawern wynoszą od 300 m do 400 m, natomiast objętości są rzędu kilkuset tysięcy metrów sześciennych, największe mają objętości ponad 2 mln m<sup>3</sup> [15].

Wytwarzanie kawern w pokładach soli odbywa się techniką otworową przez rozprowadzanie i cyrkulację wody słodkiej, która następnie jest odprowadzana na powierzchnię jako solanka. Cechą charakterystyczną otworu ługującego są dwie kolumny rur wprowadzonych współosiowo do otworu. Tworzą one dwie przestrzenie pierścieniowe oraz wewnętrzną (kołową) do transportu wody i solanki. Górna część wytwarzanej kawerny osłaniana jest przez warstwę węglowodorów ciekłych (olej osłonowy) zapobiegającą ługowaniu kawerny w górę. Proces ługowania kawerny schematycznie pokazano na rysunku 2.1. Wytwarzanie kawerny następuje przez wtłaczanie wody słodkiej do otworu, gdzie doprowadzana jest do dna niezacementowanej wewnętrznej kolumną rur, zaś solanka odbierana jest przestrzenią pierścieniową. W tym stadium wytwarzania dolna część kawerny powiększa się szybciej niż górna. Przy odwrotnym obiegu woda zatłaczana jest przestrzenią pierścieniową (pomiędzy dwoma niezacementowanymi kolumnami rur) natomiast odbiór solanki odbywa się przestrzenią wewnętrzną, co powoduje szybkie powiększanie się kawerny powyżej poziomu zatłaczania wody. Kształt kawerny modelowany jest przez zmianę położenia obydwu kolumn rur, zmianę poziomu oleju osłonowego, wydatku i kierunku przepływu wody. W końcowym stadium



następuje wytłaczanie solanki magazynowanym gazem. Po zakończeniu wytłaczania solanki na dnie komory kawerny pozostają nierozpuszczone części soli (zasyp) oraz woda.



**Rys. 2.1.** Ługowanie kawerny solnej [16]

Istotnym elementem projektowania kawerny jest jej wysokość całkowita. Wysoka, cylindryczna komora jest najbardziej pożądana ze względu na dużą objętość i wytrzymałość geomechaniczną. Jednakże wysokość kawerny jest limitowana możliwością wytłoczenia solanki przy pierwszym wtłaczaniu gazu do kawerny. Wtłaczany przy maksymalnym ciśnieniu roboczym gaz musi pokonać opory przepływu solanki przez kolumnę solankową na całej wysokości komory i długości odwiertu magazynowego oraz zrównoważyć różnicę ciężarów słupa solanki i gazu. Wartość tego ciśnienia nie może przekroczyć ciśnienia szczelinowania w stropowej części kawerny, co ogranicza maksymalną wysokość komory.

Przy jednorodnych pokładach soli stosunkowo łatwo jest uzyskać planowany kształt komory. Jednakże złoża solne często zawierają wtrącenia różnych nierozpuszczalnych minerałów (np. anhydryt) w związku z czym uzyskiwany kształt komory jest często nieregularny.

Pojemność czynna i buforowa magazynu gazu wytwarzanego w kawernie solnej wynika z relacji pomiędzy ciśnieniem minimalnym i maksymalnym pracy magazynu. Ciśnienie minimalne wynika z geomechanicznej stateczności komory i powinno być na tyle duże, aby nie dopuścić do przekroczenia dopuszczalnych naprężeń wokół komory i zbyt szybkiego jej odkształcania w wyniku konwergencji [14, 17]. Ciśnienie maksymalne magazynowania gazu jest limitowane wartością ciśnienia geostaticznego w głębokości buta rur solankowych, gdzie ciśnienie szczelinowania jest najniższe. Przekroczenie tego ciśnienia może doprowadzić do zeszcelinowania skały, a tym samym utraty szczelności zbiornika. Ciśnienie maksymalne w kawernie solnej zasadniczo nie przekracza wielkości wynikającej z gradientu ciśnienia na poziomie 0,2 bara na metr głębokości kawerny. Z kolei ciśnienie minimalne powinno być utrzymywane na poziomie gradientu ciśnienia rzędu 0,09 bara na metr głębokości kawerny. Dopuszczalna wartość minimalnego ciśnienia w magazynie wynosi ok. 25–30% ciśnienia maksymalnego, co oznacza że pojemność buforowa kawernowego magazynu jest znacznie mniejsza w porównaniu z magazynami w częściowo szcerpanych złożach gazu czy warstwach wodonośnych i wynosi w granicach od 1/4 do 1/3 całkowitej ilości gazu przy pełnym stanie kawerny. Tak więc ok. 2/3 gazu magazynowanego w kawernie stanowi pojemność czynną takiego magazynu. Ze względu na swoją specyfikę, magazyny gazu w kawernach solnych charakteryzują się znacznie większymi wydajnościami odbioru gazu w porównaniu z magazynami sezonowymi, przez co pełnią rolę szczytowych magazynów gazu [18]. Umożliwiają one odbiór i zatłaczanie dużych ilości gazu w krótkim czasie, przez co mogą być opróżniane i napełniane kilka razy w ciągu roku. Niewątpliwą wadą tej formy magazynowania gazu jest wysoki koszt magazynowania gazu wynikający z jednej strony z wysokich nakładów inwestycyjnych (ługowanie kawern, utylizacja solanki, budowa infrastruktury powierzchniowej oraz koszt uzupełnienia gazu buforowego), a z drugiej kosztów operacyjnych [18]. Jednakże koszty te mogą być znacznie ograniczone przy efektywnym wykorzystaniu pełnej pojemności magazynu w kilku cyklach w ciągu roku. Do zalet tych magazynów zaliczyć należy ich dużą dyspozycyjność oraz możliwość szybkiego przełączenia z fazy zatłaczania do fazy odbioru i odwrotnie.

### 2.3. Magazyny gazu w warstwach wodonośnych

Struktury zawodnione są wykorzystywane dla celów magazynowania gazu w przypadku braku odpowiednich szcerpanych złóż gazu lub ropy w pobliżu planowanej lokalizacji PMG.

Zawodnione struktury geologiczne wykorzystywane do magazynowania gazu powinny mieć:

- odpowiednio dużą objętość warstwy zdolnej pomieścić znaczną ilość gazu,
- nieprzepuszczalne warstwy ponad strukturą wodonośną uniemożliwiające ucieczki gazu,
- dobre własności petrofizyczne skały, tj. wysoką przepuszczalność i porowatość umożliwiające stosunkowo łatwe wypieranie wody przez zatłaczany gaz z wymaganymi wydajnościami i przy niewysokich gradientach ciśnienia,



- strukturę w kształcie antykliny z zamknięciem przestrzeni porowej ze wszystkich stron, tak aby strefa gazu mogła stabilnie utrzymywać się w szczycie struktury,
- brak uskoku i innych nieciągłości w obrębie struktury.

Przed rozpoczęciem magazynowania gazu w warstwach wodonośnych wykonywane są testy mające na celu określenie przydatności danej struktury do magazynowania gazu bez jego ucieczek do wyżej lub niżej zalegających warstw. W tym celu wykonywane są testy szczelności struktury, a także badania sejsmiczne i geologiczne. Szczelność skał nadkładu jest podstawowym kryterium przydatności struktury do magazynowania gazu. Pierwszym etapem budowy magazynu w tego typu strukturach jest testowanie skał nadkładu pod kątem możliwości ucieczek gazu. Wykonywane są m.in. badania ciśnienia przebicia (ang. *threshold pressure*) w próbkach rdzeni pozyskanych ze skał nadkładu, analizy próbek wody z warstw zalegających poniżej i powyżej skały uszczelniającej (różnice w składzie wody wskazują na brak komunikacji przez skały nadkładu), a także testy pompowania wody czy też zatłaczania gazu do warstwy wodonośnej. W przypadku struktur typu antyklina należy także precyzyjnie określić położenie punktu przelewu, który gwarantuje maksymalną pojemność pułapkowania. Struktura musi być wolna od wszelkiego rodzaju dyslokacji (uskoki), które stanowiłyby drogi ucieczki gazu.

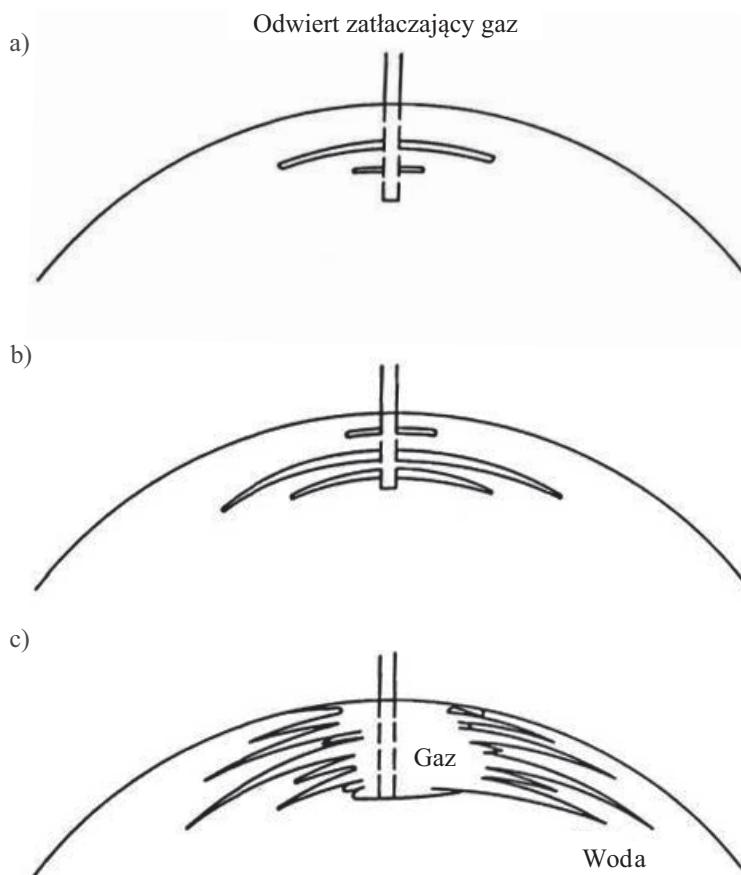
Jeśli przeprowadzone testy potwierdzają szczelność struktury, wówczas następuje stopniowe zatłaczanie gazu do warstwy wodonośnej. W procesie tym do ośrodka porowatego początkowo wypełnionego całkowicie wodą następuje zatłaczanie gazu. W celu zatłoczenia gazu (płyn niezwilżający) musi zostać wytworzone przewyższenie ciśnienia niezbędne do pokonania ciśnienia kapilarnego na granicy faz gaz-woda. Przewyższenie ciśnienia względem ciśnienia początkowego panującego w złożu nie powinno przekraczać poziomu 7–14 barów [19]. Zatłaczany do złoża gaz wypiera z przestrzeni porowej wodę. Jednakże wypieranie to nie jest całkowite. Część wody nadal pozostaje w porach skały w postaci wody związanej. Nasycenie wodą związaną może wynosić 15–30%. Ze względu na wysokie nasycenie wodą w strefie wytwarzanego magazynu w początkowej fazie zatłaczania gazu przepuszczalność względna gazu będzie stosunkowo niska. Zatem w trakcie pierwszego zatłaczania gazu ciśnienie tłoczenia będzie wyższe od maksymalnego ciśnienia wytwarzanego w normalnych w cyklach magazynowania gazu. W miarę powiększania powierzchni kontaktu gazu z wodą ciśnienie wymagane do wypierania wody nieznacznie zmniejsza się z chwilą wytworzenia wokół odwiertu tzw. poduszki gazowej. Zatłaczany do magazynu gaz jest gazem suchym. Gaz ten kontaktując się z wodą, nasycy się nią stopniowo i osusza skałę wokół odwiertów eksploatacyjnych. Zmniejszające się nasycenie wodą z kolei powoduje wzrost objętości porowej dostępnej dla gazu, a także przyczynia się do wzrostu przepuszczalności efektywnej gazu, co z kolei przekłada się na większe wydajności zatłaczania i odbioru gazu z PMG.

W trakcie wytwarzania magazynu zatłaczany do złoża gaz wypiera wodę i w wyniku różnicy gęstości gromadzi się w strefie przystropowej złoża. W złożach niejednorodnych gaz w trakcie zatłaczania będzie się przemieszczał w strefach o największej przepuszczalności, pozostawiając za frontem wypierania wodę w strefach o niższej przepuszczalności. W fazie odbioru gaz ten może zostać odcięty przez wodę. Budowa magazynu gazu w warstwie wodonośnej wiąże się z koniecznością wytworzenia bufora gazowego, tj. zatłoczenia pewnej ilości gazu, która na stałe pozostanie w złożu. Odzyskanie tego gazu nie jest już możliwe.

Fazy wytwarzania PMG w warstwach wodonośnych pokazano na rysunku 2.2. W fazie początkowej (rys. 2.2a) gaz przepływa strefami o największej przepuszczalności. Ze względu

na wyższą przepuszczalność poziomą gaz może się przemieszczać na znaczne odległości do sąsiednich odwiertów oddalonych nawet o kilkaset metrów. W późniejszej fazie (rys. 2.2b) następuje dalsza propagacja strefy nasycenia gazem i powstawanie kolejnych stref. W fazie końcowej (rys. 2.2c) ma miejsce łączenie się stref o różnej przepuszczalności w kierunku pionowym i rozdział grawitacyjny faz w wyniku różnicy gęstości wody i gazu. Gaz przemieszcza się ku szczytowi struktury, a woda wypierana jest w dół struktury. W tym etapie wokół odwiertów tłoczących wytwarza się poszerzona strefa nasycenia gazem – poduszka gazowa [20].

Do zalet tej formy magazynowania należy zaliczyć stosunkowo dużą ilość struktur zawodnionych znajdujących się blisko dużych odbiorców końcowych oraz duże potencjalne pojemności magazynowe. Wady magazynów w warstwach wodonośnych to przede wszystkim duże ryzyko nieuszczelnienia struktury, wysokie koszty prac poszukiwawczych i rozpoznawczych, wysokie koszty operacyjne związane z wydobyciem i utylizacją wody, a także konieczność utworzenia bufora gazowego.



**Rys. 2.2.** Etapy wytwarzania magazynu gazu w warstwach wodonośnych [19].  
 Faza: a) początkowa; b) późniejsza; c) powstawania poduszki gazowej

## 2.4. Magazyny gazu w wyrobiskach górniczych

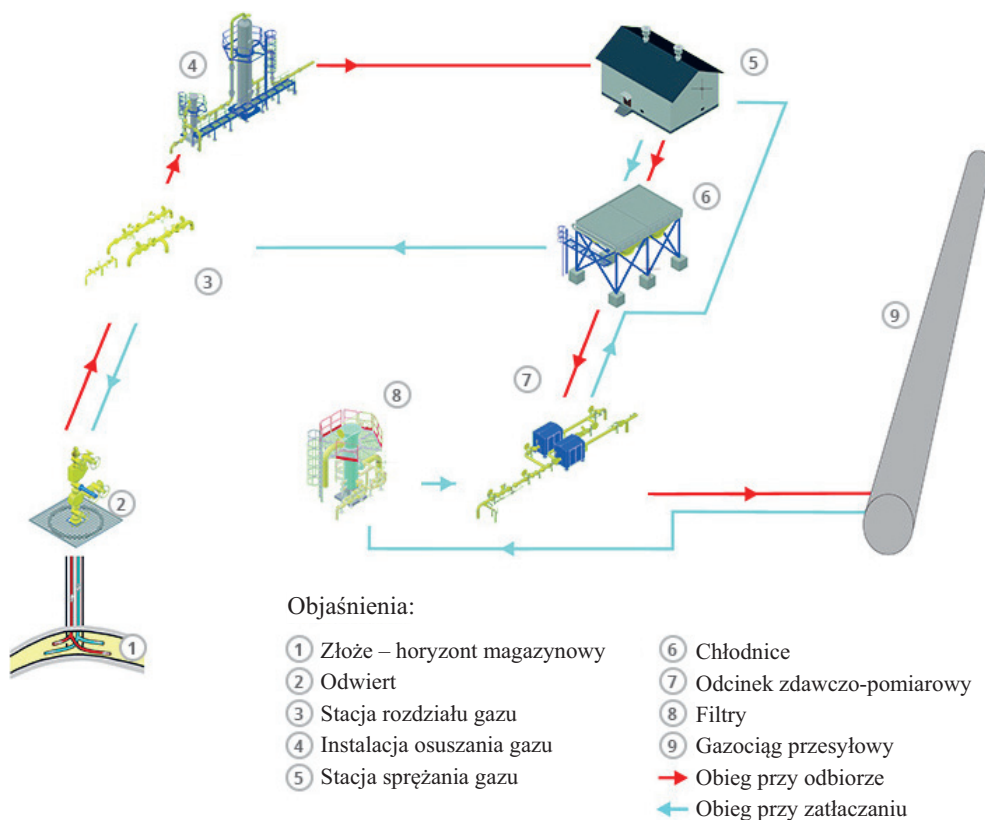
Inną możliwością, zamiast budowy nowych magazynów gazu, jest wykorzystanie wyrobisk górniczych po wydobytym węglu czy też soli na magazyny gazu. Zaadaptowanie tego typu obiektów na PMG wymaga przede wszystkim uzyskania odpowiedniego stopnia szczelności wyrobisk, tak aby nie dochodziło do strat gazu w trakcie jego magazynowania. Przekształcenie kopalni węgla na PMG może być przeprowadzone po spełnieniu dwóch podstawowych warunków. Pierwszy polega na właściwym odizolowaniu magazynu od powierzchni terenu (szczelność pionowa) oraz odizolowaniu od sąsiednich kopalń (szczelność pozioma). Drugim jest zabezpieczenie magazynu przed zawodnieniem [21]. Zbyt duży dopływ wody do wyrobisk będzie powodował zmniejszenie pojemności magazynowej, a także ograniczał zdolności sorpcyjne węgla. Uzyskanie szczelności wyrobisk górniczych zasadniczo może być zrealizowane na dwa sposoby. Pierwszy bazuje na zmniejszeniu przepuszczalności górotworu wokół wyrobiska, natomiast drugi na wytworzeniu bariery hydrodynamicznej. W celu obniżenia przepuszczalności warstw nadkładu można zastosować np. zamrażanie skał otaczających, włączanie zaczynów cementowych w szczeliny i spękania wokół wyrobiska, tworzenie obudów i osłon ścian wyrobiska. Kolejnym istotnym elementem jest uszczelnienie szybów górniczych, które realizowane jest wielostopniowo przez wykonanie kilku korków cementowych o wysokości kilku bądź kilkunastu metrów i o nieco większej średnicy niż sam szyb górniczy. Przestrzeń pomiędzy korkami cementowymi wypełniana jest materiałem uszczelniającym na bazie ilitu.

Pojemność tego typu magazynów jest funkcją dwóch głównych parametrów, objętości wyrobiska oraz sorpcji metanu w węglu. Możliwa do zmagazynowania ilość gazu będzie wówczas zależna od wartości ciśnienia w PMG. Magazynowanie gazu w wyrobiskach górniczych może być prowadzone przy ciśnieniach niskich (poniżej 1 MPa) lub wysokich (powyżej 1 MPa). Wielkość ciśnienia determinowana jest uwarunkowaniami geologicznymi i technicznymi. W przypadku magazynowania gazu w wyrobisku otoczonym górotworem naturalnie nasyconym wodą ciśnienie magazynowanego gazu nie powinno przewyższać wartości tzw. ciśnienia przebiccia, które przyjmowane jest na poziomie 65–70% ciśnienia hydrostatycznego panującego na danej głębokości. W latach 1995–2000 prowadzone były analizy możliwości wytworzenia PMG w polu Słupiec będącym częścią kopalni Nowa Ruda. Objętość geometryczna całego wyrobiska obejmująca wyrobiska korytarzowe, zroby poeksploatacyjne oraz pozostałe w złożu resztki węgla została oszacowana na poziomie 7,6–12,5 mln m<sup>3</sup>. Przyjmując ciśnienie magazynowania gazu na poziomie 1 MPa, określono możliwą do zmagazynowania ilość gazu w przedziale 76–125 mln Nm<sup>3</sup> (bez sorpcji w węglu). Przy uwzględnieniu gazu, jaki zaadsorbowałby się w węglu, pojemność tego magazynu oszacowano na poziomie 190–240 mln Nm<sup>3</sup> [22].

## 2.5. Proces zatłaczania i odbioru gazu z PMG

Podziemne magazynowanie gazu polega na cyklicznym zatłaczaniu i odbieraniu gazu z magazynu. W związku z czym ilość gazu znajdującego się w PMG podlega zmianom w cyklu rocznym czy też miesięcznym. Prowadzi to do zróżnicowania parametrów takich jak ciśnienie, zdolność zdawcza czy zdolność odbiorcza magazynu. Parametry te zależą od

czynników geologicznych, technicznych oraz fazy pracy, w jakiej znajduje się PMG. Prawidłowa praca podziemnego magazynu gazu wymaga poza odpowiednią formacją geologiczną i odwiertami wykorzystania wielu specjalistycznych urządzeń napowierzchniowych. Jest to związane z koniecznością wygenerowania odpowiednio wysokiego ciśnienia zatłaczanego gazu, co poza sprężarkami wymaga pośredniego jego schładzania. Gaz w fazie odbioru magazynu musi zostać poddany osuszaniu, dodatkowo gaz zarówno opuszczający instalację PMG, jak i wprowadzany do niej przepływa przez odcinek zdawczo-pomiarowy [23]. Poglądowy schemat procesu zatłaczania i odbioru gazu z PMG pokazano na rysunku 2.3.



Rys. 2.3. Schemat zatłaczania/odbioru gazu z PMG [2]

Powierzchniowa instalacja PMG ma na celu przygotowanie gazu w fazach zatłaczania i odbioru. Zagospodarowanie tej części składa się z instalacji technologicznych i pomocniczych. W przypadku zatłaczania, gaz pobrany z gazociągu w pierwszej kolejności trafia do stacji filtrów (8), gdzie z gazu usuwane są zanieczyszczenia zarówno stałe, jak i ciekłe w celu uniknięcia uszkodzenia infrastruktury. Zarówno gaz pobierany z sieci, jak i do niej oddawany musi przepłynąć przez odcinek zdawczo-pomiarowy (7), gdzie dokonywany jest pomiar ilości przepływającego gazu.

Kolejnym etapem jest schładzanie gazu podgrzanego w procesie jego sprężania. Gaz schładzany jest w chłodnicach (6), tak aby temperatura gazu nie przekroczyła dopuszczalnej wartości (ok. 50°C). W kolejnym etapie gaz przepływa do stacji rozdziału (3), skąd kierowany jest na poszczególne odwierty. Rozdział strumienia gazu umożliwiają zawory regulacyjne zabudowane na każdym ciągu łączącym gazociągi złożowe z odwiertami. Ze stacji rozdziału gaz indywidualnymi rurociągami doprowadzony zostaje do głowic odwiertów (2).

Zatłaczany do PMG gaz nasyca się w złożu wodą (a czasami także gazowymi węglowodorami cięższymi). W fazie odbioru gazu woda i cięższe frakcje gazu ulegają kondensacji. Obecność wody w gazie jest szczególnie widoczna w przypadku magazynów gazu wytwarzanych w warstwach wodonośnych bądź w złożach wodnonaporowych, gdzie oprócz wody w postaci pary do odwiertów eksploatacyjnych może dopływać woda w stanie ciekłym (stożki i języki wodne). Wydobywany gaz zanim trafi do sieci przesyłowej poddawany jest najpierw wstępnej separacji wody (separator), po czym kierowany jest do kolektora odbiorczego (3). Następnie w stacji osuszania (4) zostaje poddany właściwemu osuszaniu na kolumnach adsorpcyjnych. Wilgoć usuwana jest z gazu zazwyczaj za pomocą TEG (trójetyloglikol), tak aby utrzymać zgodność jego punktu rosy z normą. Ze stacją osuszania współpracuje układ regeneracji TEG. Każda kolumna wyposażona jest w indywidualny układ regeneracji, natomiast dodatkowo w całej stacji jest jeden układ rezerwowy. W zależności od wielkości ciśnienia gazu odbieranego z PMG może on być kierowany do stacji sprężania gazu (5) bądź bezpośrednio przepływa na odcinek zdawczo-pomiarowy (7) i dalej oddawany jest do gazociągu przesyłowego (9).

Schemat zatłaczania i odbioru gazu z PMG będzie się zmieniał w zależności od zakresu ciśnień pracy PMG oraz ciśnienia w gazociągach, z których gaz jest zatłaczany lub do których gaz jest oddawany (magazyn sprężarkowy lub bezsprężarkowy).

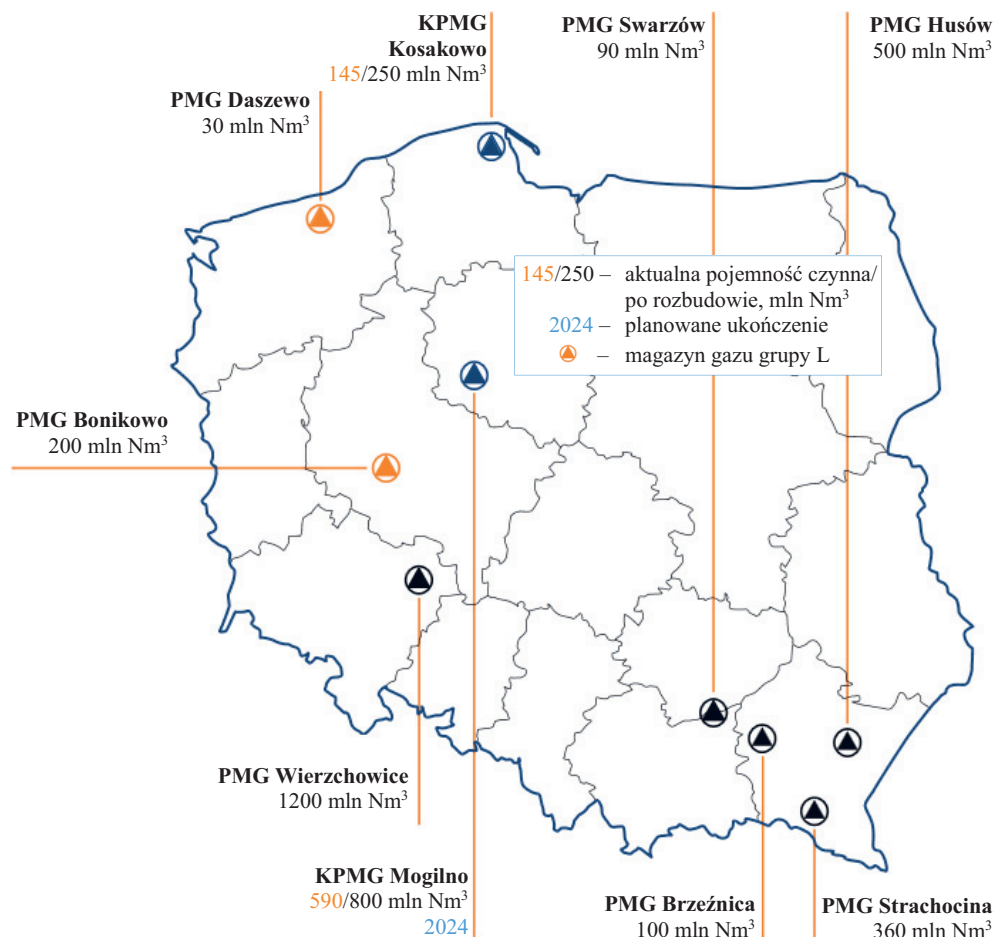
## 2.6. Charakterystyka podziemnych magazynów gazu w Polsce

Obecnie w Polsce eksploatowanych jest dziewięć podziemnych magazynów gazu. Dwa magazyny zostały zbudowane w kawernach solnych (KPMG Mogilno i KPMG Kosakowo), natomiast siedem pozostałych magazynów (PMG Wierzchowice, PMG Husów, PMG Strachocina, PMG Brzeźnica, PMG Swarzów, PMG Bonikowo i PMG Daszewo) zostało wytworzone w częściowo szcerpanych złożach gazu ziemnego lub ropy naftowej, z czego dwa – to magazyny gazu zaazotowanego grupy L (PMG Bonikowo i PMG Daszewo). Lokalizację oraz wielkości pojemności czynnych tych magazynów pokazano na mapie zamieszczonej na rysunku 2.4.

### PMG Wierzchowice

PMG Wierzchowice został utworzony w częściowo szcerpanym złożu gazu ziemnego zaazotowanego grupy Ls zalegającym na głębokości od 1500 m do 1600 m. Początkowe zasoby gazu w złożu wynosiły 11,9 mld Nm<sup>3</sup>, z czego w trakcie eksploatacji ze złoża wydobyto 7,8 mld Nm<sup>3</sup> [24]. Magazynowanie gazu rozpoczęto w 1995 roku. W początkowym

etapie budowy magazyn uzyskał pojemność czynną na poziomie 600 mln Nm<sup>3</sup>. W 1997 r. w PMG Wierzchowice odwiercono pierwszy w Polsce pozytywny odwiert horyzontalny WM-A2H z odcinkiem poziomym o długości 450 m. Aktualnie po rozbudowie, w trakcie której zmodernizowano infrastrukturę powierzchniową oraz wykonano nowe odwierty horyzontalne, do magazynowania wykorzystywanych jest łącznie 12 odwiertów horyzontalnych oraz 12 zrekonstruowanych odwiertów pionowych. Od roku 2012 pojemność czynna magazynu wzrosła do 1,2 mld Nm<sup>3</sup> [25]. Maksymalna moc zatłaczania gazu do magazynu wynosi 6 mln Nm<sup>3</sup> na dobę, zaś odbiór gazu jest możliwy z wydajnością maksymalną równą 9,6 mln Nm<sup>3</sup> na dobę. Horyzont magazynowy tworzą utwory wapienia cechsztyńskiego i czerwonego spągowca. Średnia miąższość złoża wynosi 44 m. Przepuszczalność skał zmienia się w zakresie od 0,1 mD do 250 mD ze średnią wartością 38,4 mD. Z kolei porowatość zmienia się w zakresie od 3,65% do 13,4% [2].



Rys. 2.4. Podziemne magazyny gazu w Polsce [1]



### **PMG Husów**

Podziemny magazyn gazu Husów został wytworzony w horyzoncie XII złoża gazu Husów-Albigowa-Krasne. Horyzont magazynowy zbudowany jest głównie z piaskowców. Średnie parametry skał budujących złoża to: miąższość 48 m, przepuszczalność 369 mD i porowatość 21,3% [26]. Ciśnienie początkowe w złożu wynosiło 12,9 MPa, a zasoby nieco powyżej 2 mld Nm<sup>3</sup>. Eksploatację magazynu rozpoczęto w roku 1987, osiągając pojemność czynną na poziomie 350 mln Nm<sup>3</sup>. W roku 2013 przeprowadzona została rozbudowa magazynu, w trakcie której wykonano 12 nowych odwiertów kierunkowych, w wyniku czego uzyskano większą moc odbioru oraz pojemność czynną, która wynosi obecnie 500 mln Nm<sup>3</sup>. Łącznie do eksploatacji magazynu używanych jest 27 czynnych odwiertów pozwalających na odbiór gazu z maksymalną wydajnością 5,76 mln Nm<sup>3</sup> na dobę. Magazyn ten pracuje w warunkach aktywnej strefy wodonośnej.

### **PMG Strachocina**

PMG Strachocina utworzono w wyeksploatowanym złożu gazu ziemnego wysokometanowego w horyzontach piaskowcowych I i II zalegających na głębokości od 900 m do 1100 m. Magazynowanie gazu rozpoczęto w roku 1982. Początkowo magazynowanie gazu odbywało się bezsprężarkowo, co umożliwiło niskie ciśnienie złożowe wynikające z wysokiego stopnia szczypania zasobów złoża. Znacznie ograniczało to pojemność czynną, która wynosiła maksymalnie 150 mln Nm<sup>3</sup>, oraz szybkość opróżniania magazynu. Po zakończonej w 2011 r. rozbudowie, w trakcie której m.in. odwiercono osiem odwiertów horyzontalnych oraz wybudowano nową instalację powierzchniową ze stacją sprężarek, pojemność czynna magazynu wzrosła do 330 mln Nm<sup>3</sup>, a w kolejnych latach została zwiększona do 360 mln Nm<sup>3</sup> [27]. Aktualnie przy eksploatacji magazynu używa się 34 odwiertów pionowych oraz 8 horyzontalnych. Maksymalna moc zatłaczania wynosi 2,64 mln Nm<sup>3</sup> na dobę, zaś odbioru 3,36 mln Nm<sup>3</sup> na dobę.

### **PMG Brzeźnica**

Eksploatację PMG Brzeźnica rozpoczęto w 1979 roku. Magazyn ten został wytworzony w horyzoncie II złoża gazu Brzeźnica zalegającym na głębokości 380–405 m. Pierwotne ciśnienie w złożu wynosiło 4,21 MPa [26]. Początkowa pojemność czynna magazynu wynosiła 65 mln Nm<sup>3</sup>, a zdolność zatłaczania i odbioru gazu była na poziomie 1 mln Nm<sup>3</sup> na dobę. Po rozbudowie w roku 2016 jego pojemność wzrosła do 100 mln Nm<sup>3</sup>, a moc zatłaczania i odbioru wynosi aktualnie 1,44 mln Nm<sup>3</sup> na dobę [2].

### **PMG Swarzędz**

PMG Swarzędz jest magazynem wytworzonym w częściowo szczypanym złożu gazu, którego początkowe zasoby złoża wynosiły 320 mln Nm<sup>3</sup>, przy ciśnieniu 7,65 MPa. Po wydobyciu 73% zasobów złoża w roku 1979 rozpoczęto magazynowanie gazu. Magazynowanie gazu przebiega w zakresie ciśnień złożowych od 4,5 MPa do 7,3 MPa. Pojemność czynna magazynu wynosi 90 mln Nm<sup>3</sup>, przy buforze na poziomie 111 mln Nm<sup>3</sup>. Maksymalna moc zatłaczania to 1 mln Nm<sup>3</sup> na dobę, natomiast moc odbioru jest nieco niższa – na poziomie 0,93 mln Nm<sup>3</sup> na dobę.

## KPMG Mogilno

KPMG Mogilno położony jest na obszarze województwa kujawsko-pomorskiego. KPMG Mogilno powstał w obrębie wysadu soli kamiennej Mogilno w złożu soli kamiennej Mogilno II. Jest to magazyn gazu wysokometanowego i składa się z 14 eksploatowanych kawern. Jego eksploatacja rozpoczęła się w 1997 roku, a na rok 2027 planowane jest zakończenie rozbudowy magazynu. Pojemność czynna wynosi aktualnie 590 mln Nm<sup>3</sup>, maksymalna moc zatłaczania 9,6 mln Nm<sup>3</sup> na dobę, a maksymalna moc odbioru 18 mln Nm<sup>3</sup> na dobę. Docelowo planuje się uzyskanie pojemności czynnej na poziomie 800 mln Nm<sup>3</sup>, przy mocy odbioru wynoszącej 28,8 mln Nm<sup>3</sup> na dobę [2].

## KPMG Kosakowo

KPMG Kosakowo jest drugim kawernowym magazynem gazu wysokometanowego budowanym w Polsce. Budowę tego magazynu rozpoczęto w roku 2014, a zakończenie planowane jest na rok 2022. Obecnie magazyn składa się z pięciu eksploatowanych kawern, natomiast kolejne pięć kawern jest w trakcie budowy. Kawerny ługowane są w pokładzie soli kamiennej o miąższości w przedziale 170–200 m, zalegającym na głębokości ok. 970 m poniżej powierzchni terenu. Aktualna pojemność czynna magazynu wynosi 145 mln Nm<sup>3</sup>, maksymalna moc zatłaczania 2,4 mln Nm<sup>3</sup> na dobę, a maksymalna moc odbioru to 9,6 mln Nm<sup>3</sup> na dobę. Docelowa pojemność czynna tego magazynu będzie wynosić 250 mln Nm<sup>3</sup>.

Aktualne maksymalne zdolności magazynowe wszystkich magazynów gazu wykorzystywanych na potrzeby systemu przesyłowego gazu w Polsce pokazano w tabeli 2.1.

**Tabela 2.1**

Maksymalne zdolności magazynowe magazynów systemowych w sezonie 2018/19 [2]

Magazyn	Pojemność czynna [mln Nm <sup>3</sup> ]	Maksymalna moc zatłaczania [mln Nm <sup>3</sup> na dobę]	Maksymalna moc odbioru [mln Nm <sup>3</sup> na dobę]
KPMG Mogilno	590	9,60	18,00
KPMG Kosakowo	145,5	2,40	9,60
PMG Wierzchowice	1 200	6,00	9,60
PMG Husów	500	4,15	5,76
PMG Strachocina	360	2,64	3,36
PMG Brzeźnica	100	1,44	1,44
PMG Swarzędz	90	1,00	0,93
Suma	2 985,5	27,23	48,69

Łączna pojemność wszystkich magazynów gazu wysokometanowego wynosi blisko 3 mld Nm<sup>3</sup>. Maksymalne sumaryczne moce zatłaczania i odbioru wynoszą odpowiednio: 27,23 mln Nm<sup>3</sup> na dobę oraz 48,69 mln Nm<sup>3</sup> na dobę. Sumaryczna maksymalna moc odbioru gazu z obydwu magazynów kawernowych wynosi 27,6 mln Nm<sup>3</sup> na dobę, co daje 56% mocy z wszystkich magazynów. Z kolei maksymalna moc zatłaczania do magazynów



kawernowych stanowi 44% mocy zatłaczania wszystkich magazynów. Tak więc magazyny te mogą w znacznie krótszym czasie oddawać lub pobierać gaz z systemu przesyłowego i są doskonałym narzędziem pokrywania nierównomierności szczytowych zapotrzebowania na gaz, zwłaszcza w sezonie zimowym.

Wobec wzrastającego zużycia gazu w Polsce oraz pogłębiających się nierównomierności w zapotrzebowaniu konieczna będzie dalsza rozbudowa istniejących magazynów bądź budowa nowych. Spośród istniejących magazynów największe możliwości zwiększenia pojemności czynnej mają: PMG Wierzchowice – 3,5 mld Nm<sup>3</sup>, PMG Strachocina – 1,2 mld Nm<sup>3</sup>, KPMG Kosakowo – 500 mln Nm<sup>3</sup>.

### **PMG Bonikowo**

PMG Bonikowo jest magazynem gazu wykorzystywanym na potrzeby optymalizacji wydobycia gazu ze złóż zaazotowanego grupy Lw na Niżu Polskim. Magazyn został włączony do eksploatacji w roku 2010. Pojemność czynna magazynu wynosi 200 mln Nm<sup>3</sup>, zaś pojemność buforowa ok. 330 mln Nm<sup>3</sup> [26]. Magazyn jest eksploatowany przez dwa odwierty (pionowy i poziomy), które pozwalają uzyskać wydajność odbioru na poziomie 100 tys. Nm<sup>3</sup>/h [24], natomiast moc zatłaczania wynosi 70 tys. Nm<sup>3</sup>/h. Rozważana jest dalsza rozbudowa tego magazynu przez odwiercenie kolejnego odwiertu horyzontalnego i uzyskanie pojemności czynnej na poziomie 300 mln Nm<sup>3</sup>.

### **PMG Daszewo**

Podziemny magazynem gazu w Daszewie jest jedynym magazynem w Polsce wytworzonym w sczerpanym złożu ropy. Jest to magazyn o znaczeniu lokalnym i podobnie jak PMG Bonikowo jest wykorzystywany do optymalizacji wydobycia gazu ze złóż gazu zaazotowanego oraz zasilania gazem grupy Ls odbiorców rejonu Koszalina. Pojemność czynna tego magazynu wynosi 30 mln Nm<sup>3</sup>, a maksymalna moc odbioru 0,38 mln Nm<sup>3</sup> na dobę [26].

### 3. Magazynowanie gazu w częściowo szcerpanych złożach gazu

Magazynowanie gazu w częściowo szcerpanych złożach gazu ziemnego polega na przekształceniu eksploatowanego dotychczas złoża na magazyn gazu, do/i z którego zataczany i odbierany jest cyklicznie gaz. Gaz, jaki pozostaje w złożu po okresie eksploatacji, stanowi zwykle wyjściową wielkość pojemności buforowej magazynu. W zależności od wielkości złoża oraz ilości pozostałego po eksploatacji gazu bufor ten może być uzupełniony, bądź częściowo szcerpany. Pojemność buforowa magazynu powinna wynosić co najmniej 50% pojemności całkowitej PMG, na którą składa się suma gazu buforowego i roboczego (pojemność czynna). Ze względu na znaczny stopień szcerpania złóż zwykle w fazie budowy magazynu następuje uzupełnienie pojemności buforowej. Ma to na celu podniesienie ciśnienia złożowego niezbędnego do uzyskania wymaganej wydajności odbioru gazu z PMG, a także pozwala zwiększyć pojemność czynną magazynu. Ograniczeniem w powiększaniu pojemności czynnej magazynu jest maksymalne ciśnienie w PMG, które zasadniczo nie powinno przekraczać początkowego ciśnienia złożowego. Magazyny gazu wytwarzane w częściowo szcerpanych złożach gazu, jak wspomniano wcześniej, mają wiele zalet, jednakże nie oznacza to, że każde złożo gazu nadaje się na podziemny magazyn. Złożo gazu przeznaczone na PMG musi spełniać szereg różnych kryteriów, do których należą [28]:

- szczelność nadkładu – istnienie nieprzepuszczalnych warstw skał nadkładu uniemożliwiających migrację gazu w wyższe partie górotworu;
- ciągłość i integralność struktury geologicznej – brak uskoków i innych nieciągłości;
- dobre parametry petrofizyczne skały zbiornikowej: przepuszczalność, porowatość, miąższość;
- stosunkowo niewielki stopień szcerpania – brak konieczności uzupełniania pojemności buforowej magazynu;
- znane położenie konturu wodnego, tj. umownej granicy między strefą gazową a strefą zajęta przez wodę złożową; kontur ten powinien być konturem zamkniętym;
- dobre rozwiercenie złoża oraz dobry stan techniczny istniejących odwiertów;
- korzystne położenie względem systemu istniejących gazociągów – zasilających i odbiorczych (magazyny powinny być w miarę możliwości zlokalizowane niedaleko dużych ośrodków miejskich, przemysłowych oraz istniejącego już systemu przesyłowego);
- skład gazu rodzimego nie powinien zbyt odiegać od gazu zatłaczanego (mieszanie się gazu w złożu powoduje obniżenie wartości kalorycznej gazu odbieranego z magazynu);
- dobra i pełna dokumentacja geologiczna oraz eksploatacyjna.

Złoże gazu analizowane pod kątem magazynowania gazu musi ponadto mieć odpowiednio dużą pojemność, tak aby możliwe było wytworzenie magazynu o wymaganej pojemności czynnej i buforowej. Z drugiej strony jego pojemność nie powinna być zbyt duża ze względu na konieczność uzupełnienia poduszki gazowej, co może powodować, że projekt będzie nieekonomiczny.

Kolejnym istotnym parametrem charakteryzującym magazyn gazu jest moc zatłaczania i odbioru gazu, co wiąże się bezpośrednio z przepustowością i liczbą odwiertów eksploatacyjnych. Na wydajność odwiertów eksploatacyjnych wpływ mają nie tylko parametry złożowe, takie jak porowatość, miąższość czy przepuszczalność, które są bardzo ważne ze względu na przepływ gazu w złożu, ale także konstrukcja i wyposażenie wgłębne odwiertu. Prędkości przepływu gazu zarówno w fazie zatłaczania, jak i odbioru gazu z PMG mogą być kilkukrotnie wyższe, niż ma to miejsce w trakcie eksploatacji złoża. Ilości gazu zatłaczanego i odbieranego w jednym cyklu magazynowania trwającym średnio 4–5 miesięcy często odpowiadają ilości gazu wydobytego ze złoża w ciągu kilku, a nawet kilkunastu lat. Celem ograniczenia strat ciśnienia na przepływie gazu w złożu i w odwiercie, a tym samym zwiększenia wydajności zatłaczania i odbioru gazu, stosuje się coraz częściej odwierty horyzontalne wyposażane w rury wydobywcze o większych średnicach.

Większość magazynów gazu wytwarzanych w częściowo szcerpanych złożach gazu ziemnego pracuje w warunkach stałej objętości porowej (warunki wolumetryczne), w których zmiana ciśnienia złożowego jest proporcjonalna do ilości gazu znajdującego się w magazynie. Jednakże magazynowanie gazu z powodzeniem realizowane jest także w złożach z aktywną strefą wodonośną (złoża niewolumetryczne) w postaci wody okalającej czy też podścielającej. W trakcie magazynowania w złożu ma wówczas miejsce przemieszczanie się znacznych ilości wody do złoża i na zewnątrz złoża w zależności od fazy pracy magazynu. W fazie odbioru gazu następuje wówczas ruch wody do wewnątrz złoża, z kolei w fazie zatłaczania woda jest wypierana z przestrzeni porowej magazynu na zewnątrz złoża. W zależności od wielkości strefy wodonośnej, jej aktywności oraz własności petrofizycznych skały (zwłaszcza stopnia niejednorodności skały), a także tempa i ilości zatłaczanego/odbieranego z PMG gazu zależec będzie szybkość i charakter przemieszczania się wody w złożu. W niekorzystnych uwarunkowaniach może dochodzić do przebijania się wody do odwiertów eksploatacyjnych, szczególnie w końcowym stadium odbioru gazu z PMG. Woda przebija się wówczas przez gaz buforowy strefami o wyższej przepuszczalności i dociera do odwiertów eksploatacyjnych w postaci stożków lub języków wodnych. Niewielki dopływ wody do odwiertów eksploatacyjnych nie jest większym problemem, gdyż jest ona na bieżąco wynoszona wraz z gazem. Niebezpiecznym zjawiskiem jest natomiast podciągnięcie wody na tyle blisko perforacji odwiertu, że może nastąpić jego zawodnienie. Z drugiej strony dopływająca do złoża woda powoduje podtrzymanie ciśnienia złożowego, tym samym wymagana wielkość gazu buforowego może być mniejsza. Istnieje zatem konieczność określenia takiej wielkości bufora, który z jednej strony będzie zabezpieczał odwierty eksploatacyjne przed przebiciem wody, a z drugiej utrzymywał ciśnienie na wymaganym poziomie.

### **3.1. Szczelność magazynu gazu**

Powstanie złoża węglowodorów wiąże się nierozdzielnie z istnieniem pułapki geologicznej, utworzonej przez skały zbiornikowe oraz skały uszczelniające, których kształt

i konfiguracja umożliwiają nagromadzenie się w niej węglowodorów. Skały zbiornikowe mają wiele cech umożliwiających z jednej strony akumulację w nich węglowodorów, a z drugiej filtrację płynów złożowych. Zasadniczym elementem pułapki są skały uszczelniające zalegające bezpośrednio nad skałą zbiornikową. Ich podstawowymi cechami są bardzo niska przepuszczalność i plastyczność. Skałami uszczelniającymi są m.in. ility, łupki ilaste oraz ewaporaty. Akumulacja węglowodorów w pułapkach następuje wskutek zamknięcia drogi migracji węglowodorów przez barierę kapilarną utworzoną przez skały uszczelniające pułapkę. Szczelność tej bariery zależy od rodzaju i miąższości skał nadkładu oraz typu litologicznego skał [29]. Pomimo że złoża gazu mają potwierdzoną zdolność do zatrzymywania i akumulacji węglowodorów, nie oznacza to, że przekształcone na podziemny magazyn gazu tę zdolność zachowują. Powodów, dla których szczelność struktury zostaje utracona, może być kilka, należą do nich [15, 30, 31]:

- przesyfonowanie struktury, w wyniku czego następuje ucieczka gazu do przyległych struktur geologicznych;
- rozszczelnienie odwiertów przez nieprawidłowe zacementowanie odwiertu, a także korozję rur i płaszcza cementowego;
- rozszczelnienie struktury wskutek reaktywacji uskoków i naturalnie występujących nieciągłości struktury w postaci szczelin;
- pokonania sił kapilarnych występujących w skałach nadkładu w wyniku przewyższenia ciśnienia ponad pierwotne;
- dyfuzja gazu przez skały nadkładu.

Skały nadkładu są niezbędnym, ale jednocześnie najslabiej rozpoznany elementem geologicznym podziemnych magazynów gazu. Stanowią one barierę migracji węglowodorów w ośrodku porowatym. Szczelne skały nadkładu charakteryzują się odpowiednio dużą miąższością, poprzeczną ciągłością, plastycznością oraz niską porowatością i przepuszczalnością. Ucieczki węglowodorów ze złóż mogą występować przez istniejące mikrokanaly porowe lub szczeliny w skałach nadkładu. Uszczelnienie membranowe jest związane z migracją węglowodorów przez kanały porowe, natomiast uszczelnienie hydrauliczne warunkowane jest przepływem gazu w szczelinach otwartych przez ciśnienie złożowe [32]. Badania szczelności membranowej skał nadkładu polegają na określeniu ciśnienia kapilarnego, tj. ciśnienia przy którym membrana staje się nieszczelna. Badania te przeprowadzane są zwykle w warunkach laboratoryjnych na próbkach skał nadkładu z wykorzystaniem metod porozymetrii rtęciowej. Z kolei szczelność hydrauliczną skał nadkładu określa się, wykonując próby szczelności w odwiertach. Polegają one na określeniu ciśnienia, przy którym bariera hydrauliczna staje się nieszczelna.

Jakkolwiek skały uszczelniające można rozpatrywać jako naturalną barierę dla migracji węglowodorów, to nie oznacza, że są one całkowicie nieprzepuszczalne. Z migracją węglowodorów przez uszczelniające skały nadkładu związane są dwa główne mechanizmy: dyfuzja molekularna przez nasycone wodą kanały porowe skał uszczelniających oraz powolny przepływ ściślej fazy gazowej wynikający z prawa Darcy'ego. Dyfuzja molekularna jest procesem powolnym i może być rozpatrywana jedynie w skali czasu geologicznego, tj. dziesiątek milionów lat. Natomiast przepływ konwekcyjny wynikający z prawa Darcy'ego zależy przede wszystkim od warunków geologicznych i hydrodynamicznych systemu, jakim jest układ złożo–skały uszczelniające, jak również własności płynów zarówno w złożu, jak

i w skałach uszczelniających. Powolny przepływ zgodny z prawem Darcy’ego ma miejsce, gdy różnica ciśnień pomiędzy stropem i spągami skał uszczelniających jest wystarczająco duża, aby pokonać siły kapilarne na granicy faz, tj. fazy zwilżającej (woda), którą nasycone są skały uszczelniające, oraz fazy niezwilżającej (gaz, ropa) wypełniającej przestrzeń porową złoża.

### 3.1.1. Utrata szczelności skał nadkładu wskutek pokonania ciśnienia kapilarnego

Zdolność skał nadkładu do uszczelnienia złoża jest determinowana przez minimalne ciśnienie wymagane do wyparcia wody z kanałów porowych i tym samym umożliwiającym migrację węglowodorów przez uszczelniające skały stropowe. Biorąc pod uwagę uszczelnienie membranowe, należy zauważyć, że nie jest istotna miąższość skał nadkładu, lecz wielkość ciśnienia kapilarnego oraz średnica kanałów łączących poszczególne pory skały. W warunkach hydrostatycznych siłami działającymi na węglowodory w skale nasyconej wodą są z jednej strony siły wyporu, a z drugiej siły kapilarne. Siły wyporu hydrostatycznego zależne są od różnicy gęstości wody i węglowodorów. Im większa różnica gęstości, tym większa siła wyporu słupa węglowodorów o danej wysokości. Z kolei siły kapilarne związane są ze zwilżalnością skały, średnicą przewężeń kanałów porowych skały oraz napięciem powierzchniowym na granicy węglowodorów i wody. Zdolność uszczelnienia skał nadkładu wzrasta ze wzrostem napięcia powierzchniowego oraz maleje ze spadkiem zwilżalności skał oraz zmniejszaniem średnicy przewężeń porowych [33].

Jak wspomniano wcześniej, szczelność nasyconych wodą skał nadkładu wynika z istnienia ciśnienia kapilarnego w porach skały. W momencie gdy ciśnienie w złożu przewyższy tzw. kapilarne ciśnienie przebicia (ang. *breakthrough pressure*), tj. ciśnienie przy którym następuje ciągły przepływ fazy niezwilżającej w systemie kapilar skał nadkładu, wówczas węglowodory zaczną migrować przez skały uszczelniające, przez co struktura złoża staje się nieszczelna. Ciśnienie kapilarne definiowane jest jako różnica ciśnień pomiędzy dwoma niemieszającymi się płynami w ośrodku porowatym i opisywane jest zależnością:

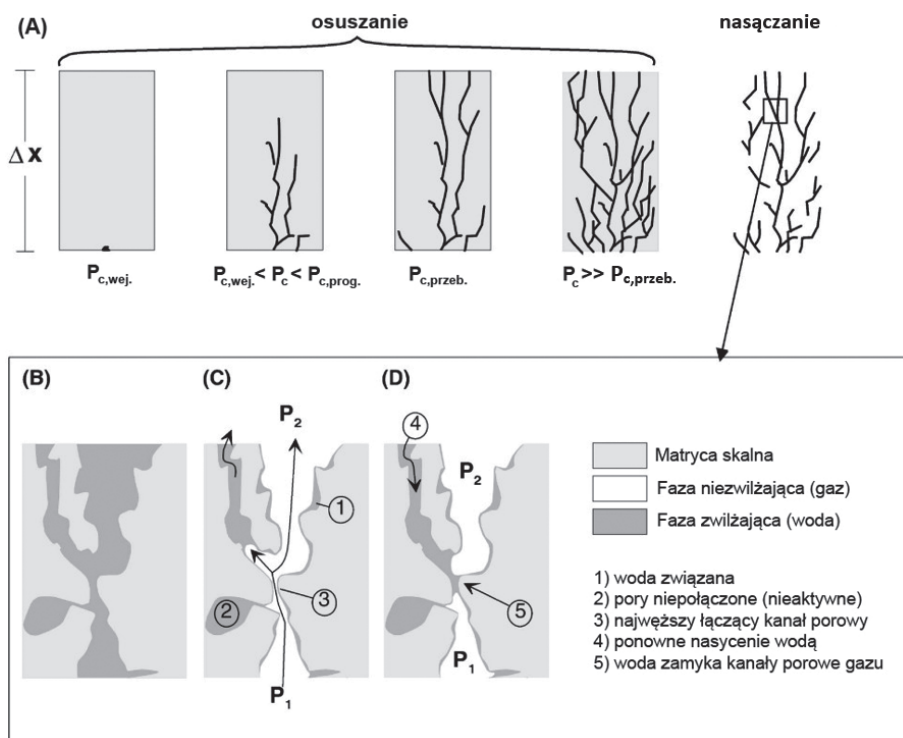
$$P_c = P_{mw} - P_w = \frac{2 \cdot \sigma}{r} \cdot \cos \theta \quad (3.1)$$

Z powyższego równania wynika, że ciśnienie przebicia jest wprost proporcjonalne do napięcia powierzchniowego na granicy faz niezwilżającej i zwilżającej oraz odwrotnie proporcjonalne do promienia kanału porowego. Kąt kontaktu jako miara zwilżalności skały jest także istotnym czynnikiem wpływającym na wielkość ciśnienia kapilarnego.

W przypadku gdy różnica ciśnień pomiędzy fazą niezwilżającą i fazą zwilżającą przekroczy ciśnienie kapilarne w danym kanale porowym, tj. gdy  $P_{mw} - P_w > P_c$ , płyn niezwilżający będzie przemieszczał się wzdłuż kanału do momentu, gdy dotrze do kolejnego przewężenia kanału porowego o mniejszej średnicy. Z chwilą gdy różnica ciśnień w przekroju skały uszczelniającej przekroczy ciśnienie kapilarne serii połączonych kanałów, powstaje wówczas ciągła struga fazy niezwilżającej i w konsekwencji następuje powolny (zgodny z prawem Darcy’ego) przepływ fazy niezwilżającej przez skałę uszczelniającą. Ta wartość różnicy ciśnień jest ciśnieniem przebicia  $P_{c, przeb}$  (ang. *breakthrough pressure*).

Proces przebicia fazy niezwilżającej (węglowodory) przez nasycone fazą zwilżającą (woda) nadległe skały uszczelniające można podzielić na pewne etapy, którym odpowiada określona wartość ciśnienia płynu niezwilżającego. Przebieg procesu kapilarnego przebicia węglowodorów w nasyconym wodą ośrodku porowatym pokazano na rysunku 3.1 (A).

W początkowym stadium, gdy ciśnienie płynu niezwilżającego wzrasta powyżej tzw. kapilarnego ciśnienia wejścia,  $P_{c, wej}$  (ang. *capillary entry pressure*) ma miejsce częściowe nasylenie skały tym płynem. Kapilarne ciśnienie wejścia nazywane także ciśnieniem progowym  $P_{c, prog}$  (ang. *threshold pressure*) jest ciśnieniem, powyżej którego następuje wyparcie fazy zwilżającej z kanałów porowych o największej średnicy znajdujących się na granicy faz [34]. Przekroczenie tej charakterystycznej wartości ciśnienia rozpoczyna migrację fazy niezwilżającej do systemu porowego skały uszczelniającej, ale nie następuje jeszcze przepływ fazy niezwilżającej. Dalszy wzrost ciśnienia płynu niezwilżającego powoduje otwieranie kolejnych, mniejszych, kanałów porowych, wypieranie fazy zwilżającej i wzrost nasylenia płynu niezwilżającego w systemie porowym. W trakcie tego etapu ciśnienie gazu jest wyższe od ciśnienia kapilarnego wejścia, ale nadal niższe od ciśnienia przebicia ( $P_{c, wej} < P_c < P_{c, przeb}$ ). Gdy ciśnienie fazy niezwilżającej wzrośnie powyżej ciśnienia przebicia, faza zwilżająca zostaje wyparta z przestrzeni porowej skały w stopniu umożliwiającym powstanie połączonych ścieżek przepływu w całym przekroju skały uszczelniającej (rys. 3.1 (A) i (C)).



**Rys. 3.1.** Mechanizm procesu kapilarnego przebicia węglowodorów przez uszczelniające skały nadkładu. (A) – etapy przebicia kapilarnego, (B) – początkowe nasylenie wodą, (C) – przebicie gazu, (D) – nasączenie wodą [35]

Połączone ścieżki przepływu płynu niezwilżającego obejmują wówczas kanały porowe o największej średnicy, gdzie opory wypierania kapilarnego faz są najmniejsze. W tym stadium przepływ fazy niezwilżającej będzie obejmował jedynie niewielką część połączonych kanałów porowych. Przy dalszym wzroście ciśnienia powstają kolejne ścieżki przepływu, co powoduje wzrost nasycenia i przepuszczalności efektywnej fazy niezwilżającej. W rezultacie następuje zmiana charakteru przepływu z kapilarnego w lepkościowy (przepływ Darcy'ego).

Ciśnienie przebiccia jest ważnym parametrem oceny zdolności uszczelniania skał uszczelniających złoża węglowodorów. Należy jednak podkreślić różnicę między ciśnieniem kapilarnym wejścia (czy też ciśnieniem progowym) a ciśnieniem przebiccia. Pierwsze jest miarą średnicy największego pora na powierzchni próbki skalnej w danych warunkach zwilżalności skały i napięcia powierzchniowego płynów. Drugie określa warunki, przy których następuje ciągły przepływ węglowodorów przez nadległe skały uszczelniające [36].

Po przebicciu się gazu w wyniku istniejącej różnicy ciśnień ma miejsce ciągły przepływ gazu (fazy niezwilżającej), który jest funkcją przepuszczalności efektywnej tej fazy.

Obniżenie ciśnienia fazy niezwilżającej po przebicciu gazu będzie z kolei prowadzić do ponownego nasączenia (ang. *re-imbibition*) skały fazą zwilżającą, począwszy od porów o najmniejszej średnicy i obejmując pory o coraz większych średnicach. Stopniowe zamykanie kanałów przepływu gazu skutkuje zmniejszaniem przepuszczalności efektywnej fazy niezwilżającej. Ostatecznie następuje zamknięcie drogi przepływu ostatniego połączonego kanału porowego, co prowadzi do całkowitego zatrzymania przepływu gazu (rys. 3.1 (D)).

W wyniku utraty łączności kanałów porowych nasyconych fazą niezwilżającą następuje wzrost różnicy ciśnień pomiędzy fazą gazową poniżej i powyżej skał uszczelniających. Bez względu na wartość tej różnicy ciśnień jest miarą największego efektywnego promienia kanału porowego, który jednocześnie określa efektywność uszczelnienia kapilarnego skały. W trakcie procesu nasączenia fazą zwilżającą pewna część porów nasycona gazem może zostać odcięta w wyniku przzerwania ścieżek przepływu gazu, co skutkować będzie rezydualnym nasyceniem fazą niezwilżającą (gazem).

Pomiary szczelności kapilarnej uszczelniających skał nadkładu wykonywane są zwykle w warunkach laboratoryjnych na próbkach skał pobranych z odwiertów. Do metod podstawowych określania ciśnienia kapilarnego należą metody porozymetrii rtęciowej. W trakcie testu polegającego na zatłaczaniu rtęci do próbki skalnej nasyconej powietrzem wyznaczana jest krzywa wypierania kapilarnego, która następnie jest konwertowana dla układu woda–gaz i na tej podstawie wyznaczane jest ciśnienie przebiccia gazu [33]. Jednakże wyznaczone ciśnienie, przy którym zaczyna się wypieranie, odpowiada bardziej kapilarnemu ciśnieniu wejścia czy też ciśnieniu progowemu, które jest znacznie niższe od ciśnienia przebiccia [36, 37].

Bezpośredni pomiar kapilarnego ciśnienia przebiccia skał uszczelniających realizowany jest w procesie wypierania fazy zwilżającej (woda) fazą niezwilżającą (gaz). W trakcie tego pomiaru stopniowo (w małych krokach) zwiększane jest ciśnienie fazy niezwilżającej. Ciśnienie przebiccia jest określane w momencie pojawienia się ciągłego i powolnego wypływu wody z badanej próbki skalnej, po czym następuje wypływ fazy niezwilżającej. Bezpośredni pomiar ciśnienia przebiccia słaboprzepuszczalnych skał uszczelniających jest bardzo czasochłonny i z tego względu rzadko wykonywany, ale jednocześnie jest to najbardziej wiarygodny test.



### 3.1.2. Ucieczki gazu przez uskoki i szczeliny

Uskoki i szczeliny są powszechnie uznawane jako możliwe drogi ucieczki gazu ze złóż gazu, ograniczają tym samym integralność strukturalną pułapek, a więc złóż i podziemnych magazynów gazu. Przyczyny rozszczelnienia skał nadkładu mogą być różnego rodzaju. Rozszczelnienie tych skał może nastąpić w wyniku szczelinowania pierwotnie nienaruszonych skał nadkładu, wskutek reaktywacji istniejących uskoków czy też propagacji istniejących uskoków w matrycy skalnej w wyniku zmian stanu naprężeń stycznych lub normalnych występujących w uskoku [38]. Wyróżnia się kilka mechanizmów powodujących uszczelnienie płaszczyzn zrzutu, jakimi są uskoki [39, 40]:

- zestawienie obok siebie skał różniących się znacznie przepuszczalnością (ang. *juxtaposition*), w wyniku czego skały o wysokiej przepuszczalności (piaskowiec) kontaktują się ze skałami o bardzo niskiej przepuszczalności (łupki) o wysokim kapilarnym ciśnieniu wejścia;
- smarowanie iłowe płaszczyzn uskoku (ang. *clay smear*), w wyniku czego wzrasta kapilarnie ciśnienie wejścia;
- kataklaza – zjawisko polegające na kruszeniu ziaren piasku, w wyniku czego w uskoku powstają strefy wypełnione materiałem drobnoziarnistym o wysokim kapilarnym ciśnieniu wejścia;
- diagenaza, w wyniku której następuje selektywne cementowanie wzdłuż płaszczyzny uskoku, co może doprowadzić do częściowego lub całkowitego zaniku porowatości, tym samym hydraulicznego uszczelnienia uskoku.

Uszczelnienie złoża powstałe wskutek uskoku wynika z odmiennych własności uszczelniających kontaktujących się ze sobą skał. Jeżeli skała zbiornikowa w wyniku zrzutu kontaktuje się ze skałą zbitą o niskiej przepuszczalności (łupki), wówczas uszczelnienie takie będzie efektywne. Uszczelnieniem mogą być dla siebie także skały przepuszczalne (tj. piaskowce różniące się własnościami kapilarnymi), pomiędzy którymi może występować znaczna różnica ciśnień w płaszczyźnie uskoku pozwalająca na zatrzymywanie węglowodorów. Ocena właściwości uszczelniających wynikających z takich zjawisk, jak kataklaza, diagenaza czy smarowanie iłowe wymaga odniesienia tych mechanizmów do mierzalnych własności, takich jak litologia skał czy też dyslokacja uskoku [4].

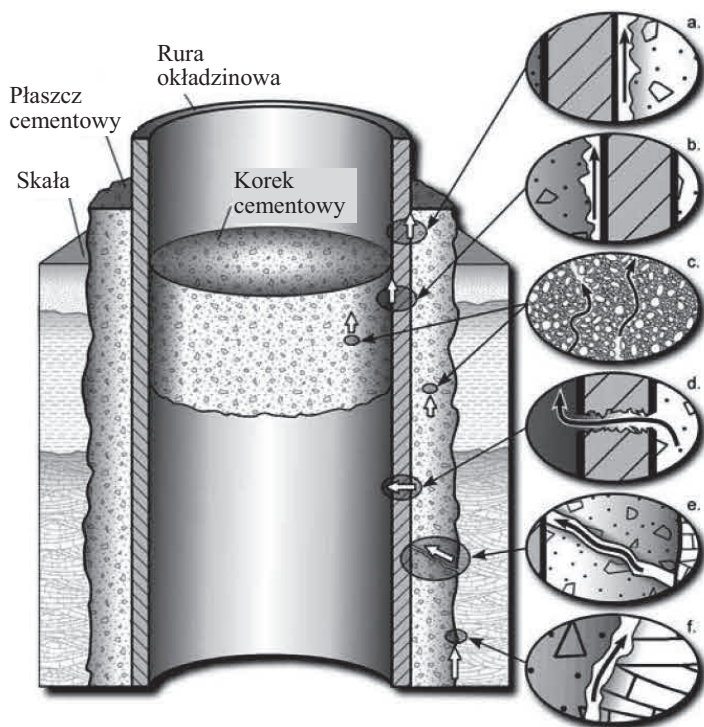
Ucieczki węglowodorów przez tego typu nieszczelności są trudne do oszacowania w warunkach laboratoryjnych. Do oceny tego rodzaju nieszczelności stosowane są metody pomiaru przepuszczalności skał uszczelniających, w skali całego złoża należą do nich testy zatłaczania wody czy też testy typu *leak-off*.

### 3.1.3. Ucieczki gazu wskutek nieszczelności odwiertów

Szczelność magazynu gazu w dużym stopniu jest uzależniona od szczelności samych odwiertów zarówno eksploatacyjnych, jak i odwiertów zlikwidowanych lub wyłączonych z eksploatacji. Szczelność odwiertu jest determinowana przez dwa główne czynniki. Jednym z nich jest izolacja odwiertu od przewiercanych skał, którą uzyskuje się przez cementowanie rur okładzinowych, zaś drugim jest szczelność ścian i połączeń gwintowych rur okładzinowych wraz z głowicą eksploatacyjną zamykającą wylot otworu. Stan techniczny odwiertów



udostępniających podziemny magazyn gazu powinien zatem zapewniać odpowiednią izolację poziomów, w których jest magazynowany gaz, od innych warstw przepuszczalnych, a także szczelność zarurowanej przestrzeni pierścieniowej. Szczelność odwiertu będzie w głównej mierze zależeć od stanu jego zacementowania. Różnego rodzaju drogi ucieczki gazu, jakie mogą mieć miejsce wzdłuż odwiertu, można podzielić na dwie kategorie: pierwotne i wtórne. Przyczyny pierwotne wynikają z nieprawidłowego bądź niepełnego zacementowania odwiertu. Przyczyny wtórne są związane z powstaniem nowych dróg ucieczek gazu spowodowanych zmianą stanu naprężeń w otworze w układzie rury–płaszcz cementowy–skała wywołanych zmianami ciśnień i temperatur w odwiertcie w trakcie cyklicznego procesu napełniania i opróżniania magazynu. Efektem tych procesów może być rozwarstwienie płaszcza cementowego czy też powstanie szczelin i spękań w płaszczu cementowym. Inną przyczyną utraty szczelności odwiertu jest rozszczelnienie połączeń gwintowych rur oraz korozja rur [41]. W zlikwidowanych odwiertach pokopalnianych uszczelnienie jest zwykle realizowane przez wykonanie korka cementowego wewnątrz rur okładzinowych powyżej horyzontu złożowego. W wyniku erozji korek cementowy także może być drogą ucieczki gazu z PMG. Możliwe drogi ucieczki gazu w nieszczelnym odwiertcie pokazano na rysunku 3.2. Gaz może przedostawać się pomiędzy płaszczem cementowym i ścianą rur okładzinowych (rys. 3.2a, b), mikrokanałikami w samym płaszczu cementowym (c), przez ściany rur okładzinowych wskutek ich korozji (d), spękaniami w płaszczu cementowym (e) oraz szczelinami pomiędzy płaszczem cementowym a skałą (f).



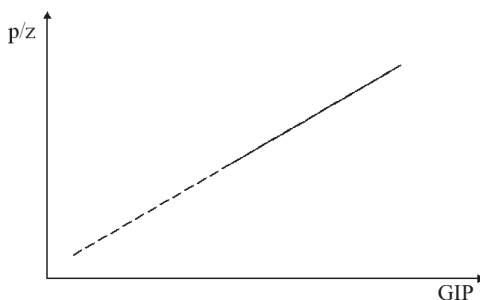
Rys. 3.2. Możliwe drogi ucieczki gazu wskutek nieszczelności odwiertu [42]

Szczelność cementacji zarurowej przestrzeni pierścieniowej eksploatacyjnej kolumny rur w otworze przeznaczonym dla podziemnego magazynu gazu sprawdza się przy ciśnieniu większym od przewidywanego największego ciśnienia roboczego (1,3 wartości spodziewanego maksymalnego ciśnienia zatłaczania) [43].

Sposób dowiercania odwiertów eksploatacyjnych na PMG oraz ich stan techniczny powinien zatem zapewniać szczelną izolację horyzontów wodnych nad i pod złożem oraz odizolowanie złoża od innych warstw przepuszczalnych.

### 3.2. Ocena szczelności magazynu gazu – histereza pracy PMG

Straty gazu podczas podziemnego magazynowania gazu mogą następować wskutek migracji i ucieczki gazu poza strukturę złoża lub w wyniku nieszczelności odwiertów. O ile straty gazu spowodowane nieszczelnością odwiertów mogą być stosunkowo łatwo zlokalizowane i zlikwidowane, o tyle straty gazu spowodowane wpływem gazu poza strukturę złoża są trudne do zidentyfikowania w krótkiej perspektywie czasowej oraz znacznie trudniej jest im zapobiegać. Ilość gazu znajdująca się w magazynie zmienia się w zależności od fazy jego pracy. W fazie napełniania wzrasta ilość gazu w magazynie oraz ciśnienie złożowe. Z kolei w fazie opróżniania ma miejsce odwrotne zjawisko polegające na obniżaniu się ciśnienia złożowego w zależności od ilości odbieranego z PMG gazu. Zależność tę można obserwować i analizować za pomocą równania bilansu masowego przez zmianę ilorazu  $p/z$  w funkcji ilości gazu znajdującego się aktualnie w magazynie ( $GIP$ ) [44]. W przypadku gdy objętość porowa złoża w trakcie magazynowania gazu nie zmienia się (warunki wolumetryczne), punkty na wykresie  $p/z$  w funkcji  $GIP$  będą układać się wzdłuż linii prostej o stałym nachyleniu, przechodzącej przez początek układu współrzędnych, jak pokazano na rysunku 3.3.

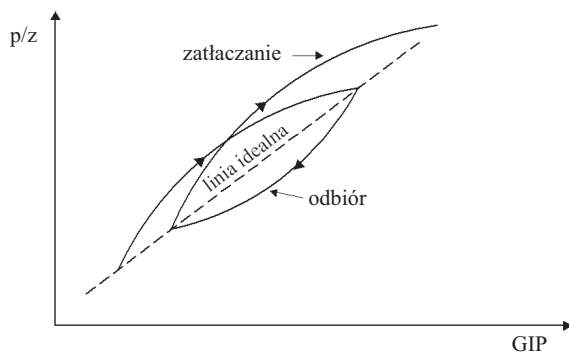


Rys. 3.3. Wykres zależności  $p/z$  od ilości gazu w magazynie [20]

Taki przebieg punktów oznacza, że zmiana ciśnienia w złożu jest wprost proporcjonalna do ilości gazu w magazynie, a struktura jest szczelna, tzn. nie ma łączności hydrodynamicznej z innymi horyzontami złożowymi.

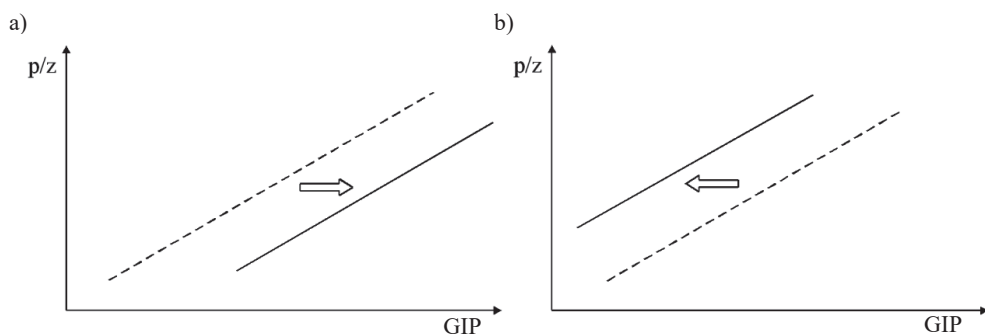
Pokazany na rysunku 3.3 wykres przedstawia sytuację wyidealizowaną. W rzeczywistości nawet w przypadku magazynów gazu pracujących w warunkach bliskich wolumetrycznym

punkty na wykresie  $p/z$  vs  $GIP$  będą układać się w pętlę przebiegającą wokół linii prostej, jest to tzw. pętla histerezy. W fazie zatłaczania gazu punkty na wykresie  $p/z$  vs  $GIP$  znajdują się nad linią prostą, z kolei w fazie odbioru pod nią, co pokazano na rysunku 3.4.



**Rys. 3.4.** Pętla histerezy podziemnego magazynu gazu pracującego w warunkach wolumetrycznych [23]

Równoległe przemieszczanie się pętli histerezy na wykresie  $p/z$  vs  $GIP$  w prawo lub w lewo od linii idealnej (złóże wolumetryczne) oznacza, że magazyn jest nieszczelny. W przypadku gdy pętle przemieszczają się w prawo, wówczas następuje ucieczka gazu poza strukturę (rys. 3.5a), z kolei przemieszczanie się pętli histerezy w lewo jest spowodowane dopływem gazu z innego horyzontu złożowego (rys. 3.5b).

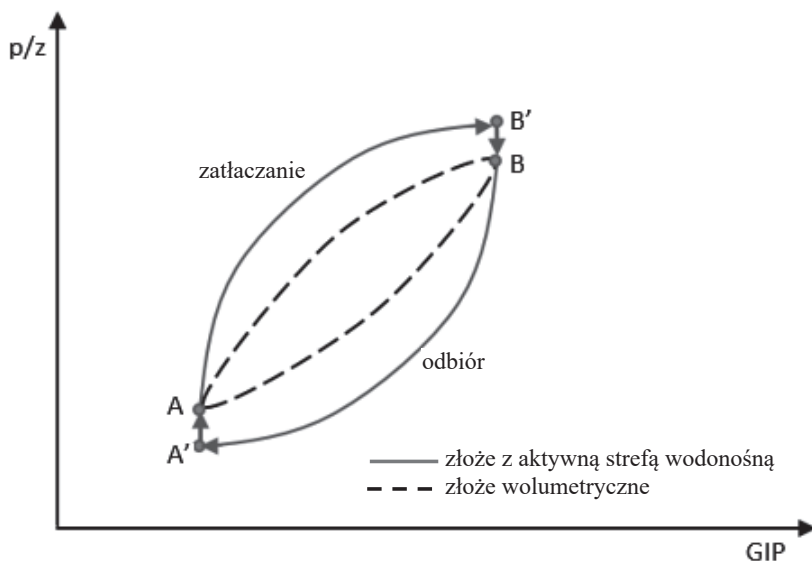


**Rys. 3.5.** Praca magazynu przy ucieczce gazu ze złoża (a) i dopływie gazu do złoża (b) [28]

Magazyny gazu kontaktujące się z aktywną strefą wodonośną charakteryzują się odmiennym przebiegiem pętli histerezy, co pokazano na rysunku 3.6.

Ze względu na znacznie mniejszą ruchliwość wody w stosunku do gazu, ruch wody w złożu następuje z pewnym opóźnieniem względem zmian ciśnienia spowodowanych zatłaczaniem i odbiorem gazu do/z PMG. W początkowej fazie zatłaczania gazu, gdy woda nadal przemieszcza się w kierunku złoża, zmniejszając objętość porową dostępną dla gazu, następuje szybki wzrost ciśnienia w magazynie (pkt A, rys. 3.6). Powstająca znaczna różnica między ciśnieniem w magazynie i w strefie zawodnionej powoduje wyhamowanie ruchu

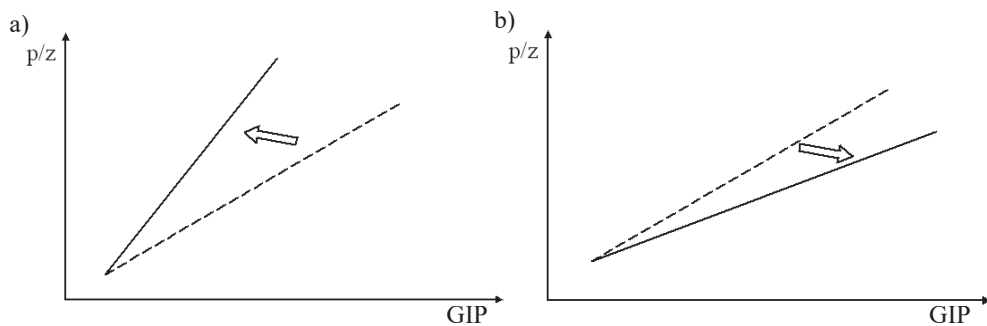
wody w kierunku złoża. Postępujące zatłaczanie gazu powoduje dalszy wzrost ciśnienia w PMG i w konsekwencji odwrócenie ruchu wody na zewnątrz złoża. W końcowej fazie okresu zatłaczania gazu intensywność wypierania wody na zewnątrz złoża jest na tyle duża, że pomimo dalszego wzrostu ilości gazu w magazynie przyrost ciśnienia jest niewielki, co wynika z powiększania objętości porowej złoża (pkt B'–B, rys. 3.6). Ruch wody na zewnątrz złoża trwa nadal pomimo zakończenia zatłaczania gazu, co się objawia spadkiem ciśnienia w PMG (pkt B, rys. 3.6). Wraz z rozpoczęciem odbioru gazu woda nadal odpływa z magazynu, powiększając ciągle objętość porową złoża dostępną dla gazu. Efekt ten objawia się znaczącym spadkiem ciśnienia gazu w magazynie niewspółmiernym do ilości odbieranego gazu (początkowy okres odbioru gazu z PMG). W dalszej fazie odbioru gazu wobec narastającej różnicy ciśnień w złożu i strefie wodonośnej woda zaczyna z powrotem dopływać do złoża, zmniejszając objętość porową zajętą przez gaz. Dopływająca z coraz większą intensywnością do złoża woda powoduje podtrzymywanie ciśnienia złożowego, które w końcowej fazie odbioru może być utrzymywane na stałym poziomie, pomimo zmniejszającej się ilości gazu w PMG (pkt A', rys. 3.6). Po zakończeniu odbioru gazu nadal ma miejsce ruch wody w kierunku złoża, co objawia się wzrostem ciśnienia w magazynie (pkt A'–A, rys. 3.6).



Rys. 3.6. Histereza pracy PMG kontaktującego się z aktywną strefą wodonośną

W przypadku gdy w trakcie budowy magazynu gazu w złożu z aktywną strefą wodonośną ma miejsce powiększanie się objętości porowej dostępnej dla gazu w wyniku wypierania wody z przestrzeni porowej, wówczas kolejne pętle histerezy na wykresie  $p/z$  vs  $GIP$  przebiegają wzdłuż prostych przemieszczających się promieniście w prawo (rys. 3.7b). Powiększanie się przestrzeni porowej złoża zajętej przez gaz jest sytuacją korzystną, jednakże należy mieć na uwadze fakt, że powiększanie się objętości porowej magazynu nie może odbywać się w sposób niekontrolowany. Może to doprowadzić do przesyfonowania struktury i ucieczkę gazu z magazynu. Z kolei w przypadku, gdy w kolejnych cyklach pracy

magazynu pętle histerezy przebiegają wzdłuż prostych przemieszczających się promieniście w lewo (rys. 3.7a), oznacza to zmniejszanie się objętości porowej dostępnej dla gazu. Następuje wówczas zawadnianie się magazynu, co dyskwalifikuje strukturę pod kątem możliwości magazynowania gazu.



**Rys. 3.7.** Przebieg pętli histerezy w przypadku magazynu w złożu z aktywną strefą wodonośną [28]

## 4. Modelowanie matematyczne pracy PMG w wolumetrycznym złożu gazu

Modelowanie pracy podziemnego magazynu gazu w częściowo sčerpanych złożach gazu ziemnego można prowadzić z wykorzystaniem profesjonalnych symulatorów złożowych powszechnie stosowanych w eksploatacji złóż węglowodorów, tj. ECLIPSE, CMG i innych [45, 46]. Siatki budowanych obecnie modeli numerycznych, nawet dla średniej wielkości złóż składają się z bardzo dużej liczby bloków obliczeniowych, dochodzącej nierzadko do kilku milionów. Zbudowanie takich modeli wymaga szczegółowej znajomości rozkładu wielu parametrów odnoszących się do budowy złoża, własności petrofizycznych skał, rozkładu nasyceń płynów w złożu i innych. Uzyskiwane wyniki symulacji w dużej mierze zależą od liczby i jakości danych wykorzystanych do budowy symulacyjnych modeli statycznych złoża.

Alternatywą dla tak rozbudowanych narzędzi obliczeniowych są modele analityczne pozwalające przy względnie niedużej liczbie danych złożowych i eksploatacyjnych analizować i prognozować eksploatację złóż węglowodorów i podziemnych magazynów gazu [47].

Analityczny model pozwalający prognozować proces magazynowania gazu zbudowany jest z równań:

- bilansu masowego,
- przepływu gazu w złożu,
- transportu gazu w odwiercie.

Układ tych równań uzupełniają równanie stanu gazu oraz korelacje opisujące własności termodynamiczne płynów złożowych.

### 4.1. Podstawy teoretyczne modelowania pracy magazynu

#### 4.1.1. Metoda bilansu masowego

Metoda bilansu masowego znajduje zastosowanie w wielu zagadnieniach inżynierii złożowej. Idea tej metody sprowadza się do porównania zmian objętości płynów złożowych i złoża w wyniku spadku ciśnienia spowodowanego eksploatacją do objętości wydobytych płynów wyrażonej w warunkach złożowych. Metodę tę można zastosować po pewnym okresie eksploatacji złoża, co do którego znana jest ilość wydobytego medium i ciśnienie złożowe. W zastosowaniu do złóż gazu pozwala ona m.in. na określenie warunków energetycznych złoża, oszacowanie wielkości zasobów początkowych gazu w złożu oraz zasobów

znajdujących się w złożu w dowolnym momencie jego eksploatacji czy też ciśnienia złożowego. Ponadto metoda ta może być wykorzystana do prognozowania eksploatacji złóż gazu i podziemnych magazynów gazu. Istotą tej metody jest zastosowanie zasady zachowania masy w odniesieniu do złoża traktowanego jako zbiornik o jednorodnym ciśnieniu i temperaturze.

W ogólnej postaci równanie bilansu masowego dla złoża gazu można zapisać jako [48]:

$$G \cdot (B_g - B_{gi}) + \frac{G \cdot B_{gi}}{1 - S_w} (S_w \cdot C_w + C_f) \cdot \Delta P = G_p \cdot B_g + W_p \cdot B_w - W_e \quad (4.1)$$

Człony lewej strony równania (4.1) określają zmianę objętości odpowiednio: gazu (człon 1) oraz wody i skały (człon 2) przy spadku ciśnienia w złożu od ciśnienia początkowego do aktualnego. Prawą stronę równania (4.1) stanowią człony objętości płynów wydobytych, tj.: gazu (człon 1), wody (człon 2) oraz wody dopływającej do złoża (człon 3).

Ścisłość skały i wody w porównaniu ze ścisłością gazu jest niewielka i może być zaniedbana. Pomijając także wydobicie wody  $W_p$ , które jest znacznie mniejsze od wielkości dopływu wody do złoża  $W_e$ , otrzymuje się następującą postać równania (4.1):

$$G \cdot (B_g - B_{gi}) = G_p \cdot B_g - W_e \quad (4.2)$$

Dzieląc równanie (4.2) jednocześnie przez  $G$  oraz  $B_g$ , po przekształceniach uzyskuje się:

$$1 - \frac{G_p}{G} = \frac{B_{gi}}{B_g} \left( 1 - \frac{W_e}{G \cdot B_{gi}} \right) \quad (4.3)$$

Występujące w równaniu (4.3) współczynniki objętościowe gazu dla ciśnienia początkowego  $B_{gi}$  oraz aktualnego ciśnienia w złożu  $B_g$  opiswane są zależnościami:

$$B_{gi} = \frac{p_n \cdot z_i \cdot T}{p_i \cdot T_n} \quad (4.4)$$

$$B_g = \frac{p_n \cdot z \cdot T}{p \cdot T_n} \quad (4.5)$$

Wykorzystując zależności (4.4) i (4.5), po przekształcenia równania (4.3) uzyskuje się ostatecznie równanie bilansu masowego dla niewolumetrycznego złoża gazu pracującego w warunkach aktywnej strefy wodonośnej w postaci [49]:

$$\frac{p}{z} = \frac{p_i}{z_i} \cdot \frac{1 - \frac{G_p}{G}}{1 - \frac{W_e}{G \cdot B_{gi}}} \quad (4.6)$$

Występujący w równaniu (4.6) człon  $W_e/G \cdot B_{gi}$  określa część objętości porowej złoża zajętej przez dopływającą do złoża wodę. W rezultacie, im więcej wody dopływa do złoża, tym mniejszy spadek ciśnienia obserwuje się dla określonej ilości wydobywanego gazu. W przypadku braku dopływu wody, tj. dla stałej objętości porowej złoża (warunki wolumetryczne), równanie (4.6) upraszcza się do równania (4.7).

$$\frac{p}{z} = \frac{p_i}{z_i} \cdot \left(1 - \frac{G_p}{G}\right) \quad (4.7)$$

Równanie (4.7) jest liniową zależnością pomiędzy ilorazem  $p/z$  a skumulowaną ilością wydobytego gazu  $G_p$ .

W przypadku modelowania pracy podziemnego magazynu gazu w warunkach wodno-aporowych równanie (4.6) przyjmie postać [50]:

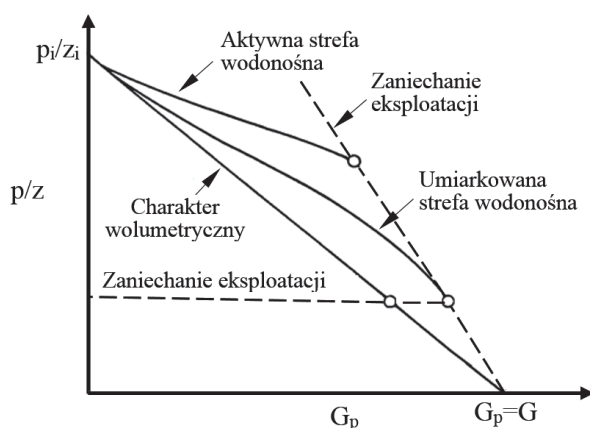
$$\frac{p}{z} = \frac{p_i}{z_i} \cdot \frac{1 - \frac{G_p - G_z}{G}}{1 - \frac{W_e}{G \cdot B_{gi}}} \quad (4.8)$$

Z kolei dla złoża wolumetrycznego, opierając się na równaniu (4.7), uzyskuje się:

$$\frac{p}{z} = \frac{p_i}{z_i} \cdot \left(1 - \frac{G_p - G_z}{G}\right) \quad (4.9)$$

#### 4.1.2. Ocena warunków energetycznych złóż gazu metodami bilansu masowego

Zastosowanie metod bilansu masowego do oceny warunków energetycznych sprowadza się często do badania zmienności ilorazu  $p/z$  w funkcji skumulowanego wydobycia gazu  $G_p$ . W przypadku złóż wolumetrycznych charakteryzujących się stałą objętością porową i dobrymi własnościami petrofizycznymi skały zależność ta ma charakter liniowy, źródłem energii złożowej jest wtedy ekspansja gazu (rys. 4.1).



Rys. 4.1. Wykres diagnostyczny oceny warunków energetycznych złoża gazu metodą  $p/z$  [48]



Z kolei nieliniowy charakter wykresu  $p/z$  vs  $G_p$  związany jest zwykle z istnieniem zewnętrznego źródła energii złożowej w postaci dopływającej do złoża wody. W zależności od wielkości i intensywności dopływu wody do złoża punkty pomiarowe przebiegają nieliniowo, co pokazano na rysunku 4.1. Dla wolumetrycznego złoża aproksymacja prostej do przecięcia z osią odciętych pozwala wyznaczyć zasoby początkowe gazu w złożu.

Bardziej czułą metodą w ocenie ewentualnego dopływu wody do złoża jest metodyka Havlena–Odeha. W metodzie tej równanie bilansu masowego zostało zapisane w postaci:

$$F = G \cdot (E_g + E_{fw}) + W_e \quad (4.10)$$

gdzie

$$F = G_p \cdot B_g + W_p \cdot B_w \quad (4.11)$$

a współczynniki ekspansji gazu  $E_g$ , skały i wody  $E_{fw}$  definiowane są jako:

$$E_g = B_g - B_{gi} \quad (4.12)$$

$$E_{fw} = \frac{B_{gi}}{1 - S_w} \cdot (S_w \cdot C_w + C_f) \cdot \Delta P \quad (4.13)$$

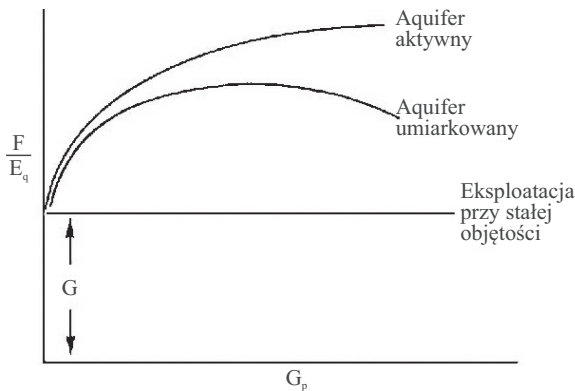
Wiedząc, że  $E_g \gg E_{fw}$ , można równanie (4.10) przekształcić do postaci:

$$F = G \cdot E_g + W_e \quad (4.14)$$

Dzieląc równanie (4.14) przez współczynnik ekspansji gazu  $E_g$ , uzyskuje się:

$$\frac{F}{E_g} = G + \frac{W_e}{E_g} \quad (4.15)$$

Uzyskane równanie (4.15) jest równaniem diagnostycznym, na podstawie którego konstruuje się wykres Cole'a. Ocena warunków energetycznych złoża w tej metodzie polega na śledzeniu zmian ilorazu  $F/E_g$  w funkcji skumulowanego wydobycia gazu lub czasu eksploatacji złoża (rys. 4.2).



**Rys. 4.2.** Wykres diagnostyczny Cole'a do oceny warunków energetycznych złoża [51]

W przypadku złoża wolumetrycznego wartość tego ilorazu będzie stała w czasie, co wynika z zależności (4.15). Ekstrapolacja uzyskanej prostej do przecięcia z osią rzędnych pozwala wtedy wyznaczyć zasoby początkowe gazu w złożu. Z kolei dla złoża niewolumetrycznego punkty na wykresie  $F/E_g$  vs  $G_p$  będą układały się wzdłuż krzywej wypukłej ku górze, co świadczy o istnieniu dodatkowego źródła energii złożowej w postaci dopływającej do złoża wody. Kształt krzywej będzie zależał od wielkości i intensywności dopływu wody ze strefy wodonośnej do złoża.

### 4.1.3. Wskaźniki energii złożowej

Złoża gazu mogą pracować w różnych systemach energetycznych, tj.: w systemie ekspansyjnym skały i cieczy, systemie ekspansyjnym gazu (warunki wolumetryczne), oraz systemie wodnonaporowym. Każdy z tych systemów może dominować w różnym stopniu w różnym okresie eksploatacji złoża w zależności od uwarunkowań geologiczno-złożowych. Udział poszczególnych systemów w całkowitej energii złoża można określić na podstawie ogólnego równania bilansu masowego (4.1) w następującej postaci bezwymiarowej:

$$\frac{G}{G_p} \left( 1 - \frac{B_{gi}}{B_g} \right) + \frac{G \cdot B_{gi}}{G_p \cdot B_g} \frac{(C_w \cdot S_w + C_f)}{1 - S_w} \Delta P + \frac{W_e - W_p \cdot B_w}{G_p \cdot B_g} = 1 \quad (4.16)$$

Poszczególne człony równania (4.16) stanowią wskaźniki ich udziału w całkowitej energii złoża i są definiowane odpowiednio:

$$\frac{G}{G_p} \left( 1 - \frac{B_{gi}}{B_g} \right) - \text{wskaźnik energii gazu,}$$

$$\frac{G \cdot B_{gi}}{G_p \cdot B_g} \frac{(C_w \cdot S_w + C_f)}{1 - S_w} \Delta P - \text{wskaźnik energii skał i wody związanej,}$$

$$\frac{W_e - W_p \cdot B_w}{G_p \cdot B_g} - \text{wskaźnik energii wody dopływającej do złoża.}$$

Suma poszczególnych wskaźników powinna być równa 1. W przypadku gdy suma nie jest równa jedności, świadczy to o niespełnieniu równania bilansu masowego.

### 4.1.4. Modelowanie dopływu gazu do odwiertów pionowych i poziomych przy zatłaczaniu gazu do PMG i odbiorze gazu z PMG

Podczas magazynowania gazu w częściowo szcerpanych złożach gazu ziemnego do zatłaczania gazu do PMG i odbioru gazu z PMG zwykle wykorzystywane są odwierty, którymi była prowadzona eksploatacja złoża. W zdecydowanej większości są to odwierty pionowe, które po rekonstrukcji są zwykle wykorzystywane w początkowej fazie budowy magazynu [52]. Jednakże coraz częściej do tego celu wykorzystywane są odwierty poziome, które ze względu na znacznie większe wydajności przepływu pozwalają na zwiększenie mocy zatłaczania i odbioru gazu, a także zwiększenie pojemności czynnej magazynu [53, 54].

Dopływ gazu do odwiertu pionowego może być opisany równaniem dopływu płynu ściśliwego z ograniczonej strefy wokół odwiertu. Dla uśrednionych wartości parametrów PVT gazu przy przepływie w stanie semiustalonym do odwiertu hydrodynamicznie niedoskonałego przyjmuje ono następującą postać [55]:

$$\Delta p^2 = p^2 - p_w^2 = \frac{q \cdot \mu \cdot z \cdot p_n \cdot T}{\pi \cdot k \cdot h \cdot T_n} \cdot \left( \ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S_m + D_t \cdot q \right) \quad (4.17)$$

Równanie (4.17) często jest zapisywane w skróconej formie jako tzw. równanie formuły dwuczłonowej:

$$p^2 - p_w^2 = a \cdot q + b \cdot q^2 \quad (4.18)$$

gdzie parametry  $a$  i  $b$  określane są następującymi zależnościami:

$$a = \frac{\mu \cdot p_n \cdot z \cdot T}{\pi \cdot k \cdot h \cdot T_n} \cdot \left( \ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} + S_m \right) \quad (4.19)$$

oraz:

$$b = \frac{\mu \cdot p_n \cdot z \cdot T}{\pi \cdot k \cdot h \cdot T_n} \cdot D_t \quad (4.20)$$

Równanie formuły dwuczłonowej dla okresu zatłaczania gazu do magazynu przyjmuje postać:

$$p_w^2 - p^2 = a \cdot q + b \cdot q^2 \quad (4.21)$$

W przypadku odwiertu horyzontalnego geometria przepływu wokół odwiertu ma kształt elipsoidy. Dopływ gazu do odwiertu horyzontalnego w stanie semiustalonym może być wówczas opisany równaniem Joshiego [56, 57]:

$$q = \frac{\pi \cdot k_h \cdot h \cdot T_n \cdot (p^2 - p_w^2)}{\mu \cdot p_n \cdot z \cdot T \cdot \left( \ln \left( \frac{e_h + \sqrt{e_h^2 - (L/2)^2}}{L/2} \right) + \frac{I_{ani} \cdot h}{L} \cdot \left( \ln \frac{I_{ani} \cdot h}{r_w \cdot (I_{ani} + 1)} - \frac{3}{4} + D_{th} \cdot q \right) \right)} \quad (4.22)$$

Parametr  $I_{ani}$  wyraża anizotropię przepuszczalności skały i jest określany zależnością:

$$I_{ani} = \sqrt{\frac{k_h}{k_v}} \quad (4.23)$$

Występujący w równaniu (4.22) parametr  $e_h$  określa połowę długości wzdłużnej osi elipsoidy drenażu odwiertu horyzontalnego i jest opisany zależnością [58]:

$$e_h = \frac{L}{2} \cdot \left( 0,5 + \left( 0,25 + \left( \frac{2 \cdot r_{eh}}{L} \right)^4 \right)^{0,5} \right)^{0,5} \quad \text{dla } L/2 < 0,9 \cdot r_{eh} \quad (4.24)$$

Podobnie jak dla odwiertu pionowego równanie dopływu gazu do odwiertu poziomego może być zapisane w postaci formuły dwuczłonowej:

$$p^2 - p_w^2 = a_h \cdot q + b_h \cdot q^2 \quad (4.25)$$

gdzie parametry  $a_h$  i  $b_h$  można zapisać następująco:

$$a_h = \frac{\mu \cdot p_n \cdot z \cdot T}{\pi \cdot k_h \cdot h \cdot T_n} \cdot \left( \ln \left( \frac{e_h + \sqrt{e_h^2 - (L/2)^2}}{L/2} \right) + \frac{I_{ani} \cdot h}{L} \cdot \left( \ln \frac{I_{ani} \cdot h}{r_w \cdot (I_{ani} + 1)} - \frac{3}{4} \right) \right) \quad (4.26)$$

oraz:

$$b_h = \frac{\mu \cdot p_n \cdot z \cdot T}{\pi \cdot k_h \cdot h \cdot T_n} \cdot \frac{I_{ani} \cdot h}{L} \cdot D_{th} \quad (4.27)$$

Dla okresu zatłaczania gazu do PMG równanie (4.25) przyjmie postać:

$$p_w^2 - p^2 = a_h \cdot q + b_h \cdot q^2 \quad (4.28)$$

#### 4.1.5. Modelowanie przepływu gazu w odwiercie

Przepływ gazu w odwiercie można rozpatrywać jako transport gazu w pionowym rurociągu przy istniejącej różnicy pomiędzy ciśnieniem dennym i głowicowym. Z przepływem gazu w odwiercie wiąże się strata ciśnienia związana z występowaniem słupa gazu w odwiercie oraz oporami przepływu na pokonanie tarcia. Opory przepływu gazu w odwiercie zależą od średnicy i chropowatości rur wydobywczych, prędkości przepływu gazu oraz własności termodynamicznych transportowanego gazu. W przypadku jednofazowego przepływu gazu w odwiercie o stałej średnicy rur wydobywczych, temperaturze i współczynniku liniowych oporów przepływu  $\lambda$  równanie transportu gazu, zwane równaniem przepustowości odwiertu, przyjmuje postać [59, 60]:

$$p_w^2 = p_g^2 \cdot e^{\frac{2 \cdot g \cdot H}{z \cdot R \cdot T}} + \frac{8 \cdot q^2 \cdot p_n^2 \cdot z^2 \cdot T^2 \cdot \lambda}{\pi^2 \cdot D^5 \cdot T_n^2 \cdot g} \cdot \left( e^{\frac{2 \cdot g \cdot H}{z \cdot R \cdot T}} - 1 \right) \quad (4.29)$$

Pierwszy człon równania (4.29) jest członem statycznym związanym z ciśnieniem słupa gazu w odwiercie. Z kolei drugi, tzw. dynamiczny, opisuje stratę ciśnienia na pokonanie oporów przepływu gazu w odwiercie.

W eksploatacji złóż gazu i podziemnych magazynów rzadko ma miejsce przepływ jednofazowy. Gaz znajdujący się w złożu, czy też do niego zatłaczany w trakcie magazynowania, wskutek kontaktu z wodą złożową ulega nasyceniu wodą. W trakcie eksploatacji złoża z powodu zmian ciśnienia i temperatury gazu w odwiercie woda wykrapla się z gazu. W odwiercie ma zatem miejsce jednoczesny przepływ dwóch faz wody i gazu. Oprócz wody pochodzącej z kondensacji do odwiertu może także dopływać ze złoża woda w stanie ciekłym (stożki, języki wodne). Przy małych prędkościach przepływu woda ta będzie gromadzić się na dnie odwiertu i utrudniać wydobycie gazu, a w skrajnym przypadku może uniemożliwić wydobycie gazu. Przy dużych prędkościach przepływu, jak to ma miejsce w przypadku

przepływu gazu w odwiertach eksploatacyjnych na PMG, energia gazu jest na tyle duża, że woda jest wynoszona w sposób ciągły wraz z gazem na powierzchnię. Woda występuje wówczas w postaci rozproszonej fazy zawieszanej w wydobywanym gazie.

Celem uwzględniania tego zjawiska w równaniu przepustowości wprowadza się tzw. współczynnik korekcyjny wody definiowany jako [55]:

$$F_w = 1 + \frac{\rho_w \cdot q_w}{\rho_g \cdot q_g} \quad (4.30)$$

Równanie przepustowości odwiertu przy przepływie jednorodnej mieszaniny gazu i wody w postaci mgły w odwiercie przyjmuje wówczas postać:

$$p_w^2 = p_g^2 \cdot e^{\frac{2 \cdot g \cdot H}{z \cdot R \cdot T} \cdot F_w} + \frac{8 \cdot q^2 \cdot p_n^2 \cdot z^2 \cdot T^2 \cdot \lambda}{\pi^2 \cdot D^5 \cdot T_n^2 \cdot g} \cdot \left( e^{\frac{2 \cdot g \cdot H}{z \cdot R \cdot T} \cdot F_w} - 1 \right) \quad (4.31)$$

W fazie zatłaczania gazu do magazynu ma miejsce przepływ gazu od głowicy w kierunku dna odwiertu, czyli w kierunku przeciwnym, jak ma to miejsce przy wydobywaniu gazu. Równanie przepustowości przyjmie wówczas postać:

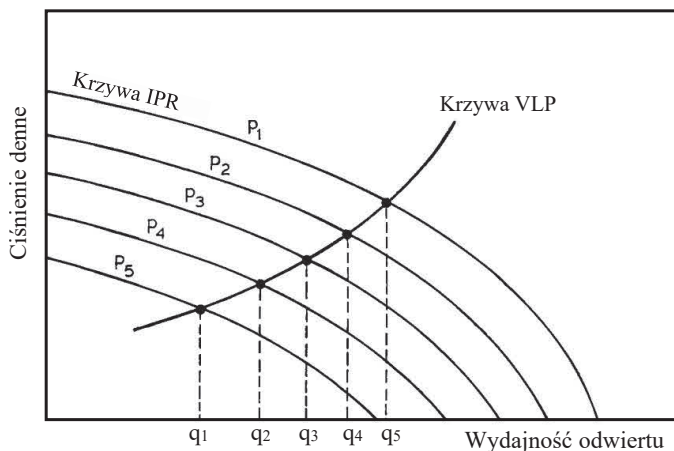
$$p_w^2 = p_g^2 \cdot e^{\frac{2 \cdot g \cdot H}{z \cdot R \cdot T} \cdot F_w} - \frac{8 \cdot q^2 \cdot p_n^2 \cdot z^2 \cdot T^2 \cdot \lambda}{\pi^2 \cdot D^5 \cdot T_n^2 \cdot g} \cdot \left( e^{\frac{2 \cdot g \cdot H}{z \cdot R \cdot T} \cdot F_w} - 1 \right) \quad (4.32)$$

## 4.2. Wyznaczanie wydajności odwiertu przy zatłaczaniu gazu do PMG i odbiorze gazu z PMG – analiza węzłowa

Praca podziemnego magazynu wytwarzanego w częściowo szcerpanym złożu gazu wiąże się z cyklicznym zatłaczaniem i odbiorem gazu. Wydajność zatłaczania i odbioru gazu jest funkcją całkowitej różnicy pomiędzy ciśnieniem złożowym i głowicowym i jest zależna zarówno od własności ośrodka porowatego, w którym następuje przepływ, stopnia uszkodzenia strefy przyodwiertowej, własności eksploatowanego płynu, konstrukcji odwiertu oraz charakteru przepływu zarówno w strefie oddziaływania odwiertu, jak i w rurach wydobywczych. Dla aktualnego ciśnienia złożowego i zadanej wartości ciśnienia głowicowego wydajność odwiertu może być określona przez rozwiązanie układu równań dopływu gazu do odwiertu oraz równania przepustowości odwiertu. Jest to tzw. zagadnienie analizy węzłowej. Rozwiązanie to można uzyskać także graficznie przez naniesienie na wykres w układzie  $p_w$  vs  $q$  krzywej przepustowości odwiertu (krzywa VLP, ang. *Vertical Lift Performance*) oraz krzywej wydajności złoża (krzywa IPR, ang. *Inflow Performance Relationship*). Punkt przecięcia krzywych określa wówczas wydajność odwiertu, co pokazano na rysunku 4.3.

Krzywe przepustowości odwiertu konstruuje się na podstawie równania przepustowości odwiertu (równanie (4.31) dla okresu odbioru gazu oraz równanie (4.32) dla okresu zatłaczania gazu do PMG) przy zadanej wartości ciśnienia głowicowego. Z kolei krzywe wydajności złoża wyznacza się z równania formuły dwuczłonowej dla odwiertu pionowego (równanie (4.18) w okresie odbioru gazu oraz równanie (4.21) w okresie zatłaczania gazu)

oraz dla odwiertu poziomego (równanie (4.25) w trakcie odbioru gazu oraz równanie (4.28) w trakcie zatłaczania) przy aktualnej wartości ciśnienia w złożu.



Rys. 4.3. Graficzne wyznaczanie wydajności odwiertu na podstawie analizy węzłowej [55]

Wydajność zatłaczania/odbioru gazu do/z PMG odwiertem pionowym można wyznaczyć analitycznie przy założeniu pewnych uproszczeń co do własności PVT gazu, przez rozwiązanie układu równań przepustowości odwiertu oraz równania formuły dwuczłonowej. W przypadku zatłaczania gazu do magazynu odwiertem pionowym wydajność odwiertu wyznacza się przez rozwiązanie układu równań (4.21) i (4.32) dla zadanej maksymalnej wartości ciśnienia głowicowego i aktualnej wartości ciśnienia panującego w PMG.

W rozwiązaniu analitycznym zakłada się stałe uśrednione wartości parametrów  $a$  i  $b$  równania formuły dwuczłonowej oraz średnie wartości parametrów  $A$  i  $B$  równania przepustowości odwiertu (4.33) opisane zależnościami:

$$A_{vz} = p_{g \max}^2 \cdot e^{\frac{2 \cdot g \cdot H}{z \cdot R \cdot T} \cdot F_w} \quad \text{oraz} \quad B_{vz} = \frac{8 \cdot p_n^2 \cdot z^2 \cdot T^2 \cdot \lambda}{\pi^2 \cdot D_v^5 \cdot T_n^2 \cdot g} \cdot \left( e^{\frac{2 \cdot g \cdot H}{z \cdot R \cdot T} \cdot F_w} - 1 \right)$$

Układ równań (4.21) i (4.32) będzie wtedy wyglądał następująco:

$$\begin{cases} p_w^2 - p^2 = a \cdot q_{vz} + b \cdot q_{vz}^2 \\ p^2 = A_{vz} - B_{vz} \cdot q_{vz}^2 \end{cases} \quad (4.33)$$

Rozwiązaniem układu równań (4.33) jest równanie pozwalające wyznaczyć wydajność zatłaczania gazu odwiertem pionowym:

$$q_{vz} = \frac{-a + \sqrt{a^2 - 4 \cdot (B_{vz} + b) \cdot (p^2 - A_{vz})}}{2 \cdot (B_{vz} + b)} \quad (4.34)$$

Wydajność odbioru gazu z PMG dla odwiertu pionowego wyznacza się z kolei, rozwiązując układ równań (4.18) i (4.31). Po wprowadzeniu w równaniu (4.31) oznaczeń pomocniczych:

$$A_{vo} = p_{g\min}^2 \cdot e^{\frac{2 \cdot g \cdot H}{z \cdot R \cdot T} \cdot F_w} \text{ oraz } B_{vo} = \frac{8 \cdot p_n^2 \cdot z^2 \cdot T^2 \cdot \lambda}{\pi^2 \cdot D_v^5 \cdot T_n^2 \cdot g} \cdot \left( e^{\frac{2 \cdot g \cdot H}{z \cdot R \cdot T} \cdot F_w} - 1 \right)$$

otrzymuje się poniższy układ równań przepustowości odwiertu i wydajności złoża:

$$\begin{cases} p^2 - p_w^2 = a \cdot q_{vo} + b \cdot q_{vo}^2 \\ p_w^2 = A_{vo} + B_{vo} \cdot q_{vo}^2 \end{cases} \quad (4.35)$$

Rozwiązaniem układu równań (4.35) jest następująca postać równania na wydajność odbioru gazu z PMG odwiertem pionowym:

$$q_{vo} = \frac{-a + \sqrt{a^2 - 4 \cdot (B_{vo} + b) \cdot (A_{vo} - p^2)}}{2 \cdot (B_{vo} + b)} \quad (4.36)$$

Analogicznie jak dla odwiertu pionowego wyznacza się wydajności zatłaczania gazu do PMG i odbioru gazu z PMG odwiertem poziomym.

Wprowadzając jak wcześniej oznaczenia pomocnicze w równaniu przepustowości dla okresu zatłaczania i odbioru gazu odwiertem poziomym w postaci:

– okres zatłaczania:

$$A_{hz} = p_{g\max}^2 \cdot e^{\frac{2 \cdot g \cdot H}{z \cdot R \cdot T} \cdot F_w} \text{ oraz } B_{hz} = \frac{8 \cdot p_n^2 \cdot z^2 \cdot T^2 \cdot \lambda}{\pi^2 \cdot D_h^5 \cdot T_n^2 \cdot g} \cdot \left( e^{\frac{2 \cdot g \cdot H}{z \cdot R \cdot T} \cdot F_w} - 1 \right)$$

– okres odbioru:

$$A_{ho} = p_{g\min}^2 \cdot e^{\frac{2 \cdot g \cdot H}{z \cdot R \cdot T} \cdot F_w} \text{ oraz } B_{ho} = \frac{8 \cdot p_n^2 \cdot z^2 \cdot T^2 \cdot \lambda}{\pi^2 \cdot D_h^5 \cdot T_n^2 \cdot g} \cdot \left( e^{\frac{2 \cdot g \cdot H}{z \cdot R \cdot T} \cdot F_w} - 1 \right)$$

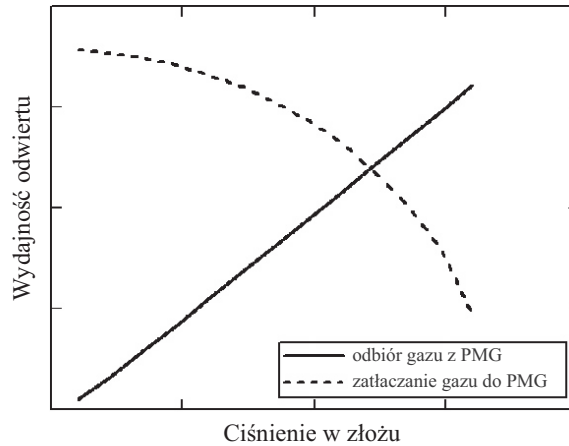
otrzymuje się następujący wzór na wydajność zatłaczania odwiertem poziomym:

$$q_{hz} = \frac{-a_h + \sqrt{a_h^2 - 4 \cdot (B_{hz} + b_h) \cdot (p^2 - A_{hz})}}{2 \cdot (B_{hz} + b_h)} \quad (4.37)$$

Z kolei wydajność odbioru odwiertem poziomym określa zależność:

$$q_{ho} = \frac{-a_h + \sqrt{a_h^2 - 4 \cdot (B_{ho} + b_h) \cdot (A_{ho} - p^2)}}{2 \cdot (B_{ho} + b_h)} \quad (4.38)$$

Wykorzystując uzyskane rozwiązania, sporządza się krzywe wydajności odwiertu jako zależność pomiędzy ciśnieniem złożowym a wydajnością odwiertu dla przyjętej wartości ciśnienia głowicowego, zarówno dla okresu zatłaczania gazu do PMG, jak i odbioru gazu z PMG. Przykładowe krzywe pokazano na rysunku 4.4.



**Rys. 4.4.** Krzywe wydajności odwiertu w okresach zatłaczania gazu do PMG i odbioru gazu z PMG

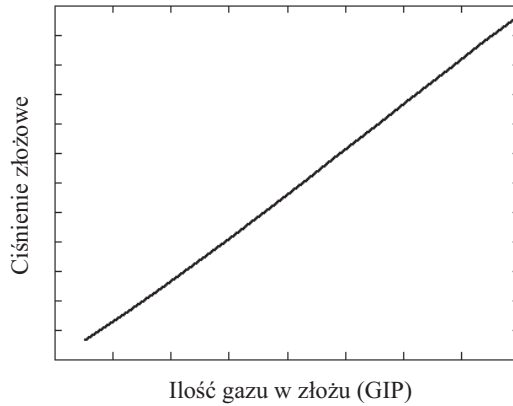
Analizując wykres pokazany na rysunku 4.4, można zauważyć, że w okresie odbioru gazu z PMG wydajność odwiertu będzie wzrastać przy wyższych ciśnieniach złożowych. Z kolei wydajność zatłaczania jest najwyższa przy niskim ciśnieniu złożowym i maleje wraz ze wzrostem ciśnienia w złożu.

### 4.3. Modelowanie procesu podziemnego magazynowania gazu

Parametry pracy projektowanego magazynu gazu określane są według metody zaproponowanej w pracach [61, 62]. Metodyka ta została rozszerzona do stosowania w przypadku odwiertów horyzontalnych przez wykorzystanie równania Joshiego dopływu gazu do odwiertu poziomego [63].

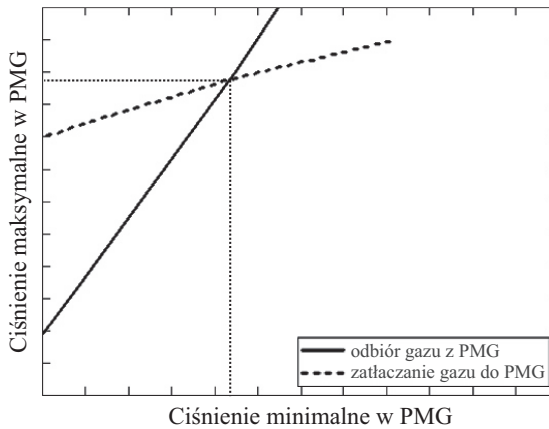
Pierwszym krokiem jest przygotowanie modelu złoża z zadaną liczbą odwiertów o danej konfiguracji. Następnie wykorzystując równanie bilansu masowego, sporządza się wykres ilości gazu w złożu w funkcji średniego ciśnienia złożowego (rys. 4.5). Jak widać, ze wzrostem ilości gazu w PMG rośnie ciśnienie złożowe. Maksymalne ciśnienie w magazynie zasadniczo nie powinno przekraczać ciśnienia początkowego, któremu odpowiadają zasoby początkowe gazu w złożu. Kolejnym krokiem jest konstrukcja krzywych wydajności odwiertu w okresie zatłaczania/odbioru gazu do/z PMG (rys. 4.4). Krzywą wydajności odwiertu w okresie odbioru gazu z PMG wyznacza się dla przyjętej minimalnej wartości ciśnienia głowicowego, z kolei krzywą wydajności odwiertu w okresie zatłaczania dla maksymalnej wartości ciśnienia na głowicy. W fazie odbioru gazu z PMG wraz ze wzrostem ilości wydobytego gazu ciśnienie w złożu obniża się i tym samym maleje wydajność odwiertu. Natomiast w fazie zatłaczania gazu do magazynu ilość gazu w złożu zwiększa się, a tym samym następuje wzrost ciśnienia złożowego, co powoduje spadek wydajność zatłaczania gazu. Zatem każdemu ciśnieniu złożowemu odpowiada pewna maksymalna wydajność zatłaczania/odbioru odwiertu oraz stan zasobów gazu w złożu.





**Rys. 4.5.** Ilość gazu w magazynie w funkcji średniego ciśnienia złożowego

Zakładając, że dane ciśnienie złożowe jest ciśnieniem na końcu cyklu odbioru gazu i znając wydajność odwiertu przy tym ciśnieniu, liczbę odwiertów oraz czas obioru gazu z PMG, można wyznaczyć ilość wydobytego gazu i tym samym określić stan zasobów gazu w PMG na początku cyklu odbioru i odpowiadające mu ciśnienie złożowe. Wyznaczone ciśnienie jest wówczas wymaganym ciśnieniem złożowym na początku cyklu odbioru, które pozwala na odbiór gazu z PMG ze stałą wydajnością (wyznaczoną przy ciśnieniu złożowym na końcu odbioru) przez cały okres odbioru. Przyjmując różne wartości ciśnienia złożowego na końcu odbioru gazu z magazynu, wyznacza się w ten sposób odpowiadające im ciśnienia na początku odbioru. Na tej podstawie można skonstruować wykres zależności między średnim ciśnieniem złożowym na końcu i na początku cyklu odbioru gazu z PMG, co pokazano na rysunku 4.6 (krzywa dla okresu odbioru).

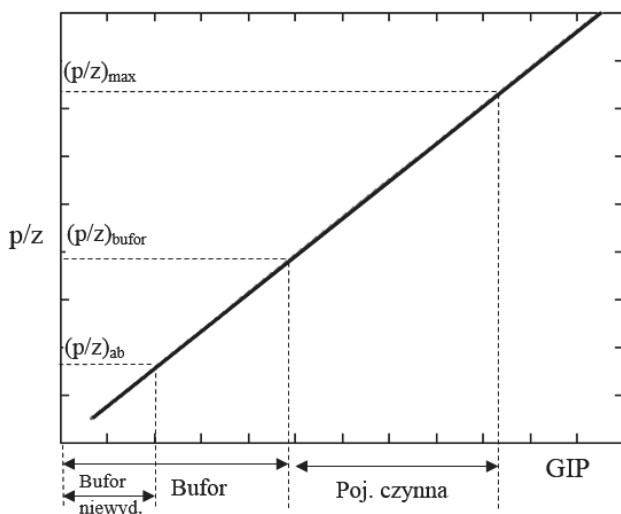


**Rys. 4.6.** Wyznaczenie zakresu ciśnień pracy PMG

Podobną procedurę wykonuje się dla okresu zatłaczania gazu do PMG. Przyjmując pewną wartość ciśnienia w magazynie na końcu okresu zatłaczania gazu do PMG (np. początkowe ciśnienie w złożu), na podstawie krzywej wydajności odwiertu wyznacza się wydajność

zatłaczania gazu przy tym ciśnieniu. Znając liczbę odwiertów i czas zatłaczania, określa się sumaryczną możliwą do zatłoczenia ilość gazu. Odejmując ilość zatłoczonego gazu od ilości gazu w magazynie przy ciśnieniu na końcu okresu zatłaczania, uzyskuje się ilość gazu w magazynie i odpowiadające ciśnienie na początku cyklu zatłaczania gazu do PMG.

Przyjmując różne wartości ciśnienia na końcu okresu zatłaczania gazu do PMG, wyznacza się w ten sposób odpowiadające im wartości ciśnień i zasobów gazu w magazynie na początku okresu zatłaczania. Na podstawie tych wyliczeń konstruuje się wykres zależności między średnim ciśnieniem złożowym na początku i na końcu cyklu zatłaczania gazu do PMG (rys. 4.6, krzywa dla okresu zatłaczania). Nanosząc wyniki obliczeń ciśnień na początku i na końcu cyklu zatłaczania i odbioru gazu na wspólny wykres, wyznacza się punkt przecięcia. Punkt ten określa minimalne i maksymalne ciśnienie pracy magazynu (rys. 4.6). Na tej podstawie wyznaczana jest pojemność buforowa i czynna PMG, co pokazano na rysunku 4.7. Pojemność buforowa odpowiada wtedy ilości gazu w magazynie przy ciśnieniu minimalnym, natomiast pojemność czynna magazynu jest różnicą ilości gazu przy ciśnieniu maksymalnym i minimalnym.



Rys. 4.7. Określenie pojemności czynnej i buforowej PMG

#### 4.4. Określenie parametrów pracy podziemnego magazynu gazu

Przedstawioną w podrozdziałach 4.1–4.3 metodykę zastosowano do określenia parametrów pracy podziemnego magazynu gazu wytwarzanego w częściowo szcerpanym złożu gazu ziemnego. W tym celu zbudowano algorytm obliczeniowy, na podstawie którego wyznaczone zostały takie parametry, jak: pojemność czynna i buforowa magazynu, ciśnienie maksymalne i minimalne w złożu, wydajność zatłaczania i odbioru gazu pojedynczym odwiertem oraz sumarycznie dla całego magazynu. Analizę pracy magazynu wykonano dla

różnej liczby odwiertów eksploatacyjnych i wartości minimalnego ciśnienia głowicowego, przy jakim gaz jest odbierany z magazynu.

Dane z przebiegu eksploatacji złoża w postaci skumulowanych ilości wydobytych płynów oraz zmian ciśnienia złożowego pokazano w tabeli 4.1. Eksploatowany jest gaz wysokometanowy. Początkowe ciśnienie w złożu wyniosło 152,4 bara, natomiast temperatura złożowa 325 K. Analizowane jest złożo typu warstwowego, którego średnia miąższość wynosi 75,5 m. Pod względem litologicznym złożo tworzą piaskowce, których średnia porowatość wynosi 23%, natomiast przepuszczalność w kierunku poziomym jest równa 95 mD. Przepuszczalność skały w kierunku pionowym jest trzykrotnie mniejsza od poziomej. Dla celów magazynowania gazu założono udostępnienie złoża odwiertami horyzontalnymi o długości odcinka poziomego 500 m wyposażonymi w rury wydobywcze o średnicy 5 cali. Średnia głębokość odwiertu wynosi 1660 m. W obliczeniach przyjęto maksymalne ciśnienie na głowicy odwiertu na poziomie 140 barów, zaś minimalne ciśnienie głowicowe odpowiednio 40 barów (wariant 1) i 60 barów (wariant 2). Z kolei maksymalne ciśnienie w PMG nie powinno przekraczać ciśnienia początkowego w złożu. Czasy zatłaczania gazu i odbioru gazu są równe i wynoszą 120 dni. Pomiędzy okresami zatłaczania/odbioru gazu do/z PMG przyjęto okresy przestoju wynoszące dwa miesiące.

**Tabela 4.1**  
Przebieg eksploatacji analizowanego złoża

Czas eksploatacji [dni]	$G_p$ [mld Nm <sup>3</sup> ]	$W_p$ [m <sup>3</sup> ]	$p$ [MPa]
0	0	0	15,24
603	0,587	583	13,59
1 181	1,118	1 088,3	12,43
1 776	1,63	1 628,4	11,03
2 223	2,037	2 124,7	10,12
2 764	2,478	2 811,7	8,97
3 749	3,134	3 930,5	7,21
4 529	3,588	4 911,6	5,77
5 239	3,933	5 879,7	4,77
7 432	4,598	8 479,6	2,84

Własności PVT gazu będące funkcją ciśnienia, tj. współczynnik ściśliwości gazu, gęstość i lepkość dynamiczną wyznaczono na podstawie równań i korelacji opisanych zależnościami, odpowiednio: (4.39), (4.41) i (4.42).

Współczynnik ściśliwości gazu  $z$  został wyznaczony na podstawie korelacji Dranchuka–Purvisa–Robinsona [64]:

$$z = 1 + \left( A_1 + A_2/T_{pr} + A_3/T_{pr}^3 \right) \cdot \rho_r + \left( A_4 + A_5/T_{pr} \right) \cdot \rho_r^2 + A_5 \cdot A_6 \cdot \rho_r^5/T_{pr} + \\ + A_7 \cdot \rho_r^2/T_{pr}^3 \cdot \left( 1 + A_8 \cdot \rho_r^2 \right) \cdot \exp\left( -A_8 \cdot \rho_r^2 \right) \quad (4.39)$$

Wartości stałych  $A_1$ – $A_8$  we wzorze (4.39) są następujące:

$$\begin{array}{llll} A_1 = 0,31506237 & A_3 = -0,57832729 & A_5 = -0,61232032 & A_7 = 0,68157001 \\ A_2 = -1,0467099 & A_4 = 0,53530771 & A_6 = -0,10488813 & A_8 = 0,68446549 \end{array}$$

a gęstość zredukowana gazu:

$$\rho_r = 0,27 \frac{P_{pr}}{z \cdot T_{pr}} \quad (4.40)$$

Równanie (4.39) jest uwikłane ze względu na występujący w nim współczynnik  $z$ , zarówno z lewej, jak i prawej strony. Procedurę numeryczną rozwiązania równania (4.39) zapisaną w systemie MathCad z wykorzystaniem funkcji *root* przedstawia rysunek 4.8.

$$\begin{array}{l} z(p) := \left[ \begin{array}{l} z \leftarrow 1 \\ (A1 \leftarrow 0.31506237 \quad A2 \leftarrow -1.04670990 \quad A3 \leftarrow -0.57832729 \quad A4 \leftarrow 0.53530771) \\ (A5 \leftarrow -0.61232032 \quad A6 \leftarrow -0.10488813 \quad A7 \leftarrow 0.68157001 \quad A8 \leftarrow 0.68446549) \\ \left( P_{pr} \leftarrow \frac{p}{P_{pc}} \quad T_{pr} \leftarrow \frac{T}{T_{pc}} \right) \\ \left( C1 \leftarrow A1 + \frac{A2}{T_{pr}} + \frac{A3}{T_{pr}^3} \quad C2 \leftarrow A4 + \frac{A5}{T_{pr}} \quad C3 \leftarrow A5 \cdot \frac{A6}{T_{pr}} \right) \\ z \leftarrow \text{root} \left[ z - \left[ \begin{array}{l} 1 + C1 \cdot \frac{0.27 \cdot P_{pr}}{z \cdot T_{pr}} + C2 \cdot \left( \frac{0.27 \cdot P_{pr}}{z \cdot T_{pr}} \right)^2 + C3 \cdot \left( \frac{0.27 \cdot P_{pr}}{z \cdot T_{pr}} \right)^5 \dots \\ + \frac{A7 \cdot \left( \frac{0.27 \cdot P_{pr}}{z \cdot T_{pr}} \right)^2}{T_{pr}^3} \cdot \left[ 1 + A8 \cdot \left( \frac{0.27 \cdot P_{pr}}{z \cdot T_{pr}} \right)^2 \right] \cdot \exp \left[ -A8 \cdot \left( \frac{0.27 \cdot P_{pr}}{z \cdot T_{pr}} \right)^2 \right] \end{array} \right], z \end{array} \right. \end{array} \right]$$

Rys. 4.8. Procedura numeryczna wyznaczania współczynnika ściśliwości gazu  $z$

Współczynnik lepkości dynamicznej gazu wyznaczono na podstawie korelacji Lee–Gonzaleza–Eakina:

$$\mu = U \cdot \exp \left( X \cdot \left( \frac{P_g}{1000} \right)^Y \right) \cdot 10^{-7} \quad (4.41)$$

gdzie:

$$U = \frac{(9,4 + 0,02 \cdot M_g) \cdot (1,8 \cdot T)^{1,5}}{209 + 19 \cdot M_g + 1,8 \cdot T}$$

$$X = 3,5 + \frac{986}{1,8 \cdot T} + 0,01 \cdot M_g, \quad Y = 2,4 - 0,2 \cdot X$$

$\rho_g$  – gęstość gazu, którą na podstawie równania stanu gazu można zapisać jako:

$$\rho_g = \frac{p}{z \cdot R \cdot T} \quad (4.42)$$

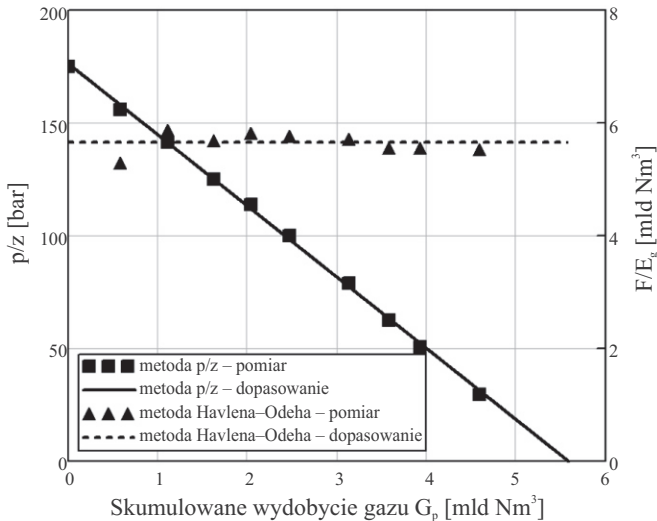
Zmiany własności gazu dla ciśnień w zakresie 20–160 barów podano w tabeli 4.2.

**Tabela 4.2**

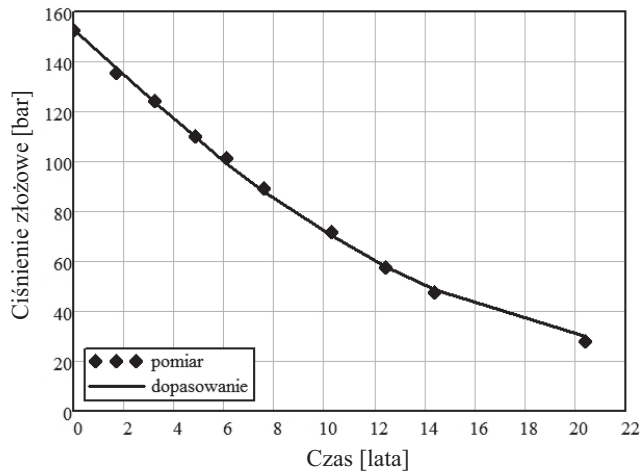
Parametry PVT gazu w warunkach złożowych

$p$ [bar]	$z$ [-]	$B_g$ [-]	$\mu$ [cP]	$\rho_g$ [kg/m <sup>3</sup> ]
160	0,87	0,0066	0,0166	111,0
140	0,872	0,0075	0,0158	96,9
120	0,879	0,0088	0,0151	82,4
100	0,89	0,011	0,0145	67,8
80	0,906	0,014	0,0139	53,3
60	0,925	0,019	0,0134	39,1
40	0,948	0,029	0,013	25,5
20	0,973	0,059	0,0127	12,4

Na podstawie danych z przebiegu eksploatacji oceniono najpierw warunki energetyczne złoża metodami Havlena–Odeha oraz  $p/z$ . Następnie wykorzystując równanie bilansu masowego i metody regresji liniowej, określono zasoby początkowe gazu w złożu. Wyniki diagnozowania mechanizmu pracy złoża wraz z dopasowanymi prostymi pokazano na rysunku 4.9. Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że złożo to pracuje w warunkach zbliżonych do wolumetrycznych, a jego zasoby początkowe oszacowano na 5,6 mld Nm<sup>3</sup>. Poprawność dopasowania modelu bilansu masowego pokazano przez porównanie ciśnień zmierzonych i wyliczonych (rys. 4.10).



**Rys. 4.9.** Diagnozowanie warunków energetycznych złoża



Rys. 4.10. Dopasowanie wyliczonych ciśnień złożowych do zmierzonych

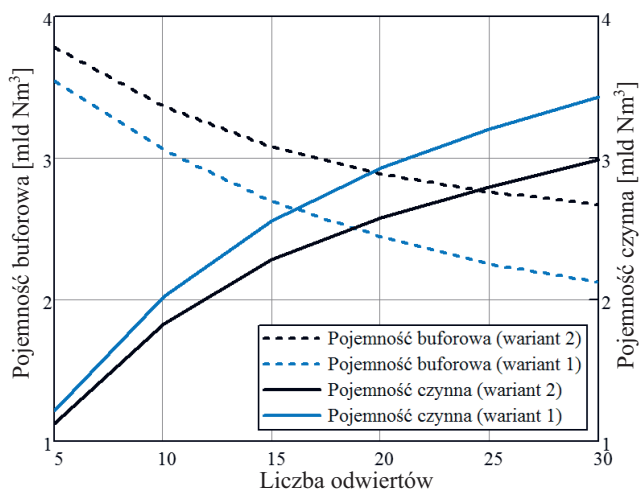
Wyniki obliczeń parametrów pracy magazynu dla zmieniającej się liczby odwiertów eksploatacyjnych w dwóch wariantach różniących się wielkością minimalnego ciśnienia głowicowego odbioru gazu z PMG pokazano w tabeli 4.3 oraz na rysunkach 4.11–4.13.

Tabela 4.3

Parametry pracy magazynu gazu

Liczba odwiertów	5	10	15	20	25	30
Wariant 1 (minimalne ciśnienie głowicowe odbioru gazu 40 barów)						
Pojemność czynna [mld Nm <sup>3</sup> ]	1,21	2,018	2,56	2,93	3,20	3,43
Pojemność buforowa [mld Nm <sup>3</sup> ]	3,55	3,05	2,67	2,44	2,26	2,16
Wydajność odbioru gazu z PMG [mln Nm <sup>3</sup> /d]	10,11	16,81	21,32	24,43	26,72	28,64
Wydajność odbioru odwiertu [Nm <sup>3</sup> /s]	23,40	19,46	16,45	14,14	12,37	11,05
Ciśnienie maksymalne w PMG [MPa]	13,07	13,89	14,38	14,68	14,91	15,18
Ciśnienie minimalne w PMG [MPa]	9,92	8,63	7,69	7,01	6,51	6,16
Wariant 2 (minimalne ciśnienie głowicowe odbioru gazu 60 barów)						
Pojemność czynna [mld Nm <sup>3</sup> ]	1,12	1,83	2,28	2,58	2,79	2,98
Pojemność buforowa [mld Nm <sup>3</sup> ]	3,78	3,36	3,07	2,89	2,76	2,67
Wydajność odbioru gazu z PMG [mln Nm <sup>3</sup> /d]	9,37	15,27	19,02	21,52	23,35	24,96
Wydajność odbioru odwiertu [Nm <sup>3</sup> /s]	21,68	17,67	14,68	12,45	10,81	9,63
Ciśnienie maksymalne w PMG [bar]	13,45	14,21	14,64	14,92	15,16	15,45
Ciśnienie minimalne w PMG [bar]	10,53	9,43	8,69	8,19	7,85	7,63

Na rysunku 4.11 przedstawiono wykres zmian pojemności czynnej i buforowej magazynu w funkcji liczby odwiertów przy minimalnym ciśnieniu głowicowym wynoszącym odpowiednio 40 barów (wariant 1) i 60 barów (wariant 2). Jak widać, wraz ze wzrostem liczby odwiertów pojemność czynna magazynu rośnie, natomiast zmniejsza się wymagana wielkość pojemności buforowej. Istotny wpływ na pojemność czynną i buforową ma wartość minimalnego ciśnienia głowicowego w fazie odbioru gazu z magazynu. Przy niższym ciśnieniu głowicowym (wariant 1) pojemność czynna magazynu jest większa, z kolei wymagana pojemność buforowa jest mniejsza. Podwyższenie ciśnienia głowicowego (wariant 2) powoduje obniżenie pojemności czynnej magazynu oraz wzrost pojemności buforowej magazynu.

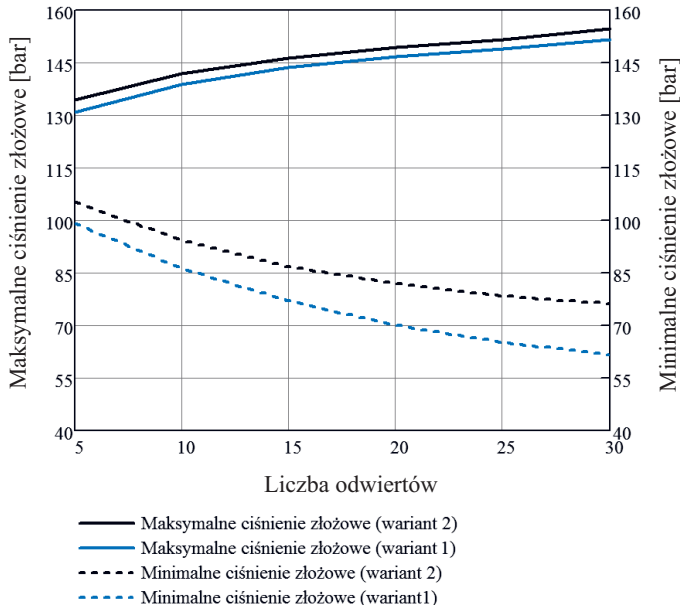


Rys. 4.11. Pojemność czynna i buforowa magazynu w funkcji liczby odwiertów eksploatacyjnych

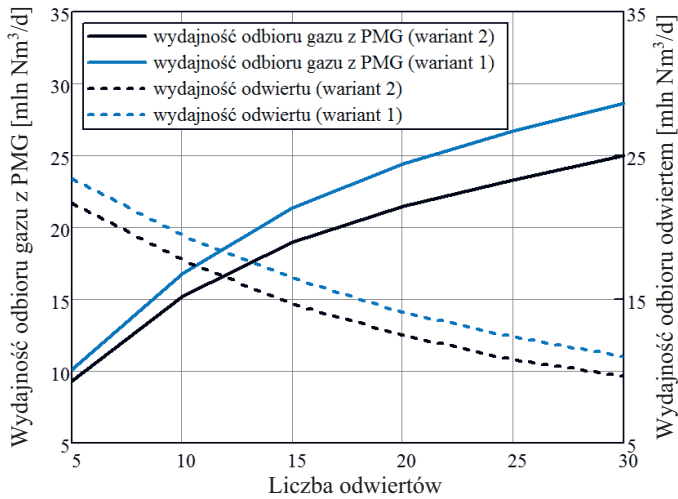
Z wielkością pojemności czynnej i buforowej magazynu wiąże się bezpośrednio zakres ciśnień pracy magazynu, co pokazano na rysunku 4.12. W zależności od liczby odwiertów i minimalnego ciśnienia głowicowego odbioru gazu obserwuje się wzrost różnicy między ciśnieniem minimalnym i maksymalnym w magazynie. Przy niższym ciśnieniu odbioru gazu z PMG (wariant 1) zakres zmian ciśnienia złożowego jest większy, co przekłada się na większe zużycie energii niezbędnej do sprężania gazu w fazie zatłaczania gazu do PMG. Z kolei w przypadku wyższych wartości ciśnienia głowicowego odbioru gazu z magazynu (wariant 2) maksymalne ciśnienie pracy magazynu jest nieznacznie wyższe w porównaniu z wariantem 1.

Największą pojemność czynną magazynu na poziomie 3,43 mld Nm<sup>3</sup> uzyskano dla wariantu pierwszego z użyciem 30 odwiertów poziomych. Dla wariantu drugiego maksymalna pojemność czynna magazynu wynosi ok. 3 mld Nm<sup>3</sup>, przy wyższej pojemności buforowej w porównaniu z wariantem 1.

Na rysunku 4.13 pokazano zmianę wydajności odbioru gazu z PMG oraz wydajność odbioru jednym odwiertem w funkcji liczby odwiertów eksploatacyjnych.



Rys. 4.12. Zakres ciśnień pracy PMG w funkcji liczby odwiertów eksploatacyjnych



Rys. 4.13. Wydajność odwiertu oraz sumaryczna wydajność odbioru gazu z PMG w funkcji liczby odwiertów

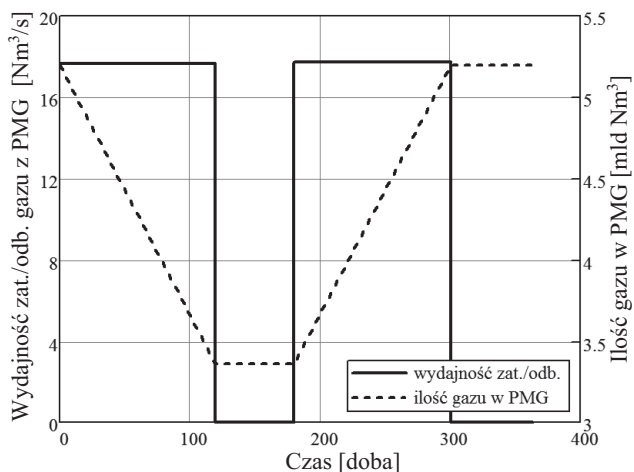
Jak można zauważyć, ze wzrostem liczby odwiertów wydajność pojedynczego odwiertu zmniejsza się, natomiast sumaryczna wydajność odbioru gazu z PMG wzrasta (rys. 4.13). Jednocześnie niższe wydajności odbioru uzyskiwane są przy wyższej wartości ciśnienia głowicowego. Maksymalną wydajność odbioru gazu z magazynu wynoszącą 28,6 mln Nm<sup>3</sup> na dobę uzyskano w wariantcie pierwszym przy użyciu 30 odwiertów poziomych. Z analizy



wykresu pokazanego na rysunku 4.13 widać, że największa wydajność odwiertu ma miejsce przy małej liczbie odwiertów eksploatacyjnych i dla niższej wartości ciśnienia głowicowego (wariant 1). W takich warunkach przepływu następuje duża strata ciśnienia na pokonanie oporów przepływu gazu zarówno w złożu, jak i w odwiercie. W związku z czym utrzymanie wymaganej mocy magazynu jest związane z koniecznością wytworzenia odpowiednio dużej pojemności buforowej magazynu celem podtrzymywania ciśnienia złożowego na odpowiednio wysokim poziomie (rys. 4.11). Znaczący wpływ na wydajność odwiertu poziomego może mieć długość odcinka poziomego. W ramach prowadzonych analiz zbadano wpływ długości odcinka poziomego odwiertu na wydajność dopływu gazu do odwiertu. Uzyskane wyniki wskazują jednak na niewielki przyrost wydajności odwiertu o większej długości odcinka poziomego, co może wynikać z faktu stosunkowo dużej miąższości złoża jak również małej niejednorodności ośrodka porowatego.

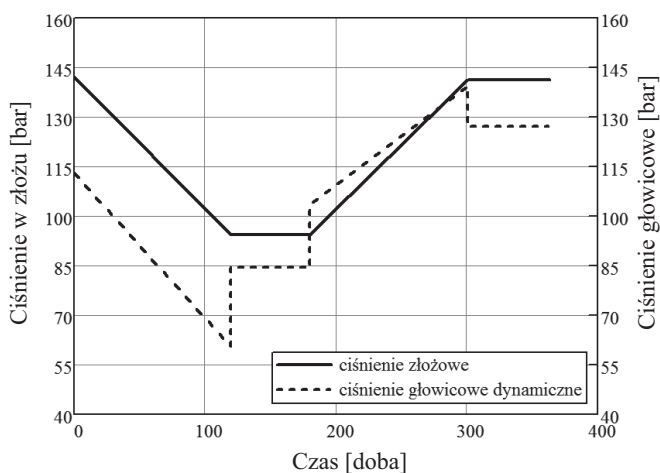
Analizując uzyskane wyniki, można zauważyć, że w zależności od liczby odwiertów produkcyjnych, jak również minimalnego ciśnienia głowicowego zmienia się wielkość pojemności czynnej i buforowej magazynu, i co za tym idzie, zakres ciśnień pracy PMG. Większą pojemność czynną magazynu, jak również szerszy zakres ciśnień pracy uzyskano przy niższym ciśnieniu głowicowym, co wydaje się naturalne. Jednakże wzrost pojemności czynnej magazynu wiąże się z koniecznością użycia większej liczby odwiertów oraz sprężania gazu do wyższego ciśnienia w cyklu napełniania magazynu.

W trakcie podziemnego magazynowania gazu następuje naprzemienne zatłaczanie i odbiór gazu ze złoża. Podczas tego procesu następuje zmiana ciśnienia złożowego i głowicowego oraz ilości gazu znajdującej się w magazynie. Na rysunku 4.14 pokazano zmiany ilości gazu w PMG oraz wydajności zatłaczania i odbioru gazu jednego cyklu magazynowania gazu dla wariantu drugiego z wykorzystaniem 10 odwiertów poziomych. Najpierw, przez 120 dni, następuje odbiór gazu z magazynu ze stałą wydajnością, w wyniku czego zmniejsza się ilość gazu w PMG, czego konsekwencją jest spadek ciśnienia złożowego.



**Rys. 4.14.** Wydajność zatłaczania gazu do PMG i odbioru gazu z PMG oraz zmiana ilości gazu w PMG, wariant 2, 10 odwiertów eksploatacyjnych

Ze spadkiem ciśnienia złożowego następuje obniżanie się ciśnienia głowicowego, które w końcowej fazie osiąga wartość minimalną wynoszącą 60 barów. Po okresie odbioru ma miejsce dwumiesięczna tzw. „stójka”, w trakcie której następuje stabilizacja ciśnienia w odwiercie. W fazie zatłaczania gazu do PMG ilość gazu w magazynie oraz ciśnienie w złożu stopniowo wzrastają. Charakterystycznym momentem fazy zatłaczania gazu jest punkt, w którym ciśnienie głowicowe zrównuje się z ciśnieniem panującym w złożu i w końcowej fazie zatłaczania jest nawet niższe od ciśnienia złożowego, pomimo trwającego zatłaczania gazu (rys. 4.15). Dzieje się tak, ze względu na wzrost ciśnienia słupa gazu w odwiercie, które w fazie zatłaczania, wywierając nacisk na dno odwiertu, wspomaga zatłaczanie gazu do PMG.



Rys. 4.15. Zmiana ciśnienia złożowego i głowicowego dynamicznego, wariant 2, 10 odwiertów eksploatacyjnych

Ocenę możliwości wytworzenia magazynu gazu w analizowanym złożu przeprowadzono także z zastosowaniem odwiertów pionowych. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że wytworzenie magazynu o podobnej pojemności czynnej wymagałoby zastosowania ponaddwukrotnie większej liczby odwiertów pionowych. Za wykorzystaniem odwiertów horyzontalnych w magazynowaniu gazu oprócz ich większych zdolności produkcyjnych w porównaniu z odwiertami pionowymi przemawia wiele czynników, tj.: mniejsze niebezpieczeństwo powstawania stożków i języków wodnych, większa powierzchnia kontaktu odwiertu ze złożem, a tym samym większa strefa drenażu, mniejsze opory przepływu gazu w strefie przyodwiertowej i związana z tym mniejsza depresja na złożu.

## **5. Modelowanie matematyczne pracy PMG w złożu z aktywną strefą wodonośną**

Ze względu na system energetyczny złoża gazu mogą pracować w warunkach wolumetrycznych (stała objętość porowa złoża) lub w warunkach wodnonaporowych (przemieszczanie konturu wodnego w miarę napełniania i opróżniania magazynu). W warunkach wolumetrycznych kontur gaz-woda nie zmienia swojego położenia, zatem magazynowanie gazu odbywa się w zbiorniku o stałej objętości porowej. W trakcie eksploatacji złoża gazu kontaktującego się z aktywną strefą wodonośną następuje stopniowy dopływ wody do złoża. Wielkość i intensywność tego dopływu wynika zarówno z wielkości i aktywności strefy wodonośnej, jak i własności petrofizycznych skały, a także od tempa szczypania zasobów złoża. Przekształcając takie złoże na podziemny magazyn, należy mieć na uwadze to, aby zminimalizować stopień zawodnienia złoża przez odpowiednio wczesne wyłączenie złoża z eksploatacji.

W początkowej fazie budowy magazynu następuje zwykle zwiększenie pojemności buforowej magazynu przez zatłoczenie do niego gazu, co ma na celu wyparcie wody z przestrzeni porowej złoża i powiększenie objętości porowej złoża dostępnej dla gazu. W trakcie magazynowania gazu jego ilość znajdująca się w magazynie zmienia się w zależności od fazy napełniania czy też odbioru gazu. W fazie odbioru gazu z PMG w miarę obniżania się ciśnienia złożowego będzie następował dopływ wody do złoża, z kolei w fazie zataczania woda będzie wypierana na zewnątrz złoża.

### **5.1. Metody określania wielkości dopływu wody do złoża/PMG**

W inżynierii złożowej istnieje wiele metod obliczania dopływu wody do złoża, z których najbardziej znane i najczęściej stosowane to metody van Everdingena–Hursta (stosowana dla ograniczonych i nieograniczonych stref wodonośnych) oraz Fetkovicha (wykorzystywana w przypadku ograniczonych stref wodonośnych). Stosuje się również kombinację tych metod (zmodyfikowana metoda Fetkovicha) – w przypadkach dużych lecz ograniczonych stref wodonośnych. W takim przypadku, w pierwszej fazie eksploatacji, kiedy strefa wodonośna zachowuje się jak nieograniczona, stosowana jest metoda van Everdingena–Hursta. Od momentu zaobserwowania wpływu granic strefy wodonośnej na zmianę ciśnienia wykorzystuje się metodę Fetkovicha.

### 5.1.1. Metoda van Everdingena–Hursta

Metoda van Everdingena–Hursta obliczania dopływu wody do złoża ze strefy wodonośnej opiera się na równaniu dopływu płynu słabościśliwego do odwiertu. Równanie to zaadaptowano do określania wielkości dopływu wody do złoża, traktując złożę jako wielkośrednicowy odwiert, do którego dopływa woda ze strefy wodonośnej. Dopływ wody do tak rozumianego odwiertu następuje w wyniku różnicy ciśnień na konturze złoża i w strefie wodonośnej. Zapisane za pomocą bezwymiarowych zmiennych promienia, czasu i ciśnienia  $r_D, t_D, p_D$  przyjmuje ono następującą postać [65]:

$$\frac{1}{r_D} \cdot \frac{\partial}{\partial r_D} \left( r_D \cdot \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right) = \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \quad (5.1)$$

gdzie:

$$r_D = \frac{r_a}{r_b} \text{ – bezwymiarowy promień,}$$

$$t_D = \frac{k \cdot t}{\phi \cdot \mu_w \cdot C_t \cdot r_b^2} \text{ – bezwymiarowy czas.}$$

Rozwiązanie równania dopływu wody do złoża dla stałej różnicy ciśnień  $\Delta p$  uzyskano dla warunków początkowo-brzegowych w postaci:

1. Warunek początkowy:

$$p = p_i = \text{const dla } t = 0 \text{ i wszystkich wartości } r \quad (5.2)$$

(stałe ciśnienie w całym obszarze)

2. Warunki brzegowe:

$$\Delta p = \text{const dla } r = r_b \text{ i } t > 0 \quad (5.3)$$

(stała różnica ciśnień pomiędzy ciśnieniem na konturze złoża i w strefie wodonośnej)

2a. Strefa wodonośna o nieograniczonym zasięgu:

$$p = p_i = \text{const dla } t > 0 \text{ i } r = \infty \quad (5.4)$$

(dla  $r = \infty$  ciśnienie w strefie wodonośnej jest stałe i równe początkowemu)

2b. Strefa wodonośna o ograniczonym zasięgu:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0 \text{ dla } t > 0 \text{ i } r = r_a \quad (5.5)$$

(brak dopływu wody spoza konturu strefy wodonośnej)

Rozwiązanie równania (5.1) przy warunkach początkowo-brzegowych (5.2)–(5.5) wyrażone w postaci skumulowanego dopływu wody do złoża jest następujące [65]:

$$W_e = 2 \cdot \pi \cdot r_b^2 \cdot h \cdot \phi \cdot C_t \cdot f \cdot \Delta p \cdot W_D(t_D) \quad (5.6)$$

Równanie (5.6) pozwala wyznaczyć skumulowaną ilość wody dopływającej do złoża, przy stałej różnicy ciśnień  $\Delta p$  pomiędzy ciśnieniem na konturze złoża i w strefie wodonośnej, przy czym jako ciśnienie na konturze złoża przyjmowane jest średnie ciśnienie w złożu.

Równanie (5.6) może być zapisane w postaci uproszczonej jako:

$$W_e = U \cdot \Delta p \cdot W_D(t_D) \quad (5.7)$$

gdzie  $U = 2 \cdot \pi \cdot r_b^2 \cdot h \cdot \phi \cdot C_t \cdot f$  jest stałą strefy wodonośnej.

Bezwymiarowa funkcja dopływu wody  $W_D$  jest zależna od bezwymiarowego czasu  $t_D$ , jak również promienia zredukowanego  $r_D$  określającego stosunek promienia strefy wodonośnej do średniego promienia złoża.

Wartości bezwymiarowej funkcji dopływu wody zestawione są w postaci tabelarycznej oraz na wykresach [65]. Można je także wyznaczyć na podstawie formuł empirycznych [66].

W przypadku stref wodonośnych o nieograniczonym zasięgu bezwymiarowa funkcja dopływu wody zależy jedynie od wartości bezwymiarowego czasu  $t_D$  i można ją wyznaczyć według następujących formuł [67]:

– dla  $t_D < 0,01$ :

$$W_D(t_D) = 2 \cdot \left( \frac{t_D}{\pi} \right)^{0,5} \quad (5.8)$$

– dla  $0,01 < t_D < 200$ :

$$W_D(t_D) = \frac{1,2838 \cdot \sqrt{t_D} + 1,19328 \cdot t_D + 0,269872 \cdot t_D^{3/2} + 0,00855294 \cdot t_D^2}{1 + 0,616599 \cdot \sqrt{t_D} + 0,0413008 \cdot t_D} \quad (5.9)$$

– dla  $t_D > 200$ :

$$W_D(t_D) = \frac{-4,29881 + 2,02566 \cdot t_D}{\ln(t_D)} \quad (5.10)$$

W ograniczonych strefach wodonośnych w zależności od wielkości bezwymiarowego promienia  $r_D$  można określić pewną wartość czasu bezwymiarowego  $t_{Dkr}$ , dla której bezwymiarowa funkcja dopływu wody osiąga stałą maksymalną wartość. Wartość czasu  $t_{Dkr}$  wyznacza się z zależności [55]:

$$t_{Dkr} = 0,4 \cdot (r_D - 1)^2 \quad (5.11)$$

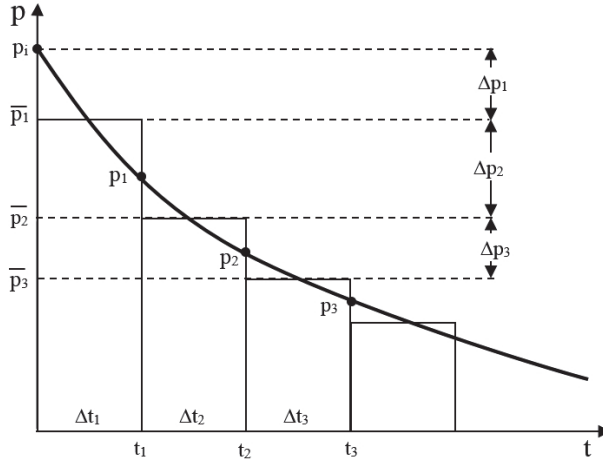
Bezwymiarową funkcję dopływu wody dla czasów bezwymiarowych  $t_D < t_{Dkr}$  wyznacza się wówczas tak jak dla stref o nieograniczonym zasięgu, zaś dla czasów  $t_D > t_{Dkr}$ , tj. dla ograniczonych stref wodonośnych z następujących równań [55]:

$$W_D = 0,5 \cdot (r_D^2 - 1) \cdot \left[ 1 - \exp\left( \frac{-2 \cdot t_D}{J^*} \right) \right] \quad (5.12)$$

gdzie:

$$J^* = r_D^4 \cdot \frac{\ln(r_D)}{r_D^2 - 1} + 0,25 \cdot (1 - 3 \cdot r_D^2) \quad (5.13)$$

Równanie (5.6) jest słuszne dla stałej różnicy ciśnień pomiędzy ciśnieniem na konturze złoża i w strefie wodonośnej. W rzeczywistym przypadku spełnienie tego warunku przy obniżającym się ciśnieniu w eksploatowanym złożu nie jest możliwe w dłuższej perspektywie czasowej. Zastosowanie metody van Everdingena–Hursta do wyznaczenia skumulowanego dopływu wody dla zmieniającego się ciśnienia złożowego jest możliwe przez zastosowanie zasady superpozycji rozwiązań. W tym celu zmianę ciśnienia złożowego aproksymuje się serią spadków ciśnienia, dla których zakłada się  $\Delta p = \text{const}$  (rys. 5.1).

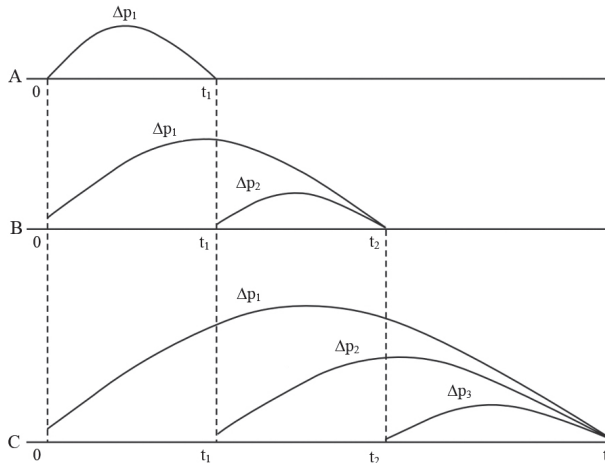


Rys. 5.1. Dyskretyzacja zmiany ciśnienia złożowego

Spadki ciśnienia w poszczególnych przedziałach czasowych  $\Delta t$  wyznaczane są wówczas w postaci różnic ciśnień średnich wyliczanych jako średnia arytmetyczna ciśnień złożowych odpowiadających początkowi i końcowi danego interwału wg zależności:

$$\Delta p_j = \bar{p}_j - \bar{p}_{j+1} = \frac{p_{j-1} + p_j}{2} - \frac{p_j + p_{j+1}}{2} = \frac{p_{j-1} - p_{j+1}}{2} \quad (5.14)$$

Skumulowaną ilość dopływającej do złoża wody wyznacza się przez sumowanie dopływów cząstkowych wyznaczanych dla każdego spadku ciśnienia oddzielnie z zastosowaniem zasady superpozycji rozwiązań. Według tej zasady dopływ wody spowodowany spadkiem ciśnienia powstałym w chwili  $t$  trwa od momentu jego wystąpienia do końca rozpatrywanego okresu eksploatacji złoża. Graficznie zastosowanie zasady superpozycji w określaniu dopływu wody do złoża pokazano na rysunku 5.2.



Rys. 5.2. Zastosowanie superpozycji rozwiązań w określaniu dopływu wody do złoża [67]

Skumulowany dopływ wody do złoża jest wówczas sumą dopływów wody spowodowanych kolejnymi spadkami ciśnienia  $\Delta p$  od momentu ich wystąpienia do końca rozpatrywanego okresu eksploatacji złoża. Skumulowany dopływ wody do złoża wyznacza się według zależności:

$$W_e = 2 \cdot \pi \cdot r_b^2 \cdot h \cdot \phi \cdot C_t \cdot f \cdot \sum_{j=0}^{n-1} \Delta p_j \cdot W_D(t_{Dn} - t_{Dj}) \quad (5.15)$$

Metoda van Everdingena–Hursta wynika z dokładnego rozwiązania równania dyfuzji, przez co jest bardziej restrykcyjna matematycznie. Jednakże w związku z koniecznością stosowania zasady superpozycji nie jest możliwe obliczenie skumulowanego dopływu wody do złoża wprost, przez zwykłe zsumowanie dopływu z kroku poprzedniego i bieżącego. Dla każdego kroku czasowego konieczne jest odniesienie się do momentu jego rozpoczęcia, co znacznie utrudnia zapis równań i wydłuża czas obliczeń [49]. Mimo to metoda ta jest najdokładniejsza i stanowi wiodący model wykorzystywany w większości programów komercyjnych.

### 5.1.2. Metoda Fetkovicha

Model matematyczny metody Fetkovicha opisywany jest układem dwóch głównych równań. Pierwszym jest równanie dopływu wody do złoża ze strefy zawodnionej o ograniczonym zasięgu w postaci [65]:

$$q_w = \frac{dW_e}{dt} = J(p_a - p_r) \quad (5.16)$$

Drugim równaniem metody Fetkovicha jest równanie bilansu masowego dla strefy wodonośnej o stałej ściśliwości, z którego wynika, że spadek ciśnienia w strefie wodonośnej jest wprost proporcjonalny do ilości wypływającej z niej wody:

$$W_e = C_t \cdot W_i \cdot (p_i - p_a) \quad (5.17)$$

Z równania (5.17) wynika, że maksymalny wypływ wody wystąpi, gdy  $p_a = 0$ , zatem:

$$W_{ei} = C_t \cdot W_i \cdot p_i \quad (5.18)$$

Równanie (5.17) można przekształcić w celu określenia ciśnienia w strefie wodonośnej po wypłynięciu z niej ilości wody  $W_e$  jako:

$$p_a = p_i \cdot \left( 1 - \frac{W_e}{C_t \cdot W_i \cdot p_i} \right) \quad (5.19)$$

Wykorzystując zależność (5.17), równanie bilansu masowego dla strefy wodonośnej można zapisać w postaci:

$$p_a = p_i \cdot \left( 1 - \frac{W_e}{W_{ei}} \right) \quad (5.20)$$

Różniczkując równanie (5.20) względem czasu  $t$ , uzyskuje się zależność:

$$\frac{dW_e}{dt} = -\frac{W_{ei}}{p_i} \cdot \frac{dp_a}{dt} \quad (5.21)$$

Wstawiając równanie (5.21) do równania (5.16), po scałkowaniu i przekształceniu otrzymuje się zależność na skumulowany dopływ wody do złoża w postaci [65]:

$$W_e = \frac{W_{ei}}{p_i} \cdot (p_i - p_r) \cdot (1 - e^{-J \cdot p_i \cdot t / W_{ei}}) \quad (5.22)$$

Uzyskane rozwiązanie jest słuszne dla stałej różnicy ciśnień. W rzeczywistości ciśnienie na konturze gaz-woda zmienia się w czasie, co wymagałoby stosowania zasady superpozycji, podobnie jak ma to miejsce w metodzie van Everdingena–Hurst. Fetkovich natomiast pokazał, że można uniknąć konieczności posługiwania się metodą superpozycji, stosując następującą procedurę dyskretną, gdzie cząstkowy dopływ wody do złoża zapisywany jest jako:

$$\Delta W_{en} = \frac{W_{ei}}{p_i} \cdot (\bar{p}_{a_{n-1}} - \bar{p}_{r_n}) \cdot (1 - e^{-J \cdot p_i \cdot \Delta t_n / W_{ei}}) \quad (5.23)$$

gdzie: ciśnienie w strefie wodonośnej pod koniec okresu czasowego  $n - 1$  na podstawie równania (5.20) wyznacza się następująco:

$$\bar{p}_{a_{n-1}} = p_i \cdot \left( 1 - \frac{\sum_{j=1}^{n-1} \Delta W_{ej}}{W_{ei}} \right) \quad (5.24)$$

a ciśnienie średnie w złożu dla  $n$ -tego okresu czasowego:

$$\bar{p}_{r_n} = \frac{p_{r_{n-1}} + p_{r_n}}{2} \quad (5.25)$$

Skumulowany dopływ wody do złoża jest sumą dopływów w kolejnych okresach czasowych na podstawie zależności:

$$W_e = \sum_{j=1}^n \Delta W_{ej} = W_{e_{n-1}} + \Delta W_{en} \quad (5.26)$$

Występujący w równaniu (5.16) indeks wydajności  $J$  zależy od przyjętej geometrii przepływu oraz stanu hydrodynamicznego, w jakim znajduje się strefa wodonośna. Metoda Fetkovicha stosowana jest do stref wodonośnych o ograniczonym zasięgu. Zasadniczym stanem hydrodynamicznym dla takich stref wodonośnych jest stan semiustalony, dla którego indeks wydajności można opisać zależnością:

$$J = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot k \cdot h}{\mu_w \cdot \left( \ln \frac{r_a}{r_b} - \frac{3}{4} \right)} \quad (5.27)$$



### 5.1.3. Algorytm obliczania zmian ciśnienia złożowego oraz wielkości dopływu wody do złoża

Dopływ wody do złoża kontaktującego się ze strefą wodonośną następuje w wyniku spadku ciśnienia złożowego spowodowanego wydobyciem płynów złożowych. Zmianę ciśnienia w złożu w funkcji wydobywania płynów złożowych pozwala określić równanie bilansu masowego, które dla złóż kontaktujących się z aktywną strefą wodonośną opisane jest zależnością (4.6). Dla dowolnego kroku czasowego  $n$ :

$$\left(\frac{p}{z}\right)_n = \frac{p_i}{z_i} \frac{\left(1 - \frac{G_{p_n}}{G}\right)}{1 - \frac{W_{e_n}}{G \cdot B_{gi}}} \quad (5.28)$$

Z kolei wielkość dopływu wody do złoża może być wyznaczona z wykorzystaniem omówionych wcześniej metod van Everdingena–Hursta i Fetkovicha.

W przypadku metody van Everdingena–Hursta dopływ wody opisywany jest równaniem (5.15), które dla kroku czasowego  $n$  można zapisać, wydzielając ostatni człon jako:

$$W_{e_n} = U \cdot \left[ \sum_{j=0}^{n-2} \Delta p_j \cdot W_D(u \cdot (t_n - t_j)) + \Delta p_{n-1} \cdot W_D(u \cdot (t_n - t_{n-1})) \right] \quad (5.29)$$

gdzie  $\Delta p_{n-1} = \frac{p_{n-2} - p_n}{2}$ .

Parametr  $u$  wynikający z definicji bezwymiarowego czasu  $t_D$  wyznacza się z następującego równania:

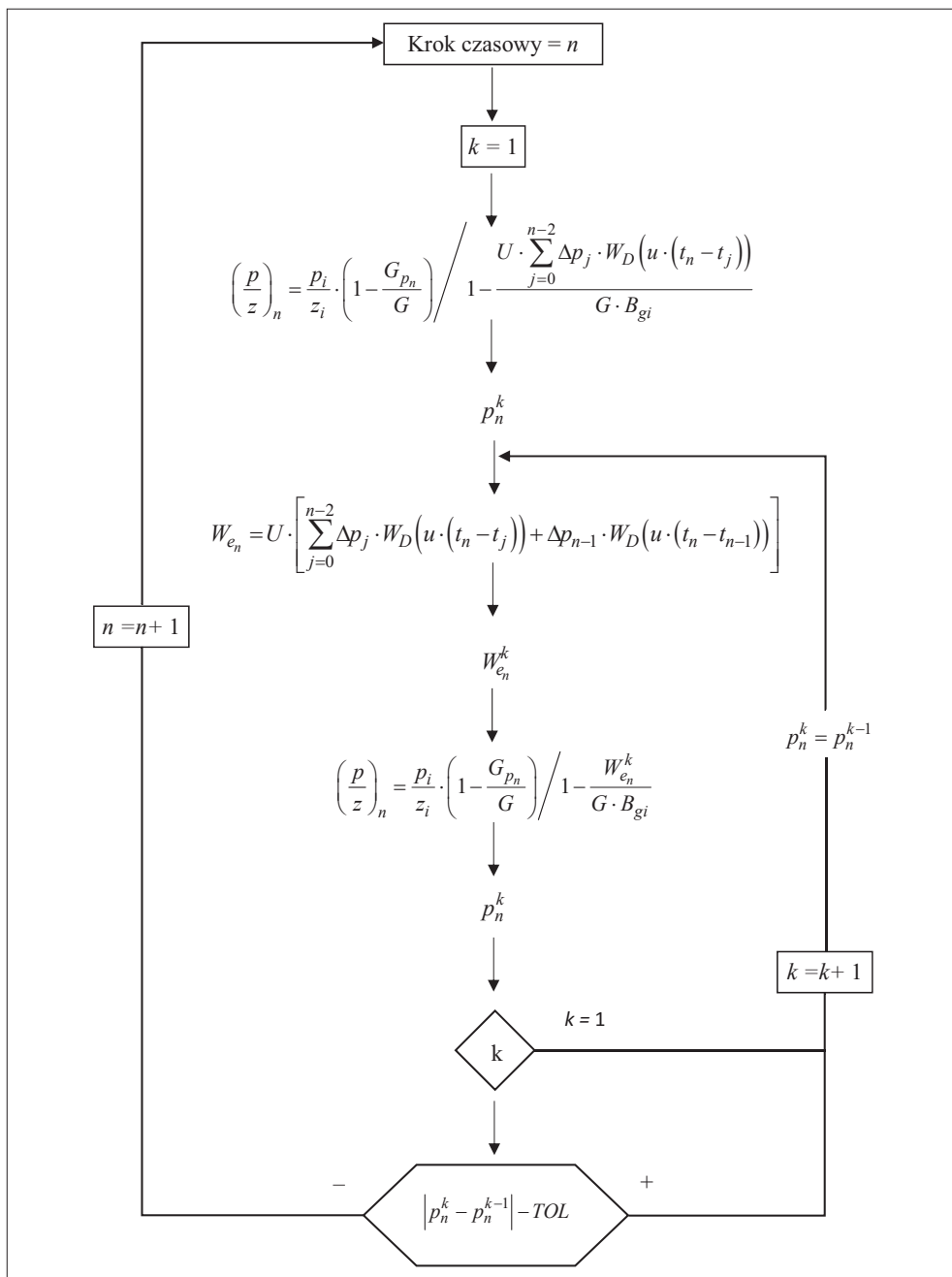
$$u = \frac{k}{\phi \cdot \mu_w \cdot C_i \cdot r_b^2} \quad (5.30)$$

Wówczas bezwymiarowy czas opisywany jest zależnością:  $t_D = u \cdot t$ .

Zachowanie się układu złożo–strefa wodonośna może zatem być opisane układem równań (5.28) i (5.29). W równaniach tych nieznanymi parametrami są ciśnienie złożowe  $p_n$  i dopływ wody  $W_{en}$  w bieżącym kroku czasowym  $n$ . Ponieważ równania te są zależne od siebie, muszą być zatem rozwiązywane jednocześnie metodami numerycznymi, gdzie szukane parametry wyznaczone są przez kolejne przybliżenia.

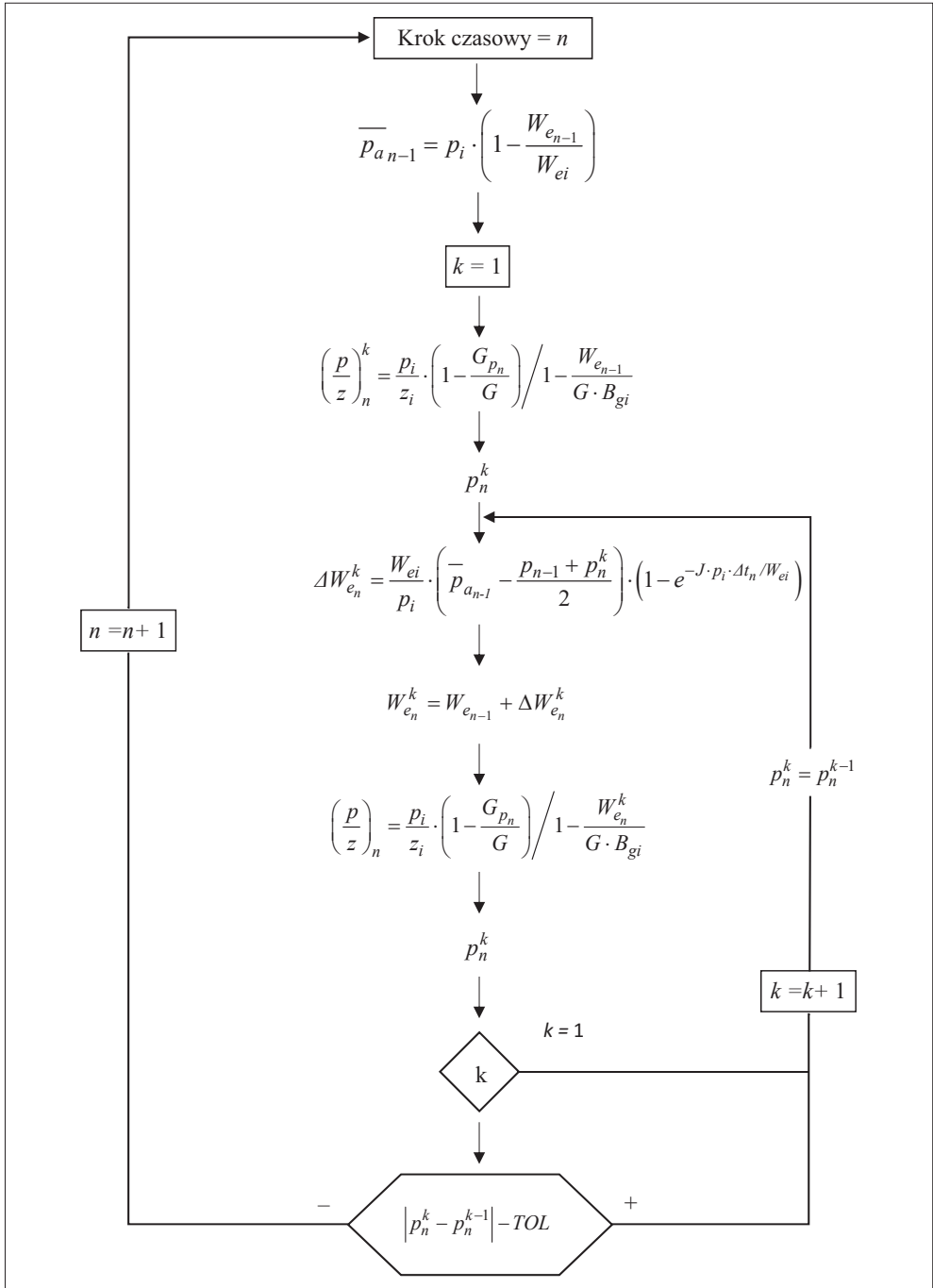
Algorytm rozwiązania układu równań (5.28) i (5.29) dla znanych parametrów charakteryzujących strefę wodonośną oraz zasobów początkowych złoża przedstawiono na rysunku 5.3.

W metodzie Fetkovicha ciśnienie złożowe oraz wielkość dopływu wody do złoża dla dowolnego kroku czasowego  $n$  wyznacza się z wykorzystaniem równań (5.23), (5.24), (5.26) i (5.28) według algorytmu pokazanego na rysunku 5.4.



gdzie:  $k$  – krok iteracyjny,  $n$  – krok czasowy,  $TOL$  – błąd obliczeń iteracyjnych

**Rys. 5.3.** Algorytm wyliczania ciśnienia złożowego oraz wielkości dopływu wody do złoża (metoda van Everdingena–Hursta) [49]



Rys. 5.4. Algorytm wyliczania ciśnienia złożowego oraz wielkości dopływu wody do złoża (metoda Fetkovicha) [65]

### 5.1.4. Kalibracja modelu bilansowego – wyznaczanie parametrów strefy wodonośnej

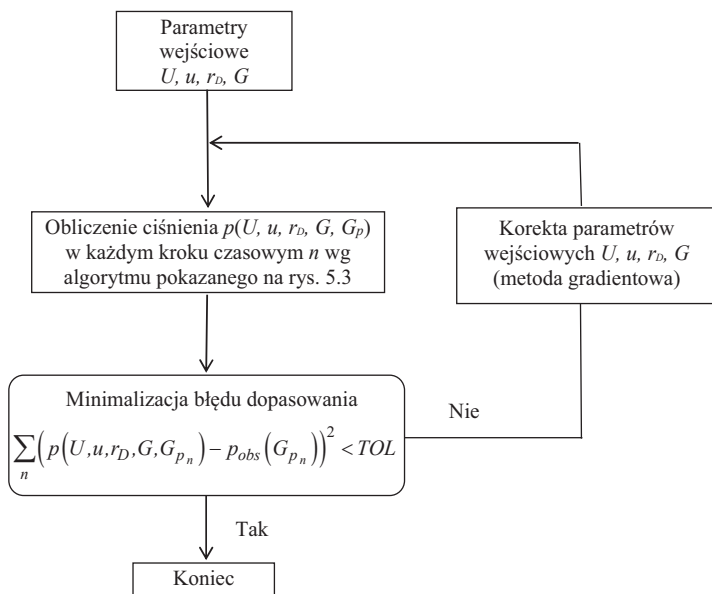
Przedstawione w podrozdziale 5.1.3 metody rozwiązywania bilansu masowego z uwzględnieniem dopływu wody do złoża wymagają wcześniejszego zdefiniowania parametrów opisujących strefę wodonośną, jak również początkowych zasobów gazu w złożu. W praktyce parametry te nie są znane i muszą być wyznaczone na podstawie danych pomiarowych z przebiegu eksploatacji, tj. wydobycia płynów złożowych, pomiarów ciśnień złożowych, jak też parametrów PVT płynów złożowych. Jest to rozwiązanie tzw. „zagadnienia odwrotnego” polegające na dopasowaniu modelu bilansowego do zmierzonych ciśnień złożowych (tzw. kalibracja modelu).

Dopasowywanymi parametrami są zasoby początkowe gazu w złożu  $G$  oraz parametry charakteryzujące strefę wodonośną, w zależności od przyjętej metody będą to:

- w metodzie van Everdingena–Hursta:
  - stała strefy wodonośnej  $U$ ,
  - promień zredukowany  $r_D$ ,
  - parametr  $u$ , opisany zależnością (5.30),
- w metodzie Fetkovicha [68]:
  - indeks wydajności strefy wodonośnej  $J$ ,
  - maksymalny dopływ wody ze strefy wodonośnej  $W_{ei}$ .

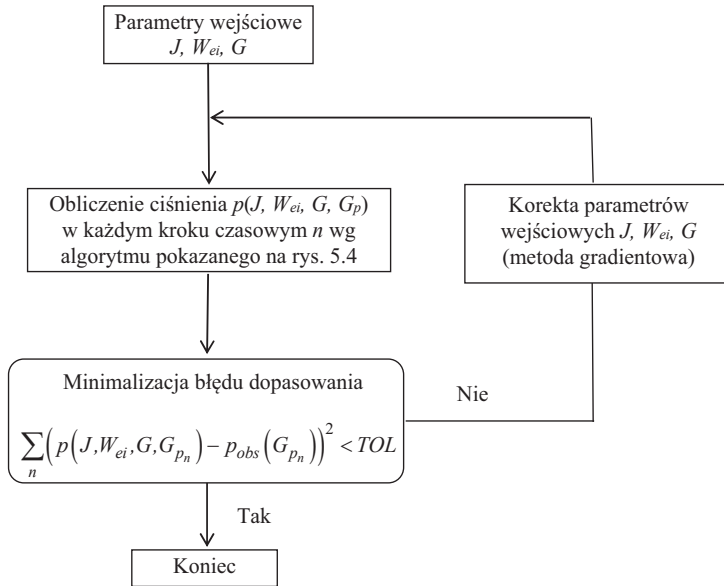
Kryterium dopasowania jest zbieżność średnich ciśnień złożowych, obliczonych i zmierzonych.

Na rysunkach 5.5 oraz 5.6 pokazano schematycznie procedury kalibracji modelu bilansowego z uwzględnieniem omówionych wcześniej metod obliczania dopływu wody do złoża.



**Rys. 5.5.** Kalibracja modelu bilansowego z dopływem wody do złoża  
liczonym według metody van Everdingena–Hursta

Parametry modelu bilansowego wyznacza się przez dopasowanie poszukiwanej funkcji do punktów pomiarowych z użyciem metod regresji nieliniowej [69]. Na podstawie przyjętych startowych wartości parametrów dopasowania wyznaczane są nowe wartości poszukiwanych parametrów, dla których funkcja dopasowania maleje. Procedura jest zatrzymywana w momencie osiągnięcia minimum funkcji. Minimalizowaną funkcją jest suma kwadratów odchylek ciśnień mierzonych i obliczanych w każdym kroku czasowym.



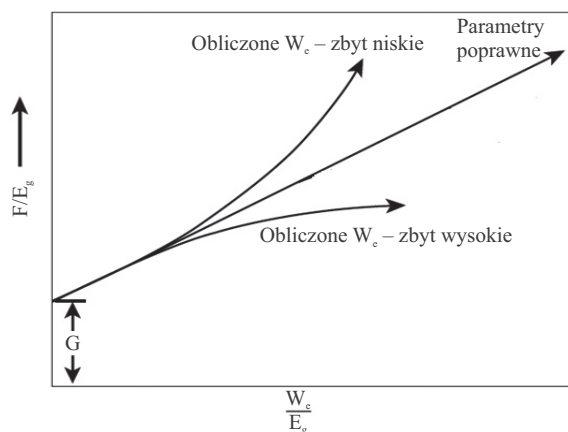
Rys. 5.6. Kalibracja modelu bilansowego z dopływem wody do złoża liczoną według metody Fetkovicha

Poprawność kalibracji modelu bilansowego można także zweryfikować metodą Havlena–Odeha. Metoda ta pozwala na właściwy dobór parametrów opisujących strefę wodonośną, a tym samym poprawne oszacowanie ilości dopływającej do złoża wody zgodnie z równaniem (4.15). Z analizy tego równania wynika, że przy prawidłowo wyznaczonych parametrach strefy wodonośnej punkty pomiarowe na wykresie  $F/E_g$  vs  $W_e/E_g$  powinny układać się wzdłuż linii prostej o nachyleniu 1, wówczas rzędna początkowa określa wielkość zasobów początkowych gazu w złożu, co pokazano na rysunku 5.7.

Jeśli punkty na wykresie w układzie  $F/E_g$  vs  $W_e/E_g$  układają się nieliniowo, wówczas świadczy to o błędnym dopasowaniu parametrów strefy wodonośnej. Jeśli punkty układają się wzdłuż krzywej odchylającej się do góry, świadczy to o zbyt słabej aktywności strefy wodonośnej (zbyt mały dopływ wody), zaś gdy punkty układają się wzdłuż krzywej odchylającej się ku dołowi, wówczas aktywność strefy wodonośnej jest zbyt duża (za duży dopływ wody do złoża).

Zapis w systemie MathCad algorytmów obliczeniowych kalibracji modelu bilansowego dla złóż gazu pracujących w warunkach aktywnej strefy wodonośnej z wykorzystaniem metod wyznaczania wielkości dopływu wody do złoża van Everdingena–Hursta i Fetkovicha

pokazano na rysunkach 5.8 i 5.9. Dopasowanie parametrów tych modeli przeprowadza się metodami regresji nieliniowej przez zastosowanie funkcji gradientowej *miner* systemu MathCad.



**Rys. 5.7.** Wykres diagnostyczny poprawności kalibracji modelu bilansowego złoża gazu pracującego w warunkach niewolumetrycznych (metoda Havlena–Odeha) [48]

## 5.2. Badania laboratoryjne przepływów dwufazowych woda-gaz w ośrodku porowatym

Magazynowanie gazu w częściowo sczerpanych złożach polega na jego sezonowym załtaczaniu i odbiorze ze złoża. W przypadku gdy magazyn wytwarzany jest w złożu kontaktującym się z aktywną strefą wodonośną, w trakcie jego pracy ma miejsce naprzemienny ruch wody do złoża i na zewnątrz złoża. Istotnym aspektem pracy takiego magazynu jest śledzenie przemieszczania się konturu wodnego i związanych z tym zmian przepuszczalności skały zarówno dla gazu, jak i wody. Parametry te będą zmieniać się w zależności od rodzaju skały, stopnia jej niejednorodności oraz własności płynów i są funkcją zmieniającego się nasycenia tym płynami [70, 71]. W celu badania zmian przepuszczalności efektywnej skały przy jednoczesnym przepływie wody i gazu w złożu zbudowano stanowisko laboratoryjne, na którym przeprowadzono pomiary przepuszczalności efektywnej skały przy wzajemnym wypieraniu wody i gazu. W ramach wykonanych badań przeprowadzono eksperymenty wypierania wody gazem oraz wypierania gazu wodą w próbce skalnej w warunkach przepływowych odpowiadających rzeczywistym warunkom złożowym.

### 5.2.1. Stanowisko badawcze

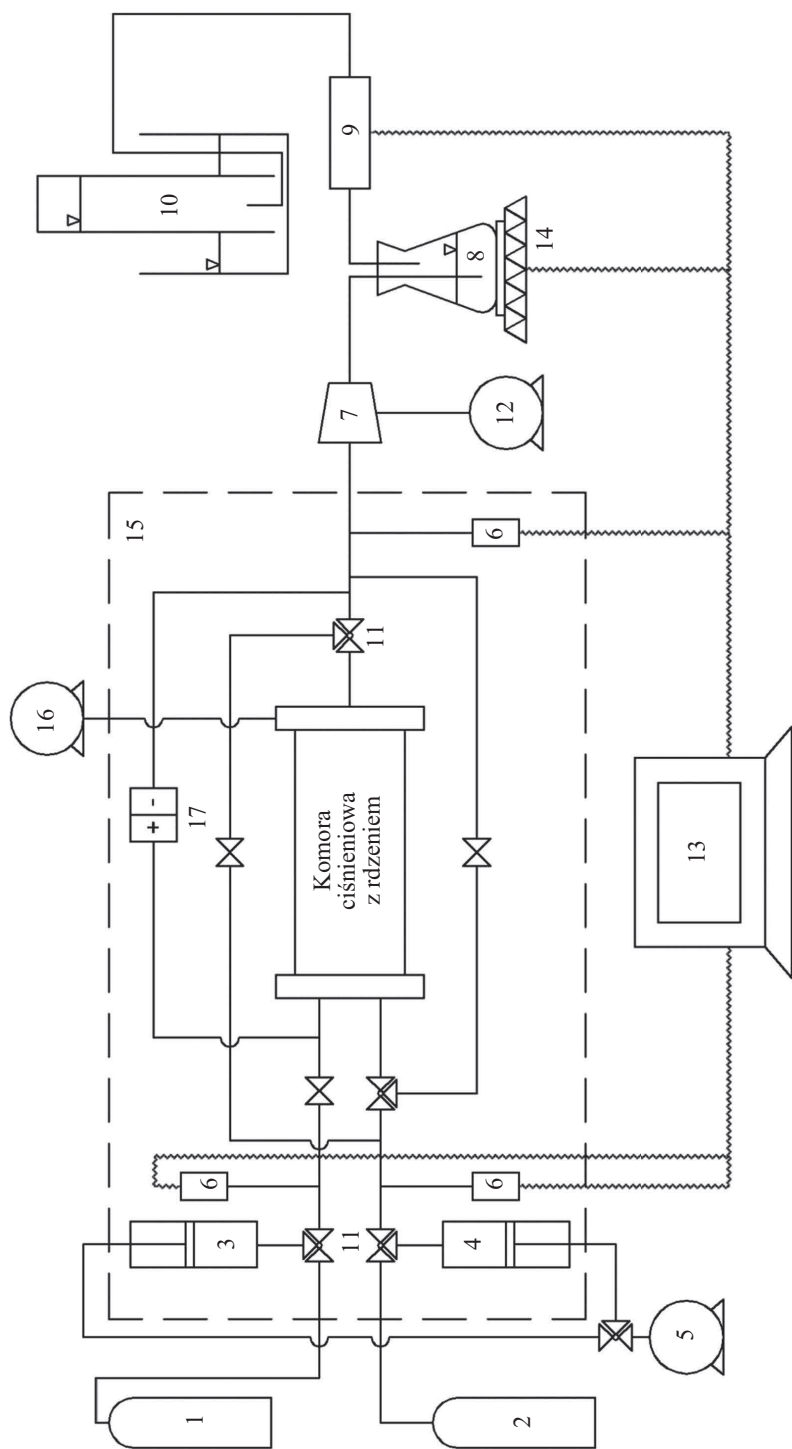
Stanowisko laboratoryjne zostało skonstruowane na podstawie doświadczeń autora przy budowie tego typu stanowisk w ramach prac badawczych nad przepływami płynów w ośrodkach porowatych realizowanych na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH [72, 73]. Jego schemat przedstawiono na rysunku 5.10.

$$\begin{aligned}
\text{vEH}(U, u, r_D, Gi) := & \left[ \begin{array}{l} p_0 \leftarrow Pi \\ We_0 \leftarrow 0 \cdot m^3 \\ p_1 \leftarrow \text{root} \left[ \frac{P}{z(P)} - \frac{\left[ \frac{Pi}{z(Pi)} \cdot \left( 1 - \frac{Gp_1 - G_{I1}}{Gi} \right) \right]}{U \cdot \left[ \frac{Pi - P}{2} \cdot W_D[u, r_D, (t_1 - t_0)] \right]}, P \right] \\ We_1 \leftarrow U \cdot \left[ \frac{Pi - p_1}{2} \cdot W_D[u, r_D, (t_1 - t_0)] \right] \\ p1 \leftarrow p_1 \\ p_2 \leftarrow \text{root} \left[ \frac{P}{z(P)} - \frac{\left[ \frac{Pi}{z(Pi)} \cdot \left( 1 - \frac{Gp_2 - G_{I2}}{Gi} \right) \right]}{U \cdot \left[ \frac{Pi - p1}{2} \cdot W_D[u, r_D, (t_2 - t_0)] + \frac{Pi - P}{2} \cdot W_D[u, r_D, (t_2 - t_1)] \right]}, P \right] \\ We_2 \leftarrow U \cdot \left[ \frac{Pi - p_1}{2} \cdot W_D[u, r_D, (t_2 - t_0)] + \frac{Pi - p_2}{2} \cdot W_D[u, r_D, (t_2 - t_1)] \right] \\ \text{for } n \in 3..N \\ p_n \leftarrow \text{root} \left[ \frac{P}{z(P)} - \frac{\left[ \frac{Pi}{z(Pi)} \cdot \left( 1 - \frac{Gp_n - G_{In}}{Gi} \right) \right]}{U \cdot \left[ \frac{Pi - p_1}{2} \cdot W_D[u, r_D, (t_n - t_0)] + \sum_{j=1}^{n-2} \left[ \frac{p_{j-1} - p_{j+1}}{2} \cdot W_D[u, r_D, (t_n - t_j)] \right] + \frac{p_{n-2} - P}{2} \cdot W_D[u, r_D, (t_n - t_{n-1})] \right]}, P \right] \\ We_n \leftarrow U \cdot \left[ \frac{Pi - p_1}{2} \cdot W_D[u, r_D, (t_n - t_0)] + \sum_{j=1}^{n-1} \left[ \frac{p_{j-1} - p_{j+1}}{2} \cdot W_D[u, r_D, (t_n - t_j)] \right] \right] \end{array} \right]
\end{aligned}$$

Rys. 5.8. Skrypt systemu MathCad dla kalibracji modelu bilansowego z dopływem wody według metody van Everdingena–Hursta

$$\begin{aligned}
\text{Fet}(J, Wei, Gi) := & \left[ \begin{array}{l} p_0 \leftarrow Pi \\ pa0 \leftarrow Pi \\ We0 \leftarrow 0 \cdot m^3 \\ p_1 \leftarrow \text{root} \left[ \frac{P}{z(P)} - \frac{\left[ \frac{Pi}{z(Pi)} \cdot \left( 1 - \frac{Gp_1 - G_{I1}}{Gi} \right) \right]}{1 - \left[ \frac{We0 + \frac{Wei}{Pi} \cdot \left( Pi - \frac{Pi + P}{2} \right) \right] \cdot \left[ 1 - \exp \left[ \frac{-J \cdot Pi \cdot (t_1 - t_0)}{Wei} \right] \right]}, P \right] \\ \Delta WE_1 \leftarrow \frac{Wei}{Pi} \cdot \left( pa0 - \frac{p_0 + p_1}{2} \right) \cdot \left[ 1 - \exp \left[ \frac{-J \cdot Pi \cdot (t_1 - t_0)}{Wei} \right] \right] \\ WE_1 \leftarrow \sum \Delta WE \\ \text{for } n \in 2..N \\ pa_{n-1} \leftarrow Pi \cdot \left( 1 - \frac{WE_{n-1}}{Wei} \right) \\ p_n \leftarrow \text{root} \left[ \frac{P}{z(P)} - \frac{\left[ \frac{Pi}{z(Pi)} \cdot \left( 1 - \frac{Gp_n - G_{In}}{Gi} \right) \right]}{1 - \frac{WE_{n-1} + \frac{Wei}{Pi} \cdot \left( pa_{n-1} - \frac{p_{n-1} + P}{2} \right) \cdot \left[ 1 - \exp \left[ \frac{-J \cdot Pi \cdot (t_n - t_{n-1})}{Wei} \right] \right]}, P \right] \\ \Delta WE_n \leftarrow \frac{Wei}{Pi} \cdot \left( pa_{n-1} - \frac{p_{n-1} + p_n}{2} \right) \cdot \left[ 1 - \exp \left[ \frac{-J \cdot Pi \cdot (t_n - t_{n-1})}{Wei} \right] \right] \\ WE_n \leftarrow \sum_{j=1}^n \Delta WE_j \\ pa_n \leftarrow Pi \cdot \left( 1 - \frac{WE_n}{Wei} \right) \end{array} \right]
\end{aligned}$$

Rys. 5.9. Skrypt systemu MathCad dla kalibracji modelu bilansowego z dopływem wody według metody Fetkovicha



**Rys. 5.10.** Schemat stanowiska badawczego przepływów dwufazowych w ośrodku porowatym

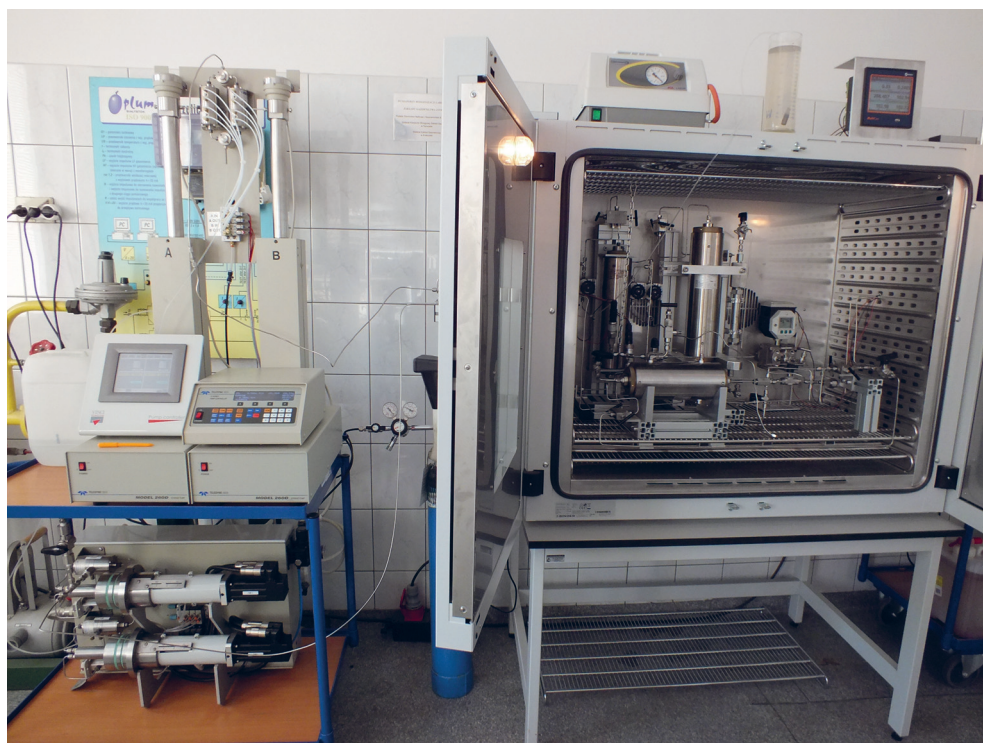


Głównym elementem stanowiska jest komora ciśnieniowa firmy CoreLab serii HCH o dwuosiowym (radialnym i współosiowym) uszczelnieniu. Badana próbka skalna w kształcie walca jest umieszczana w elastycznym kołnierzu z tworzywa sztucznego wewnątrz komory. Następnie za pomocą pompy dozującej (16) jest uszczelniana (zatłaczanym do przestrzeni pomiędzy korpusem komory a kołnierzem i korkami dystrybucyjnymi) olejem pod ciśnieniem przewyższającym ciśnienie w badanej próbce [74]. Komora pozwala na prowadzenie badań na próbkach skalnych o średnicy 1 cala i długości w zakresie 1–3 cale, przy ciśnieniach porowych do 600 barów i ciśnieniach uszczelnienia maks. 690 barów w temperaturze do 177°C. Korek dystrybucyjny wlotowy ma dwa wejścia iniekcyjne, natomiast ruchomy korek wylotowy jedno wyjście. Specjalne nacięcia na czołach korków dystrybucyjnych pozwalają na równomierne rozprowadzenie zatłaczanego i odbieranego płynu na całej powierzchni przekroju poprzecznego badanej próbki.

Stanowisko badawcze można podzielić na trzy części:

- 1) system zatłaczania składający się z pompy dozującej wodę oraz dwóch zasobników na zatłaczane płyny,
- 2) komorę ciśnieniową,
- 3) układ pomiarowy na wyjściu z komory umożliwiający pomiar wydajności i ilości przetłaczanych płynów.

Widok stanowiska badawczego pokazano na rysunkach 5.11 i 5.12.



Rys. 5.11. Stanowisko badawcze – system zatłaczania płynów (fot. autor)



**Rys. 5.12.** Stanowisko badawcze – układ pomiarowy na wyjściu z rdzenia (fot. autor)

Głównym elementem systemu zatłaczania jest dwutłokowa pompa dozująca (5) (rys. 5.10) firmy Teledyne ISCO serii 260D pozwalająca na tłoczenie wody w trybie ciągłym z wydajnościami w zakresie od 0,01  $\mu\text{l}/\text{min}$  do 45 ml/min przy ciśnieniach w zakresie 1–517 barów [75]. Pompa może pracować w trybie ustalonego przepływu lub utrzymania stałego ciśnienia tłoczenia. W zależności od fazy eksperymentu pompa tłoczy wodę (płyn roboczy) do jednego bądź drugiego zasobnika ciśnieniowego z ruchomym tłokiem. Znajdujący się nad tłokiem płyn (gaz (3) lub woda złożowa (4)) jest wówczas wtłaczany do komory ciśnieniowej. Gaz do układu pomiarowego dostarczany jest z butli (1) natomiast woda złożowa z butli (2). Ciśnienie w komorze jest utrzymywane na ustalonym poziomie za pomocą wstecznego zaworu regulacyjnego ciśnienia (7) sterowanego pompą dozującą (12), w której czynnikiem roboczym jest azot.

Układ pomiarowy na wyjściu z rdzenia składa się z przepływomierza (9), elektronicznej wagi laboratoryjnej (14) oraz naczynia do pomiaru sumarycznej ilości wypływającego z układu pomiarowego gazu (10). Na wadze umieszczony jest szklany separator (8), do którego po rozprężeniu trafiają wypływające z układu płyny. Woda jest zatrzymywana w separatorze i mierzona w sposób ciągły na wadze, natomiast gaz przepływa przez przepływomierz masowy, a następnie trafia do szklanego naczynia z wodą, gdzie jest gromadzony. Zastosowany przepływomierz EL-FLOW firmy Bronkhorst pozwala na ciągły pomiar masowego natężenia przepływu gazu [72].

Układ pomiaru ilości gazu wypływającego z komory ciśnieniowej składa się z kąpieli wodnej z odwróconym skalowanym naczyniem wypełnionym wodą, do którego od spodu doprowadzany jest gaz pod ciśnieniem zbliżonym do normalnego, który wpływając do naczynia, wypiera z niego wodę. Objętość wypartej wody jest miarą sumarycznej ilości gazu, jaka wypłynęła z układu pomiarowego w trakcie eksperymentu.

Komora ciśnieniowa z badanym rdzeniem oraz zasobniki z przetłaczanymi płynami umieszczone są w szafie termostatycznej (15) utrzymującej stałą temperaturę w układzie. Pomiar ciśnienia na wejściu i wyjściu z komory ciśnieniowej są mierzone za pomocą przetworników ciśnienia (6). Ponadto celem precyzyjnego pomiaru różnicy ciśnień na wejściu i wyjściu komory zastosowano wysokociśnieniowy manometr różnicowy (17). Wszystkie mierzone w trakcie eksperymentu parametry są wyświetlane, zbierane i rejestrowane w rejestratorze wielokanałowym MultiCon firmy Simex (13). Zbudowane stanowisko pozwala na prowadzenie pomiarów przy wypieraniu wody i gazu z rdzenia skalnego w obydwu kierunkach. W normalnym układzie płyny zatłaczane są na wejściu do komory i odbierane na wyjściu. Poprzez układ zaworów trójdrożnych (11) możliwe jest także zatłaczanie wody do rdzenia na wyjściu z komory ciśnieniowej oraz odbiór wypływających płynów na wejściu komory. Takie rozwiązanie umożliwia śledzenie procesu wypierania gazu wodą w fazie odbioru gazu z PMG, gdy woda dopływająca do złoża wypiera z przestrzeni porowej gaz.

### 5.2.2. Metodyka badań wypierania w układzie woda–gaz, gaz–woda

Badana próbka skalna z piaskowca została pobrana z serii złożowej czerwonego spągowca jednego ze złóż na Niżu Polskim. Próbka została wycięta w kształcie walca o średnicy 2,54 cm i długości 4,58 cm (rys. 5.13). Porowatość próbki wynosi 18%, a jej objętość porowa 4,18 cm<sup>3</sup>. Przed przystąpieniem do właściwych pomiarów wyznaczona została przepuszczalność absolutna badanej próbki skalnej. Pomiaru dokonano przy przetłaczaniu azotu przez badaną próbkę z różnymi wydajnościami pompy dozującej w zakresie 0,1–1 ml/min przy różnych wartościach ciśnienia, odpowiednio 50, 80 i 100 barów. Wyznaczona wartość współczynnika przepuszczalności wyniosła 96,1 mD. Następnie przez badaną próbkę przetłaczana została woda złożowa aż do całkowitego nasycenia skały wodą.



Rys. 5.13. Widok badanej próbki skalnej (fot. autor)

## I etap badań – wypieranie w układzie gaz–woda

Celem tego etapu badań było określenie przepuszczalności względnej skały dla gazu w funkcji nasycenia wodą. Płynem wypierającym był gaz (azot), zaś płynem wypieranym woda. W trakcie eksperymentu pompa dozująca tłoczy wodę ze stałą wydajnością do zasobnika z gazem (azot). Woda jest zatłaczana do przestrzeni pod tłokiem zasobnika, zaś gaz znajdujący się nad tłokiem jest wtłaczany do komory badawczej i stopniowo wypiera z przestrzeni porowej rdzenia wodę złożową. Od momentu przebiccia się gazu na wyjściu z rdzenia, możliwe jest wyznaczenie przepuszczalności efektywnej skały dla tej fazy w funkcji zmieniającego się nasycenia wodą. Przepływający przez badaną próbkę gaz wypiera z niej wodę, której ilość mierzona jest na wyjściu z układu przepływowego na elektronicznej wadze laboratoryjnej. Pomiar kontynuowany jest do momentu, aż jej ilość zostanie zredukowana do nasycenia wodą związaną (zanik wypływu wody na wyjściu z układu). Przepuszczalność skały dla gazu osiąga wówczas wartość maksymalną. Odnosząc określone wartości wyznaczonego współczynnika przepuszczalności efektywnej do gazu do przepuszczalności absolutnej skały, uzyskuje się przepuszczalności względne skały do tej fazy. Pomiar przepuszczalności względnych dla gazu wykonano przy ciśnieniu 80 barów oraz wydajności pompy dozującej wodę 1 ml/min. Wyniki eksperymentu pokazano w tabeli 5.1.

**Tabela 5.1**  
Wyniki wypierania wody gazem

Wyszczególnienie	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3
Wydajność przepływu gazu [Ncm <sup>3</sup> /min]	72,8	74,1	75,4
Masa wypartej wody [g]	1,19	1,37	1,91
Różnica ciśnień na wejściu/wyjściu z komory [bar]	0,196	0,15	0,077
Nasycenie wodą [%]	72,2	67,2	54,3
Przepuszczalność efektywna skały dla gazu [mD]	1,44	1,92	3,90
Przepuszczalność względna skały dla gazu [-]	0,015	0,02	0,039

Po zakończonym eksperymencie próbka została wyjęta z komory ciśnieniowej i zważona, w celu określenia nasycenia wodą związaną. Nasycenie wodą związaną określono na podstawie różnicy masy próbki suchej i nasyconej wodą. Nasycenie wodą związaną wynosiło 54,3%. Tak wysokie nasycenie wodą znacznie ograniczało przepuszczalność efektywną skały dla gazu.

## II etap badań – wypieranie w układzie woda–gaz

W drugim etapie eksperymentu do nasyconej gazem próbki zatłaczana była woda, która wypierała z przestrzeni porowej gaz. Początkowe nasycenie gazem wynikało z nasycenia wodą związaną i w miarę zatłaczania wody stopniowo się obniżało. Wydajność, z jaką gaz wypływał z rdzenia, mierzona była za pomocą przepływomierza, natomiast sumaryczną



jego ilość mierzono za pomocą wypełnionego wodą naczynia, do którego przepływał gaz. Miarą ilości wypartego z układu pomiarowego gazu była objętość wytłoczonej z naczynia wody. Znając ilość wypartego z rdzenia gazu oraz przeliczając ją na objętość w warunkach panujących w rdzeniu, określono nasycenie skały gazem i wodą. Od momentu pojawienia się przepływu wody na wyjściu z rdzenia możliwe stało się wyznaczenie przepuszczalności efektywnej skały dla wody, a tym samym przepuszczalności względnej skały dla tej fazy [76]. Pomiaru wykonano przy ciśnieniu równym 80 barów przy wydajności pompy dozującej wodę 0,1 ml/min. Uzyskane wyniki pomiarów przepuszczalności względnych wody zestawiono w tabeli 5.2.

**Tabela 5.2**  
Wyniki wypierania gazu przez wodę

Wyszczególnienie	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	Pomiar 4
Ilość wypartego z rdzenia gazu [Ncm <sup>3</sup> ]	19,06	31,56	64,56	126,86
Objętość wypartego gazu w warunkach panujących w rdzeniu [cm <sup>3</sup> ]	0,259	0,429	0,877	1,723
Nasycenie gazem [-]	0,395	0,354	0,247	0,044
Nasycenie wodą [-]	0,605	0,646	0,753	0,956
Różnica ciśnień na wej./wyj. z komory [bar]	1,02	0,79	0,402	0,181
Przepuszczalność efektywna skały dla wody [mD]	1,48	1,91	3,75	8,32
Przepuszczalność względna skały dla wody [-]	0,015	0,02	0,04	0,087

W literaturze można znaleźć wiele korelacji pozwalających wyznaczyć przepuszczalność względną skały dla gazu i wody w funkcji nasycenia wodą [77]. W niniejszej pracy dopasowanie do uzyskanych wyników pomiarowych przepuszczalności względnych skały dokonano z wykorzystaniem modelu Coreya [67], którego parametry w postaci wykładników  $n_g$  i  $n_w$  wyznaczono z zastosowaniem metod regresji nieliniowej. Ogólne równania Coreya dla układu gaz-woda przyjmują postać [67, 78]:

$$k_{rg} = k_{rgcw} \cdot \left[ \frac{S_g - S_{gc}}{1 - S_{gc} - S_{wi}} \right]^{n_g} \quad (5.31)$$

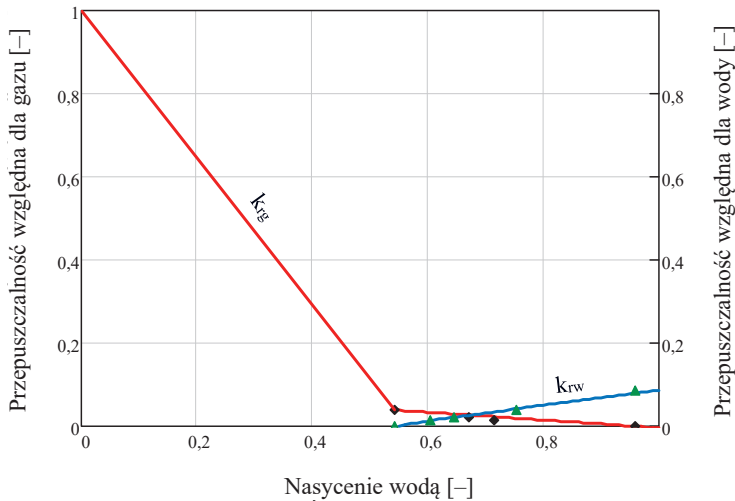
$$k_{rw} = k_{rwgc} \cdot \left[ \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_w} \right]^{n_w} \quad (5.32)$$

Wyznaczone eksperymentalnie parametry równań modelu Coreya wraz z dopasowanymi metodami regresji nieliniowej wykładnikami powyższych równań (5.31) i (5.32) zestawiono w tabeli 5.3.

**Tabela 5.3**  
Parametry równań modelu Coreya

Nasylenie resztkowe gazem $S_{gc}$ [-]	0,042
Nasylenie początkowe wodą $S_{wi}$ [-]	0,543
Przepuszczalność względna gazu przy nasyeniu wodą związaną $k_{rgcw}$ [-]	0,039
Przepuszczalność względna wody przy nasyeniu resztkowym gazem $k_{rwgc}$ [-]	0,0866
Wykładnik $n_g$ [-]	1,79
Wykładnik $n_w$ [-]	0,93

Wykres zamiany przepuszczalności względnych gazu i wody w funkcji nasyenia wodą wraz z dopasowaniem pokazano na rysunku 5.14.



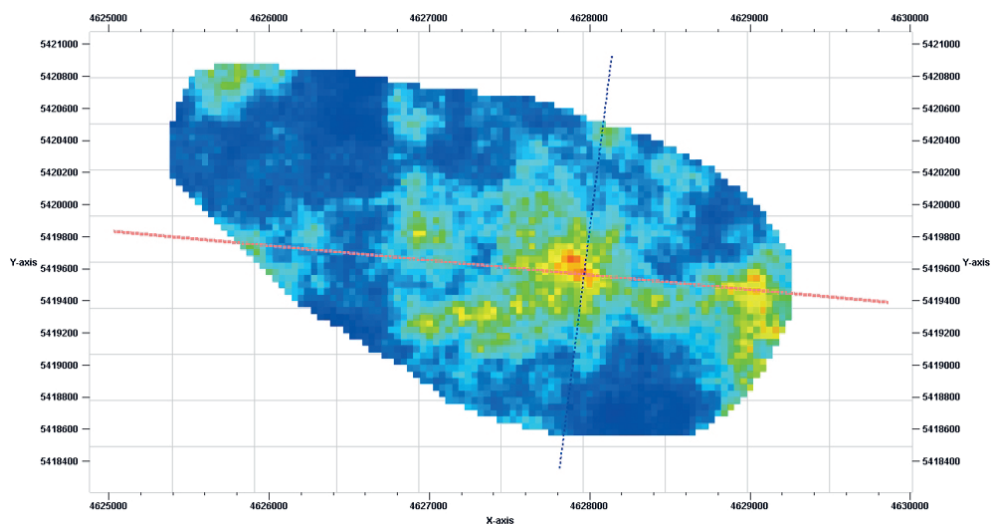
Rys. 5.14. Krzywe przepuszczalności względnych skały dla wody i gazu w funkcji nasyenia wodą

### 5.3. Określenie parametrów pracy podziemnego magazynu gazu kontaktującego się z aktywną strefą wodonośną

W celu określenia możliwości magazynowania gazu w częściowo szcerpanym złożu gazu pracującym w warunkach aktywnej strefy wodonośnej przeprowadzono symulację komputerową eksploatacji hipotetycznego złoża gazu. Zbudowany syntetyczny model numeryczny złoża został oparty na danych zbliżonych do rzeczywistego złoża. Opierając się na zbudowanym modelu statycznym złoża, przeprowadzono najpierw symulację jego eksploatacji, a następnie przeprowadzono prognozę rozbudowy i magazynowania gazu w kilku cyklach. Symulację wykonano za pomocą symulatora złożowego ECLIPSE [79].

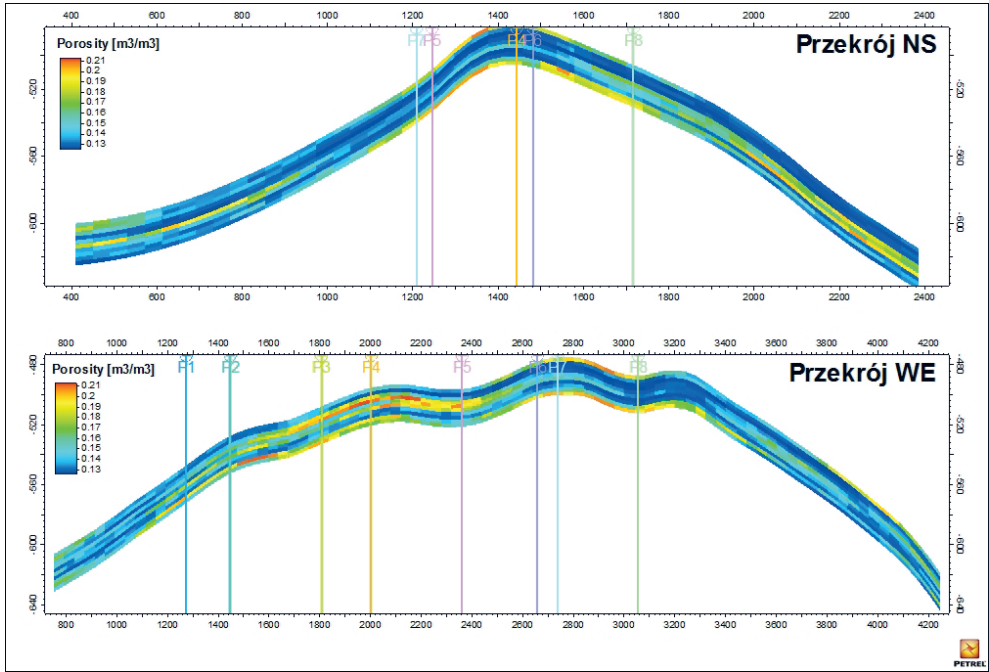
### 5.3.1. Statyczny model geologiczny złoża

Syntetyczne złożo gazu ziemnego występuje na głębokości 475–620 m p.p.m. Złożo ekranowane jest stratygraficznie przez utwory niskoprzepuszczalne, od spągu podściela je woda złożowa, która wykazuje aktywny charakter. Złożo ma powierzchnię 6,4 km<sup>2</sup>, przy średniej miąższości wynoszącej 30 m. Podzielone zostało dyskretną siatką bloków o średnich wymiarach powierzchniowych wynoszących 40 m × 40 m i miąższości 2,5 m. Sumarycznie złożo podzielono na 98 elementów w płaszczyźnie x, 59 elementów w płaszczyźnie y oraz 11 warstw liczonych w miąższości złoża. Rozkład porowatości modelowanego złoża z zaznaczonymi przekrojami przedstawiono na rysunku 5.15. Wartości porowatości w przekrojach NS oraz WE przedstawiono na rysunku 5.16. Porowatość syntetycznego złoża zmienia się z zakresie 12,5–21,30%, przy średniej wartości wynoszącej 14,74%. Parametry zbiornikowe poprawiają się w kierunku zachodnim zapadania złoża. Przepuszczalność modelowanego złoża zmienia się w zakresie 70–300 mD, przy średniej wartości wynoszącej 148 mD. Zmienność przepuszczalności w przekrojach analogicznych do przekrojów porowatości przedstawiono na rysunku 5.17. Przyjęto założenie, że ze względu na kompakcję sedymentacyjną, przepuszczalność pionowa stanowi 10% przepuszczalności poziomej.

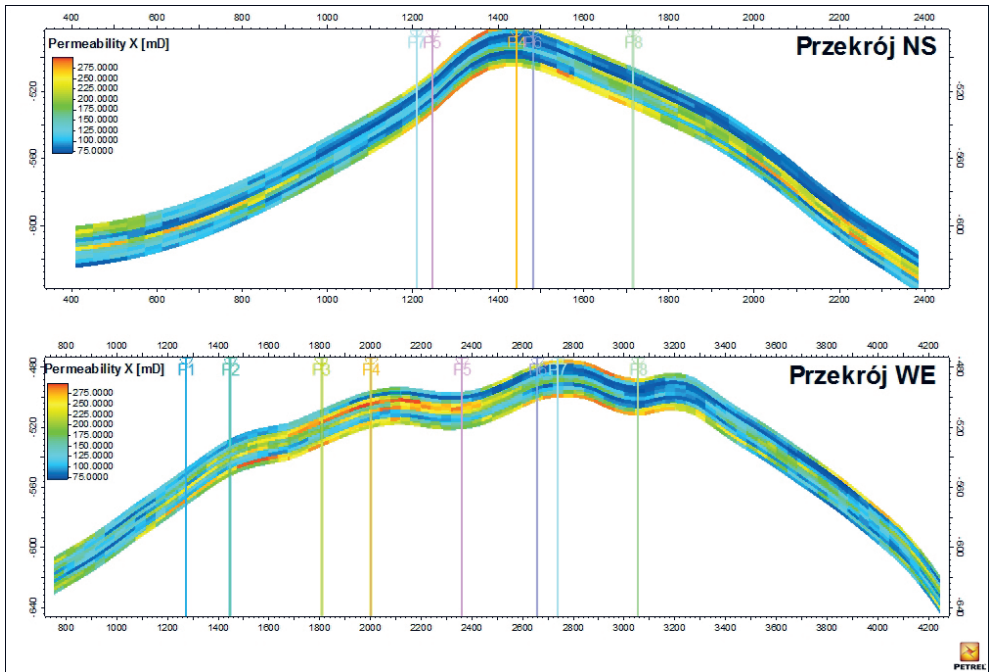


Rys. 5.15. Rozkład porowatości i lokalizacja przekrojów modelowanego złoża.  
Widok w pierwszej warstwie modelu

Pierwotny kontur złożowy pomiędzy strefą gazową a strefą wodonośną (GWC) zlokalizowany był na głębokości 570 m p.p.m. Złożo udostępnione jest ośmioma pionowymi odwiertami eksploatacyjnymi o średnicy 4,5", perforowanymi w warstwach 1–5, w celu ograniczenia zagrożenia podciągania wody złożowej.

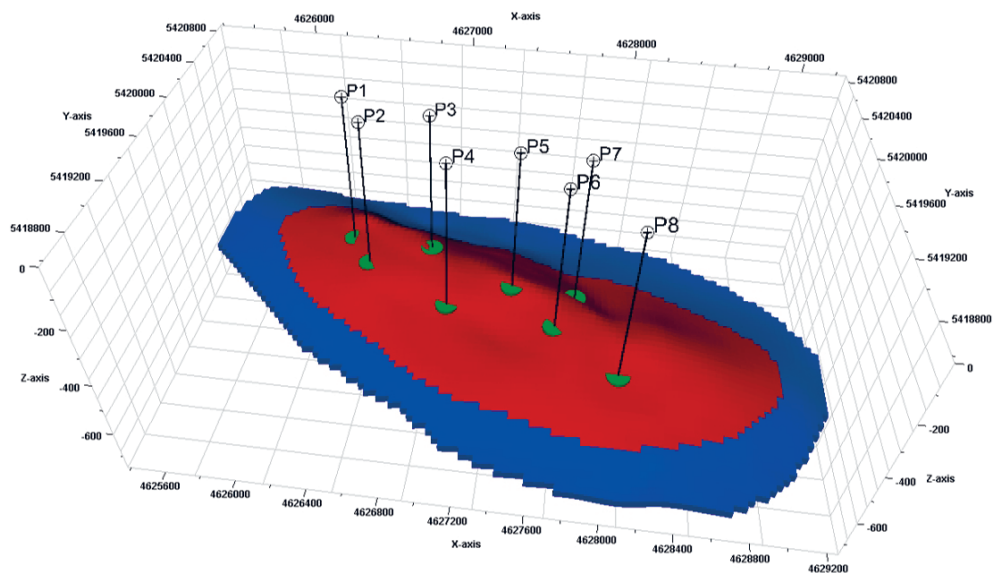


Rys. 5.16. Rozkład porowatości w przekrojach NS oraz WE



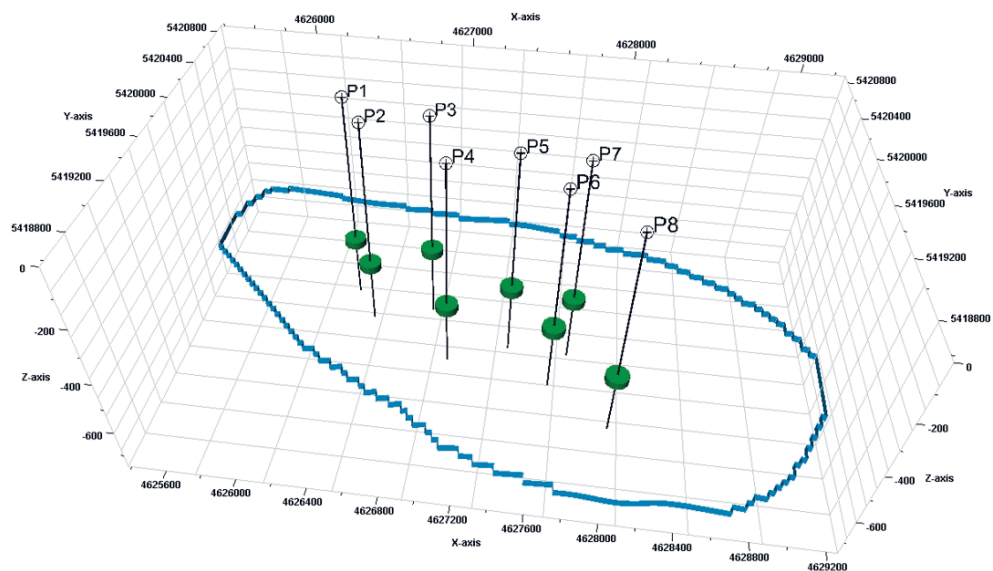
Rys. 5.17. Zmienność przepuszczalności w przekrojach NS oraz WE





**Rys. 5.18.** Lokalizacja odwiertów udostępniających złożo z widokiem strefy nasycenia gazem (kolor czerwony) i zawadnionej (kolor niebieski)

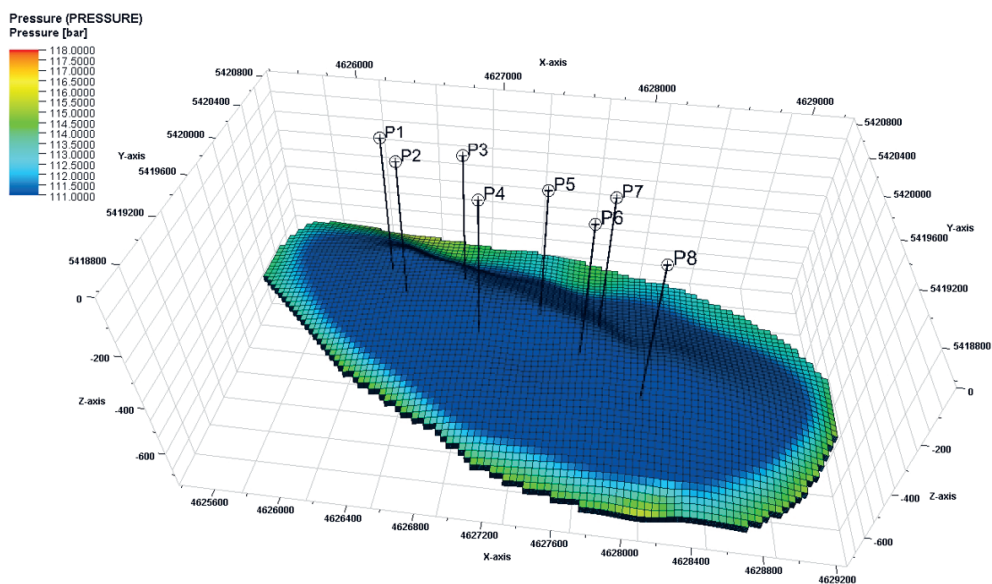
Lokalizację odwiertów wraz z pierwotnym położeniem konturu wodnego pokazano na rysunku 5.18. Złożo otoczone jest przez aktywną warstwę wodonośną, której lokalizacja w sensie połączenia z modelem złoża przedstawiona została kolorem niebieskim na rysunku 5.19.



**Rys. 5.19.** Lokalizacja odwiertów udostępniających złożo oraz pierwotne położenie konturu wodnego

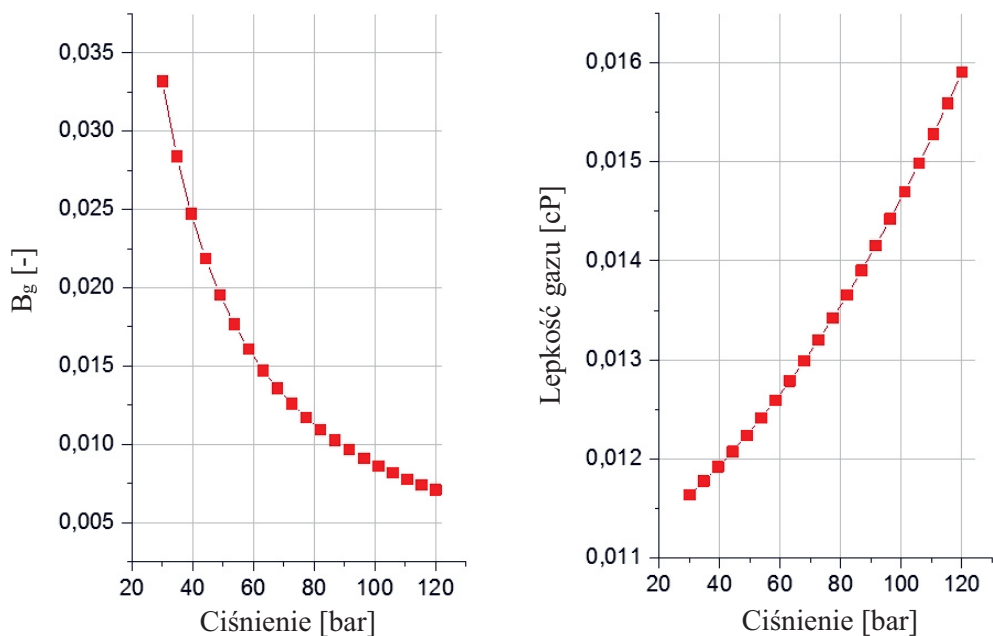
### 5.3.2. Dynamiczny model symulacyjny złoża

Przedstawiony w podrozdziale 5.3.1 statyczny model uzupełniony został o rozkład ciśnień i nasyceń i tworzy dynamiczny model symulacyjny. Model został zainicjowany w sposób równowagowy, przez przyjęcie rozkładu ciśnień wynikającego z gradientu danej fazy na odpowiadającej głębokości. Rozkład początkowego ciśnienia złożowego przedstawiono na rysunku 5.20. Rozkład ciśnienia zmienia się od 109 barów w stropowej części złoża do 118 barów w spągu. Nasylenie wodą w modelu zależne jest od rozpatrywanej głębokości, poniżej konturu przyjęto 100-procentowe nasylenie wodą złożową, powyżej natomiast nasylenie wynoszące 54,3%, zgodnie z wynikami badań laboratoryjnych pokazanych w podrozdziale 5.2. W modelu dynamicznym uwzględniono także wyznaczone w warunkach laboratoryjnych krzywe przepuszczalności względnych gazu i wody opisane równaniami Coreya, których parametry podano w tabeli 5.3. Symulacja pracy syntetycznego złoża rozpoczyna się 1 stycznia 1979 roku. Modelowany obiekt jest złożem gazu wysokometanowego, przy założeniu 100-procentowego udziału metanu w składzie gazu ziemnego. W zależności od podanej kompozycji gazu określono zmienność właściwości płynu złożowego w zakresie ciśnień 30–120 barów. Przebieg zmian współczynnika objętościowego oraz lepkości przedstawiono na rysunku 5.21. Przyjęto założenie o izotermiczności przepływu.



Rys. 5.20. Rozkład ciśnień w modelowanym złożu, stan na początek okresu eksploatacji

Eksplorację złoża prowadzono przez 6 lat, w wyniku czego ze złoża wydobyto 411 mln Nm<sup>3</sup> gazu, co stanowiło 56,7% zasobów początkowych. W tym czasie ciśnienie w złożu obniżyło się od początkowej wartości 109,6 bara do 63,1 bara. Sumaryczne wydobywanie wody wyniosło 475,2 m<sup>3</sup>. Przebieg eksploatacji analizowanego złoża pokazano w tabeli 5.4.



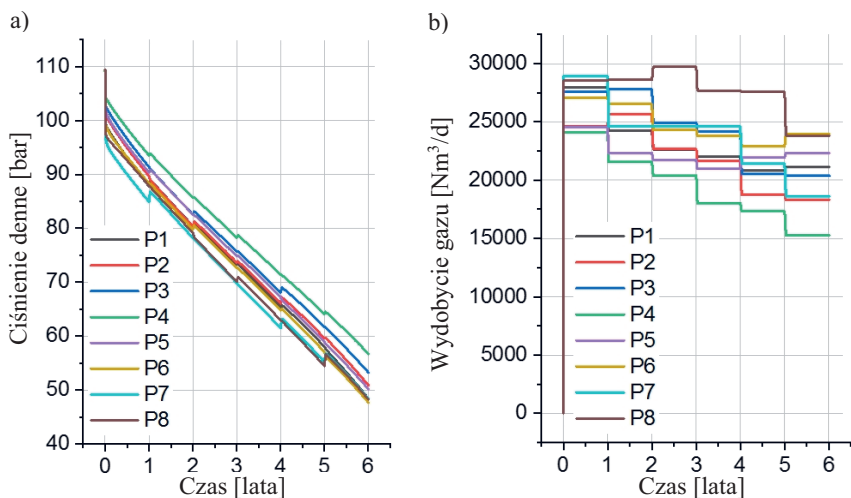
Rys. 5.21. Zmiany właściwości płynu złożowego w funkcji ciśnienia

Tabela 5.4

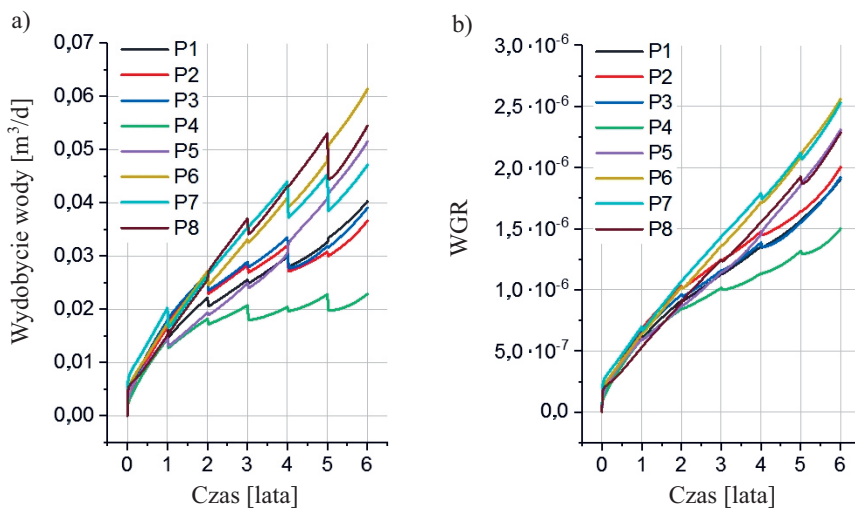
Przebieg eksploatacji syntetycznego złoża

Czas eksploatacji [dni]	$G_p$ [mld Nm <sup>3</sup> ]	$W_p$ [m <sup>3</sup> ]	$p$ [MPa]
0	0	0	10,96
183	39	11,6	10,46
365	77,9	32,0	10,00
545	114	57,6	9,60
731	152	90,4	9,20
911	186	125,3	8,84
1 096	221	166,1	8,47
1 276	254	208,3	8,12
1 461	288	256,5	7,75
1 641	319	304,2	7,41
1 826	351	358,0	7,05
2 016	382	415,7	6,67
2 193	411	475,2	6,31

Zmiany wydobywania gazu, wydobywania wody, ciśnienia dennego oraz wykładnika wodno-gazowego w odwiertach udostępniających złożę, tj. P1–P8, przedstawiono na rysunkach 5.22 i 5.23. W trakcie eksploatacji zauważono przemieszczanie się konturu wodnego z głębokości 570 m p.p.m. do głębokości ok. 550 m p.p.m.

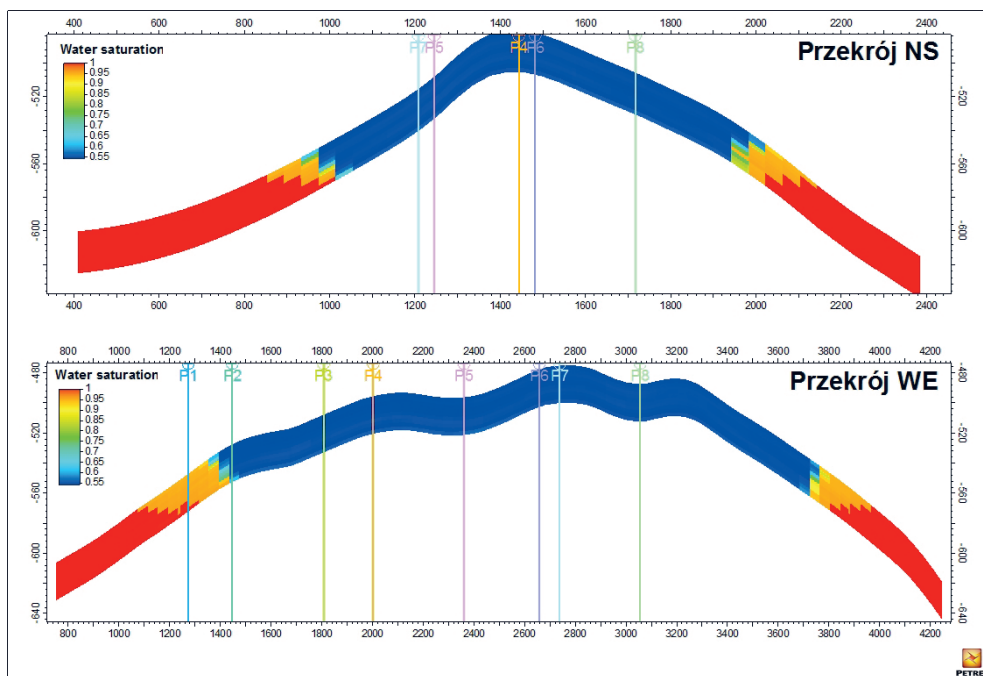
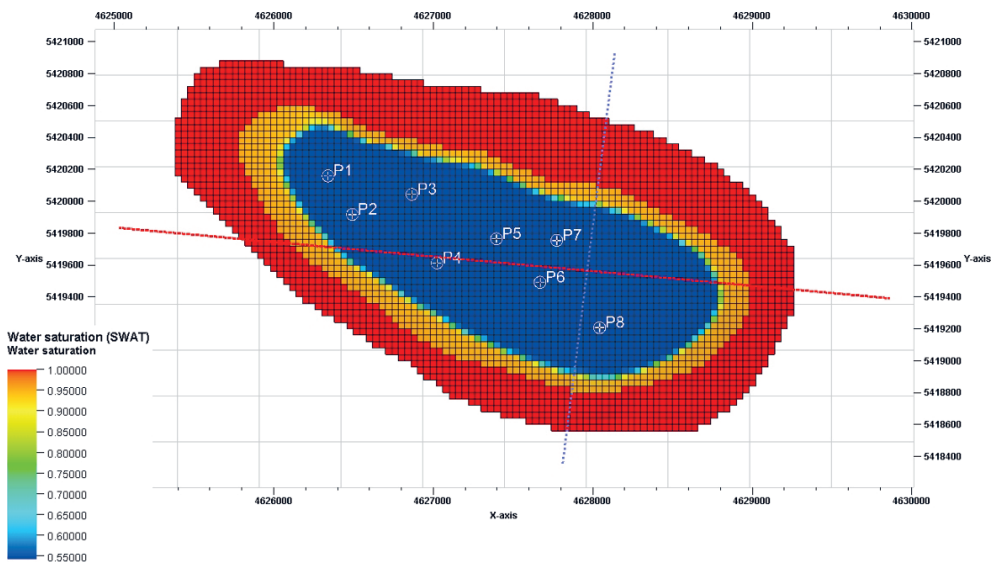


**Rys. 5.22.** Zmiany przebiegu: a) ciśnienia dennego; b) wydobywania gazu poszczególnymi odwiertami w okresie eksploatacji syntetycznego złoża gazu



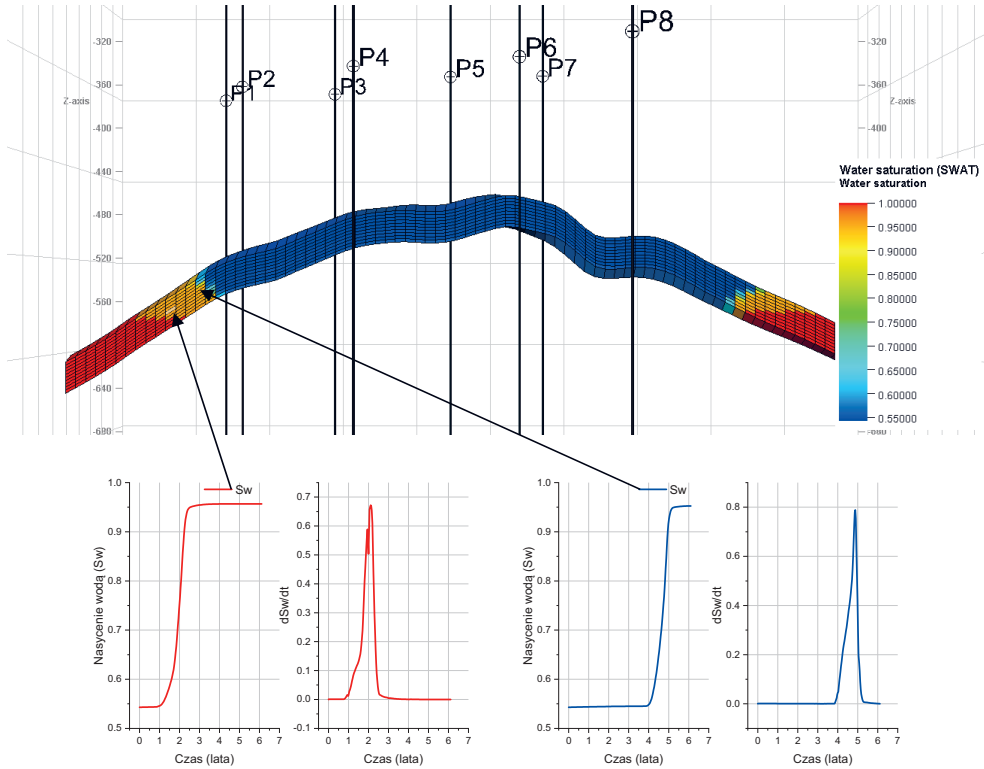
**Rys. 5.23.** Zmiany przebiegu: a) wydobywania wody; b) wykładnika wodnego poszczególnymi odwiertami w okresie eksploatacji syntetycznego złoża gazu

Zmiany nasycenia po sześciu latach eksploatacji, które wyniknęły z tego faktu, przedstawiono na rysunku 5.24. Średnie nasycenie wodą w strefie intruzji wody złożowej wynosi ok. 95%.



Rys. 5.24. Zmiany nasycenia wodą w trakcie eksploatacji złoża, stan po sześciu latach eksploatacji

Zmiany nasycenia oraz szybkość tych zmian w wybranych punktach modelu złożowego przedstawiono na rysunku 5.25.



Rys. 5.25. Zmiany nasycenia wodą złożową w wybranych punktach modelu symulacyjnego

Po okresie eksploatacji rozpoczęto przekształcanie złoża na magazyn gazu. Założono rozbudowę trwającą trzy cykle magazynowe. Cykl zatłaczania trwał 100 dni, przy wydajności zatłaczania wynoszącej 0,5 mln Nm<sup>3</sup> na dobę. Następnie założono przestój technologiczny magazynu wynoszący 50 dni, po czym rozpoczynał się cykl odbioru wynoszący 150 dni przy założeniu wydajności odbioru wynoszącej 0,15 mln Nm<sup>3</sup> na dobę. Po okresie odbioru ponowiono 50-dniowy przestój technologiczny. W cyklach drugim i trzecim wydajność zatłaczania wynosiła 0,4 mln Nm<sup>3</sup>/d. W wyniku rozbudowy zwiększono pojemność buforową gazu z 314 mln Nm<sup>3</sup> do 374,5 mln Nm<sup>3</sup>. Po okresie rozbudowy rozpoczęto regularną eksploatację PMG. W kolejnych cyklach magazyn pracuje w reżimie 150 dni zatłaczania z wydajnością 1,1 mln Nm<sup>3</sup> na dobę, 30 dni przestoju technologicznego, 150 dni odbioru z wydajnością 1,1 mln Nm<sup>3</sup> na dobę oraz 35 dni przestoju po okresie odbioru.

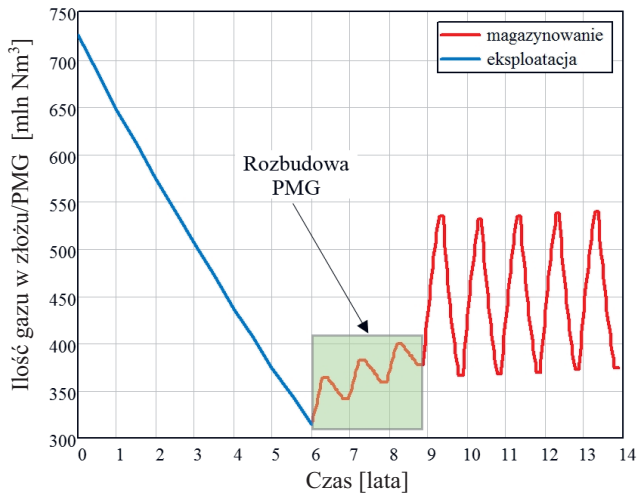
Skumulowane ilości gazu zatłaczanego i odbieranego oraz zmianę ilości gazu w złożu w kolejnych cyklach pracy magazynu zestawiono w tabeli 5.5.

Na rysunkach 5.26 i 5.27 pokazano zmianę ilości gazu oraz średniego ciśnienia złożowego w funkcji czasu eksploatacji złoża i magazynu.

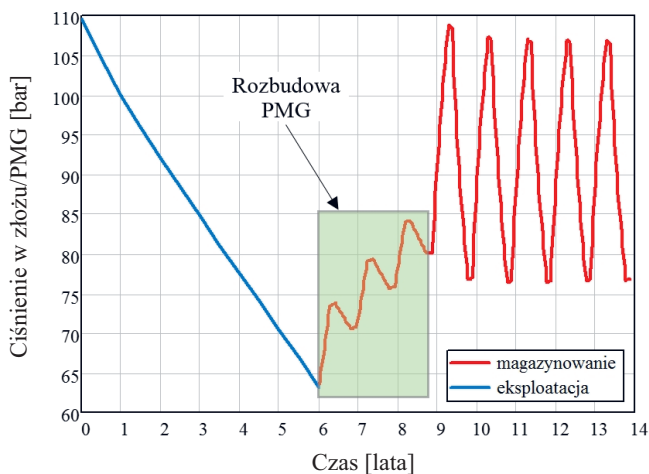
**Tabela 5.5**

Zatłaczanie i odbiór gazu w kolejnych cyklach pracy magazynu

Cykl	Okres zatłaczanie/odbiór	Gaz zatłoczony [mln Nm <sup>3</sup> ]	Gaz odebrany [mln Nm <sup>3</sup> ]	Ilość gazu w PMG [mln Nm <sup>3</sup> ]
1	Zatłaczanie	50	–	364,4
1	Odbiór	–	22,5	341,9
2	Zatłaczanie	40	–	381,9
2	Odbiór	–	22,5	359,4
3	Zatłaczanie	40	–	399,4
3	Odbiór	–	22,5	376,9
4	Zatłaczanie	157,2	–	534,1
4	Odbiór	–	168,7	365,4
5	Zatłaczanie	166,1	–	531,6
5	Odbiór	–	164,9	366,6
6	Zatłaczanie	167,2	–	533,8
6	Odbiór	–	164,5	369,3
7	Zatłaczanie	167,3	–	536,6
7	Odbiór	–	164,6	372,0
8	Zatłaczanie	167,2	–	539,2
8	Odbiór	–	164,8	374,5

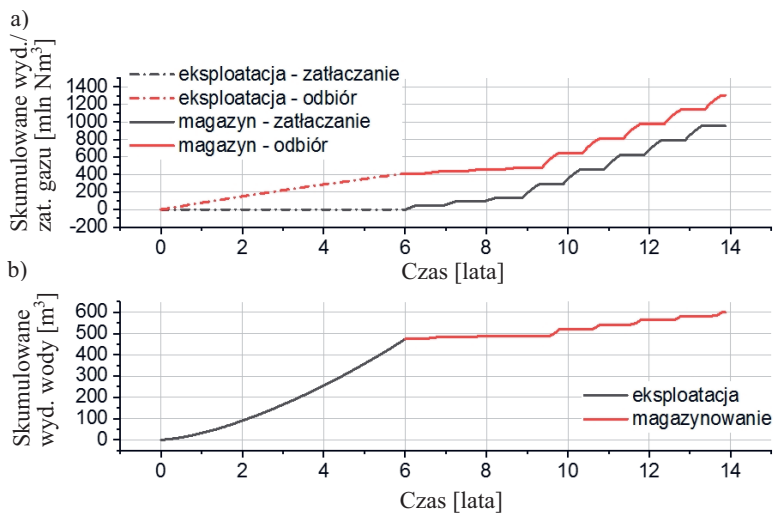


**Rys. 5.26.** Zmiana ilości gazu w złożu/PMG w trakcie eksploatacji i magazynowania gazu



Rys. 5.27. Zmiana średniego ciśnienia w złożu/PMG w trakcie eksploatacji i magazynowania gazu

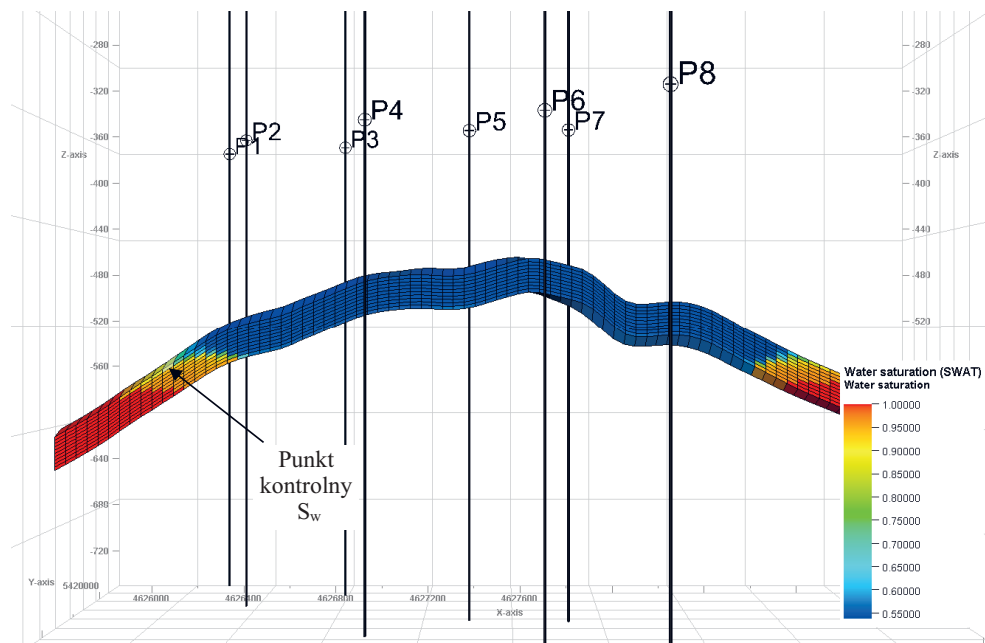
Analizując zmianę średniego ciśnienia złożowego w trakcie rozbudowy, zaobserwowano jego stopniowy wzrost w ciągu kolejnych cykli. Po trzecim cyklu zatłaczania średnie ciśnienie złożowe podniosło się z 63,1 bara do 84 barów. W trakcie regularnej pracy PMG średnie ciśnienie złożowe wzrosło do wartości 108,5 bara, jednak ze względu na stopniowe odpychanie wody złożowej obserwowana jest stabilizacja maksymalnego ciśnienia przy napelnionym magazynie przy wartości 106,5 bara. Zmiany skumulowanego wydobycia gazu ziemnego oraz wody złożowej wraz z wartościami skumulowanego zatłaczania przedstawiono na rysunku 5.28.



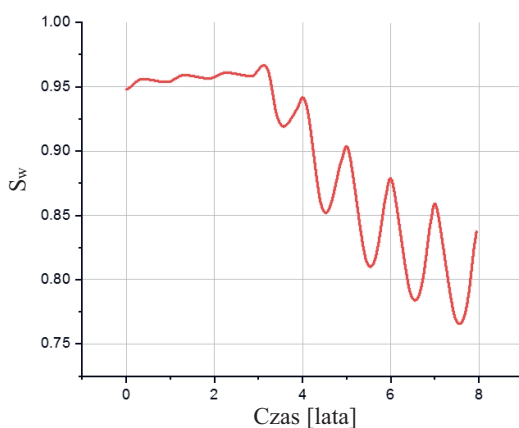
Rys. 5.28. Zmiany skumulowanego wydobycia i zatłaczania gazu (a) oraz wydobycia wody (b) w trakcie eksploatacji i rozbudowy oraz pracy PMG



W trakcie pracy PMG zaobserwowano stopniowe odpychanie wody złożowej szczególnie ze stropowych części złoża, co przedstawiono na rysunku 5.29 oraz na wykresie zmiany nasycenia wodą w punkcie kontrolnym pokazanym na rysunku 5.30. Jak można zauważyć, nasycenie wodą w punkcie kontrolnym z cyklu na cykl stopniowo zmniejsza się. Tym samym powiększa się strefa nasycenia gazem.



Rys. 5.29. Nasycenie wodą złożową na koniec okresu symulacji pracy PMG z zaznaczonym punktem kontrolnym nasycenia wodą



Rys. 5.30. Zmiany nasycenia wodą w punkcie kontrolnym

### 5.3.3. Analiza eksploatacji i magazynowania gazu w syntetycznym złożu na podstawie modelu analitycznego

Na podstawie wyników symulacji komputerowej i wykorzystując analityczny model obliczeniowy, przeprowadzono analizę eksploatacji złoża oraz zaprognozowano pracę magazynu gazu w fazie jego rozbudowy i docelowej pojemności. Uzyskane wyniki obliczeń analitycznych odniesiono do wyników symulacji komputerowej.

Ocenę możliwości budowy podziemnego magazynu w częściowo szcerpanym złożu gazu przeprowadzono na podstawie pokazanego w podrozdziale 5.1 modelu matematycznego bilansu masowego z dopływem wody oraz zbudowanych algorytmów obliczeniowych. Do obliczeń przyjęto dane z przebiegu eksploatacji złoża (tab. 5.4). Eksploatowany jest gaz wysokometanowy, którego parametry PVT, tj. współczynnik ściśliwości gazu  $z$ , współczynnik objętościowy, gęstość oraz lepkość, wyznaczono, korzystając z korelacji i równań, odpowiednio (4.39), (4.4), (4.41) i (4.42). Wyznaczone parametry gazu odnoszące się do wartości ciśnień pomiędzy wartością ciśnienia początkowego i na końcu eksploatacji złoża, przy temperaturze panującej w złożu 303 K, podano w tabeli 5.6.

**Tabela 5.6**

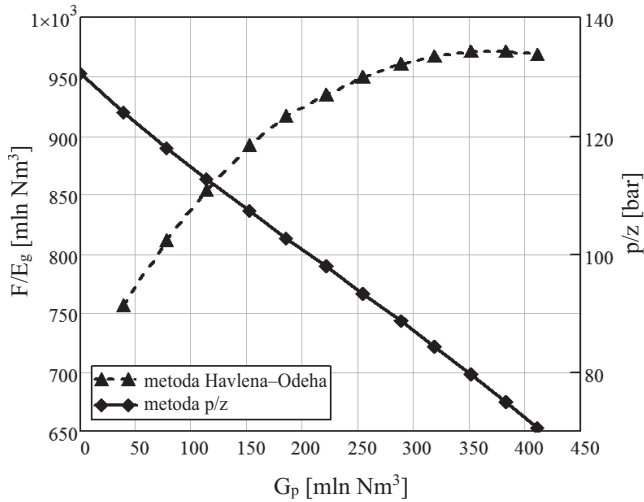
Parametry PVT gazu w warunkach złożowych

$p$ [MPa]	$z$ [-]	$B_g$ [-]	$\mu$ [cP]	$\rho_g$ [kg/m <sup>3</sup> ]
11	0,84	0,00845	0,0145	83,4
10	0,85	0,0952	0,0141	75,0
9	0,86	0,011	0,0137	66,7
8	0,87	0,012	0,0134	58,4
7	0,885	0,014	0,0131	50,4
6	0,899	0,017	0,0128	42,5

#### Ocena warunków energetycznych złoża

Prawidłowa ocena warunków energetycznych złoża jest kluczowa ze względu na ocenę charakteru pracy i magazynu gazu oraz wiarygodnego określenia zasobów początkowych gazu w złożu. Badanie mechanizmu pracy złoża przeprowadzono metodami bilansu, opierając się na danych dotyczących przebiegu eksploatacji złoża, a mianowicie wydobycia płynów złożowych oraz zmiany ciśnienia złożowego. Diagnostowanie warunków energetycznych analizowanego złoża przeprowadzono z wykorzystaniem metodyki  $p/z$  oraz Havlena–Odeha na podstawie danych z przebiegu eksploatacji złoża zestawionych w tabeli 5.4 z uwzględnieniem własności gazu pokazanych w tabeli 5.6. Wykresy diagnostyczne pokazano na rysunku 5.31.

Przebieg punktów na wykresie  $p/z$  vs  $G_p$  może sugerować, że złożo pracuje w warunkach wolumetrycznych, jednakże ułożenie punktów na wykresie  $F/E_g$  vs  $G_p$  jednoznacznie wskazuje na istnienie aktywnej strefy wodonośnej podtrzymującej ciśnienie złożowe. Zatem w trakcie eksploatacji nastąpił znaczny dopływ wody do złoża.



**Rys. 5.31.** Wykresy diagnostyczne oceny warunków energetycznych złoża

W celu dopasowania wyliczanych ciśnień do przebiegu zmian ciśnienia złożowego dokonano kalibracji modelu bilansowego z uwzględnieniem omówionych w podrozdziale 5.1 metod obliczania dopływu wody do złoża, tj. metody van Everdingena–Hursta i Fetkovicha. Kalibrację modelu przeprowadzono na podstawie danych z przebiegu eksploatacji złoża, wykorzystując procedury obliczeniowe, pokazane na rysunkach 5.5 i 5.6, i korzystając z autorskiego programu napisanego w systemie MathCad, którego główne elementy pokazano na rysunkach 5.8 i 5.9. W tabeli 5.7 zestawiono wyznaczone metodami regresji nieliniowej parametry strefy wodonośnej dla obydwu metod określania dopływu wody do złoża oraz zasoby początkowe gazu w złożu.

**Tabela 5.7**

Parametry dopasowania modeli van Everdingena–Hursta i Fetkovicha oraz wyznaczone zasoby początkowe gazu w złożu

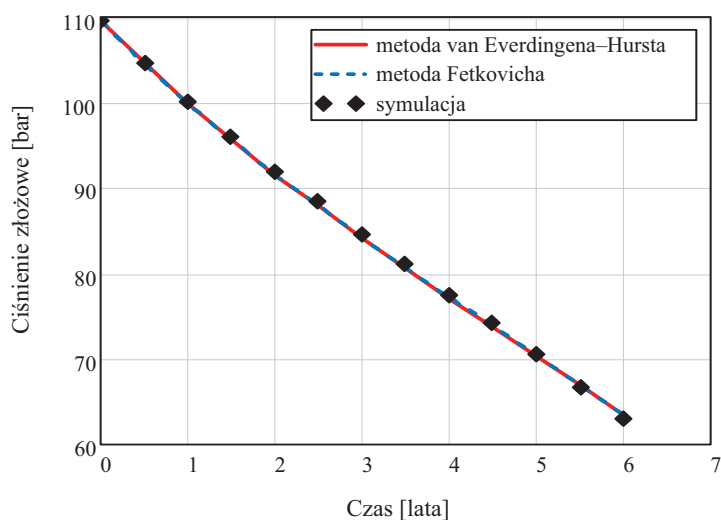
Metoda van Everdingena–Hursta				Metoda Fetkovicha		
$U$ [m <sup>3</sup> /Pa]	$u$ [1/s]	$r_D$ [–]	$G$ [mln Nm <sup>3</sup> ]	$J$ [m <sup>3</sup> /Pa·s]	$W_{gi}$ [m <sup>3</sup> ]	$G$ [mln Nm <sup>3</sup> ]
$1,02 \cdot 10^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{-5}$	36,3	725	$3,96 \cdot 10^{-9}$	$6,98 \cdot 10^6$	723,3

Wyniki kalibracji modelu bilansowego w postaci porównania ciśnień złożowych uzyskanych z symulacji komputerowej z wyliczonymi ciśnieniami w funkcji czasu pokazano w tabeli 5.8 oraz na rysunku 5.32. Uzyskane wyniki wskazują na bardzo dobrą zgodność obydwu metod, tj. Fetkovicha i van Everdingena–Hursta, z wynikami symulacji komputerowej. Współczynniki zgodności dopasowania  $R^2$  w obu przypadkach wynoszą 0,999. Wyniki obliczeń uzyskanych obiema metodami są zbieżne i stanowią jednocześnie wzajemną weryfikację.

**Tabela 5.8**

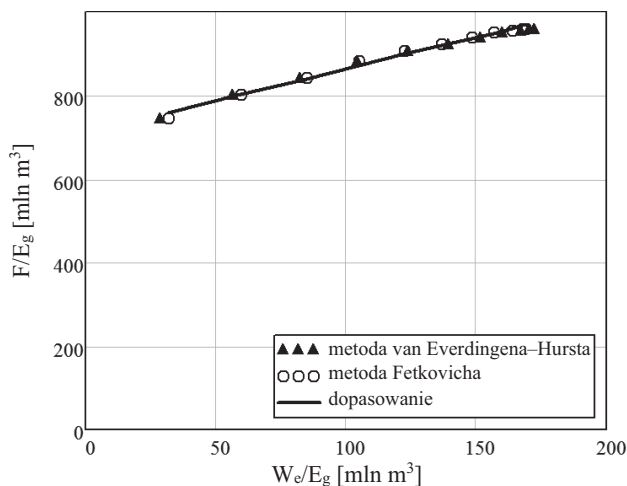
Dopasowanie modeli analitycznych do ciśnień uzyskanych z symulacji komputerowej

Czas eksploatacji [lata]	Ciśnienie średnie w złożu [MPa]		
	Symulacja	Metoda van Everdingena–Hursta	Metoda Fetkovicha
0	10,96	10,96	10,96
0,5	10,46	10,454	10,45
1	10,00	9,987	9,98
1,5	9,60	9,578	9,569
2	9,20	9,156	9,15
2,5	8,84	8,793	8,791
3	8,47	8,421	8,424
3,5	8,12	8,073	8,079
4	7,75	7,71	7,718
4,5	7,41	7,381	7,39
5	7,05	7,03	7,039
5,5	6,67	6,682	6,695
6	6,31	6,344	6,355



**Rys. 5.32.** Dopasowanie ciśnień wyliczonych z uzyskanymi z symulacji

Błąd bezwzględny wyliczonych ciśnień w porównaniu z ciśnieniami złożowymi z symulacji nie przekracza 0,52 bara dla metody Fetkovicha i 0,5 bara dla metody van Everdingena–Hursta. Poprawność kalibracji modelu obliczeniowego pokazano także na wykresie w układzie  $F/E_g$  vs  $W_e/E_g$  (rys. 5.33). Punkty na wykresie układają się liniowo, co świadczy o właściwym określeniu parametrów modeli złoża i strefy wodonośnej.

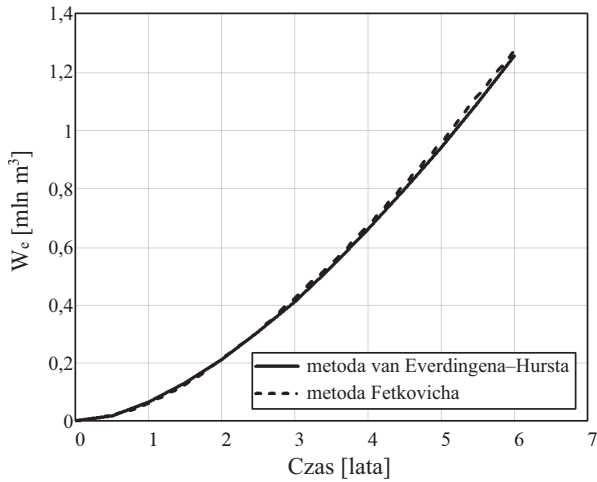


**Rys. 5.33.** Wykres diagnostyczny kalibracji modelu bilansowego według metody Havlena–Odeha

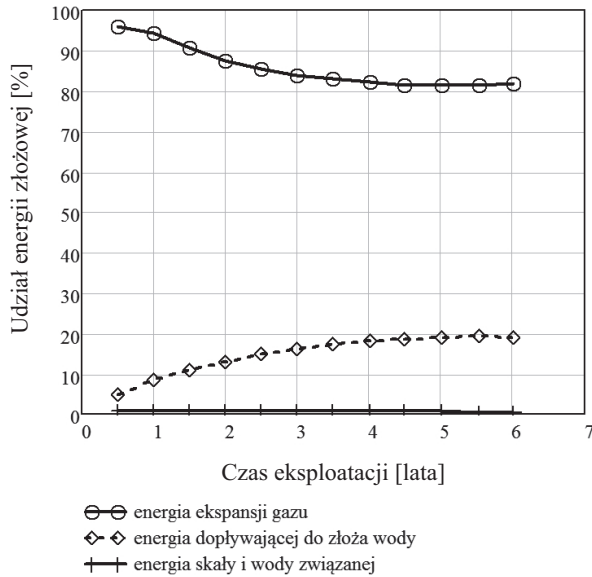
Na rysunku 5.34 pokazano zmianę skumulowanego dopływu wody do złoża w czasie.

Jak można zauważyć, w trakcie eksploatacji następuje stopniowy przyrost ilości wody dopływającej do złoża. Po trzech latach eksploatacji i wydobywaniu 221 mln Nm<sup>3</sup> dopływ ten wynosił 0,4 mln m<sup>3</sup>, natomiast po sześciu latach eksploatacji złoża wydobytych było 411 mln Nm<sup>3</sup> gazu, a sumaryczny dopływ wody wzrósł ponadtrzykrotnie do poziomu 1,27 mln m<sup>3</sup> (wg metody Fetkovicha) i 1,244 mln m<sup>3</sup> (wg metody van Everdingena–Hursta). Taki charakter dopływu wody do złoża, świadczy o postępującym zawadnianiu się złoża i pomniejszaniu przestrzeni porowej złoża dostępnej dla gazu. Konsekwencją tego jest wzrastający udział energii dopływającej do złoża wody w całkowitej energii złoża, który w końcowej fazie eksploatacji złoża osiąga ok. 20% w całkowitej energii złoża (rys. 5.35).

Ze względu na nieco większą dokładność obliczeń do prognozowania pracy magazynu gazu wykorzystano model van Everdingena–Hursta. Wyznaczone na podstawie skalibrowanego modelu bilansowego z wykorzystaniem modelu dopływu wody złoża van Everdingena–Hursta zasoby początkowe gazu określono na poziomie 725 mln Nm<sup>3</sup>.



Rys. 5.34. Skumulowany dopływ wody do złoża



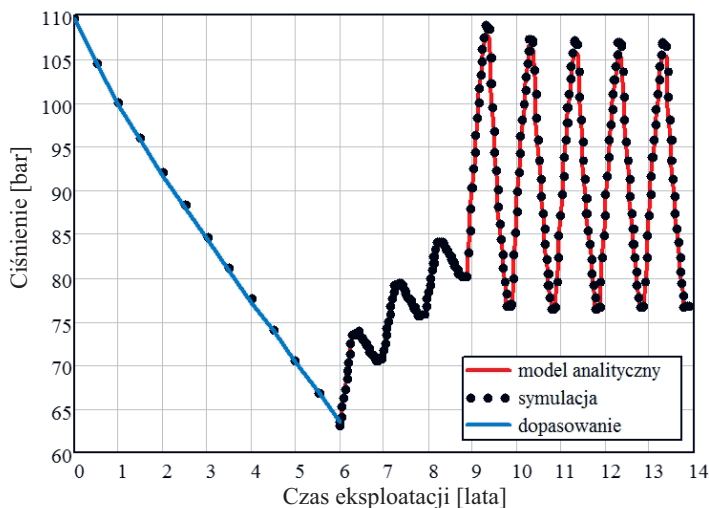
Rys. 5.35. Zamiana wskaźników systemu energetycznego złoża

### 5.3.4. Prognoza budowy magazynu gazu

Na podstawie skalibrowanego modelu bilansowego z dopływem wody do złoża przeprowadzono prognozę pracy magazynu gazu w ośmiu cyklach według scenariusza przyjętego w symulacji komputerowej.

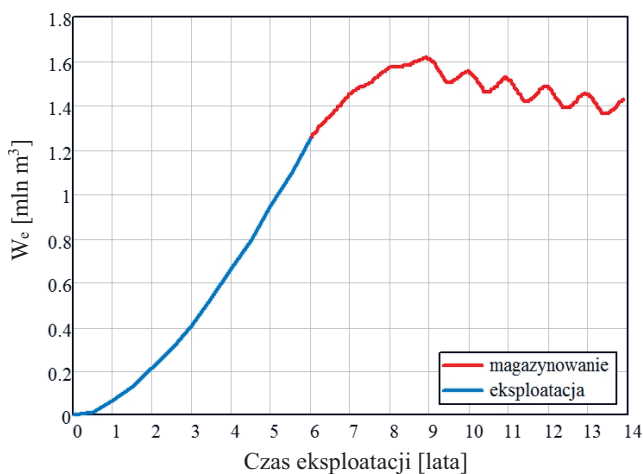
Ze względu na znaczne zmniejszenie objętości porowej dostępnej dla gazu w trakcie eksploatacji złoża spowodowanej dopływem wody w początkowych trzech cyklach pracy magazynu zwiększono jego pojemność buforową, zatłaczając łącznie ok. 63 mln Nm<sup>3</sup> gazu. Celem tego zabiegu było wyparcie wody z przestrzeni porowej złoża i odepchnięcie jej od odwiertów eksploatacyjnych, tak aby możliwe były uzyskanie jak największej pojemności czynnej wytwarzanego magazynu.

Przebiegi zmian ciśnienia zarówno dla okresu eksploatacji złoża, jak i magazynowania gazu przedstawiono na rysunku 5.36. Jak można zauważyć, uzyskane wyniki wyznaczanych ciśnień złożowych są zbieżne z wynikami uzyskanymi z symulacji komputerowej, co potwierdza poprawność kalibracji modelu analitycznego. Analizując uzyskane wyniki, można zauważyć, że w trakcie w początkowych trzech cyklach rozbudowy magazynu następuje stopniowy wzrost ciśnienia złożowego od 63,1 bara na końcu eksploatacji złoża do 83,5 bara po odbiorze gazu w trzecim cyklu. W kolejnych pięciu cyklach pracy magazynu, wobec znacznie większych ilości zatłaczanego i odbieranego gazu, zakres zmian ciśnienia złożowego jest znacznie szerszy i wynosi blisko 30 barów, przy czym ciśnienia na koniec cykli zatłaczania gazu do magazynu są wtedy bliskie ciśnieniu początkowemu w złożu i stabilizują się na poziomie 105,2 bara (na koniec okresu zatłaczania w ostatnim ósmym cyklu pracy PMG). Różnica pomiędzy wartościami uzyskiwanymi w symulacji i wyznaczanych analitycznie mieści się zatem w granicach nieco powyżej 1 bara, co świadczy o dobrym skalibrowaniu modelu analitycznego. Uzyskana pojemność czynna magazynu wynosi ok. 170 mln Nm<sup>3</sup>, przy pojemności buforowej na poziomie 370 mln Nm<sup>3</sup> gazu.



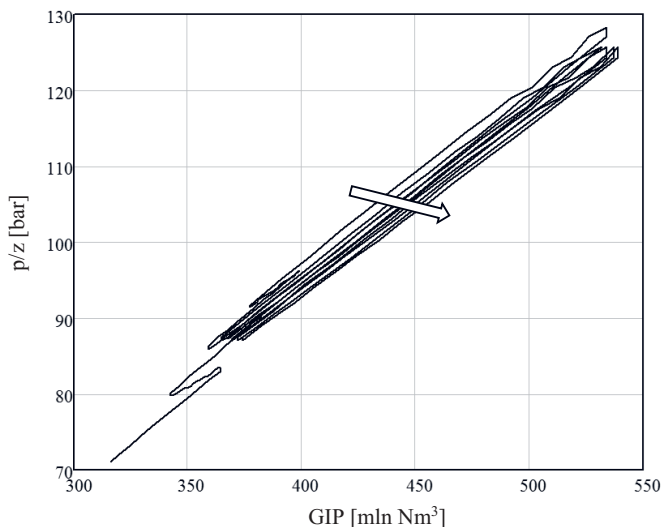
**Rys. 5.36.** Zmiana ciśnienia złożowego w trakcie dotychczasowej eksploatacji i prognozy pracy PMG

Na rysunku 5.37 pokazano zmianę skumulowanej ilości wody dopływającej do złoża w trakcie jego eksploatacji i magazynowania gazu. Jak stwierdzono już wcześniej, w trakcie eksploatacji gazu wzrasta dopływ wody do złoża.



**Rys. 5.37.** Skumulowany dopływ wody do złoża w trakcie dotychczasowej eksploatacji i prognozy pracy PMG

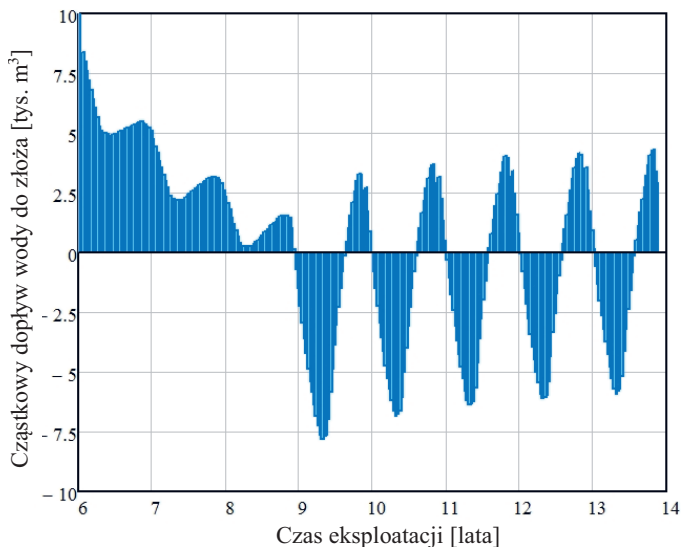
Na uwagę zasługuje jednak fakt, że odwrócenie negatywnego trendu nie następuje od razu w momencie rozpoczęcia zatłaczania gazu do złoża. W początkowych trzech cyklach rozbudowy PMG, z cyklu na cykl, pomimo zatłaczania dodatkowych ilości gazu do magazynu, skumulowany dopływ wody do złoża nadal rośnie. Dopiero w kolejnych cyklach kierunek ruchu wody w kierunku złoża zostaje odwrócony i rozpoczyna się wypieranie wody ze złoża, w wyniku czego powiększa się objętość porowa dostępna dla gazu. Efekt ten można także zauważyć, analizując przebieg pętli histerezy pokazanych na rysunku 5.38, gdzie kolejne pętle przesuwają się nieznacznie promieniście w prawo.



**Rys. 5.38.** Pętle histerezy pracy magazynu



W kolejnych cyklach następuje zatem powiększanie się pojemności magazynu, co jest efektem korzystnym w aspekcie pracy magazynu. Jednocześnie nie ma niebezpieczeństwa rozszczenia złoża i ucieczki gazu poza strukturę, ze względu na to, iż ruch wody na zewnątrz złoża ma tendencję do stabilizacji. Podobne wnioski można wyciągnąć z analizy wykresu cząstkowego dopływu wody do złoża pokazanego na rysunku 5.39.



**Rys. 5.39.** Cząstkowy dopływ wody do złoża w trakcie zatłaczania i odbioru gazu z PMG

W początkowych trzech cyklach rozbudowy dopływy cząstkowe mają znak dodatni, co oznacza, że następuje ciągły dopływ wody do złoża, ale z tendencją malejącą. Zaczynając od czwartego cyklu pracy magazynu, obserwuje się ujemne wartości dopływów cząstkowych, co jest równoznaczne z wypieraniem wody z przestrzeni porowej złoża. W fazie odbioru gazu z PMG woda wprawdzie znowu dopływa do złoża, ale w mniejszych ilościach w porównaniu z okresami zatłaczania, gdzie więcej wody jest wypierane ze złoża. W końcowych cyklach pracy magazynu obserwuje się stabilizację ruchu wody w złożu. Objętość porowa dostępna dla gazu jest na zbliżonym poziomie w tych samych fazach pracy PMG.

## Podsumowanie

Wzrastające w ostatnich latach zużycie gazu w Polsce wobec spadku wydobycia ze złóż krajowych jest powodem zwiększonego importu tego paliwa. Jednocześnie z roku na rok obserwuje się coraz to większe zróżnicowanie w zużyciu gazu w okresach letnich i zimowych. Duże dysproporcje w zapotrzebowaniu na gaz wynikają z jednej strony z uwarunkowań klimatycznych, a z drugiej z faktu, że obok odbiorców przemysłowych coraz większą rolę odgrywają odbiorcy indywidualni. To właśnie ta grupa charakteryzuje się największą zmiennością w zapotrzebowaniu na gaz. W celu zapewnienia ciągłości i bezpieczeństwa dostaw gazu do odbiorców niezbędne jest zatem posiadanie rezerw gazu zgromadzonych w magazynach. Magazyny gazu stanowią zatem nieodzowny element prawidłowego funkcjonowania systemu przesyłowego. Przy wzrastającym zużyciu gazu i narastających dysproporcjach w zapotrzebowaniu na gaz konieczne jest posiadanie magazynów o odpowiednio dużych pojemnościach. Cel ten można osiągnąć przez budowę nowych magazynów bądź rozbudowę już istniejących. Ponad trzy czwarte magazynów gazu istniejących w świecie zostało wytworzonych w częściowo szcerpanych złożach gazu ziemnego, które są naturalnymi obiektami dla tych celów. Za wyborem tych struktur przemawia wiele korzyści, z których najważniejszymi są duże pojemności, dobre własności kolektorskie, ale przede wszystkim potwierdzona szczelność struktury geologicznej. Ta własność jest jednocześnie najistotniejszym kryterium wyboru struktury na PMG. W pracy scharakteryzowano możliwe drogi ucieczki gazu z PMG, m.in. wskutek pokonania sił kapilarnych w uszczelniających skałach nadkładu przy przewyższeniu ciśnienia ponad pierwotne, rozszczelnienia struktury w wyniku reaktywacji uskoków i naturalnie występujących nieciągłości oraz rozszczelnienia odwiertów udostępniających złoża. Przedstawiono także metody oceny szczelności magazynu oparte na metodach bilansu masowego.

Celem niniejszej pracy było pokazanie modelowania pracy podziemnych magazynów gazu wytwarzanych w częściowo szcerpanych złożach gazu ziemnego. W tym celu zbudowano modele matematyczne z wykorzystaniem istniejących w inżynierii złożowej rozwiązań analitycznych, które następnie zaimplementowano do budowy algorytmów obliczeniowych. Modele oparte są głównie na równaniach: bilansu masowego, przepływu gazu w złożu, transportu gazu w odwiercie, dopływu wody do złoża, a także równaniach opisujących własności PVT płynów złożowych. Modelowanie pracy magazynu gazu przeprowadzono dla dwóch rodzajów złóż gazu, tj. wolumetrycznego i niewolumetrycznego.

Wykorzystując dane z przebiegu eksploatacji jednego ze złóż z Przedgórza Karpat, dokonano oceny możliwości utworzenia w tym złożu magazynu gazu. Obliczenia wykonano,

korzystając z metodyki pokazanej w pracy [61], którą rozszerzono o możliwość zastosowania odwiertów poziomych w magazynowaniu gazu z wykorzystaniem równania Joshiego [57]. Opierając się na zbudowanym algorytmie obliczeniowym i wykorzystując dane historyczne z przebiegu eksploatacji złoża, określono warunki energetyczne złoża jako wolumetryczne. Przyjmując warunki ograniczające w postaci minimalnego ciśnienia głowicowego, w zależności od liczby zastosowanych odwiertów poziomych, wyznaczono możliwą do uzyskania pojemność czynną oraz zakres ciśnień pracy magazynu. Ze względu na wysoki stopień szczypania zasobów dla zapewnienia prawidłowej pracy magazynu konieczne okazało się zwiększenie pojemności buforowej magazynu. Na podstawie przeprowadzonej analizy określono wielkości pojemności czynnej magazynu, która wzrastała przy wykorzystaniu większej liczby odwiertów eksploatacyjnych oraz niższej wartości ciśnienia głowicowego na koniec okresu odbioru gazu z magazynu.

Modelowanie pracy magazynu gazu wytwarzanego w złożu gazu kontaktującym się z aktywną strefą wodonośną przeprowadzono dla hipotetycznego złoża gazu. W tym celu przeprowadzono symulację eksploatacji syntetycznego złoża gazu, którego statyczny model geologiczny zbudowano na podstawie rzeczywistego złoża. Model ten następnie uzupełniono o rozkład ciśnień i nasycień płynami, tworząc dynamiczny model symulacyjny. Na tej podstawie przeprowadzono najpierw symulację eksploatacji złoża, a następnie magazynowania gazu, opierając się na przyjętych scenariuszach jego rozbudowy i docelowej pracy. Ważnym elementem budowy modelu symulacyjnego złoża były badania eksperymentalne mające na celu określenie przepuszczalności efektywnych skał zbiornikowych dla gazu i wody. Zjawiska te są szczególnie istotne w modelowaniu pracy magazynów gazu kontaktujących się z aktywną strefą wodonośną, gdzie w trakcie magazynowania ma miejsce naprzemienny ruch wody do i na zewnątrz złoża w zależności od fazy zatłaczania/odbioru gazu do i z PMG. W tym celu na zbudowanym stanowisku przeprowadzono badania eksperymentalne, których wynikiem było wyznaczenie krzywych przepuszczalności względnych skały dla wody i gazu w funkcji nasycenia skały wodą. Uzyskane wyniki zostały zaimplementowane w dynamicznym modelu symulacyjnym złoża. Wyniki symulacji komputerowej użyto następnie do modelowania pracy złoża i magazynu z wykorzystaniem rozwiązań analitycznych. Stosując zbudowane algorytmy obliczeniowe oparte na równaniu bilansu masowego oraz równaniach określania wielkości dopływu wody do złoża, dokonano kalibracji modelu analitycznego przez dopasowanie do wyników otrzymanych z symulacji komputerowej i uzyskano bardzo dobrą zgodność. Na tej podstawie przeprowadzono prognozę pracy magazynu gazu według scenariusza przyjętego w symulacji komputerowej. W trzech początkowych cyklach pracy magazynu następuje rozbudowa magazynu przez zwiększenie pojemności buforowej, ma to na celu odwrócenie procesu zawadniania się złoża, które występowało w trakcie jego eksploatacji. Pomimo zwiększania w kolejnych cyklach ilości gazu w PMG i tym samym podwyższania ciśnienia nie udało się odwrócić niekorzystnego kierunku napływu wody do złoża. Zwiększenie ciśnienia w złożu do wartości bliskiej wartości ciśnienia początkowego w kolejnych cyklach pracy magazynu pozwoliło na odwrócenie kierunku ruchu wody i wypieraniu jej z przestrzeni porowej złoża. W końcowych cyklach pracy magazynu obserwuje się stopniowe powiększanie objętości porowej dostępnej dla gazu z tendencją do stabilizacji tego trendu. Efekt ten jest korzystny w aspekcie prawidłowej pracy magazynu. Sytuację tę zaobserwowano także na podstawie analizy pętli histerezy pracy magazynu, gdzie kolejne pętle przebiegają wzdłuż prostej odchylającej się promieniście w prawo.

Pokazane w pracy sposoby modelowania pracy podziemnych magazynów gazu mają charakter uniwersalny i mogą być wykorzystane zarówno w projektowaniu nowych magazynów gazu, jak i przy rozbudowie już istniejących. W odróżnieniu od bardziej zaawansowanych narzędzi, jakimi są symulatory złożowe, modele oparte na rozwiązaniach analitycznych pozwalają, przy względnie małej liczbie danych wejściowych, analizować i prognozować eksploatację złóż węglowodorów i podziemnych magazynów gazu. Narzędzia te jednocześnie mogą być także wykorzystane do weryfikacji wyników symulacji komputerowej.



## Literatura

- [1] *PGNiG w liczbach – 2017*, <http://pgnig.pl/documents/10184/2443425/PGNiG-w-liczbach-2017.pdf/57ea4e3e-a573-482c-bea1-0d4f3aafb4a3>, dostęp 03.10.2018 r.
- [2] *Gas Storage Poland*, <https://ipi.gasstoragepoland.pl>, dostęp 03.10.2018 r.
- [3] Ciechanowska M., *Podziemne magazyny gazu elementem bezpieczeństwa energetycznego Polski*, *Nafta-Gaz*, rok 72, nr 10/2016, s. 833–840.
- [4] Wang X., Economides M., *Advanced Natural Gas Engineering*, Gulf Publishing Company, 2009.
- [5] Kosowski P., Stopa J., Rychlicki S., *Analiza rynku gazu ziemnego w Polsce w latach 2003–2009 i prognozy na lata 2010–2012*, *Nafta-Gaz*, rok 66, nr 11/2010.
- [6] Matkowski A., Musiał P., *Systemowe magazyny gazu w Polsce*, *Archiwum Energetyki*, t. 42, nr 1, s. 81–92, 2012.
- [7] Kosowski P., Stopa J., Rychlicki S., *Podziemne magazynowanie gazu jako element systemu bezpieczeństwa energetycznego i rynku gazowego*, *Polityka Energetyczna*, t. 10, z. 2, 2007, s. 131–140.
- [8] Filar B., Kwilosz T., *Możliwości rozwoju podziemnych magazynów gazu w Polsce*, *Polityka Energetyczna*, t. 11, z. 2, 2008, s. 33–40.
- [9] Kaliski M., Janusz P., Szurlej A., *Podziemne magazyny jako element zapewniający ciągłość dostaw gazu ziemnego*, *Wiertnictwo Nafta Gaz*, t. 27, z. 1–2, 2010, s. 193–205.
- [10] Kaliski M., Janusz P., Szurlej A., *Podziemne magazyny gazu jako element krajowego systemu gazowego*, *Nafta-Gaz*, rok 66, nr 5/2010, s. 325–332.
- [11] Reinisch R., *Wybrane, istotne aspekty podziemnych magazynów gazu (u progu XXI wieku)*, Wydawnictwo PLJ, Warszawa 2000.
- [12] Nawrat S. i in., *Utylizacja metanu z pokładów węgla w polskich kopalniach podziemnych*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2009.
- [13] Polskie LNG, *Informacje o spółce*, <http://www.polskielng.pl/o-firmie/informacje-o-spolce>, dostęp 05.10.2018 r.
- [14] Ślizowski J., Urbańczyk K. i in., *Możliwości magazynowania gazu ziemnego w polskich złożach soli kamiennej w zależności od warunków geologiczno-górnictwowych*, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Kraków, Wydawnictwo IGSMiE PAN, 2011.
- [15] Evens D.J., Chadwick R.A., *Underground Gas Storage Worldwide Experiences and Future Development in the UK and Europe*, The Geological Society, London 2009.

- [16] *Encyclopaedia of Hydrocarbons: Exploration, production and transport*, t. 1, ENI, 2005.
- [17] Kunstman A., Poborska-Młynarska K., Urbańczyk K., *Geologiczne i górnicze aspekty budowy magazynowych kawern solnych*, Przegląd Geologiczny, vol. 57, nr 9, 2009, s. 819–928.
- [18] Stopa J., Rychlicki S., Kosowski P., *Rola podziemnego magazynowania gazu w kawernach solnych*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, t. 24, z. 3/2, 2008.
- [19] Ikoku Chi U., *Natural Gas Reservoir Engineering*, John Willey & Sons, New York–Chichester–Brisbane–Toronto–Singapore 1984.
- [20] Tek M.R., *Underground Storage of Natural Gas*, Gulf Publishing Company, Huston 1987.
- [21] Siemek J., Nagy S., *Podziemne magazyny gazu ziemnego w wyeksploatowanych kopalniach węgla*, Wiertnictwo Nafta Gaz, t. 24, z. 2, 2007, s. 857–868.
- [22] Siemek J., Kidybiński A. i in., *Podziemne magazyny gazu w zaniechanych kopalniach węgla* – praca zbiorowa, Główny Instytut Górniczo-Geologiczny, Katowice 2006.
- [23] Flanigan O., *Underground Gas Storage Facilities: Design and Implementation*, Elsevier Science & Technology Books, 1995.
- [24] Nowak J., Olszewska K., Pawłowski A., Sierpińska M., *Stan zaawansowania budowy podziemnych magazynów gazu w obszarze działania PGNiG S.A. Oddziału w Zielonej Górze*, Nafta-Gaz, rok 66, sierpień 2010, s. 681–690.
- [25] Gałek G., Belczyk M., *Podziemny Magazyn Gazu Wierchowice – rozbudowa do pojemności 1,2 mld m<sup>3</sup>*, Nafta-Gaz, rok 68, styczeń 2012, s. 14–26.
- [26] Gąska K., Hoszowski A., Gmiński Z., Kurek A., *Monografia podziemnych magazynów gazu w Polsce*, Oficyna Wydawnicza ASPRA-JR, Warszawa 2012.
- [27] Filar B., Miziołek M., *Parametry PMG Strachocina osiągnięte w pierwszym cyklu eksploatacji magazynu, po rozbudowie pojemności czynnej zakończonej w 2011 r.*, Nafta-Gaz, rok 68, grudzień 2012, s. 993–998.
- [28] Nagy S., Rybicki C., Łaciak M., Blicharski J. i in., *Vademecum gazownika*, t. 1, Wydawnictwo Stowarzyszenia Naukowo-Technicznego Inżynierów i Techników Przemysłu Naftowego i Gazowniczego, Kraków 2014.
- [29] Zubrzycki A., *Podstawy geologii naftowej*, Wydawnictwo Z.P. Wioska, Kraków 2011.
- [30] Blicharski J., *An Evaluation of Hydrocarbon Deposit Tightness in Aspect of CO<sub>2</sub> Sequestration*, AGH Drilling, Oil, Gas, vol. 32, No. 4, 2015, s. 671–682.
- [31] Uliasz-Misiak B., *Ryzyko związane z geologicznym składowaniem CO<sub>2</sub>*, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków, t. 10, 2008, s. 623–632.
- [32] Nelson R.C., Evans J.M., Sorensen J.A., Steadman E.N., Harju J.A., *Factors Affecting the Potential for CO<sub>2</sub> Leakage from Geologic Sinks*, Plains CO<sub>2</sub> Reduction (PCOR) Partnership, 2005.
- [33] Berg R.R., *Capillary Pressures in Stratigraphic Traps*, AAPG Bulletin, vol. 59, No. 6, June 1975, s. 939–956.
- [34] Al-Bazali T.M., Zhang J., Chenevert M.E., Sharma M.M., *Estimating the Reservoir Hydrocarbon Capacity Through Measurement of the Minimum Capillary Entry Pressure of Shale Caprocks*, SPE 121450, 2009.
- [35] Hildenbrand A., Schlomer S., Krooss B.M., *Gas Breakthrough Experiments on Fine-Grained Sedimentary Rocks*, Geofluids, vol. 2, 2002, s. 3–23.

- [36] Li S., Dong M., Li Z., Huang S., Qing H., Nickel E., *Gas Breakthrough Pressure for Hydrocarbon Reservoir Seal Rock Implications for the Security of Long-Term CO<sub>2</sub> Storage in the Weyburn Field*, *Geofluids*, vol. 5, 2005, s. 326–334.
- [37] Klimkowski Ł., Smulski R., *Laboratory Method to Measure Sealing Capacity of Caprocks*, *Archives of Mining Sciences*, vol. 57, No. 2, 2012, s. 471–448.
- [38] Schoofs S., Lawati M., Engen G., Salmi K., Quseimi I., Kindy F., Marsden C., Ita J., Hejden F.H.J., Bauer A., *Integrated Usage of Surveillance Data for Estimating Cap Rock Integrity and Heat Distribution During Steam Injection in a Fractured Carbonate Reservoir*, SPE 129479, 2010.
- [39] Hunt S.P., Camac B.A., Boulton P.J., *A New Geomechanical Tool for the Evaluation of Hydrocarbon Trap Integrity*, ARMA/USRMS 06–1064, 2005.
- [40] Yielding G., Freeman B., Needham D.T., *Quantitative Fault Seal Prediction*, AAPG Bulletin, vol. 81, No. 6, June 1997, s. 897–917.
- [41] Nygaard R., Salehi S., Weideman B., Lavoie R., *Effect of Dynamic Loading on Wellbore Leakage for the Wabamun Area CO<sub>2</sub> – Sequestration Project*, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2014.
- [42] Celia M.A., Bachu S. i in., *Quantitative estimation of CO<sub>2</sub> leakage from geological storage: Analytical models, numerical models, and data needs*, Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies 5– September 2004, Vancouver, Canada, Elsevier, vol. 1, 2005.
- [43] *Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w zakładach górniczych wydobywających kopaliny otworami wiertniczymi*, Dz. U. Nr 109, poz. 961, z 2004 r. Nr 24, poz. 213 oraz z 2007 r. Nr 106, poz. 726, Katowice, 2007.
- [44] Rybicki C., Łaciak M., *Metoda szacowania strat gazu w podziemnych magazynach gazu*, *Górnictwo*, r. 22, z. 3, 1998, s. 163–169.
- [45] Azin R., Nasiri A., Jodeyri A., Montazeri H.M., *Investigation of Underground Gas Storage in a Partially Depleted Gas Reservoir*, SPE 113588, 2008.
- [46] Kurihara M., Liang J., Fujimoto F., Nghiem L., Sammon P., *Development and Application of Underground Gas Storage Simulator*, SPE 59438, 2000.
- [47] Juez-Larre J., Remmelts G., Breunese J.N., van Gessel S.F., Leeuvenburgh O., *Using Underground Gas Storage to Replace Swing Capacity of the Giant Natural Gas field of Groningen in the Netherlands. A Reservoir Performance Feasibility Study*, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 145, 2016, s. 34–35.
- [48] Ahmed T., McKinney P.D., *Advanced Reservoir Engineering*, Gulf Professional Publishing, 2005.
- [49] Dake L.P., *The Practice of Reservoir Engineering (Revised Edition)*, Elsevier Science, 2001.
- [50] Ettihad A., Jablonowski C., Lake L.W., *Gas Storage Facility Design Under Uncertainty*, SPE 123987, 2010.
- [51] Rybicki C., Blicharski J., *Problemy przemieszczania się wody złożowej w czasie eksploatacji złóż gazu ziemnego i podziemnych magazynów gazu*, *Wiertnictwo Nafta Gaz*, t. 24, z. 1, 2007, s. 435–441.
- [52] Florian T., Ueberer W., *Increasing the Capacity of an Underground Gas Storage by Optimized Well Completions, Matzen Field, Austria*, SPE 121263, 2009.



- [53] Bagci S., Ozturk B., *Performance Analysis of Horizontal Wells for Underground Gas Storage in Depleted Gas Fields*, SPE 111102, 2007.
- [54] Bilgesu H.I., Ali W., *Effect of Reservoir Properties on the Performance and Design of Gas Storage Wells*, SPE 91441, 2004.
- [55] Hagoort J., *Fundamentals of Gas Reservoir Engineering*, Elsevier–Amsterdam–Oxford–New–York–Tokyo, 1988.
- [56] Economides M.J., Hill A.D., *Petroleum Production Systems*, Prentice Hall, New Jersey 1994.
- [57] Joshi S.D., *Horizontal Well Technology*, PennWell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma, 1991.
- [58] Bergin S.R., Shikari Y.A., *A Horizontal Well in Gas Storage: A Case Study*, SPE 26165, 1993.
- [59] Ikoku Ch.U., *Natural Gas Production Engineering*, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1992.
- [60] Rybicki C., Blicharski J., *Wybrane problemy sterowania pracą odwiertów gazowych*, XI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, AGH Kraków, 2000.
- [61] McVay D.A., Spivey J.P., *Optimizing Gas Storage Reservoir Performance*, SPE 28639, 1994.
- [62] Tureyen O.I., Karaalioglu H., Sataman A., *Effect of the Wellbore Conditions on the Performance of Underground Gas Storage*, SPE 59737, 2000.
- [63] Blicharski J., Rybicki C., Stec G., *Analytical Prediction Model of UGS Performance*, AGH Drilling, Oil, Gas, vol. 31, No. 2, 2014, s. 325–339.
- [64] Ahmed T., *Equation of State and PVT Analysis*. Gulf Professional Publishing, Elsevier, 2016
- [65] Dake L.P., *Fundamental of Reservoir Engineering*, Elsevier 1978.
- [66] Rybicki C., Blicharski J., *Ruch wody w złożach węglowodorów i podziemnych magazynach gazu*, Wiertnictwo Nafta Gaz, t. 24, z. 2, 2007, s. 823–834.
- [67] Ahmed T., *Reservoir Engineering Handbook*, Gulf Professional Publishing, 2006.
- [68] Kuncir M., Chang J., Mansdorfer J., Dougherty E., *Analysis and Optimal Design of Gas Storage Reservoirs*, SPE 84822, 2003.
- [69] Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*, 2nd edition, Cambridge University Press, 1993.
- [70] Fatemi S.M., Sohrabi M., *Experimental and Theoretical Investigation ow Water/Gas Relative Permeability Hysteresis: Applicable to Water Alternating Gas (WAG) Injection and Gas Storage Processes*, SPE 161827, 2012.
- [71] Tang L., Wang J., Bai F., Shi L., *Inventory Forecast of Underground Gas Storage Based on Modified Material Balance Equation*, Petroleum Exploration and Development, vol. 41, Issue 4, 2014, s. 528–532.
- [72] Blicharski J., Smulski R., *Stanowisko laboratoryjne wypierania się płynów w ośrodkach porowatych w aspekcie sekwestracji CO<sub>2</sub>*, AGH Drilling Oil Gas, vol. 29, No. 1, 2012, s. 89–96.
- [73] Rybicki C., Wójcikowski M., Blicharski J., *Stanowisko laboratoryjne do badania przepływów wielofazowych w ośrodkach porowatych*, Wiertnictwo Nafta Gaz, t. 22/2, 2005, s. 559–572.

- [74] <https://www.corelab.com/cli/core-holders/standard-core-holder-hch-series>, dostęp 23.10.2018 r.
- [75] <http://www.teledyneisco.com/en-uk/pumps/dual-pumps>, dostęp 23.10.2018 r.
- [76] Rybicki C., Dubiel S., Blicharski J., Falkowicz S., *Water inflow prognosis for the gas wells*, Archives of Mining Sciences, vol. 51, No. 2, 2006, s. 241–251.
- [77] Mulyadi H., Amin R., Kennaird A.F., *Practical Approach to Determine Residual Gas Saturation and Gas–Water Relative Permeability*, SPE 71523, 2001.
- [78] Donnez P., *Essentials of Reservoir Engineering*, Editions Technip, France – Paris, 2007.
- [79] ECLIPSE – *Technical Description*, Schlumberger, 2014.