

**Analiza możliwości pozyskiwania pozabilansowych
zasobów gazu ziemnego z nasyconych poziomów
solankowych w procesach sekwestracji CO₂**

*Analysis of additional gas production possibility from
deep saline aquifers in the process of CO₂ sequestration*

Marcin Warnecki

**Analiza możliwości pozyskiwania
pozabilansowych zasobów gazu ziemnego
z nasyconych poziomów solankowych
w procesach sekwestracji CO₂**

*Analysis of additional gas production possibility
from deep saline aquifers in the process of CO₂
sequestration*

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

2016

Redaktor naukowy: dr Wiesław Szott

Recenzent: prof. nzw. dr hab. inż. Jan Lubaś

DOI: 10.18668/PN2016.211

Wydawca:

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

ul. Lubicz 25A

31-503 Kraków

Redaktor wydania: Agnieszka J. Kozak

Korekta językowa: Katarzyna Wróbel

Skład i łamanie, DTP, projekt okładki: Paweł Noszkiewicz

Druk i oprawa:

Drukarnia K&K reklama i poligrafia

ul. Zakopiańska 9, 30-418 Kraków

Nakład: 70 egz.

Copyright © 2016 INiG – PIB Kraków, ul. Lubicz 25A, Poland

ISSN 2353-2718, ISBN 978-83-65649-16-4

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej publikacji nie może być, bez uprzedniej pisemnej zgody wydawcy, gromadzona w systemach zbierania informacji, transmitowana lub reprodukowana, włączając w to fotokopie, fotografie, zapis magnetyczny lub inny.

Prenumeratę i wysyłkę prac naukowo-badawczych oraz materiałów informacyjnych prowadzi redakcja.

Spis treści

Streszczenie	10
Abstract	13
Wprowadzenie	16
1. Studium dotychczas przeprowadzonych badań w zakresie sekwestracji CO₂ w głębokich solankowych poziomach wodonośnych nasyconych gazem ziemnym	18
1.1. Rodzaje solankowych poziomów wodonośnych nasyconych gazem ziemnym	18
1.2. Możliwości pozyskiwania gazu z solankowych poziomów wodonośnych	25
1.3. Gaz ziemny w poziomach solankowych Nizy Polskiego	43
1.4. Konkluzje	48
2. Charakterystyka geologiczno-złożowa megastruktury niecki poznańskiej – potencjalnego obiektu sekwestracyjnego	49
2.1. Zarys budowy geologicznej niecki poznańskiej na tle geologii basenu permńskiego	49
2.2. Skały macierzyste węglowodorów zakumulowanych w osadach czerwonego spągowca basenu polskiego	57
2.3. Ogólna charakterystyka złóż węglowodorów w osadach czerwonego spągowca basenu polskiego	59

2.4. Struktura wodonośna niecki poznańskiej jako ogromny rezerwuár rozpuszczonego gazu ziemnego oraz potencjalny obiekt sekwestracyjny	62
3. Określenie właściwości fazowych mieszanin strefy przejściowej powstałych podczas procesu zatłaczania CO₂ do poziomów solankowych nasyconych gazem ziemnym	71
3.1. Aparatura badawcza	71
3.2. Rodzimy gaz złożowy Ujazd-15	76
3.3. Rodzimy gaz złożowy Porążyn-2A	80
3.4. Dytlenek węgla – CO ₂	84
3.5. Mieszaniny gazu złożowego Ujazd-15 i CO ₂	87
3.6. Mieszaniny gazu złożowego Porążyn-2A i CO ₂	91
4. Badanie procesów spęcznienia wód akifera podczas nasycania go CO₂ oraz rozpuszczalności gazów w solankach	96
4.1. Określenie współczynnika spęcznienia – <i>swelling test</i>	96
4.2. Badania rozpuszczalności rodzimych gazów ziemnych i CO ₂ w solance złożowej	110
5. Modelowanie i analiza procesu wypierania gazu ziemnego rozpuszczonego w warstwach wodonośnych skały zbiornikowej zatłaczanym CO₂	125
5.1. Badanie na fizycznym modelu złoża – bez ośrodka porowatego	125
5.2. Modelowanie procesu wypierania gazu ziemnego na fizycznym modelu ośrodka porowatego	142
5.3. Badanie procesów wypierania gazu ziemnego na symulacyjnym modelu ośrodka porowatego	157

6. Określenie efektywności procesu wypierania, oszacowanie ilości gazu ziemnego możliwego do wydobycia	175
6.1. Paproć–Cicha Góra – obszar niecki wybrany do modelowania numerycznego	175
6.2. Opis i założenia symulacji numerycznej procesu zatłaczania CO₂ z równoczesnym odbiorem wypieranego gazu ziemnego	177
6.3. Symulacje procesów sekwestracji CO₂ z równoczesnym odbiorem wypieranego gazu ziemnego	183
7. Wnioski	202
Literatura.....	208
Spis rysunków i tabel.....	215

Streszczenie

W ciągu ostatnich kilku dekad wzrosła koncentracja gazów cieplarnianych w atmosferze, co wzbudziło zaniepokojenie z powodu możliwych do wywołania zmian klimatycznych. Uważa się, że gazy cieplarniane zatrzymują ciepło emitowane z powierzchni Ziemi w dolnych warstwach atmosfery, czego skutkiem jest globalne ocieplenie. Emisja ditlenku węgla (CO₂) odpowiada za około 2/3 obserwowanego procesu globalnego ocieplenia. W ciągu ostatnich 150 lat stężenie ditlenku węgla w atmosferze wzrosło z 280 ppm do około 400 ppm. Stało się tak głównie w wyniku spalania paliw kopalnych. Efektywne korzystanie z alternatywnych źródeł energii proponuje się jako pierwsze podejście do obniżenia poziomu CO₂ w atmosferze.

W minionym dziesięcioleciu geologiczne składowanie ditlenku węgla szczegółowo badano w kontekście nowego rozwiązania umożliwiającego ograniczenie koncentracji węgla w atmosferze. Idea ta polega na wychwytywaniu CO₂ ze źródeł emisji, a następnie zatłaczaniu go do głębokich formacji geologicznych.

Istnieją różne metody składowania:

- zatłaczanie CO₂ do szcerpanych złóż ropy i gazu;
- zatłaczanie CO₂ do pokładów węgla;
- zatłaczanie CO₂ do głębokich solankowych poziomów wodonośnych.

Poziomy wodonośne mają najwyższą szacowaną pojemność sekwestracyjną. Niejednokrotnie błędnie uważa się, że solankowe poziomy wodonośne cechuje niska wartość ekonomiczna. Jednak niektóre z nich mogą być istotnym źródłem energii, gdyż zawierają rozpuszczony w wodzie metan i/lub ciepło geotermalne. Pozyskanie tej energii może pomóc zrównoważyć koszty wychwytywania i składowania ditlenku węgla (CCS).

W naszym kraju produkcja energii elektrycznej odbywa się głównie poprzez spalanie węgla – ok. 85%. W związku z tym technologie niskiej emisji CO₂ z jego przechwytywaniem

i bezpiecznym magazynowaniem są w Polsce wysoce pożądane. Głębokie solankowe poziomy wodonośne stanowią największy znany obecnie potencjał sekwestracyjny ditlenku węgla, lecz w przeciwieństwie do wglębnych struktur naftowych stopień ich geologicznego rozpoznania jest znacznie mniejszy. W istniejących poziomach solankowych nasyconych gazem ziemnym szczelność (na przestrzeni czasu geologicznego) potwierdzona jest występowaniem niewielkich złóż gazu w lokalnych kumulacjach struktury. Typując przyszłe poziomy geologiczne do podziemnego składowania CO₂ w Polsce, należy uwzględnić utwory permskie zalegające na obszarze Niżu Polskiego. Szczególną uwagę zwraca megastruktura niecki poznańskiej, wypełnionej utworami czerwonego spągowca rozciągającymi się na powierzchni ok. 5000 km². Piaskowce te stanowią rozległy poziom solankowy nasycony gazem ziemnym. W lokalnych kulminacjach struktury powstały złoża gazu ziemnego. Jak wyliczono, megastruktura niecki poznańskiej w poziomach solankowych czerwonego spągowca może zawierać zasoby rozpuszczonego gazu ziemnego w ilości 120 mld Nm³, a więc na poziomie obecnie udokumentowanych zasobów gazu ziemnego w Polsce [21].

Już w latach 70. rozważano różne metody pozyskania rozpuszczonego gazu. Jedną z ciekawszych późniejszych propozycji jest prezentowana koncepcja składowania w tych poziomach CO₂. Gaz ten cechuje dobra rozpuszczalność w wodach złożowych, znacznie większa (ok. 10-krotnie) od rozpuszczalności gazów ziemnych. W trakcie procesu sekwestracji CO₂ powinien zatem zachodzić proces wypierania rozpuszczonych w solankach rodzimych gazów ziemnych i ich migracja do wyżejleżących kulminacji, które stanowią złoża gazu ziemnego. Następowałby więc proces naturalnego uzupełnienia zasobów uwolnionym gazem ziemnym z możliwością jego późniejszego wydobycia [36].

Monografia składa się z 7 rozdziałów.

Rozdział 1 to przegląd literaturowy dotyczący badanego zagadnienia. Zaprezentowano w nim wiele koncepcji i wynalazków mających na celu umożliwienie pozyskiwania gazu ziemnego zawartego w głębokich poziomach solankowych. Są to techniki polegające głównie na wydobyciu nasyconej solanki na powierzchnię, a następnie odseparowaniu z niej rozpuszczonego gazu. Opisano również kilka projektów badawczych prowadzonych w Polsce i za granicą.

Rozdział 2 dotyczy geologii. Zawiera ogólną charakterystykę geologiczną polskiej części basenu czerwonego spągowca i struktury niecki poznańskiej – jako potencjalnego krajowego obiektu sekwestracyjnego. W rozdziale opisano proponowaną koncepcję pozyskiwania gazu ziemnego poprzez zatłaczanie CO₂ bezpośrednio do nasyconych poziomów solankowych w procesie sekwestracji CO₂.

Rozdział 3 przedstawia opis i wyniki kompleksowych badań właściwości fazowych mieszanin powstałych podczas zatłaczania CO₂ do solanek zawierających metanowy gaz

ziemny. Badania prowadzono z użyciem aparatury PVT firm Chandler i Ruska w złożowych warunkach ciśnienia i temperatury. Opisano użytą aparaturę, przedstawiono metodykę badań, w końcu zaprezentowano uzyskane rezultaty testów PVT gazów rodzimych (Ujazd-15, Porażyn-2A), ditlenku węgla i ich mieszanin pośrednich.

Rozdział 4 zawiera opis i wyniki badań dotyczących zjawiska pęcznienia solanki wskutek zatłaczania do niej CO₂ (ang. *swelling test*). Przedstawiono również rezultaty badań rozpuszczalności gazów ziemnych i CO₂ w solankach złożowych i wodzie destylowanej.

Rozdział 5 przedstawia szczegółową charakterystykę i wyniki eksperymentów prowadzonych na fizycznych modelach złoża. Doświadczenia wykonywano w złożowych warunkach ciśnienia i temperatury. Pierwszy omówiony eksperyment przeprowadzono na fizycznym modelu złoża nie uwzględniającym zjawiska porowatości. Kolejne eksperymenty pozwoliły zbliżyć się do bardziej rzeczywistych warunków, tj. były wykonywane w ośrodku porowatym. Testy udowodniły, że możliwe jest pozyskanie dodatkowych ilości gazu ziemnego poprzez wyparcie ich ze środowiska wodnego.

Rozdział 6 opisuje numeryczny geologiczny model złoża, którym posłużono się w symulacjach procesu desorpcji gazu ziemnego z głębokich poziomów wodonośnych i geologicznej sekwestracji CO₂. Przedstawiono specyfikację modelu symulacyjnego łącznie z parametrami petrofizycznymi, właściwościami płynu złożowego i ich wzajemnym oddziaływaniem. Symulacje numeryczne wykorzystujące specjalistyczne oprogramowanie (Eclipse firmy Schlumberger) były ukierunkowane na oszacowanie ilości gazu ziemnego możliwego do pozyskania podczas zatłaczania CO₂ w procesie sekwestracji. W rozdziale opisano wpływ zatłaczania CO₂ na ilość wydobytego gazu ziemnego – rozważono i przedyskutowano kilka scenariuszy prowadzenia tego procesu.

Rozdział 7 prezentuje podsumowanie uzyskanych wyników badań oraz wnioski końcowe. Przedyskutowano w nim pewne koncepcje i strategie pozyskiwania gazu ziemnego z poziomów solankowych. Przedstawiono zalecenia dotyczące przyszłych prac.

Abstract

In the past few decades, greenhouse gases concentration has increased in the atmosphere and aroused concerns about climate change. It is believed, that greenhouse gases trap the heat radiated from the Earth's surface and lower layers of the atmosphere, causing global warming, and that carbon dioxide (CO₂) accounts for about two thirds of the observed global warming.

In the past 150 years, the concentration of carbon dioxide in the atmosphere has surged from 280 ppm, to about 400 ppm. This was mainly as a result of burning fossil fuels.

Increasing the efficiency and developing alternative energies, have been introduced as approaches, to reduce the level of carbon dioxide in the atmosphere. Geological storage of carbon dioxide has been studied comprehensively in the past decade, as a new solution, to reduce the carbon content in the atmosphere. This idea consists of capturing carbon dioxide from sources of emission and injecting it into deep geological formations.

There are different methods of storage strategies:

- injecting CO₂ into depleted oil and gas reservoirs,
- injecting CO₂ in coal seams,
- injecting CO₂ into deep saline aquifers.

Among these candidates, deep saline aquifers have the highest estimated storage capacity.

On the other hand, it is erroneously believed, that deep saline aquifers have low economic value. Some aquifers contain sources of energy, such as dissolved methane or geothermal energy.

Production of this energy can help offset the cost of Carbon Capture and Storage (CCS).

Coal accounts for 85% of electric energy generation in Poland. Therefore, low carbon emitting technology with its capture and underground storage of CO₂, is required in our country. Deep saline aquifers have the largest long-term storage potential of CO₂, but there are many problems with their exploration and qualification, due to the lack of tightness confirmation. It is very important to reduce the cost of their exploration, done mainly by expensive drilling. In existing aquifers saturated by natural gases, tightness is confirmed by the presence of a lot of local gas accumulations, in their top structures. Special attention was focused on the Poznań Trough mega-aquifer, naturally saturated by native natural gases. This mega-structure represents a great potential for long-term underground CO₂ storage in Poland, covering an area of 5000 km². At present, these Rotliegend sandstones, represent a huge container of brine saturated with natural gas.

Reservoirs of natural gas have been formed in its local culminations. As calculated, the Poznan Trough structure may contain dissolved natural gas resources, estimated as nearly 120 billion Nm³, and therefore, at the current documented level of natural gas reserves in Poland [21].

Already in the 70's various ways of obtaining dissolved gas were considered. One of the most interesting later proposals, seems to be the concept of storing CO₂ in these layers. This gas has high solubility in reservoir water, much higher (ten times) than the solubility of natural gases. In the process of CO₂ sequestration, the phenomenon of displacement of native natural gas (which originally saturates the underlying water) by CO₂ injected into reservoir should occur. Such a displacement process, allows to replenish the gas cap by a volume, equivalent to methane gas dissolved in underlying water [36].

This Monograph is organized into seven chapters.

Chapter 1 contains the literature review related to this research. This chapter also describes many inventions and patents, regarding natural gas production from deep saline aquifers – conducted mainly by methane extraction from brine, in surface separation processes. It includes a description of some research and projects conducted both in Poland and abroad.

Chapter 2 focuses on geology. It contains the geological characteristics of the Polish Rotliegend Basin and Poznań Trough mega-structure – the potential national sequestration object. The chapter introduces the proposed idea of obtaining natural gas resources, by injecting CO₂ directly into the gas saturated saline aquifer, in the sequestration process.

Chapter 3 deals with the comprehensive testing and analyses of the phase transitions/behavior of the mixtures, formed during the process of CO₂ injection into saline aquifers saturated with natural gas. Studies were performed using the Chandler/Ruska PVT (Pressure-Volume-Temperature) systems at reservoir conditions.

This chapter covers the PVT apparatus description, testing methodology and finally the results of the PVT study of native reservoir gases (Ujazd-15, Porażyn-2A), carbon dioxide and its mixtures with the native methane gases.

Chapter 4 contains studies connected with the reservoir brine swelling process, during saturating it with CO₂ – this is called the Swelling Test. The chapter also deals with a solubility study of native gases and carbon dioxide in reservoir brine and distilled water.

Chapter 5 provides a detailed description and the results of advanced experiments, performed on gas reservoir physical models with underlying water. These experiments were conducted at the reservoir (pressure and temperature) conditions.

The first experiment was performed using a physical model having no porosity. Subsequent experiments allowed for the development of earlier studies, by using a more realistic model, with a porous rock matrix. These experiments have proven, that it is possible to achieve the additional natural gas volumes, by displacing it from saline aquifer.

Chapter 6 describes a numerical model used to simulate the methane gas production, from deep saline aquifers and geologic storage of CO₂. All of the specifications of the model, including petrophysical properties, fluid properties and rock-fluid properties, are explained in this chapter. Numerical simulations, performed using specialized software: Eclipse by Schlumberger company, were mainly focused on calculating the amount of gas possible to obtain during CO₂ injection in the sequestration process. It describes the effect of injecting CO₂ to methane gas recovery – various scenarios were simulated and discussed.

Chapter 7 presents the summary of the results of the studies and conclusions. It also discusses the proposed ideas and strategies of obtaining methane gas from deep saline aquifers saturated with natural gas. Finally, some recommendations for future works are presented.

Wprowadzenie

Zagadnienia związane z pozyskiwaniem gazu ziemnego zawartego w głębokich solankowych poziomach wodonośnych cechują się stosunkowo krótką historią poznawczą. Co prawda już w latach 30. XX wieku w Japonii [42] i we Włoszech [57] prowadzono przemysłowe pozyskiwanie takiego gazu poprzez separację wydobywanej nasyconej gazem solanki, jednak wykorzystywane wówczas technologie nie odpowiadały wymogom bezpieczeństwa środowiskowego i zostały prawnie zakazane.

W latach 70. ubiegłego wieku polskie środowisko naftowe zastanawiało się, dlaczego po północnej stronie wału wolsztyńskiego monokliny przedsudeckiej zasoby gazu wielu odkrytych złóż są zdecydowanie mniejsze niż w części południowej. Opisywane szeroko w literaturze przedmiotu warunki genezy gazów węglowodorowych, ich drogi migracji i główne cechy skały zbiornikowej (porowatość, przepuszczalność) były przecież odpowiednie do akumulacji dużej ilości węglowodorów w omawianym rejonie. Odpowiedź znaleziono dosyć szybko – nie było wystarczająco dużych form strukturalnych, do których gaz mógłby się swobodnie wydzielić [21]. W istniejących warunkach doszło jedynie do uformowania się małych złóż, natomiast ogromne ilości gazu pozostały zakumulowane w wodach złożowych – rozległych poziomach wodonośnych podścielających złoża gazu. Obecne złoża można zatem porównać do małych soczewek gazu znajdujących się w lokalnych kulminacjach ogromnej struktury wodonośnej nasyconej gazem ziemnym [38].

Zawarty w wodzie gaz może być częściowo odzyskany poprzez długotrwałą racjonalną eksploatację odkrytych złóż. Pewnym potwierdzeniem tego wydawać się może zaobserwowany wzrost zasobów gazu na niektórych złożach (np. Załęcze, Grodzisk) w stosunku do obliczonych pierwotnie oraz zaznaczający się bardzo mały spadek ciśnienia na innych złożach. Prawdopodobnie zjawisko to związane jest z zasileniem złóż gazami wydzielającymi się z podścielających je wód złożowych w trakcie spadającego ciśnienia złożowego.

W obecnych czasach kładziony jest coraz większy nacisk na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, w tym CO₂, do atmosfery. Autor niniejszej pracy rozpoczął badania nad procesami rozpuszczania się ditlenku węgla w wodach złożowych, a zwłaszcza w takich, w których rozpuszczone są znaczne ilości gazu węglowodorowego – w zasadzie na poziomie nasycenia w warunkach ciśnienia i temperatury złożowej.

Istotną inspiracją były dotychczasowe obserwacje procesu powrotnego zatłaczania gazów kwaśnych na złożu Borzęcin, gdzie od stycznia 1996 r., na podstawie projektu Instytutu Nafty i Gazu, rozpoczęto przedsięwzięcie składowania gazów kwaśnych, będących produktem odpadowym z instalacji oczyszczania gazu węglowodorowego.

Zbadano zjawiska korozji w urządzeniach wgłębnych i napowierzchniowych oraz wpływ zatłaczanych gazów na procesy naturalnego udrażniania strefy przyodwiertowej otworu zatłaczającego. Najciekawsze obserwacje poczyniono jednak w obszarze zjawisk migracji gazów kwaśnych, w strefie wody podścielającej złożo gazu, a szczególnie – procesu wypierania gazu rodzimego nasycającego poziom solankowy przez zatłaczany gaz kwaśny [34, 32].

Badania fazowe wykonane na aparaturze PVT pozwoliły wysunąć tezę, wstępnie przedstawioną w publikacji [36], że powinien zachodzić proces wypierania z wód złożowych rozpuszczonego w nich metanu przez zatłaczane gazy kwaśne, ze względu na znaczne różnice ich rozpuszczalności w solance. Coraz bardziej zaawansowane eksperymenty na fizycznych i symulacyjnych modelach złoża kontynuowane są w INiG – PIB, w Zakładzie Badania Złóż Ropy i Gazu, po dzień dzisiejszy [37, 72–80]. Badano m.in. procesy rozpuszczania, dyfuzji i migracji CO₂ (w stanie nadkrytycznym) w systemach wodonośnych nasyconych gazem ziemnym.

Celem badań było poznanie problematyki związanej z możliwością pozyskiwania pozabilansowych ilości gazu ziemnego zawartych w głębokich solankowych poziomach wodonośnych z wykorzystaniem procesu geologicznej sekwestracji CO₂ i wykazanie, że proces ten jest technologicznie możliwy oraz stwarza perspektywę rentowności.

Niniejsze opracowanie przedstawia wybrane wyniki badań naukowych prowadzonych przez autora od 2003 r. Znaczną część badań zrealizowano w ramach projektu pt. *Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z programem ich monitorowania*, wykonanego na zamówienie Ministra Środowiska za środki finansowe wypłacone przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Prace badawcze realizowało konsorcjum, którego liderem był Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, a w którego skład wchodził m.in. Instytut Nafty i Gazu. Część prezentowanych prac zrealizowano w ramach działalności statutowej finansowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

1. Studium dotychczas przeprowadzonych badań w zakresie sekwestracji CO₂ w głębokich solankowych poziomach wodonośnych nasyconych gazem ziemnym

1.1. Rodzaje solankowych poziomów wodonośnych nasyconych gazem ziemnym

Jako głębokie solankowe poziomy wodonośne nasycone gazem ziemnym należy rozumieć złoża wód podziemnych, w których – na ogół – przy ciśnieniu wyższym od ciśnienia hydrostatycznego solanka i gaz ziemny pozostają w równowadze. Dzięki odwiertowi udostępniającemu taką strukturę wodonośną solanka może wypływać na powierzchnię ziemi samoczynnie, niekiedy pod ciśnieniem sięgającym kilkudziesięciu bar (studnia artezyjska).

Wyróżnia się dwa rodzaje poziomów wodonośnych:

1. Pierwszy to struktury zawadnione, w których panuje ciśnienie hydrostatyczne (ang. *hydropressured aquifers*). Są to porowate, przepuszczalne poziomy wodonośne posiadające łączność z warunkami atmosferycznymi, w których ciśnienie płynu wypełniającego ośrodek porowaty wynika jedynie z ciężaru słupa wody mierzonego od danej głębokości zalegania do warunków powierzchniowych. W warstwach tych gradient ciśnienia wraz

z głębokością determinowany jest głównie mineralizacją wód złożowych i zawiera się przeważnie w zakresie 700÷1200 kg/m² na 1 metr głębokości.

2. Drugi rodzaj poziomów wodonośnych to struktury o tzw. anomalnym ciśnieniu złożowym (ang. *geopressed* lub *overpressured aquifers*). Nie posiadają one łączności hydrodynamicznej z atmosferą. Struktury te często są poroździelane uskokami, a ciśnienie płynów wypełniających pory skalne uwarunkowane jest (częściowym lub całkowitym) ciężarem warstw nadkładu. W warstwach tych gradient ciśnienia w funkcji głębokości zazwyczaj wynosi 1200÷2400 kg/m² na 1 m głębokości. Takie struktury zawadnione, spotykane na całym świecie (np. wzdłuż południowego wybrzeża USA nad Zatoką Meksykańską), powstały wskutek szybkiego pograżenia skał osadowych.

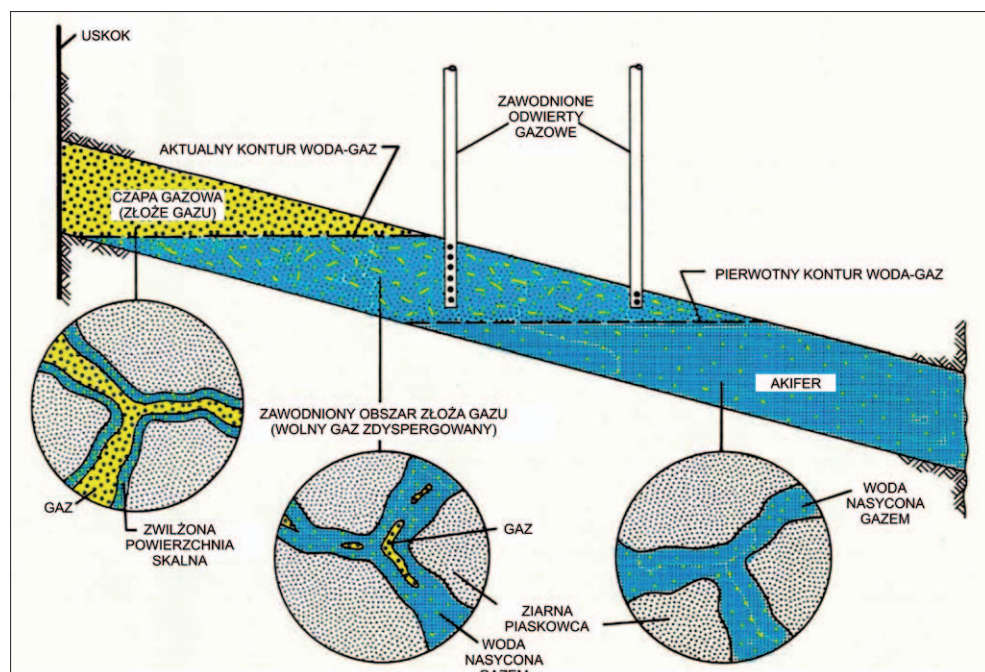
W skorupie ziemskiej gaz może być nagromadzony w różnych formach:

- gaz zaabsorbowany, tj. rozpuszczony w wodzie lub zaadsorbowany na powierzchni minerałów, a głównie substancji organicznej;
- gaz zdyspergowany (rozproszony w środowisku wodnym wypełniającym porowatą przestrzeń skały), mający zerową przepuszczalność fazową i niemający ciągłości fazowej – banieczki gazu otoczone wodą;
- gaz w stanie wolnym, wypełniający przestrzeń porowatą i mający ciągłość fazową oraz zdolność przepływu w skale złożowej – taka forma nagromadzenia to obecne konwencjonalne zasoby gazu ziemnego;
- gaz ziemny uwięziony/zaciśnięty (ang. *tight gas*), zamknięty w izolowanych porach piaskowców lub rzadziej w porach utworów węglanowych, charakteryzujących się bardzo niskimi wartościami parametru przepuszczalności, przy najczęściej niskich wartościach porowatości [45];
- gaz formacji łupkowych (ang. *shale gas*) – zawarty w czarnych łupkach bogatych w materię organiczną. Są to skały drobnoziarniste, ilasto-mułowcowe, które osadziły się na dnie mórz [55]. Wspólną cechą *shale gas* i *tight gas*, a równocześnie różniącą je od konwencjonalnych akumulacji gazu ziemnego jest brak samoistnego przyływu gazu do odwiertu w ilościach, w których eksploatacja metodami tradycyjnymi byłaby ekonomicznie opłacalna.

Głównym składnikiem gazów rozpuszczonych w poziomach wodonośnych jest metan, stanowiący zazwyczaj 95÷98% [18]. Mechanizmy, według których metan rozpuszczony w wodzie pozostaje w roztworze, wydziela się z roztworu i migruje ku górze jako koloidalnej wielkości banieczki gazu, zostały szczegółowo opisane w literaturze [40]. MacElvain stwierdza, że metan rozpuszcza się w wodzie w postaci indywidualnych cząsteczek CH₄ nieoddziałujących wzajemnie na siebie. W środowisku wodnym metan jest stabilnym gazem inertnym, którego zachowanie podlega prawom gazu idealnego. Najważniejsze, aby zrozumieć, że metan może być obecny w fazie wodnej w dwóch stanach – w roztworze i w zawieszynie. W roztworze CH₄ występuje jako oddzielne pojedyncze cząsteczki o prawie identycznej masie cząsteczkowej jak woda. Masa cząsteczkowa metanu wynosi 16, podczas gdy masa cząsteczkowa wody – 18. W związku z powyższym cząsteczki metanu rozpuszczone w wodzie nie będą opadać ani wznosić się w roztworze, a jedynie – poruszać się w losowo wybranych kierunkach, determinowanych jedynie przez gradient koncentracji. Molekuły metanu nie mają żadnego powinowactwa względem siebie, a banieczek metanu nie należy traktować jako zbioru milionów gazowych cząsteczek „współpracujących” ze sobą, a jedynie jako środowisko kierowane siłami kohezji wody otaczającej gaz. MacElvain definiuje środowisko przesycone – w którym znajduje się więcej cząsteczek metanu, niż woda może utrzymać w sposób zabezpieczający właściwą odległość między nimi, by zachowały swoją indywidualność – jako pojedyncze cząsteczki. Rezultatem stanu przesylenia jest zjawisko losowego zderzania się molekuł metanu, pozbawiania ich powłoki/filmu wodnego (uprzednio obecnego na powierzchni cząstek CH₄) i w efekcie – powstawania nadzwyczaj małych pęcherzyków gazu. Olbrzymia liczba takich mikroskopijnych banieczek gazu tworzy się natychmiast po obniżeniu ciśnienia w formacjach wodonośnych nasyconych gazem ziemnym. Z uwagi na ultramałe rozmiary i w wyniku niekończących się kolizji z cząsteczkami wody pęcherzyki gazu pozostają w nieustannym ruchu w przypadkowych kierunkach. Banieczki nie są kuliste, zawierają kilkadziesiąt lub kilkaset cząsteczek metanu, a ich kształt ulega ciągłym zmianom. Ponadto nieustannie odbijane są od wszystkiego, czego dotkną. W ten sposób pęcherzyki gazu o koloidalnej wielkości mogą być łatwo przesuwane w górę przez otaczające je wody, z szybkością do kilku milimetrów na sekundę, niezależnie od osadowych cząstek stałych (materiału skalnego), które mogą zakłócać ich zygzakowaty ruch Browna w górę struktury wodonośnej. Takie niezwykle małe pęcherzyki gazu mogą szybko wznieść się setki metrów w sposób niedostępny dla większych banieczek gazu lub pojedynczych molekuł. Migracja koloidalnych pęcherzyków gazu do wyżejległych obszarów, wynikająca z różnic gęstości gazu i otaczających go wód, jest wzmocniana przez ciągle zmieniający się ich kształt. Przemieszczanie odbywa się ruchem robaczko-

wym, z wykorzystaniem dostępnych szczelin w ośrodku porowatym. Małe bąbelki gazu ostatecznie akumulują się w przystropowej części warstwy wodonośnej, a zwiększając swoją objętość, nieustannie wypierają z porów fazę wodną, aż do osiągnięcia krytycznej objętości nasycenia gazem, przy której możliwy jest ewentualny jego przepływ, np. do odwiertu wydobywczego.

Konwencjonalne metody eksploatacji złóż węglowodorów, odwiertami ropnymi i gazowymi, stosowane są przy ograniczeniu wydatku wydobycia, w celu zapobieżenia zbyt dużemu spadkowi ciśnienia wokół strefy przyodwiertowej. Postępowanie takie ogranicza możliwość powstawania stożków wodnych, a do odwiertu nie napływa woda, tj. płyn niepożądany. Mając powyższe na uwadze, konwencjonalne odwierty zakańcza się powyżej strefy kontaktu ropa–woda czy gaz–woda, udostępniając wyłącznie płyny węglowodorowe. W przypadku wtargnięcia do strefy przyodwiertowej konwencjonalnego odwiertu gazowego wody wraz z gazem, zaczyna on wydobywać znaczne ilości wody, co może doprowadzić do zamknięcia, a następnie likwidacji takiego otworu (rys. 1.1).



Rys. 1.1. Formy występowania gazu ziemnego związane z obecnością konwencjonalnego złoża gazu

Na skalę przemysłową wydobycie gazu rozpuszczonego w wodzie prowadzone było dotychczas w trzech krajach, tj. Japonii, Włoszech i Nepalu [16]. Pewne próby i badania efektywności pozyskiwania takiego gazu podejmowano również w USA.

W Japonii przemysłowe wydobycie gazu ziemnego rozpuszczonego w solankowych poziomach wodonośnych rozpoczęto – odwiertami sięgającymi 400 m głębokości – w rejonie Zatoki Tokijskiej w 1931 r. Następnie gaz rozpuszczony w poziomach wodonośnych wydobywano jeszcze w wielu innych lokalizacjach rozprzestrzenionych na obszarze całej Japonii [41, 42]. W 1963 r. wydobycie wynosiło $1,69 \times 10^9$ Nm³. Pozyskiwany płyn węglowodorowy to gaz suchy (według klasyfikacji McCaina [39]), w żaden sposób niezwiązany z akumulacjami ropy naftowej i stanowiący odrębne zasoby. Jakkolwiek w przypadku niektórych odwiertów ww. gaz pochodził z głębokości ponad 2000 m, to w większości wydobycie odbywało się z płytszych struktur, tj. do 1000 m. Wydajność pojedynczych odwiertów wynosiła ok. 6000 Nm³/dobę, przy wykładniku gaz/woda utrzymującym się na poziomie 1,96 Nm³/m³. Czas eksploatacji odwiertów wydobywczych, których średnice nie przekraczały 5 cali, wynosił od 5 do 10 lat. Główne usterki/awarie występowały na skutek korozji rur. Cały wydobywany gaz konsumowany był przez japoński przemysł chemiczny.

We Włoszech komercyjne wykorzystanie gazu rozpuszczonego w poziomach wodonośnych rozpoczęło się w delcie Padu, na południe od Wenecji, w 1939 r. [57]. Z uwagi na ówczesnie obowiązujące prawo wydobycie prowadzono odwiertami dochodzącymi nie głębiej niż do 500 m. W rejonie Polesine gaz pozyskiwano na obszarze rozciągającym się na blisko 2000 km². W 1951 r., z użyciem 1400 odwiertów, wydobyto 753 mln Nm³ gazu, co stanowiło 34% całkowitego rocznego wydobycia gazu ziemnego w całych Włoszech. W latach 1943–1949 na opisywanym obszarze pozyskano więcej gazu ziemnego niż na jakimkolwiek innym złożu w Italii. Przez pierwszych kilka lat wypływ płynów z odwiertów dokonywał się samoczynnie, później należało zastosować pompowanie. Zarówno w Japonii, jak i we Włoszech odgazowana solanka odprowadzana była kanałem lub rzeką do morza. W obu krajach wystąpiło zanieczyszczenie gruntów rolnych spowodowane nieszczelnością kanałów, a nawet przypadki zapadania się ziemi na skutek wydobycia na powierzchnię ogromnych ilości słonych wód wgłębnych. Powyższe problemy spowodowały, że wprowadzono ograniczenia w stosowaniu takiej metody pozyskiwania gazu ziemnego w obu krajach. Słabe wyposażenie, błędna technologia oraz nie do końca przemyślane działania doprowadziły niejednokrotnie do poważnych problemów i mocno zredukowały zyski generowane z tego rodzaju działalności.

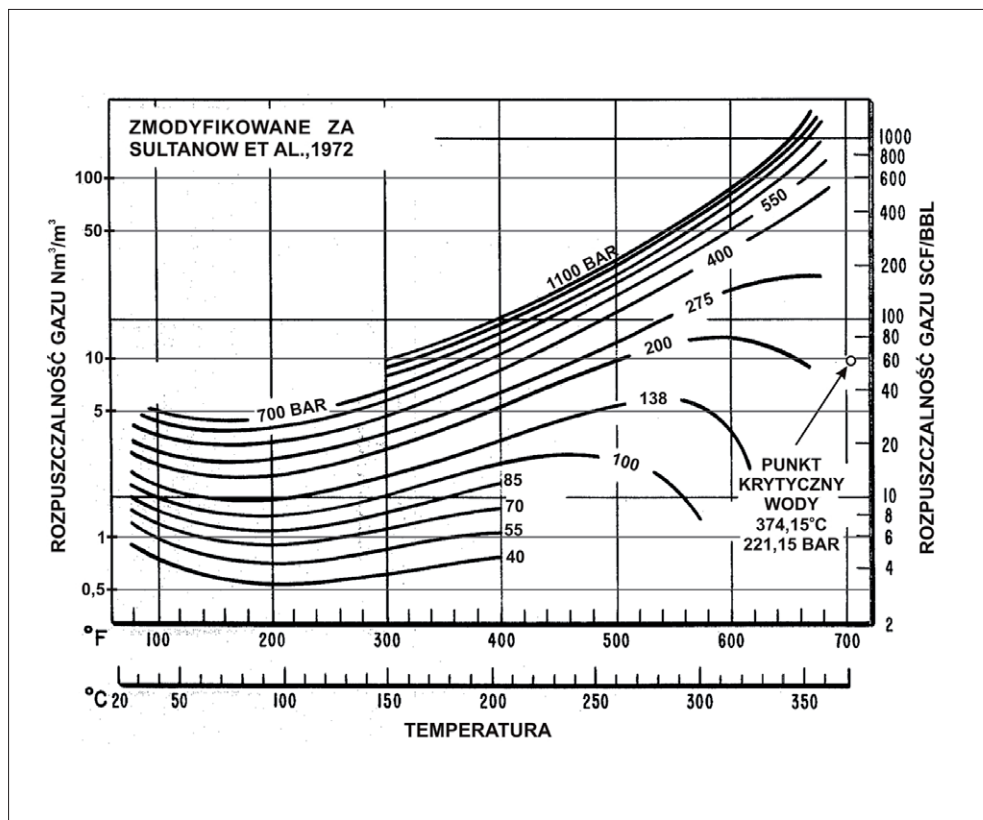
W latach 40. ubiegłego wieku badania dotyczące określenia zawartości gazu ziemnego w wodach wgłębnych wykonała amerykańska firma Humble Oil and Refining Company

– obecnie Exxon [2]. Próbki wody pobrano z użyciem specjalnie zaprojektowanych próbników wgłębnych, a następnie szczegółowo przebadano je w laboratorium. Materiał do analizy pochodził z 300 odwiertów zlokalizowanych na rozległym obszarze – od Nowego Meksyku do Florydy, lecz ze specjalnym naciskiem na rejon wschodniego Teksasu, Luizjany i południowego Missisipi. Podstawową kwestią, którą postawiono sobie za cel badań, było jednoznaczne rozstrzygnięcie, czy wgłębne poziomy wodonośne omawianego regionu rzeczywiście nasycone są gazem węglowodorowym. Jeśli tak, to kolejnym etapem miało być określenie zasięgu ich występowania oraz ewentualnego powiązania z obecnością na tym obszarze lokalnych kumulacji ropy i gazu w tej samej formacji oraz warstwach bezpośrednio sąsiadujących – zarówno głębszych, jak i płytszych. Rezultaty badań wykazały, że na głębokościach poniżej kilkuset metrów solankowe poziomy wodonośne zawierają mieralne ilości rozpuszczonego gazu ziemnego (głównie metanu), którego zawartość rośnie ze wzrostem głębokości. Stwierdzono ponadto, że w formacjach starszych niż oligocen, w przebadanym obszarze i zakresie głębokości, nasycenie wód gazem ziemnym utrzymuje się na poziomie kilku procent objętości porowej, a w regionie Frio (obszar geologiczny w USA – oligocen) próbki wody były nasycone (lub niemal całkowicie nasycone) gazem ziemnym. Dotyczyło to próbek wody pochodzących z prawie wszystkich wykorzystanych do badań otworów. Wykazano, że całkowita ilość gazu węglowodorowego rozpuszczonego w wodzie nasycającej struktury wgłębne ww. obszaru prawdopodobnie przekracza dotychczas udokumentowane zasoby gazu zakumulowanego w konwencjonalnych złożach tego obszaru [18].

Dane dotyczące eksploatacji odwiertów służących jako źródło wody przeznaczonej do nawadniania złóż ropy, zlokalizowanych na zewnętrznych połaciach szelfu kontynentalnego Zatoki Meksykańskiej, potwierdzają wysokie nasycenie tych wód metanem. Dla przykładu, z odwiertów, których operatorem była Shell Oil Company, wydobywano wodę zawierającą rozpuszczony gaz ziemny w ilości 2,5÷2,8 Nm³ na 1 m³ solanki. Podczas tysięcy testów DST (ang. *drill stem test*) oraz niezliczonych poborów płynów złożowych próbnikami wgłębnymi, prowadzonych m.in. przez firmę Schlumberger, potwierdzono obecność gazu ziemnego, głównie metanu, w wodach złożowych (w warunkach maksymalnego lub prawie maksymalnego nasycenia) na obszarze całego wybrzeża Luizjany i Teksasu, zarówno na lądzie, jak i morzu, na głębokościach poniżej kilkuset metrów.

Bardzo dobra rozpuszczalność metanu w wodzie w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury, jak pokazano na rysunku 1.2 [65], oraz rozliczne dowody nasycenia głębokich solankowych poziomów wodonośnych gazem ziemnym (na głębokościach 400÷6000 m) utwierdzają w przekonaniu, że gaz węglowodorowy może być szcerpywany z nasyconych wód złożowych, także w basenach sedymentacyjnych młodych geologicznie, w których

węglowodory ropopochodne znajdują się ciągle w procesie dojrzwania. Rozpuszczony metan może być wydobywany podobnie jak we wspomnianych przypadkach Japonii i Włoch – tj. razem z wodą; może być również pozyskiwany oddzielnie, z uniknięciem wydobywania na powierzchnię ogromnych objętości wody, tzn. według proponowanych koncepcji zawartych w kilku przytaczanych patentach dotyczących opisywanego zagadnienia.



Rys. 1.2. Rozpuszczalność metanu w wodzie słodkiej [65]

Badając procesy rozpuszczalności metanu w wodzie, zauważono m.in., że jednostkowy spadek ciśnienia płynu złożowego w rozpatrywanym systemie złożonym z wody nasyconej gazem ziemnym powoduje wydzielenie się z fazy wodnej o wiele większej ilości gazu przy ciśnieniach rzędu 300÷800 bar i temperaturze powyżej 150°C niż przy niższym ciśnieniu

i temperaturze. Dla przykładu: w temperaturze 200°C objętość gazu wydzielonego z wody przypadająca na jednostkę ciśnienia (dot. spadku) jest dwa razy większa niż w temperaturze 150°C; w 250°C jest już większa poczwórną, natomiast w przypadku temperatury 300°C objętość wydzielonego gazu zwiększona jest co najmniej o rząd wielkości.

Oszacowano, że zasoby gazu ziemnego rozpuszczonego w piaskowcowych warstwach wodonośnych zalegających w basenie północnej Zatoki Meksykańskiej na głębokości przekraczającej 7500 m, na obszarze 400 000 km², mogą dochodzić do $1,5 \times 10^{15}$ Nm³ [20]. Ten sam autor pochodzenie gazu zawartego w wyżej wymienionej strukturze przypisuje naturalnemu termicznemu krakingowi ropy naftowej i niemożności ucieczki węglowodorów z warstwy o anomalnie wysokim ciśnieniu, czego następstwem było nasycenie powiązanych poziomów wodonośnych [17]. Przeprowadzone symulacje komputerowe dotyczące multifazowych przepływów płynów (tj. gazu ziemnego, gazu rozpuszczonego w wodzie i wody) wykazały, że odwierty „wodne” udostępniające nasycone poziomy zawadnione posiadają zdolność do wydobywania tak dużej ilości gazu ziemnego na dobę jak gazowe odwierty konwencjonalne [15]. Studia dotyczące kosztów pozyskiwania rozpuszczonego gazu ziemnego ujawniły ich dużą czułość na poszczególne parametry złożowe – są generalnie trudne do oszacowania [56].

1.2. Możliwości pozyskiwania gazu z solankowych poziomów wodonośnych

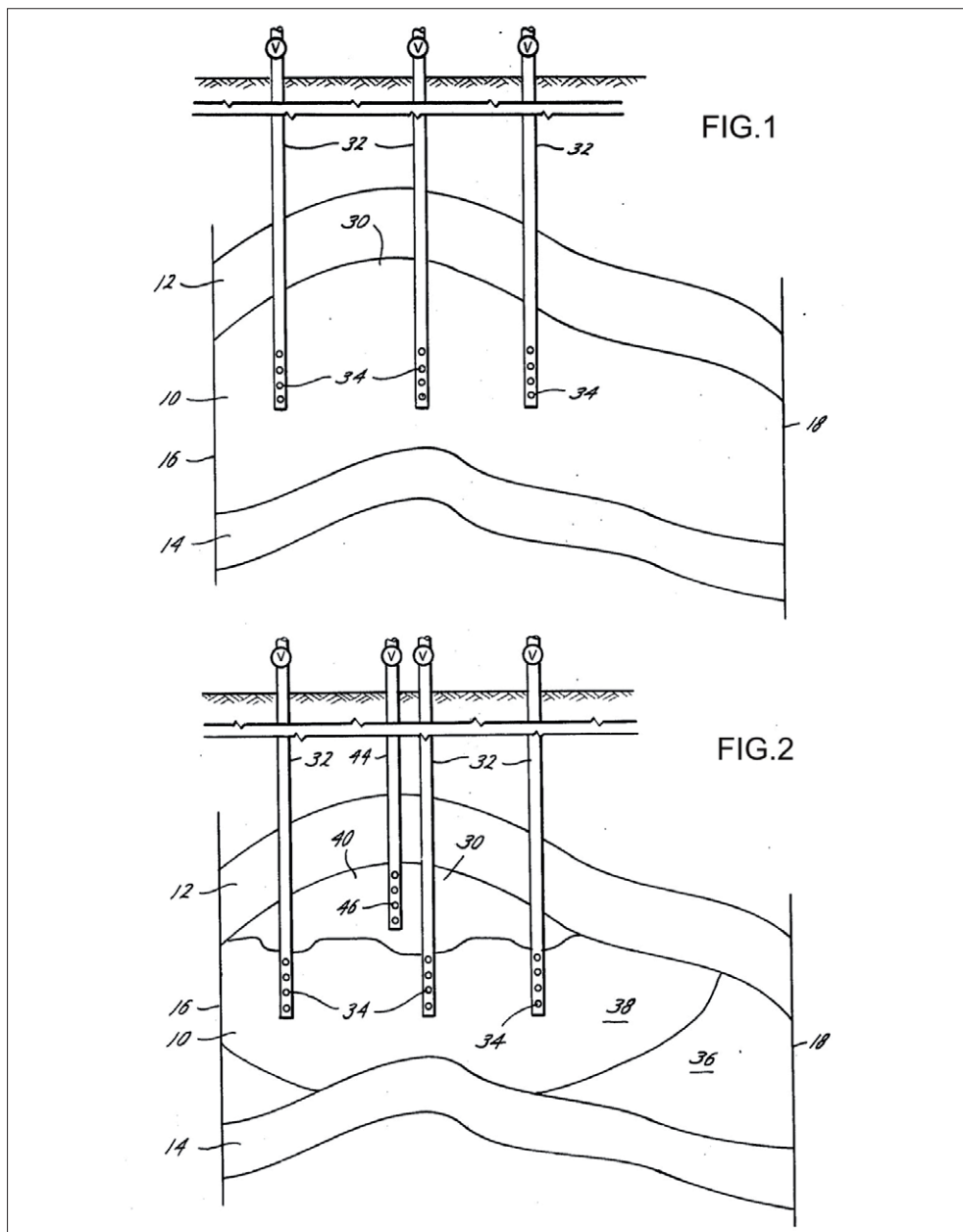
Dokonano przeglądu literatury światowej, patentów, artykułów i zasobów internetu poświęconych tematowi badań i/lub projektów dotyczących możliwości pozyskiwania pozabilansowych zasobów gazu ziemnego z nasyconych poziomów solankowych. Poniżej przedstawiono kilka wybranych przykładów, wydaje się – najbardziej zbliżonych do problematyki poruszanej w niniejszej pracy.

Patent o nazwie *Method for increasing the recovery of natural gas from a geo-pressured aquifer* [4] dotyczy metody odzysku gazu ziemnego rozpuszczonego w głębokich poziomach solankowych. Pierwotnie jego zastosowanie ukierunkowane było na odwierty, którymi dowieziono struktury wodonośne, a następnie wydobywano nimi wodę nasyconą gazem. Chodziło głównie o zwiększenie skuteczności wydobycia rozpuszczonego w eksploatowanych wodach gazu ziemnego, który towarzyszył solance. Metoda polega na obniżeniu ciśnienia panującego w formacji wodonośnej (tzw. akiferze) w wystarczającym stopniu,

by z wody zaczął wydzielać się rozpuszczony w niej gaz ziemny. Na skutek powstałego gradientu ciśnienia uwolniony gaz migruje bardziej swobodnie niż woda w kierunku odwiertu wydobywczego i może być pozyskiwany/wydobywany [4]. Nie zawsze gaz uwalniany z wody wyżej wymienionym sposobem będzie przemieszczał się w kierunku odwiertu wydobywczego. Może również migrować „najłatwiejszą” drogą w górę formacji wodonośnej i gromadzić się w postaci strefy wolnego gazu, jako czapa gazowa, w pułapkach – lokalnych kulminacjach struktury wodonośnej, uszczelnionej w stropie nieprzepuszczalnymi warstwami nadkładu.

W rozległych warstwach wodonośnych nasyconych gazem ziemnym mogą znajdować się również strefy wolnego gazu w postaci banieczek zdyspergowanych w fazie wodnej. W takim przypadku wydobycie wody złożowej, jednym lub kilkoma odwiertami udostępniającymi ww. strefę „rozproszonemu wolnemu gazu”, poprzez redukcję ciśnienia w systemie złożowym spowoduje zwiększanie objętości i stopniowe łączenie się rozproszonych banieczek gazu. W konsekwencji opisanego procesu po przekroczeniu krytycznego nasycenia porów skały gazem staje się on mobilny i może przepływać do odwiertu(-ów) eksploatacyjnego(-ych) (i zostać wydobyty) lub migrować do wyżejleżących poziomów, gdzie, napotykając pułapkę, może uformować lub powiększyć istniejącą strefę wolnego gazu – czapę gazową, która po dowieńczeniu może być eksploatowana. Wydobycie gazu ziemnego uwolnionego z warstw wodonośnych i nagromadzonego w czapie powoduje dalszą redukcję ciśnienia w opisywanym systemie złożowym, co w wielu przypadkach skutkuje stopniowym uwalnianiem/wydzielaniem z rozległych warstw wodonośnych kolejnych dodatkowych ilości gazu ziemnego, który – migrując do stref pułapek – konsekwentnie zwiększa istniejące zasoby gazu. W momencie, gdy woda przestanie wypływać z odwiertu pod własnym ciśnieniem, autorzy wynalazku proponują kontynuowanie wydobywania wody i gazu ziemnego z użyciem dodatkowego gazu wprowadzanego do otworu. Miałby on na celu unoszenie wód złożowych (tzw. gazodźwig), a tym samym – dalsze obniżanie ciśnienia w warstwach wodonośnych i wydzielanie kolejnych objętości gazu ziemnego. Na rysunku 1.3 przedstawiono oryginalną grafikę zawartą w opisie wynalazku. Poziom wodonośny 10 nasycony gazem ziemnym ograniczony jest warstwą nieprzepuszczalną w spągu 14 i w stropie 12. Oba brzozy formacji solankowej stanowią uskoki 16 i 18. Struktura wodonośna posiada w swej najwyższej wyniesionej części pułapkę 30. Wydobycie wody złożowej odbywa się odwiertami 32, które wytwarzają depresję ciśnienia na znacznym obszarze struktury. Wielkość sčerpania wody powinna zapewnić wydzielanie się części gazu z solanki.

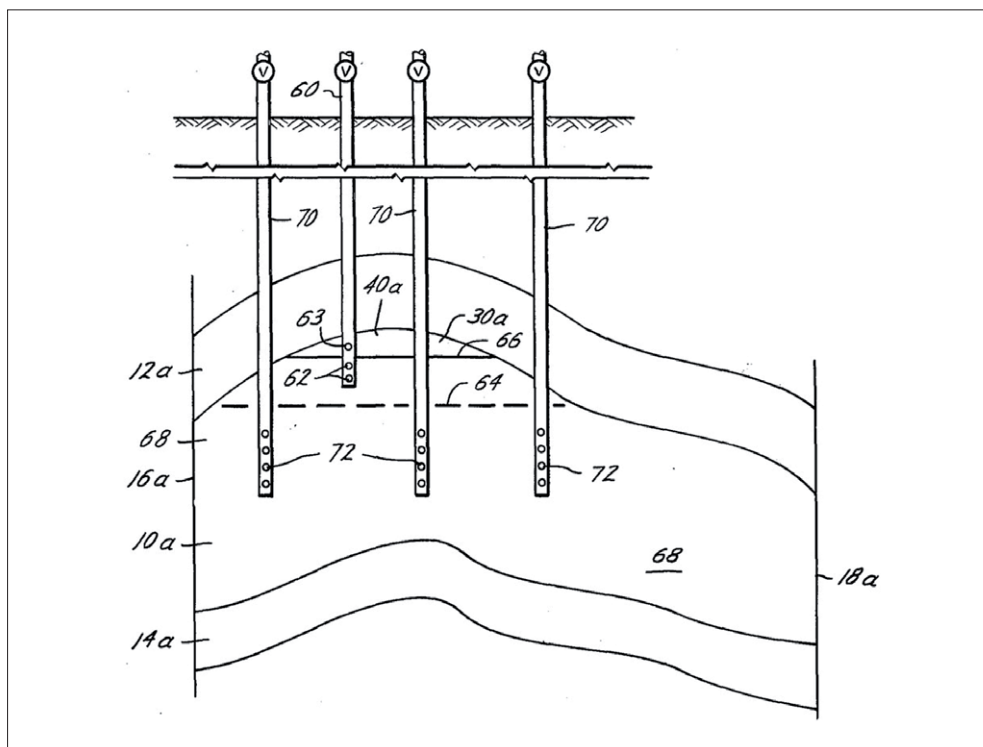
Dolna część oryginalnej grafiki wynalazku (oznaczona fig. 2 na rys. 1.3) przedstawia przekrój poprzeczny opisywanej struktury wodonośnej po upływie jednego roku ciągłego wydobywania wody.



Rys. 1.3. Sposób wydobywania gazu ziemnego rozpuszczonego w wodach złożowych –
patent US4116276 [4]

Spowodowało to obniżenie ciśnienia w znaczącej części struktury zawodnionej. Charakterystyka opisywanego systemu złożowego uległa zasadniczej zmianie. Przestrzeń struktury wodonośnej obejmuje strefę gazu całkowicie rozpuszczonego w wodzie 36, obszar wolnego gazu (w postaci bąbelczek) rozproszonego w fazie wodnej 38 oraz nowo uformowaną strefę wolnego gazu 40 w postaci czapy gazowej. Do zakumulowania wolnego gazu 40 doszło na skutek znacznej redukcji ciśnienia w części obszaru zawodnionego, wydzielenia się z wody gazu (pierwotnie całkowicie w niej rozpuszczonego) i jego stopniowej migracji w górę struktury – aż do zatrzymania w pułapce. Opisywana koncepcja obejmuje wydobycie gazu ziemnego, odwiertem 44 udostępniającym strefę wolnego gazu 46, poprzedzone intensywnym i długotrwałym wydobyciem wody.

Wynalazek może znaleźć również praktyczne zastosowanie w złożach gazu z czapą gazową (rys. 1.4) [4].



Rys. 1.4. Sposób wydobycia gazu ziemnego rozpuszczonego w wodach złożowych – patent US4116276 [4]

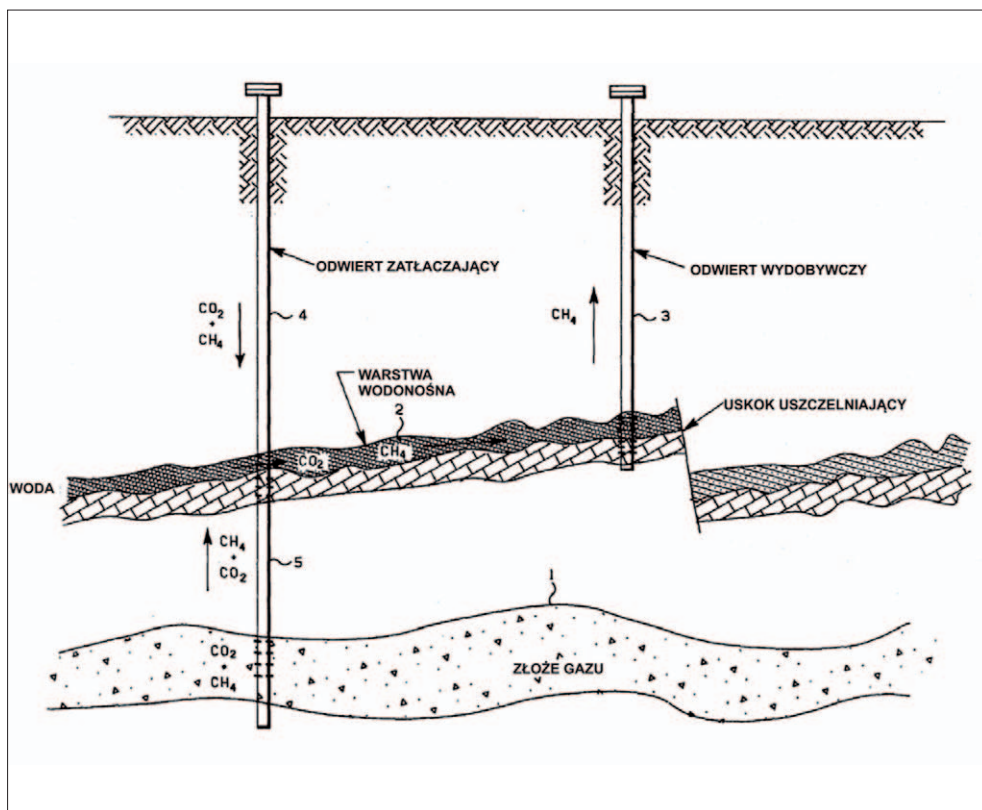
Odwiert eksploatujący gaz został zalany przez wodę pierwotnie podścielającą złożo. Poziom wodonośny 10a wciąż zawiera jeszcze niewyekspluatowaną strefę wolnego gazu 40a zakumulowaną w pułapce 30a. Zalewany odwiert 60, pracujący w sposób konwencjonalny, wydobywa nadmierne ilości wody. Po wtargnięciu wody granica rozdziału faz gaz/woda 66 podniosła się, a wydobywanie gazu ustało. W obszarze zawodnionym 68, zalegającym pod strefą wolnego gazu 40a, nadal zawierać się będzie mieszanina gazu zdyspergowanego oraz całkowicie rozpuszczonego w fazie wodnej. Zgodnie z proponowaną koncepcją należy rozpocząć intensywną eksploatację solanki odwiertami 70, udostępniającymi poziom wodonośny, w celu zredukowania ciśnienia w systemie złożowym do tego stopnia, aby gaz ziemny mógł wydzielić się z wody, a jego część mogła migrować (swobodniej niż woda) do odwiertów wydobywczych. Dodatkowo pewna objętość gazu, przemieszczając się ku górze, powiększy czapę gazową 40a, co w konsekwencji obniży poziom fazy wodnej, umożliwiając ponowne wydobywanie gazu odwiertem 60.

Wynalazek zatytułowany *CO₂ removal from hydrocarbon gas in water bearing underground reservoir* [5] dotyczy oczyszczania gazu węglowodorowego. Głównym celem jego stosowania jest zredukowanie zawartości CO₂ w gazie ziemnym, a dzięki temu – wystarczające podniesienie jego wartości energetycznej, do poziomu umożliwiającego użycie oczyszczonego gazu jako pełnowartościowego paliwa.

Koncentracja CO₂ w wydobywanym z różnych złóż gazie ziemnym może zmieniać się w bardzo szerokim zakresie. Mogą być to jedynie ilości śladowe, lecz w skrajnych przypadkach stężenie CO₂ może dochodzić nawet do 98%. Gaz węglowodorowy zawierający w swoim składzie ditlenek węgla może być produktem naturalnym (zakumulowanym w strukturze gazonośnej w czasie geologicznym) – może również być mieszaniną powstałą w wyniku stosowania metod wspomagania wydobywania, w trakcie którego do złoża zatłaczano znaczne ilości CO₂. Podczas gdy nieznaczne stężenia ditlenku węgla w gazie ziemnym są akceptowalne, stosunkowo duże jego koncentracje powodują obniżenie wartości energetycznej gazu węglowodorowego, uniemożliwiając użycie go jako pełnowartościowego paliwa.

Zasadę oczyszczania gazu ziemnego z CO₂ prowadzoną według omawianej koncepcji pokazano na rysunku 1.5. Złożo gazu 1, zawierające węglowodorowy gaz ziemny w mieszaninie z dużą ilością CO₂, zalega w pobliżu rozległej struktury zawodnionej 2 – takie usytuowanie złóż gazu (w bezpośrednim sąsiedztwie warstw wodonośnych) występuje dosyć często. W prezentowanym przykładzie odwiertem 4, udostępniającym złożo gazu bogatego w CO₂, przewiercono również wyżejleżącą strukturę wodonośną. Gaz ziemny odbierany jest ze złoża dolnym odcinkiem odwiertu 4, następnie, bez wydobywania na powierzchnię, wprowadzany jest bezpośrednio do warstwy wodonośnej. Podczas przepływu gazu, przez strukturę zawierającą solankę, do odwiertu wydobywczego 3 zdecydowana większość CO₂

jest absorbowana w wodzie. Zmniejszenie zawartości CO₂ w mieszaninie gazów wynika z wielokrotnie wyższej rozpuszczalności ditlenku węgla w solance w stosunku do rozpuszczalności metanu – CO₂ rozpuszcza się i nasyca wody złożowe, metan zaś w fazie gazowej migruje w stronę odwiertu wydobywczego.



Rys. 1.5. Sposób oczyszczania gazu ziemnego z CO₂ z użyciem poziomów wodonośnych – patent US4187910 [5]

Całkowite wydobycie gazu z odwiertu wydobywczego jest w przybliżeniu równe ilości gazu węglowodorowego wprowadzanego do struktury wodonośnej. Zapewnia to utrzymanie stałego ciśnienia w układzie. Okres, w jakim dana struktura wodonośna może być wykorzystywana do prowadzenia procesu oczyszczania gazu węglowodorowego z CO₂

według prezentowanej koncepcji, zależy od ilości wody w złożu, od tego, czy jest to woda stojąca/nieruchoma, czy też wpływa z sąsiednich warstw (zachodzi wymiana/mieszanie wód), oraz od wymaganej do usunięcia/zaabsorbowania ilości CO₂. Migracja, a co za tym idzie – ciągła wymiana wód, może znacznie wydłużyć użytkowanie danego obiektu.

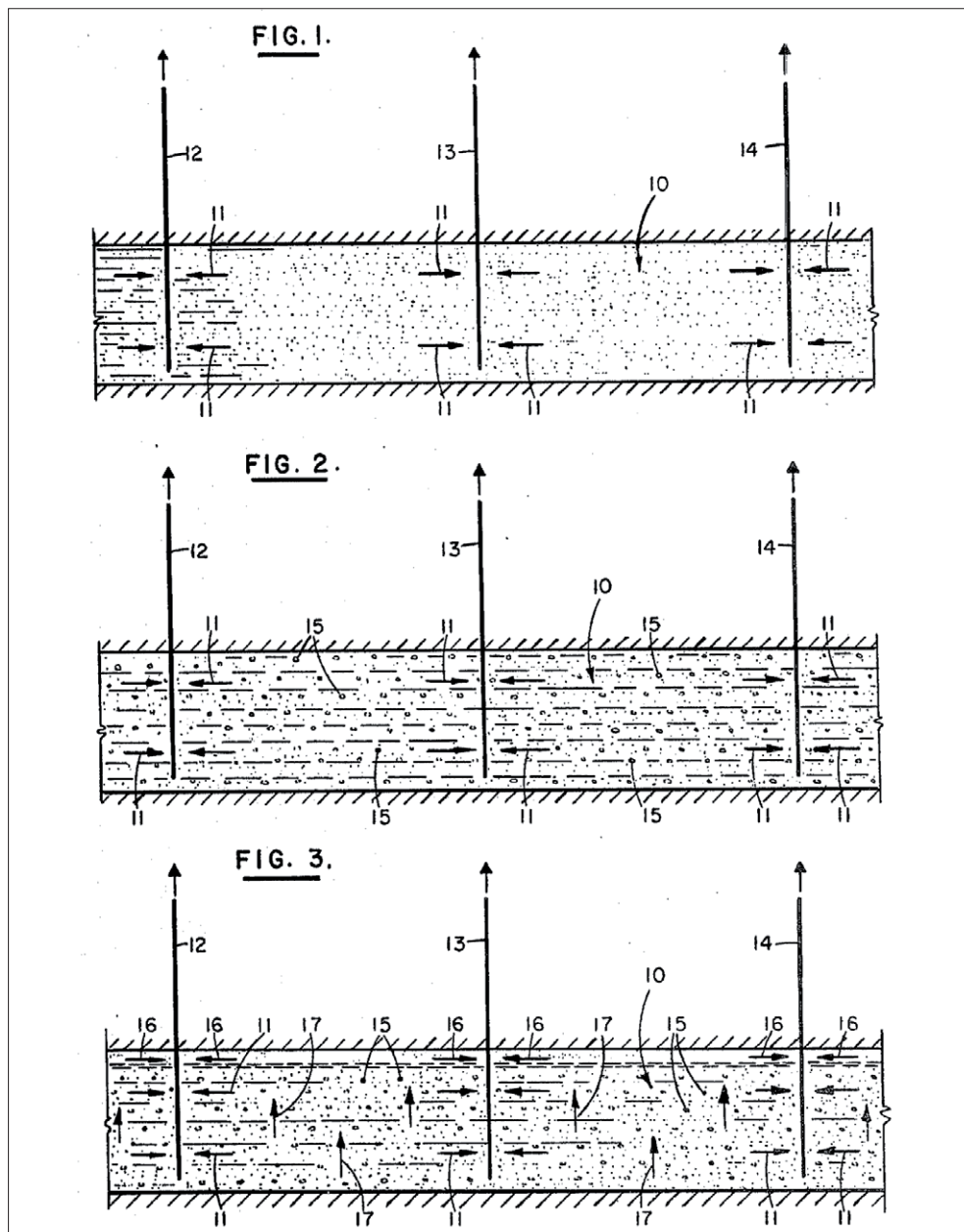
Wynalazek pt. *Method for recovering gas from solution in aquifer waters* [58] dotyczy sposobu wydobycia gazu węglowodorowego z podziemnych formacji wodonośnych – w szczególności gazu ziemnego pierwotnie rozpuszczonego w wodzie złożowej.

Wpływ ciśnienia, temperatury i zasolenia wody na rozpuszczalność gazu w solance jest doskonale znany [6], jednakże to ciśnienie najbardziej oddziałuje na ilość gazu zawartego w wodzie [58]. Jak podają autorzy wynalazku, na głębokości 4600 m, w temperaturze 178°C i przy panującym ciśnieniu ok. 90 MPa, rozległa struktura zawodniona wybrzeża Teksasu i Luizjany zawiera co najmniej 5,3 Nm³ gazu ziemnego rozpuszczonego w 1 m³ solanki. Całkowite zasoby niekonwencjonalnego gazu ww. warstw oszacowano na ok. $1,5 \times 10^{15}$ Nm³ [20].

Wody złożowe mogą zawierać mniej rozpuszczonego gazu, aniżeli wynikałoby to z warunków nasycenia. W takim układzie solanka pozostaje nienasycona. Powszechnie jednak wiadomo, że wody występujące w określonych strukturach geologicznych – w pewnych obszarach geograficznych prawie zawsze zawierają rozpuszczony gaz w ilościach blisko korespondujących z warunkami nasycenia i takie struktury są najbardziej odpowiednie do zastosowania opisywanego wynalazku.

Według prezentowanej koncepcji wydobycia gazu ziemnego rozpuszczonego w głębokich poziomach solankowych na początkowym etapie ze złoża odbierana jest wyłącznie woda. Kontynuowanie procesu po pewnym czasie powoduje obniżenie ciśnienia panującego w warstwie wodonośnej i stopniowe wydzielanie się gazu, który migruje w kierunku odwiertów i jest wydobywany na powierzchnię razem z solanką. Początkowo rozpuszczony w wodzie gaz ziemny, odbierany razem z wodą z warstwy wodonośnej, wydzielany jest z solanki na separatorze powierzchniowym. Intensywne wydobycie wody prowadzi do zwiększenia nasycenia gazem strefy wokół odwiertu wydobywczego. Po przekroczeniu nasycenia krytycznego gaz, jako oddzielna „faza gazowa”, zaczyna przemieszczać się na skutek gradientu ciśnienia do odwiertu wydobywczego. Całkowity gaz odebrany ze złoża jest sumą gazu rozpuszczonego w wodzie i gazu wydzielonego z solanki już w złożu.

Rysunek 1.6 ilustruje zastosowanie wynalazku. Zgodnie z założoną koncepcją w pierwszej kolejności ze struktury wgłębnej odbierana jest woda. Na skutek tego procesu zwolniona objętość porowa, powstała po usunięciu solanki, niwelowana jest poprzez ekspansję materiału skały zbiornikowej, ekspansję pozostałej w strukturze wody oraz wypełniającą pozostałą przestrzeń fazę gazową, wydzieloną z fazy wodnej w wyniku redukcji ciśnienia w układzie.



Rys. 1.6. Sposób wydobywania gazu ziemnego rozpuszczonego w wodach złożowych – patent US4149596 [58]

W górnej części rysunku 1.6 (oznaczonej FIG. 1) przedstawiono typową warstwę wodonośną 10 udostępnioną trzema odwiertami 12, 13 i 14. Rozpoczęcie wydobywania wody uruchamia proces przepływu wód 11 nasyconych gazem ziemnym w kierunku odwiertów.

W centralnej części rysunku (FIG. 2) zobrazowano warunki panujące w strukturze zawodnionej na etapie pośrednim. Wydobywanie wody wywołało spadek ciśnienia w warstwie wodonośnej. Gaz w postaci banieczek (15) wydziela się z fazy wodnej i gromadzi w porach skały zbiornikowej. Nasylenie fazą gazową pozostaje na niskim poziomie – niewystarczającym do osiągnięcia nasycenia krytycznego, wymaganego do zainicjowania procesu przepływu gazu.

W dolnej części rysunku (FIG. 3) zilustrowano trzeci etap procesu. Szczerpywanie wody ze struktury wodonośnej jest kontynuowane, a ciśnienie złożowe zostało znacznie zredukowane w stosunku do warunków początkowych. Po przekroczeniu nasycenia krytycznego gaz (w fazie gazowej) przepływa do odwiertów wydobywczych. Jego migracja ma miejsce głównie w przystropowej części struktury wodonośnej w postaci cienkiej warstwy 16. Ilość gazu przepływającego do odwiertów wydobywczych na bieżąco uzupełniana jest gazem oddzielnym z górnej części warstwy wodonośnej siłami grawitacji 17. W przeważającej części struktury nasycenie gazem utrzymuje się na poziomie nieznacznie przewyższającym nasycenie krytyczne. Wydobywanie gazu i wody kontynuowane jest aż do momentu, w którym ciśnienie złożowe staje się zbyt niskie, aby dalsze prowadzenie eksploatacji było ekonomicznie uzasadnione [58].

Badania laboratoryjne oraz dane pozyskane w trakcie eksploatacji wielu złóż ropy pokazują, że gaz wydzielający się z cieczy w przestrzeni porowej skały początkowo jest całkowicie zatrzymywany przez siły kapilarne – gromadząc się głównie w większych porach ośrodka zbiornikowego. Na tym etapie oddziaływanie kapilarne skały uniemożliwia jakikolwiek przepływ gazu, który mógłby potencjalnie wystąpić na skutek gradientu ciśnienia wywołanego prowadzeniem standardowej eksploatacji złoża. Gdy nasycenie gazem zaczyna wzrastać, możliwe jest osiągnięcie poziomu nasycenia krytycznego, przy którym prawdopodobnie wystąpi przepływ [58].

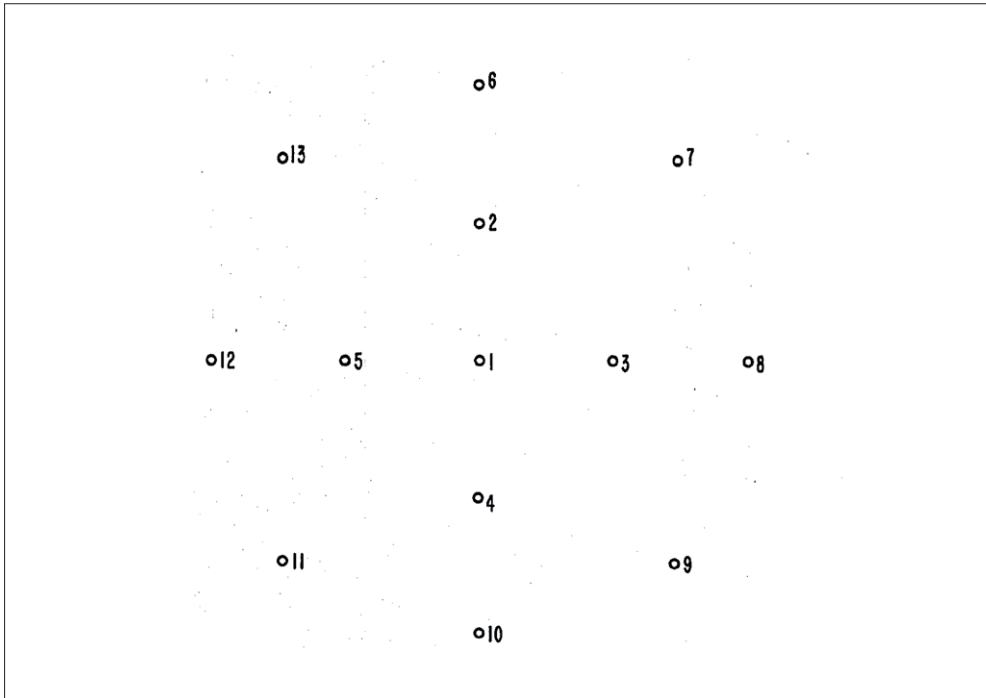
Po zainicjowaniu wydobywania wody ze struktury zawodnionej ilość wydzielonego w urządzeniach napowierzchniowych gazu przypadająca na 1 m³ solanki koresponduje z pierwotnym nasyceniem wody gazem. Po pewnym czasie wykładnik gazowo-wodny odbieranego ze złoża płynu maleje, co ma związek z zatrzymywaniem pęcherzyków wydzielanego z fazy wodnej gazu w porach skalnych przez siły kapilarne. Po przekroczeniu wartości nasycenia krytycznego zarówno faza gazowa, jak i wodna przepływają w kierunku odwiertów wydobywczych, a całkowity wykładnik gazowo-wodny będzie wynikał z objętości „wolnego” gazu oraz gazu rozpuszczonego w fazie wodnej wpływającej do odwiertu. Przepływ gazu w formacji wodonośnej jest znacznie ułatwiony dzięki jego niskiej lepkości i gęstości.

Patent pod tytułem *Method and apparatus for natural gas and thermal energy production from aquifers* [18] przedstawia metodę oraz oprzyrządowanie umożliwiające utworzenie złoża gazu ziemnego w głębokich poziomach wodonośnych zawierających znaczne ilości rozpuszczonego gazu. Razem z gazem tym samym odwiertem prowadzi się wydobycie gorącej wody, z której odzyskiwana jest energia termalna.

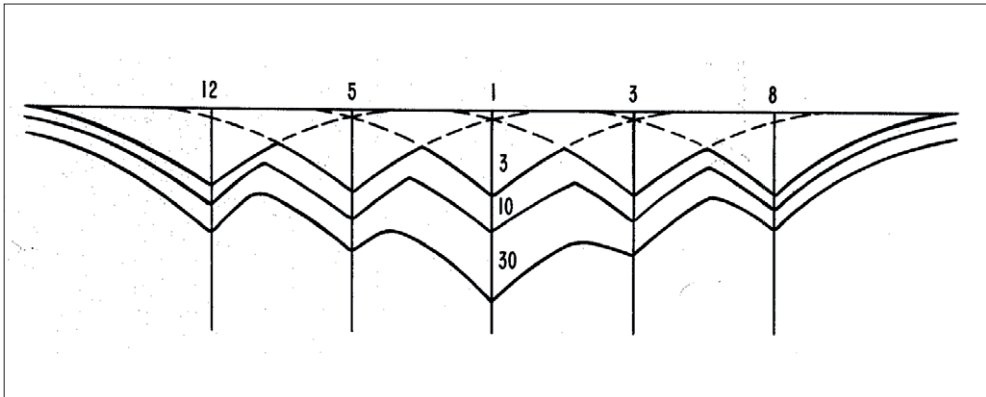
Istota wynalazku opiera się na zasadach podobnych jak poprzednio. Jakkolwiek powyższe założenia są dosyć rozpowszechnione, to według autora wynalazku [18] nie zaproponowano właściwej metody i narzędzi pozwalających w pierwszym etapie wydobywać solankę, następnie wywołać wydzielenie się i przepływ gazu, który mógłby być – jako wolna faza gazowa – wydobywany na powierzchnię.

Zastosowanie prezentowanej koncepcji umożliwia pozyskiwanie gazu ziemnego (wolnego od wody) z wydatkiem daleko wyższym niż możliwy do osiągnięcia w przypadku użycia standardowej konstrukcji odwiertu i oddzielania gazu od wody w warunkach napowierzchniowych – w separatorze. Metoda pozwala na ograniczenie do minimum strat ciepła (związanych z desorpcją i ekspansją wydzielonego gazu w wodzie) występujących podczas dopływu gazu do odwiertu i w trakcie przejścia przez turbiny i/lub wymienniki ciepła na powierzchni ziemi. Większość ciepła wymaganego do wydzielenia gazu z wody, następnie traconego podczas ekspansji gazu przepływającego do odwiertu, dostarczana jest przez ciepłotę matrycy skały zbiornikowej. Jak wspomniano wcześniej, pozbawione gazu geotermalne wody są wydobywane tym samym odwiertem i równocześnie z wydzielonym z wody gazem – umożliwia to specjalna konstrukcja odwiertu. Ponadto proces wydobycia mediów odbywa się przy zachowaniu wysokiej temperatury głowicowej – jedynie nieznacznie niższej od temperatury złożowej.

Dla zastosowania prezentowanej koncepcji wydobycia gazu ziemnego i wód geotermalnych konieczne jest, by struktura złożowa spełniała pewne wymagania. Mianowicie obszarowo rozległa warstwa wodonośna powinna posiadać miąższość co najmniej 30 metrów oraz charakteryzować się jednorodnymi własnościami kolektorowymi w całym przekroju. Rozmieszczenie i lokalizacja odwiertów (rys. 1.7) powinny być wyznaczone na podstawie dokładnych studiów nad rozpoznaniem właściwości płynów i skały zbiornikowej, jak również wyników badań pilotażowych prowadzonych z użyciem 3÷5 odwiertów o specjalnej konstrukcji. Siatka nowo powstałych odwiertów (ich ułożenie i odstęp), oparta m.in. na rezultatach pilotażowych testów hydraulicznych, powinna pozwolić na prowadzenie wydobycia umożliwiającego wytworzenie w złożu uprzednio zaprojektowanego, optymalnego dla metody, rozkładu ciśnienia (rys. 1.8) oraz pozwolić na nieprzerwane i zgodne z założonym planem wydobycie ze wszystkich otworów po rozpoczęciu procedury rozruchowej.



Rys. 1.7. Rozmieszczenie pierwszych odwiertów na złożu – patent US4359092 [18]

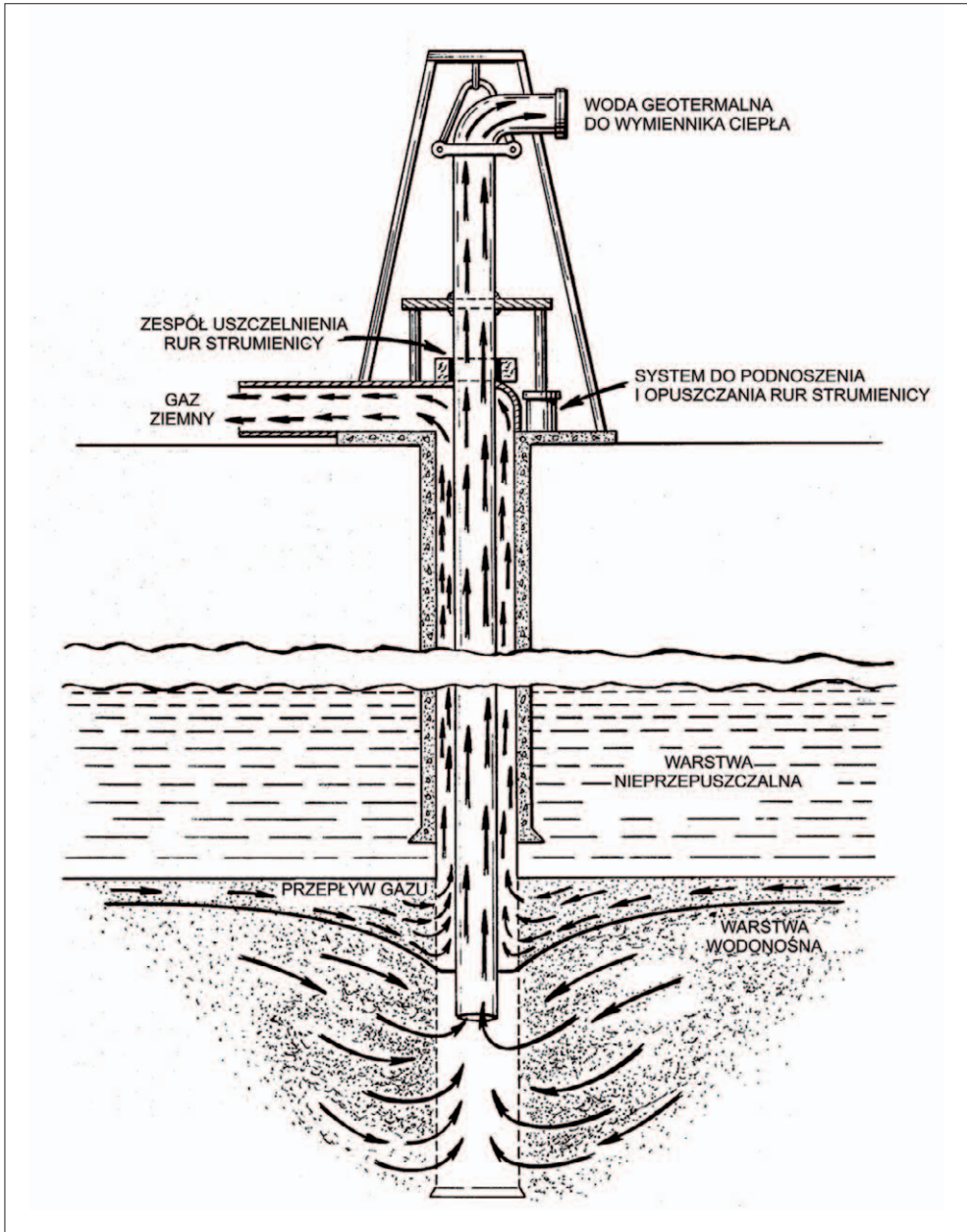


Rys. 1.8. Wyidealizowany kształt stożków depresji ciśnienia w strukturze wodonośnej po 3., 10. i 30. dniach od rozpoczęcia wydobywania – patent US4359092 [18]

Proponowana koncepcja jest łatwiejsza w zastosowaniu do struktur wód geotermalnych nasyconych gazem, charakteryzujących się anomalnie wysokim ciśnieniem, jednakże może być efektywnie stosowana również do poziomów wodonośnych o ciśnieniu hydrostatycznym. Hydrodynamicznie wywołana redukcja ciśnienia w omawianym systemie złożowym powoduje wydzielenie się z wody gazu. Po przekroczeniu krytycznego nasycenia gazem, które jest zmienne i według autora wynalazku [18] zawiera się w zakresie 6÷60% objętości porowej skały, następuje odwrócenie stosunku przepuszczalności gaz/woda. Przepływ gazu szybko dominuje rozpatrywany system złożowy, a migracja wód zostaje znacznie ograniczona lub całkowicie zatrzymana.

Wartość nasycenia krytycznego gazem zależna jest od składu mineralogicznego, budowy, konfiguracji porów i scementowania materiału matrycy skalnej – parametr ten powinien być określany na podstawie testów z użyciem rdzeni wiertniczych. Znaczenie ma również głębokość zalegania i ułożenie warstw. Na większych głębokościach krytyczne nasycenie wzrasta. Kolejnym istotnym parametrem jest temperatura złożowa, a także zasolenie wód. Szacuje się, że w celu uzyskania satysfakcjonującego nasycenia gazem należy obniżyć ciśnienie w warstwie wodonośnej o ok. 30÷50%. Dla warstw głębszych skala redukcji ciśnienia będzie proporcjonalnie mniejsza, a dla płytszych – większa. W chwili osiągnięcia wartości krytycznego nasycenia porów skały gazem następuje zamiana charakteru przepływu płynów w złożu z wodnego na gazowy. Stożki depresji ciśnienia wywołane odbiorem wody z systemu rozprzestrzeniają się wtedy w szybkim tempie, gdyż przepuszczalność osrodka zbiornikowego jest co najmniej o rząd wielkości większa dla gazu niż dla wody. Wydobycie gazu znacznie wzrasta, a z odwiertów znajdujących się w obszarze „nowo uformowanego złoża gazu” wypływa wyłącznie gaz ziemny z towarzyszącą mu parą wodną. Powyższy charakter wydobycia gazu występuje tak długo, jak długo trwa proces rozszerzania się stożka depresji ciśnienia (wokół odwiertu) wywołującego wydzielanie się gazu z fazy wodnej z wymaganym wydatkiem. Na spadek ilości pozyskiwanego gazu mają wpływ dwa główne czynniki. Pierwszym jest efekt szczypania gazu pierwotnie rozpuszczonego w solance, który zachodzi w strefie oddziaływania odwiertu (w zasięgu stożka depresji ciśnienia). Drugie ograniczenie to konsekwentnie zwiększająca się odległość (mierzona po promieniu) strefy intensywnego wydzielania się z wody gazu w stosunku do odwiertu wydobywczego. W miarę postępu procesu eksploatacji i uruchamiania kolejnych odwiertów wydobywających gaz – sztucznie wytworzone złożo gazu będzie się stopniowo zmniejszać. Pierwsze użyte odwierty, tj. inicjujące proces wydobycia gazu, według prezentowanej koncepcji, zostaną w końcu zalane wodą, która zawierać będzie tylko śladowe ilości rozpuszczonego gazu.

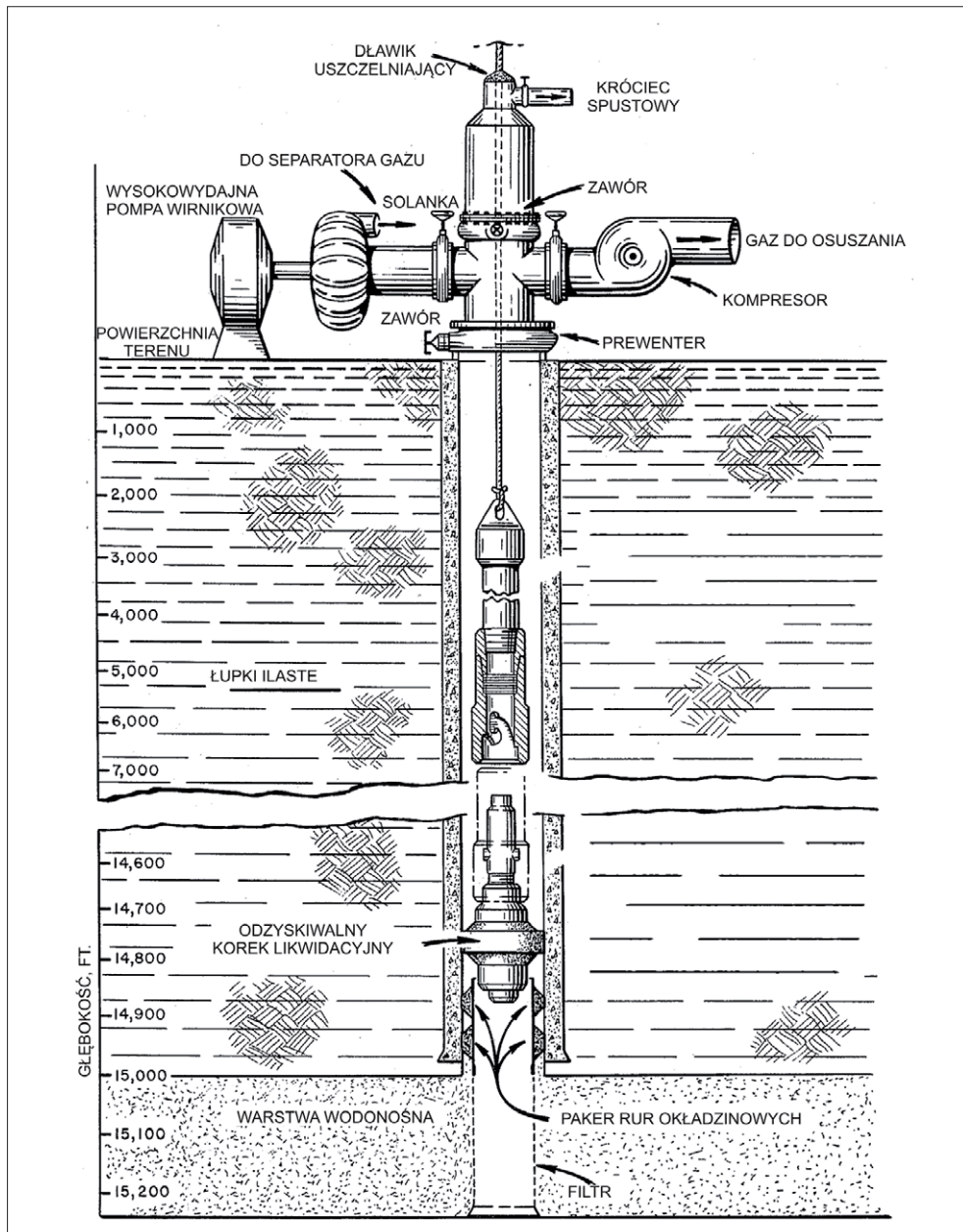
Konstrukcja odwiertu przeznaczonego do pozyskiwania gazu i wody geotermalnej z użyciem opisywanej metody różni się od budowy konwencjonalnego odwiertu ropnego czy gazowego (rys. 1.9).



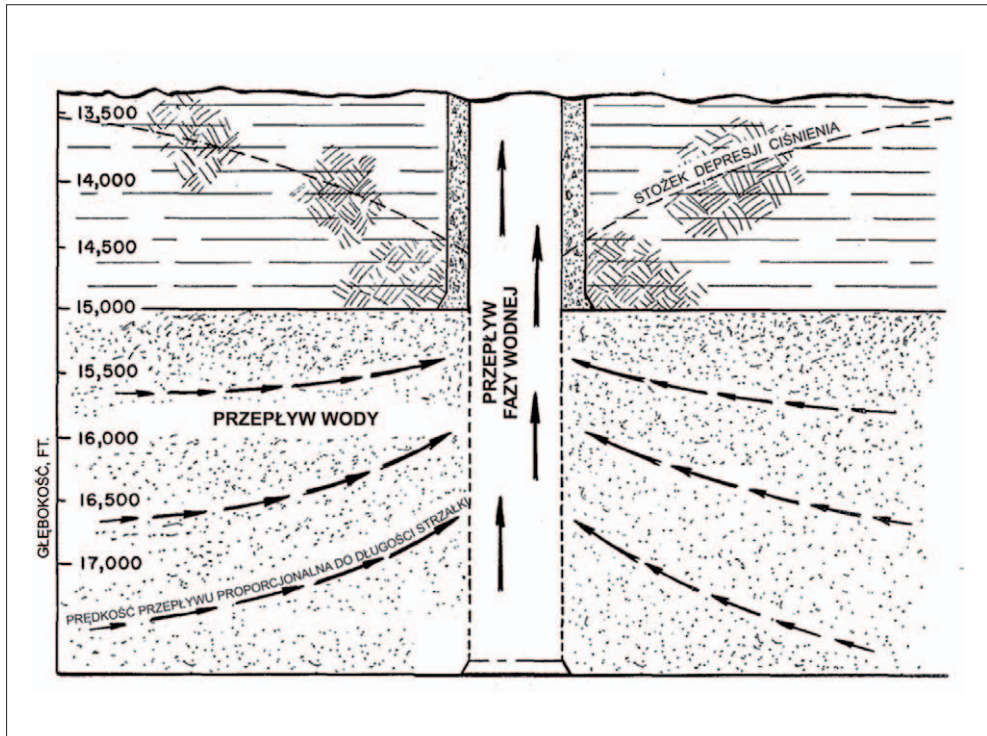
Rys. 1.9. Konstrukcja odwiertu przeznaczonego do jednoczesnego pozyskiwania gazu ziemnego i wód termalnych – patent US4359092 [18]

W odwiercie montuje się dodatkową rurę, tzw. strumienicę (ang. *eductor pipe*), która umożliwia odprowadzenie wód termalnych na powierzchnię. Po zainicjowaniu przepływu fazy gazowej do odwiertu głębokość zapuszczenia rur strumienicy jest płynnie regulowana i utrzymywana poniżej poziomu gaz-woda. Wydzielający się z wody gaz wpływa do odwiertu, a następnie przestrzeń pierścieniową odwiertu przepływa do urządzeń napowierzchniowych. W przypadku gdy wydobywaniu gazu towarzyszy proces pozyskania ciepła wód geotermalnych, rura strumienicy może być wykonana lub powleczona materiałem o wysokim parametrze izolacji termicznej. Wówczas gorąca woda przepływająca strumienicą nie jest wychładzana przez gaz transportowany na powierzchnię przestrzenią pierścieniową. Ekspansja gazu przemieszczającego się w górę odwiertu jest źródłem zapotrzebowania na ciepło. Termiczne odizolowanie obu płynów minimalizuje efekt strat energii cieplnej wody. W ciągu rur strumienicy, dla ułatwienia odbioru wody, montuje się dodatkowo pompę zanurzeniową – dotyczy to głównie poziomów wodonośnych o ciśnieniu hydrostatycznym [18].

Wynalazek pt. *Natural gas production from geopressured aquifers* [19] dotyczy sposobu pozyskiwania gazu ziemnego odwiertami udostępniającymi warstwy wodonośne nasycone metanem. Metoda obejmuje wykonanie początkowego odwiertu, w którym zastosowano skojarzone metody sterowania, dopuszczające początkowy przepływ wody przy braku przeciwcisnienia na głowicy (rys. 1.10). Wypływ wody (rys. 1.11) utrzymywany jest do czasu, w którym spadek ciśnienia w warstwie wodonośnej spowoduje wydzielenie się z wody gazu, a następnie dojdzie do wzrostu przepuszczalności dla gazu kosztem przepuszczalności fazowej dla wody. Następuje wtedy zmiana charakteru przepływu płynów w złożu; do odwiertu wydobywczego wpływa jedynie gaz ziemny i para wodna, a w poziomie solankowym tworzy się strefa nasycona gazem w postaci wtórnej czapy gazowej. Wydobywanie gazu prowadzone jest przy znacznej redukcji ciśnienia głowicowego. W przeciwnym razie następowalby proces przedwczesnego zmniejszania się strefy wolnego gazu wokół odwiertu, a w konsekwencji doszłoby do przerwania wydobywania. Kształt strefy wolnego gazu przyjmuje postać odwróconego stożka (rys. 1.12). Pozyskiwanie gazu danym odwiertem trwa do momentu, aż otaczające go wody pozbawione zostaną nasycającego je gazu. W tym czasie ciśnienie w czapie gazowej jest na tyle niskie, że postępuje proces podnoszenia się poziomu wód złożowych, zmniejszając głębokość/objętość strefy wolnego gazu. Na tym etapie należy wykonać kolejne odwierty. Muszą one być zlokalizowane centrycznie na okręgu, którego środkiem jest pierwszy/inicjujący odwiert. Obowiązuje je również identyczna procedura wydobywania, którą należy równocześnie uruchomić dla wszystkich odwiertów danego pierścienia.



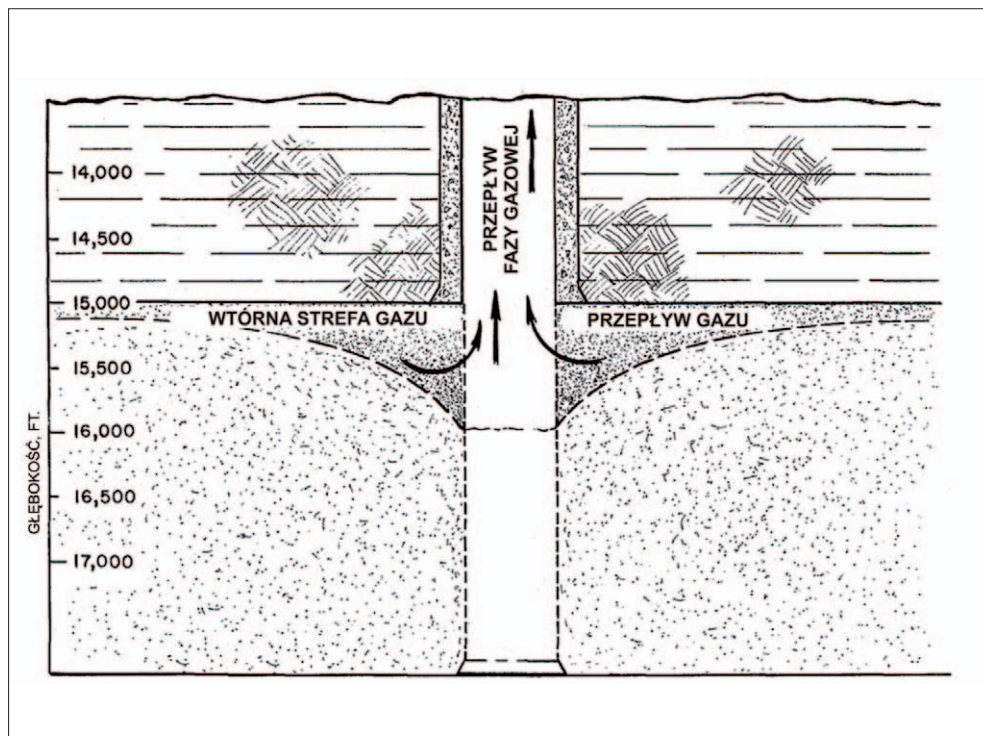
Rys. 1.10. Konstrukcja typowego odwiertu zaprojektowanego do wydobycia gazu ziemnego według prezentowanej koncepcji – patent US4279307 [19]



Rys. 1.11. Stożek spadku ciśnienia i początkowe warunki wydobywania wody – patent US4279307 [19]

Gdy praca odwiertów spowoduje wydzielenie z fazy wodnej większości rozpuszczonego gazu, wówczas wydobywanie całego systemu zaczyna spadać i konieczne jest uruchomienie kolejnego, współosiowego pierścienia odwiertów. Proces włączania kolejnych odwiertów można przyrównać do zjawiska rozchodzenia się okręgów po wrzuceniu kamienia do stawu.

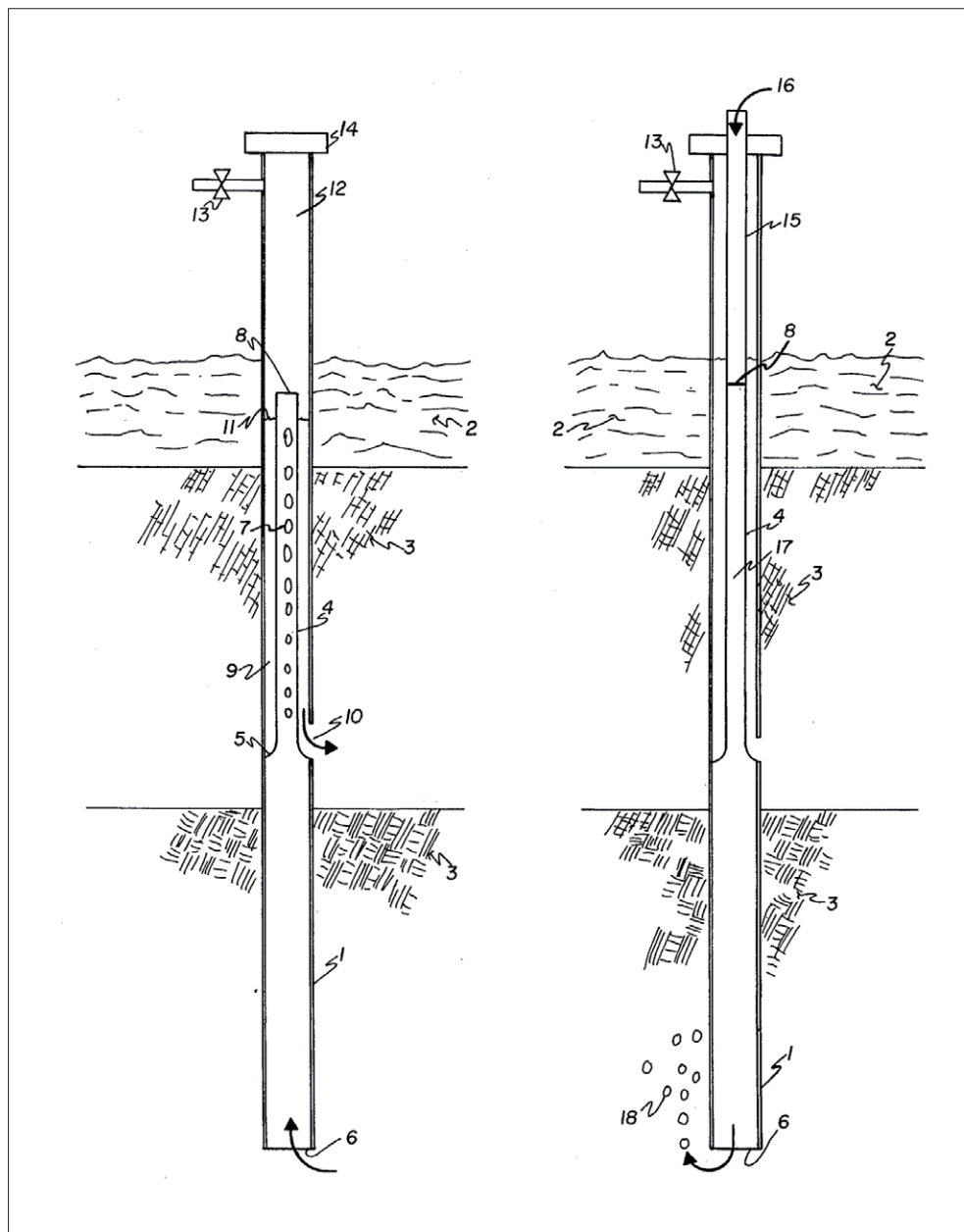
Gdy ilość pozyskiwanego gazu odwiertami drugiego pierścienia zaczyna maleć, wydobywanie gazu z pierwszego pierścienia staje się coraz bardziej nieopłacalne. Jest to także sygnał, że gaz rozpuszczony w wodach zalegających pod odwiertami drugiego okręgu został już w dużej mierze szcerpany. Na tym etapie uruchomiona zostaje eksploatacja odwiertami trzeciego pierścienia, z jednoczesnym zaprzestaniem wydobywania odwiertami zlokalizowanymi na pierwszym okręgu. Proces może być kontynuowany przy użyciu licznych pierścieni odwiertów, dopóki rozpuszczony w wodzie gaz nie zostanie wydobyty lub dalsze pozyskiwanie gazu będzie ekonomicznie opłacalne.



Rys. 1.12. Uformowanie się wtórnej czapy gazowej wynikające z kontrolowanego wypływu płynów z odwiertu – patent US4279307 [19]

W wynalazku pt. *Recovery of natural gas from deep brines* [9] autor przedstawia metodę mającą służyć do pozyskiwania gazu ziemnego rozpuszczonego w głębokich poziomach solankowych. Elementem wyróżniającym tę metodę jest cyrkulacja wód złożowych, a mianowicie rozpuszczony w solance metan wydziela się z wody już w odwiercie, a następnie – odgazowana solanka zawracana jest ponownie do złoża bez wydobywania jej na powierzchnię. Cały proces odbywa się w rurkach wydobywczych w bliskiej odległości od samej warstwy wodonośnej zawierającej rozpuszczony gaz. Proces cyrkulacji wody zachodzi przy wykorzystaniu energii pochodzącej z ciśnienia wód złożowych i sił powiązanych ze ścisłością struktury zawodnionej.

Głównym celem prezentowanej koncepcji jest ekonomiczne i bezpieczne dla środowiska naturalnego oddzielenie metanu od gorącej solanki złożowej w warunkach wgłębnych, a następnie bezpośrednia powrotna iniekcja odgazowanej wody do warstw zawodnionych.



Rys. 1.13. Rysunek schematyczny urządzeń do odgazowania i cyrkulacji solanki. Z prawej strony etap rozruchu procesu, z lewej etap pozyskiwania gazu ziemnego – patent US4377208 [9]

Opisany proces ma się odbywać z wykorzystaniem sił in situ systemu złożowego. W ramach realizacji koncepcji do przetłaczania wody stosuje się pompy wgłębne lub turbiny wykorzystujące energię złoża. Pracują one w sposób ograniczający wytrącanie osadów i tłumiący odparowanie pary wodnej. Jedną z zalet metody jest możliwość pracy urządzeń nieposiadających ruchomych części/elementów konstrukcyjnych, jednakże – jak podaje autor wynalazku – zastosowanie pomp napędzanych siłami in situ systemu złożowego sprawia, że proces pozyskania gazu staje się bardziej efektywny. Źródłem siły napędowej wykorzystywanej w metodzie jest głównie zjawisko ekspansji metanu wywołane poprzez obniżenie ciśnienia w systemie złożowym złożonym z wód nasyconych gazem ziemnym – pozostających w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury. Metan wydzielony z fazy wodnej tłumi niekorzystne dla przebiegu procesu odparowywanie wody, pozwala przemieszczać wodę w odwiercie, w końcu napędza pompy/turbiny, pozwalając na pozbycie się odgazowanej solanki. Dzięki użyciu kilku mechanicznych pomp czy turbin umieszczonych na różnych głębokościach w odwiercie możliwe jest pozyskanie gazu ziemnego z solanki w różnym stopniu nasyconej metanem. Na rysunku 1.13 zaprezentowano oryginalne grafiki zawarte w opisie wynalazku US4377208. Schematycznie przedstawiają one urządzenie do cyrkulacji solanki i pozyskiwania gazu ziemnego.

Oprócz wyżej zaprezentowanych metod pozyskiwania gazu ziemnego rozpuszczonego w poziomach wodonośnych oraz szeregu badań poświęconych towarzyszącym tym procesom zjawiskom można wymienić jeszcze liczne pozycje literaturowe i wielu naukowców, którzy na przestrzeni lat zajmowali się opisywaną tematyką. Oczywiście nie sposób zgłębić całości literatury poświęconej temu zagadnieniu, z drugiej jednak strony wiele metod i konkluzji badawczych, w mniejszym lub większym stopniu, pokrywa się – nawet jeśli chodzi o patenty, które z racji swego charakteru powinny być swoistym dziełem autorskim o wyjątkowej, strzeżonej prawem oryginalności.

1.3. Gaz ziemny w poziomach solankowych Nizy Polskiego

Na zawartość gazu ziemnego rozpuszczonego w poziomach solankowych zwrócono w naszym kraju uwagę w drugiej połowie lat 70. ubiegłego wieku. Znalazło to wyraz w raportach ekspertów pracujących wówczas w polskim górnictwie naftowym, w raportach i dokumentacjach geologów z ZPNiG Piła oraz w publikacjach Gurariego [14] i P. Karnkow-

skiego [21]. Prace w tym zakresie podjął również ówczesny Instytut Górnictwa Naftowego i Gazownictwa – obecnie Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy. Wynik tych prac ujęto w niepublikowanych opracowaniach [13]. W dokumentacjach zespół opracowujący zaproponował podział zasobów gazu ziemnego zawartych w wodach złożowych na trzy kategorie:

- zasoby gazu pozostałe w złożu po zalaniu odwiertów eksploatacyjnych wodą;
- zasoby gazu w soczewkach i przekładkach wypełnionych w większości wodą (obiekty gazowo-wodne);
- zasoby gazu rozpuszczonego i zdyspergowanego w wodach wgłębnych.

Ze względów ekonomicznych i technologicznych za najbardziej perspektywiczne uznano konwencjonalne złoża gazu ziemnego z aktywną wodą, których odwierty, po wydobyciu kilku do kilkunastu procent zasobów, zostały zalane wodą. Opracowano projekt technologiczny pozyskania gazu z enklaw złoża wypełnionych gazem, a oddzielonych od odwiertów strefą zawadnioną. Zaproponowana wówczas technologia polegała na intensywnym pompowaniu wody z odwiertów, dzięki czemu po spadku ciśnienia „bąbel” gazu powiększa się, obejmując dany odwiert wydobywczy, i następuje wypływ gazu na powierzchnię. Koncepcję technologii, szacowanych kosztów i nakładów inwestycyjnych opracowano dla złoża Kaleje, jednakże koszty realizacji projektu przekroczyły możliwości Zakładu [16].

Struktury gazowo-wodne omówione w dokumentacji IGNiG [63] są obecne w miocenie przedgórze Karpat. Wyróżnia się dwie strefy ich występowania:

- pierwszą – w pobliżu nasunięcia górotworu karpackiego;
- drugą – w strefie północnej zapadliska przedkarpackiego.

Z występujących naprzemianlegle kompleksów piaskowcowo-łupkowych uzyskiwano przyływ gazu z wodą o natężeniu do kilkudziesięciu Nm³/min. Ze względu na równie duże przyływy wody odwierty te były likwidowane. Stwierdzono wówczas, że tak duże wydajności nie mogą pochodzić wyłącznie z wydzielania się gazu rozpuszczonego w wodzie [63].

Podstawowym źródłem gazu są laminy i soczewki wypełnione gazem położone wśród rozległych warstw wodonośnych. Przyczyną takiego stanu rzeczy może być niezakończona migracja gazu w warunkach płasko zalegających lamin i „wysalania się” wód wgłębnych po zetknięciu z pokładami soli.

Gaz ziemny rozpuszczony w wodach wgłębnych został w Polsce częściowo rozpoznany w formacjach czerwonego spągowca. Na obszarze monokliny przedsudeckiej, zajmującej powierzchnię około 40 tys. km², badania sejsmiczne nie zarejestrowały w podłożu cechsz-

tytu większych struktur lokalnych, co nierozdzielnie wiąże się z brakiem możliwości występowania dużych złóż gazu w tym rejonie. Odkryte na południowym obszarze monokliny (niecka zielonogórska) złoża gazu są małe, a jedynie kilka z nich można według nomenklatury światowej zaliczyć do średnich. W większości powierzchnie złóż wynoszą średnio około 5 km², a miąższości strefy nasyconej gazem zawierają się w przedziale od 20 m do 40 m. Prowadzone badania i prace geologiczno-poszukiwawcze wykazały, że nagromadzenia gazu ziemnego skupiają się głównie wokół struktury wału wolsztyńskiego. Zakładano, że wał tworzy swoistą zaporę dla węglowodorów migrujących z głębi basenu ku strefom brzeżnym. Oczekiwano, że w północnej części monokliny powinny znajdować się nawet bogatsze złoża gazu niż po stronie południowej. W niecce poznańskiej, ze względu na głębsze zaleganie utworów czerwonego spągowca (2600÷3700 m), odkrycie złóż gazu nastąpiło nieco później niż po południowej stronie wału. W 1974 roku (otworem Kaleje-1) odkryto pierwsze (o wartości ekonomicznej) złożo gazu ziemnego po północnej stronie wału wolsztyńskiego, co zapoczątkowało intensywną eksplorację omawianego obszaru.

Liczne wiercenia pozwoliły na stosunkowo szybką lokalizację kolejnych złóż, tj.: Klęka, Grodzisk, Kościan, Ujazd, Bukowiec, Buk, Porążyn, Sątopy i innych [22]. Niestety mnogość złóż nie przełożyła się na ich zasobność w węglowodory – co więcej, nie dorównują one nawet złożom znanym z południowej strony wału. Za główną przyczynę takiego stanu rzeczy uważa się małe rozmiary powierzchni struktur tworzących pułapki oraz ich niewielką amplitudę. Obszar niecki poznańskiej, mimo bardzo korzystnych cech zbiornikowych (przepuszczalność 50÷1000 mD, porowatość około 20%) i wysokiej koncentracji węglowodorów (metan do 90%), nie przewyższył zasobami obszaru południowego. Według m.in. Sokołowskiego [64] i Karnkowskiego [21] wyjaśnienia tego faktu należy doszukiwać się u źródeł generowania węglowodorów, ich migracji i ostatecznego formowania się złóż. Obecny stan wiedzy pozwala powiązać genezę złóż gazu ziemnego omawianego obszaru z nagromadzeniem materii organicznej w osadach górnego karbonu, a także w starszym paleozoiku. Zakładając, że karbońska materia organiczna jest głównym źródłem generowania węglowodorów, należy przyjąć, że początek ich migracji mógł nastąpić najwcześniej w okresie triasu. Wówczas to w wyniku dużego pograżenia materii organicznej (minimum 3000 m) zaistniały odpowiednie warunki termodynamiczne do „uruchomienia” węglowodorów [21]. Zasadnicza migracja gazu mogła wystąpić jednak z początkiem trzeciorzędu, gdy basen permski, w rezultacie ruchów laramijskich, zaczął się wynurzać. Wówczas to węglowodory rozpoczęły wędrówkę ku wyższym strefom oraz ku brzegom basenu permskiego. Najpewniej wtedy nastąpiło wypełnienie pułapek strukturalnych i utworzenie złóż. Zakłada się, że młodsze ruchy orogenezy alpejskiej, podczas których m.in. wydzwignięte

zostały Sudety, mogły wywołać dalszą migrację węglowodorów, a nawet częściowe zniszczenie „nowo utworzonych” złóż – zwłaszcza w brzeźnych rejonach basenu.

W formowaniu się złóż węglowodorów zasadniczą rolę odgrywają pułapki skalne oraz porowatość i przepuszczalność ośrodka zbiornikowego. Określone typy złóż tworzą się w zależności od litologii skał oraz ich form strukturalnych. Gaz ziemny migrujący porami skał w środowisku wodnym, zgodnie z prawami grawitacji, dąży do zajęcia jak najwyższego położenia. Jednakże w przypadku, gdy migracja odbywa się w sposób ciągły, a do tego brak jest odpowiednich form strukturalnych, w których gaz mógłby się swobodnie zakumulować, występuje zjawisko stopniowego rozpuszczania się gazu w solankach złożowych. Prawdopodobnie taka sytuacja występuje w północnej części monokliny przedsudeckiej, a ponadto podobne zjawiska, chociaż w mniejszej skali, zachodzą w części południowej, czyli na obszarze niecki zielonogórskiej [14, 21]. Monoklina przedsudecka po północnej stronie wału wolsztyńskiego tworzy w podcechsztyńskim podłożu rozległy, spenepienizowany, a zarazem mocno pochylony ku północy (4÷5%) płaskowyż. Na tle tej jednostajnie obniżającej się powierzchni utworów saksonu o pustynnym reliefie występują jedynie niewielkie struktury (lokalne kulminacje) o eolicznej genezie (głównie wydmy) – ewentualnie bloki uwzględniające budowę tektoniczną podłoża. Względna monotonia ówczesnej rzeźby terenu i brak wyraźnego morfologicznego zróżnicowania powierzchni uniemożliwiły swobodne wydzielenie się gazu i uformowanie większych złóż. Zdecydowanie większa część zasobów gazu ziemnego pozostała poza obecnymi złożami, tj. jako rozpuszczona lub zdyspergowana (tzn. w postaci niemobilnych banieczek) w rozległych poziomach wodonośnych.

Prowadzone przez grupy pomiarowe Przedsiębiorstwa Poszukiwań Nafty i Gazu w Pile pomiary nasycenia wód wglębnych gazem węglowodorowym pozwoliły na oszacowanie zasobów gazu rozpuszczonego na obszarze północnej części monokliny przedsudeckiej. Zakładając średnie nasycenie wód gazem na poziomie 2,4 Nm³/m³, zasoby gazu w rozpatrywanym obszarze mogą wynosić 120 mld Nm³ [21]. Ponadto z dużym prawdopodobieństwem można założyć, że obszar nasycenia wód wglębnych gazem, zarówno w północnej, jak i w południowej części monokliny, może rozciągać się na powierzchni co najmniej 10 tys. km², a jednocześnie wzrasta również miąższość osadów saksonu, co pociąga za sobą zwiększone ilości rozpuszczonego gazu.

Nasycenie gazem jest zgodne z danymi dotyczącymi innych rejonów geologicznych, przy uwzględnieniu głębokości występowania wód i ich mineralizacji. Pomiary i badania geologiczne pozwoliły na dokonanie podobnych obliczeń m.in. w USA (opisywane wcześniej) oraz dla obszaru gazowych złóż zachodniej Syberii [1, 11]. Wyliczono, że objętość gazu rozpuszczona w ogromnych poziomach wodonośnych jury i kredy pozostaje na poziomie

tysięcy miliardów Nm³, a gazy te w miarę eksploatacji i spadku ciśnienia zlokalizowanych tam złóż mogą wydzielać się z solanki i migrować do wyżejleżących kulminacji/pułapek, uzupełniając zasoby gazu istniejących złóż. Taka sama sytuacja może również występować w przypadku złóż gazu zlokalizowanych na monoklinie przedsudeckiej – a zwłaszcza przy włączeniu zatłaczania CO₂ do nasyconych gazem warstw solankowych w procesach sekwestracji. Zasilanie istniejących złóż gazu gazem rozpuszczonym i/lub zdyspergowanym w rozległych poziomach wodonośnych może mieć istotne znaczenie dla wydłużenia żywotności złóż/kopalń.

W wyżej prezentowanych tzw. pozabilansowych zasobach nie uwzględniono jednak gazu zdyspergowanego w wodzie, którego ilość, zwłaszcza w pobliżu złóż gazu, może być nawet większa niż ilość gazu rozpuszczonego w wodzie.

Gurari wraz ze swoim zespołem [14] badał procesy wzajemnego wpływu gazów ziemnych Niżu Polskiego rozpuszczonych w wodach złożowych i gazów pozostających w formie wolnej fazy gazowej – najczęściej zakumulowanych w strukturalnych pułapkach w postaci złóż. Wymienia on trzy główne typy migracji gazu decydujące o tworzeniu się złóż, tj.: dyfuzję, migrację gazów rozpuszczonych w wodach i migrację „strumieniową”, tzn. taką, w której gaz przemieszcza się w postaci wolnej fazy lotnej. Sam proces dyfuzji w osadach czerwonego spągowca obszaru monokliny przedsudeckiej ma niewielki wpływ na skład gazu. W wyniku długotrwałego wzajemnego kontaktu wody i gazu skład gazu rozpuszczonego w solance ulega zmianie, zbliżając się na granicy rozdziału faz do składu gazu wolnego, z uwzględnieniem różnej rozpuszczalności poszczególnych składników mieszaniny. Za pomocą gazowo-geochemicznych wskaźników określono główne drogi migracji gazów węglowodorowych przez głębokie poziomy wodonośne obszaru monokliny przedsudeckiej [14]. Analizując koncentracje poszczególnych składników badanych gazów (definiując i porównując tzw. współczynniki zmienności), wysunięto wówczas wnioski, że na omawianym obszarze monokliny można wyróżnić dwa zgoła odmienne rejony. W strefie na północ od wału wolsztyńskiego stwierdza się bliskie pokrewieństwo gazów w odkrytych złożach tego rejonu z gazami rozpuszczonymi w wodach podścielających, zatem złoża te przypuszczalnie utworzyły się głównie w wyniku wydzielenia się gazów rozpuszczonych w wodach złożowych.

W strefie na południe od wału wolsztyńskiego warunki formowania się złóż są zdecydowanie inne. Obszary bliskiego pokrewieństwa składu gazu nasycającego poziomy wodonośny i gazu w złożach są wąskie, wydłużone w kierunku południkowym lub okalają pojedyncze złoża gazu w formie aureoli. Przemieszczanie się gazu i tworzenie się złóż jest tutaj wynikiem migracji gazu w fazie lotnej, przebiegającej w strefie wyraźnie niedosyconych węglowodorami gazowymi wód złożowych. Zgodność głównych kierunków migracji

ze współczesnym planem strukturalnym oraz wyrazistość tych dróg świadczą o wzroście intensywności migracji po alpejskiej przebudowie tego obszaru. Metodyka proponowana przez Gurariego pozwala przewidzieć skład gazu w pułapce leżącej na „głównej drodze migracji”, przy znajomości danych o składzie chemicznym gazu rozpuszczonego w wodzie złożowej.

Bardzo słabo lub w ogóle nie zostały przebadane wody wglębne na zawartość gazu rozpuszczonego w innych regionach Polski [16].

1.4. Konkluzje

Na podstawie przedstawionego studium dotychczas przeprowadzonych badań i rodzaju stosowanych technologii pozyskiwania gazu ziemnego z głębokich poziomów wodonośnych można zauważyć, co następuje:

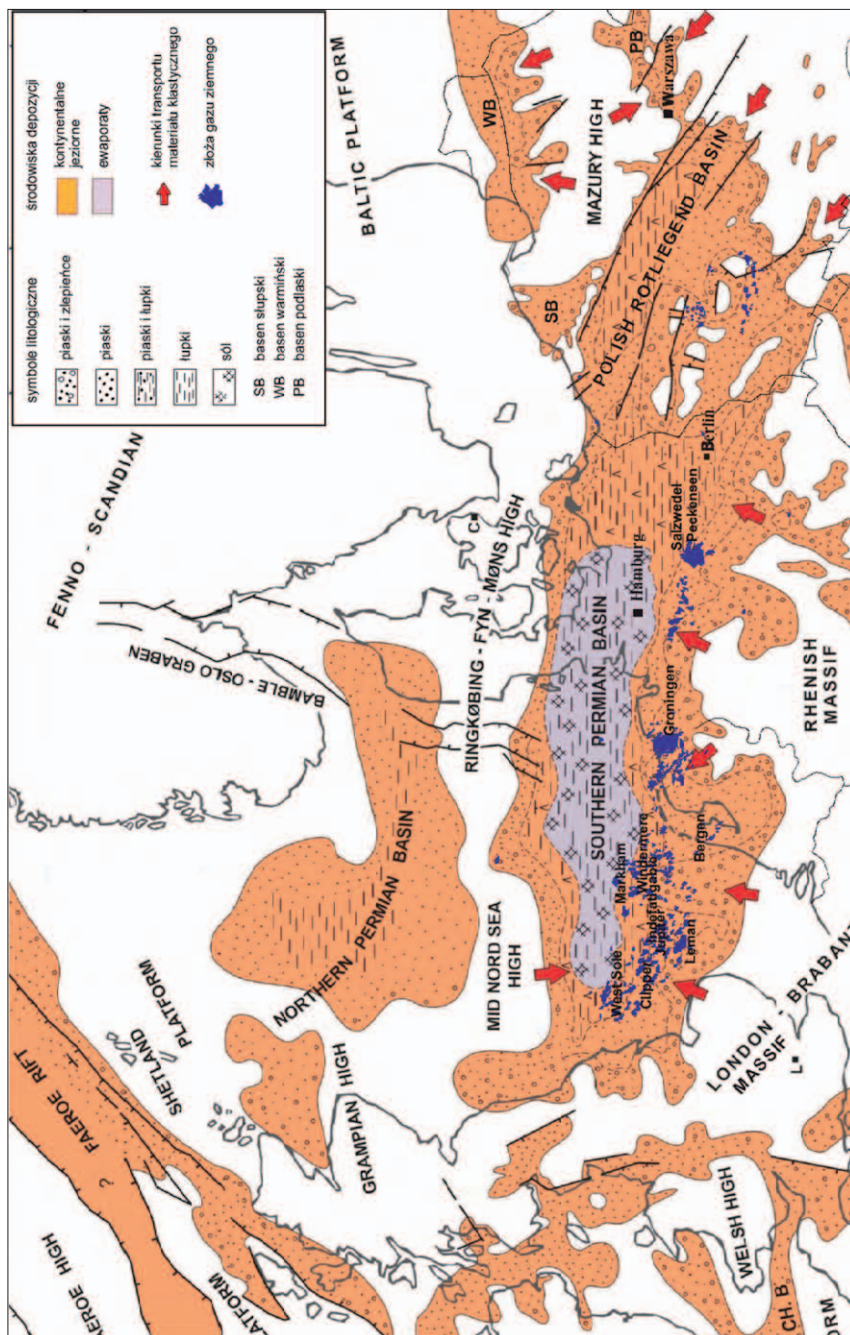
- W dotychczas prezentowanych technologiach nie zaproponowano wykorzystania sekwestracji CO₂ jako metody pozwalającej na wypieranie rozpuszczonych w wodach węglowodorów (głównie metanu). Jedynym procesem związanym z CO₂ jest propozycja redukcji CO₂ zawartego w wydobywanym gazie poprzez jego absorpcję w wyżejległych poziomach wodonośnych, co tylko pośrednio nawiązuje do problematyki sekwestracji.
- Powszechnie proponowane metody pozyskania gazów rozpuszczonych w głębokich poziomach wodonośnych bazują na ich fizycznej desorpcji wymuszonej zmianą w złożu warunków PVT (ciśnienie, objętość, temperatura) poprzez wywołanie w strefie przyodwiertowej depresji o mniejszym lub większym zasięgu. W warunkach geologicznych Niżu Polskiego, ze względu na efekt Joule’a–Thomsona, w strefie przyodwiertowej może dochodzić do zmiany temperatury przepływającego gazu w zakresie kilku stopni Celsjusza [60, 61]. Przedstawione rozwiązania różnią się w zasadzie jedynie konstrukcją stosowanych odwiertów, rodzajem wyposażenia wglębnego czy napowierzchniowego oraz sposobem pozbycia się odgazowanej solanki.

2. Charakterystyka geologiczno-złożowa megastruktury niecki poznańskiej – potencjalnego obiektu sekwestracyjnego

2.1. Zarys budowy geologicznej niecki poznańskiej na tle geologii basenu permskiego

Struktura niecki poznańskiej (zwanej też zapadliskiem poznańskim lub wielkopolskim [23]) uformowała się w osadach czerwonego spągowca europejskiego basenu permskiego. Polski basen czerwonego spągowca jest wschodnią częścią ogromnego permskiego basenu rozciągającego się w Europie od Morza Północnego poprzez Holandię i Niemcy aż do Polski (rys. 2.1).

Basen permski uformował się w końcowym etapie waryscyjskich ruchów górotwórczych na bazie geosynkliny środkowoeuropejskiej, która ulegała stopniowym ruchom pogrążającym, wypełniając się osadami od kambru po sylur [82]. Na skutek działania fazy ardeńskiej orogenezy kaledońskiej, w górnym sylurze, geosynklinalne osady zostały wydzwignięte i pofałdowane. W dewonie nastąpił kolejny etap rozwoju geosynkliny środkowoeuropejskiej, a jego osady leżą niezgodnie na kompleksie kaledońskim. Przypuszcza się, iż osady karbonu dolnego stanowią ciągłość sedymentacyjną z osadami górnego dewonu. Geosynklina środkowoeuropejska w czasie dolnego karbonu była przesunięta ku południowi w porównaniu do zasięgu geosynkliny kaledońskiej. Osady karbońskie w synklinorium pomorskim leżące na sfałdowanym kompleksie kaledońskim nie wykazują,



Rys. 2.1.1. Paleogeografia czerwonego spągowa północnej Europy [83, 31]

oprócz mniejszych miąższości, tak dużego zaangażowania tektonicznego, jakie odnotowano w osadach karbonu dolnego w rejonie Poznania [12, 62]. Po karbonie dolnym (namur) nastąpiło wypiętrzenie i sfałdowanie osadów dewońskich i karbońskich w sudeckiej fazie orogenezy warycyjskiej, a ukształtowany górotwór poddawany był następnie silnej denudacji w górnym karbonie i dolnym permie.

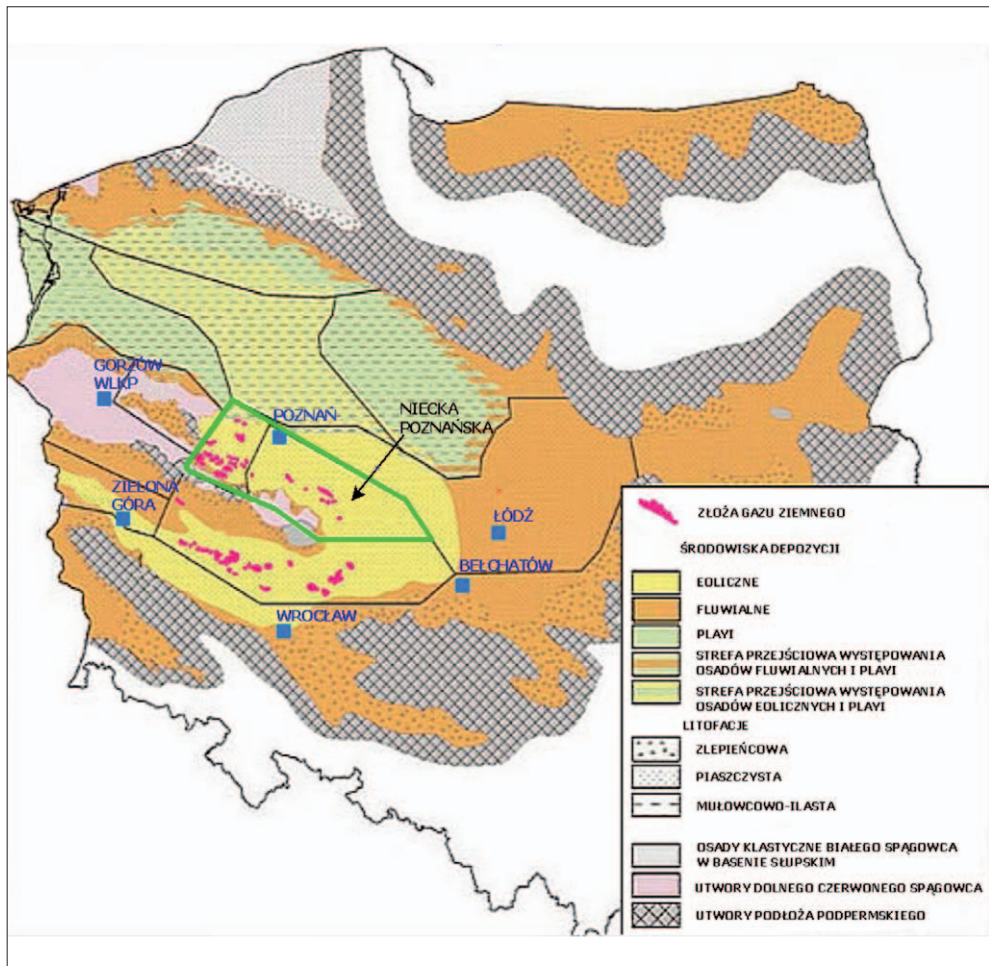
W polskiej części basenu permskiego pograżenie podłoża było mniejsze niż w centralnej części basenu (Niemcy, Holandia), gdzie w profilu osadów identyfikowano duże udziały ewaporatów. Miąższości oraz wykształcenia facjalne wskazują, że w polskiej części basenu jedynie w obszarze jego największej subsydencji, tj. w strefie bruzdy duńsko-polskiej, pograżenie było na tyle duże, że nagromadziły się tam osady środowiska playi [82]. Dane pozyskiwane z badań sejsmicznych i głębokich otworów wiertniczych pozwalają scharakteryzować powierzchnię morfologiczną jako mocno pofałdowaną – z dużymi deniwelacjami rzeźby terenu. Studia warycydów (tj. gór orogenezy warycyjskiej/hercyńskiej) na obszarze Wielkopolski wykazały, że powstało wówczas kilka grzbietów górskich, które już w czasie orogenezy, a także później – w czasie dolnego permu, poddawane były licznym deformacjom nieciągłym, pogłębiając i zwiększając duże deniwelacje rzeźby ówczesnej powierzchni terenu [12, 64]. Właśnie wał wolsztyński, o długości ok. 200 km i szerokości 30–50 km, rozciągający się od rejonu Ostrowa Wielkopolskiego przez rejon Wolsztyna ku zachodnim granicom Polski, był jednym z takich grzbietów górskich. Powstały wówczas również inne wypiętrzone strefy tektoniczne położone niemal równolegle do wału wolsztyńskiego. Wyniesienia te zostały jednak całkowicie pogrzebane osadami czerwonego spągowca, gdyż były niedostatecznie wypiętrzone (niższe od wału wolsztyńskiego). Ich istnienie ma zasadnicze znaczenie dla identyfikacji środowisk sedymentacji, poznania tektoniki, a w szczególności – wytypowania rejonów o określonych typach pułapek złożowych.

Utwory czerwonego spągowca odegrały główną rolę w dystrybucji i akumulacji zasobów ropy i gazu, nie mając jednak charakteru skał macierzystych. W dolnym permie na środowisko depozycji istotny wpływ wywarły: suchy i gorący klimat pustynny, sedymentacja w warunkach lądowych, duże deniwelacje rzeźby terenu (wynikające z orogenezy warycyjskiej) oraz – równocześnie działające – syngenetyczne ruchy tensyjne rozciągające basen, a tym samym ułatwiające wypływ lawy na powierzchnię. Powolne ruchy epejrogeniczne nakładały się na lokalne ruchy tensyjno-przesuwcze, obniżając obszar basenu o ponad 1000 m. W rezultacie w górnym permie (cechsztynie) nastąpiło wkroczenie morza.

Ze względu na środowisko depozycji osadów w dolnym permie wydzielono [82]:

- utwory aluwialno-fluwialne – głównie w strefach brzeżnych basenu i najniżej położonych partiach profilu;

- utwory eoliczne – przeważające w centralnych częściach niecki zielonogórskiej i poznańskiej, w stropie oraz w bruzdzie duńsko-polskiej w spągu profilu utworów czerwonego spągowca;
- osady playi – zalegające w najbardziej pogrążonej części basenu w obrębie dzisiejszych synklinoriów szczecińskiego i mogileńskiego (rys. 2.2).



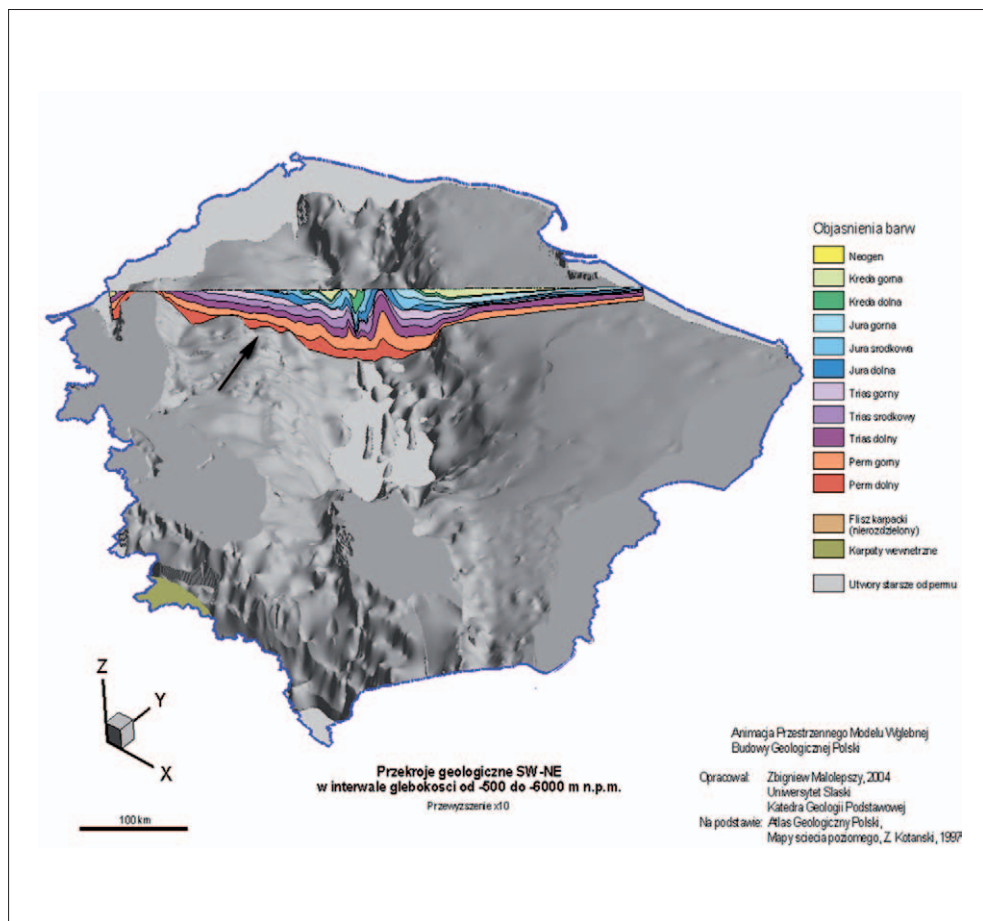
Rys. 2.2. Lokalizacja megastruktury wodonośnej niecki poznańskiej (linia zielona) na tle mapy paleogeograficznej schyłku górnego czerwonego spągowca (zmodyfikowane za Wolnowskim [82])

Ze względu na zróżnicowanie nachylenia stropu czerwonego spągowca nieckę poznańską podzielono na dwa opisane poniżej obszary.

- Zachodnia część sięga od strefy Lwówek–Nowy Tomyśl do Poznania. Jej szerokość wynosi około 40–50 km, a rozciągłość kształtuje się na poziomie około 35 km. Utwory aluwialno-fluwialne stanowią dolną część profilu osadów czerwonego spągowca, natomiast wyżej zalegają głównie osady eoliczne. Od północy niecka poznańska ograniczona jest wałem/garbem Rokietnica–Siekierki, a za nim następuje wzrost udziału utworów środowiska playi. Mniejsze nachylenie stropu czerwonego spągowca przyczyniło się do zachowania zakumulowanego gazu w kilku ciągach obiektów strukturalnych. Prowadzone na przestrzeni kilkudziesięciu lat poszukiwania ropy i gazu zaowocowały w tym obszarze basenu permskiego odkryciem szeregu złóż gazu ziemnego – w tym takich jak: Paproć–Cicha Góra, Ujazd, Grodzisk.
- Wschodnia część niecki poznańskiej zalega na obszarze od Poznania do rejonu Pleszewa (ok. 80 km długości i 35 km szerokości). Obszar ten cechuje się znacznie większym nachyleniem stropu czerwonego spągowca. Pułapki tam stwierdzone charakteryzują się zamknięciami tektoniczno-litologicznymi [82]. Typowe dla tego obszaru są rowy tektoniczne, zlokalizowane zazwyczaj nad paleopodniesieniami w stropie czerwonego spągowca. Cechują się one anomaliami miąższości osadów cechsztyńskich i mezozoicznych, co oddziałuje na model prędkości i w rezultacie pogarsza dokładność odwzorowania głębokości horyzontów perspektywicznych.

Na rysunku 2.3 zilustrowano uproszczony przekrój geologiczny zachodniej Polski, na którym wskazano strukturę osadów czerwonego spągowca niecki poznańskiej.

Obszar niecki poznańskiej, początkowo wypiętrzony i poddany erozji, uległ (w wyniku ruchów pionowych związanych z fazą saalską) szybkiemu pogrążeniu, a następnie, w klimacie głównie pustynnym, wypełniony został klastycznymi osadami saksonu z przeważającym udziałem zlepieńców w strefach brzeżnych [23]. Produktem wyjściowym do powstania saksońskich osadów klastycznych był materiał wulkaniczny i wypiętrzone skały orogenu kaledońskiego i waryscyjskiego, poddane intensywnym procesom denudacji.



Rys. 2.3. Przekrój geologiczny SW-NE zachodniej Polski – strzałką zaznaczono strukturę osadów czerwonego spągowca niecki poznańskiej [43]

W okresie saksonu głównymi strefami alimentacyjnymi dostarczającymi materiał okruchowy, m.in. do zapadliska/niecki poznańskiej (basenów drugiego rzędu [23]), były obszary wówczas wyżej położone, czyli:

- płaskowyż wschodnioeuropejskiej platformy prekambryjskiej, wraz z wypiętrzeniami orogenu kaledońskiego;
- obszar obecnych Gór Świętokrzyskich z ich wschodnim i południowym obrzeżeniem;

- wypiętrzzenia wewnątrz basenu, tj.: wał wolsztyński, wypiętrzanie Myśluborza – Rokietnicy i najwyższe utwory dzisiejszego bloku przedsudeckiego.

Akumulacja osadów klastycznych w saksonie odbywała się w bardzo zróżnicowanym morfologicznie środowisku, przy złożonych procesach erozji, transportu i akumulacji oraz przy udziale ruchów obniżających, które szczególnie wyraźnie zaznaczyły się w zapadlisku poznańskim. Z tego powodu zachodziły istotne różnice w facjach i miąższości osadów [54]. Obok wypiętrzonej strefy tworzyły się miąższe utwory klastyczne (zlepieńce i piaskowce), znoszone przez okresowo płynące rzeki [10, 54]. W wyniku tego zjawiska powstawały strefy stożków napływowych, czego przykładem jest rejon Kaleje–Kłęka, Ujazd [25]. Dalej w głębi basenów powstawały równiny fluwialne, kształtowane przez okresowo lub stale płynące rzeki. W centralnych lokalizacjach basenu, odznaczających się największym obniżeniem terenu, mogły istnieć stałe lub okresowe jeziorzyska, w których transportowany rzekami materiał okruchowy odkładał się w seriach fluwialno-deltowych i zastoiskowych. Następnie, po wypełnieniu lokalnych niecek i basenów, sedymentacja osadów saksonu poszerzała swój zasięg przy stale zwiększającym się obszarze alimentacyjnym. Ponadto przypuszcza się, że w trakcie postępującej erozji i sedymentacji osadów saksonu, na skutek kaptażu rzecznych, mogło dojść do połączenia mniejszych basenów sedymentacyjnych (szczególnie poznańskiego z pomorskim).

Sedymentacja osadów saksonu nie jest jednorodna. Na przykład w obszarze zapadlika pomorskiego dominują szeroko rozprzestrzenione utwory drobnoklastyczne w facji piaszczysto-mułowcowo-ilastej powstałej w środowisku wodnym (sabhka). Osady saksonu niecki poznańskiej reprezentują odmienny typ. Szczególnie w południowej, brzeżnej części, na skłonie wału wolsztyńskiego procesy sedymentacyjne odbywały się dużo gwałtowniej. Odnotowano tu mocno rozbudowaną strefę gradientu tektonicznego, której amplituda w rejonie Kaleje–Kłęka może sięgać 1000 m [23].

Strefowo występują tu poziomy zlepieńców o miąższościach przekraczających 100 m. Środkową część niecki wypełniają serie osadów piaskowcowych powstałych w warunkach fluwialnych (deltowych). W otworze Kórnik-1 odnotowano największą miąższość osadów saksonu w Polsce, tj. 1094 m. W latach 70. XX wieku skutkiem tego odkrycia było skierowanie prac poszukiwawczych za węglowodorami na omawiany obszar. Rejon niecki poznańskiej spełniał również rolę „tranzytową”, odprowadzając okresowymi rzekami nadmiar klastycznego materiału na północ, tj. do niecki pomorskiej. Należy przypuszczać, że w końcowej fazie sedymentacji, przed transgresją cechsztyńską, w konsekwencji ruchów obniżających część materiału klastycznego z niecki poznańskiej odprowadzana była w kierunku zachodnim poprzez powstały w wyniku kaptażu przełam na linii Gro-

dzisk–Staropole. Osady saksonu w niecce zielonogórskiej prezentują podobny typ facjalny do permskich osadów obszaru niecki poznańskiej, lecz ich miąższość jest zdecydowanie mniejsza. W części wschodniej osiąga ok. 500 m, natomiast w zachodniej przekracza 700 m. Przeważnie są to osady fluwialne, stwierdzono także serie typu sabkha oraz zlepieńce związane z rozłamami tektonicznymi [23].

Przy opisie osadów saksonu należy podkreślić istotny wpływ czynników eolicznych, które w warunkach klimatu pustynnego odgrywały bardzo ważną rolę w redepozycji osadów fluwialnych i współtworzeniu krajobrazu. Generalnie przyjmuje się dominujący kierunek wiatrów pasatowych z północnego wschodu [27], co ma ogromne znaczenie dla określenia rejonów, gdzie potencjalnie mogły powstawać pola wydmowe. W rejonie niecki poznańskiej nawiercono międzywarstwowe poziomy pochodzenia wydmowego oraz utwory wydmowe kończące cykl sedimentacji osadów saksonu (otwory: Buk, Kaleje, Klęka, Stęszew). Jest to ważne z uwagi na występujące tam lepsze własności zbiornikowe, co ma bezpośredni wpływ na możliwość akumulacji węglowodorów.

Można przypuszczać, że pierwotny zasięg osadów saksonu był większy od teraźniejszego, ale na skutek erozji przedcechsztyńskiej i niszczącej działalności falowania podczas transgresji osady te zostały całkowicie zerodowane. Ujawnia się to głównie w południowej, brzeżnej części niecki poznańskiej i we wschodniej części niecki zielonogórskiej w postaci lokalnie występujących, niewielkiej miąższości, osadów jasnych piaskowców. W obrębie wyniesienia Rokietnicy zaobserwowano jednocześnie rozmycie osadów saksonu oraz erozję odsłoniętego masywu zbudowanego z utworów dolnkarbońskich. W brzegowych obszarach basenu dolnopermskiego transgresja cechsztyńska zaznaczyła się strefowo występującymi poziomami zlepieńców o nieznacznej miąższości.

Pierwszym złożem gazu ziemnego odkrytym na Niżu Polskim (1964 rok) było złożo Bogdaj–Uciechów [24], występujące w utworach wapienia cechsztyńskiego i saksonu. Jest ono zlokalizowane na południowo-wschodnim skłonie wału wolsztyńskiego, gdzie nagromadził się gaz migrujący od strony północno-wschodniej, z centrum basenu permskiego, ku strefom peryferycznym. Pułapkami dla gazu stały się formy strukturalne związane z ukształtowaniem podpermskiego podłoża, występujące przy sprzyjających warunkach zbiornikowych piaskowców saksonu i węglanowych serii cechsztynu.

Migracja węglowodorów odbywała się prawdopodobnie poprzez porowate utwory saksonu wypełniające łóżyska rzek płynących od bloku przedsudeckiego ku północy i poprzez obniżenia w wale wolsztyńskim, wypełnione porowatymi utworami saksonu lub wapieni i dolomitów cechsztynu [23]. Po północno-wschodniej stronie wału wolsztyńskiego, w obszarze niecki poznańskiej, w latach 1974–1977 odkryto nowy rejon występowania złóż gazu ziemnego w piaszczystych utworach saksonu, a także częściowo w białym spągowcu

(Grodzisk, Ujazd). Następnie zidentyfikowano i udostępniono szereg złóż typu strukturalnego i litologicznego, tj. Klęka, Grodzisk Wielkopolski, Ujazd, Porażyn, Buk – później kolejne. W okolicach Rokietnicy, na północny zachód od Poznania, stwierdzono niedużą akumulację gazu oraz solankę bardzo silnie nasyconą gazem. Należy założyć, że w centralnej części niecki poznańskiej możliwość wypełnienia gazem ziemnym wiąże się potencjalnie z każdym zamkniętym podniesieniem, jednakże lokalne struktury sejsmiczne, w których odkryto dotychczas złoża, cechują się generalnie niewielką wysokością, tj. do 40 m, a mała amplituda struktur bardzo utrudnia ich wykrycie.

2.2. Skały macierzyste węglowodorów zakumulowanych w osadach czerwonego spągowca basenu polskiego

W piaszczystych osadach czerwonego spągowca na obszarze Niżu Polskiego zakumulowane są znaczne ilości gazu ziemnego, jednakże utwory te spełniają jedynie rolę skały zbiornikowej, w której obrębie na przestrzeni czasu geologicznego uformowały się różnego typu pułapki złożowe – głównie strukturalne. To materia organiczna, występująca najczęściej w formie rozproszonej w osadach stanowiących podłoże czerwonego spągowca, stanowi główne źródło węglowodorów. Za utwory macierzyste dla ropy i gazu omawianego obszaru uważane są ilasto-mułowcowe osady dewonu i węglanowe serie karbonu bądź węglanowe i ilasto-węglanowe osady dewonu [46].

W geochemii naftowej do oceny jakości skał macierzystych i określenia ich dojrzałości do generowania węglowodorów wykorzystuje się wiele technik analitycznych, z czego podstawowymi tego typu badaniami są: piroliza metodą Rock-Eval (określenie zawartości, rodzaju i stopnia dojrzałości materii organicznej) i mikroskopia optyczna (oznaczenie typu i stopnia przeobrażenia substancji organicznej). W biurach i pracowniach geologicznych przygotowywane są mapy dojrzałości materii organicznej, przydatne m.in. do określania obszarów perspektywicznych dla występowania złóż węglowodorów. Podczas analizy basenu prowadzonej pod kątem wyznaczenia optymalnych stref dla prospekcji naftowej bardzo istotne jest odtworzenie warunków temperaturowych, jakim poddane były osady potencjalnie macierzyste w całej historii ich geologicznego rozwoju. Czynnikiem, który wywiera największy wpływ na przemiany obecnej w osadach substancji organicznej w węglowodory, jest temperatura. Odtworzenie historii pograżenia

potencjalnie macierzystych utworów, realizowane w różnych obszarach polskiej części basenu czerwonego spągowca, pozwala na określenie momentu wejścia tych osadów w poszczególne fazy generowania węglowodorów ciekłych bądź gazowych. Na podstawie licznych analiz stwierdzono [46], iż na przeważającym obszarze Niżu Polskiego osady potencjalnie macierzyste występujące w podłożu czerwonego spągowca znajdują się na wystarczająco wysokim poziomie dojrzałości termicznej do generowania węglowodorów. Ich miąższość jest znacznie zróżnicowana – od kilkudziesięciu metrów w niektórych otworach wiertniczych zlokalizowanych w brzeżnych partiach basenu do ponad 500 m w jego części centralnej.

Dla wyjaśnienia genezy gazu ziemnego zgromadzonego w osadach czerwonego spągowca i karbonu prowadzono rozliczne badania jego składu cząsteczkowego i izotopowego [28]. Sporządzono korelację genetyczną gazu ziemnego ze skałą macierzystą występującą w profilu utworów młodopaleozoicznych. W celu scharakteryzowania substancji organicznej skał potencjalnie macierzystych pobrano próbki z utworów karbonu górnego i dolnego oraz dewonu górnego z profili wybranych odwiertów, a następnie poddano je analizie geochemicznej, w której określono ilość, typ i stopień przeobrażenia substancji organicznej zdeponowanej w badanych utworach. Stwierdzono [28], że zawartość substancji organicznej w utworach karbonu górnego waha się od 0 do 7,05% wag. (średnia 0,79%), w utworach karbonu dolnego od 0 do 5,47% wag. (średnia 0,62%), a w materiale skalnym pochodzącym z osadów górnego dewonu zawiera się w granicach od 0 do 1,17% wag. (średnia 0,12%). Stopień przeobrażenia kerogenu typu III, przeważającego w utworach górnego karbonu, jest zróżnicowany od etapu mikrobialnego do końcowej fazy niskotemperaturowego etapu procesów termogenicznych. Kerogen mieszany (II i III) występuje natomiast w utworach dolnego karbonu oraz górnego dewonu – znajduje się on na niskotemperaturowym etapie procesów termogenicznych. Zaobserwowano, że substancja organiczna utworów górnodewońskich charakteryzuje się najslabszymi parametrami macierzystości.

Analizowane gazy ziemne posiadają zbliżone wartości wskaźników geochemicznych i stosunków izotopowych, za wyjątkiem składu trwałych izotopów węgla w etanie i propanie. Rezultaty oznaczeń składu cząsteczkowego i izotopowego gazów potwierdzają ich termogeniczne pochodzenie. Główny składnik badanych gazów – metan został prawdopodobnie wytworzony z kerogenu w trakcie etapu wysokotemperaturowego, natomiast wyższe węglowodory gazowe mogły być wygenerowane pod koniec niskotemperaturowego etapu procesów termogenicznych.

Inwersja izotopowa odnotowana w układzie metan–etan–propan analizowanych gazów może również oznaczać, że wszystkie badane węglowodory gazowe wytworzyły się

z tej samej wyjściowej materii humusowej, ale co najmniej na dwóch etapach przeobrażenia. Jak podaje Kotarba [28], pierwsza porcja gazu mogła powstać na etapie procesów niskotemperaturowych i była wzbogacona w cięższe frakcje gazowe, natomiast druga porcja, składająca się wyłącznie z metanu, wygenerowana została na etapie procesów wysokotemperaturowych. Gaz metanowy, migrując grawitacyjnie, zakumulował się w pułapkach wcześniej wypełnionych cięższymi frakcjami węglowodorowymi. Ciągłe jednak nie można wykluczyć, że mamy do czynienia z procesem mieszania dwóch niezależnych składowych genetycznych. Gaz wzbogacony w wyższe węglowodory, który jest obecny w utworach dolnokarbońskich i dewońskich, mieszał się z metanem wytworzonym z humusowej substancji organicznej, zawartej w utworach górnokarbońskich. Ostateczne wyjaśnienie tego procesu wymaga dalszych badań geochemicznych skał macierzystych karbonu i dewonu.

2.3. Ogólna charakterystyka złóż węglowodorów w osadach czerwonego spągowca basenu polskiego

Na terenie Polski w osadach czerwonego spągowca odkryto kilkadziesiąt złóż gazu ziemnego. Złoża te, zlokalizowane w przystropowych partiach piaszczystych osadów czerwonego spągowca, uszczelnione są ewaporatami cechsztyńskimi. Ich występowanie koncentruje się w dwóch rejonach, tj. poznańskim (położonym na północ od wału wolsztyńskiego) i dolnośląskim (znajdującym się po południowej stronie wału wolsztyńskiego, a na północ od Wrocławia). W zdecydowanej większości pułapki złożowe mają charakter strukturalny [22].

Od początku prowadzenia prac wiertniczych w utworach czerwonego spągowca na obszarze Niżu Polskiego wykonywano badania parametrów fizycznych, właściwości fazowych (PVT) oraz szczegółowe analizy składu występujących tam gazów ziemnych. Duże znaczenie ze względów ekologicznych i bezpieczeństwa pracy ma oznaczenie obecnych w gazie składników toksycznych, głównie siarkowodoru, a także tlenu i ditlenku węgla oraz rtęci.

Głównymi składnikami, na których opiera się klasyfikacja jakościowa gazów ziemnych w czerwonym spągowcu, są metan i azot. Do gazów metanowych zalicza się gazy zawierające metan w ilości powyżej 75% obj., w gazach metanowo-azotowych metan stanowi 75÷50%, a w azotowo-metanowych 50÷25%. W gazach azotowych dominuje azot, a kon-

centracja metanu nie przekracza 25%. W składzie objętościowym gazu ziemnego rejonu niecki poznańskiej węglowodory zajmują przeszło 75% (przeważnie 80÷92%), a azot nie przekracza 25%. W rejonie dolnośląskim zawartość węglowodorów waha się w granicach 50%, a resztę stanowi głównie azot. Na Pomorzu Zachodnim (północna część polskiego basenu czerwonego spągowca) zawartość metanu w gazie spada poniżej 25%, a ilość azotu może przekraczać 75%.

W sąsiadującym z pomorską częścią basenu polskiego basenie północnoniemieckim w składzie gazu ziemnego stężenie azotu osiąga przeszło 90% obj. Tak duża koncentracja wyjaśniana jest poprzez oddziaływanie bardzo wysokich temperatur na materię organiczną, gdyż azot pochodzący z materii organicznej tworzy się w temperaturze wyższej niż metan – dlatego uważa się, że gazy ziemne o wysokiej zawartości azotu powstają w końcowej fazie generacji węglowodorów.

Koncentracja azotu w gazie ziemnym w południowej części polskiego basenu czerwonego spągowca zwiększa się ku brzegom basenu, ale zawartość helu wyraźnie przywiązana jest do jednego obszaru. W rejonie Odolanowa odnotowuje się bardzo wysoką koncentrację helu (osiągającą 0,4÷0,5% obj.) nie tylko w pojedynczych otworach, ale również w całych złożach gazu ziemnego. Jest to jedno z nielicznych miejsc na świecie, w których w instalacji odazotowania gazu ziemnego z jednoczesnym odzyskiem helu i jego skraplaniem uzyskuje się przemysłowe ilości helu. Mamy tutaj do czynienia nie tylko ze stosunkowo wysoką koncentracją helu w gazie, ale także z jego znacznym objętościowo nagromadzeniem. Miejsce wysokiej koncentracji helu pokrywa się z obszarem najwyższego strumienia ciepłego, notowanego w późnym permie, triasie i jurze, w całym polskim basenie czerwonego spągowca [26]. Ponieważ hel (zwłaszcza w tak ogromnych ilościach) może pochodzić tylko z płaszczu lub dolnej części skorupy ziemskiej, tam też należy doszukiwać się faktów potwierdzających teorię wysokotemperaturowego pochodzenia azotu. Z mapy strukturalnej powierzchni Moho w Polsce wynika, że na obszarze, gdzie notuje się obecnie największą ilość helu oraz gdzie w przeszłości permsko-mezozoicznej istniał obszar charakteryzujący się wysokim strumieniem ciepłym, skorupa jest ściśniona do wartości mniejszej niż 30 kilometrów.

Badania koncentracji rtęci w permsko-karbońskich gazach Niżu Polskiego pozwalają na wyodrębnienie trzech stref [33]:

- złoża niecki poznańskiej i północnego skłonu wału wolsztyńskiego o bardzo wysokiej zawartości rtęci, tj. 0,2÷2,0 mg Hg/Nm³;
- złoża zapadliska pomorskiego o zawartości rtęci 0,04÷0,1 mg Hg/Nm³;
- złoża południowej monokliny przedsudeckiej o stosunkowo niskiej zawartości rtęci, tj.: 0,005÷0,020 mg Hg/Nm³.

Tabela 2.1. Parametry wybranych złóż gazu zlokalizowanych w permskich osadach obszaru niecki poznańskiej [44, 52, 7]

Lp.	Nazwa złoża	Miaższość lub wysokość złoża [m]	Porowatość [%]	Przepuszczalność [mD]	Powierzchnia złoża [km ²]	Cisnienie złożowe [MPa]	Temperatura złożowa [°C]	Poziom wody podścielającej [m]
1	Bukowiec	22,23	11,7	47,35	6,62	30,87	102	-2729
2	Ujazd	23,20	11,1	2,51-116,92	11,56	29,65	102	-2628
3	Grodzisk	11,70	11,5	46,40	6,25	30,70	95	-2709
4	Paproć-Cicha Góra	16,44	8,6	11,19	10,87	29,67	98	-2630
5	Sątopy	4,00	11,20	114,20	2,26	31,44	101	-2758
6	Kopanki W	22,0	14,1	386,40	1,60	30,98	97	-2722
7	Porążyn	16,0	12,51	78,40	2,30	31,15	96	-2741
8	Łągwy	13,5	8,74	17,73	1,01	31,95	107	-2858
9	Szewce E	16,0	11,60	64,89	0,56	31,72	101	-2833
10	Piekary	4,0	16,00	18,80	1,16	32,14	96	-2861
11	Strzępiń	4,5	11,10	0,84-1,14	0,39	31,24	100	-2764
12	Niemierzyce	10,5	10,70	12,30	1,04	31,33	95	-2776
13	Strykowo	7,5	14,6	10,20	2,44	32,27	88	-2846
14	Sędzaw	40,0	16,60	80,20	0,82	32,39	97	-2872
15	Borowo	21,5	13,86	58,80	0,92	31,18	95	-2749

Zwiększone koncentracje helu, a także rtęci mogą być świadectwem wglębnych procesów nieorganicznych i degazacji płaszczu Ziemi [59]. Również część azotu, prócz tej związanej i mającej swe źródło w materii organicznej, może pochodzić z tego typu procesów biogenicznych zachodzących w płaszczu Ziemi. Na formowanie się współczesnego składu gazów ziemnych występujących w osadach czerwonego spągowca, w tym w rejonie niecki poznańskiej, wpłynęło szereg czynników, takich jak: typ macierzystej substancji organicznej i stopień jej przeobrażenia, ewentualna wieloetapowość procesów generacyjnych oraz procesy migracji i mieszania się składników pochodzących z różnych źródeł [47].

2.4. Struktura wodonośna niecki poznańskiej jako ogromny rezerwuar rozpuszczonego gazu ziemnego oraz potencjalny obiekt sekwestracyjny

Permskie osady czerwonego spągowca obszaru niecki poznańskiej w dużej mierze wypełnione zostały solankami złożowymi. Współobecne w systemie złożowym gazy węglowodorowe (w mieszaninie z azotem) pozostają w równowadze termodynamicznej z podścielającymi je wodami, w warunkach ciśnienia i temperatury panujących w formacji zbiornikowej, dzięki czemu ogromne ilości gazu zostały rozpuszczone w solance. Na skutek grawitacyjnej separacji i migracji płynów wypełniających pory skały zbiornikowej doszło do akumulacji (wolnego/ nierozpuszczonego w wodzie) gazu w pułapkach zlokalizowanych w przystropowych lokalizacjach osadów saksońskich. Są to obecnie, w większości, wyeksploatowane złoża gazu ziemnego. Główną warstwę gazonośną struktury stanowią utwory czerwonego spągowca, reprezentowane przez osady saksonu i autunu. Skała zbiornikowa generalnie składa się z piaskowców drobno- i średnioziarnistych z domieszką materiału grubszego – ich spoiwo stanowi przeważnie materia węglanowa i krzemionkowa. Od rodzaju spoiwa zależy w znacznym stopniu przepuszczalność i porowatość kolektora, a istotne zróżnicowanie rodzaju spoiwa skutkuje dużymi zmianami własności zbiornikowych skał [53].

Charakteryzując omawiany układ, można stwierdzić, że jest to obecnie ogromna struktura prawie w całości wypełniona wodą z rozpuszczonym w niej gazem, a jej najwyższe wyniesienia morfologiczne stanowią strefy gazowe w postaci eksploatowanych złóż. Głębokie solankowe poziomy wodonośne zalegające w warstwach permu na obszarze niecki poznańskiej rozciągają się na powierzchni ok. 5000 km² (rys. 2.2). Megaakifer nasycony

jest rodzimym gazem ziemnym, a jego szczelność potwierdzona jest występowaniem wielu akumulacji gazu.

W ponad 50 odwiertach, którymi dowiercono się do warstw wodonośnych niecki w początkowej fazie rozpoznania obszaru, stwierdzono (próbnikami złoża) nasycenie wód złożowych gazem węglowodorowym. Już w latach 70. XX wieku polscy geolodzy, znając ten fakt, zastanawiali się nad znalezieniem możliwości wydobycia ogromnych ilości „uwięzionego” gazu. Dzięki przeprowadzonym wówczas badaniom ustalono, że w 1 m³ solanki rozpuszczone jest średnio ok. 2,4 Nm³ gazu ziemnego (w zależności od mineralizacji, ciśnienia i temperatury złożowej). Wyliczono, że na powierzchni 5000 km² zasoby gazu rozpuszczonego w solankach omawianej struktury mogą dochodzić nawet do 120 mld Nm³ [21]. Do obliczeń przyjęto następujące założenia (wartości uśrednione):

- powierzchnia struktury: ok. 5000 km² (szer. 45 km, dł. 115 km);
- miąższość warstw wodonośnych: 100 m (przeważnie 10÷600 m);
- porowatość: 10%;
- temperatura złożowa: 80°C;
- ciśnienie złożowe: 30 MPa;
- rozpuszczalność gazu w solance: 2,4 Nm³/m³.

Nasycenie solanki gazem jest niejednorodne na przestrzeni całej warstwy wodonośnej, może także maleć wraz z głębokością, więc rzeczywista ilość gazu węglowodorowego rozpuszczonego w solankach może być zredukowana do ok. 100 mld Nm³, co i tak jest porównywalne z wydobywalnymi zasobami gazu ziemnego w Polsce, tj. ok. 140 mld Nm³ [71].

Struktura wodonośna niecki poznańskiej i współistniejących w równowadze złóż gazu może być symbolicznie przyrównana do ogromnego syfonu prawie całkowicie wypełnionego wodą nasyconą gazem. Stosunkowo niewielka przestrzeń w syfonie „nad wodą”, a wypełniona sprężonym gazem, symbolizuje złożo gazu ziemnego powstałe w wyniku jego akumulacji w najwyższych, przystropowych obszarach porowatych i przepuszczalnych osadach czerwonego spągowca niecki.

W niedalekim sąsiedztwie niecki i zlokalizowanych na niej złóż węglowodorów znajduje się aglomeracja poznańska, licząca ok. 1 mln mieszkańców [49]. Na tym terenie zlokalizowanych jest wielu emitentów CO₂, w tym największy – Zespół Elektrociepłowni Poznańskich. Odpadowe gazy kwaśne z elektrociepłowni mogłyby być przechwytywane i transportowane na wybrane obszary istniejących, w dużej mierze już wyeksploatowanych, kopalń gazu ziemnego. Sprzyjają temu istniejące korytarze, którymi przebiegają rurociągi transportujące gaz ze złóż w kierunku Poznania. Stwarzają one ułatwienie w projektowaniu rurociągu transportującego CO₂ w rejon podziemnego składowania. Następnie gaz

kwaśny (głównie strumień CO₂) byłby sprężany i zatłaczany bezpośrednio do głębokich solankowych poziomów wodonośnych. Procesowi temu sprzyja duża ilość wykonanych na tym obszarze odwiertów wraz z siecią rurociągów i urządzeń zagospodarowania powierzchniowego złóż. Bardzo istotną zaletą struktury wodonośnej niecki jest jej szczelność, zweryfikowana na przestrzeni milionów lat dzięki istnieniu wielu złóż gazu ziemnego w jej lokalnych wyniesieniach. Warunek pełnej potwierdzonej szczelności struktury magazynowej jest podstawowy w rozumieniu geologicznej sekwestracji CO₂. Rejon niecki jako potencjalny magazyn sekwestracyjny jest także bardzo korzystny z punktu widzenia ekonomii przedsięwzięcia deponowania tam CO₂. Mianowicie obszar ten został rozwiercony setkami odwiertów, które po części można wykorzystać w projekcie sekwestracji – co umożliwi osiągnięcie oszczędności na wierceniach, które musiałyby być wykonane na nowej, nierozpoznanej strukturze.

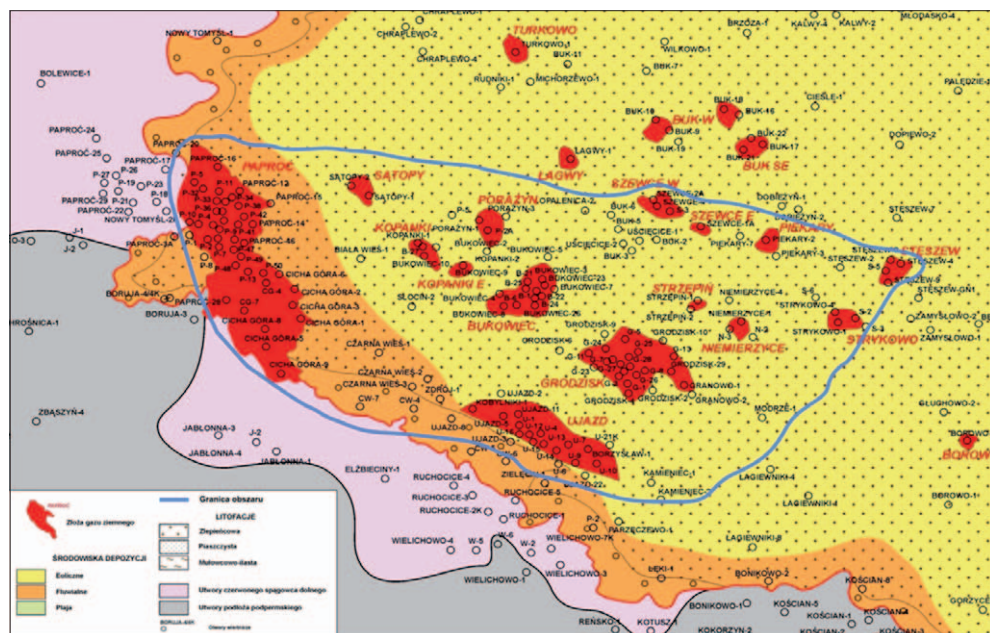
Mimo że obszar występowania osadów czerwonego spągowca w Polsce jest znaczny, to w większej części kraju jego parametry jako skały kolektorskiej (porowatość, przepuszczalność, miąższość) są słabo rozpoznane, co wyklucza sprawne zastosowanie tam procesu geologicznego składowania CO₂. Najlepiej rozpoznane utwory czerwonego spągowca znajdują się w zachodniej części Polski, ponieważ usytuowanych jest tam szereg złóż węglowodorów. Dzięki temu znana jest stratygrafia oraz własności warstw, które mogą posłużyć do sekwestracji.

W ciągu ostatnich kilku lat w Instytucie Nafty i Gazu – Państwowym Instytucie Badawczym prowadzono badania nad możliwością sekwestracji ditlenku węgla w warstwach wodonośnych wypełniających strukturę niecki poznańskiej. Do dokładniejszych analiz [35] wybrany został fragment niecki zawierający się w granicach: od północy po złoża Sątopy, Szewce, Piekary; od wschodu po złoża Stęszew i Strykowo; od południa i zachodu naturalną granicę stanowi wał wyniesienia wolsztyńskiego (rys. 2.4). Wyżej zdefiniowany obszar obejmuje następujące złoża gazu: Bukowiec, Ujazd, Grodzisk, Paproć–Cicha Góra, Sątopy, Kopanki, Porażyn, Szewce, Piekary, Strzępiń, Niemierzyce, Strykowo, Stęszew.

Wytypowany południowo-zachodni fragment niecki poznańskiej ograniczony jest od zachodu i południa wałem wolsztyńskim. W kierunku północno-wschodnim nasycone wodą utwory czerwonego spągowca zanurzają się do głębokości 5 tys. metrów, co również stanowi swego rodzaju zamknięcie, gdyż zatłaczane gazy mają tendencję do grawitacyjnej migracji ku górze. Całość przykryta jest szczelnie ewaporatami cechsztyńskimi [70]. Wydzielony fragment może więc tworzyć dogodną strukturę dla potrzeb sekwestracji CO₂.

Zgodnie z tezą prezentowanej pracy oczekiwane jest zjawisko polegające na tym, że ditlenek węgla, z racji swej ok. 10-krotnie wyższej rozpuszczalności w solance niż gaz ziemny, będzie desorbował rozpuszczony w wodzie gaz metanowy, który pod pewnymi warunkami

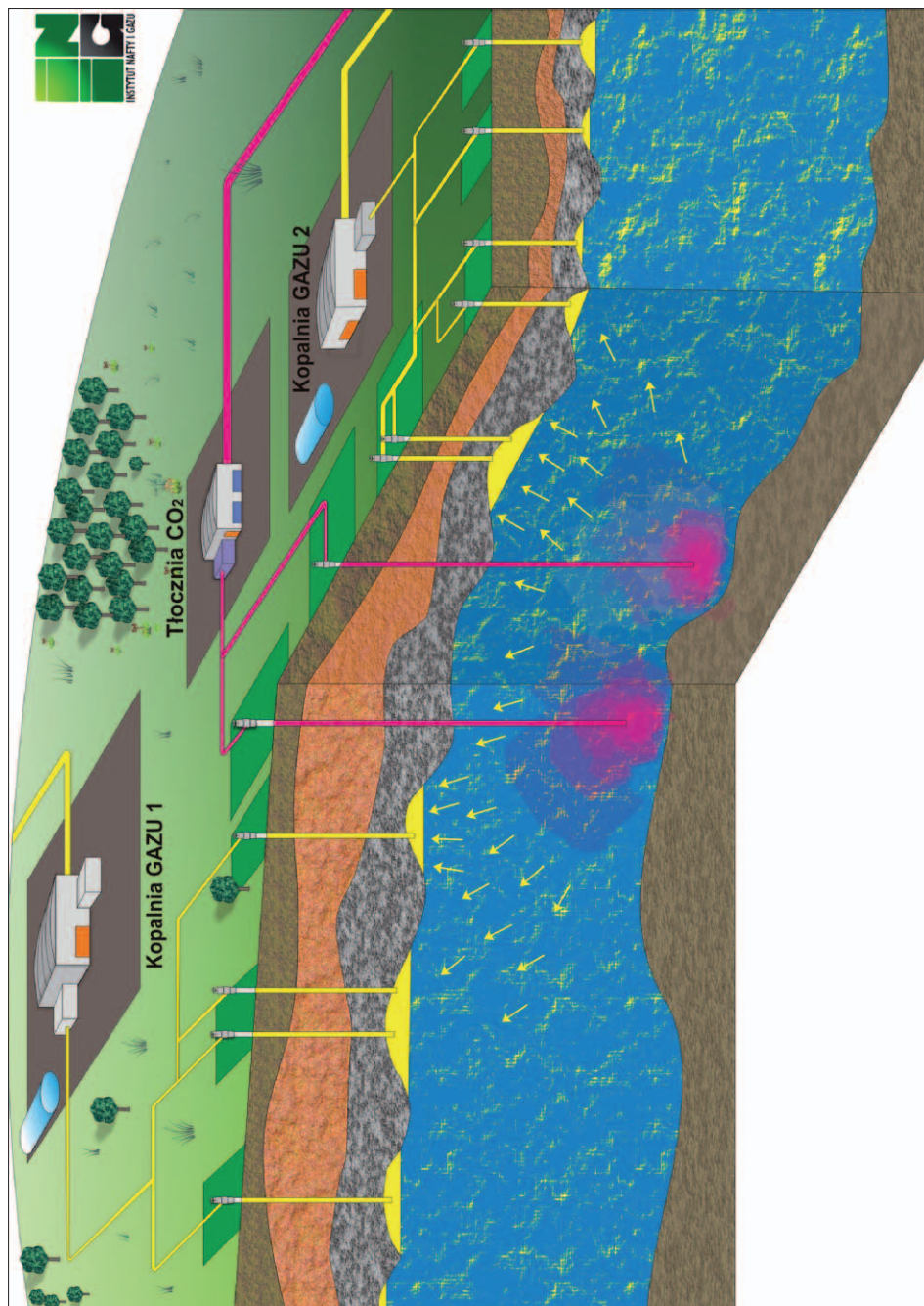
zacznie migrować grawitacyjnie, wpływając do pułapek będących obecnymi złożami gazu, lub w szczególnych przypadkach może uformować nowe złoża. Koncepcję pozyskiwania pozabilansowych zasobów gazu przedstawiono na rysunku 2.5.



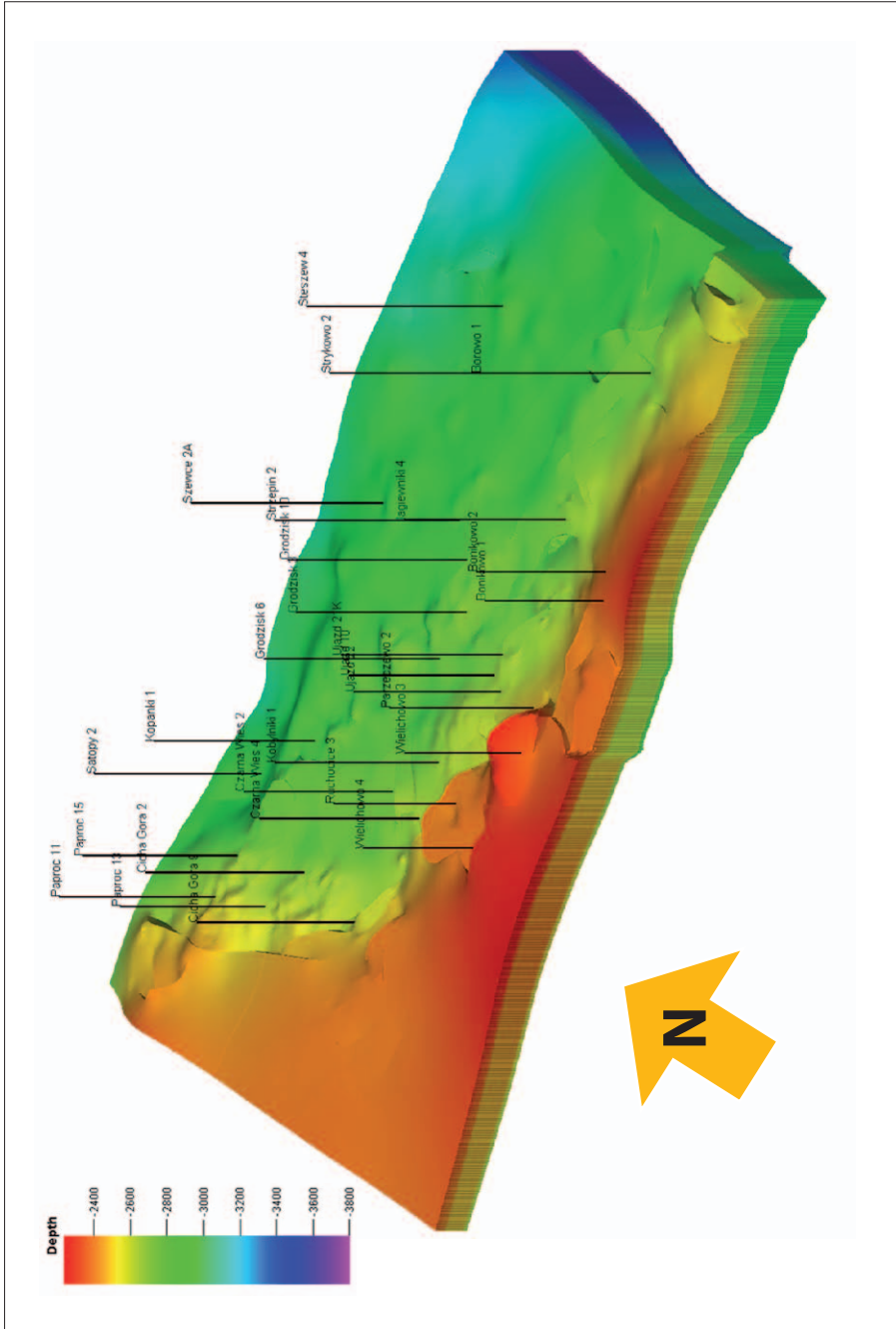
Rys. 2.4. Granice obszaru niecki poznańskiej wydzielone dla potrzeb projektu składowania CO₂ [35, 3]

Na kolejnych rysunkach przedstawiono model strukturalno-geologiczny wyżej omawianego fragmentu niecki poznańskiej. Grafiki ilustrują duże zróżnicowanie topografii terenu permskich osadów w prezentowanym rejonie oraz znaczny upad warstw w kierunku północno-wschodnim, co najbardziej widoczne jest na załączonych przekrojach (rys. 2.8–2.10).

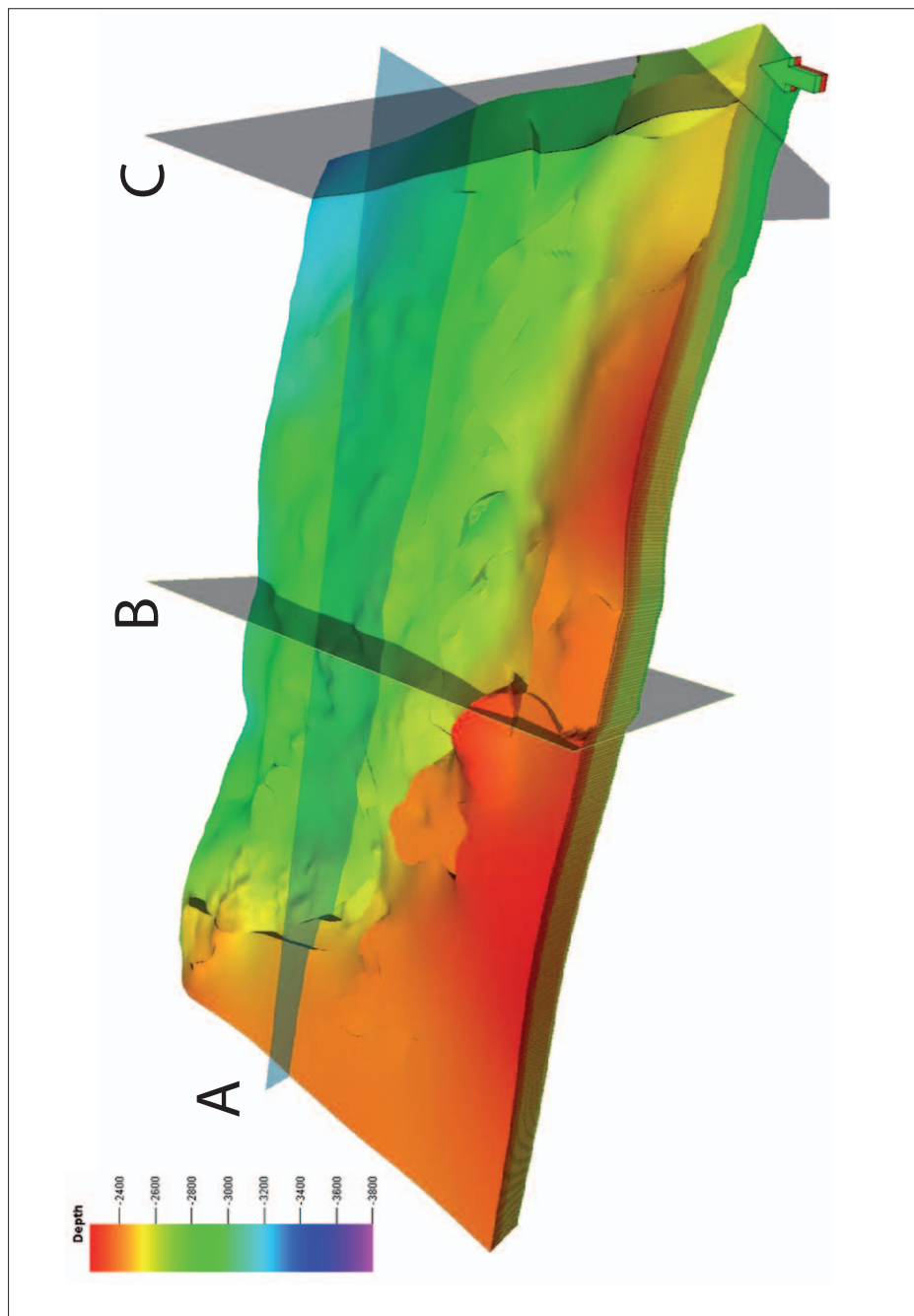
Można również zaobserwować duże zróżnicowanie przepuszczalności w wydzielonych warstwach modelu geologicznego oraz doskonałe uszczelnienie (w postaci uskoków i obszarów o zerowej przepuszczalności) w południowym i zachodnim rejonie omawianego obszaru (np. okolice złoża Paproć–Cicha Góra; przekrój „A”). Zagwarantowanie pełnej szczelności warstw zbiornikowych jest szczególnie ważne w kontekście geologicznego składowania CO₂.



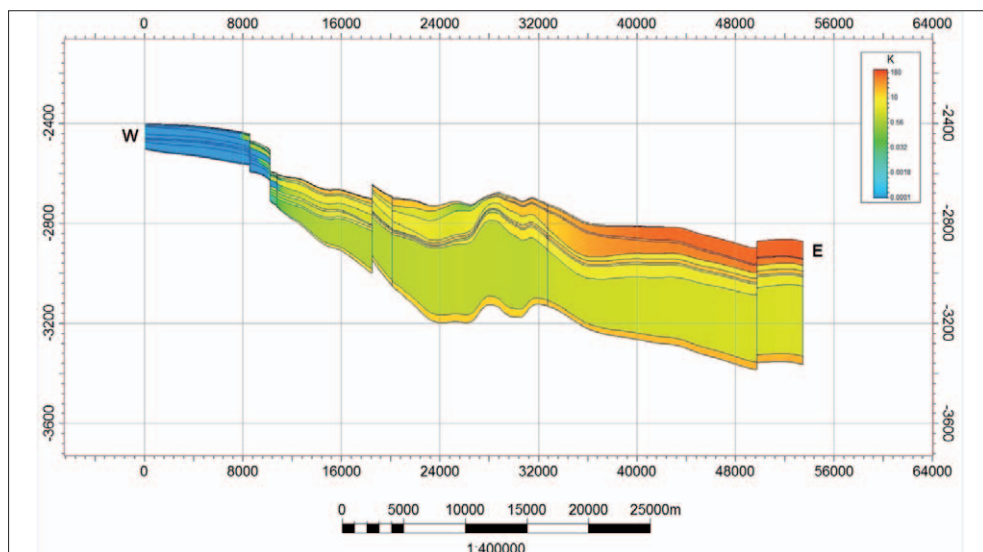
Rys. 2.5. Koncepcja pozyskiwania pozabilansowych źródeł gazu ziemnego przy udziale sekwestracji CO₂ – niecka poznańska [74]



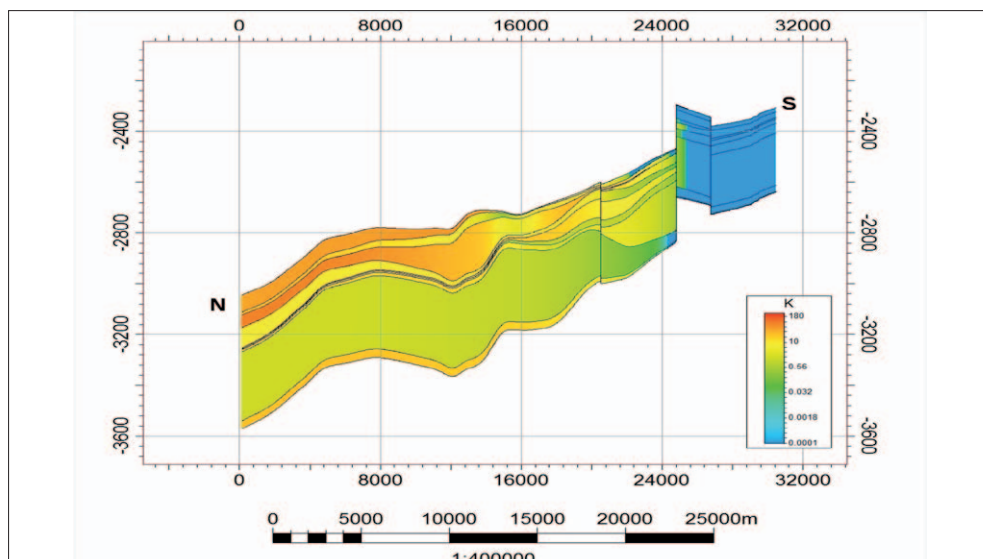
Rys. 2.6. Model strukturalno-geologiczny fragmentu niecki poznańskiej wydzielonego dla potrzeb projektu geologicznego składowania CO₂ [35, 68]



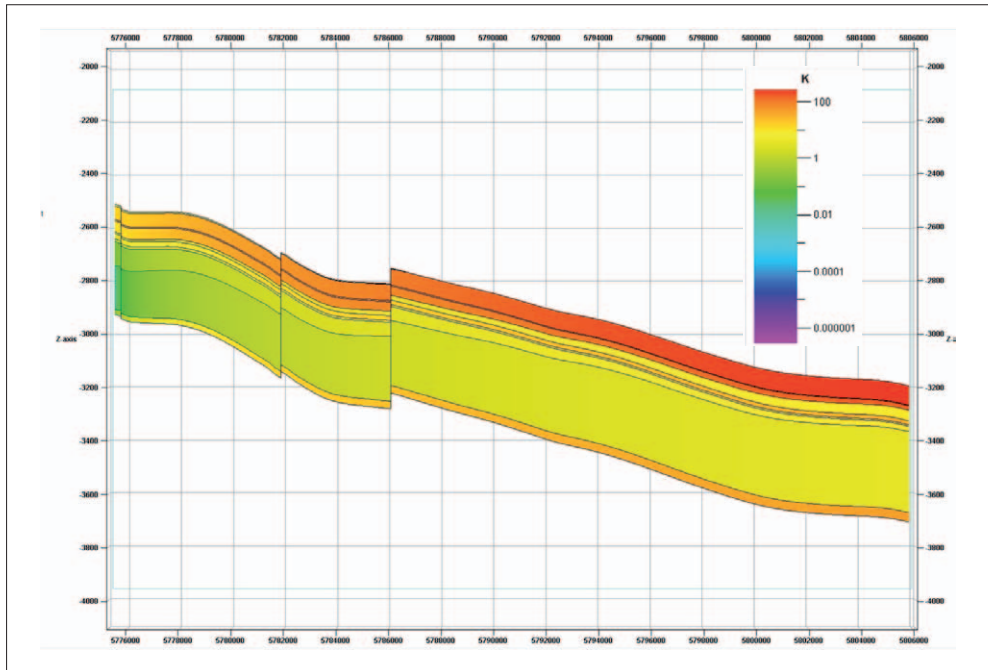
Rys. 2.7. Model południowo-zachodniej części niecki poznańskiej z naniesionymi lokalizacjami przekrojów pionowych [35, 68]



Rys. 2.8. Przekrój „A” (W-E) obrazujący zmiany przepuszczalności skały złożowej w wydzielonych warstwach modelu [35, 68]



Rys. 2.9. Przekrój „B” (N-S) obrazujący zmiany przepuszczalności skały złożowej w wydzielonych warstwach modelu [35, 68]



Rys. 2.10. Przekrój „C” (N-S) obrazujący zmiany przepuszczalności skały złożowej w wydzielonych warstwach modelu [35, 68]

3. Określenie właściwości fazowych mieszanin strefy przejściowej powstałych podczas procesu zatłaczania CO₂ do poziomów solankowych nasyconych gazem ziemnym

Badania właściwości fazowych rodzimych gazów węglowodorowych nasycających zasolone poziomy wodonośne, ditlenku węgla oraz kolejnych mieszanin obu gazów niezbędne są do poznania parametrów/charakterystyki wymienionych płynów w złożowych warunkach ciśnienia i temperatury. Wyniki badań PVT umożliwiają zaprojektowanie, przeprowadzenie oraz dokonanie poprawnego bilansu procesu wypierania gazu rodzimego przez zatłaczany CO₂.

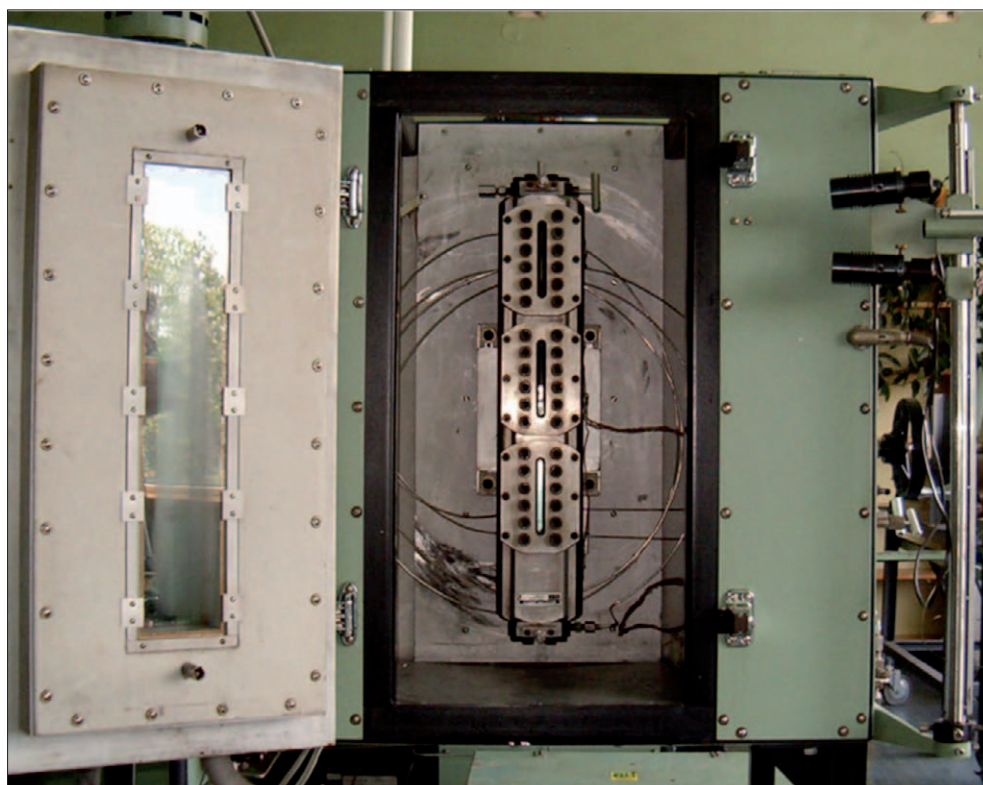
3.1. Aparatura badawcza

Badania prowadzono na dwóch rodzajach aparatury PVT do badań właściwości fazowych płynów złożowych. Pierwsza z nich to starszy zestaw rtęciowy firmy Ruska, powszechnie stosowany w laboratoriach PVT, którego istotną część stanowią dwie komory ciśnieniowe (jedna do badań gazu kondensatowego, druga do badań ropy złożowej) umieszczone w sterowanych łaźniach termostatycznych [81]. Komory te połączone są z pompami rtęciowymi układem połączeń ciśnieniowych, dzięki czemu możliwa jest zmiana objętości badanej próbki poprzez zatłaczanie lub odbiór rtęci z komory. Użyta komora ciśnieniowa do badań gazu kondensatowego posiada maksymalną objętość $V = 488 \text{ cm}^3$. Wbudowane we frontową ściankę komory trzy szklane okienka/wzierniki umożliwiają obserwację próbki

podczas prowadzenia badań (rys. 3.1). Pomiaru bieżących objętości próbki dokonuje się za pomocą odczytów na katetometrze, natomiast pomiarów ciśnienia – na włączonych w układ ciśnieniowy precyzyjnych manometrach. Badania można prowadzić w szerokim zakresie temperatur (4–180°C), maksymalne ciśnienie robocze komory wynosi 700 bar. Opisywana komora, tzw. kondensatowa, może pracować zarówno w stanie statycznym, jak i dynamicznym. Poruszanie komorą poprzez przechylenie umożliwia mieszanie faz i skutecznie przyspiesza osiągnięcie równowagi fazowej w poszczególnych punktach badawczych. Rtęciowy zestaw PVT wykorzystano podczas badań kontaktowych (ang. *constant mass expansion* – test CME) gazu złożowego z odwiertów Ujazd-15 oraz Porążyn-2A.

Badania wykonywane były w następujących temperaturach:

- Ujazd-15 ($T_1 = 22^\circ\text{C}$, $T_2 = 60^\circ\text{C}$, $T_3 = T_{z1} = 100^\circ\text{C}$);
- Porążyn-2A ($T_1 = 21^\circ\text{C}$, $T_2 = 60^\circ\text{C}$, $T_3 = T_{z1} = 100^\circ\text{C}$).



Rys. 3.1. Trójkrotna komora ciśnieniowa w zestawie do badań PVT [81]

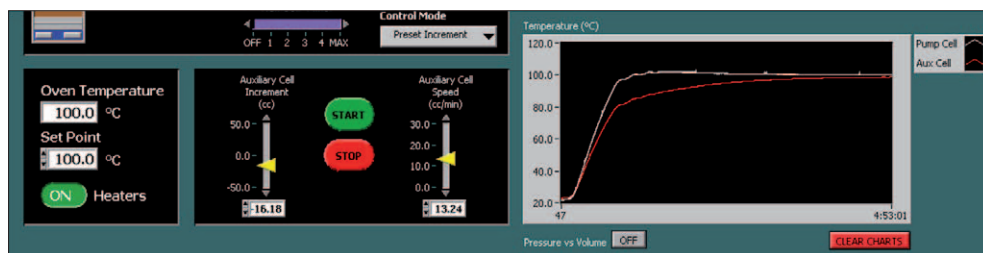
Większość badań przeprowadzono na nowoczesnej, beztrzęciowej aparaturze PVT firmy Chandler Engineering – Model 2370-3000-G PVT System (rys. 3.2 i 3.3). Zestaw ten jest używany w Zakładzie Badania Złóż Ropy i Gazu w INiG – PIB od 2003 r.



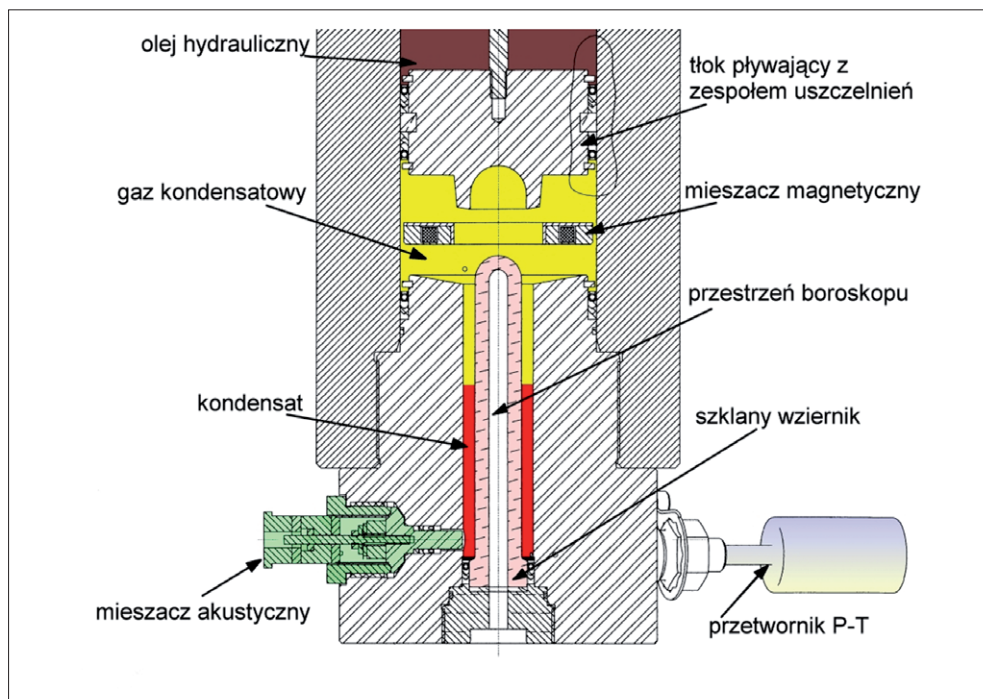
Rys. 3.2. Aparatura do badań PVT firmy Chandler Engineering – Model 2370-3000-G PVT System [81]

Zasadniczym elementem beztrzęciowej aparatury PVT są dwie komory ciśnieniowe umieszczone w powietrznej łaźni termostatycznej.

Komora ciśnieniowa przeznaczona do badań gazu kondensatowego (ang. *gas condensate cell*) cechuje się maksymalną objętością 1040 cm³ i zaprojektowana jest z myślą o prowadzeniu badań do ciśnienia ok. 137,9 MPa (tj. 20 000 psia) i temperatury 204°C (400°F).



Rys. 3.3. Panel sterowania z graficznym wglądem w proces osiągnięcia zadanej temperatury [81]



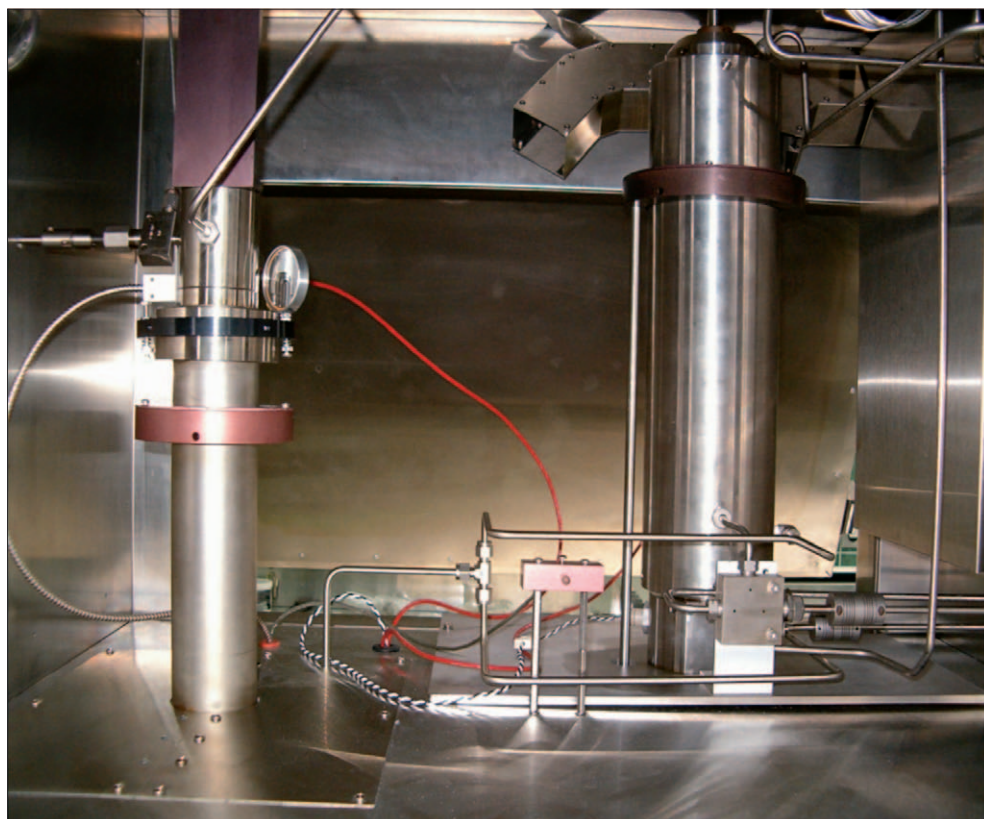
Rys. 3.4. Konstrukcja dolnej części komory kondensatowej [81]

Pomiaru temperatury i ciśnienia dokonuje się jednocześnie poprzez przetwornik, którego czujniki (ciśnienia i temperatury) zintegrowano w odpornej kompaktowej obudowie. Dokładność pomiaru temperatury wynosi $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, a pomiaru ciśnienia $\pm 0,5$ bar.

Dolna część komory ciśnieniowej zbudowana jest z odpornego na wysokie temperatury i ciśnienia szkła kwarcowego pełniącego rolę wziernika (rys. 3.4). Konstrukcja taka umożliwia obserwację procesów kondensacji/odparowania, wizualną detekcję punktu rosy oraz pozwala na precyzyjny pomiar objętości fazy gazowej i ciekłej.

Komora ciśnieniowa posadowiona jest na stałe w łaźni termostatycznej (rys. 3.5) i niemożliwe jest jej poruszanie w celu mieszania i tym samym przyspieszenia osiągnięcia stabilizacji badanej próbki. W związku z powyższym komora kondensatowa wyposażona jest w dwa systemy mieszające: magnetyczny i akustyczny.

Efektywne mieszanie próbki przyspiesza osiągnięcie stabilizacji i pozwala na skrócenie czasu badań.



Rys. 3.5. Komora ropna (z lewej) i kondensatowa (z prawej) w powietrznej łaźni termostatycznej aparatury PVT [81]

3.2. Rodzimy gaz złożowy Ujazd-15

Próbkę gazu złożowego pochodzącego z odwiertu Ujazd-15 wprowadzono do komory badawczej aparatury PVT. Przeprowadzono badania kontaktowe – rozprężania stałej masy gazu (test CME). Temperatura badań wynosiła kolejno: $T_1 = 22^\circ\text{C}$, $T_2 = 60^\circ\text{C}$, $T_3 = T_{zł} = 100^\circ\text{C}$. Dla każdej temperatury wyznaczono relacje ciśnienia w funkcji objętości próbki, wyliczono współczynniki objętościowe, współczynniki ściśliwości gazu, zweryfikowano stan fazowy, tzn. sprawdzono, czy nie zachodzi proces kondensacji cieczy z gazu na którymś z kroków badawczych. Uzyskane rezultaty badań zestawiono w tabelach 3.1–3.3 oraz zilustrowano na rysunkach 3.6–3.7.

Tabela 3.1. Badanie kontaktowe gazu złożowego z odwiertu Ujazd-15 – test CME
($T = 22^\circ\text{C} \pm 0,2^\circ\text{C}$)

Ciśnienie	Objętość próbki	Współczynnik objętościowy	Współczynnik ściśliwości
P [$\pm 0,5$]	V [$\pm 0,1$]	B_g [$\pm 5E-05$]	Z [$\pm 5E-03$]
bara	cm ³	m ³ /Nm ³	–
7,2	359,99	0,1509	0,996
16,3	157,75	0,0661	0,983
28,1	89,17	0,0374	0,962
35,5	69,56	0,0292	0,946
48,8	49,95	0,0209	0,935
59,9	40,04	0,0168	0,920
77,5	30,53	0,0128	0,907
110,3	20,92	0,0088	0,885
149,3	15,33	0,0064	0,877
198,5	11,90	0,0050	0,906
239,6	10,24	0,0043	0,940
267,7	9,55	0,0040	0,980
297,1	8,96	0,0038	1,021

Uwagi dotyczące wyników badań podanych w tabelach 3.1–3.8:

- niepewność wyznaczenia wartości ciśnienia, objętości i temperatury oszacowano na podstawie klasy dokładności urządzeń pomiarowych;
- niepewność wyznaczenia współczynnika objętościowego (B_g) oraz współczynnika ściśliwości gazu (Z) oszacowano na podstawie formuły na propagację błędu.

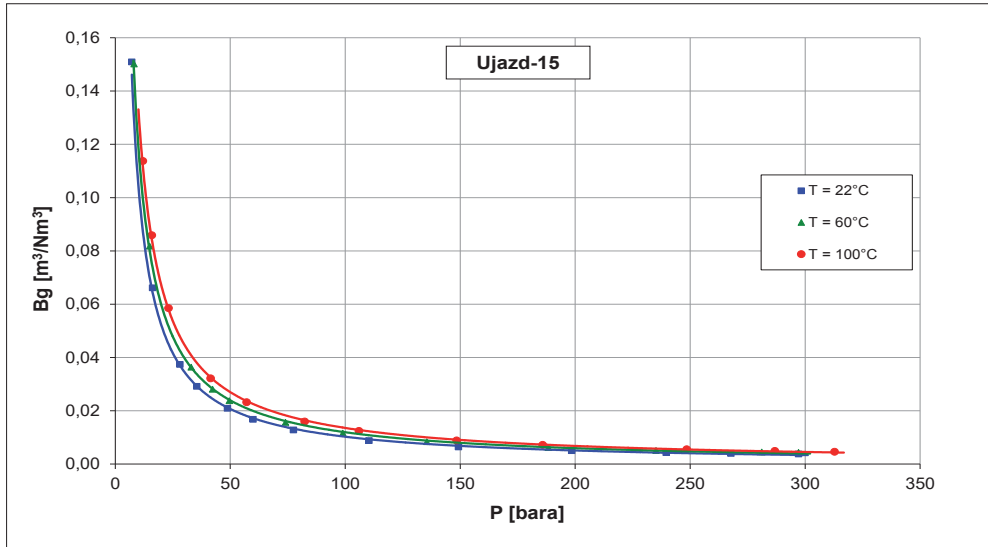
**Tabela 3.2. Badanie kontaktowe gazu złożowego z odwiertu Ujazd-15 – test CME
($T = 60^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$)**

Ciśnienie	Objętość próbki	Współczynnik objętościowy	Współczynnik ściśliwości
P [$\pm 0,5$]	V [$\pm 0,1$]	B_g [$\pm 5E-05$]	Z [$\pm 5E-03$]
bara	cm ³	m ³ /Nm ³	–
8,2	358,21	0,1501	0,997
15,0	195,10	0,0818	0,991
33,0	86,72	0,0363	0,972
42,4	66,89	0,0280	0,961
49,6	56,69	0,0238	0,954
74,0	37,34	0,0157	0,938
98,9	27,62	0,0116	0,927
135,5	19,97	0,0084	0,918
188,3	14,63	0,0061	0,934
235,2	12,09	0,0051	0,964
281,2	10,70	0,0045	1,020
297,1	10,30	0,0043	1,038

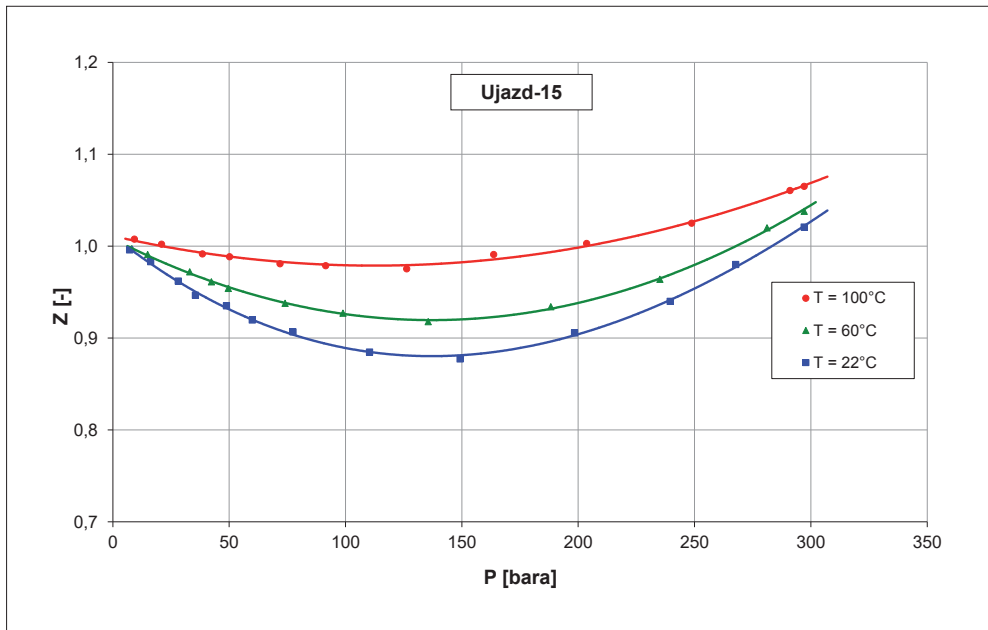
**Tabela 3.3. Badanie kontaktowe gazu złożowego z odwiertu Ujazd-15 – test CME
(T = 100°C ±0,2°C)**

Ciśnienie	Objętość próbki	Współczynnik objętościowy	Współczynnik ściśliwości
P [±0,5]	V [±0,1]	B _g [±5E-05]	Z [±5E-03]
bara	cm ³	m ³ /Nm ³	–
9,3	357,16	0,1497	1,008
20,9	158,12	0,0663	1,002
38,5	84,96	0,0356	0,992
50,2	65,01	0,0272	0,988
71,9	45,06	0,0189	0,981
91,5	35,33	0,0148	0,979
126,3	25,50	0,0107	0,975
163,7	19,99	0,0084	0,991
203,7	16,26	0,0068	1,003
248,8	13,61	0,0057	1,025
291,1	12,03	0,0050	1,061
297,1	11,84	0,0050	1,065

Na żadnym z punktów badawczych, tzn. w zakresie temperatury 22÷100°C i ciśnienia 7÷300 bara (bar absolutny – ciśnienie zmierzone względem próżni), nie odnotowano kondensacji i obecności fazy ciekłej w komorze badawczej. Ze względu na powyższe oraz biorąc pod uwagę skład badanej mieszaniny węglowodorowej (metan – 82% mol; azot – 17% mol; frakcje C₂₊ < 1% mol), należy stwierdzić, iż gaz z odwiertu Ujazd-15 jest gazem suchym – w rozumieniu typu płynu złożowego [39].



Rys. 3.6. Współczynnik objętościowy gazu B_g – badania kontaktowe [80]



Rys. 3.7. Współczynnik ścisłości gazu Z – badania kontaktowe [80]

3.3. Rodzimy gaz złożowy Porążyn-2A

Próbkę gazu złożowego pobranego z odwiertu Porążyn-2A wprowadzono do komory badawczej aparatury PVT. Wykonano, jak poprzednio, badania kontaktowe (test CME). Temperatura prowadzenia badań wynosiła kolejno: $T_1 = 21^\circ\text{C}$, $T_2 = 60^\circ\text{C}$, $T_3 = T_{zi} = 100^\circ\text{C}$. Dla każdej wartości temperatury wyznaczono relacje ciśnienia w funkcji objętości próbki, wyliczono współczynniki objętościowe, współczynniki ściśliwości gazu oraz zweryfikowano stan fazowy pod kątem kondensacji fazy ciekłej.

Uzyskane rezultaty badań zestawiono w tabelach 3.4–3.6 oraz zilustrowano na rysunkach 3.8–3.9.

Tabela 3.4. Badanie kontaktowe gazu złożowego z odwiertu Porążyn-2A – test CME
($T = 21^\circ\text{C} \pm 0,2^\circ\text{C}$)

Ciśnienie	Objętość próbki	Współczynnik objętościowy	Współczynnik ściśliwości
$P [\pm 0,5]$	$V [\pm 0,1]$	$B_g [\pm 5E-05]$	$Z [\pm 5E-03]$
bara	cm ³	m ³ /Nm ³	–
9,4	309,69	0,1128	0,975
13,9	208,60	0,0760	0,969
31,6	87,89	0,0320	0,927
40,0	68,28	0,0249	0,913
55,5	48,67	0,0177	0,902
88,8	29,16	0,0106	0,864
129,2	19,55	0,0071	0,843
209,7	12,49	0,0046	0,875
251,8	10,83	0,0039	0,911
312,8	9,45	0,0034	0,988

Tabela 3.5. Badanie kontaktowe gazu złożowego z odwiertu Poróżyn-2A – test CME (T = 60°C ±0,2°C)

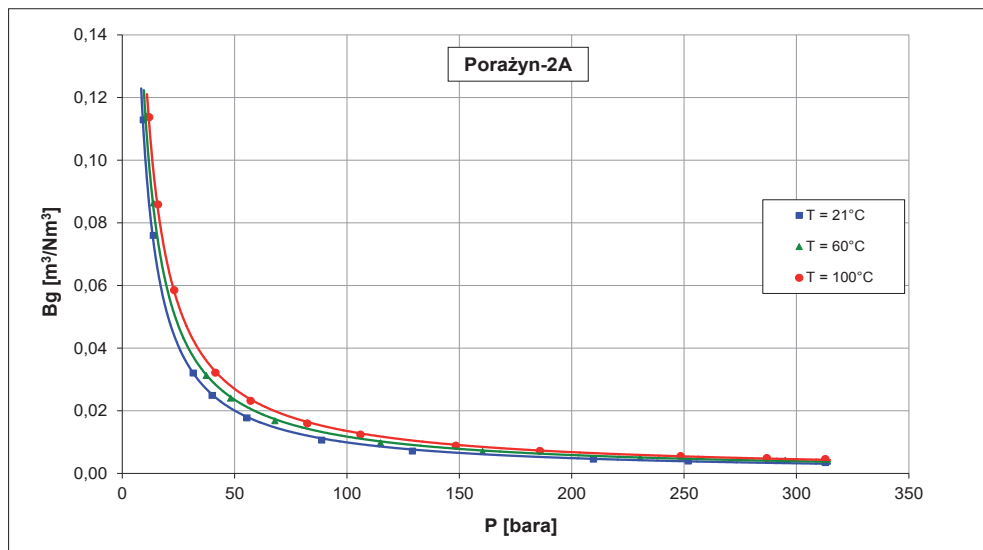
Ciśnienie	Objętość próbki	Współczynnik objętościowy	Współczynnik ściśliwości
P [±0,5]	V [±0,1]	B _g [±5E-05]	Z [±5E-03]
bara	cm ³	m ³ /Nm ³	–
10,6	312,90	0,1140	0,981
14,0	237,02	0,0864	0,975
37,4	85,74	0,0312	0,945
48,2	66,01	0,0241	0,939
68,0	46,18	0,0168	0,925
114,9	26,84	0,0098	0,910
160,3	19,28	0,0070	0,912
230,5	13,78	0,0050	0,937
295,0	11,43	0,0042	0,994
312,8	10,96	0,0040	1,011

Podobnie jak w przypadku gazu Ujazd-15 – w żadnym z punktów badawczych, w zakresie temperatury 21 ÷ 100°C i ciśnienia 7 ÷ 300 bara, nie odnotowano obecności fazy ciekłej w komorze badawczej. Ze względu na powyższe oraz biorąc pod uwagę skład badanej mieszaniny (metan – 80% mol; azot – 19% mol; frakcje C₂₊ < 1% mol), należy stwierdzić, iż gaz z odwiertu Poróżyn-2A jest gazem suchym – w rozumieniu typu płynu złożowego [39].

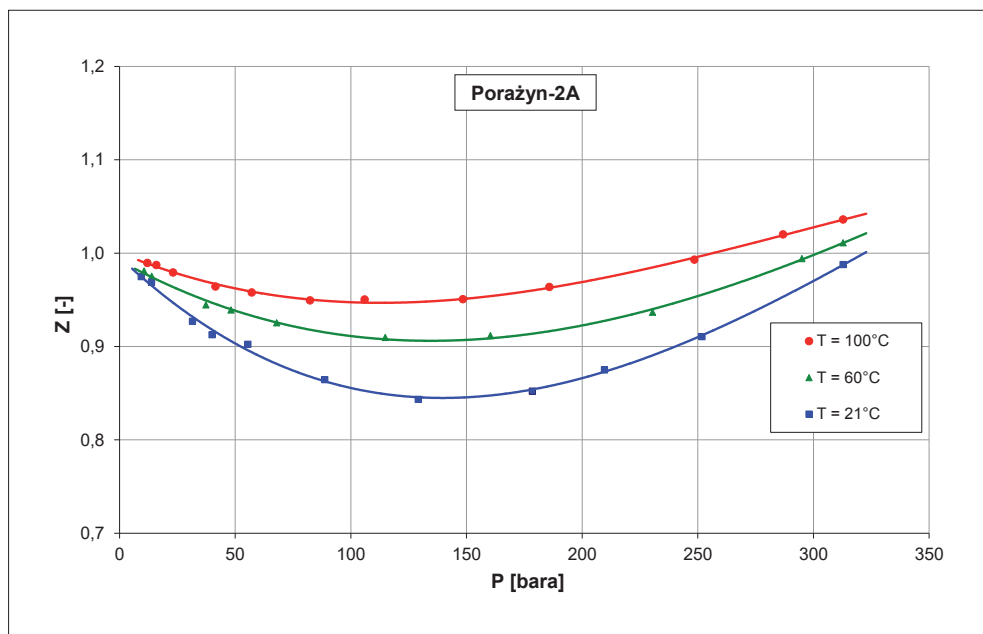
Brak wykraplania cieczy upraszcza badania przygotowawcze oraz ułatwia samo badanie zjawisk wypierania rodzimego gazu przez zatłaczany CO₂.

**Tabela 3.6. Badanie kontaktowe gazu złożowego z odwiertu Porążyn-2A – test CME
(T = 100°C ±0,2°C)**

Ciśnienie	Objętość próbki	Współczynnik objętościowy	Współczynnik ściśliwości
P [±0,5]	V [±0,1]	B _g [±5E-05]	Z [±5E-03]
bara	cm ³	m ³ /Nm ³	–
12,0	312,11	0,1137	0,989
15,9	235,64	0,0859	0,987
23,2	160,53	0,0585	0,979
41,5	88,29	0,0322	0,964
57,2	63,63	0,0232	0,958
82,4	43,78	0,0160	0,949
106,0	34,05	0,0124	0,950
148,5	24,32	0,0089	0,951
185,8	19,70	0,0072	0,964
248,5	15,18	0,0055	0,993
286,8	13,51	0,0049	1,020
312,8	12,58	0,0046	1,036



Rys. 3.8. Współczynnik objętościowy gazu B_g – badania kontaktowe [80]



Rys. 3.9. Współczynnik ścisłości gazu Z – badania kontaktowe [81]

3.4. Ditlenek węgla – CO₂

Próbkę ditlenku węgla wprowadzono do komory badawczej bezrządczej aparatury PVT. Wykonano badania kontaktowe (test CME) w temperaturze: $T_1 = 30^\circ\text{C}$, $T_2 = T_{zi} = 100^\circ\text{C}$ (temperatura złożowa odpowiadająca płynom z odwiertu Ujazd-15 i Porążyn-2A). Dla każdej wartości temperatury wyznaczono relacje ciśnienia w funkcji objętości próbki, wyliczono współczynniki objętościowe i współczynniki ściśliwości gazu. W temperaturze 30°C przejście przez krzywą wrzenia/kondensacji występuje przy ciśnieniu ok. 72 bara. Przemiana fazowa widoczna jest na sporządzonych wykresach, gdzie graficznie przedstawiono wyniki badań.

Podczas badań prowadzonych w temperaturze 100°C CO₂ znajduje się w obszarze nadkrytycznym „gęsty gaz”. Odróżnienie fazy ciekłej od gazowej nie jest możliwe.

Uzyskane rezultaty badań zestawiono w tabelach 3.7–3.8 oraz na rysunkach 3.10–3.11.

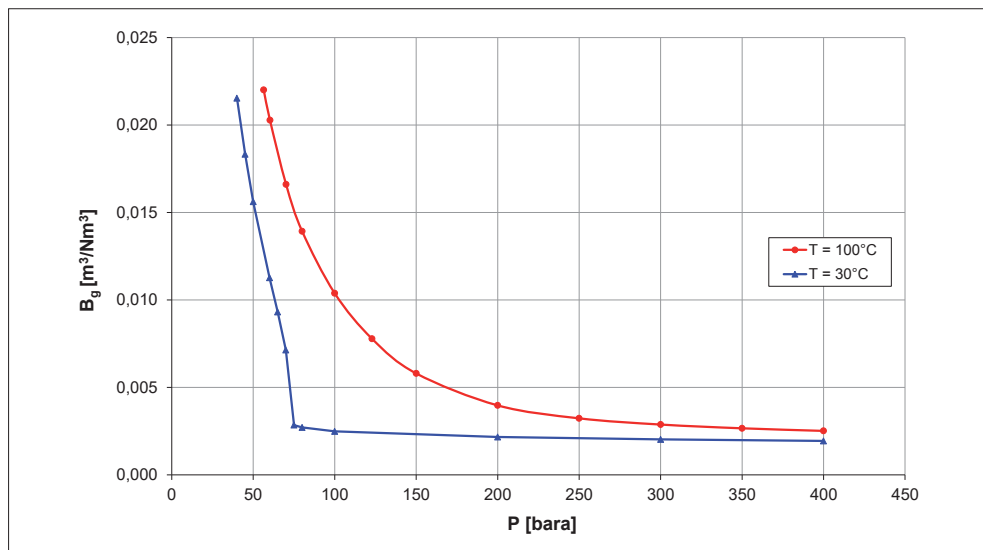
Tabela 3.7. Badanie kontaktowe ditlenku węgla (CO₂ techniczny) – test CME
($T = 30^\circ\text{C} \pm 0,2^\circ\text{C}$)

Ciśnienie	Objętość próbki	Współczynnik objętościowy	Współczynnik ściśliwości
P [$\pm 0,5$]	V [$\pm 0,1$]	B _g [$\pm 5\text{E-}05$]	Z [$\pm 5\text{E-}03$]
bara	cm ³	m ³ /Nm ³	–
400,0	36,584	0,00194	0,691
300,0	38,256	0,00203	0,542
200,0	40,790	0,00217	0,385
100,0	46,900	0,00249	0,221
80,0	51,112	0,00271	0,193
75,0	53,637	0,00285	0,190
70,0	134,500	0,00714	0,444
65,0	175,463	0,00932	0,538
60,0	212,327	0,01127	0,601

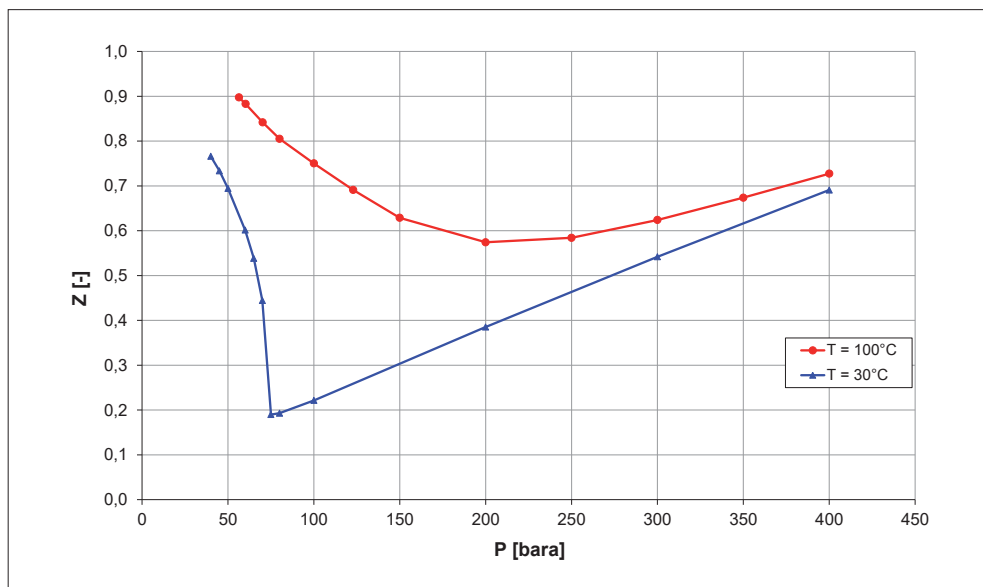
Ciśnienie	Objętość próbki	Współczynnik objętościowy	Współczynnik ściśliwości
P [$\pm 0,5$]	V [$\pm 0,1$]	B _g [$\pm 5E-05$]	Z [$\pm 5E-03$]
bara	cm ³	m ³ /Nm ³	–
50,0	294,178	0,01562	0,694
45,0	345,343	0,01833	0,734
40,0	405,660	0,02154	0,766

**Tabela 3.8. Badanie kontaktowe ditlenku węgla (CO₂ techniczny) – test CME
(T = 100°C \pm 0,2°C)**

Ciśnienie	Objętość próbki	Współczynnik objętościowy	Współczynnik ściśliwości
P [$\pm 0,5$]	V [$\pm 0,1$]	B _g [$\pm 5E-05$]	Z [$\pm 5E-03$]
bara	cm ³	m ³ /Nm ³	–
400,0	47,410	0,00252	0,727
350,0	50,195	0,00266	0,674
300,0	54,237	0,00288	0,624
250,0	60,933	0,00323	0,584
200,0	74,868	0,00397	0,574
150,0	109,293	0,00580	0,629
122,9	146,585	0,00778	0,691
100,0	195,597	0,01038	0,750
80,0	262,409	0,01393	0,805
70,2	312,879	0,01661	0,842
60,3	382,016	0,02028	0,883
56,4	414,559	0,02201	0,897



Rys. 3.10. Współczynnik objętościowy gazu B_g – badania kontaktowe CO₂ [80]



Rys. 3.11. Współczynnik ściśliwości gazu Z – badania kontaktowe CO₂ [80]

3.5. Mieszaniny gazu złożowego Ujazd-15 i CO₂

W celu zbadania właściwości fazowych rodzimego gazu ziemnego Ujazd-15 w mieszaninie z kolejnymi ilościami CO₂ wykorzystano symulator PVTsim16 firmy Calsep. Przeprowadzono badania symulacyjne PT Flash rodzimego gazu z odwiertu Ujazd-15, ditlenku węgla oraz siedmiu mieszanin pośrednich powstałych w wyniku zmieszania obu gazów. Badania wykonano w temperaturze złożowej $T_{zl} = 100^{\circ}\text{C}$.

Składy oraz główne parametry PVT badanych mieszanin gazowych w warunkach złożowych zawarto w tabelach 3.9 i 3.10.

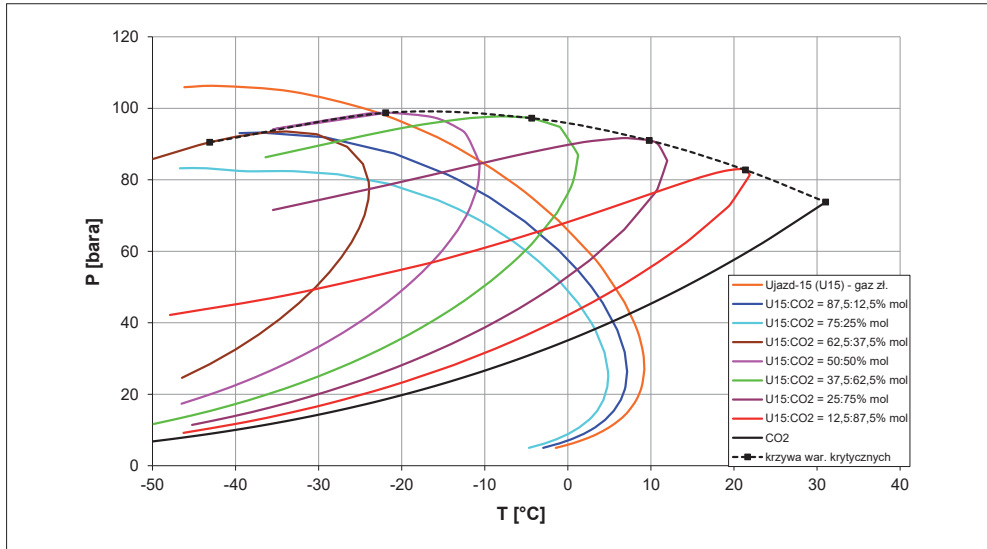
Tabela 3.9. Skład badanych mieszanin gazu złożowego Ujazd-15 i CO₂ [% mol] – wg PVTsim

Mieszanina gazu U15 : CO ₂	100 : 0,0	87,5 : 12,5	75 : 25	62,5 : 37,5	50 : 50	37,5 : 62,5	25 : 75	12,5 : 87,5	0,0 : 100
He	0,117	0,102	0,088	0,073	0,058	0,044	0,029	0,015	–
N ₂	16,953	14,834	12,715	10,596	8,476	6,357	4,238	2,119	–
CO ₂	0,392	12,843	25,294	37,745	50,196	62,647	75,098	87,549	100
C1	81,685	71,475	61,264	51,053	40,843	30,632	20,421	10,211	–
C2	0,793	0,694	0,595	0,496	0,397	0,298	0,198	0,099	–
C3	0,034	0,029	0,025	0,021	0,017	0,013	0,008	0,004	–
iC4	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	–
nC4	0,005	0,004	0,003	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001	–
C5+	0,021	0,016	0,014	0,013	0,009	0,007	0,005	0,002	–

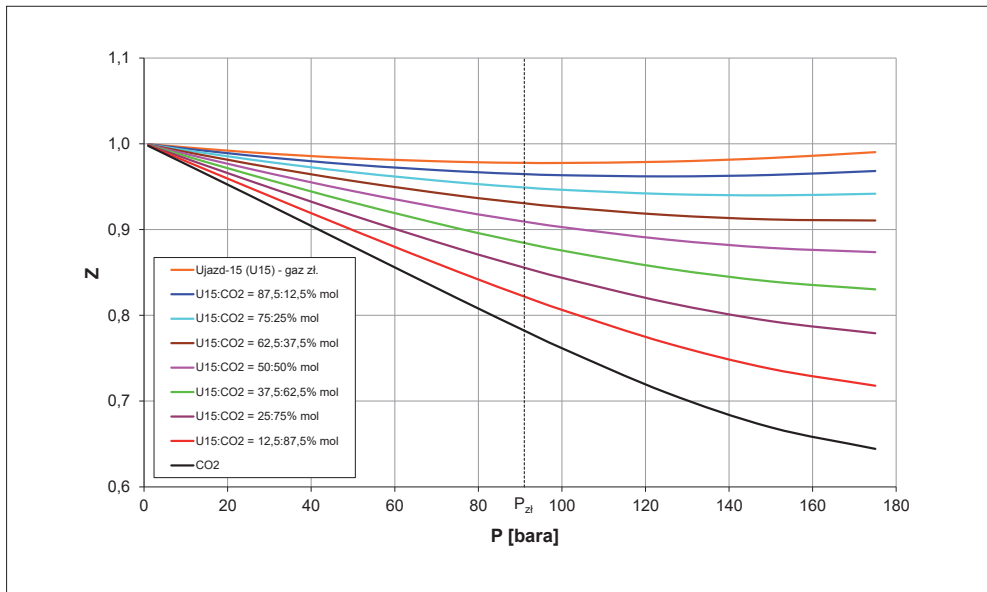
Tabela 3.10. Wybrane parametry mieszanin gazu Ujazd-15 i CO₂ w warunkach złożowych – wg PVTsim PT Flash w: 91 bara; 100°C

Mieszanina gazu U15 : CO ₂	Objętość molowa	Gęstość	Współczynnik ściśliwości gazu Z	Masa molowa	Współczynnik Joule'a-Thomsona	Lepkość
% mol/mol	cm ³ /mol	g/cm ³	–	g/mol	C/bara	cP
100 : 0,0	333,4	0,055	0,978	18,3	0,181	0,0161
87,5 : 12,5	328,9	0,065	0,965	21,5	0,209	0,0171
75 : 25	323,6	0,076	0,949	24,7	0,242	0,0180
62,5 : 37,5	317,3	0,088	0,931	28,0	0,280	0,0188
50 : 50	310,0	0,101	0,909	31,2	0,324	0,0196
37,5 : 62,5	301,6	0,114	0,884	34,4	0,374	0,0203
25 : 75	291,7	0,129	0,856	37,6	0,429	0,0211
12,5 : 87,5	280,2	0,146	0,822	40,8	0,492	0,0218
0,0 : 100	266,7	0,165	0,782	44,0	0,561	0,0226

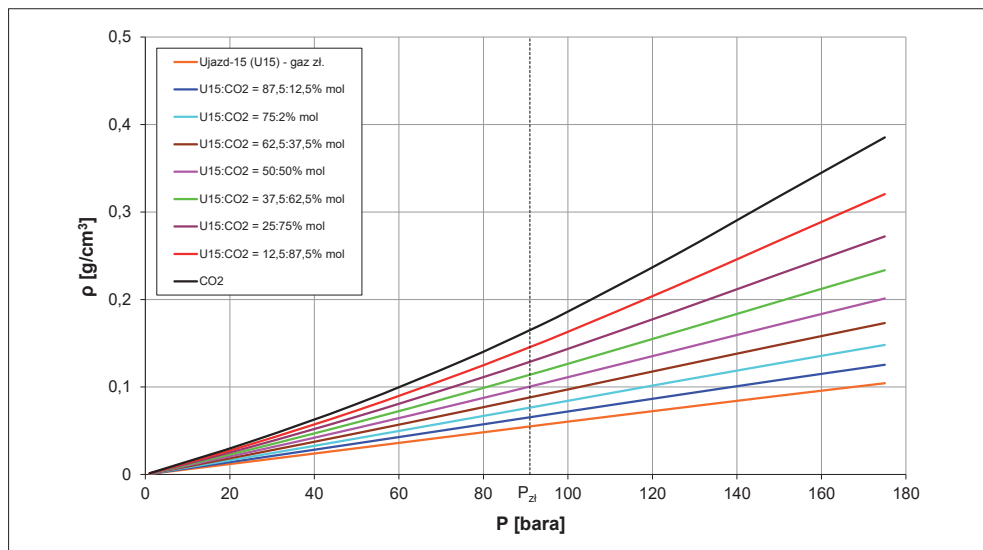
Rysunki 3.12–3.15 ilustrują zmiany wybranych parametrów badanych płynów w funkcji ciśnienia w temperaturze złożowej.



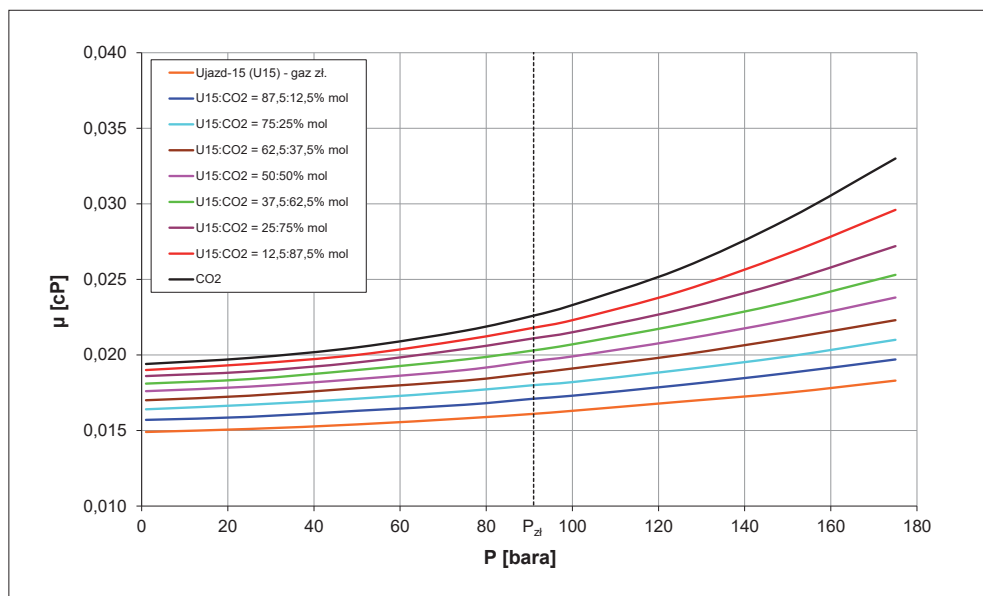
Rys. 3.12. Diagramy fazowe mieszanin gazu Ujzd-15 i CO₂ – wg PVTsim [80]



Rys. 3.13. Współczynnik ściśliwości Z mieszanin gazu Ujzd-15 i CO₂ w funkcji ciśnienia – wg PVTsim ($T_{zl} = 100^{\circ}\text{C}$) [80]



Rys. 3.14. Gęstość mieszanin gazu Ujazd-15 i CO₂ w funkcji ciśnienia – wg PVTsim (T_{zi} = 100°C) [80]



Rys. 3.15. Lepkość dynamiczna mieszanin gazu Ujazd-15 i CO₂ w funkcji ciśnienia – wg PVTsim (T_{zi} = 100°C)

3.6. Mieszaniny gazu złożowego Porążyn-2A i CO₂

Do przeprowadzenia badań właściwości fazowych rodzimego gazu ziemnego Porążyn-2A w mieszaninie z kolejnymi ilościami CO₂ wykorzystano symulator PVTsim16 firmy Calsep. Wykonano badania symulacyjne PT Flash rodzimego gazu z odwiertu Porążyn-2A, ditlenku węgla oraz siedmiu mieszanin pośrednich powstałych w wyniku zmieszania obu gazów. Badania przeprowadzono w temperaturze złożowej $T_{zl} = 100^{\circ}\text{C}$.

Składy oraz główne parametry PVT badanych mieszanin gazowych w warunkach złożowych zawarto w tabelach 3.11 i 3.12.

Rysunki 3.16–3.19 ilustrują zmiany wybranych parametrów badanych płynów w funkcji ciśnienia w temperaturze złożowej.

Tabela 3.11. Skład badanych mieszanin gazu złożowego Porążyn-2A i CO₂ [% mol] – wg PVTsim

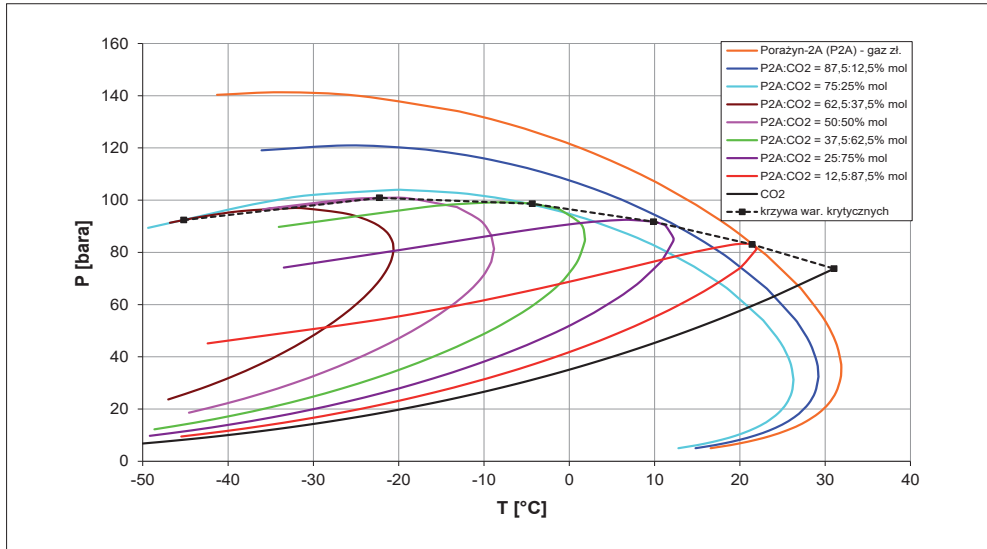
Mieszanina gazu P2A : CO ₂	100 : 0,0	87,5 : 12,5	75 : 25	62,5 : 37,5	50 : 50	37,5 : 62,5	25 : 75	12,5 : 87,5	0,0 : 100
He	0,136	0,119	0,102	0,085	0,068	0,051	0,034	0,017	–
N ₂	19,050	16,669	14,287	11,906	9,525	7,144	4,762	2,381	–
CO ₂	0,309	12,770	25,231	37,693	50,154	62,616	75,077	87,539	100
C1	79,772	69,801	59,829	49,858	39,886	29,915	19,943	9,972	–
C2	0,631	0,552	0,473	0,394	0,315	0,237	0,158	0,079	–
C3	0,034	0,030	0,025	0,021	0,017	0,013	0,008	0,004	–
iC4	0,003	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000	–
nC4	0,005	0,005	0,004	0,003	0,003	0,002	0,001	0,001	–
C5+	0,061	0,052	0,045	0,037	0,030	0,022	0,015	0,007	–

Tabela 3.12. Wybrane parametry mieszanin gazu Porażyn-2A i CO₂ w warunkach złożowych – wg PVTsim PT Flash w: 266 bara; 100°C

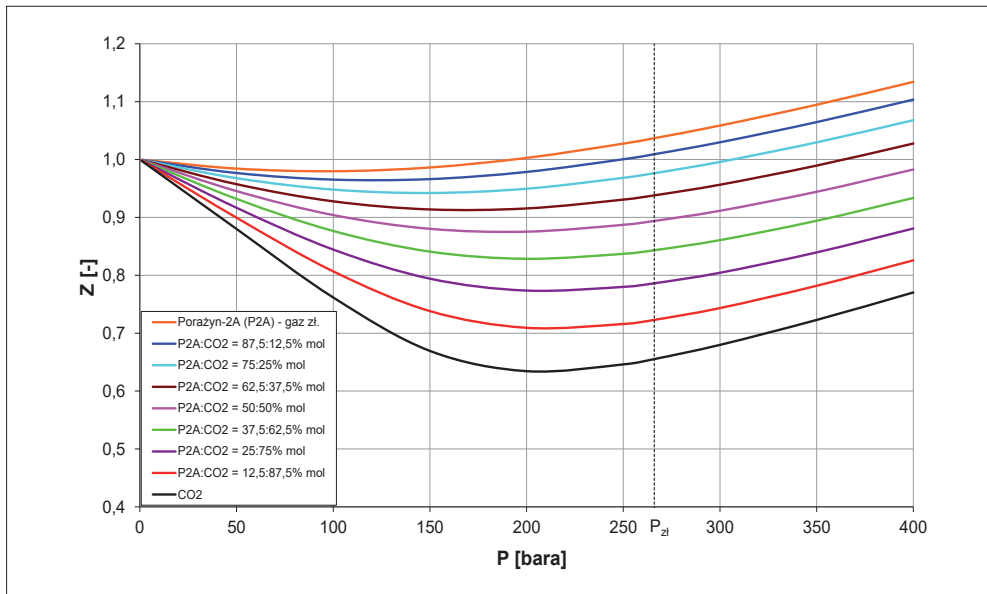
Mieszanina gazu P2A : CO ₂	Objętość molowa	Gęstość	Współczyn- nik ściśliwo- ści gazu Z	Masa molowa	Współczyn- nik Joule'a- -Thomsona	Lepkość
% mol/mol	cm ³ /mol	g/cm ³	–	g/mol	C/bara	cP
100 : 0,0	120,95	0,153	1,037	18,6	0,069	0,0217
87,5 : 12,5	117,71	0,185	1,009	21,7	0,082	0,0236
75 : 25	113,88	0,219	0,976	24,9	0,097	0,0256
62,5 : 37,5	109,42	0,257	0,938	28,1	0,112	0,0277
50 : 50	104,26	0,300	0,894	31,3	0,126	0,0302
37,5 : 62,5	98,37	0,350	0,843	34,5	0,137	0,0331
25 : 75	91,71	0,411	0,786	37,7	0,145	0,0367
12,5 : 87,5	84,33	0,484	0,723	40,8	0,145	0,0414
0,0 : 100	76,44	0,576	0,655	44,0	0,136	0,0476

W symulacjach badań PVT z użyciem symulatora PVTsim zastosowano równanie stanu gazu SRK Peneloux (T) (Soave-Redlich-Kwong Peneloux (T)). Dla tego równania otrzymano najlepszą spójność generowanych symulatorem i eksperymentalnych rezultatów badań. Do porównania wyników posłużyły badania gazów złożowych Ujazd-15 i Porażyn-2A, które przeprowadzono w termostatyзовanych komorach ciśnieniowych aparatury PVT.

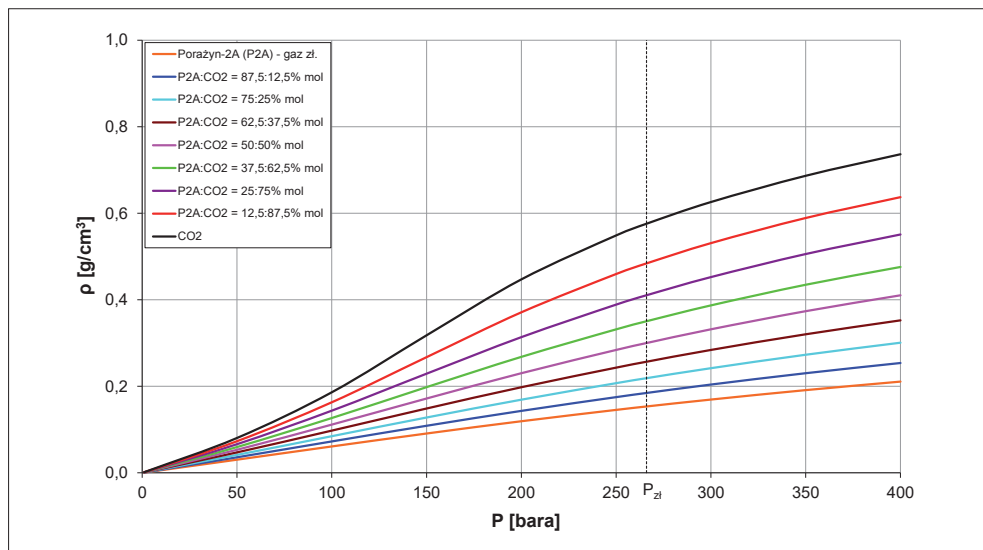
Wygenerowany symulatorem PVTsim diagram fazowy gazu Porażyn-2A w stosunku do diagramu gazu Ujazd-15 jest nieznacznie przesunięty w prawo, w stronę wyższej temperatury. Powyższe wynika z faktu, iż gaz ze złoża Porażyn jest bogatszy w cięższe frakcje węglowodorowe, które odpowiadają za zwiększenie obszaru kondensacji. W gazie Porażyn zawartość frakcji C₅₊ wynosi 0,061% mol, natomiast w gazie ze złoża Ujazd analogiczne frakcje stanowią jedynie 0,021% mol składu gazu – gaz jest bardziej suchy, a jego diagram fazowy znajduje się poniżej temperatury 10°C.



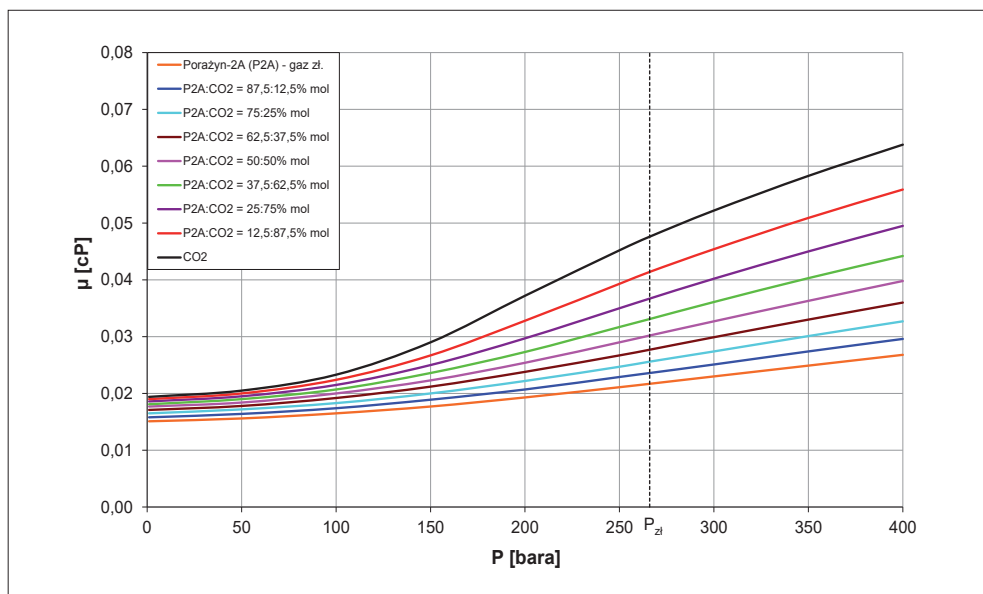
Rys. 3.16. Diagramy fazowe mieszanin gazu Porazyn-2A i CO₂ – PVTsim [80]



Rys. 3.17. Współczynnik ściśliwości Z mieszanin gazu Porazyn-2A i CO₂ w funkcji ciśnienia – wg PVTsim (T_{zi} = 100°C) [80]



Rys. 3.18. Gęstość poszczególnych mieszanin gazu Porażyn-2A i CO₂ – PVTsim (T_{zł} = 100°C) [80]



Rys. 3.19. Lepkość dynamiczna mieszanin gazu Porażyn-2A i CO₂ w funkcji ciśnienia – wg PVTsim (T_{zł} = 100°C)

Diagram fazowy ditlenku węgla w układzie PT (ciśnienia i temperatury), jak i innych płynów jednoskładnikowych stanowi krzywa oddzielająca obszary cieczy (górny) i gazu (dolny). Krzywa kończy się w punkcie krytycznym, który dla CO₂ wynosi: $T_c = 30,98^\circ\text{C}$, $P_c = 73,75$ bara. Ditlenek węgla znajdujący się powyżej warunków PT krytycznych pozostaje w fazie nadkrytycznej – tzw. gęsty gaz. Podczas zatłaczania CO₂ do złoża i mieszania się go z gazem rodzimym powstają mieszaniny pośrednie, które zbadano, a ich diagramy fazowe przedstawiono na powyższych rysunkach (rys. 3.12–3.16).

W przypadku obu analizowanych gazów ziemnych (Ujazd, Porążyn) zwiększający się udział CO₂ w pierwotnym składzie gazu powoduje w przebadanym zakresie ciśnienia i w temperaturze złożowej wyraźne zmniejszanie się współczynnika ściśliwości gazu Z (rys. 3.13 – gaz Ujazd, rys. 3.17 – gaz Porążyn). Wzrost koncentracji CO₂ w badanych rodzimych gazach metanowych powoduje także wielokrotny wzrost gęstości oraz lepkości dynamicznej nowo powstałej mieszaniny.

Należy zauważyć, że gęstość CO₂ w warunkach złożowych niecki poznańskiej, biorąc za przykład złożo Porążyn-2A, ma bardzo wysoką wartość – zbliżoną do gęstości cieczy. W warunkach złożowych ($P_{zł} = 266$ bara; $T_{zł} = 100^\circ\text{C}$) gęstość ditlenku węgla wynosi $\rho_{(\text{CO}_2)} = 0,576$ g/cm³.

Dla ciśnień złożowych rzędu 297÷400 bara (pierwotne ciśnienia złożowe na złożach Ujazd – niższe, Młodasko – wyższe) oraz w odpowiednich temperaturach złożowych ($T_{zł} = 88\div 125^\circ\text{C}$) gęstość zatłaczanego ditlenku węgla zawierałaby się w zakresie $\rho_{(\text{CO}_2)} = 0,530\div 0,760$ g/cm³. Z uwagi na powyższe parametry CO₂ w podanych warunkach PT znajdujący się w obszarze nadkrytycznym posiada cechy pozwalające rozpatrywać go bardziej jako ciecz aniżeli gaz.

4. Badanie procesów spęcznienia wód akifera podczas nasycania go CO₂ oraz rozpuszczalności gazów w solankach

4.1. Określenie współczynnika spęcznienia – *swelling test*

Podczas zatłaczania ditlenku węgla do wód akifera nasyconych rodzimym gazem ziemnym rozpoczyna się proces stopniowego rozpuszczania i nasycania solanki przez CO₂. Objętość wody, dodatkowo nasyconej ditlenkiem węgla, odpowiednio wzrasta – zjawisko to nazywane jest spęcznieniem (ang. *swelling*) [51]. Parametrem charakteryzującym wielkość przedstawionego procesu jest współczynnik spęcznienia (S_v), definiowany jako:

$$S_v = \frac{V_{nas1-4}}{V_{nas0}} \quad (4.1)$$

gdzie:

S_v – współczynnik spęcznienia,

V_{nas0} – objętość mieszaniny złożowej (in situ) w punkcie ciśnienia nasycenia,

V_{nas1-4} – objętość w punkcie ciśnienia nasycenia mieszaniny po zatłoczeniu dodatkowych porcji (1–4) gazu.

Dla wyznaczenia powyższego współczynnika niezbędne jest przeprowadzenie, na aparaturze PVT, serii badań kontaktowych (rozprężania stałej masy; ang. *constans mass expansion*, test CME) wody złożowej pierwotnie nasyconej rodzimym gazem ziemnym. Celem eksperymentu jest zbadanie: w jaki sposób płyn złożowy zareaguje na zatłaczanie CO₂, jak zwiększy się ciśnienie nasycenia, jak wzrośnie (spęcznieje) objętość mieszaniny oraz ile „nadmiarowego” gazu może się rozpuścić w danej mieszaninie w warunkach PT złożowych [50].

W komorze ciśnieniowej aparatury PVT przygotowano solankę, pobraną z odwiertu Porążyn-2A, nasyconą rodzimym gazem ziemnym w warunkach złożowych ($P_{zi} = 266$ bara, $T_{zi} = 100^\circ\text{C}$). Otrzymano jednorodną ciecz nasyconą rodzimym gazem ziemnym i charakteryzującą się ciśnieniem nasycenia równym ciśnieniu złożowemu w temperaturze złożowej ($P_{nas0} = P_{zi} = 266$ bara). Objętość próbki pozostającej w ww. warunkach stanowiła objętość w punkcie ciśnienia nasycenia (V_{nas0}) przygotowanej mieszaniny złożowej. Woda złożowa zawierała w sobie rozpuszczony gaz ziemny w stopniu odpowiadającym panującym warunkom PT złożowym. Do tak przygotowanego układu, przy utrzymaniu stałej temperatury, dotłaczano kolejne zadane objętości CO₂, rejestrując zmiany ciśnienia nowo powstałego systemu w funkcji objętości w temperaturze złożowej.

W pierwszym etapie badań do komory z solanką „naturalnie” nasyconą gazem ziemnym dotłoczono 0,05 mola ditlenku węgla i wymieszano do osiągnięcia pełnego rozpuszczenia gazu w wodzie. Nowo powstały płyn poddano badaniu kontaktowemu w celu określenia relacji ciśnienia w funkcji objętości (P-V), a następnie wyznaczono punkt ciśnienia nasycenia mieszaniny (P_{nas1}) oraz odpowiadającą mu nową, większą objętość (V_{nas1}) – ujmującą także rozpuszczony CO₂.

Opisany eksperyment powtórzono trzykrotnie, dotłaczając do komory z solanką dodatkowe ilości CO₂. W każdym przypadku wyznaczano kolejne (coraz wyższe) ciśnienia nasycenia i odpowiadające im objętości (P_{nas2} i V_{nas2} , P_{nas3} i V_{nas3} , P_{nas4} i V_{nas4}).

Wyniki czterech badań kontaktowych przedstawiono w tabelach 4.1–4.4. Obok danych pomiarowych zaprezentowano także obliczone wartości izotermicznego współczynnika ściśliwości próbki (c) oraz objętość względną (V_{rel}).

Na rysunkach 4.1–4.4 zilustrowano przebieg poszczególnych badań – są to relacje ciśnienia w funkcji objętości próbki z zaznaczeniem punktów nasycenia poszczególnych mieszanin wodno-gazowych.

Ditlenek węgla podczas badań cały czas pozostawał w warunkach ciśnienia i temperatury przewyższających warunki krytyczne dla CO₂, czyli znajdował się w stanie nadkrytycznym. W tej sytuacji zanika różnica gęstości między fazą ciekłą a gazową danej substancji oraz napięcie powierzchniowe. W stanie nadkrytycznym nie istnieje granica

między cieczą a gazem. Powyższy fakt mocno utrudnił wyznaczenie punktu nasycenia badanej mieszaniny. Jak widać na poszczególnych rysunkach, zagięcie krzywej $P = f(V)$ bywało minimalne, a dokładne wyznaczenie punktu ciśnienia nasycenia, czyli rozdzielenia obszaru jednofazowego od dwufazowego – problemowe. W takich przypadkach często pomocne okazuje się wykorzystanie dodatkowego parametru, jakim jest izotermiczny współczynnik ściśliwości próbki (c), który jest bardzo czuły na zmiany ściśliwości badanego płynu, wynikające z tego, czy znajduje się on w obszarze jedno- (ciecz) czy dwufazowym (ciecz + gaz). Na tej podstawie ustalono wartości ciśnienia nasycenia każdej z czterech nowo powstałych mieszanin [80].

Tabela 4.1. Badanie kontaktowe solanki złożowej z odwiertu Porążyn-2A po zatłoczeniu do niej 0,05 mol CO₂ – mieszanina I (ustalenie warunków nasycenia – test CME nr 1)

Ciśnienie	Objętość próbki	Temperatura	Izotermiczny współczynnik ściśliwości	Objętość względna
$P [\pm 0,5]$	$V [\pm 5E-03]$	$T [\pm 0,2]$	$c [\pm 1E-06]$	$V_{rel} [\pm 5E-04]$
bara	cm ³	°C	1/bar	–
716,0	309,197	100	3,38E-05	0,9886
673,2	309,531	100	3,39E-05	0,9896
638,3	309,898	100	3,40E-05	0,9908
602,5	310,265	100	3,30E-05	0,9920
566,4	310,629	100	3,25E-05	0,9931
532,4	311,003	100	3,54E-05	0,9943
499,7	311,382	100	3,72E-05	0,9955

Ciśnienie	Objętość próbki	Temperatura	Izotermiczny współczynnik ściślności	Objętość względna
P [$\pm 0,5$]	V [$\pm 5E-03$]	T [$\pm 0,2$]	c [$\pm 1E-06$]	V _{rel} [$\pm 5E-04$]
bara	cm ³	°C	1/bar	—
468,2	311,765	100	3,89E-05	0,9968
437,8	312,152	100	4,09E-05	0,9980
410,1	312,548	100	4,57E-05	0,9993
P _{nas1} = 397,0	V _{nas1} = 312,775	100	5,55E-05	1,0000
386,6	312,961	100	5,60E-05	1,0006
364,8	313,381	100	6,16E-05	1,0019
344,8	313,808	100	6,81E-05	1,0033
325,2	314,236	100	6,94E-05	1,0047
307,7	314,668	100	7,88E-05	1,0061
290,8	315,110	100	8,28E-05	1,0075
276,7	315,558	100	1,01E-04	1,0089
266,2	315,917	100	1,08E-04	1,0100

Tabela 4.2. Badanie kontaktowe solanki złożowej z odwiertu Porążyn-2A po zatłoczeniu do niej 0,10 mol CO₂ – mieszanina 2 (ustalenie warunków nasycenia – test CME nr 2)

Ciśnienie	Objętość próbki	Temperatura	Izotermiczny współczynnik ściśliwości	Objętość względna
P [±0,5]	V [±5E-03]	T [±0,2]	c [±1E-06]	V _{rel} [±5E-04]
bara	cm ³	°C	1/bar	–
727,0	309,382	100	3,57E-05	0,9873
704,7	309,630	100	3,59E-05	0,9881
693,2	309,764	100	3,76E-05	0,9885
660,6	310,135	100	3,68E-05	0,9897
629,2	310,512	100	3,86E-05	0,9909
599,3	310,895	100	4,12E-05	0,9921
572,6	311,293	100	4,79E-05	0,9934
545,7	311,688	100	4,70E-05	0,9947
516,1	312,074	100	4,18E-05	0,9959
487,3	312,463	100	4,32E-05	0,9971
460,8	312,852	100	4,70E-05	0,9984

Ciśnienie	Objętość próbki	Temperatura	Izotermiczny współczynnik ściślności	Objętość względna
P [$\pm 0,5$]	V [$\pm 5E-03$]	T [$\pm 0,2$]	c [$\pm 1E-06$]	V _{rel} [$\pm 5E-04$]
bara	cm ³	°C	1/bar	–
P _{nas2} = 424,5	V _{nas2} = 313,360	100	4,47E-05	1,0000
408,3	313,653	100	4,87E-05	1,0009
369,1	314,500	100	6,87E-05	1,0036
351,8	314,932	100	7,92E-05	1,0050
336,0	315,369	100	8,75E-05	1,0064
321,4	315,810	100	9,58E-05	1,0078
308,2	316,257	100	1,07E-04	1,0092
296,2	316,709	100	1,19E-04	1,0107
285,2	317,162	100	1,30E-04	1,0121
275,6	317,626	100	1,50E-04	1,0136
266,3	318,109	100	1,65E-04	1,0152

Tabela 4.3. Badanie kontaktowe solanki złożowej z odwiertu Porążyn-2A po zatłoczeniu do niej 0,15 mol CO₂ – mieszanina 3 (ustalenie warunków nasylenia – test CME nr 3)

Ciśnienie	Objętość próbki	Temperatura	Izotermiczny współczynnik ściśliwości	Objętość względna
P [±0,5]	V [±5E-03]	T [±0,2]	c [±1E-06]	V _{rel} [±5E-04]
bara	cm ³	°C	1/bar	–
716,00	312,730	100	3,41E-05	0,9960
681,62	313,100	100	3,43E-05	0,9972
648,33	313,473	100	3,58E-05	0,9984
615,18	313,847	100	3,59E-05	0,9996
P _{nas3} = 602,80	V _{nas3} = 313,988	100	3,63E-05	1,0000
585,76	314,238	100	4,23E-05	1,0008
558,08	314,637	100	4,58E-05	1,0021
531,13	315,037	100	4,71E-05	1,0033
506,31	315,446	100	5,23E-05	1,0046
482,19	315,858	100	5,41E-05	1,0060
459,8	316,275	100	5,89E-05	1,0073
438,10	316,696	100	6,12E-05	1,0086

Uwagi dotyczące wyników badań podanych w tabelach 4.1–4.4:

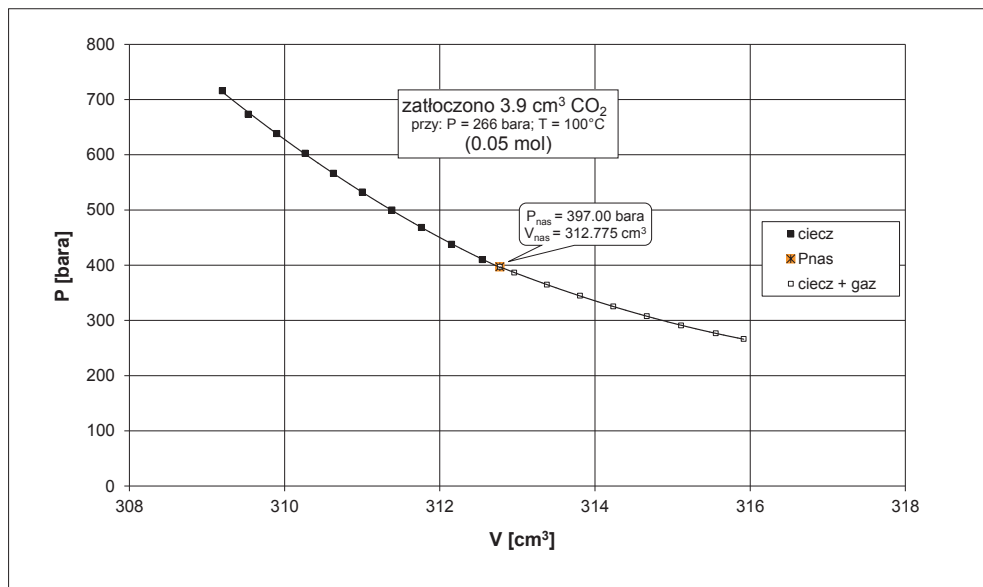
- niepewność wyznaczenia wartości ciśnienia, objętości i temperatury oszacowano na podstawie klasy dokładności urządzeń pomiarowych;

- niepewność wyznaczenia izotermicznego współczynnika ściśliwości (c) oraz objętości względnej badanej próbki (V_{rel}) została oszacowana na podstawie formuły na propagację błędów.

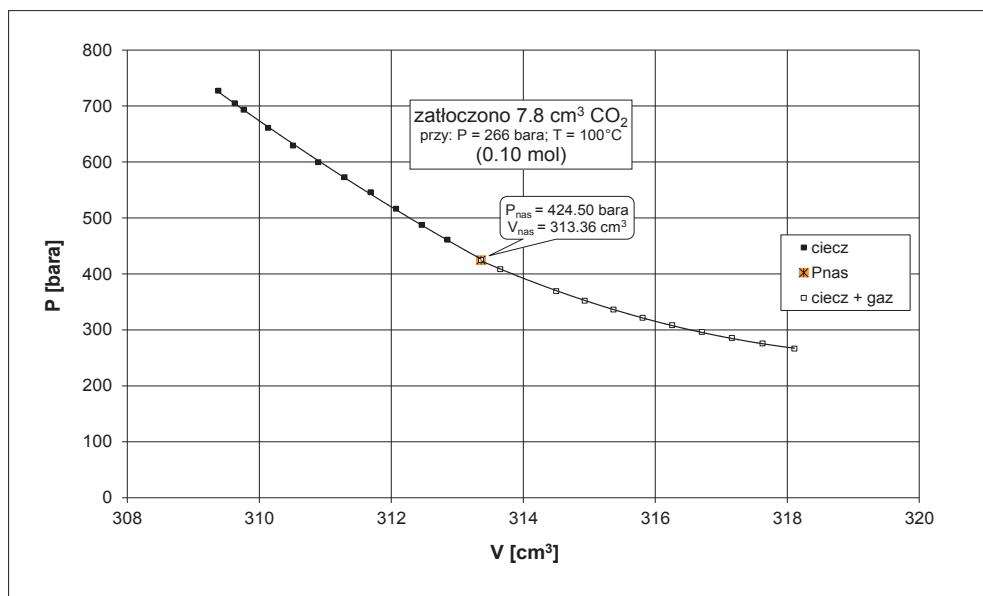
Tabela 4.4. Badanie kontaktowe solanki złożowej z odwiertu Porążyn-2A po zatłoczeniu do niej 0,20 mol CO₂ – mieszanina 4 (ustalenie warunków nasycenia – test CME nr 4)

Ciśnienie	Objętość próbki	Temperatura	Izotermiczny współczynnik ściśliwości	Objętość względna
$P [\pm 0,5]$	$V [\pm 5E-03]$	$T [\pm 0,2]$	$c [\pm 1E-06]$	$V_{rel} [\pm 5E-04]$
bara	cm ³	°C	1/bar	–
722,64	313,396	100	3,83E-05	0,9969
699,44	313,604	100	3,84E-05	0,9976
681,22	313,832	100	3,99E-05	0,9983
663,34	314,061	100	4,08E-05	0,9990
$P_{nas4} = 639,48$	$V_{nas4} = 314,360$	100	3,99E-05	1,0000
617,09	314,676	100	4,49E-05	1,0010
594,74	314,991	100	4,47E-05	1,0020
574,22	315,311	100	4,95E-05	1,0030
554,09	315,633	100	5,07E-05	1,0040
535,00	315,958	100	5,39E-05	1,0051
515,73	316,283	100	5,33E-05	1,0061
497,85	316,614	100	5,85E-05	1,0072
480,28	316,945	100	5,94E-05	1,0082

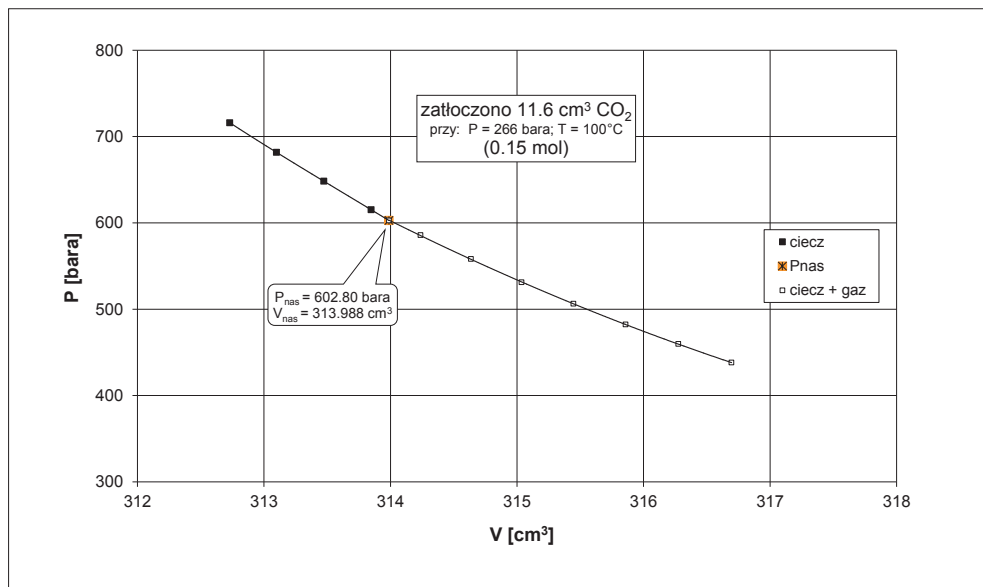
Ciśnienie	Objętość próbki	Temperatura	Izotermiczny współczynnik ściśliwości	Objętość względna
P [$\pm 0,5$]	V [$\pm 5E-03$]	T [$\pm 0,2$]	c [$\pm 1E-06$]	V _{rel} [$\pm 5E-04$]
bara	cm ³	°C	1/bar	—
464,18	317,282	100	6,60E-05	1,0093
448,43	317,620	100	6,76E-05	1,0104
433,46	317,961	100	7,16E-05	1,0115
419,00	318,303	100	7,43E-05	1,0125
405,43	318,651	100	8,05E-05	1,0136
392,72	319,001	100	8,63E-05	1,0148
381,09	319,354	100	9,50E-05	1,0159
369,80	319,710	100	9,86E-05	1,0170
354,53	320,249	100	1,10E-04	1,0187
340,30	320,793	100	1,19E-04	1,0205
327,63	321,341	100	1,35E-04	1,0222
316,30	321,896	100	1,52E-04	1,0240
306,02	322,454	100	1,68E-04	1,0257
290,35	323,391	100	1,85E-04	1,0287
277,60	324,339	100	2,29E-04	1,0317
266,00	325,315	100	2,59E-04	1,0348



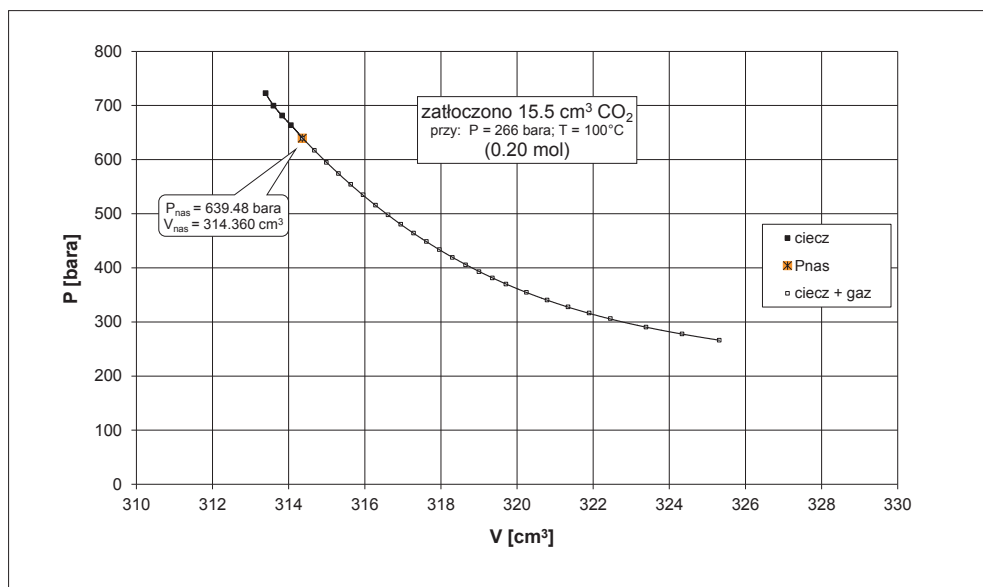
Rys. 4.1. Badanie kontaktowe solanki złożowej Porążyn-2A po zatłoczeniu do niej 0,05 mol CO₂



Rys. 4.2. Badanie kontaktowe solanki złożowej Porążyn-2A po zatłoczeniu do niej 0,10 mol CO₂



Rys. 4.3. Badanie kontaktowe solanki złożowej Porążyn-2A po załoczeniu do niej 0,15 mol CO₂



Rys. 4.4. Badanie kontaktowe solanki złożowej Porążyn-2A po załoczeniu do niej 0,20 mol CO₂

W tabeli 4.5 zebrano rezultaty przeprowadzonych badań kontaktowych oraz zawarto w niej wyniki obliczeń wykładników gazowych poszczególnych mieszanin. Na podstawie wykonanych badań wyliczono współczynniki spęcznienia (S_v) solanki po zatłoczeniu do niej kolejnych ilości CO₂.

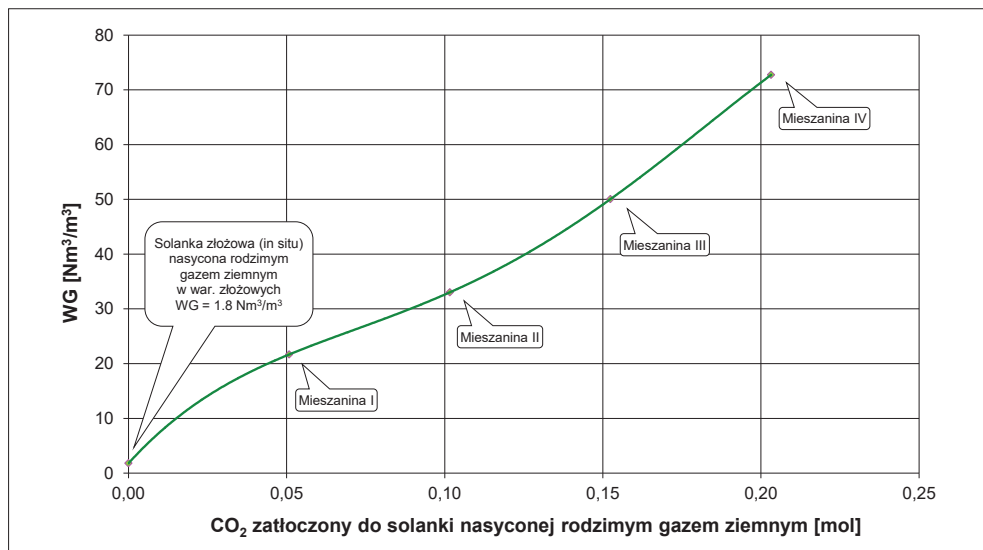
Tabela 4.5. Zebrane rezultaty badań kontaktowych solanki z odwiertu Porażyn-2A podczas zatłaczania do niej CO₂ w warunkach złożowych (*swelling test*)

Mieszanina	Zatłoczony CO ₂	Wykładnik gazowy	Ciśnienie punktu nasycenia	Objętość solanki w punkcie nasycenia	Współczynnik spęcznienia
	$x_{CO_2} [\pm 1E-03]$	WG $[\pm 0,1]$	$P_{nas} [\pm 0,5]$	$V_{nas} [\pm 5E-03]$	$S_v [\pm 5E-04]$
	mol	Nm ³ /m ³	bara	cm ³	m ³ /m ³
solanka zł.	0,0000	1,8	$P_{zi} = 266,0$	312,126	1,0000
1	0,0508	22	397,0	312,775	1,0021
2	0,1016	33	424,5	313,360	1,0040
3	0,1524	50	602,8	313,988	1,0060
4	0,2032	73	639,5	314,360	1,0072

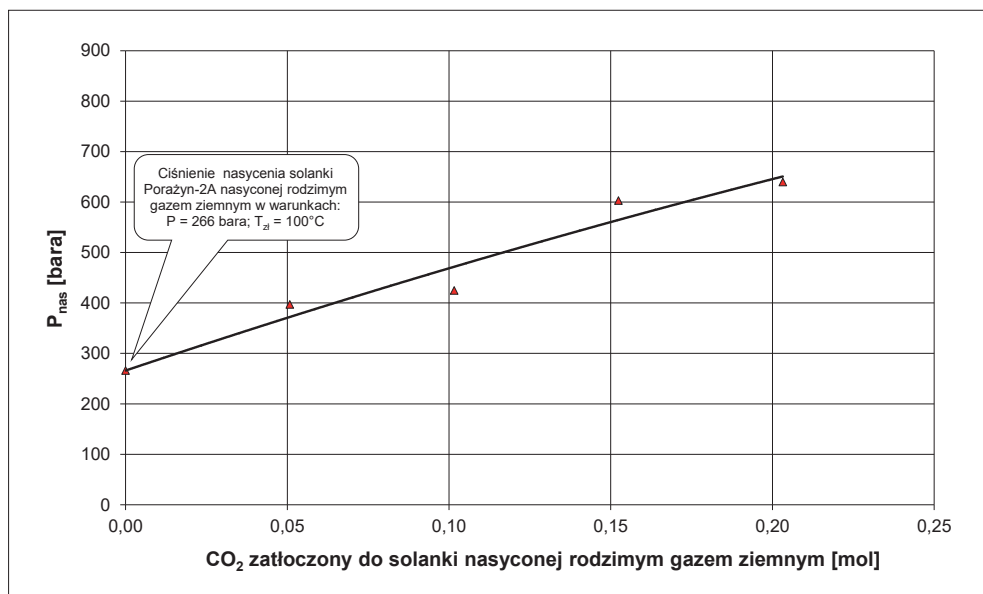
- Niepewność wyznaczenia wartości ciśnienia i objętości oszacowano na podstawie klasy dokładności urządzeń pomiarowych.
- Niepewność wyznaczenia ilości CO₂ (x_{CO_2}), wykładnika gazowego (WG) i współczynnika spęcznienia (S_v) oszacowano na podstawie formuły na propagację błędów.

Przeprowadzone badania dowiodły, że zmiany objętości wód akifera podczas zatłaczania do nich ditlenku węgla są znikome. Duża zdolność rozpuszczania i migracji CO₂ w solankach powoduje minimalny przyrost objętości – w przebadanym zakresie współczynnik spęcznienia pozostaje bliski jedności [80].

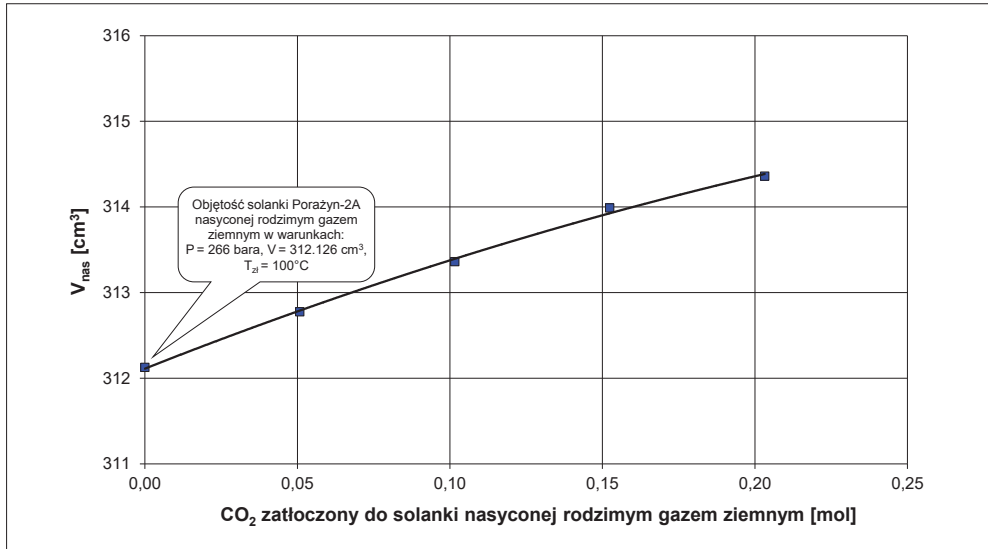
Na kolejnych rysunkach zilustrowano wyniki badań procesu spęcznienia. Rysunek 4.5 obrazuje zmiany wykładnika gazowego solanki podczas zatłaczania do niej CO₂. Rysunki 4.6 i 4.7 zawierają relacje ciśnienia i objętości próbki w punkcie nasycenia solanki złożowej Porażyn-2A w funkcji zatłoczonego CO₂. Rysunek 4.8 prezentuje uzyskane wartości współczynnika spęcznienia.



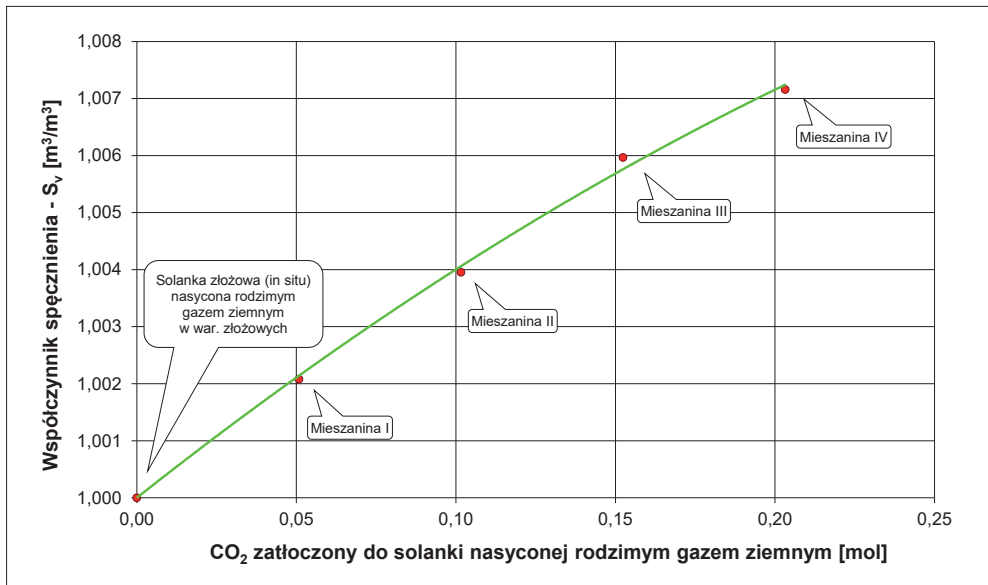
Rys. 4.5. Zmiany wykładnika gazowego solanki złożowej Porążyn-2A podczas zatłaczania do niej CO₂



Rys. 4.6. Zmiany ciśnienia punktu nasycenia solanki złożowej Porążyn-2A podczas zatłaczania do niej CO₂



Rys. 4.7. Zmiany objętości w poszczególnych punktach nasycenia solanki złożowej Porazyn-2A podczas zatłaczania do niej CO₂



Rys. 4.8. Współczynnik spęcznienia (S_v) solanki złożowej Porazyn-2A podczas zatłaczania do niej CO₂

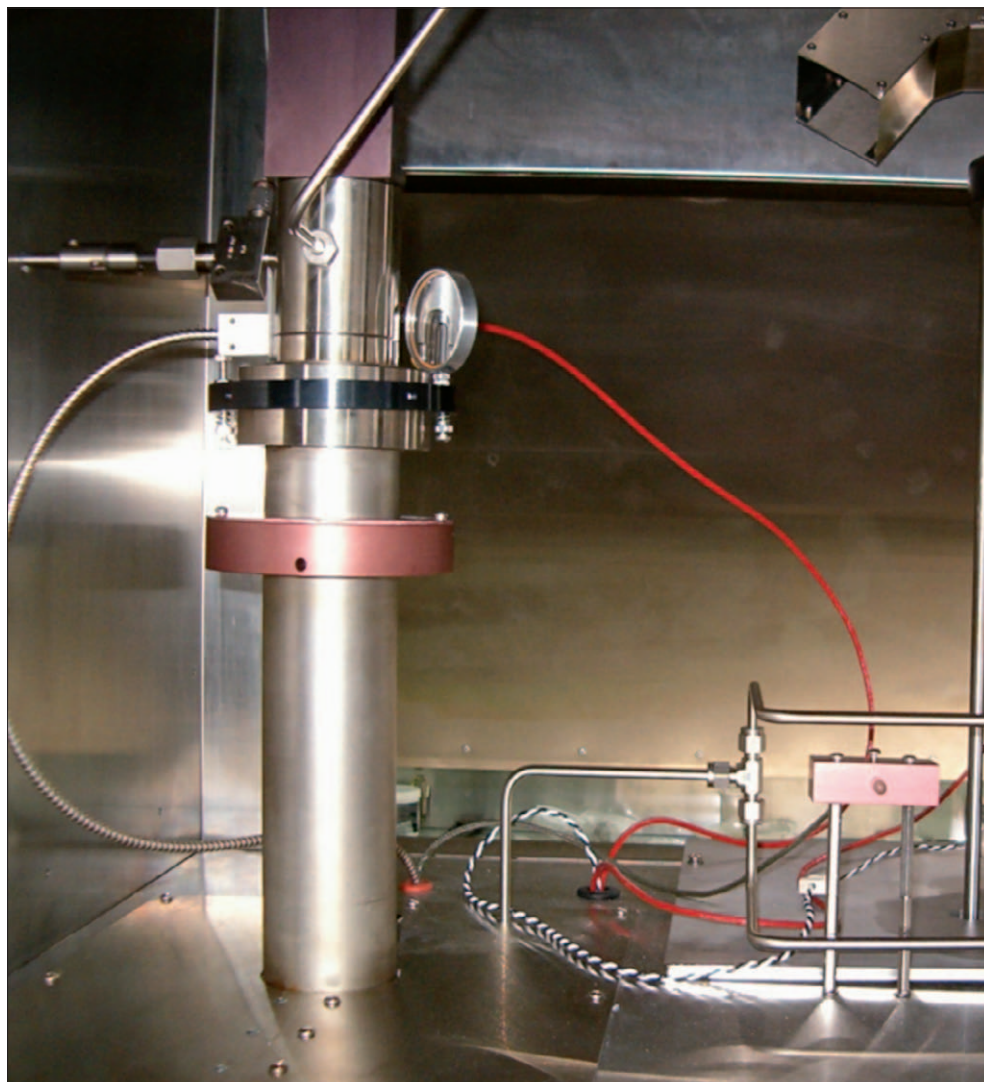
4.2. Badania rozpuszczalności rodzimych gazów ziemnych i CO₂ w solance złożowej

W prezentowanych badaniach eksperymentalnych określono rozpuszczalność rodzimego gazu ziemnego (Ujazd-15 i Porażyn-2A) oraz CO₂ w solance złożowej. Ponadto, dla celów porównawczych, wyznaczono izotermy rozpuszczalności gazu ziemnego i ditlenku węgla w wodzie destylowanej. Badania wykonano w dwóch temperaturach: 30°C i 100°C. Prowadzono je w komorze ciśnieniowej bezrządkowej aparatury PVT. Komora posadowiona w powietrznej łaźni termostatycznej wyposażona jest w mieszacz magnetyczny, a w swojej górnej części posiada szklany wziernik umożliwiający ciągłą obserwację badanej próbki (rys. 4.9).

Procedura badawcza służąca do ustalenia rozpuszczalności poszczególnych gazów w solankach złożowych była następująca:

- Odmierzoną porcję solanki złożowej wprowadzano do komory badawczej.
- Pompą próżniową odpowietrzano próbkę solanki w celu odebrania rozpuszczonego w niej powietrza.
- Poprzez układ połączeń ciśnieniowych wprowadzano do komory z solanką badany gaz.
- Zamykano komorę ciśnieniową, mając wewnątrz solankę i badany gaz w bezpośrednim kontakcie.
- Uruchamiano mieszanie próbki.
- Podnoszono temperaturę przygotowanego układu solanka–gaz do pożądanego wartości dla prowadzenia badania.
- Podnoszono ciśnienie w komorze do pożądanego wartości – używano funkcji *Constant Pressure*, która pozwala na „inteligentne” monitorowanie oraz utrzymywanie zadanego ciśnienia w układzie, bacząc na zmiany temperatury – jest to szczególnie istotne podczas podnoszenia temperatury układu.
- W celu osiągnięcia równowagi fazowej i maksymalnego nasycenia solanki badanym gazem próbkę utrzymywano w zadanych warunkach ciśnienia i temperatury przez okres ok. 15 godzin – ciągle mieszając.
- Po osiągnięciu stabilizacji fazowej (utrzymując zadane ciśnienie) wyłaczano „nadmiarowy” gaz, który w danych warunkach ciśnienia i temperatury nie zdołał rozpuścić się w wodzie – odbiór czapy gazowej.

- Tak przygotowaną nasyconą solankę stopniowo rozgazowywano, odbierając i mierząc gaz na poszczególnych krokach ciśnieniowych. Pozwoliło to na wykreślenie krzywej rozpuszczalności danego gazu w solance w funkcji ciśnienia w zadanej temperaturze badawczej [79].



Rys. 4.9. Komora ciśnieniowa w łaźni termostatycznej aparatury PVT

W tabeli 4.6 zamieszczono skład chemiczny badanych gazów ziemnych natomiast w tabeli 4.7 zestawiono główne parametry wód złożowych.

Tabela 4.6. Skład gazu złożowego z odwiertu Ujazd-15 i Porążyn-2A [% mol]

Składnik	Gaz ziemny	
	Ujazd-15	Porążyn-2A
He	0,117	0,136
N ₂	16,953	19,05
CO ₂	0,392	0,308
C1	81,685	79,772
C2	0,793	0,631
C3	0,034	0,034
iC4	0,002	0,003
nC4	0,005	0,005
iC5	0,001	0,001
nC5	0,003	0,003
C6	0,002	0,003
C7	0,003	0,005
C8	0,004	0,021
C9	0,004	0,012
C10+	0,003	0,015

Tabela 4.7. Wyniki pomiarów i oznaczeń chemicznych badanych wód złożowych

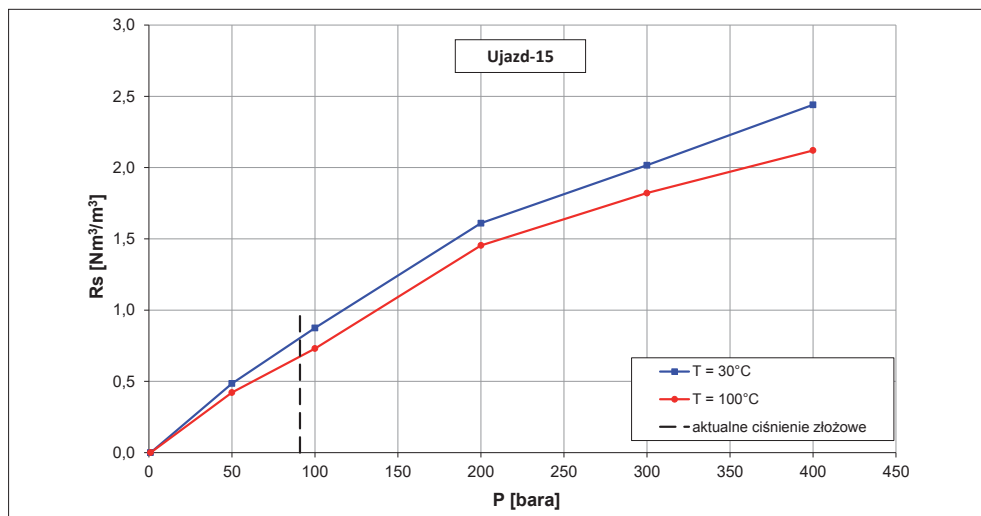
Oznaczenie	Woda złożowa	
	Ujazd-15	Porążyn-2A
Gęstość w 20°C [g/cm ³]	1,150	1,132
Odczyn pH	5,30	5,66
Sucha pozostałość [g/dm ³]	239,2	211,3
Chlorki [g/dm ³]	136,5	120,5
Siarczany [mg/dm ³]	185	218
Ca [mg/dm ³]	31 090	27 850
K [mg/dm ³]	1 637	1 638
Mg [mg/dm ³]	2 016	1 036
Na [mg/dm ³]	52 220	39 220

Rozpuszczalność gazu ziemnego Ujazd-15 w solance złożowej

Tabela 4.8. Rozpuszczalność gazu ziemnego Ujazd-15 w solance złożowej

Ciśnienie P [±0,5]	Rozpuszczalność gazu w solance złożowej Rs [Nm ³ /m ³] ±0,01		
	bara	T = 30°C ±0,2°C	T = 100°C ±0,2°C
400,0		2,44	2,12
300,0		2,02	1,82
200,0		1,61	1,45
100,0		0,87	0,73
P _{zi} = 91,0*		–	0,70
50,0		0,49	0,42
1,0		0,00	0,00

* dane w wierszu wyznaczono przez interpolację



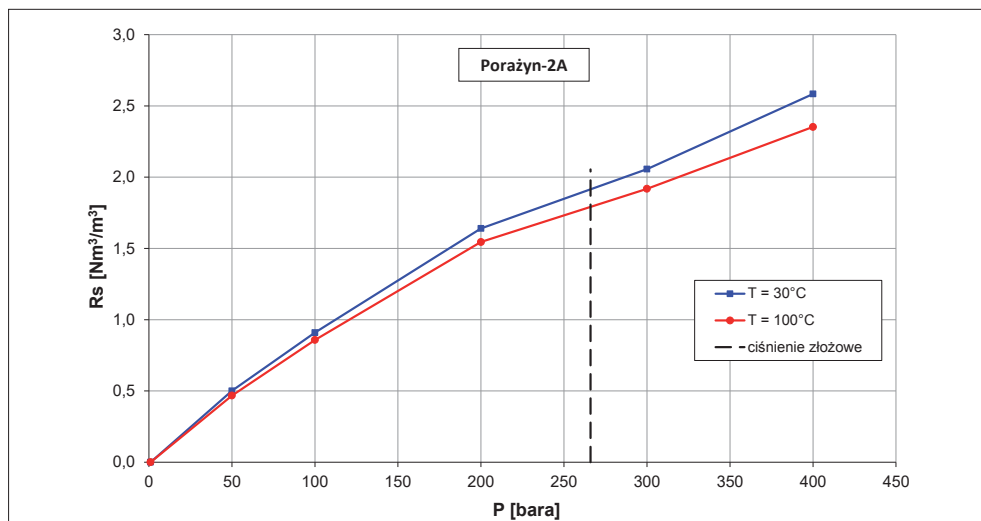
Rys. 4.10. Izotermę rozpuszczalności gazu ziemnego Ujazd-15 w solance złożowej

Rozpuszczalność gazu ziemnego Porążyn-2A w solance złożowej

Tabela 4.9. Rozpuszczalność gazu ziemnego Porążyn-2A w solance złożowej

Ciśnienie P [±0,5]	Rozpuszczalność gazu w solance złożowej Rs [Nm ³ /m ³] ±0,01		
	bara	T = 30°C ±0,2°C	T = 100°C ±0,2°C
400,0		2,58	2,35
300,0		2,06	1,92
P _{zi} = 266,0*		–	1,80
200,0		1,64	1,55
100,0		0,91	0,86
50,0		0,50	0,47
1,0		0,00	0,00

* dane w wierszu wyznaczone przez interpolację

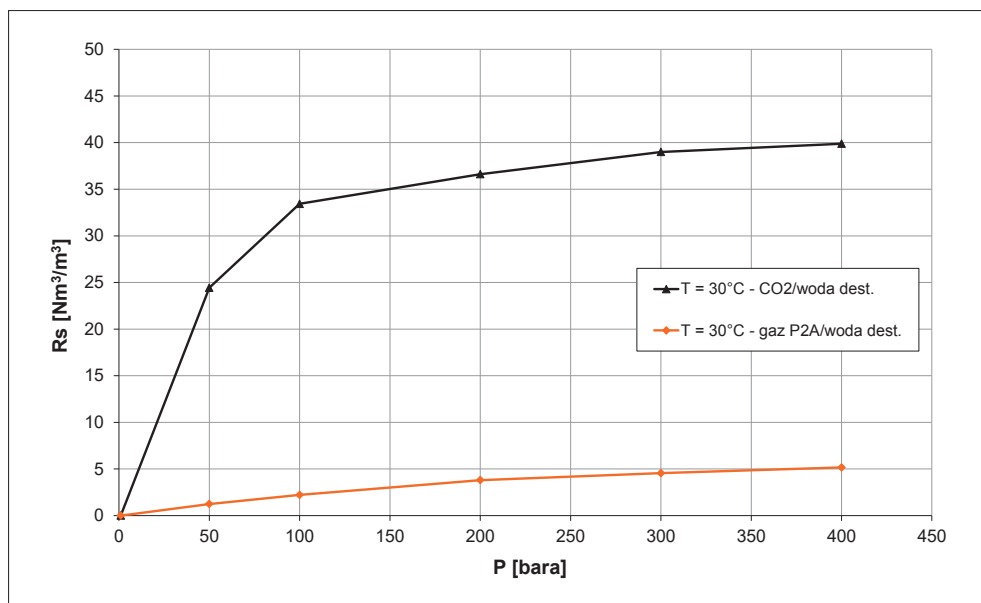


Rys. 4.11. Izotermę rozpuszczalności gazu ziemnego Porążyn-2A w solance złożowej

Rozpuszczalność gazu ziemnego Porażyn-2A i CO₂ w wodzie destylowanej

Tabela 4.10. Rozpuszczalność gazu ziemnego Porażyn-2A i CO₂ w wodzie destylowanej – T = 30°C ±0,2°C

Ciśnienie	Rozpuszczalność gazu w solance złożowej Rs [Nm ³ /m ³] ±0,01	
P [±0,5]		
bara	gaz Porażyn-2A	CO ₂
400,0	5,16	39,88
300,0	4,55	38,99
200,0	3,80	36,61
100,0	2,21	33,43
50,0	1,24	24,43
1,0	0,00	0,00



Rys. 4.12. Izotermę rozpuszczalności gazu złożowego Porażyn-2A i CO₂ w wodzie destylowanej

Uwagi dotyczące wyników badań podanych w tabelach 4.8–4.10:

- niepewność wyznaczenia wartości ciśnienia oszacowano na podstawie klasy dokładności manometru;
- niepewność wyznaczenia rozpuszczalności (Rs) oszacowano na podstawie formuły na propagację błędu.

Rozpuszczalność CO₂ w solance złożowej Porążyn-2A

Badania rozpuszczalności CO₂ w solance złożowej przeprowadzono według wcześniej przedstawionej procedury. Jest ona zbliżona do standardowej techniki PVT badania ropy złożowej, zwanej badaniem różnicowym lub odbiorem różnicowym (z ang. *differential liberation – test DL*), gdyż polega na stopniowym odbiorze i pomiarze gazu wydzielającego się z nasyconej cieczy podczas obniżania ciśnienia w układzie badawczym. Zwiększona zdolność ditlenku węgla do rozpuszczania się w wodzie pozwoliła na dokonanie pewnych dodatkowych pomiarów wolumetrycznych badanego płynu, dzięki czemu określono współczynniki objętościowe solanki nasyconej CO₂ w zadanych warunkach ciśnienia i temperatury. Badania wykonano w dwóch temperaturach: 30°C i 100°C.

Uzyskane rezultaty przedstawiono w tabelach 4.11 i 4.12 w formie odpowiadającej badaniu odbioru różnicowego. Dzięki prowadzeniu stopniowego odbioru gazu z komory możliwe było wykreślenie zależności rozpuszczalności CO₂ w solance w funkcji ciśnienia (rys. 4.13). Na kolejnym rysunku zaprezentowano relacje współczynnika objętościowego solanki nasyconej CO₂ w funkcji ciśnienia dla dwóch temperatur badawczych.

**Tabela 4.11. Badanie różnicowe mieszaniny złożowej z solanki Porążyn-2A i CO₂ –
T = 30°C ±0,2°C**

Ciśnienie	Objętość próbki	Wsp. obj. solanki nasyconej CO ₂	CO ₂ rozpuszczone w wodzie zł.	Rozpuszczalność CO ₂ w wodzie zł.	Próbka
P [±0,5]	V [±5E-03]	B _w [±5E-4]	V _{CO₂} [±1]	Rs [±0,01]	faza
bara	cm ³	m ³ /m ³	Ncm ³	Nm ³ /m ³	–
400,0	203,444	1,0183	4238	21,2	ciecz
300,0	204,307	–	–	–	ciecz + gaz

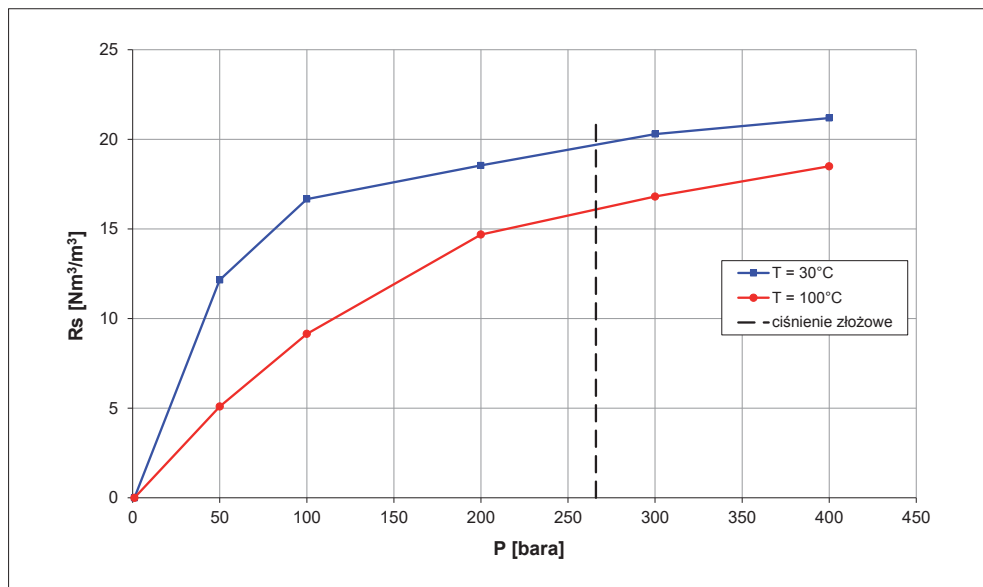
Ciśnienie	Objętość próbki	Wsp. obj. solanki nasyconej CO ₂	CO ₂ rozpuszczone w wodzie zł.	Rozpuszczalność CO ₂ w wodzie zł.	Próbka
P [±0,5]	V [±5E-03]	B _w [±5E-4]	V _{CO₂} [±1]	Rs [±0,01]	faza
bara	cm ³	m ³ /m ³	Ncm ³	Nm ³ /m ³	—
300,0	203,586	1,0179	4059	20,3	ciecz
200,0	204,534	—	—	—	ciecz + gaz
200,0	203,418	1,0172	3709	18,5	ciecz
100,0	204,578	—	—	—	ciecz + gaz
100,0	203,313	1,0166	3333	16,7	ciecz
50,0	216,276	—	—	—	ciecz + gaz
50,0	202,408	1,0120	2431	12,2	ciecz
1,0	200,000	1,0000	0	0,0	ciecz

Tabela 4.12. Badanie różnicowe mieszaniny złożonej z solanki Porążyn-2A i CO₂ – T = 100°C ±0,2°C

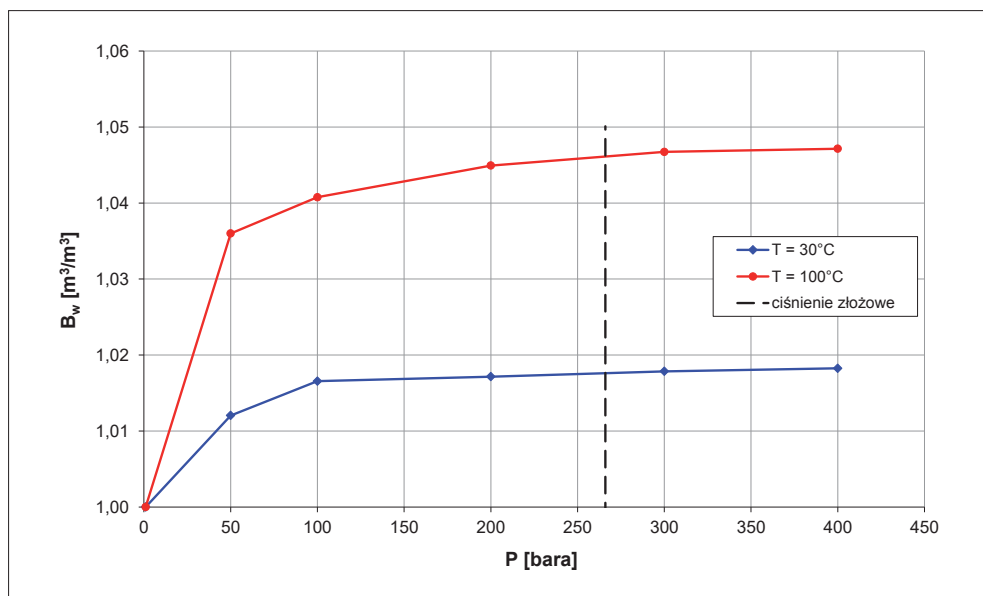
Ciśnienie	Objętość próbki	Wsp. obj. solanki nasyconej CO ₂	CO ₂ rozpuszczone w wodzie zł.	Rozpuszczalność CO ₂ w wodzie zł.	Próbka
P [±0,5]	V [±5E-03]	B _w [±5E-4]	V _{CO₂} [±1]	Rs [±0,01]	faza
bara	cm ³	m ³ /m ³	Ncm ³	Nm ³ /m ³	—
400,0	209,430	1,0472	3699	18,5	ciecz

Ciśnienie	Objętość próbki	Wsp. obj. solanki nasyczonej CO ₂	CO ₂ rozpuszczone w wodzie zł.	Rozpuszczalność CO ₂ w wodzie zł.	Próbka
P [$\pm 0,5$]	V [$\pm 5E-03$]	B _w [$\pm 5E-4$]	V _{CO₂} [± 1]	Rs [$\pm 0,01$]	faza
bara	cm ³	m ³ /m ³	Ncm ³	Nm ³ /m ³	—
300,0	210,691	—	—	—	ciecz + gaz
300,0	209,346	1,0467	3361	16,8	ciecz
P _{zi} = 266,0*	209,240	1,0462	3200	16,0	ciecz
200,0	211,832	—	—	—	ciecz + gaz
200,0	209,454	1,0449	2937	14,7	ciecz
100,0	219,000	—	—	—	ciecz + gaz
100,0	207,887	1,0408	1829	9,2	ciecz
50,0	227,322	—	—	—	ciecz + gaz
50,0	207,200	1,0360	1018	5,1	ciecz
1,0	199,569	1,0000	0	0,0	ciecz

* dane w wierszu wyznaczone przez interpolację



Rys. 4.13. Rozpuszczalność CO₂ w wodzie złożowej Porążyn-2A



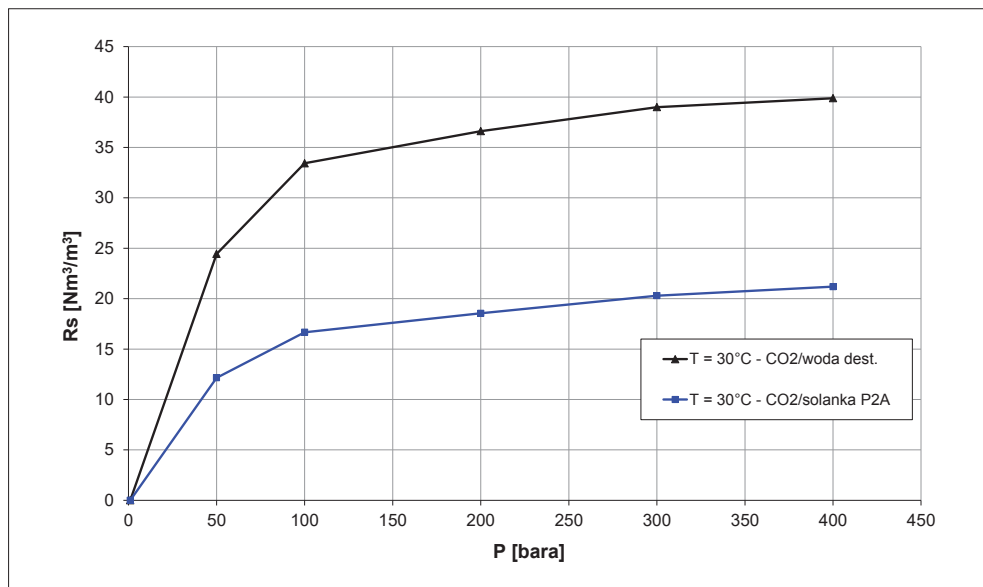
Rys. 4.14. Współczynnik objętościowy solanki Porążyn-2A nasyconej CO₂

Wyniki badań rozpuszczalności CO₂ w wodzie destylowanej przeprowadzono w temperaturze 30°C według wcześniej opisanej procedury badawczej. Uzyskane wyniki badań zawarto w tabeli 4.13 oraz zilustrowano na rysunkach 4.15 i 4.16.

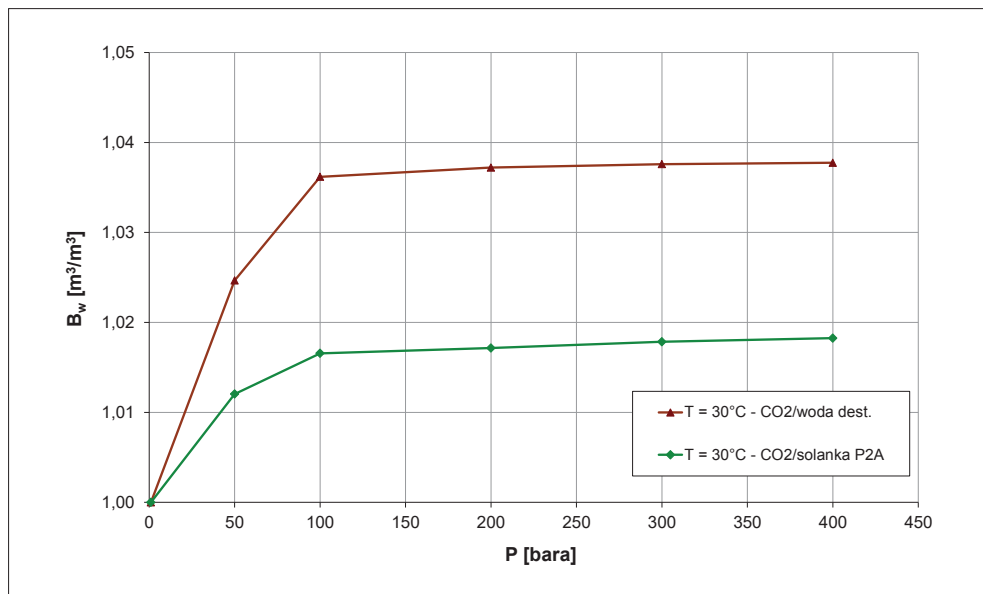
Otrzymane rezultaty stanowią cenny materiał porównawczy dla badań rozpuszczalności ditlenku węgla w solankach złożowych. Potwierdzają ogromny wpływ stopnia mineralizacji wód na zdolność rozpuszczania się CO₂. Badania wykazały, że w przebadanym zakresie ciśnień i temperatur w wodzie destylowanej może rozpuścić się dwukrotnie więcej CO₂ niż w badanej solance złożowej. Przy jeszcze wyższym stopniu mineralizacji solanki różnice te mogą ulec dalszemu zwiększeniu (rys. 4.15).

Tabela 4.13. Badanie różnicowe mieszaniny złożonej z wody destylowanej i CO₂ – T = 30°C ±0,2°C

Ciśnienie	Objętość próbki	Wsp. obj. solanki nasycanej CO ₂	CO ₂ rozpuszczone w wodzie zł.	Rozpuszczalność CO ₂ w wodzie zł.	Próbka
P [±0,5]	V [±5E-03]	B _w [±5E-4]	V _{CO₂} [±1]	Rs [±0,01]	faza
bara	cm ³	m ³ /m ³	Ncm ³	Nm ³ /m ³	–
400	207,550	1,0378	7976	39,9	ciecz
300	208,286	–	–	–	ciecz + gaz
300	207,518	1,0376	7799	39,0	ciecz
200	208,834	–	–	–	ciecz + gaz
200	207,442	1,0372	7322	36,6	ciecz
100	209,149	–	–	–	ciecz + gaz
100	207,237	1,0362	6686	33,4	ciecz
50	227,322	–	–	–	ciecz + gaz
50	204,933	1,0247	4886	24,4	ciecz
1	200	1,0000	0	0,0	ciecz



Rys. 4.15. Rozpuszczalność CO₂ w wodzie destylowanej i solance Porążyn-2A



Rys. 4.16. Współczynnik objętościowy wody destylowanej oraz solanki Porążyn-2A nasyconej CO₂

Uwagi dotyczące wyników badań podanych w tabelach 4.11–4.14:

- niepewność wyznaczenia wartości ciśnienia, objętości i temperatury oszacowano na podstawie klasy dokładności urządzeń pomiarowych;
- niepewność wyznaczenia współczynnika objętościowego (B_w) oraz rozpuszczalności (R_s) oszacowano na podstawie formuły na propagację błędów.

W tabeli 4.14 oraz na rysunku 4.17 zebrano wyniki przeprowadzonych przez autora laboratoryjnych badań rozpuszczalności rodzimych gazów ziemnych oraz CO₂ w solankach złożowych i wodzie destylowanej.

Odnotowano znaczne zróżnicowanie zdolności do rozpuszczania się poszczególnych przebadanych gazów w wodzie.

Najwyższe wartości rozpuszczalności osiągnięto podczas kontaktowania CO₂ z wodą destylowaną w temperaturze 30°C ($R_{sCO_2} = 40 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$). Zdolność CO₂ do rozpuszczania się w solance z odwiertu Porażyn-2A była już znacznie niższa ($R_{sCO_2} = 21,2 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$). Widać, jak mocny wpływ na rozpuszczanie gazu ma stopień mineralizacji, a co za tym idzie – gęstość solanki. Także rozpuszczalności rodzimych gazów ziemnych w wodzie destylowanej ($R_s = 5,16 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$) i solance ($R_s = 2,58 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$) znacznie odbiegają od siebie – różnica ta (w warunkach $P = 400 \text{ bara}$, $T = 30^\circ\text{C}$) wynosi 100%.

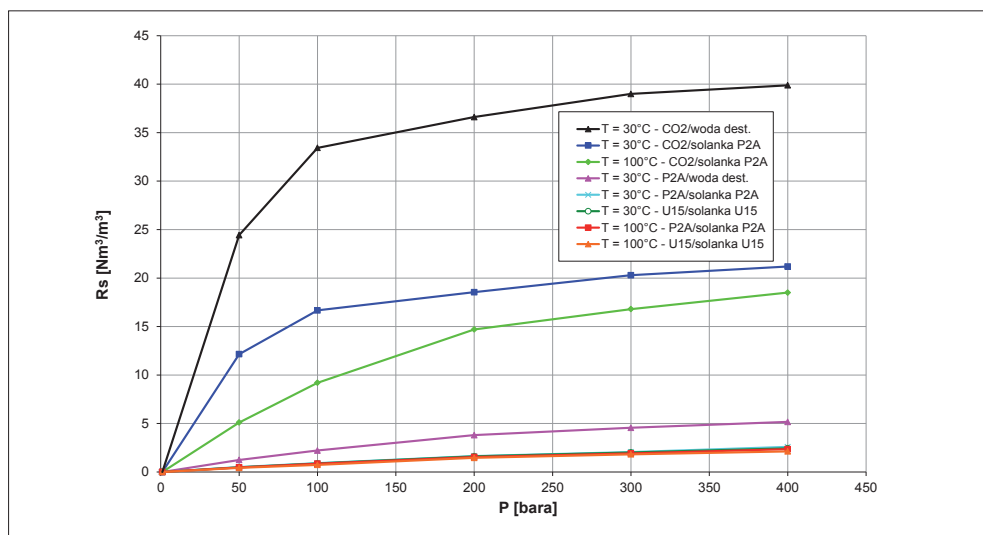
Określone rozpuszczalności gazów rodzimych w odpowiadającej im solance są niewielkie w porównaniu do rozpuszczalności CO₂. Dla układu płynów pobranych z odwiertu Ujazd-15 w warunkach złożowych ($P_{zł} = 91 \text{ bara}$, $T_{zł} = 100^\circ\text{C}$) odnotowano rozpuszczalność wynoszącą $0,70 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$, natomiast w przypadku odwiertu Porażyn-2A ($P_{zł} = 266 \text{ bara}$, $T_{zł} = 100^\circ\text{C}$) wyniosła ona $1,80 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$.

Tak znaczne rozbieżności wynikają głównie z różnic ciśnienia złożowego panującego obecnie w obu złożach. Porównując rozpuszczalność obu układów solanka–gaz przy takim samym ciśnieniu (np. 400 bara) i temperaturze złożowej, można zauważyć, że różnice te są już znikome: odpowiednio $R_s = 2,12 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$ (Ujazd) i $R_s = 2,35 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$ (Porażyn).

Generalnie można także stwierdzić, że w przebadanym zakresie ciśnień i temperatur lepsze rozpuszczanie gazu w solance i wodzie destylowanej zachodzi przy niższych temperaturach. Powyższe stwierdzenie dotyczy temperatur z zakresu poniżej 100°C, gdyż dane literaturowe dowodzą [65], że powyżej tej temperatury zachodzi odwrócenie trendu i rozpuszczalność metanu w wodzie rośnie ze wzrostem temperatury. Wyższe ciśnienie powoduje wzrost rozpuszczalności gazu w wodzie.

Tabela 4.14. Zebrane wyniki badań rozpuszczalności gazów złożowych Ujazd-15, Porażyn-2A i CO₂ w solankach złożowych oraz w wodzie destylowanej

Układ	gaz zł. Ujazd-15 solanka Ujazd-15		gaz zł. Porażyn-2A solanka Porażyn-2A		CO ₂ solanka Porażyn-2A		CO ₂ woda dest.	gaz zł. P-2A woda dest.
	T [°C]	P [bara]	T [°C]	P [bara]	T [°C]	P [bara]		
T [°C] ±0,2	30	100	30	100	30	100	30	30
P [bara] ±0,5	Rozpuszczalność gazu w wodzie [Nm ³ /m ³] ±0,01							
400,0	2,44	2,12	2,58	2,35	21,20	18,50	39,88	5,16
300,0	2,02	1,82	2,06	1,92	20,30	16,80	38,99	4,55
200,0	1,61	1,45	1,64	1,55	18,50	14,70	36,61	3,80
100,0	0,87	0,73	0,91	0,86	16,70	9,20	33,43	2,21
50,0	0,49	0,42	0,50	0,47	12,20	5,10	24,43	1,24
1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Rys. 4.17. Zebrane wyniki badań rozpuszczalności gazów ziemnych i CO₂ w solankach i wodzie destylowanej

5. Modelowanie i analiza procesu wypierania gazu ziemnego rozpuszczonego w warstwach wodonośnych skały zbiornikowej zatłaczanym CO₂

Do opisywanych badań użyto gazu i wody złożowej pobranej z odwiertu Porażyn-2A. Badania prowadzono w warunkach ciśnienia i temperatury odpowiadających warunkom złożowym panującym na złożu Porażyn, tj.: $P_{zł} = 266$ bara, $T_{zł} = 100^{\circ}\text{C}$.

5.1. Badanie na fizycznym modelu złoża – bez ośrodka porowatego

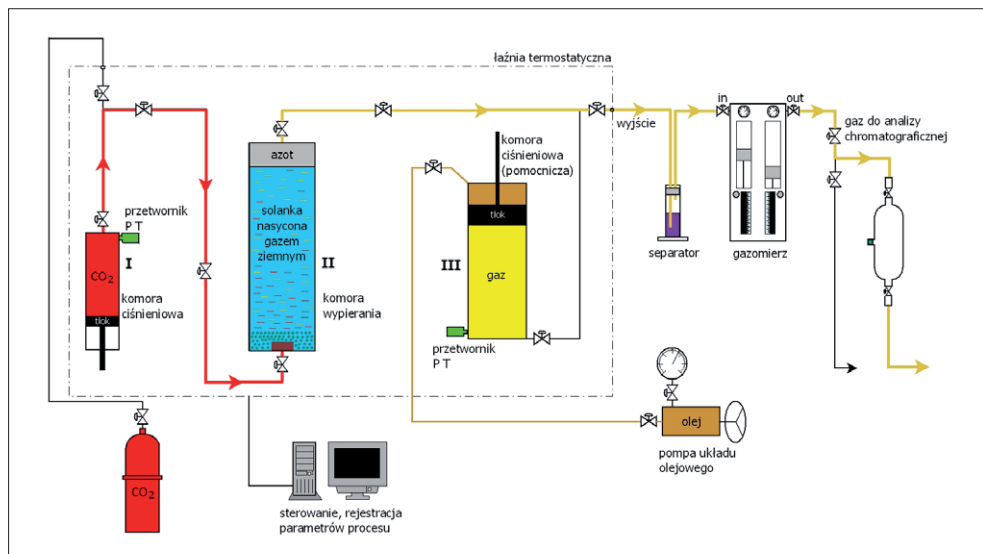
Właściwe badanie procesu wypierania rodzimego gazu metanowego rozpuszczonego w warstwach wodonośnych skały zbiornikowej poprzedzone zostało badaniami pilotażowymi. W niniejszej pracy nie zostały one przedstawione, jednakże pozwoliły na odpowiednie zaprojektowanie i przeprowadzenie badania procesów wypierania w warunkach odpowiadających poziomom wodonośnym niecki poznańskiej. Dzięki badaniu pilotażowemu, o krótszym przebiegu i w niższym ciśnieniu, wprowadzono szereg ulepszeń i korekt w badaniu zasadniczym.

Badanie procesu wypierania wykonano na specjalnie zaadaptowanej do tego celu aparaturze PVT – pogładowy schemat znajduje się na rysunku 5.1.

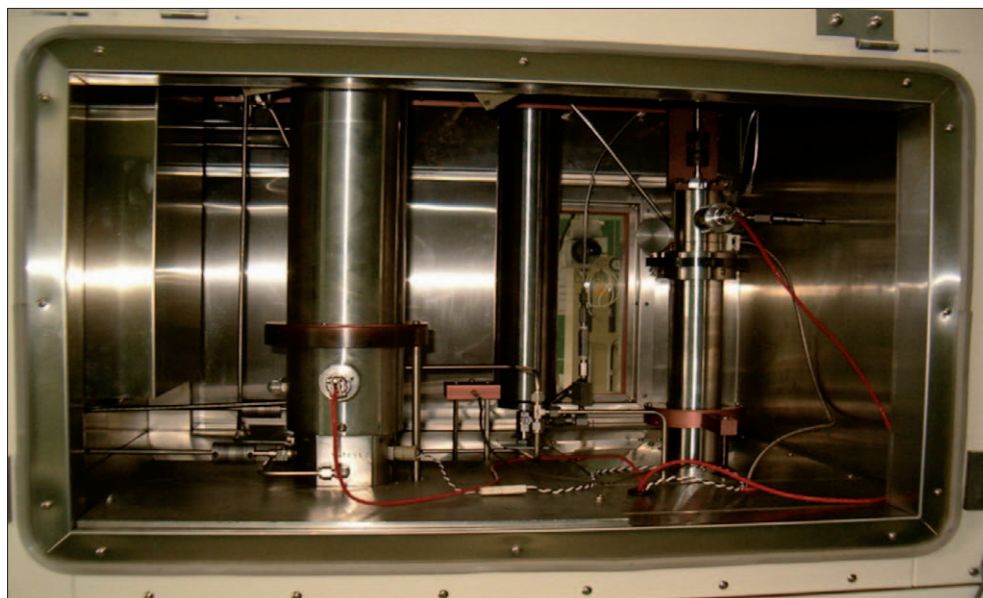
Głównymi elementami opisywanego stanowiska badawczego są trzy komory ciśnieniowe umieszczone w powietrznej łaźni termostatycznej (rys. 5.2):

- I – komora służąca do przygotowania próbek solanki nasyconej rodzimym gazem ziemnym w warunkach PT złożowych. Podczas samego procesu wypierania komora I służyła do kontrolowanego zatłaczania CO₂ do komory wypierania II.
- II – komora wypierania. Na spodzie komory zamontowano dyfuzor (rys. 5.3), ułatwiający rozpuszczanie się w solance wprowadzanego CO₂. Szklane kulki umieszczone w komorze również miały na celu zwiększenie rozpuszczania się wtłaczanego od dołu komory ditlenku węgla w warunkach laboratoryjnych. Komora wypierania w 95% wypełniona została solanką nasyconą gazem ziemnym, przygotowaną w dwóch partiach ($2 \times 370 \text{ cm}^3$) w komorze nr I. Około 5% pozostałej objętości stanowił bufor azotowy w postaci czapy gazowej, który spełniał trzy zadania. Przed samymi badaniami, podczas przetłaczania solanki z komory nr I do komory nr II, poduszka azotowa stanowiła przeciwcisnienie i zapobiegała obniżeniu się ciśnienia w układzie poniżej 266 bara, a tym samym – rozgazowaniu nasyconej solanki. Ciśnienie azotu utrzymywano dzięki komorze nr III – pomocniczej (funkcja *Constant Pressure*). W trakcie badania wypierania obecność bufora azotowego umożliwiała prowadzenie odbioru wypieranego rodzimego gazu rozpuszczonego pierwotnie w solance. Po zakończeniu badań, używając komory pomocniczej i bufora azotowego, wytloczono od góry komory wypierania pozostałą w modelu solankę.
- III – komora gazowa, tzw. pomocnicza, służyła do utrzymywania ciśnienia w układzie podczas operacji mających na celu odpowiednie przygotowanie układu do badań. Jak wspomniano, po badaniach wypierania użyto jej do wytłoczenia solanki z komory.

W skład stanowiska do badań procesu wypierania wchodziły ponadto: układ zaworów i połączeń ciśnieniowych, gazomierz i separator. W celu ustalenia składu odbieranego z komory gazu korzystano z chromatografii gazowej. Do analizy chromatograficznej oddano całą objętość gazu odebranego z komory wypierania (14 próbek w czasie 16 godzin trwania samego eksperymentu wypierania). Kolejne trzy próbki pozyskano przy rozgazowaniu solanki pozostałej po zakończeniu doświadczenia – opis w dalszej części pracy.



Rys. 5.1. Schemat stanowiska do badania procesu wypierania rodzimego gazu ziemnego rozpuszczonego w warstwach wodonośnych poprzez zatłaczany CO₂ [74]



Rys. 5.2. Zespół komór ciśnieniowych będących częścią stanowiska do badania procesu wypierania [80]



Rys. 5.3. Dyfuzor z piaskowca chęcińskiego [80]

W tabeli 5.1 zawarto podstawowe wielkości i parametry, które – w większości – powinny być znane przed rozpoczęciem eksperymentu wypierania. Założono zatłoczenie takiej ilości CO₂, która byłaby co najmniej równa ilości potrzebnej do maksymalnego nasycenia użytej solanki, a więc osiągnięcia rozpuszczalności $R_{smaxCO_2} = 16,0 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$ (przy: $P_{zi} = 266 \text{ bara}$; $T_{zi} = 100^\circ\text{C}$) – bez obecności gazu ziemnego rozpuszczonego w solance. Ostatecznie zatłoczono 100,5% maksymalnej objętości CO₂, jaka mogłaby się rozpuścić w zadanych warunkach PT w solance.

W tabeli 5.2 zestawiono główne parametry prowadzenia procesu wypierania, uzyskane wyniki oraz skład chemiczny odbieranego gazu.

Tabela 5.1. Główne parametry badania procesu wypierania gazu ziemnego z solanki z użyciem CO₂

<p>Objętość komory wypierania w warunkach: $P_{zi} = 266 \text{ bara}$; $T_{zi} = 100^\circ\text{C}$</p>	<p>$V_{kw} = 781 \text{ cm}^3$</p>
--	---

Objętość użytej w eksperymencie solanki Porażyn-2A nasyconej rodzimym gazem ziemnym Porażyn-2A w warunkach: $P_{z1} = 266$ bara; $T_{z1} = 100^{\circ}\text{C}$	$V_{SN} = 738 \text{ cm}^3$
Współczynnik objętościowy solanki Porażyn-2A nasyconej rodzimym gazem ziemnym w warunkach: $P_{z1} = 266$ bara; $T_{z1} = 100^{\circ}\text{C}$	$B_{SN} = 1,033 \text{ m}^3/\text{m}^3$
Objętość solanki martwej (rozgazowanej) w warunkach: $P = 1$ bara; $T = 20^{\circ}\text{C}$	$V_{SM} = \frac{V_{SN}}{B_{SN}} = 715 \text{ cm}^3$
Objętość bufora azotowego (tzw. czapa gaz.) w warunkach: $P_{z1} = 266$ bara; $T_{z1} = 100^{\circ}\text{C}$	$V_{BA} = V_{KW} - V_{SN} = 43 \text{ cm}^3$
Objętość azotu znajdującego się w buforze azotowym (czapa gaz.) przed badaniem w warunkach normalnych: $P = 1$ bara; $T = 0^{\circ}\text{C}$	$V_{N2} = 7284 \text{ Ncm}^3$
Rozpuszczalność rodzimego gazu ziemnego w solance złożowej Porażyn-2A w warunkach: $P_{z1} = 266$ bara; $T_{z1} = 100^{\circ}\text{C}$	$Rs_{P2A} = 1,8 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$
Rozpuszczalność CO ₂ w solance złożowej Porażyn-2A w warunkach: $P_{z1} = 266$ bara; $T_{z1} = 100^{\circ}\text{C}$	$R_{sCO2} = 16,0 \text{ Nm}^3/\text{m}^3 = R_{smaxCO2}$
Szacowana objętość gazu rodzimego (Porażyn-2A) rozpuszczonego w solance złożowej w komorze wypierania w warunkach: $P_{z1} = 266$ bara; $T_{z1} = 100^{\circ}\text{C}$	$V_{GR} = V_{SM} \cdot Rs_{P2A} = 1286 \text{ Ncm}^3$
Szacowana maksymalna objętość CO ₂ możliwa do rozpuszczenia w solance złożowej znajdującej się w komorze wypierania w warunkach: $P_{z1} = 266$ bara; $T_{z1} = 100^{\circ}\text{C}$	$V_{maxCO2} = V_{SM} \cdot R_{smaxCO2} = 11\,435 \text{ Ncm}^3$
Objętość CO ₂ zatłoczonego do komory wypierania w trakcie badań w warunkach: $P_{z1} = 266$ bara; $T_{z1} = 100^{\circ}\text{C}$	$V_{zCO2} = 11\,497 \text{ Ncm}^3 \approx V_{maxCO2}$

Tabela 5.2. Przebieg procesu wypierania rodzimego gazu rozpuszczonego w solance ziołowej przez zatłaczany CO₂ (ciśnienie tłoczenia P_{TL} ≈ ciśnienie odb. gazu; P_{OG} = ciśnienie zł.; P_{zi} = 266 bara; T_{zi} = 100°C)

Lp.	Czas od początku badania	Ilość zatłoczonego CO ₂ (V _{ZO2})		Wydatek tłoczenia CO ₂	Objętość gazu odebranego z komory z komory (V _{GE})	Wydatek gazu odebranego z komory z komory (q _{GE})	Nr próbki pobranej do analizy	Skład próbki gazu			Objętość metanu odebranego z komory (P = const.)	
		Ncm ³	%R _{Smax}					Ncm ³ /h	Ncm ³ /h	CH ₄	N ₂	CO ₂
1	00:00	0	0,0	-	0	0	-	-	-	-	-	-
2	00:09	279	2,4	2033	0	0	-	-	-	-	-	-
3	00:19	413	3,6	803	83	446	-	-	-	-	-	-
4	00:29	474	4,1	365	116	177	1	6,48	93,52	0,00	32	3,1
5	00:35	957	8,4	5280	409	2620	-	-	-	-	-	-
6	00:45	966	8,5	56	488	422	-	-	-	-	-	-
7	00:55	1103	9,6	817	565	412	-	-	-	-	-	-
8	01:05	1224	10,7	730	638	393	2	7,45	92,52	0,03	65	6,3
9	01:25	1478	12,9	762	788	403	-	-	-	-	-	-
10	01:45	1731	15,1	758	937	398	-	-	-	-	-	-
11	02:05	1979	17,3	744	1085	398	-	-	-	-	-	-
12	02:25	2222	19,4	730	1228	383	3	8,07	91,90	0,03	104	10,1
13	02:45	2466	21,6	731	1378	403	-	-	-	-	-	-

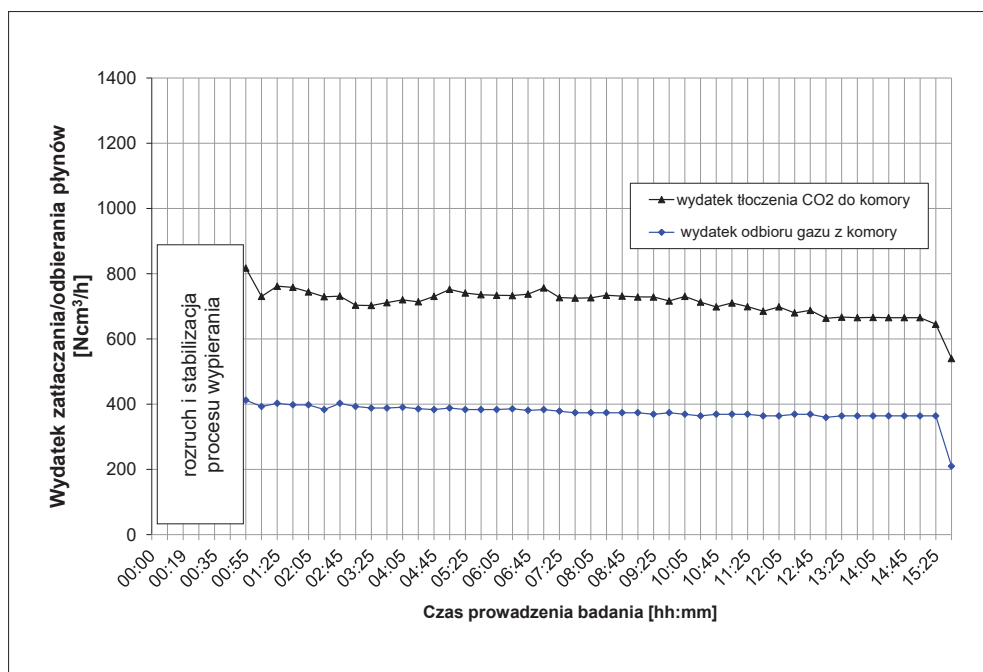
Lp.	Czas od początku badania hh:mm	Ilość załtaczzonego CO ₂ (V _{ZCO2})		Wydatek tłoczenia CO ₂ Ncm ³ /h	Objętość gazu odebranego z komory z komory (V _{GE}) Ncm ³	Wydatek gazu odebranego z komory z komory (q _{GE}) Ncm ³ /h	Nr próbki pobranej do analizy	Skład próbki gazu			Objętość metanu odebranego z komory (V _{ME}) (P = const.)	
		Ncm ³	%R _{Smax}					CH ₄	N ₂ % mol	CO ₂	ΣNcm ³	%V _{MS}
14	03:05	2701	23,6	703	1525	393	—					
15	03:25	2935	25,7	703	1670	388	4	8,40	89,77	1,83	145	14,1
16	03:45	3172	27,7	711	1814	388						
17	04:05	3412	29,8	720	1960	391						
18	04:25	3650	31,9	714	2104	386						
19	04:45	3893	34,0	730	2247	383	5	8,40	85,83	5,77	186	18,1
20	05:05	4144	36,2	752	2392	388						
21	05:25	4391	38,4	741	2535	383						
22	05:45	4636	40,5	736	2678	383						
23	06:05	4881	42,7	734	2821	383	6	8,44	80,50	11,06	226	22,1
24	06:25	5125	44,8	733	2965	386						

Lp.	Czas od początku badania hh:mm	Ilość zatłoczonego CO ₂ (V _{ZO2})		Wydatek tłoczenia CO ₂ Ncm ³ /h	Objętość gazu odebranego z komory (V _{GE}) Ncm ³	Wydatek gazu odbieranego z komory (q _{GE}) Ncm ³ /h	Nr próbki pobranej do analizy	Skład próbki gazu % mol			Objętość metanu odebranego z komory (P = const.) V _{MS}	
		Ncm ³	%R _{smax}					CH ₄	N ₂	CO ₂	ΣNcm ³	%V _{MS}
25	06:45	5371	47,0	737	3107	381	–					
26	07:05	5623	49,2	757	3250	383	7	8,26	75,12	16,62	267	26,0
27	07:25	5866	51,3	727	3391	379						
28	07:45	6107	53,4	725	3530	374						
29	08:05	6349	55,5	726	3670	374						
30	08:25	6594	57,7	734	3809	374	8	7,93	69,64	22,42	305	29,7
31	08:45	6838	59,8	731	3949	374						
32	09:05	7081	61,9	729	4088	374						
33	09:25	7324	64,0	729	4226	369	9	7,60	65,48	26,93	342	33,3
34	09:45	7562	66,1	717	4365	374						
35	10:05	7806	68,3	730	4503	369						
36	10:25	8044	70,3	713	4639	364	10	7,36	59,80	32,84	377	36,7
37	10:45	8276	72,4	698	4776	369						

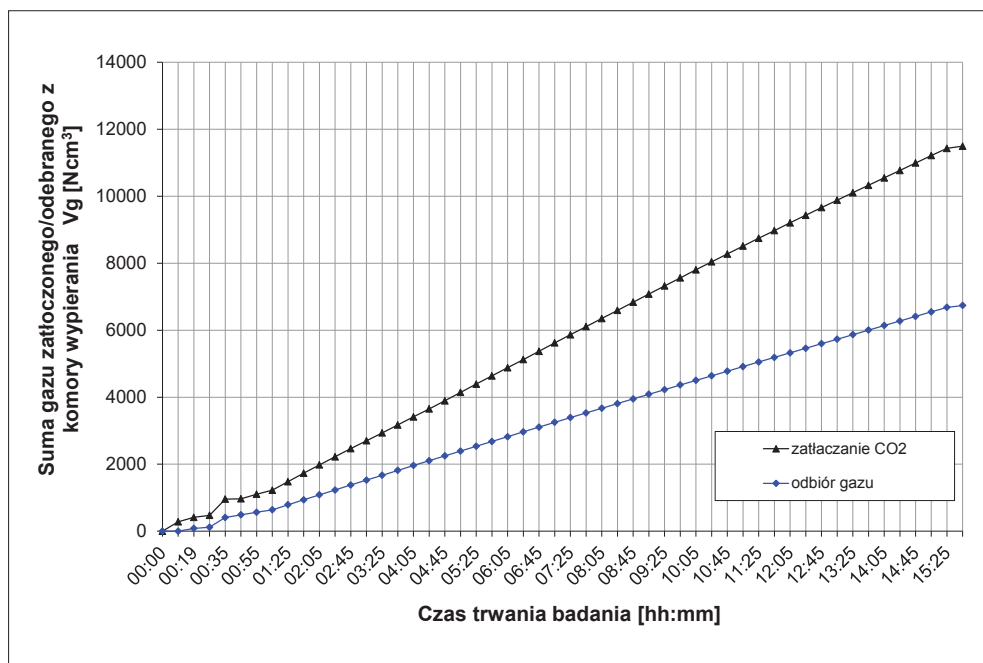
Lp.	Czas od początku badania hh:mm	Ilość zatłoczonego CO ₂ (V _{Z02})		Wydatek tłoczenia CO ₂ Ncm ³ /h	Objętość gazu odebranego z komory z komory (V _{GE}) Ncm ³	Wydatek gazu odbieranego z komory (q _{GE}) Ncm ³ /h	Nr próbki pobranej do analizy	Skład próbki gazu % mol			Objętość metanu odebranego z komory (P = const.)	
		Ncm ³	%Rsm _{max}					CH ₄	N ₂	CO ₂	ΣNcm ³	%V _{MS}
38	11:05	8513	74,4	710	4914	369	–					
39	11:25	8746	76,5	699	5051	369	11	6,96	55,50	37,54	411	40,0
40	11:45	8975	78,5	685	5187	364						
41	12:05	9207	80,5	698	5323	364						
42	12:25	9434	82,5	680	5461	369	12	6,72	48,48	44,80	443	43,2
43	12:45	9663	84,5	688	5598	369						
44	13:05	9884	86,4	663	5733	359						
45	13:25	10107	88,4	667	5868	364	13	6,58	45,12	48,30	475	46,3
46	13:45	10328	90,3	665	6004	364						
47	14:05	10551	92,3	666	6140	364						
48	14:25	10772	94,2	665	6276	364	14	6,33	41,17	52,50	505	49,2
49	14:45	10994	96,1	665	6412	364						
50	15:05	11216	98,1	665	6548	364						
51	15:25	11431	100,0	645	6683	364	210					
52	15:33	11497	100,5	540	6739	210						

Na rysunku 5.4 zestawiono wydatek zatłaczania CO₂ i wydatek, z jakim odbierano gaz z komory – była to mieszanina gazu buforowego (azot) oraz rodzimego gazu metanowego (metan – 80% mol; azot – 19% mol; frakcje C2+ < 1% mol) wypieranego z solanki przez CO₂ – wtłaczany bezpośrednio od dołu komory [80]. Poza momentem rozruchu procesu udawało się utrzymywać jednolite tempo zarówno zatłaczania CO₂, jak i odbioru gazu – przy stałym ciśnieniu. Wyższa wartość wydatku zatłaczania CO₂ w stosunku do wydatku odbioru gazu jest skutkiem dużej zdolności rozpuszczania się CO₂ w solance.

Obecność wystarczającego bufora gazowego do końca procesu wypierania (mimo zatłoczenia prawie 40 cm³ CO₂) potwierdziła wyniki badań procesu spęcznienia i określenie w nich bardzo niskiego współczynnika spęcznienia. Przy większym współczynniku spęcznienia (w tym przypadku wystarczyłoby S_v = 1,05 m³/m³) solanka znajdująca się w komorze, pod wpływem rozpuszczania się w niej CO₂, zwiększyłaby na tyle swoją objętość, by wypełnić miejsce czapy gazowej i skutecznie uniemożliwić kontynuowanie eksperymentu. Proces wypierania musiałby zostać w danym momencie przerwany.



Rys. 5.4. Wydatek zatłaczanego CO₂ i odbieranego gazu z komory wypierania w funkcji czasu, P = constans [80]



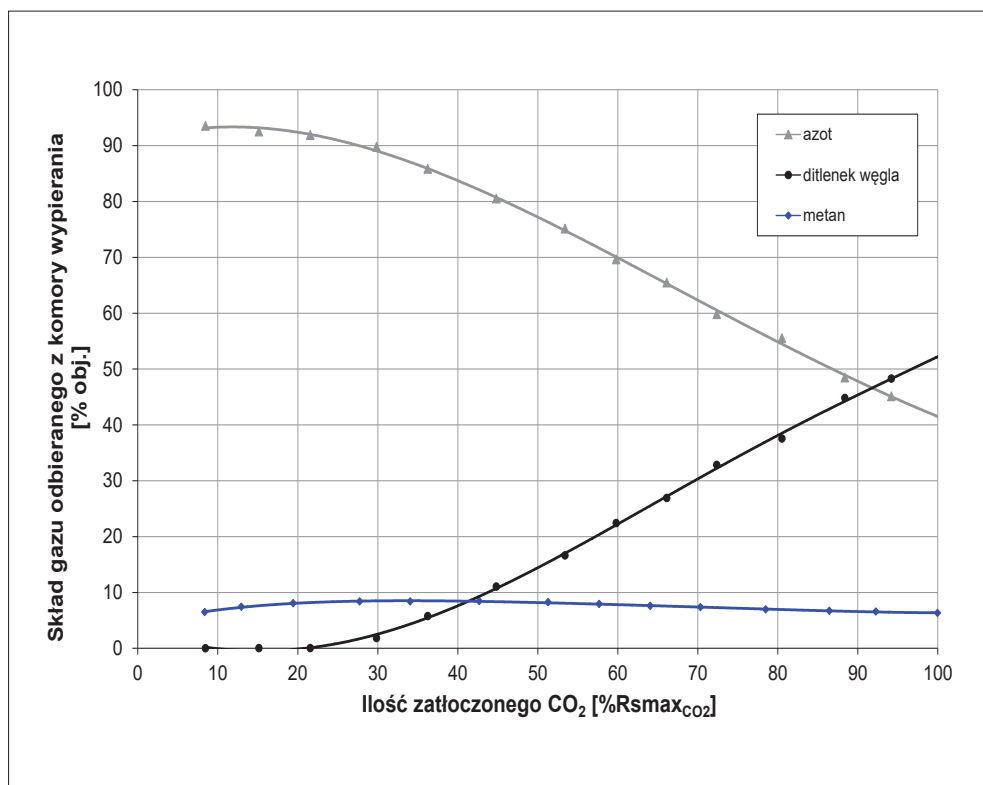
Rys. 5.5. Suma zatłoczonego CO₂ i odebranego gazu z komory wypierania w funkcji czasu, P = constans [80]

Całkowitą ilość ditlenku węgla, którą (w sposób jednostajny) zatłoczono do nasyconej gazem solanki znajdującej się w komorze wypierania, przedstawiono na rysunku 5.5. Zaprezentowano także przebieg odbioru gazu z komory w trakcie kilkunastogodzinnego procesu wypierania. Objętość ostatecznie zatłoczonego CO₂ była blisko dwukrotnie większa od objętości odebranego i poddanego analizom chromatograficznym gazu.

Jak wspomniano wcześniej, gaz na wyjściu z komory wypierania był skrupulatnie mierzony i kolejno poddawany analizom chromatograficznym w celu monitorowania zmian składu zachodzących w trakcie procesu, a także przeprowadzenia objętościowego i jakościowego bilansu, pozwalającego podsumować ostateczne efekty eksperymentu wypierania. Otrzymano skład chemiczny 14 kolejnych próbek gazu (tab. 5.2). Zmiany składu eksploatowanego gazu w funkcji ilości zatłoczonego CO₂ (jako %R_{maxCO2}) zilustrowano na rysunku 5.6.

Metan w składzie gazu odbieranego z komory (w mieszaninie z azotem) pojawia się po wtłoczeniu pierwszych ilości CO₂; wielokrotna różnica rozpuszczalności tych gazów

w solance sprawia, że metan jest wypierany, natomiast CO₂ rozpuszcza się w wodzie. Gaz o bardzo wysokiej rozpuszczalności (CO₂) wprowadzany do układu solanka–gaz ziemny, pozostającego w warunkach równowagi termodynamicznej, powoduje zachwianie ustalonych warunków międzyfazowych i daje potencjał ustalenia się nowych – z dodatkowym płynem w układzie. Ograniczona zdolność solanki do rozpuszczania w sobie gazu ziemnego powoduje wydzielenie się, w pierwszej kolejności, składników gazu o mniejszej rozpuszczalności w wodzie – w tym przypadku metanu i azotu.



Rys. 5.6. Skład gazu odbieranego z komory wypierania w funkcji ilości zatłoczonego CO₂ – P = constans [80]

Dalsze tłoczenie CO₂ daje w efekcie już nieznaczny przyrost koncentracji metanu (maksimum 8,44% mol) w odbieranym gazie [80]. Po zatłoczeniu ok. 40% RsmaxCO₂ zawartość

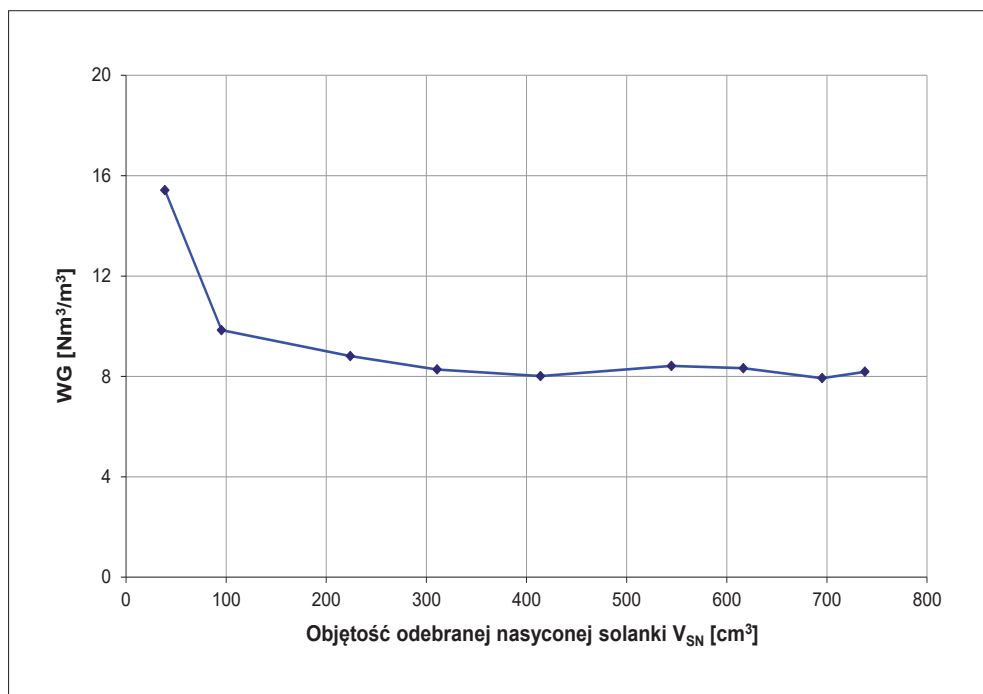
metanu powoli zaczyna spadać; równocześnie konsekwentnie zwiększa się koncentracja CO₂ – głównie kosztem azotu, którego stężenie spada ze 100% do 40% (odpowiednio: początek i zakończenie eksperymentu).

Użyty w eksperymencie rodzimy gaz ziemny ze złoża Porążyn zawiera w sobie blisko 20% azotu, co w powiązaniu z obecnością bufora azotowego, niezbędnego z technicznego punktu widzenia prowadzenia procesu wypierania, nieznacznie utrudnia właściwą interpretację modelowanego zjawiska. Dlatego też przy zastosowaniu czystego metanu jako gazu ziemnego nasycającego solanki złożowe należałoby oczekiwać jeszcze wyższej efektywności procesu i zwiększenia koncentracji metanu kosztem azotu i w stosunku do CO₂. W dalszej części pracy znajduje się opis tego typu badań. Zostały one przeprowadzone przez autora na modelu złoża z ośrodkiem porowatym.

Po zakończeniu kilkunastogodzinnych badań procesu wypierania przystąpiono do odebrania i jednoczesnego rozgazowania (separacji) solanki z komory wypierania. Wodę złożową odgazowano kontaktowo, tj. przy utrzymaniu stałego ciśnienia podczas całego procesu. Wytlóczono całą objętość nasyconej (teraz w głównej mierze ditlenkiem węgla) solanki – $V_{SN} = 738 \text{ cm}^3$. Tłoczono azot od góry komory (ponownie zwiększając bufor azotowy), solankę natomiast odbierano zaworem dolnym (nr 10 na rys. 5.1). Opisywaną separację przeprowadzono stopniowo, z podziałem na dziewięć etapów. Na każdym z nich mierzono wydzielony gaz i objętość odgazowanej solanki. Obliczono wykładniki gazowe i przedstawiono je graficznie na rysunku 5.7. Pobrano i poddano analizie chromatograficznej gaz wydzielony z dwóch pierwszych i ostatniego, dziewiątego, kroku odbioru. Skład chemiczny analizowanych gazów zawarto na schemacie ilustrującym opisywany proces (rys. 5.8).

Solanka znajdująca się w trakcie badań w najniższej części komory wypierania, w strefie wprowadzania CO₂, charakteryzowała się najwyższym stopniem nasycenia gazem $WG_1 = 15,4 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$. Analizy składu wykazały, że był to głównie ditlenek węgla (98% mol). Oprócz bezpośredniej bliskości miejsca wprowadzania CO₂ do komory wpływ na wyższy wykładnik gazowy najniższej warstwy solanki mogła mieć dodatkowa objętość CO₂ pozostała w objętości martwej zaworu oraz w objętości porowej dyfuzora po zatrzymaniu procesu zatłaczania ($Bg_{CO_2} = 0,0034 \text{ m}^3/\text{Nm}^3$, przy: $P_{zł} = 266 \text{ bara}$, $T_{zł} = 100^\circ\text{C}$). Kolejne wartości wykładnika gazowego utrzymywały się na stałym poziomie w granicach 9,8–7,9 Nm^3/m^3 . Z powyższego wynika, iż w trakcie prowadzonego procesu zatłaczania w komorze uzyskano połowę maksymalnej rozpuszczalności CO₂ w danych warunkach w solance, tj. 50% $R_{smax_{CO_2}}$. Zważywszy na brak możliwości dodatkowego mieszania płynów w komorze w trakcie procesu zatłaczania CO₂ oraz na względnie krótki czas prowadzenia eksperymentu (w stosunku do warunków otworowych), uniemożliwiający osiągnięcie równowagi fazowej w systemie gaz–solanka, należy to uznać za wynik zadowalający. W warunkach

geologiczno-złożowych powinno się oczekiwać, że wartość nasycenia rodzimej solanki ditlenkiem węgla w strefie przyodwiertowej (odwiert zatłaczający) będzie zbliżała się do 100% $R_{smax_{CO_2}}$.

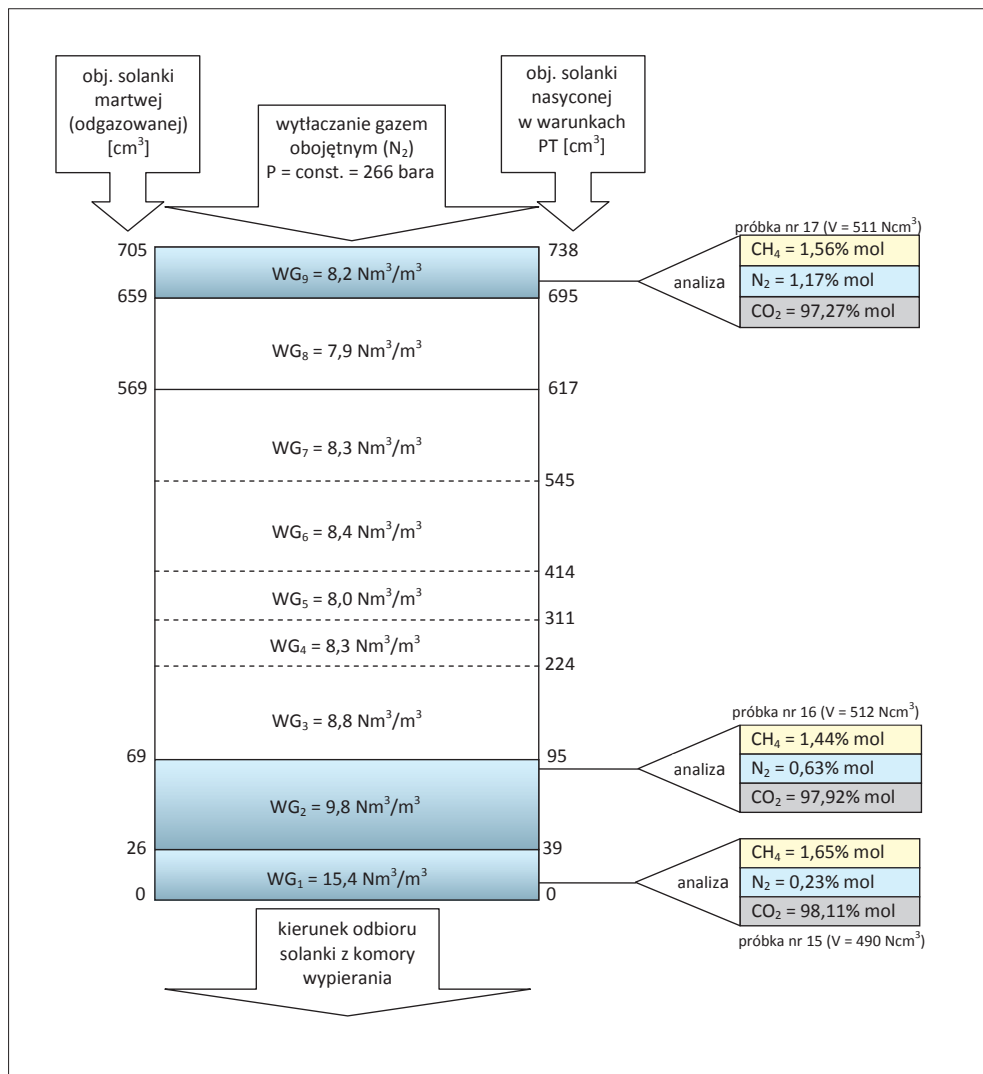


Rys. 5.7. Rozgazowanie solanki po badaniach, $WG = f(V_{SN})$, $P = \text{constans}$ [80]

Analizy chromatograficzne próbek gazu uzyskanych podczas separacji solanki wytłaczanej z komory wypierania wykazały znikomą koncentrację metanu. Odnotowano najwyższą koncentrację CO₂ w dolnym obszarze komory (98%), malała ona nieznacznie na korzyść azotu i metanu w kierunku górnych obszarów komory (rys. 5.8).

Do przeprowadzenia bilansu przyjęto następujący średni skład gazu z rozgazowania solanki:

- metan: 1,66% mol;
- azot: 0,68% mol;
- ditlenek węgla: 97,77% mol.



Rys. 5.8. Schemat poglądowy procesu odbioru solanki z komory wypierania po zakończeniu eksperymentu [80]

W tabeli 5.3 zawarto rezultaty obliczeń bilansowych dotyczących gazów wprowadzonych do komory wypierania i gazów odebranych z komory w trakcie i po zakończeniu badania właściwego procesu wypierania rodzimych gazów ziemnych przez zatłaczany CO₂.

Tabela 5.3. Całkowity bilans gazu w eksperymencie wypierania

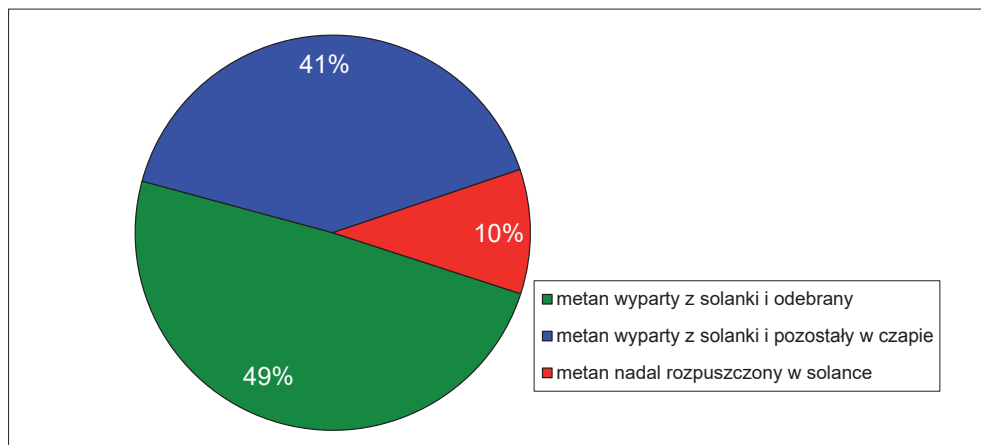
Gaz dostarczony do komory przed i w trakcie badań		Gaz odebrany z komory w trakcie i po badaniach	
Rodzaj/typ	V [Ncm ³]	Rodzaj/typ	V [Ncm ³]
Objętość gazu rodzimego rozpuszczonego w solance (V _{GR})	1286	Gaz odbierany w trakcie badania (V _{GE})	6738
Objętość azotu w buforze azotowym (V _{N2})	7284	Gaz pozostały w czapie gazowej po zakończeniu wypierania (V _{GC})	6588
Objętość zatłoczonego CO ₂ (V _{CO2})	11 497	Gaz wydzielony z rozgazowania solanki złożowej po zakończeniu procesu wypierania (V _{CS})	6741
Suma objętości gazu dostarczonego do komory (V _{GD})	20 067	Suma objętości gazu odebranego z komory (V _{GO})	20 067

Tabela 5.4 zawiera obliczenia bilansu gazów procesu wypierania z podziałem na trzy główne składniki gazowe, tj.: metan, azot i ditlenek węgla. Wykonany bilans jakościowy pozwala ocenić skuteczność przeprowadzonego eksperymentu mającego na celu modelowanie procesu wypierania gazu ziemnego rozpuszczonego w wodach złożowych z zastosowaniem zatłaczania CO₂.

Z szacowanej zawartości metanu nasycającego solankę w warunkach złożowych 1027 Ncm³ dzięki zatłaczaniu CO₂ udało się wyprzeć 90% jego pierwotnej ilości, tj. 922 Ncm³. Część metanu (505 Ncm³) odebrano z komory wypierania w trakcie eksperymentu, część natomiast pozostała w czapie gazowej (w mieszaninie z CO₂ i azotem) w momencie zakończenia eksperymentu wypierania (417 Ncm³). Pozostała objętość metanu biorącego udział w eksperymencie nie została wyparta z solanki i była w niej rozpuszczona w momencie zakończenia właściwego procesu wypierania – tj. 105 Ncm³.

Tabela 5.4. Bilans gazu w procesie wypierania z rozbiciem na poszczególne składniki gazu

Rodzaj/typ gazu	Składnik [Ncm ³]			Suma	
	CH ₄	N ₂	CO ₂		
Gaz rodzimy rozpuszczony w solance (V _{GR})	1027	255	4	1286	Gaz dostarczony
Zatłoczony CO ₂ w trakcie badania procesu wypierania (V _{ZCO2})	–	–	11 497	11 497	
Azot pozostający w buforze azotowym (V _{N2})	–	7284	–	7284	
Gaz wydobyty (V _{GE})	505	4781	1452	6738	Gaz odebrany
Gaz pozostały w czapie gazowej po zakończeniu wypierania (V _{GC})	417	2712	3459	6588	
Gaz z rozgazowania solanki (V _{GS})	105	46	6590	6741	

Rys. 5.9. Bilans metanu w procesie wypierania gazu ziemnego zatłaczanym CO₂ [80]

Należy mieć na uwadze fakt, że niemożliwe jest w trakcie opisywanych badań laboratoryjnych/modelowych oddanie w pełni warunków procesowych wypierania zachodzących w złożu – w czasie geologicznym i skali makro. Jednakże zastosowane rozwiązania (np. dyfuzor z piaskowca i kulki szklane wydłużające migrację CO₂ w solance) pozwalają częściowo przybliżyć się do warunków i zjawisk zachodzących w realnym złożu.

Kolejnym krokiem była budowa doskonalszej postaci modelu symulującego (obrazującego) ośrodek porowaty.

5.2. Modelowanie procesu wypierania gazu ziemnego na fizycznym modelu ośrodka porowatego

Fizyczny model ośrodka porowatego – charakterystyka

Dla realizacji zadania stworzono specjalne stanowisko badawcze, którego głównym elementem jest komora ciśnieniowa stanowiąca model ośrodka porowatego (rys. 5.10). Komorę badawczą zbudowano z wysokogatunkowej stalowej rury o średnicy wewnętrznej $d = 5$ cm, długości 220 cm i pojemności $V_{KP} = 4617$ cm³. Komorę starannie wypełniono sortowanym piaskiem kwarcytowym o ziarnistości 0,1–0,5 mm. Dokonano pomiarów powstałej objętości porowej (ang. *pore volume* – PV) poprzez wypełnienie modelu ośrodka porowatego azotem, uzyskując $PV = 1631$ cm³. Następnie wyznaczono porowatość ośrodka – $\varphi = 35,3\%$.

Model wyposażono w szklany wziernik, umożliwiając tym samym obserwację jego najwyżej położonej przestrzeni pod kątem zmian fazowych. Identyfikacja chwili pojawienia się w układzie wtórnej czapy gazowej, powstałej w wyniku desorpcji gazu rodzimego przez zatłaczany CO₂, była niezwykle istotna dla właściwego wykonania eksperymentu wypierania. Wziernik, we współpracy z pompką wodną, umożliwiał także pomiar ilości wypartego gazu (wielkości czapy) w warunkach PT prowadzenia procesu wypierania.

Z uwagi na fakt wykonywania badań w wysokiej temperaturze ($T_{zi} = 100^\circ\text{C}$) zacho-
dziła konieczność wyposażenia stanowiska badawczego w precyzyjny układ grzewczy z regulacją i stabilizacją temperatury. Zastosowano trzy maty grzewcze, którymi owinięto komorę modelu, a następnie wykonano izolację termiczną. Każda z grzałek była sterowana indywidualnie poprzez precyzyjny czujnik i regulator pracujący w trybie PID – zapewniającym minimalne wahania temperatury układu (rzędu $\pm 0,1^\circ\text{C}$). Dzięki zastosowaniu

trzech płaszczy grzewczych, owiniętych wzdłuż całej długości komory, trzech czujników temperatury i trzech regulatorów wyeliminowano problem powstawania gradientu temperatury wraz z wysokością modelu ośrodka porowatego.

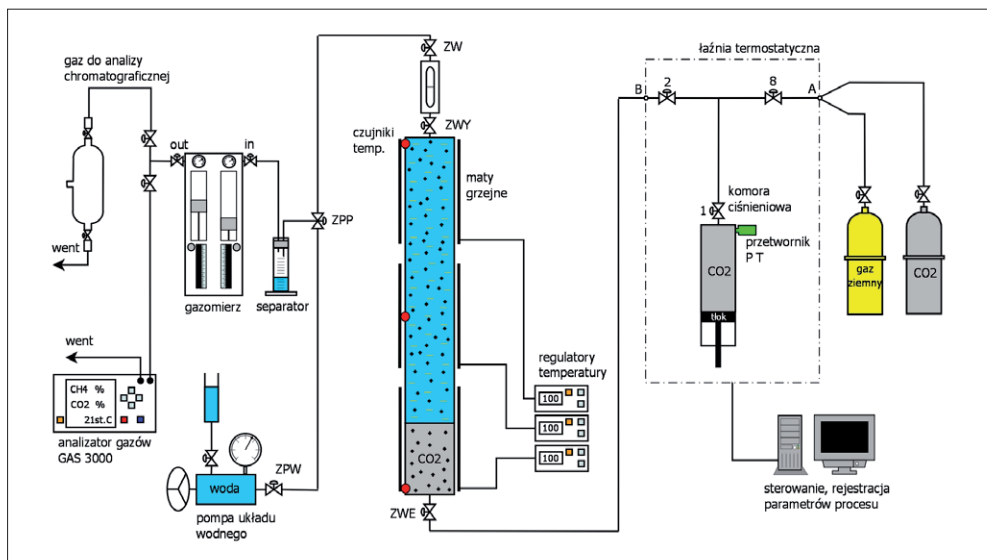


Rys. 5.10. Stanowisko badawcze do modelowania procesów wypierania gazu rozpuszczonego w solankach [78]

Inne elementy opisywanego stanowiska badawczego to:

- 1) komora ciśnieniowa aparatury PVT – służąca do badań i przygotowywania próbek solanki nasyconej rodzimym gazem ziemnym w warunkach PT złożowych. Podczas samego procesu wypierania komora ta służyła do kontrolowanego zatłaczania CO₂ do modelu złoża, a po wypełnieniu solanką – do kontrolowania ciśnienia w układzie badawczym;
- 2) separator – umożliwiający także pomiar odbieranej cieczy;

- 3) gazomierz – służący do precyzyjnego pomiaru gazu odbieranego z modelu złoża;
- 4) analizator gazów (CO₂, CH₄, H₂S) – do bieżącej oceny składu strumienia odbieranego gazu;
- 5) wodna pompa ciśnieniowa – umożliwiająca wprowadzenie badanego płynu do wziernika z zachowaniem stałego ciśnienia. Układ połączeń został tak skonstruowany, że umożliwiał ponowne wycofanie próbki z wziernika do modelu złoża bez zakłócenia parametrów prowadzenia procesu;
- 6) układ zaworów i połączeń ciśnieniowych – umożliwiających m.in. pobór próbek gazu do chromatografii gazowej (analizowano 10 próbek gazu);
- 7) układ regulacji i stabilizacji temperatury komory badawczej modelu złoża.

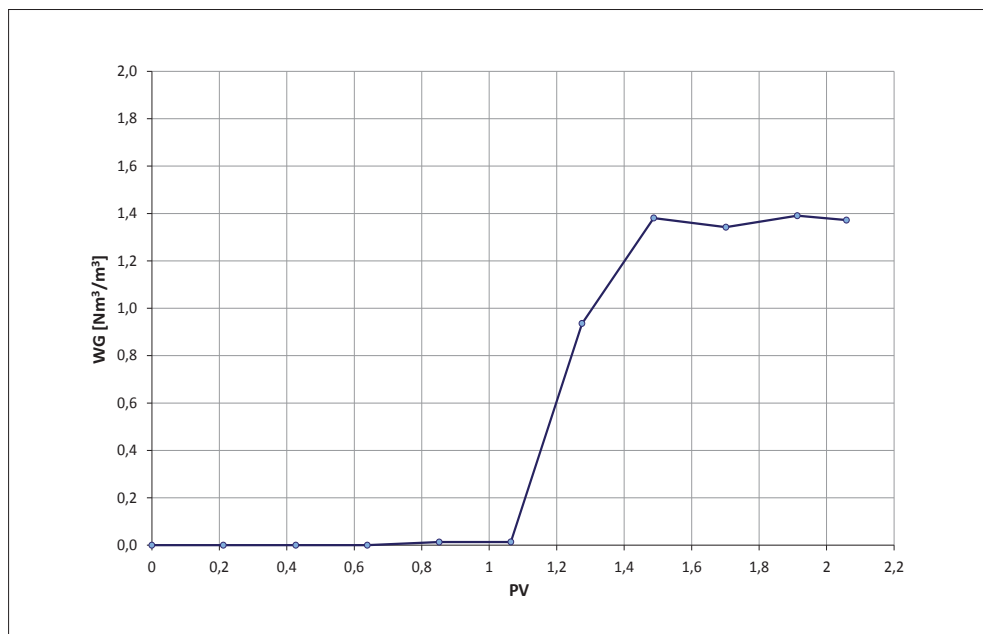


Rys. 5.11. Schemat stanowiska do badania procesu wypierania gazu ziemnego rozpuszczonego w warstwach wodonośnych przez zatłaczany CO₂ [78]

Opis eksperymentu

Do eksperymentu wypierania użyto gazu i wody złożowej pobranej z odwiertu Porażyn-2A. Badania zasadnicze prowadzono przy ciśnieniu i temperaturze odpowiadających warunkom złożowym panującym na ww. złożu ($P_{zł} = 266$ bara, $T_{zł} = 100^{\circ}\text{C}$).

W komorze ciśnieniowej aparatury PVT przygotowano solankę nasyconą rodzimym gazem ziemnym Porażyn w warunkach złożowych. Następnie, w stanie jednofazowym (powyżej ciśnienia nasycenia), przetłoczono przygotowaną solankę do ośrodka porowatego modelu – utrzymując stałe ciśnienie i zapobiegając tym samym wydzieleniu się gazu. Nasycenie całej objętości porowej modelu wymagało przygotowania wielu jednorodnych porcji nasyconej solanki i właściwego przetłoczenia każdej z nich, aż do całkowitego wypełnienia objętości porowej (PV) modelu. Zweryfikowano zgodność uzyskiwanego wykładnika gazowego na wyjściu z modelu z rezultatami odpowiednich badań rozpuszczalności, co potwierdziło pełną jednorodność i właściwy stopień nasycenia solanki rodzimym gazem ziemnym. Otrzymano takie samo nasycenie gazem solanki zatłaczanej i odbieranej z modelu ośrodka porowatego (rys. 5.12).



Rys. 5.12. Wprowadzanie do modelu solanki nasyconej gazem ziemnym – przebieg zmian wykładnika gazowego na wyjściu z modelu w funkcji objętości porowej PV [78]

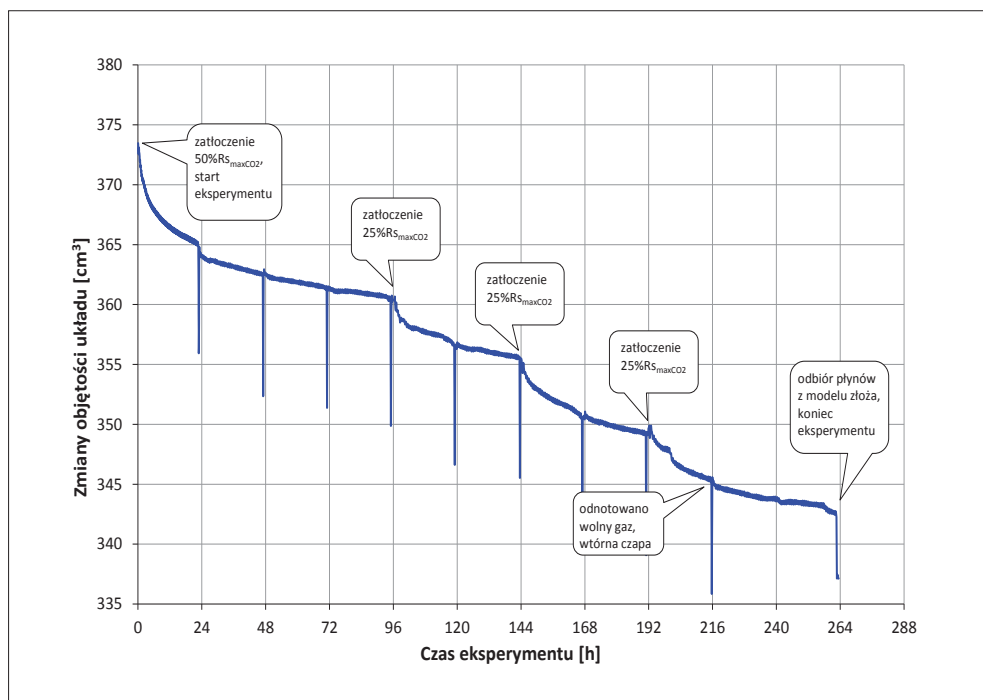
Następnie, utrzymując podwyższone ciśnienie (w stosunku do ciśnienia nasycenia), podniesiono temperaturę solanki do $T_{zł} = 100^{\circ}\text{C}$, zachowując stan jednofazowy w ukła-

dzie. Podczas podgrzewania objętość solanki w systemie wzrosła o 74 cm³, tj. ok. 5%. Tak przygotowany układ pozostawiono do stabilizacji w warunkach złożowych ($P_{zł} = 266$ bara, $T_{zł} = 100^{\circ}\text{C}$).

Następnym etapem eksperymentu było wprowadzenie do modelu kolejnych ilości CO₂. Założono stopniowe zatłaczanie CO₂ w porcjach. Były to ułamki objętości ditlenku węgla ($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$) niezbędnej do nasycenia solanki w danych warunkach PT, a więc osiągnięcia rozpuszczalności $R_{\text{maxCO}_2} = 16,0 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$ bez obecności rodzimego gazu rozpuszczonego w solance. Dane rozpuszczalności oraz inne istotne parametry PVT pozyskano z wcześniej wykonanych badań.

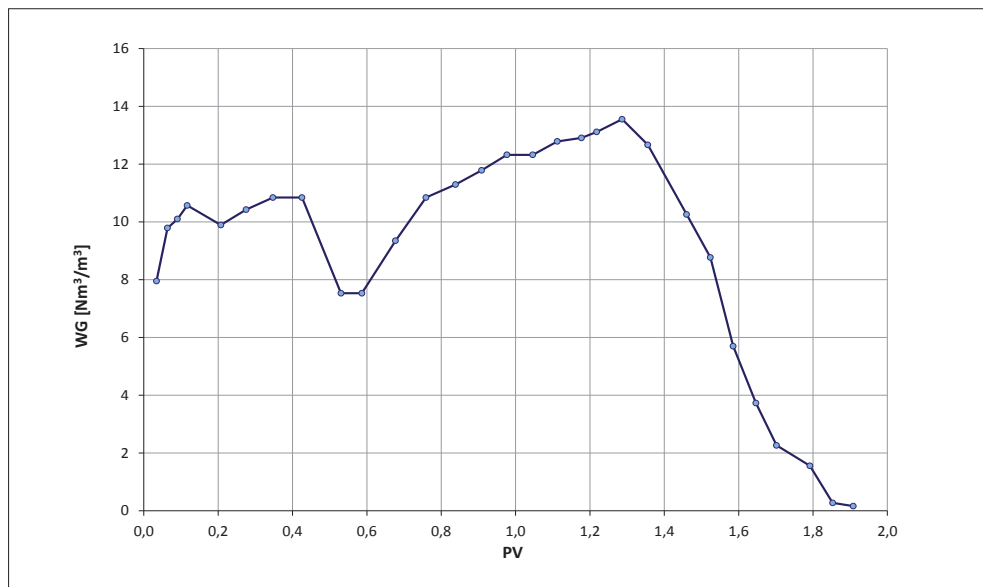
Zatłaczanie CO₂ przeprowadzono, z zachowaniem stałego ciśnienia w układzie, przez zawór wejściowy/dolny (ZWE), przy jednoczesnym odbiorze solanki zaworem wyjściowym/górnym (ZWY). Tłoczenie ditlenku węgla odbywało się porcjami, z zachowaniem określonego czasowego trybu postępowania. Na początku eksperymentu wprowadzono CO₂ w ilości odpowiadającej 50% R_{maxCO_2} . Kolejne porcje CO₂ zatłaczano po 4., 6. i 8. dobie od rozpoczęcia eksperymentu (rys. 5.13). Co 24 godziny, z zachowaniem ciśnienia złożowego, wprowadzano górną (najbardziej interesującą) część badanego płynu do wziernika. Miało to na celu sprawdzenie, czy w określonym przedziale czasowym w złożu nie wydzielił się już wolny gaz obecny w postaci wtórnej czapy gazowej – na rysunku moment ten ilustrują pionowe „piki” występujące w 24-godzinnych odstępach. Ostatecznie zatłoczono 125% maksymalnej objętości CO₂, jaka mogłaby się rozpuścić w danych warunkach w solance. Było to 30 600 Ncm³ CO₂, w warunkach PT złożowych 112 cm³ (wysokość słupa CO₂ w modelu złoża 16 cm, powierzchnia kontaktu z solanką 7 cm² – uwzględniono porowatość ośrodka). Pomędzy poszczególnymi etapami tłoczenia komorę ciśnieniową aparatury PVT pozostawiano połączoną z modelem ośrodka porowatego w funkcji utrzymywania stałego ciśnienia w układzie (*Constant Pressure Mode*). Dyfuzja/rozpuszczanie się CO₂ w solance nie powodowało spadku ciśnienia w modelu – tłok komory PVT odpowiednio przesunął się, utrzymując $P_{zł} = 266$ bara (rys. 5.13). Zarejestrowane zmiany objętości komory aparatury PVT (stabilizującej ciśnienie) w trakcie całego eksperymentu pozwalają na ciągłe śledzenie dynamiki badanych procesów zachodzących w modelu (rozpuszczanie, dyfuzja, desorpcja, migracja i kumulowanie się gazu). Sterowanie i rejestracja parametrów prowadzonego procesu odbywały się przez oprogramowanie aparatury PVT.

W momencie, gdy obecność fazy gazowej w modelu okazała się faktem, przystąpiono do odbioru kolejnych objętości gazu „z czapy” z zachowaniem stałego ciśnienia. Następnie z modelu wytłoczono fazę wodną, dokonując pomiaru wykładnika gazowego i określając skład wydzielonego z solanki gazu. W prezentowanym eksperymencie utworzenie się wtórnej czapy gazowej odnotowano po 9 dobach od rozpoczęcia doświadczenia.

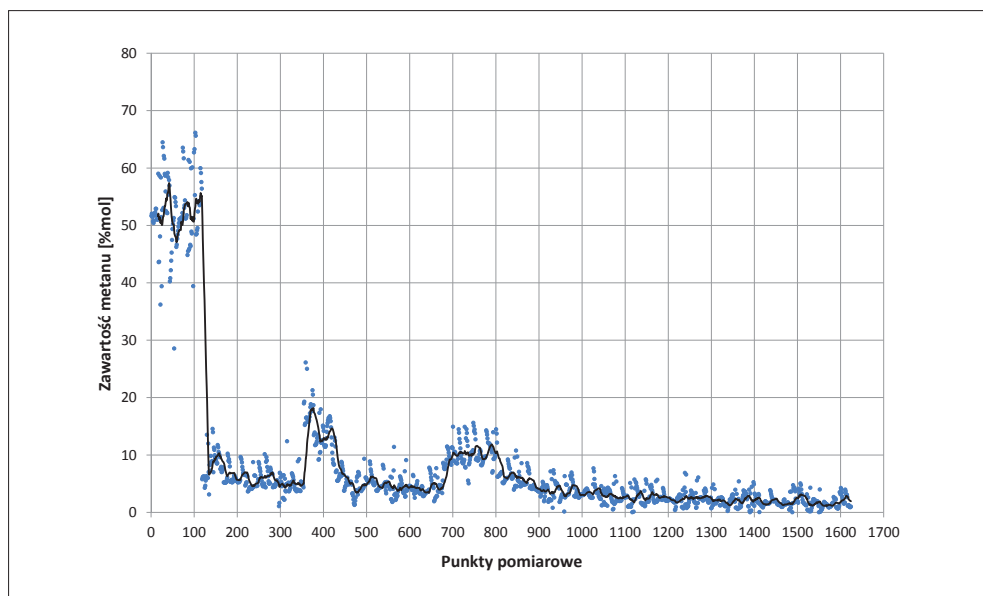


Rys. 5.13. Zmiany objętości układu podtrzymującego ciśnienie złożowe w modelu, odzwierciedlające dynamikę badanego procesu [78]

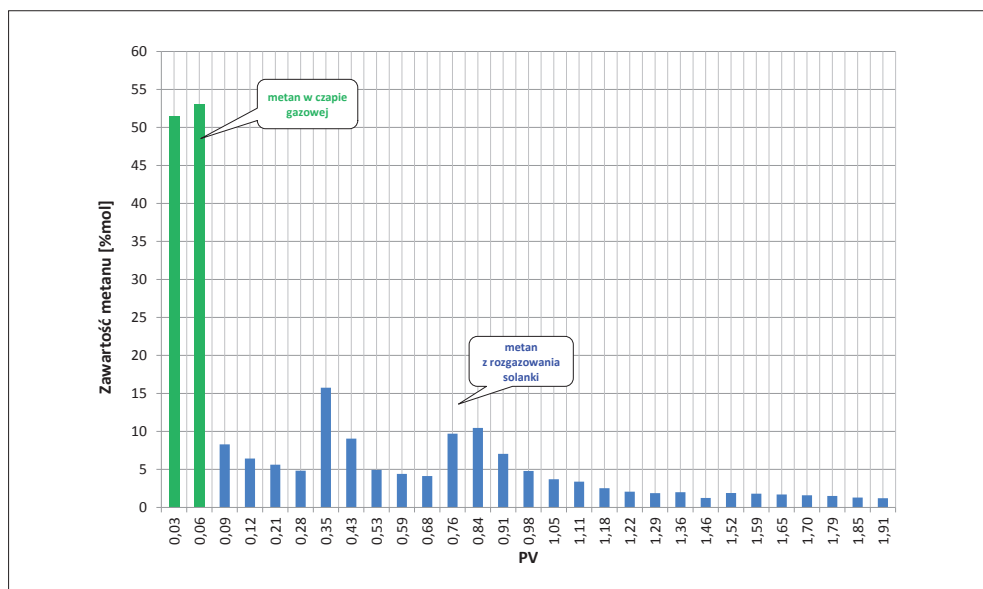
W trakcie odbioru gazu z modelu zmierzono objętość i poddano analizom skład chemiczny 23 próbek gazu. W czasie rzeczywistym monitorowano jego skład analizatorem CH₄/CO₂. Eksperyment kontynuowano do momentu odebrania z modelu (z zachowaniem ciśnienia złożowego) całego płynu złożowego biorącego udział w eksperymencie wypierania. Podczas odbioru płynu odnotowano „wahnięcie” wykładnika gazowego (rys. 5.14). Uważa się, że za zaburzenie właściwego przebiegu krzywej nasycenia solanki gazem odpowiada fakt wyłaczania płynu złożowego (o temperaturze $T_{zi} = 100^{\circ}\text{C}$) wodą destylowaną o temperaturze pokojowej. Wprowadzenie „zimnego” płynu do komory badawczej, dodatkowo w dużych ilościach, spowodowało znaczną destabilizację temperatury modelu i zakłócenie pracy układu trzech regulatorów temperatury [72]. Zmiany temperatury mają wpływ na wielkość rozpuszczalności gazów w wodzie. Powyższe czynniki spowodowały również anormalną koncentrację metanu w odbieranym gazie w omawianym momencie eksperymentu (rys. 5.15 i 5.16).



Rys. 5.14. Odbiór płynu z modelu złoża – przebieg zmian wykładnika gazowego [78]



Rys. 5.15. Odbiór płynu z modelu złoża – zawartość metanu w odbieranym gazie [78]



Rys. 5.16. Odbiór płynu z modelu złoża – zawartość metanu w odbieranym gazie [78]

Po zbilansowaniu przeprowadzonego procesu wypierania gazu ziemnego przez zatłaczany CO₂ można stwierdzić, iż dzięki wprowadzeniu CO₂ do systemu złożonego z solanki pozostającej w równowadze fazowej z nasycającym ją rodzimym gazem metanowym – w układzie tworzą się nowe warunki równowagowe z efektem pojawienia się wtórnej czapy gazowej.

Czas migracji zdesorbowanego z solanki gazu do czapy, jej wielkość i skład fazy gazowej zależą od wielu czynników: sposobu i ilości zatłaczanego CO₂, parametrów PT złożowych, cech skały zbiornikowej (porowatość, przepuszczalność) i innych.

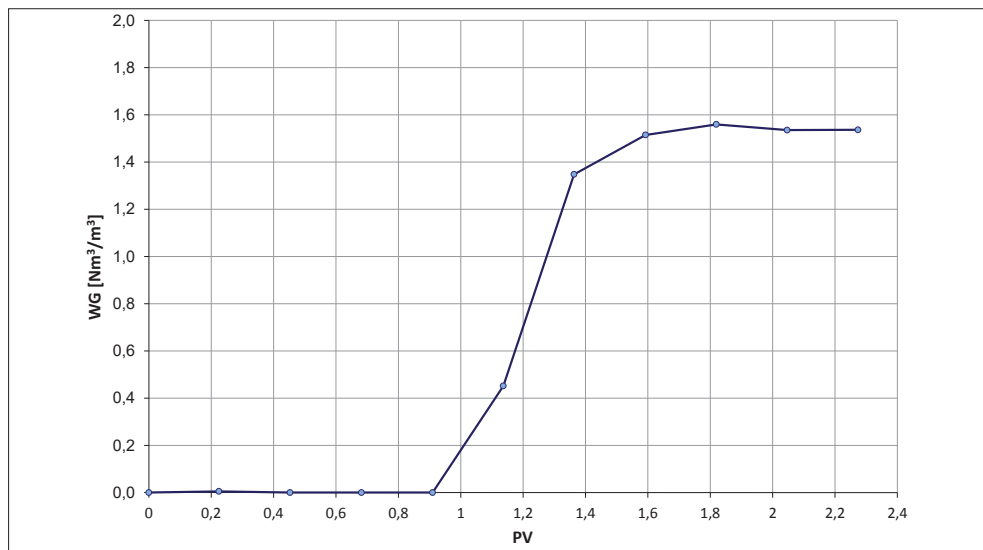
W analizowanym wariantcie prowadzenia procesu na fizycznym modelu ośrodka porowatego – w momencie zakończenia eksperymentu osiągnięto efektywność wypierania rzędu 27%. Oznacza to, że zatłoczony w odstępach czasowych i porcjach CO₂ zdesorbował rozpuszczony w solance gaz ziemny, który – przekraczając nasycenie krytyczne – stał się „mobilny”, przemieszczając się grawitacyjnie ku najwyższej części modelu złoża, tworząc tam kumulację w postaci wtórnej czapy gazowej ($V_{CG} = 3,6 \text{ cm}^3$) – odnotowanej w szklanym wzierniku. Badania wykazały, że koncentracja metanu w strefie gazowej wyniosła ok. 53% mol. W trakcie trwającego dziewięć dni eksperymentu wyparto ok. 27% mol całości metanu – pierwotnie „trwale” rozpuszczonego w strefie wodonośnej. Ilość ta sta-

nowi pozabilansowe zasoby gazu, niemożliwe do wydobycia standardowymi metodami eksploatacji.

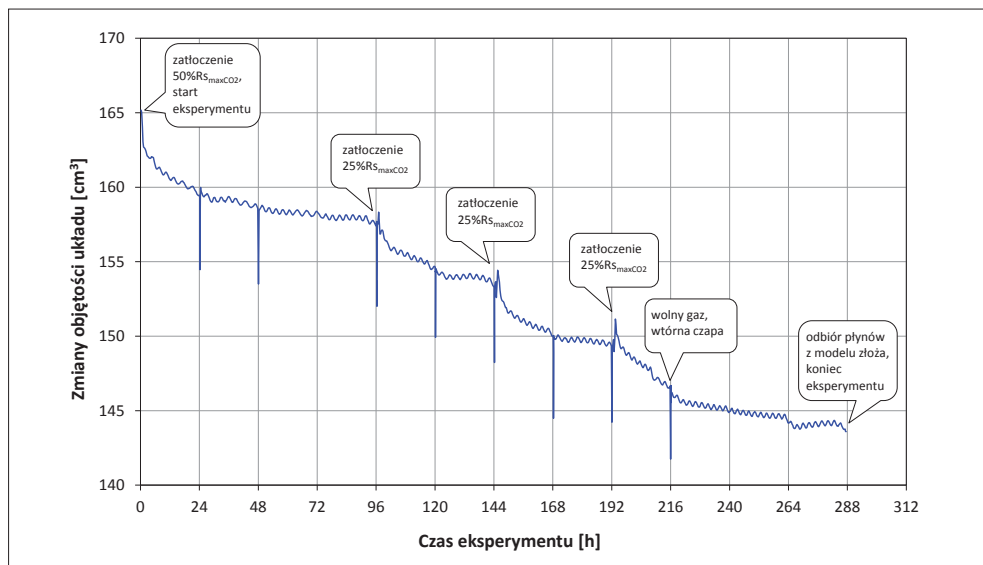
Przedstawiony powyżej eksperyment nie był jedynym wykonanym tego typu badaniem. Pomimo że przygotowanie i przeprowadzenie jednego doświadczenia trwało blisko miesiąc, wykonano ich w sumie siedem. Różniły się one między sobą nieznacznie, poprawiano głównie techniczne aspekty realizacji eksperymentu. Ich celem było: maksymalne wyeliminowanie objętości martwych, doskonalenie procedury przygotowania nasyconej gazem solanki oraz sposobu jej właściwego zatłoczenia do modelu czy takie zoptymalizowanie odbioru płynów z modelu po zakończeniu danego doświadczenia, by ułatwić analizę ilościową, jakościową i dokonanie bilansu całego eksperymentu. Dla realizacji tego ostatniego celu zdecydowano się przeprowadzić kilka doświadczeń z użyciem czystego metanu zamiast rodzimego gazu węglowodorowego będącego mieszaniną wieloskładnikową metanu, azotu i lekkich frakcji węglowodorowych. Ograniczenie ilości składników płynów biorących udział w eksperymencie pozwoliło na uproszczenie analiz chemicznych i ułatwienie interpretacji rezultatów badań. Zastosowanie w kilku eksperymentach czystego metanu jako gazu ziemnego rozpuszczonego w wodach złożowych było również spowodowane planowanymi (i opisanymi w dalszej części pracy) badaniami na symulacyjnym modelu złoża/ośrodka porowatego, prowadzonymi na specjalistycznym oprogramowaniu Eclipse firmy GeoQuest Schlumberger.

Poniżej zaprezentowano rezultaty wybranych eksperymentów wypierania, w których użyto metanu jako gazu nasycającego głębokie solankowe poziomy wodonośne.

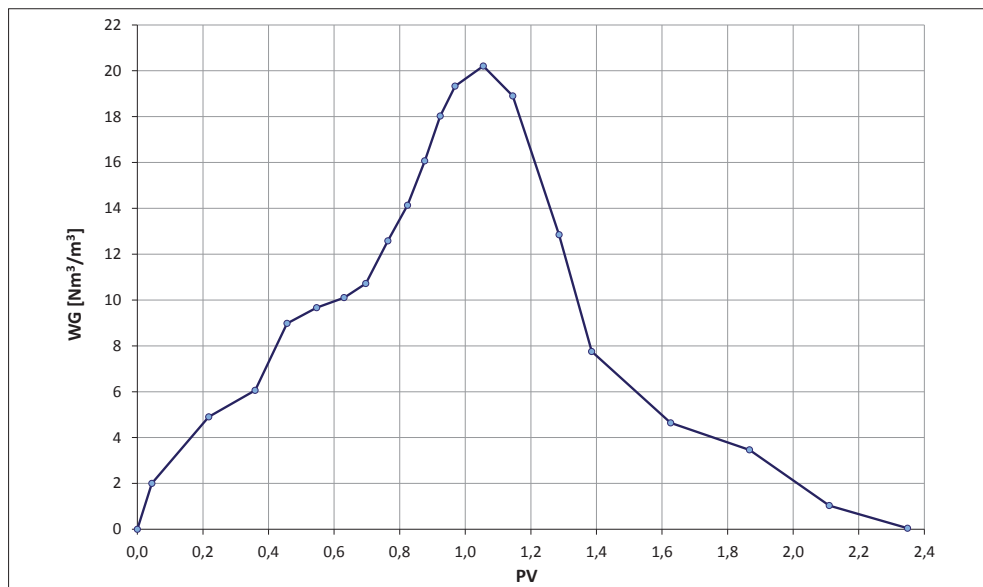
W pierwszym z nich model ośrodka porowatego wypełniono wcześniej przygotowaną solanką nasyconą metanem, aż do osiągnięcia i potwierdzenia jednorodności rozpuszczenia gazu w całym modelu (rys. 5.17). Następnie, tak jak w poprzednich tego typu eksperymentach, podniesiono temperaturę solanki do $T_{z1} = 100^{\circ}\text{C}$, zachowując stan jednofazowy w układzie, i pozostawiono do osiągnięcia stabilizacji w warunkach złożowych. Dalszym etapem było wprowadzanie do modelu kolejnych ilości CO₂, stanowiących ułamki objętości ditlenku węgla ($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$) niezbędnej do nasycenia solanki w danych warunkach ciśnienia i temperatury. Postępowano według wcześniej wypracowanego trybu, czyli najpierw wprowadzono CO₂ w ilości odpowiadającej 50% R_{maxCO_2} , a kolejne porcje (25% R_{maxCO_2}) zatłaczano po 4., 6. i 8. dobie od rozpoczęcia eksperymentu (rys. 5.18). W 24-godzinnych odstępach, odpowiednio, wprowadzano część badanego płynu do wziernika w celu sprawdzenia, czy nie wydzielił się wolny gaz obecny w postaci wtórnej czapy gazowej. Tak jak w kilku pozostałych eksperymentach zatłoczono ostatecznie 125% maksymalnej objętości CO₂, jaka mogłaby całkowicie rozpuścić się w danych warunkach w solance. Zmiany objętości komory aparatury PVT (stabilizującej ciśnienie) w trakcie całego eksperymentu – pozwoliły



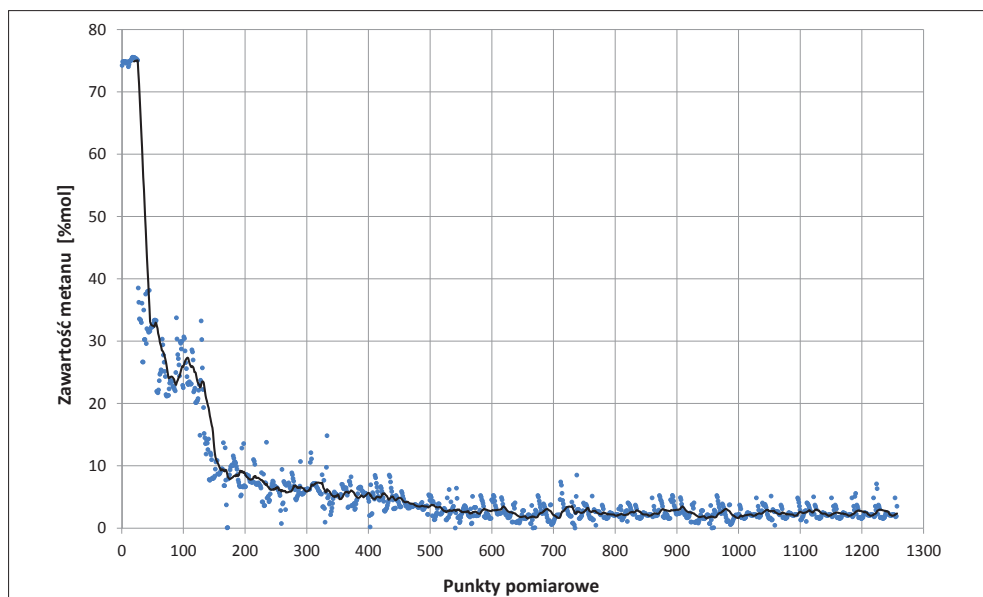
Rys. 5.17. Wprowadzanie do modelu solanki nasyconej gazem ziemnym – przebieg zmian wykładnika gazowego na wyjściu z modelu w funkcji objętości porowej PV



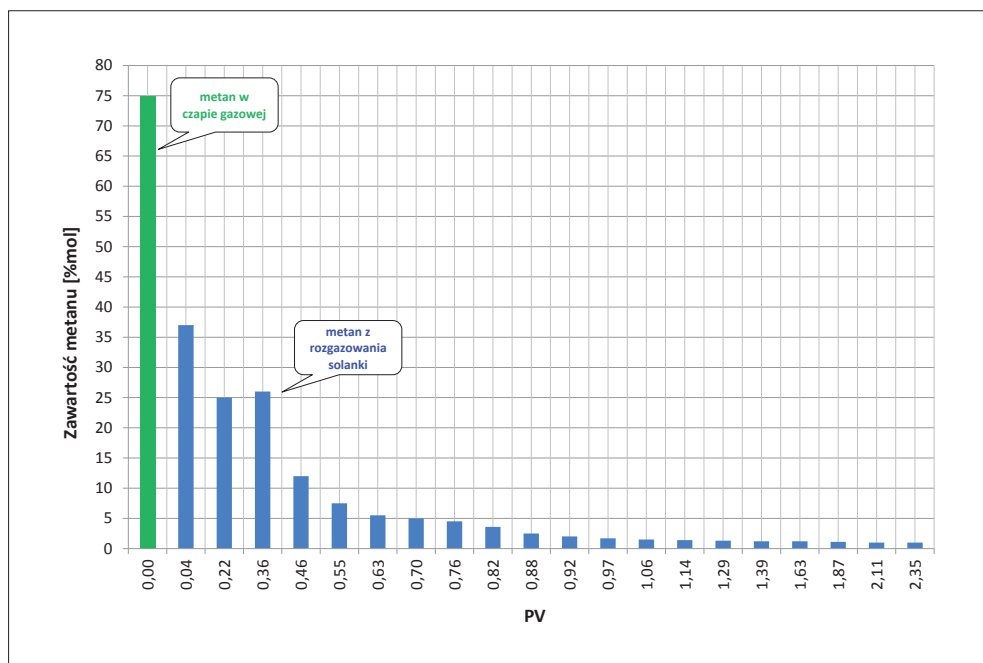
Rys. 5.18. Zmiany objętości układu podtrzymującego ciśnienie złożowe w modelu, odzwierciedlające dynamikę badanego procesu



Rys. 5.19. Odbiór płynu z modelu złoża – przebieg zmian wykładnika gazowego



Rys. 5.20. Odbiór płynu z modelu złoża – zawartość metanu w odbieranym gazie



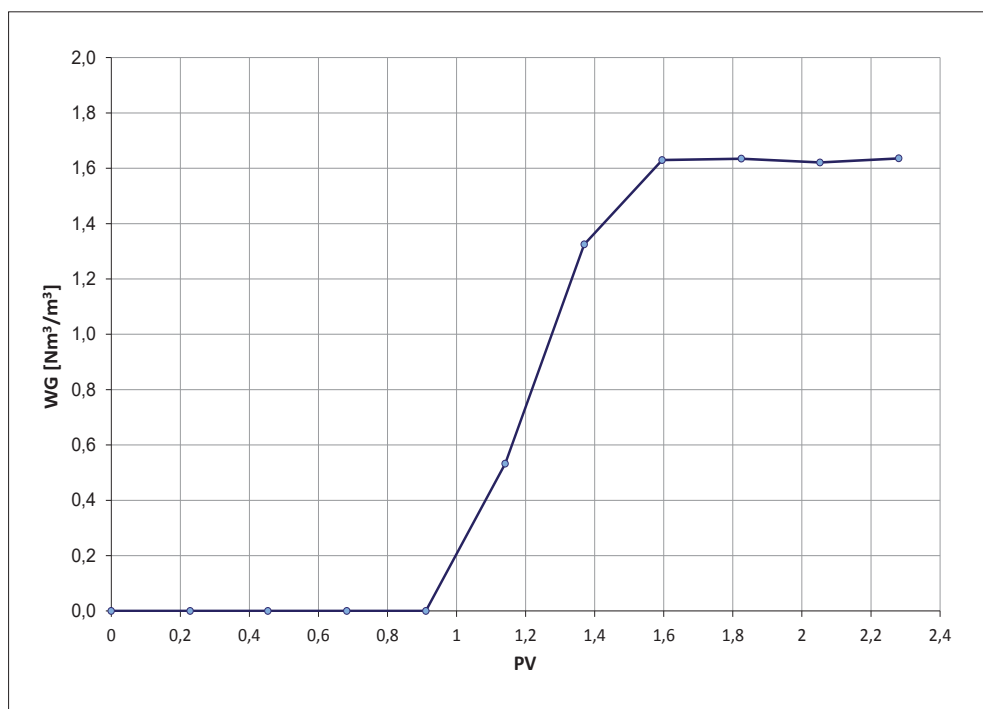
Rys. 5.21. Odbiór płynu z modelu złoża – zawartość metanu w odbieranym gazie

na śledzenie dynamiki procesów zachodzących w modelu. Także w tym doświadczeniu obecność wtórnej czapy gazowej w układzie stwierdzono po 9 dobach kontynuowania eksperymentu wypierania. Niezwłocznie przystąpiono do odbioru z modelu wydzielonego z solanki gazu, dokonano pomiaru jego objętości i oznaczono skład chemiczny. Następnie z komory badawczej wytloczono fazę wodną, dokonując pomiaru wykładnika gazowego i określając skład wydzielonego z solanki gazu (rys. 5.19). Eksperyment kontynuowano do momentu odebrania z modelu całego płynu złożowego biorącego udział w eksperymencie wypierania metanu z użyciem zatłaczania CO₂. Wyniki bieżących oznaczeń zawartości metanu w odbieranym gazie, dokonanych analizatorem CH₄/CO₂, przedstawiono na rysunku 5.20.

Podsumowując omawiany eksperyment, należy stwierdzić, że w wyniku zatłaczania CO₂ (wg przedstawionej procedury) do modelu ośrodka porowatego wypełnionego solanką złożową nasyconą metanem (gazem ziemnym) po 9 dobach od zatłoczenia pierwszej porcji ditlenku węgla zaobserwowano wydzielenie się w układzie wtórnej czapy gazowej ($V_{CG} = 2,4 \text{ cm}^3$ w warunkach PT złożowych) w postaci fazy gazowej za-

kumulowanej w najwyższej części komory badawczej. Zawartość metanu w wypartym gazie wynosiła 75% mol (rys. 5.21). W odniesieniu do całej ilości metanu rozpuszczonego w solance – w trakcie omawianego 9-dniowego eksperymentu udało się zdesorbować z fazy wodnej ok. 16% mol metanu wskutek wprowadzenia do układu CO₂ z zadaniem trybem zatłaczania.

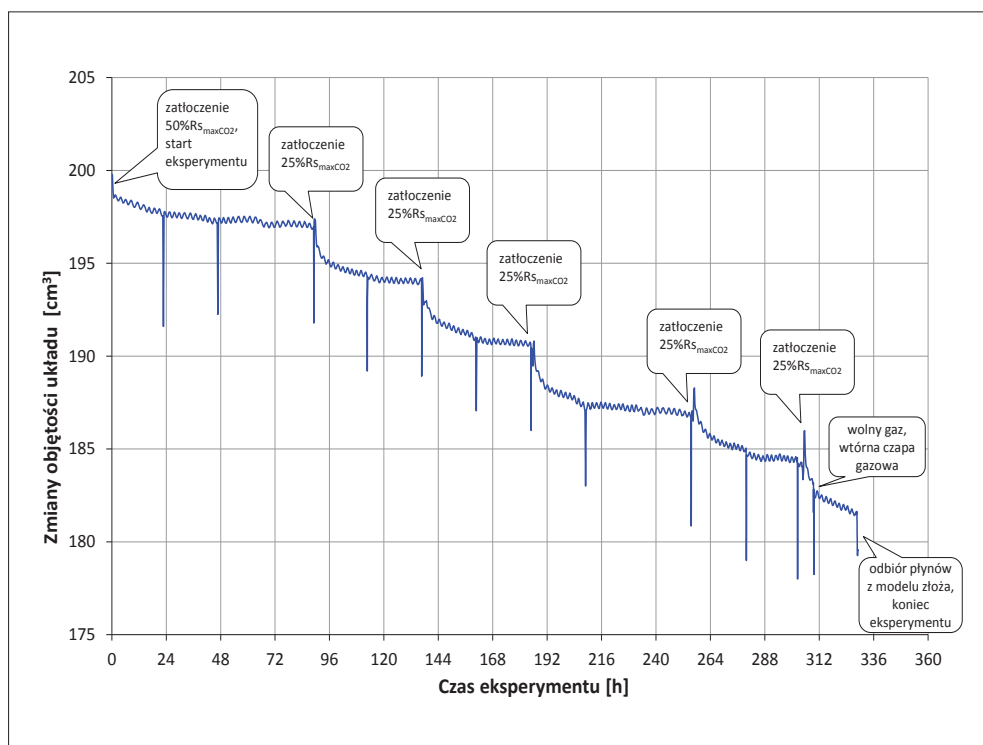
Opisany poniżej eksperyment wypierania gazu ziemnego poprzez zatłaczanie CO₂ na fizycznym modelu ośrodka porowatego dodatkowo posłużył do wykonania symulacji badanych zjawisk z zastosowaniem specjalistycznego oprogramowania Eclipse firmy GeoQuest Schlumberger.



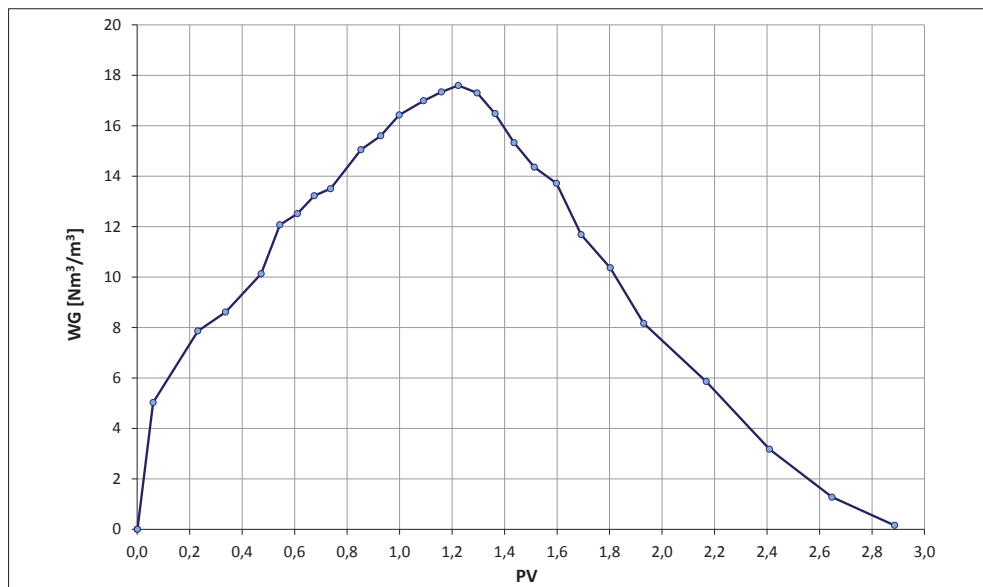
Rys. 5.22. Wprowadzanie do modelu solanki nasyconej gazem ziemnym – przebieg zmian wykładnika gazowego w funkcji objętości porowej PV

Omawiany eksperyment został przygotowany (rys. 5.22) i poprowadzony w sposób analogiczny do poprzednich doświadczeń. Solankę złożową nasycono metanem. Nie odno-

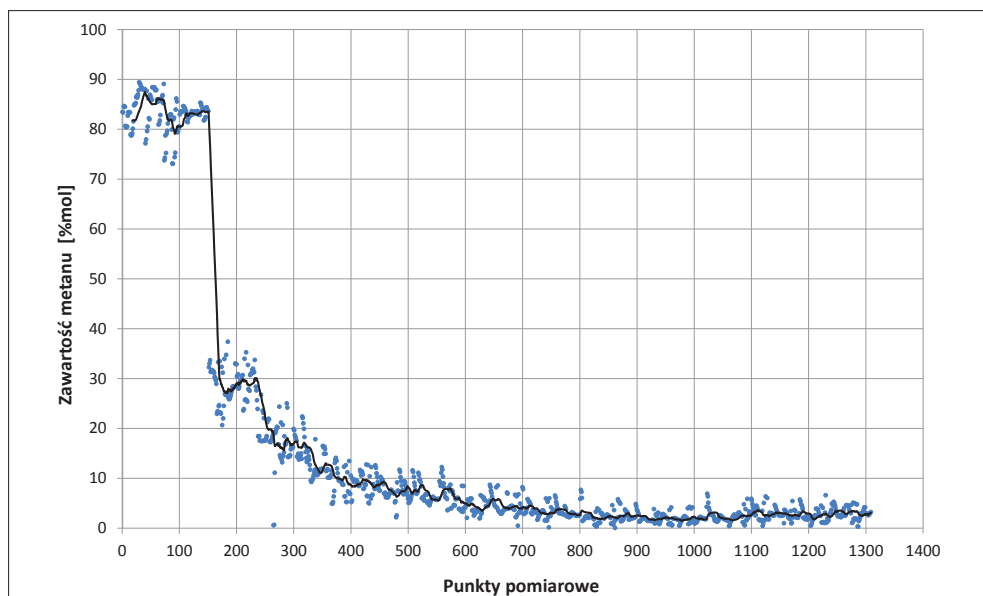
towano jednak pojawienia się wtórnej czapy gazowej w modelu po 9 dobach od rozpoczęcia właściwego eksperymentu, czyli zatłoczenia do układu pierwszej porcji CO₂ – jak to się działo w kilku poprzednich eksperymentach. Pojawienie się „wolnego” gazu w modelu zarejestrowano dopiero po upływie 13 dób, a było to poprzedzone wprowadzeniem do układu kolejnych dodatkowych dwóch porcji CO₂ (2 razy po 25% $R_{s_{maxCO_2}}$; rys. 5.23). Wyparty z solanki metan (w mieszaninie z CO₂) zgromadził się w najwyższej części komory badawczej w ilości $V_{CG} \approx 3,8 \text{ cm}^3$ – w warunkach złożowych ($P_{zł} = 266 \text{ bara}$, $T_{zł} = 100^\circ\text{C}$). Zawartość metanu w „gazie z czapy” wyniosła ok. 84% mol, a więc była najwyższa spośród wszystkich przeprowadzonych eksperymentów (rys. 5.25 i 5.26). W odniesieniu do całej ilości metanu nasycającego solankę – podczas prezentowanego 13-dniowego eksperymentu wyparto z fazy wodnej ok. 25% mol metanu wskutek wprowadzenia do układu CO₂ z zadanym trybem zatłaczania.



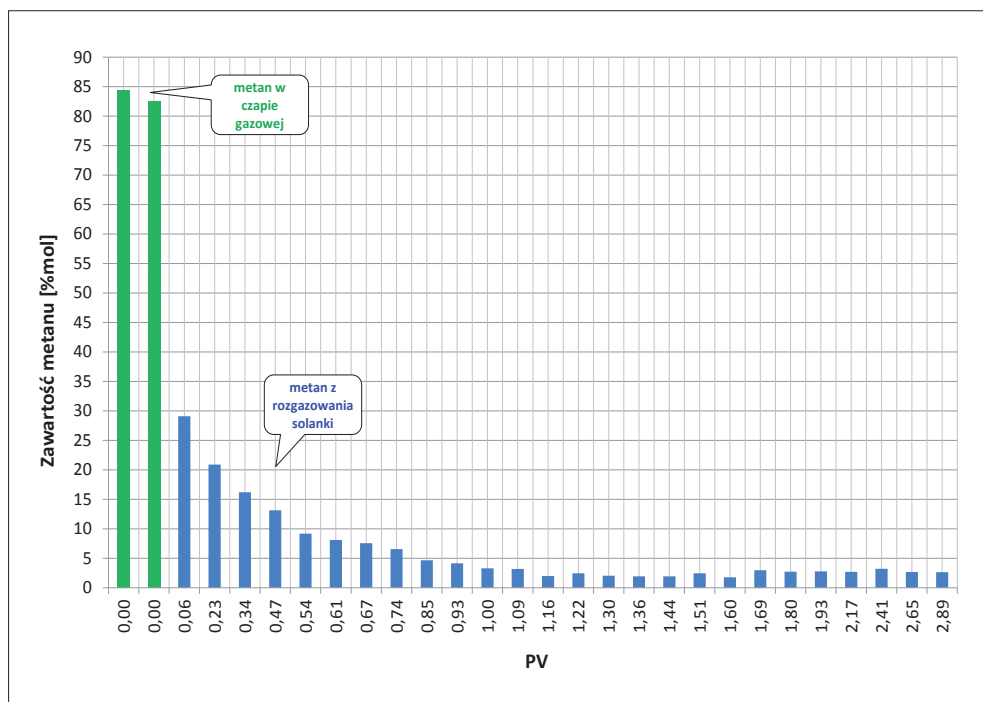
Rys. 5.23. Zmiany objętości układu podtrzymującego ciśnienie złożowe w modelu, odzwierciedlające dynamikę badanego procesu



Rys. 5.24. Odbiór płynu z modelu złoża – przebieg zmian wykładnika gazowego



Rys. 5.25. Odbiór płynu z modelu złoża – koncentracja metanu w odbieranym gazie



Rys. 5.26. Odbiór płynu z modelu złoża – koncentracja metanu w odbieranym gazie

5.3. Badanie procesów wypierania gazu ziemnego na symulacyjnym modelu ośrodka porowatego

Rezultaty wyżej zaprezentowanego (13-dniowego) eksperymentu wypierania metanu poprzez zatłaczanie CO₂ na fizycznym modelu ośrodka porowatego posłużyły również do wykonania symulacji badanych zjawisk z zastosowaniem specjalistycznego oprogramowania Eclipse firmy GeoQuest Schlumberger. Badania wykonano dzięki współpracy autora z Zakładem Symulacji Złóż Węglowodorów i Podziemnych Magazynów Gazu w INiG – PIB, Oddział Krosno.

Wykorzystano oprogramowanie, a w szczególności moduł GASWAT, z pakietu ECLIPSE firmy Schlumberger GeoQuest [8], za pomocą którego możliwe jest symulowanie proce-

sów uwzględniających m.in. efekt rozpuszczalności gazów. Dla pełniejszego zrozumienia zjawisk zachodzących w trakcie zatłaczania CO₂ do poziomów wodonośnych nasyconych gazem ziemnym zbudowano jednowymiarowy numeryczny model migracji gazu, opierając się na wykonanym fizycznym modelu ośrodka porowatego i rezultatach eksperymentu na nim przeprowadzonego.

Symulacyjny model ośrodka porowatego – charakterystyka

Na podstawie wcześniejszych prac badawczych i zdobytych doświadczeń [69, 66] opracowano numeryczny model złoża, przypominający tzw. cienką rurkę (ang. *slim tube*). Model symulacyjny składa się z 2200 bloków, o powierzchni przekroju odpowiadającej modelowi fizycznemu, połączonych w szereg o długości 2200 mm. Siatka bloków modelu jest jednorodna, ponadto model numeryczny cechuje się jednorodną porowatością $\phi = 0,3534$ i przepuszczalnością $k = 1$ darcy. Powyższe parametry modelu symulacyjnego zostały dobrane w taki sposób, by jak najpełniej odpowiadały cechom fizycznego modelu ośrodka porowatego wykorzystywanego w badaniach eksperymentalnych.

W modelu uwzględniono obecność dwóch faz: gazu i wody złożowej. Pod względem składu chemicznego zdefiniowano gaz zatłaczany jako CO₂ oraz gaz rodzimy – CH₄. W symulacjach zastosowano równanie stanu Penga–Robinsona.

Tabela 5.5. Harmonogram prowadzenia eksperymentu

	Nr tłoczenia CO ₂ i odbioru solanki						Odbiór czapy gazowej	Odbiór solanki
	1	2	3	4	5	6		
Czas rozpoczęcia tłoczenia/ odbioru	31.05.2012 15:30	4.06.2012 9:30	6.06.2012 14:20	8.06.2012 8:45	11.06.2012 07:50	13.06.2012 8:30	14.06.2012 8:00	14.06.2012 9:00
Czas zakończenia tłoczenia/ odbioru	31.05.2012 15:38	4.06.2012 9:34	6.06.2012 14:24	8.06.2012 8:49	11.06.2012 7:54	13.06.2012 8:34	14.06.2012 9:00	14.06.2012 9:35
*G _{inj} (25°C, 276 bara) [m ³ × 10 ⁻⁶]	24,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	0,00	0,00

	Nr tłoczenia CO ₂ i odbioru solanki						Odbiór czapy gazowej	Odbiór solanki
	1	2	3	4	5	6		
*W _p (25°C, 1 bara) [m ³ × 10 ⁻⁶]	34,00	16,80	16,60	17,30	16,80	17,30	0,00	81,00
*G _p (25°C, 1 bara) [m ³ × 10 ⁻⁶]	56,00	21,20	21,40	19,70	21,20	22,70	828,00	450,00
*W _{inj} (pom. cyklami) (25°C, 266 bara) [m ³ × 10 ⁻⁶]	1,71	3,03	3,48	3,96	2,45	1,68	3,04	82,00

* Objaśnienia wielkości: G_{inj}, W_p, G_p, W_{inj} przedstawiono na kolejnej stronie.

Jako warunki początkowe omawianego procesu przyjęto całkowite wypełnienie przestrzeni porowej solanką nasyconą CH₄.

W modelowaniu uwzględniono:

- zjawisko rozpuszczalności gazów (CO₂, CH₄) w wodzie;
- zjawisko dyfuzji w fazie wodnej;
- zjawisko dyfuzji w fazie gazowej.

Wyniki symulacji

Wykorzystując dane uzyskane z pomiarów laboratoryjnych, odtworzono eksperyment, który podzielono na trzy główne etapy:

- Etap I – sześć faz tłoczenia CO₂ prowadzonych przy równoczesnym odbiorze z modelu solanki. W okresach pomiędzy tymi fazami podtrzymywano stałe ciśnienie poprzez dotłaczanie wody. Etap trwał od 31.05.2012 r., godz. 15:30, do 14.06.2012 r., godz. 8:00.
- Etap II – odbiór nowo powstałej, wtórnej czapy gazowej z równoczesnym dotłoczeniem wody w celu utrzymania stałego ciśnienia w układzie. Etap trwał od godz. 8:00 do godz. 9:00 w dniu 14.06.2012 r.

- Etap III – odbiór części nasyconej gazem (CO₂, CH₄) solanki „po podaniu” z jednoczesnym dotłoczeniem wody w celu utrzymania stałego ciśnienia. Etap trwał od godz. 9:00 do godz. 9:35 w dniu 14.06.2012 r.

W poszczególnych etapach modelowania eksperymentu dla uzyskania wysokiej zgodności wyników symulacji z pomiarami eksperymentalnymi sterowano wpływem oraz tłoczeniem:

- w etapie I:
 - » q_{inj,CO_2} – wydajnością zatłaczania CO₂: wynikającą z całkowitej ilości zatłoczonego CO₂ do złoża (G_{inj}) w poszczególnych etapach tłoczenia,
 - » q_w – wydajnością wypływu wody: wynikającą z całkowitej ilości zgazowanej solanki odebranej ze złoża (W_p) w poszczególnych etapach tłoczenia,
 - » $q_{inj,w}$ – wydajnością zatłaczania wody: wynikającą z sumarycznej ilości wody zatłoczonej do złoża (W_{inj}) w czasie tzw. stójek pomiędzy poszczególnymi fazami tłoczenia CO₂;
- w etapie II:
 - » q_g – wydajnością wypływu gazu: wynikającą z całkowitej ilości odebranego gazu pochodzącego z czapy gazowej złoża (G_p),
 - » $q_{inj,w}$ – wydajnością zatłaczania wody: wynikającą z sumarycznej ilości wody zatłoczonej do złoża (W_{inj}) w czasie odbioru czapy gazowej;
- w etapie III:
 - » q_w – wydajnością wypływu wody: wynikającą z całkowitej ilości odebranej ze złoża solanki nasyconej rozpuszczonym w niej gazem (W_p),
 - » $q_{inj,w}$ – wydajnością zatłaczania wody: wynikającą z sumarycznej ilości wody zatłoczonej do złoża (W_{inj}) w czasie odbioru zgazowanej solanki.

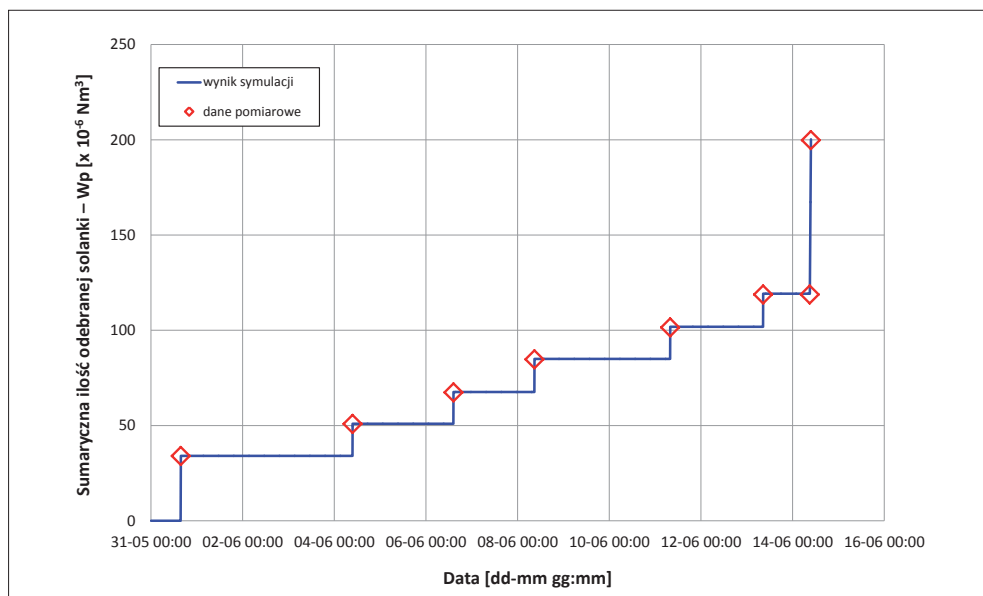
W wyniku przeprowadzonych symulacji starano się odtworzyć w poszczególnych etapach:

- w etapie I:
 - » sumaryczną ilość odebranego gazu pochodzącego z odgazowania solanki;
- w etapie II:
 - » moment pojawienia się czapy gazowej oraz jej wielkość,
 - » brak odbioru wody podczas odbioru czapy gazowej,
 - » skład chemiczny odbieranego gazu;
- w etapie III:
 - » ilość gazu pochodzącego z odgazowania odebranej solanki,
 - » skład chemiczny odebranego gazu.

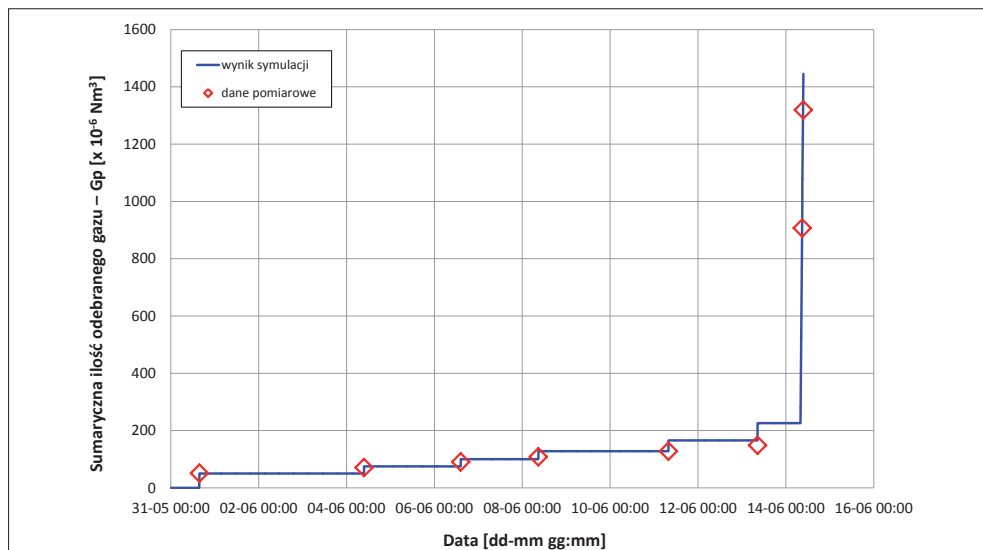
Na rysunku 5.27 przedstawiono sumaryczną ilość wody wydobytej z modelu ośrodka porowatego. Wielkość ta pokrywa się z danymi eksperymentalnymi w każdej fazie doświadczenia.

Niedoskonałości aparatury badawczej, możliwość mieszania się wody nienasyconej pochodzącej z elementów aparatury badawczej z solanką pochodzącą ze złoża, jak i niewielkie objętości odbieranych płynów (niekiedy ułamki cm³) przyczyniły się do niedokładności pomiarów laboratoryjnych, według których z odgazowania solanki otrzymywano mniej gazu, niż wynikałoby to z pierwotnego wykładnika gazowego, wynoszącego $WG = 1,634 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$. Niedoskonałości pomiarów przyczyniły się do wystąpienia obserwowanych różnic pomiędzy wynikami symulacji a danymi eksperymentalnymi (rys. 5.28). Jeśli pominąć niedoskonałości etapu I, można zauważyć, że ilość odebranego gazu w etapie III jest zbliżona do ilości wykazanej z danych laboratoryjnych (rys. 5.29).

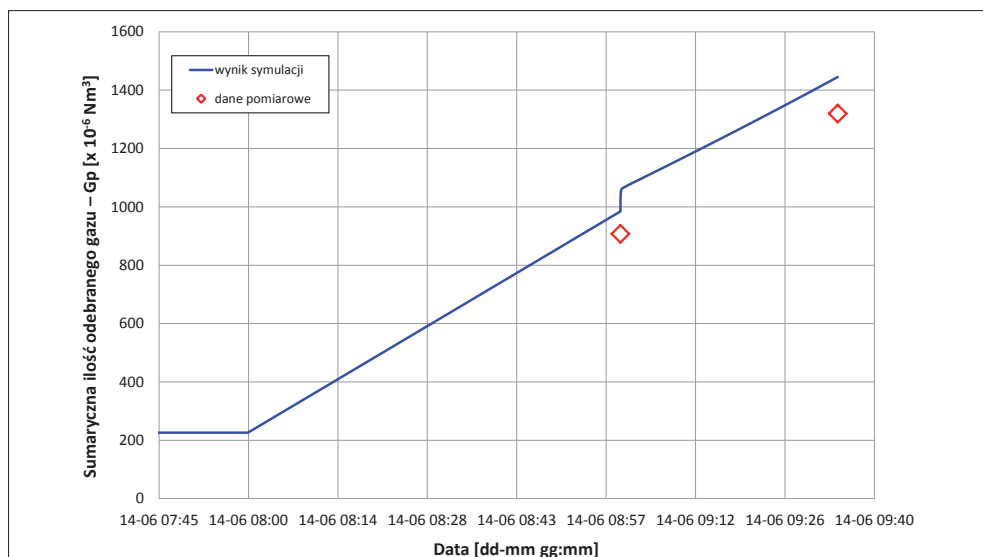
Podczas odbioru czapy gazowej wydzielonej w trakcie eksperymentu poddawano analizie jej skład chemiczny (rys. 5.30). Podobnej analizie podlegał również gaz pochodzący z odgazowania solanki. Skład gazu wygenerowany w procesie symulacji odtwarza w bardzo dobrym stopniu wyniki pomiarów i oznaczeń laboratoryjnych.



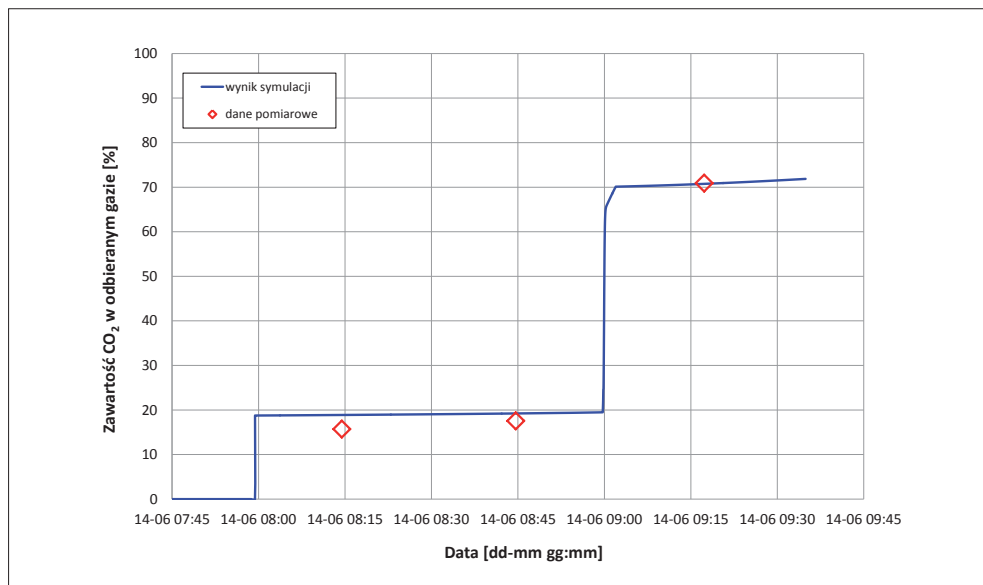
Rys. 5.27. Sumaryczna ilość solanki odebranej z modelu ośrodka porowatego podczas trwania eksperymentu; etapy I, II i III [48]



Rys. 5.28. Sumaryczna ilość gazu odebranego z modelu ośrodka porowatego podczas trwania eksperymentu; etapy I, II i III [48]



Rys. 5.29. Sumaryczna ilość gazu odebranego z modelu ośrodka porowatego podczas trwania eksperymentu; etapy II i III [48]

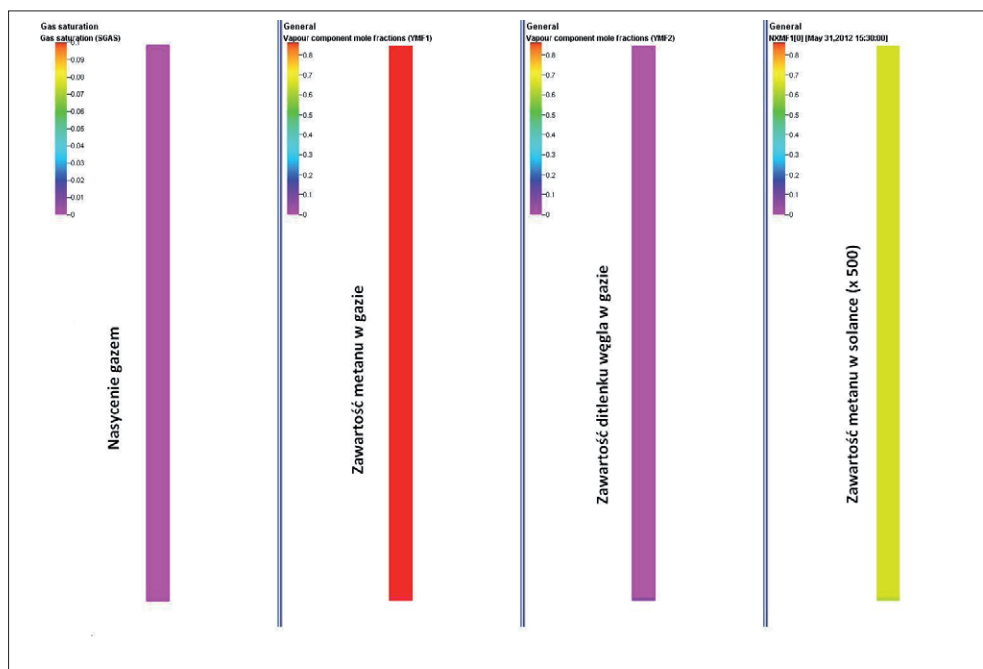
Rys. 5.30. Zawartość CO₂ w odbieranym gazie; etapy II i III [48]

Analiza rozkładów nasycenia modelu gazem oraz zawartości CO₂ i CH₄ w gazie

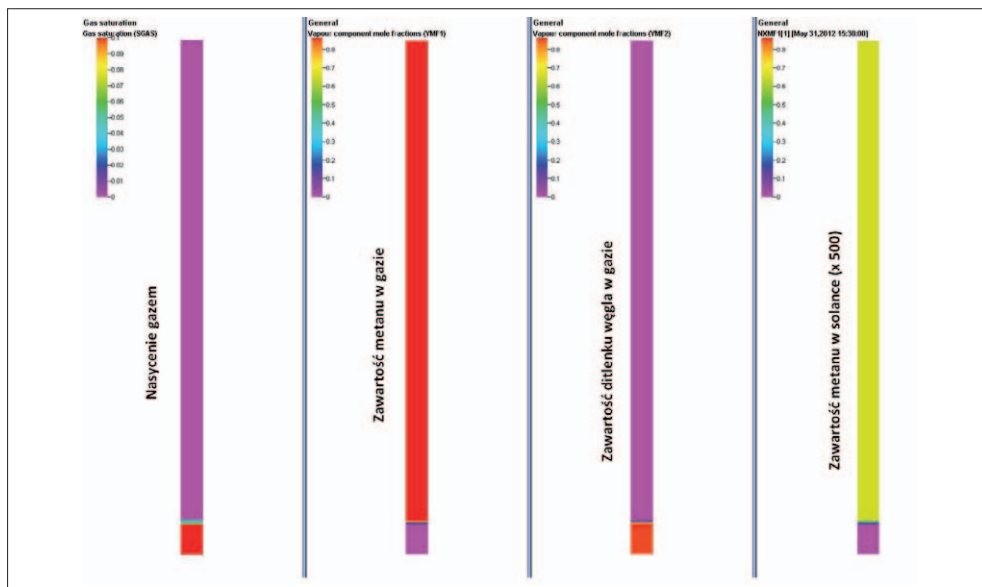
Wyjaśnienie zjawisk zachodzących w złożu w trakcie opisywanego procesu wypierania możliwe jest dzięki analizie rozkładów odpowiednich wielkości wewnątrz modelu złoża na różnych etapach zaawansowania procesu. Rozkłady nasycenia ośrodka porowatego gazem – S_g , zawartości metanu w gazie – c_{CH_4} (YMF1), zawartości ditlenku węgla w gazie – c_{CO_2} (YMF2) oraz przeskalowanej ($\times 500$) zawartości metanu w solance – c_{CH_4w} (NXMF1) z kolejnych etapów eksperymentu przedstawiono na rysunkach 5.31–5.45. Wysokość poszczególnych diagramów odzwierciedla wysokość modelu, zaś zmiany barw na kolejnych diagramach ilustrują zachodzące zmiany fazowe.

- Stan przed rozpoczęciem zatłaczania: 31.05.2012 r., godz. 15:30 (rys. 5.31).
- Stan po zatłoczeniu 1. porcji CO₂: 31.05.2012 r., godz. 15:38 (rys. 5.32).
- Przepływ CO₂ do góry wraz z jego rozpuszczaniem się: 4.06.2012 r., godz. 9:30 (rys. 5.33).
- Stan po zatłoczeniu 2. porcji CO₂: 4.06.2012 r., godz. 9:34 (rys. 5.34).
- Przepływ CO₂ do góry wraz z jego rozpuszczaniem się: 6.06.2012 r., 14:20 (rys. 5.35).

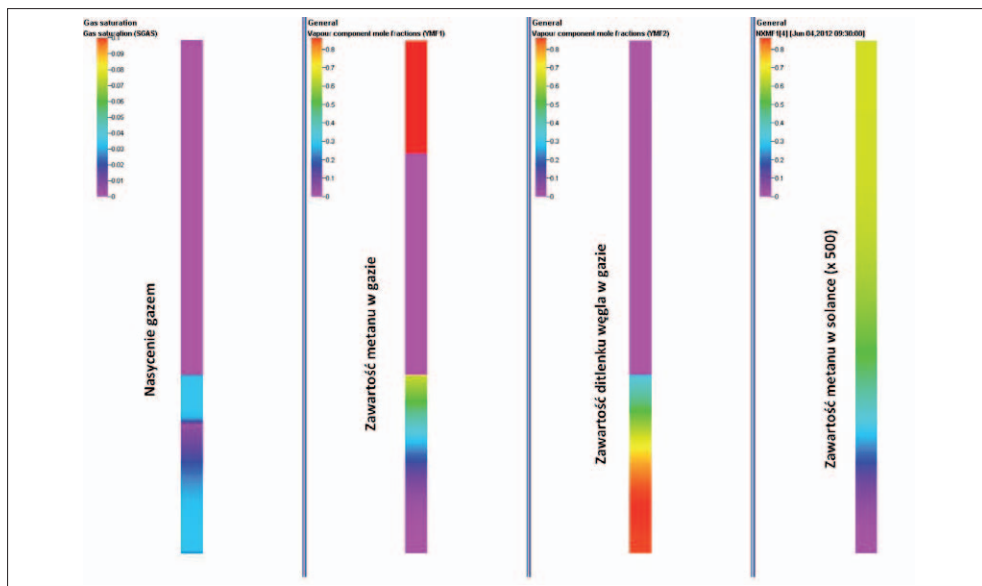
- Stan po zatłoczeniu 3. porcji CO₂: 6.06.2012 r., godz. 14:24 (rys. 5.36).
- Przepływ CO₂ do góry i jego rozpuszczanie się: 8.06.2012 r., godz. 8:45 (rys. 5.37).
- Stan po zatłoczeniu 4. porcji CO₂: 8.06.2012 r., godz. 8:49 (rys. 5.38).
- Przepływ CO₂ do góry wraz z jego rozpuszczaniem się: 11.06.2012 r., godz. 7:50 (rys. 5.39).
- Stan po zatłoczeniu 5. porcji CO₂: 11.06.2012 r., godz. 7:54 (rys. 5.40).
- Przepływ do góry i rozpuszczanie się CO₂: 13.06.2012 r., godz. 8:30 (rys. 5.41).
- Stan po zatłoczeniu 6. porcji CO₂: 13.06.2012 r., godz. 8:34 (rys. 5.42).
- Pojawienie się fazy gazowej w najwyższej „przystropowej” części modelu złoża: 14.06.2012 r., godz. 8:00 (rys. 5.43).
- Szczerpanie czapy gazowej, początek odbioru zgazowanej solanki: 14.06.2012 r., godz. 9:00 (rys. 5.44).
- Koniec odbioru zgazowanej solanki: 14.06.2012 r., godz. 9:35 (rys. 5.45).



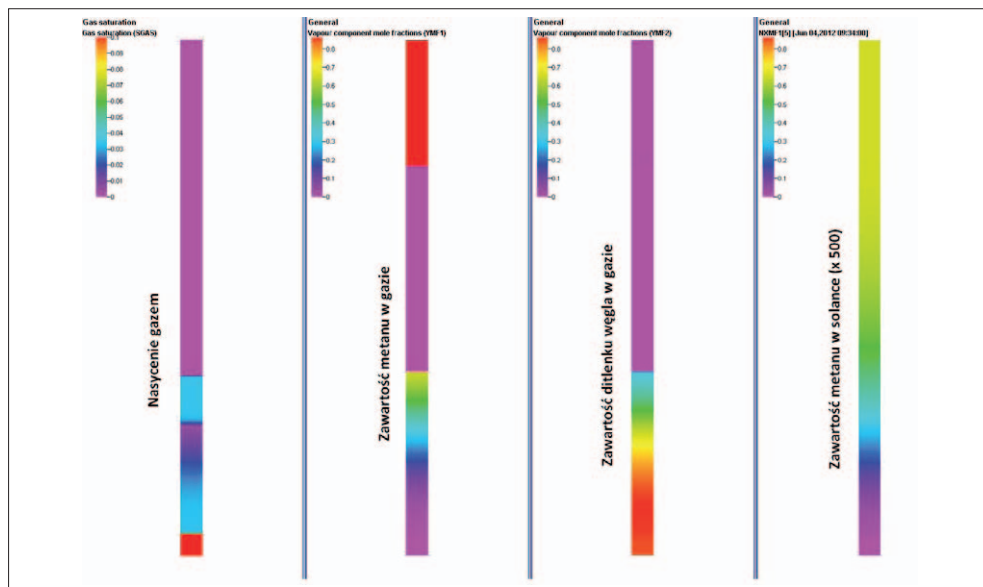
Rys. 5.31. Etap I, stan przed zatłaczaniem nr 1 (31.05.2012 r., godz. 15:30) [48]



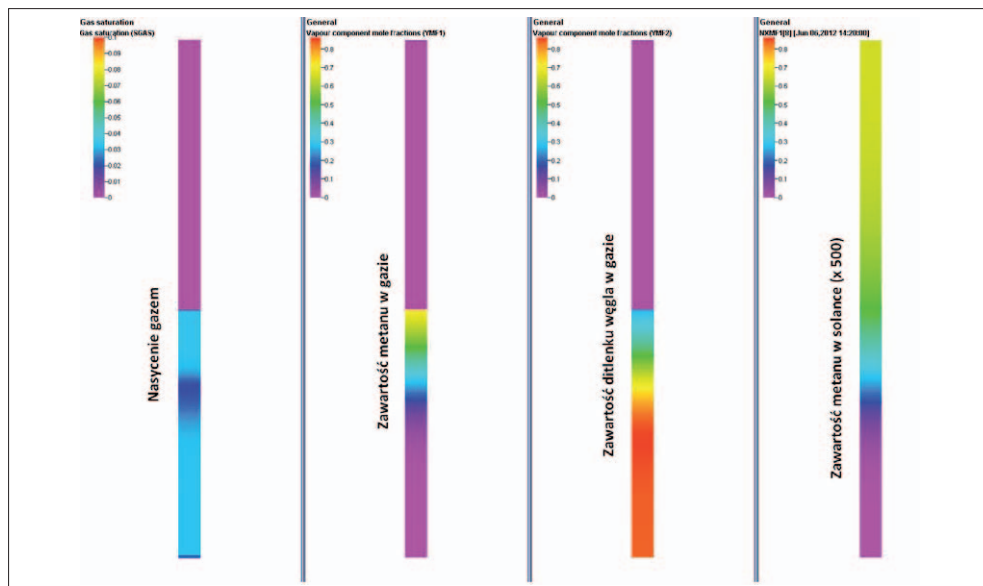
Rys. 5.32. Etap I, stan po załęczaniu nr 1 (31.05.2012 r., godz. 15:38) [48]



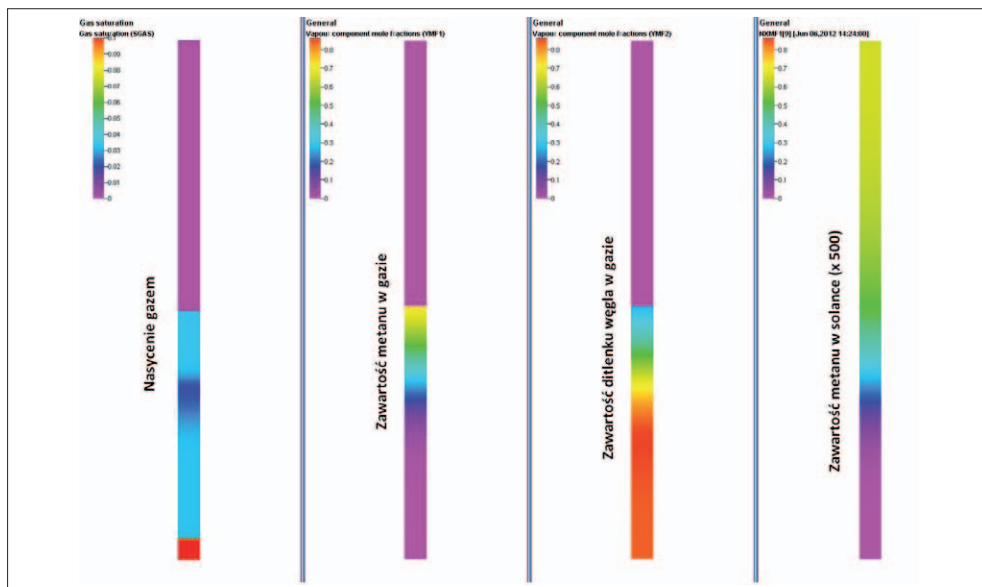
Rys. 5.33. Etap I, stan przed załęczaniem nr 2 (4.06.2012 r., godz. 9:30) [48]



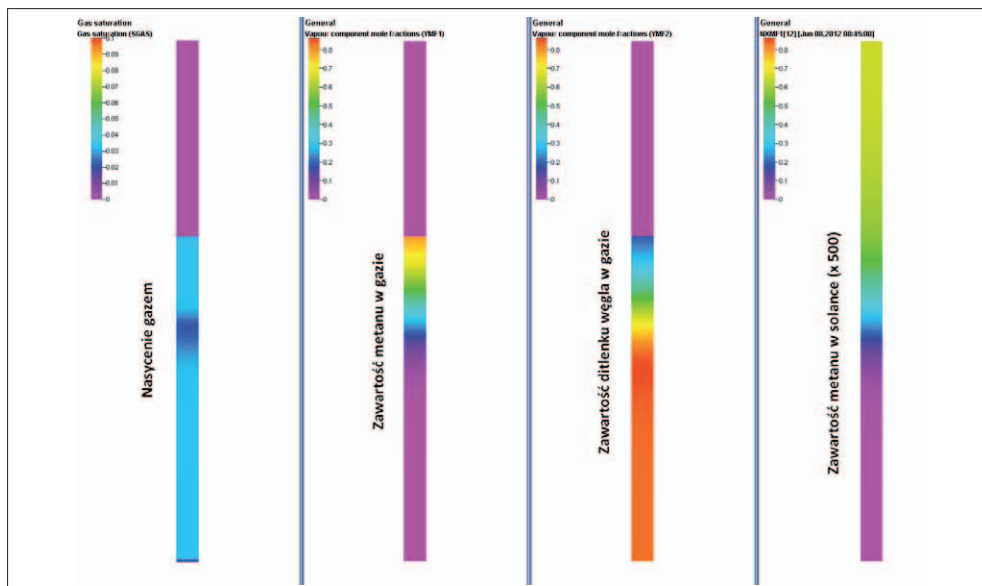
Rys. 5.34. Etap I, stan po załączeniu nr 2 (4.06.2012 r., godz. 9:34) [48]



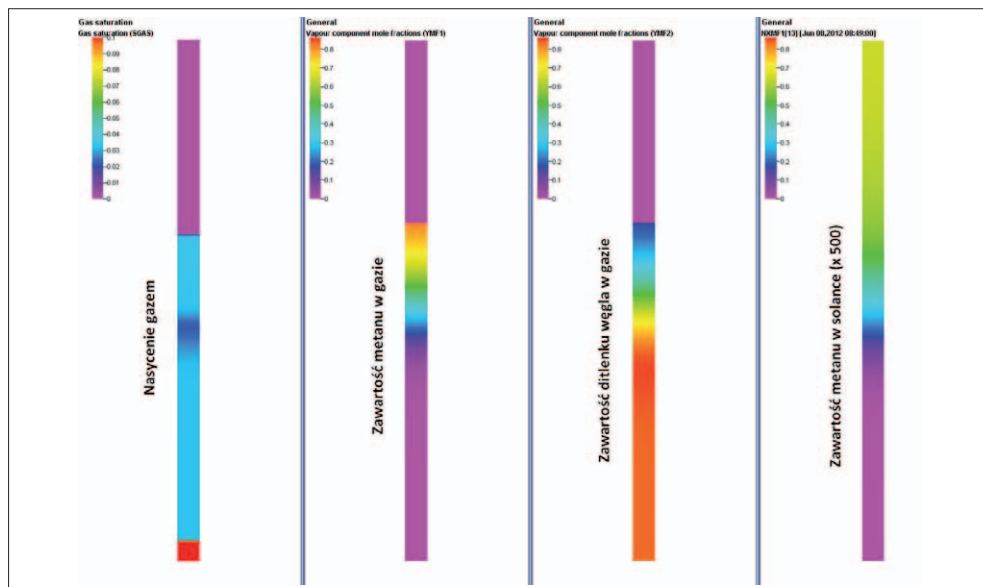
Rys. 5.35. Etap I, stan przed załączeniem nr 3 (6.06.2012 r., godz. 14:20) [48]



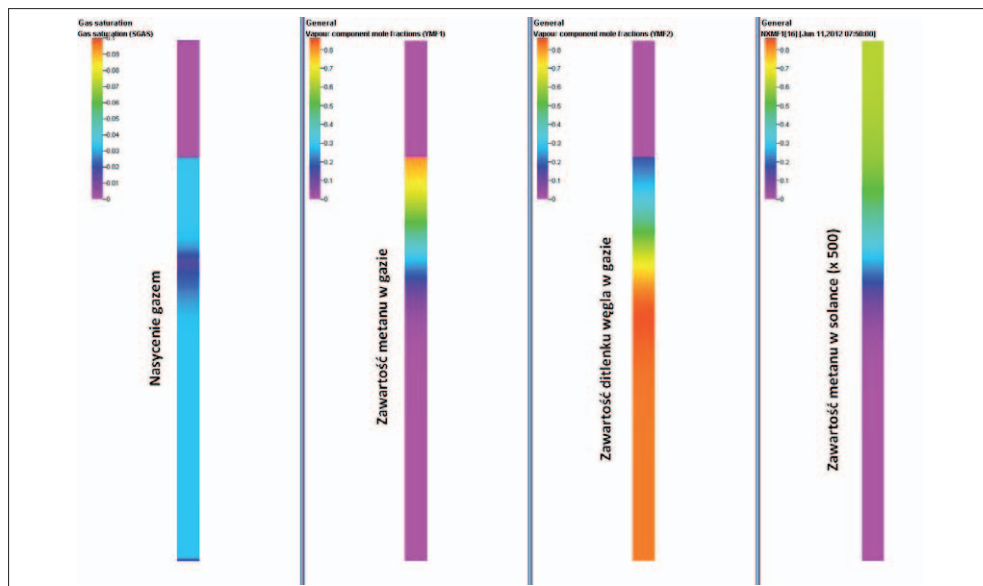
Rys. 5.36. Etap I, stan po zatłaczaniu nr 3 (6.06.2012 r., godz. 14:24) [48]



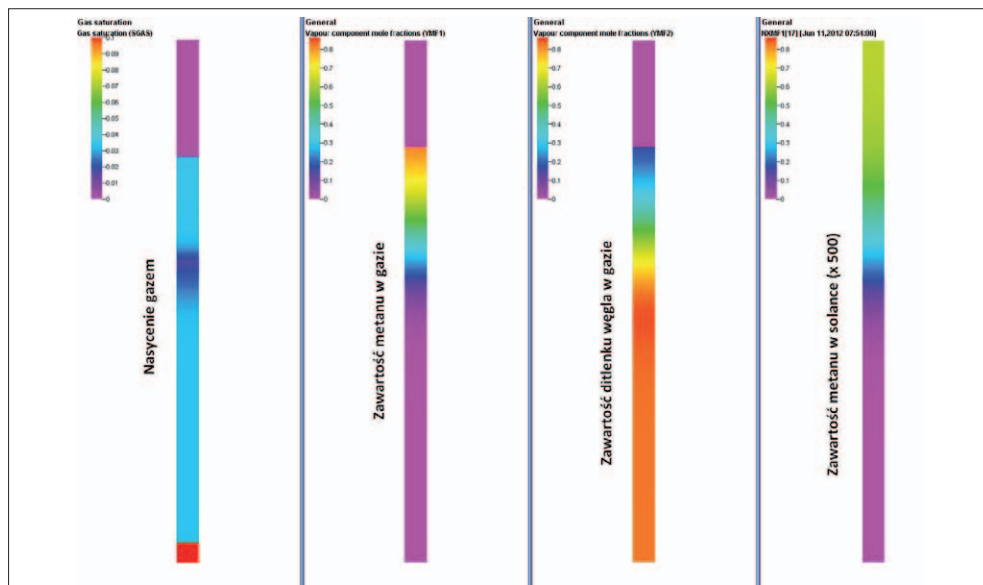
Rys. 5.37. Etap I, stan przed zatłaczaniem nr 4 (8.06.2012 r., godz. 8:45) [48]



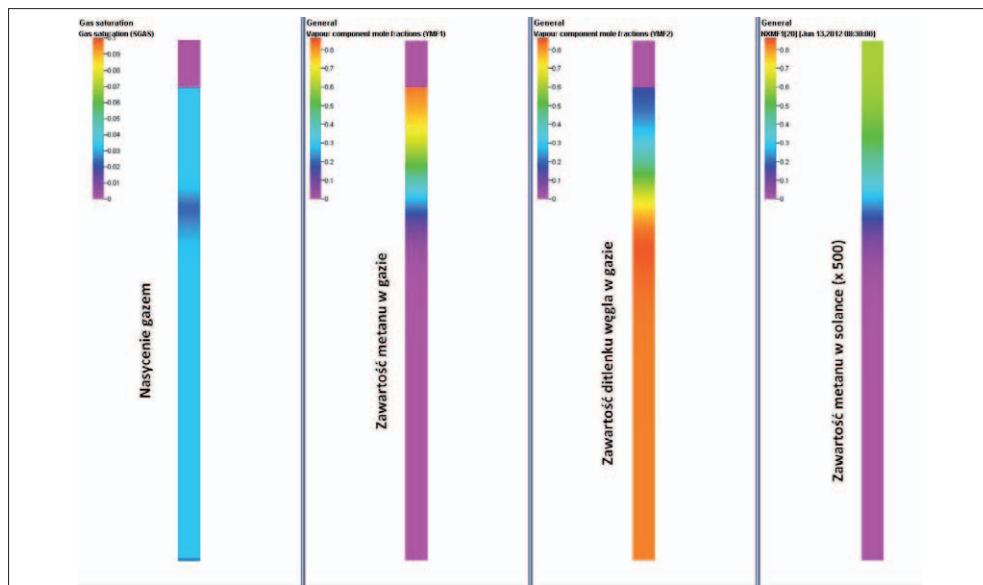
Rys. 5.38. Etap I, stan po zafłaczaniu nr 4 (8.06.2012 r., godz. 8:49) [48]



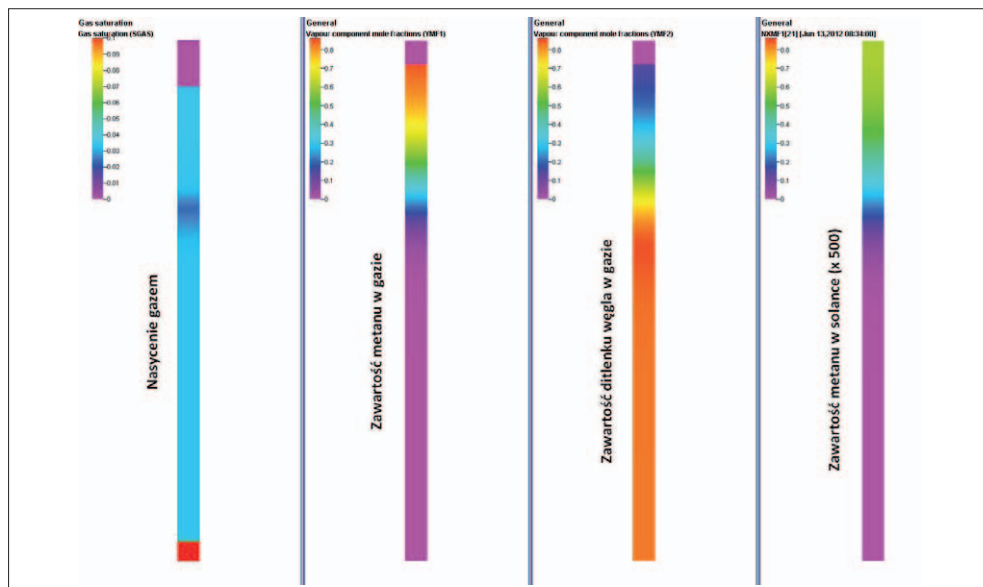
Rys. 5.39. Etap I, stan przed zafłaczaniem nr 5 (11.06.2012 r., godz. 7:50) [48]



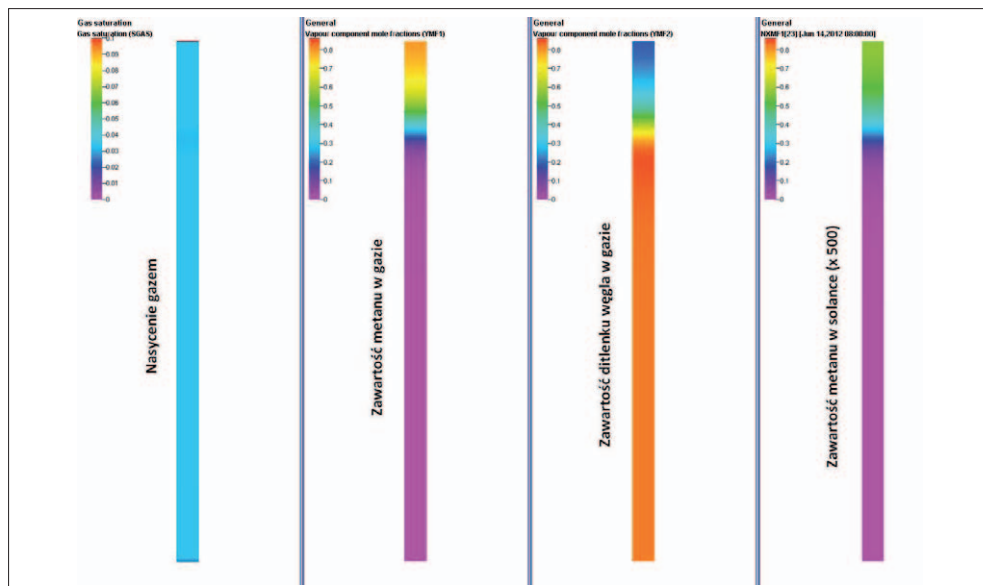
Rys. 5.40. Etap I, stan po zatłaczaniu nr 5 (11.06.2012 r., godz. 7:54) [48]



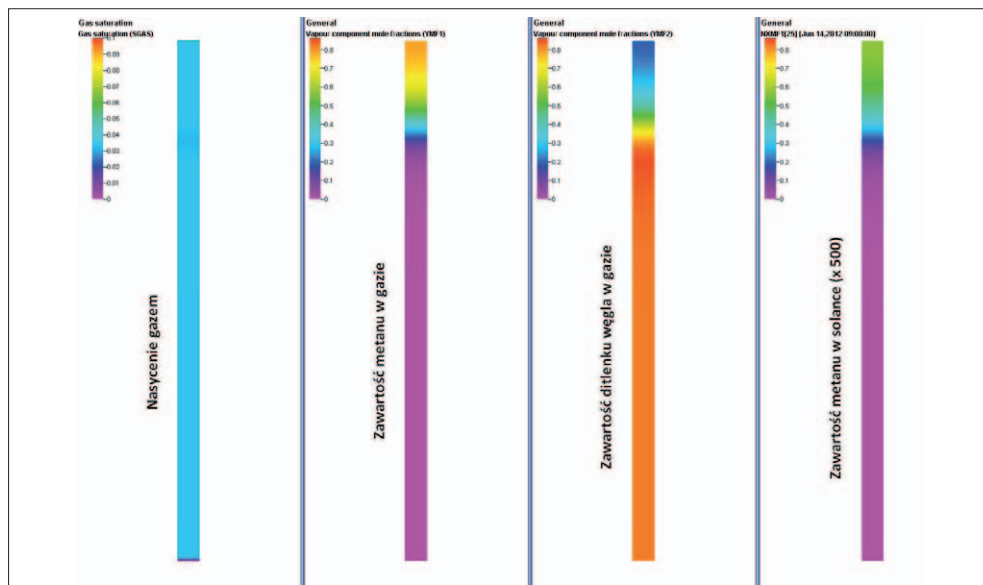
Rys. 5.41. Etap I, stan przed zatłaczaniem nr 6 (13.06.2012 r., godz. 8:30) [48]



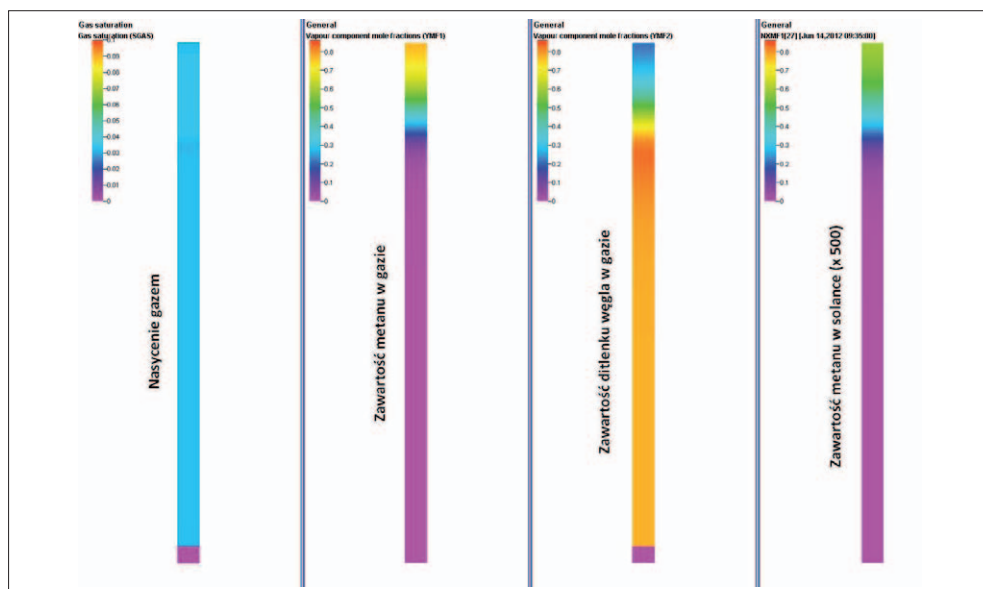
Rys. 5.42. Etap I, stan po zatłaczaniu nr 6 (13.06.2012 r., god z. 8:34) [48]



Rys. 5.43. Etap II, stan przed odbiorem czapy gazowej (14.06.2012 r., godz. 8:00) [48]



Rys. 5.44. Etapy II i III, stan po odbiorze czapy gazowej, a przed odbiorem zgazowanej solanki (14.06.2012 r., godz. 9:00) [48]



Rys. 5.45. Etap III, stan po odbiorze zgazowanej solanki (14.06.2012 r., godz. 9:35) [48]

Analizując przedstawione rozkłady, można dokonać następujących spostrzeżeń:

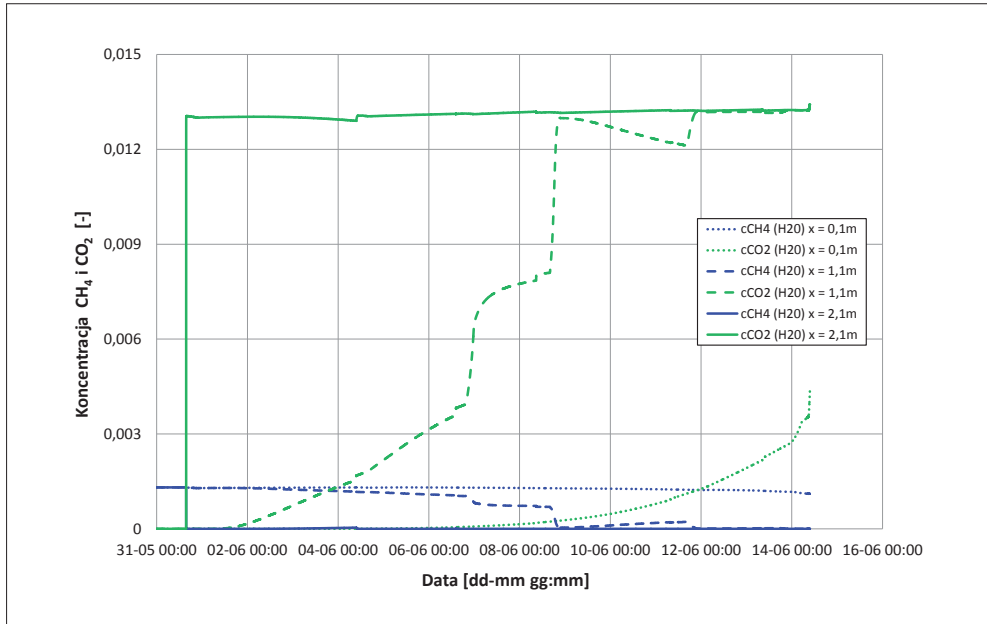
- 1) W modelu istnieje front wypierania przemieszczający się ku górze ośrodka porowatego przy obecności minimalnego nasycenia gazem ($S_{gr} \sim 0,034$).
- 2) Istnieje strefa wodna ($S_w \sim 1,0$) o malejącej rozpiętości, a następnie zanika ona pomiędzy 13.06.2012 r., godz. 8:34, a 14.06.2012 r., godz. 8:00.
- 3) Występuje front „metanowy” (o zawartości CH₄ < 100% w przemieszczającym się gazie) wypierany przez rozpuszczający się w wodzie CO₂ o blisko 10-krotnie większej rozpuszczalności.
- 4) Zachodzi zjawisko wypierania rozpuszczonego uprzednio w solance CH₄ przez „przepływający” przez złożę CO₂.
- 5) Wyższa rozpuszczalność CO₂ od wypieranego CH₄ skutkuje powstawaniem, w czasie relaksacji, przekładki strefy wodnej z powodu rozpuszczenia się większej ilości CO₂ od ilości wypartego CH₄ pomiędzy strefami gazowymi.
- 6) Występuje przepływ gazu ku górze aż do momentu spadku nasycenia gazem do nasycenia krytycznego.
- 7) Istotnym wynikiem eksperymentu jest pojawienie się czapy gazowej o odpowiedniej wielkości, która mogła zostać odebrana z modelu bez wpływu wody.
- 8) Występuje niewielkie, choć zauważalne mieszanie się CO₂ z CH₄, czego wynikiem był odbiór czapy gazowej zanieczyszczonej przez CO₂.

W ramach opisywanej części pracy (symulacje komputerowe) zebrano oraz przeanalizowano, poddając jednocześnie weryfikacji, otrzymane dane eksperymentalne pochodzące z eksperymentu laboratoryjnego. Skonstruowano model migracji gazu zachodzącej w fizycznym modelu ośrodka porowatego, następnie zaimplementowano w nim dane pomiarowe z eksperymentu laboratoryjnego pozwalające na jego komputerową symulację.

Odtworzono dane eksperymentalne, a przede wszystkim:

- sumaryczną ilość wydobytego gazu – G_p ;
- sumaryczną ilość wydobytej wody – W_p ;
- moment pojawienia się „czapy” gazowej oraz jej wielkość;
- skład gazu pochodzącego z czapy gazowej (etap II);
- skład gazu pochodzącego z odgazowania solanki (etap III).

Przeprowadzono szczegółową analizę wyników symulacji.



Rys. 5.46. Koncentracja CH₄ oraz CO₂ w solance na poszczególnych odległościach od górnego końca modelu złoża [48]

Poniżej przedstawiono wnioski nasuwające się po wykonanych analizach i prognozach symulacyjnych.

- 1) Nasylenie krytyczne gazem, przy którym gaz staje się mobilny, odgrywa decydującą rolę w szybkości jego przemieszczania się w złożu oraz czasie pojawienia się czapy gazowej w najwyższej strefie fizycznego modelu złoża.
- 2) Znaczna różnica pomiędzy rozpuszczalnością CO₂ a CH₄ ma duże znaczenie dla zjawisk zachodzących w złożu, towarzyszących powstawaniu strefy gazowej (tzw. czapy) składającej się przede wszystkim z metanu.
- 3) Efektywna migracja swobodnego CO₂ wynika głównie z istnienia sił wyporu. Powoduje to pionowy przepływ zatłaczanego gazu ku górze, aż do spadku nasycenia gazem poniżej nasycenia krytycznego.
- 4) Transport rozpuszczonego CO₂ w modelu fizycznym złoża zachodzi również w wyniku przepływu wody (głównie w trakcie zatłaczania CO₂) oraz dyfuzji CO₂ w środowisku wodnym.

- 5) Uwzględnienie dyfuzji molekularnej gazów powoduje rozproszenie się gazu zatłaczanego w poszerzonym obszarze (w kierunku przepływu gazu oraz wody) i w efekcie zmianę koncentracji składu wydobywanego gazu.
- 6) Dzięki symulatorowi kompozycyjnemu możliwe było określenie ilości wydobytego metanu oraz stopnia szcerpania jego pierwotnej ilości (tab. 5.6).

Tabela 5.6. Wybrane rezultaty symulacji [48]

Etap	Koniec etapu	G_p (CH ₄) [Nm ³ × 10 ⁻⁶]	W_p [Nm ³ × 10 ⁻⁶]	Szcerpanie CH ₄ [%]	Szcerpanie wody [%]
I	14.06.2012 godz. 8:00	170	120	6,25	6,48
II	14.06.2012 godz. 9:00	770	120	28,46	6,48
III	14.06.2012 godz. 9:35	940	200	34,60	10,88

Symulacje numeryczne mogą stanowić cenne narzędzie pozwalające na bliższe poznanie procesów zachodzących w złożu podczas wypierania CH₄ przez zatłaczany CO₂. Dzięki nim możliwe jest również ocenienie skali zachodzenia danego zjawiska. Pomiar eksperymentu laboratoryjnego można przenieść na symulacyjny model rzeczywistego złoża, jednakże należy zaznaczyć, że do prawidłowej oceny procesu wypierania metanu z solanki wymagany jest szereg danych pomiarowych dotyczących tego złoża [48].

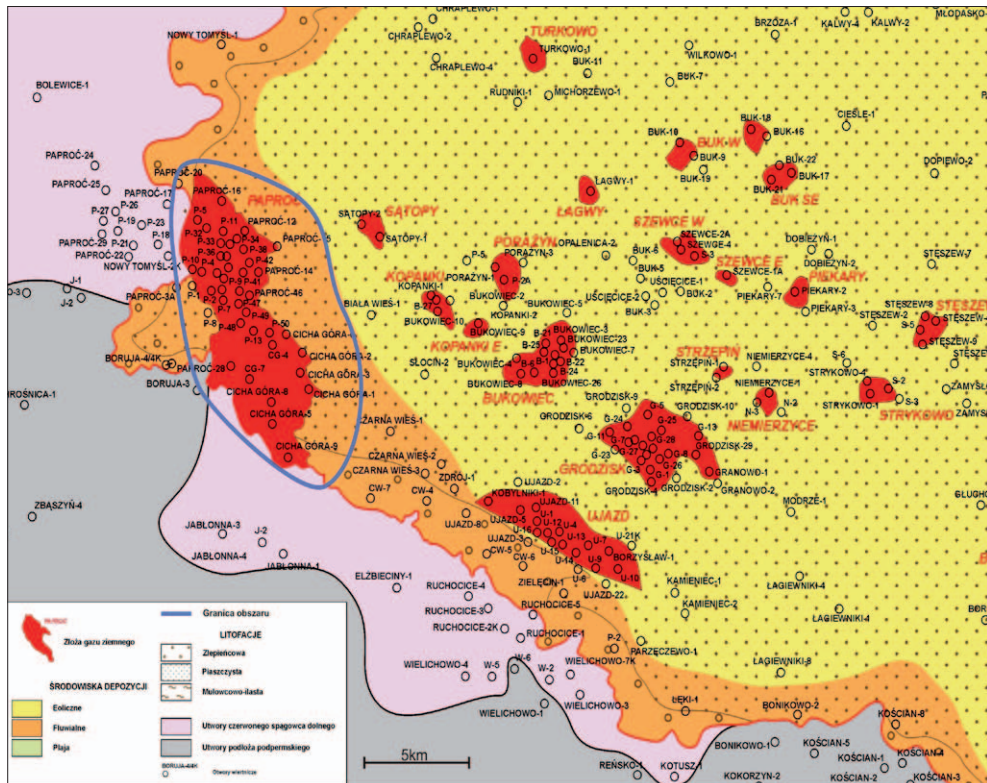
6. Określenie efektywności procesu wypierania, oszacowanie ilości gazu ziemnego możliwego do wydobycia

Wykorzystując trójwymiarowy geologiczny model symulacyjny zbudowany w ramach projektu pt. *Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z programem ich monitorowania. Zadanie 1.1.15. Opracowanie szczegółowych statycznych modeli ośrodka geologicznego składowisk – struktura niecki poznańskiej w formacjach czerwonego spągowca oraz Zadanie 1.1.16. Modelowanie dynamiczne procesów zatłaczania CO₂ do składowiska – struktura niecki poznańskiej* [67, 68], autor wykonał obliczenia symulacyjne ukierunkowane na określenie efektywności procesu wypierania i wstępne oszacowanie pozabilansowych ilości gazu węglowodorowego możliwych do pozyskania w wyniku zatłaczania CO₂.

6.1. Paproć–Cicha Góra – obszar niecki wybrany do modelowania numerycznego

Z racji ogromnej powierzchni permskiej struktury wodonośnej rejonu niecki poznańskiej (ok. 5000 km²), zróżnicowania i mnogości zlokalizowanych tam złóż węglowodorów autor skupił się w symulacjach numerycznych na zachodnim obszarze zapadliska poznańskiego, obejmującym jedno z większych gazowych złóż regionu, tj. Paproć–Cicha Góra (rys. 6.1). Wyłączone z modelu symulacyjnego obszary nie mają praktycznie wpływu na sekwestrację CO₂ w wybranej części struktury.

Złoże odkryto w 1982 r., a jego eksploatację rozpoczęto we wrześniu 1985 r. Początkowe zasoby geologiczne gazu ziemnego wynosiły 10,3 mld Nm³, a wydobywalne 7,8 mld Nm³. Głównymi składnikami płynu złożowego są: metan (69%) i azot (29%). Gaz zawiera niewielkie ilości helu; nie stwierdzono obecności siarkowodoru. Złoże występuje częściowo w piaszczystych utworach karbonu, jednak głównie w piaskowcach czerwonego spągowca i węglanach wapienia cechsztyńskiego [29]. Zarys konturów złoża jest dość nieregularny w wyniku pofalowania powierzchni stropowej czerwonego spągowca. Złoże gazu w osadach czerwonego spągowca ma powierzchnię ok. 27 km², a miąższość piaskowca nasyconego gazem to średnio ok. 16 m, maksymalnie 60 m. W obrębie złoża wydzielono kilka poziomów piaskowcowych, w których miąższość zmienia się w znacznym przedziale. Średnia porowatość wynosi 8,5% (4,6÷12,6%).



Rys. 6.1. Obszar niecki poznańskiej obejmujący złożo gazu Paproć–Cicha Góra wydzielony dla potrzeb modelowania numerycznego [3, 35]

Wartość przepuszczalności, w zależności od profili poziomów piaskowcowych dla poszczególnych odwiertów, zawiera się w przedziale od 0,1 mD do 56,3 mD [7]. Temperatura złożowa wynosi 98°C, natomiast początkowe ciśnienie złożowe to 29,7 MPa. Złoże należy do typu masywowego, o niejednorodnym typie skały zbiornikowej. W 1979 r. nieopodal złoża Paproć odkryto złożo Cicha Góra. W wyniku dalszych prac poszukiwawczych okazało się, że Cicha Góra i Paproć stanowią jeden system złożowy.

6.2. Opis i założenia symulacji numerycznej procesu zatłaczania CO₂ z równoczesnym odbiorem wypieranego gazu ziemnego

W badaniach posłużono się narzędziami programistycznymi do modelowania i symulacji z pakietów Petrel i Eclipse 300 firmy GeoQuest Schlumberger [8]. Użyty model geologiczny struktury zawiera elementy niezbędne do przeprowadzenia wielowariantowych i długoczasowych symulacji eksploatacji złoża z równoczesną sekwestracją ditlenku węgla. W symulacjach uwzględniono własności transportowe w układzie skała–płynы złożowe, skład i własności płynów złożowych oraz ich wzajemne oddziaływanie. Rozmiar bloku modelu w płaszczyźnie 2D ustalono na 100 × 100 m, wyodrębniono także 10 warstw o zróżnicowanej miąższości.

Model złoża został poprawnie skalibrowany, jego główne parametry oraz historia eksploatacji, z przebiegiem zmian ciśnień odwiertów, zostały z dużą dokładnością odtworzone, z sięgnięciem wstecz do lat 80. ubiegłego wieku. Płynы złożowe obecne w omawianej strukturze to gaz ziemny i woda złożowa. Oddziaływanie gazu i solanki na skałę scharakteryzowano poprzez podanie krzywych przepuszczalności względnych oraz krzywej ciśnień kapilarnych. W modelu wykorzystano średni skład chemiczny gazu ziemnego, wyliczony na podstawie analiz próbek pobranych z kilku otworów, a z potrzeby ograniczenia złożowości systemu płynów zgrupowano etan i cięższe składniki węglowodorowe i zastąpiono je pseudoskładnikiem C₂₊. Z uwagi na kompozycyjny charakter przygotowywanego modelu symulacyjnego, przy użyciu programu PVTsim, wygenerowano parametry równania stanu Penga–Robinsona. Parametry równania podano również dla H₂O i NaCl, ponieważ wymaga tego moduł uwzględniający rozpuszczalność gazu w wodzie. W równaniu stanu nie wzięto pod uwagę helu, z powodu jego niskiej koncentracji w składzie chemicznym omawianego „modelowego” gazu.

Założone własności solanki w warunkach złożowych, takie jak: gęstość, współczynnik objętościowy, izotermiczny współczynnik ściśliwości czy lepkość, pozyskano na podstawie laboratoryjnych badań PVT i analiz autora, w większości opisanych w rozdziałach 3–5 niniejszej pracy.

W celu właściwego zobrazowania procesów zachodzących podczas składowania CO₂ w modelu symulacyjnym omawianego fragmentu niecki poznańskiej uwzględniono zarówno rozpuszczalność ditlenku węgla, jak i pozostałych komponentów zawartych w składzie gazu ziemnego. Wartości rozpuszczalności przyjęto na podstawie pomiarów wykonanych przez autora w warunkach termobarycznych w komorze ciśnieniowej aparatury PVT i wykreślonych wówczas krzywych rozpuszczalności badanych gazów w wodach złożowych (rozdział 4). Zgodnie z literaturą rozpuszczalność azotu założono na poziomie odpowiednio mniejszym od rozpuszczalności metanu. W celu uzyskania równowagi hydrodynamicznej w złożu założono maksymalne nasycenie solanki gazem ziemnym, w zadanych warunkach ciśnienia i temperatury (krzywe rozpuszczalności).

Złoża gazu ziemnego monokliny przedsudeckiej po północnej stronie wału wolsztyńskiego zostały wypełnione gazem węglowodorowym, którego utworami macierzystymi są formacje wieku dewonu i karbonu. Przybliżeniu najbardziej obecnie prawdopodobnej genezy złóż niecki poznańskiej poświęcono obszerne fragmenty pierwszego i drugiego rozdziału niniejszej pracy. Według przywoływanych już geologów badających nagromadzenia węglowodorów w polskim basenie czerwonego spągowca [21, 64] generacja węglowodorów miała miejsce w utworach starszych niż osady obecnej formacji zbiornikowej, a następnie (głównie) gaz metanowy przemieszczał się grawitacyjnie, napełniając istniejące pułapki i formując złoża.

Modelując procesy wypierania i migracji metanu zawartego w poziomach wodonośnych, w tym ilości gazu możliwego do pozyskania dzięki zatłaczaniu CO₂, oprócz zasobów gazu naturalnie rozpuszczonego w solance uwzględnić należy również współobecność gazu ziemnego zdyspergowanego – strefy wolnego gazu w postaci niezliczonej ilości banieczek rozproszonych w fazie wodnej. Gaz zdyspergowany w środowisku wodnym występuje w strukturach złożowych (z wodą podścielającą), do których gaz napłynął, migrując grawitacyjnie poprzez poziomy solankowe od warstw macierzystych do skał formacji zbiornikowej. W przypadku złoża Paproć–Cicha Góra, jak i innych złóż niecki poznańskiej najprawdopodobniej takie zjawiska właśnie tam zaszły – potwierdzają to liczne prace naukowe poświęcone wyjaśnieniu genezy omawianych złóż. Szczegółowe badania dotyczące sposobu migracji i akumulacji gazu ziemnego w złożach monokliny przedsudeckiej prowadził m.in. Gurari [14]. Wyróżnił on trzy główne typy migracji gazu decydujące o tworzeniu się złóż, tj.: dyfuzję, migrację gazów rozpuszczonych w wodach

i migrację „strumieniową”, tzn. taką, w której gaz przemieszcza się w postaci wolnej fazy lotnej. Za pomocą gazowo-geochemicznych wskaźników Gurari wraz z zespołem określił drogi migracji gazów węglowodorowych poprzez poziomy wodonośne monokliny przedsudeckiej. W rejonie niecki poznańskiej stwierdzono duże pokrewieństwo gazów w odkrytych złożach z gazami rozpuszczonymi w wodach podścielających, zatem złoża te utworzyły się głównie w wyniku wydzielenia się gazów rozpuszczonych w wodach złożowych.

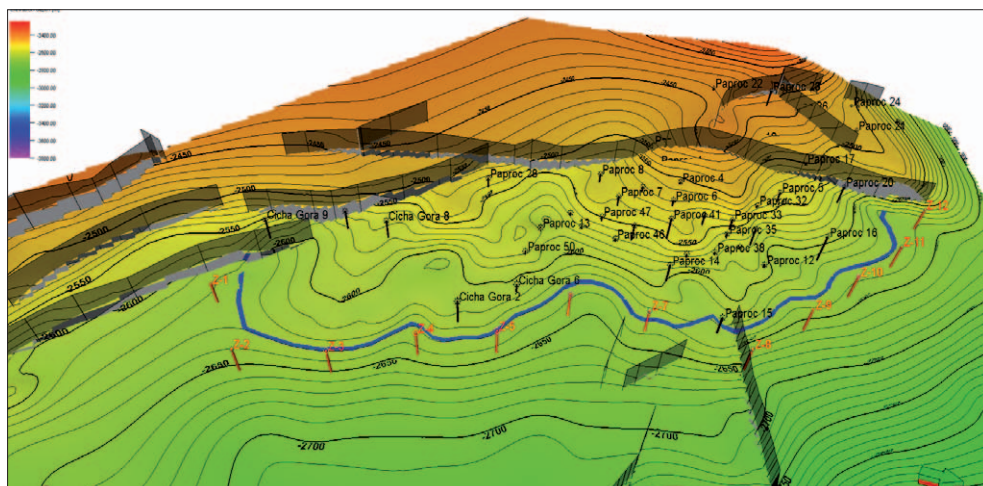
Teza zaproponowana przez Gurariego wpisuje się w koncepcję wypierania metanu zawartego w wodach złożowych przy użyciu zatłaczania CO₂. W pewnym uproszczeniu geneza złóż niecki wyglądałaby następująco: powstały w formacjach karbonu i dewonu gaz metanowy podczas migracji przez rozległe poziomy wodonośne maksymalnie nasyca je gazem – sytuacja taka występuje co najmniej w strefach migracji i obszarach je okalających. Po osiągnięciu maksymalnego stopnia rozpuszczalności metanu w wodzie następuje „przesycenie” solanki gazem i dalsze rozpuszczanie nie jest w danych warunkach termobarycznych możliwe. Gazu ziemnego posiadającego potencjał do migracji było jednak na tyle dużo, że jego grawitacyjna wędrówka trwała nadal. Z racji ograniczenia rozpuszczalności w środowisku wodnym dochodzi do etapu, w którym gaz zaczyna przemieszczać się w środowisku wód złożowych głównie w postaci fazy lotnej, jako niezliczona ilość maleńkich rozproszonych banieczek. W pobliżu naturalnych pułapek, w lokalnych kumulacjach struktury, występuje zagęszczenie takiego strumienia przepływającego gazu, którego cząsteczki łączą się w większe skupiska i unosząc się coraz wyżej, zwiększają swoją objętość jako strefy wolnego gazu. Zjawisku temu sprzyja zmniejszanie się ciśnienia w górotworze zachodzące w trakcie nieustannego unoszenia się baniek gazu w górę struktury. Jak opisywano w początkowych rozdziałach pracy, gaz, osiągając nieprzepuszczalny strop skał zbiornikowych, gromadzi się głównie w lokalnych wzniesieniach, tworząc złożę w postaci czapy gazowej. Migracja gazu jednak jeszcze się nie kończy, trwa ona aż do wyczerpania się potencjału wymuszającego ustalenie nowej równowagi termodynamicznej w systemie. Wędrujący w górę metan zwiększa objętość powstałych złóż, a jednocześnie podścielająca złożę woda konsekwentnie zajmuje niższe poziomy. Po wyczerpaniu pierwotnych sił wymuszających migrację płynów i osiągnięciu równowagi termodynamicznej opisywany system złożowy wygląda następująco: w lokalnej kumulacji struktury powstało złożę gazu ziemnego w postaci czapy gazowej; dolną granicę złoża stanowi woda podścielająca. Jest to solanka maksymalnie nasycona rozpuszczonym gazem ziemnym, a dodatkowo zawierająca duże ilości zdyspergowanego gazu, który został „zatrzymany w wędrówce” i uwięziony w środowisku wodnym w momencie ustania migracji gazu do wyżejległego złoża – czyli po osiągnięciu równowagi fazowej.

Twierdzi się, że ilość metanu zdyspergowanego, zwłaszcza w pobliżu złóż gazu, może być nawet większa niż objętość tego gazu rozpuszczonego w wodzie [16, 21]. Zdyspergowany metan z powodu okoliczności, dzięki którym (w danej formie) powstał, znajduje się na granicy nasycenia krytycznego, dlatego wznowienie/kontynuowanie jego dalszej migracji jest ułatwione chociażby przez zatłoczenie do opisywanych wód złożowych CO₂. Ditle-nek węgla, z racji ok. 10-krotnie wyższej rozpuszczalności w solance względem metanu, będzie powodował jego desorpcję z fazy wodnej i zaburzy ustaloną równowagę fazową w układzie. Po wprowadzeniu wystarczającej ilości CO₂ (bezwładność systemu) nastąpi wznowienie migracji gazu metanowego w kierunku pułapek i zwiększanie zasobów złóż o ilości pozabilansowe. W pewnych warunkach geologicznych możliwe jest nawet utworzenie się złóż w miejscach, gdzie ich wcześniej nie było – tzw. wtórne czapy gazowe.

Niestety nie istnieją wiarygodne pomiary poziomu nasycenia krytycznego, a co się z tym wiąże – ilości zdyspergowanego gazu ziemnego w permskich osadach złoża Paproć–Cicha Góra. Mimo wysiłków autora również obecnie nie udało się przeprowadzenie takich pomiarów (w którymś ze złóż niecki), gdyż wiązałoby się to ze zmianą/przerwaniem programu wiercenia otworu, stójką na czas zapuszczenia próbników wgłębnych i poboru próbek nasyconej solanki in situ. Każda zmiana w programie realizacji otworu, dodatkowo wiążąca się ze zwiększeniem kosztów czy wydłużeniem czasu prac, napotyka pewien opór ze strony operatora/inwestora. W związku z powyższym na podstawie danych literaturowych przyjęto średnią wartość nasycenia krytycznego na poziomie 9% przestrzeni porowej (pore volume) – bazując głównie na amerykańskich pomiarach prowadzonych przez firmy Exxon i Schlumberger u wybrzeży Luizjany i Teksasu [18, 58].

W symulacjach numerycznych modelujących procesy eksploatacji złoża i symultanicznego zatłaczania CO₂ założono wykorzystanie 12 nowych pionowych odwiertów (Z1÷Z12, kolor czerwony; rys. 6.2). Rozmieszczono je na linii łuku okalającego złożo od wschodu. Odwierty z zadaniem wydatkiem zatłaczają CO₂ na odpowiednią głębokość, bezpośrednio do wód podścielających złożo. Przygotowując założenia symulacyjne, zachowano pewną odległość pomiędzy odwiertami iniekcyjnymi a samym złożem. Aktualny kontur (linia niebieska) rozdzielający obszar zawodniony od skał nasyconych wolnym gazem ziemnym przyjęto jako północną i wschodnią granicę złoża – południową i zachodnią barierę dla węglowodorów stanowi seria uskoków, oznaczona na rysunku jako ciemnoszare wstęgi. Uszczelnienie skał zbiornikowych w stropie stanowi nieprzepuszczalna warstwa nadkładu w postaci utworów cechsztynu, a utwory czerwonego spągowca tworzą kształt monokliny wznoszącej się w kierunku zachodnim, ulegając litologicznemu wyklinieniu. Lokalizacja, granice (i ich typ), kształt i upad stropu opisywanego złoża miały znaczący

wpływ na wybranie właśnie tego obszaru niecki do prowadzenia symulacji i podjęcia prób ustalenia kierunków migracji gazów oraz oszacowania pozabilansowych ilości gazu ziemnego możliwych do pozyskania w wyniku sekwestracji CO₂ w tym rejonie.



Rys. 6.2. Rozmieszczenie odwiertów zatłaczających CO₂ na tle mapy stropu wybranej struktury złożowej

W prezentowanej pracy przedstawiono prognozy procesów sekwestracji CO₂ prowadzonych według dwóch poniższych scenariuszy.

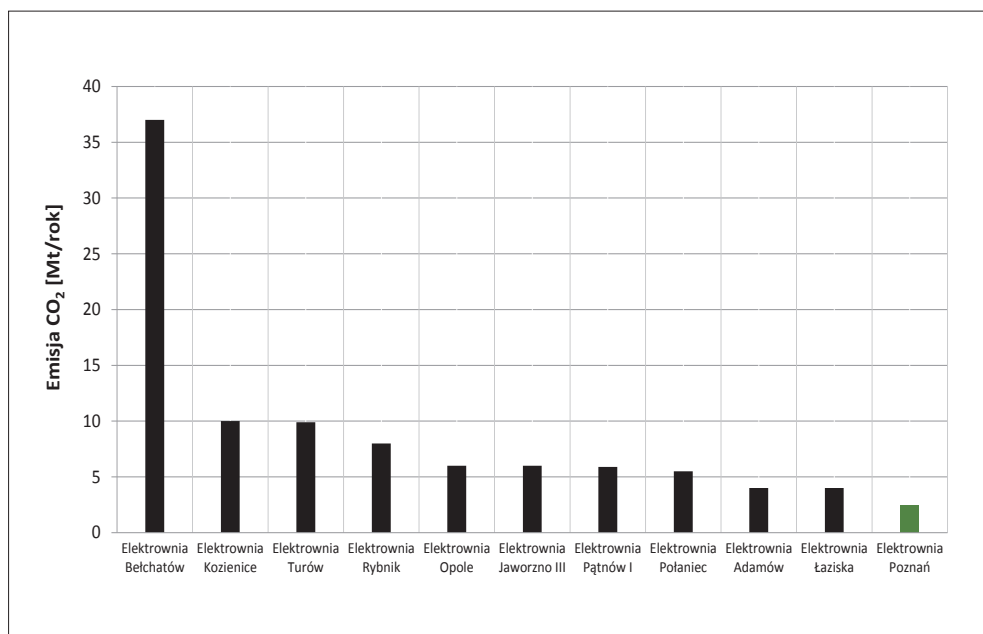
Wariant nr 1

Założono zatłaczanie CO₂ dwunastoma pionowymi odwiertami z wydatkiem 50 tys. Nm³ na dobę na odwiert, przez okres 50 lat, co w skali roku daje 0,43 Mt CO₂ zatłoczonych do struktury.

Wariant nr 2

Założono zatłaczanie CO₂ dwunastoma pionowymi odwiertami z wydatkiem 100 tys. Nm³ na dobę na odwiert, przez okres 50 lat, co w skali roku daje 0,86 Mt CO₂ zatłoczonych do struktury.

W projektowaniu symulacji przyjęto realistyczne ilości ditlenku węgla zatłaczanego do złoża. W porównaniu z ilościami CO₂ emitowanymi do atmosfery przez największe polskie elektrownie (rys. 6.3) są one wielokrotnie niższe, ale patrząc na nie z perspektywy wybranego w modelowaniu obiektu złożowego, jego możliwości sekwestracyjnych i zakładanego czasu (50 lat) prowadzenia procesu zatłaczania CO₂ – wydają się odpowiednie – dotyczy to szczególnie Zespołu Elektrociepłowni Poznań, o rocznej emisji CO₂ na poziomie ok. 2,5 Mt, która stanowi potencjalne źródło CO₂ w tym rejonie.



Rys. 6.3. Główni emitenci CO₂ w Polsce według Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami w 2012 r. [30]

Symulacje na numerycznym modelu złoża prowadzono z założeniem następujących limitów, dotyczących wydobywania poszczególnych odwiertów, decydujących o istotnych parametrach prowadzenia procesu.

Dany odwiert kontynuuje wydobywanie, dopóki koncentracja ditlenku węgla w składzie wydobywanego gazu znajduje się poniżej 90% mol. Jeśli stężenie CO₂ osiąga zakładany górny limit, wówczas taki odwiert jest wyłączany z eksploatacji.

Gdy ciśnienie denne ruchowe danego odwiertu eksploatacyjnego zaczyna spadać do wartości 100 bara, wówczas następuje stopniowe ograniczenie wydobycia z takiego odwiertu. W miarę potrzeby zmniejszanie wydatku następuje do poziomu przyjętego jako ekonomicznie opłacalny, tj.: 1440 Nm³/dobę (1 Nm³/min) – w przeliczeniu na CH₄. W przypadku gdy również ten warunek nie może być spełniony (ciśnienie denne ruchowe zaczyna spadać do 100 bara pomimo zminimalizowania wydobycia), odwiert zostaje wyłączony.

Jeśli dla danego odwiertu wydobywczego wykładnik wodny wydobywanego gazu wzrośnie do poziomu 0,0001 m³ wody na 1 Nm³ gazu, wówczas taki odwiert zostaje wyłączony z eksploatacji złoża.

Denne ciśnienie ruchowe odwiertów zatłaczających CO₂ nie może przekroczyć 350 bara. Limit ten związany jest z wymogami bezpieczeństwa (geomechanika górotworu), a jego wartość ustalono, uwzględniając wyliczoną wysokość średniego pierwotnego ciśnienia całej rozpatrywanej struktury i zwiększając ją o 5%. W oszacowaniu limitu ciśnieniowego odwiertów zatłaczających uwzględniono również warstwy zawadnione podścielające złożę gazu, stąd jego wartość jest wyższa niż pierwotne ciśnienie złożowe przyjęte dla złoża gazu Paproć–Cicha Góra.

6.3. Symulacje procesów sekwestracji CO₂ z równoczesnym odbiorem wypieranego gazu ziemnego

Obliczenia symulacyjne przeprowadzono według dwóch wariantów realizujących różne schematy sekwestracji CO₂. W obydwu przypadkach ditlenek węgla zatłaczano bezpośrednio do wód podścielających złożę Paproć–Cicha Góra przez okres 50 lat. Jednocześnie trwała ciągła eksploatacja złoża. Procesy symultanicznego zatłaczania CO₂ i wydobycia gazu prowadzono z zachowaniem równych wydatków mediów wprowadzanych i odbieranych z rozpatrywanej struktury (tzw. *voidage replacement*). W odniesieniu do warunków normalnych wydajność zatłaczania CO₂ (w Nm³/d) była równa wydobyciu gazu ziemnego ze złoża.

W obu prezentowanych wariantach do zatłaczania CO₂ wykorzystano 12 nowych pionowych odwiertów, natomiast wydobycie gazu realizowane było poprzez 27 istniejących odwiertów, znajdujących się w obrębie złoża Paproć–Cicha Góra.

Przedstawione poniżej wyniki symulacji złożowych uzyskano przy użyciu kompozycyjnego symulatora złożowego Eclipse 300 firmy Schlumberger z modułem Gaswat.

Wariant nr 1

Założenia:

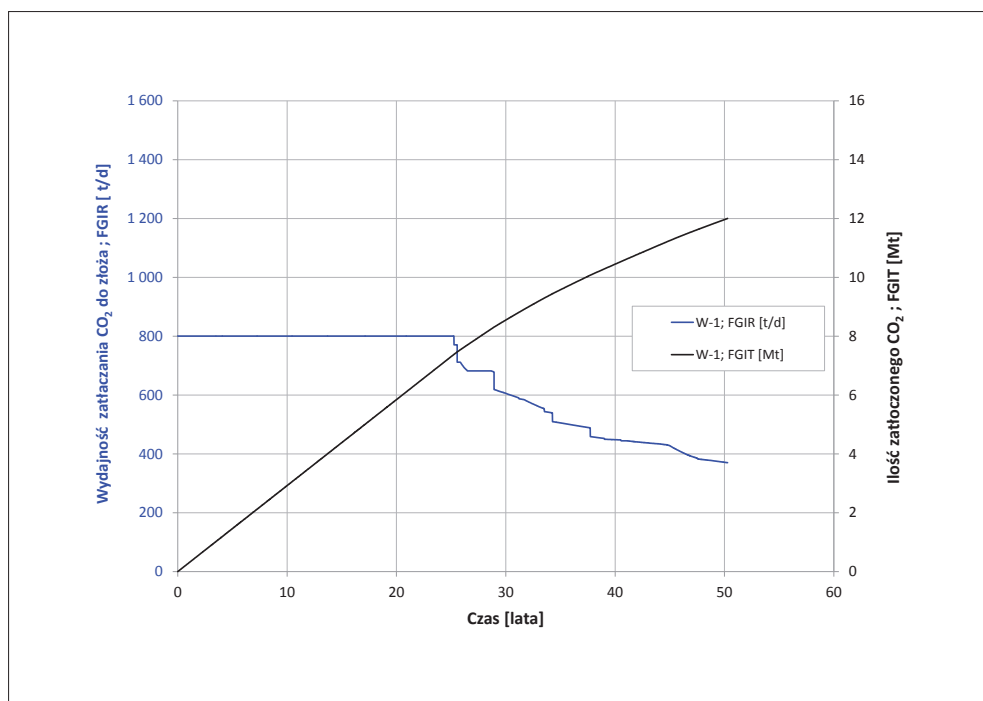
- zatłaczanie CO₂ dwunastoma pionowymi odwiertami rozmieszczonymi po wschodniej stronie złoża;
- stała wydajność zatłaczania dla każdego z odwiertów: 50 tys. Nm³/d;
- zatłaczanie ditlenku węgla w stanie nadkrytycznym do strefy wodonośnej;
- zdeponowanie w strukturze ok. 12 mln ton CO₂.

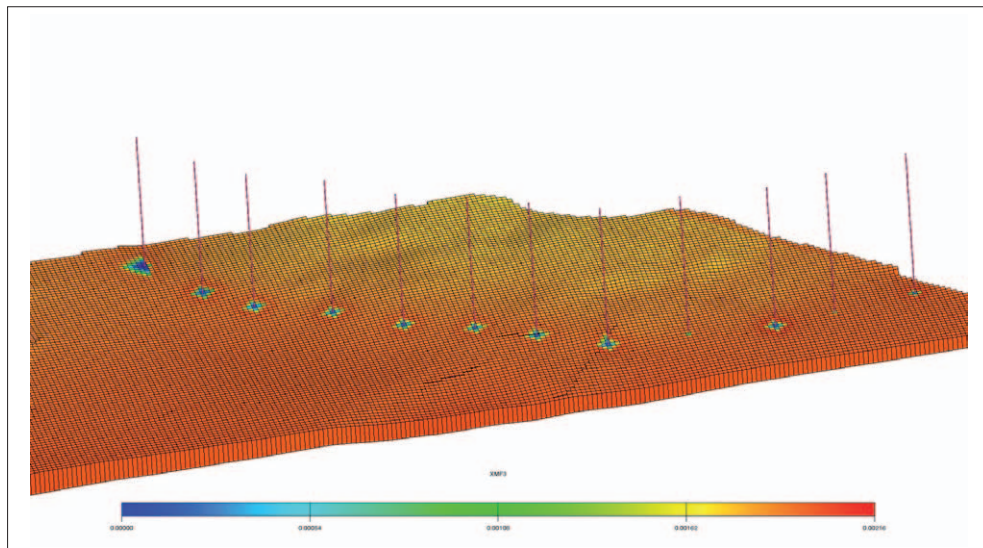
W omawianym wariantcie rzeczywista wydajność zatłaczania CO₂ (realizowana 12 odwiertami) nie była tak wysoka, jak pierwotnie założono. Ostatecznie wyniosła nieco ponad 400 tys. Nm³ na dobę, czyli do warstw wodonośnych omawianej struktury codziennie udawało się zatłoczyć ok. 800 ton ditlenku węgla (rys. 6.4).

Fakt nieosiągnięcia planowanego wydatku zatłaczania CO₂ spowodowany był narzuconymi na etapie projektowania symulacji limitami. W tym przypadku chodzi o ograniczenie wysokości ciśnienia dennego dynamicznego w odwiertach iniekcyjnych do 350 bara. Własności strefy wodonośnej modelowanego czerwonego spągowca, decydujące o chłonności poszczególnych odwiertów, są niekiedy niewystarczające, aby odwierty te mogły zatłaczać CO₂ z dużymi wydajnościami. W prezentowanej symulacji odwierty iniekcyjne Z9 i Z11 zostały udostępnione w niekorzystnych warunkach złożowych i praktycznie nie wprowadzają CO₂ do struktury. W takich przypadkach zaleca się zmianę lokalizacji odwiertu zatłaczającego lub przeprowadzenie zabiegów stymulacyjnych poprawiających chłonność skały w strefach przyodwiertowych lub zastosowanie odwiertów horyzontalnych.

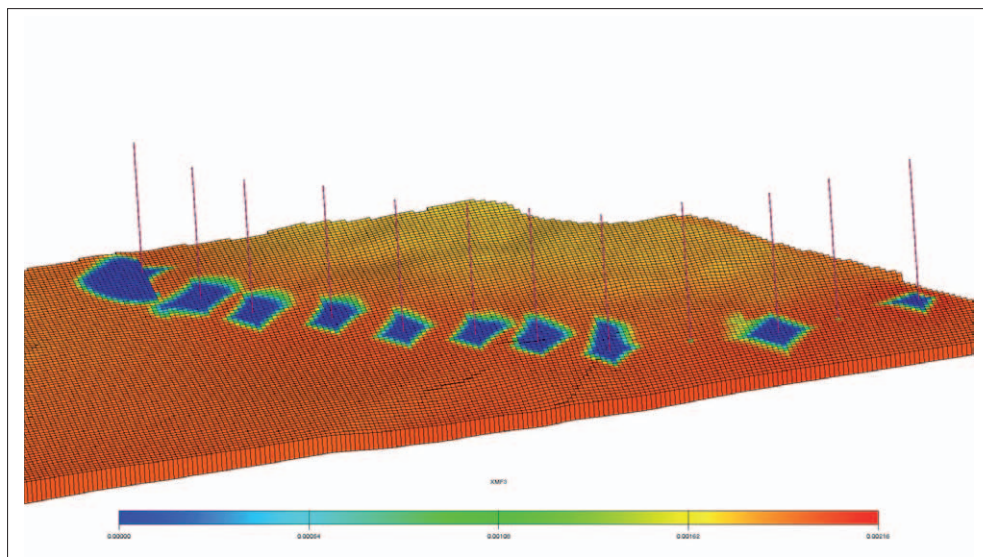
Na kolejnych rysunkach przedstawiono wyniki symulacji w postaci rozkładów koncentracji metanu rozpuszczonego w wodzie. Znaczna różnica pomiędzy rozpuszczalnością metanu i ditlenku węgla w solance pozwala zaobserwować zachodzące w strukturze zjawisko wypierania rozpuszczonego w wodzie metanu. Udział molowy metanu rozpuszczonego w wodzie po zakończeniu historycznego okresu eksploatacji złoża (tj. przed rozpoczęciem zatłaczania CO₂) kształtował się na poziomie 0,0011÷0,0016. Od początku zatłaczania CO₂ w strefach okalających odwierty zatłaczające zaobserwowano spadek ilości metanu rozpuszczonego w wodzie – jego miejsce konsekwentnie zajmuje

łatwo rozpuszczający się w wodzie złożowej ditlenek węgla. W miarę iniekcji CO_2 do struktury w warstwie wodonośnej formują się coraz to większe obszary, w których zawartość rozpuszczonego metanu w wodzie jest bliska zeru (rys. 6.5–6.8). Świadczy to o prawie zupełnej desorpcji metanu „uwięzionego” wcześniej w wodach złożowych, co jest szczególnie widoczne na rysunku przekrojowym ilustrującym rozkład nasycenia metanem poszczególnych warstw modelu symulacyjnego (rys. 6.9). Na rysunku tym można zaobserwować również kierunki migracji rozpuszczonego w wodzie CO_2 , pokrywające się ze strefami zaniku koncentracji metanu w środowisku wodnym – od cienia koloru niebieskiego. Prezentowany rozkład nasycień wymuszony jest między innymi niejednorodnością warstw skał zbiornikowych, a w szczególności zmiennością parametru przepuszczalności. Wyparty z solanki metan stopniowo migruje w kierunku odwiertów wydobywczych, powiększając zasoby złoża gazu ziemnego Paproć–Cicha Góra o ilości pozabilansowe, niemożliwe do pozyskania konwencjonalnymi metodami eksploatacji.

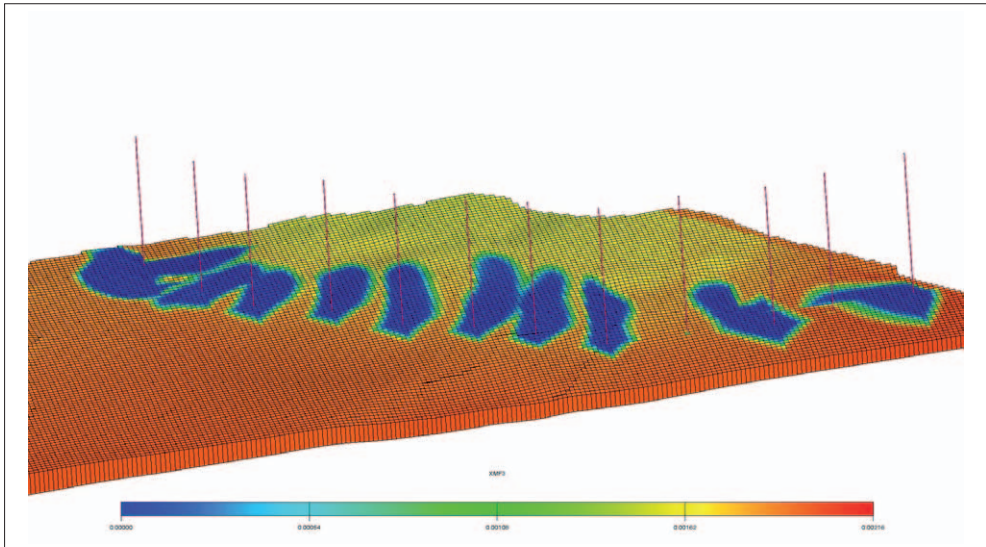
Rys. 6.4. CO_2 zatlaczany do złoża – wariant nr 1



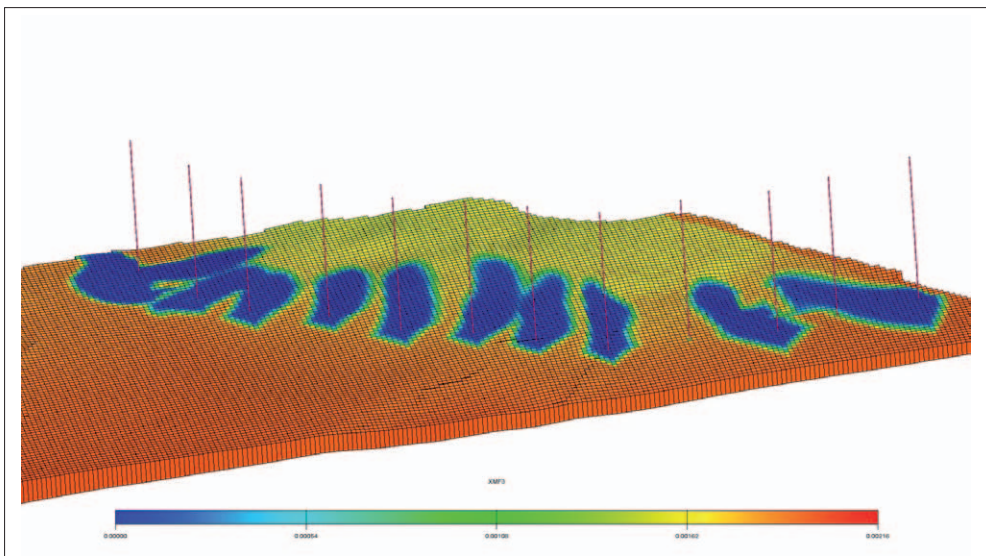
Rys. 6.5. Koncentracja metanu rozpuszczonego w wodzie kilka dni po rozpoczęciu zatłaczania CO₂ (rok 0) – warstwa 9



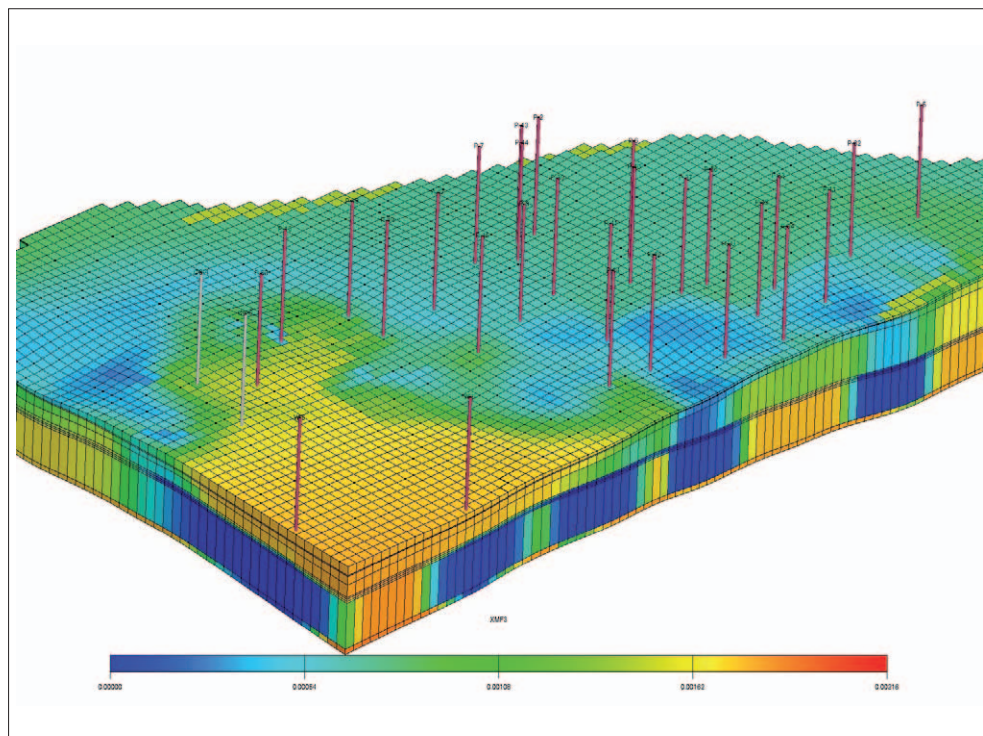
Rys. 6.6. Koncentracja metanu rozpuszczonego w wodzie po 5 latach od rozpoczęcia zatłaczania CO₂ – warstwa 9



Rys. 6.7. Koncentracja metanu rozpuszczonego w wodzie po 25 latach od rozpoczęcia zatłaczania CO₂ – warstwa 9

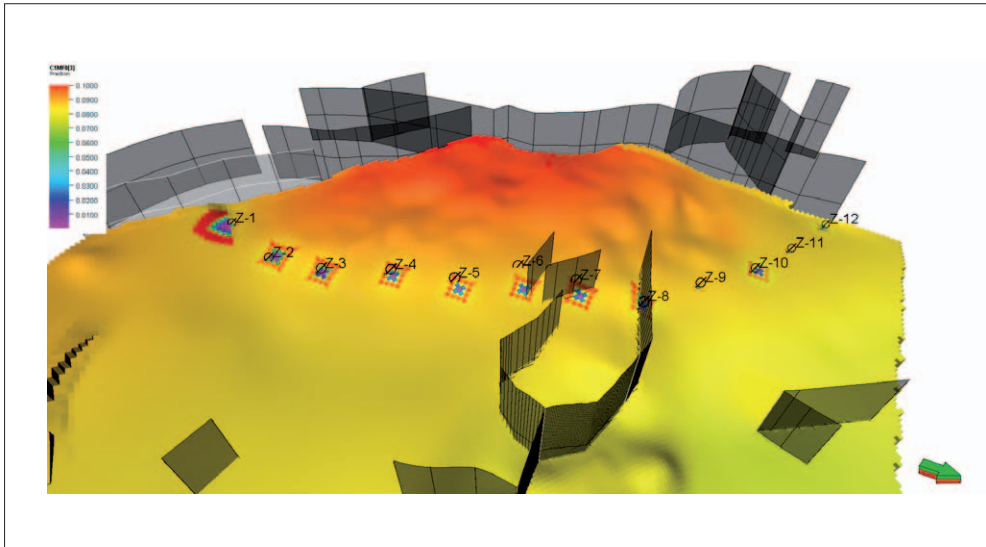


Rys. 6.8. Koncentracja metanu rozpuszczonego w wodzie w momencie zakończenia zatłaczania CO₂ (rok 50) – warstwa 9

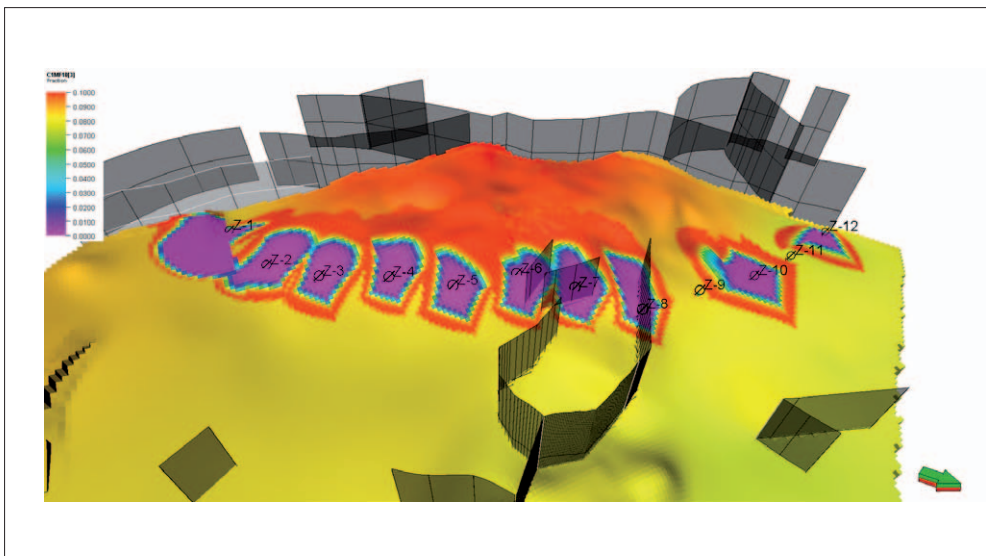


Rys. 6.9. Koncentracja metanu rozpuszczonego w wodach omawianej struktury w momencie zakończenia zatłaczania CO₂ (rok 50)

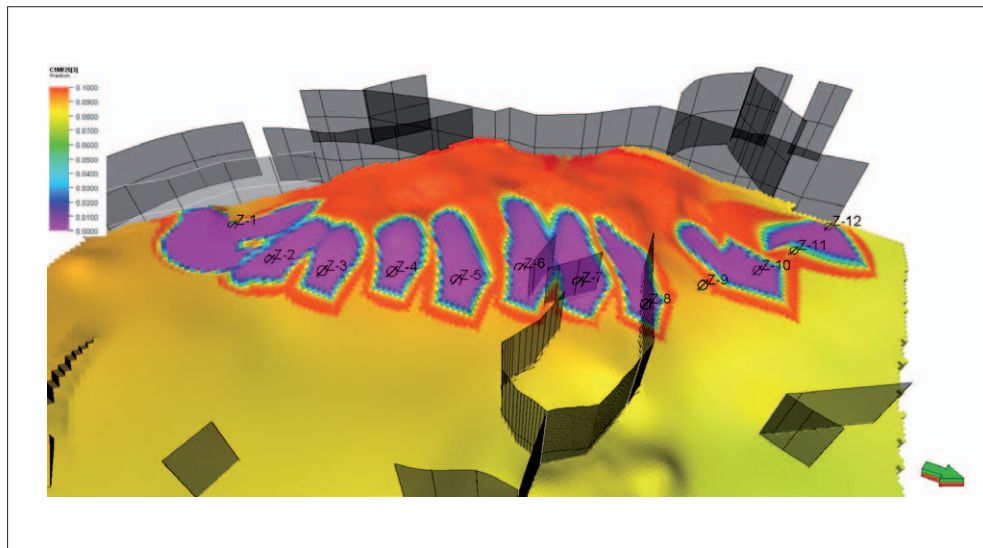
Na rysunkach 6.10–6.13 zilustrowano rozkład nasycenia metanem w fazie gazowej w dziewiątej warstwie symulacyjnego modelu złoża. Jest to objętościowo największa warstwa modelu, która reprezentuje część zawodnioną złoża; udostępniono w niej odwierty zatłaczające. Na kolejnych rysunkach widać jak „uwolniony” metan, zarówno wyparty z fazy wodnej, jak i pierwotnie zdyspergowany, przemieszcza się generalnie od odwiertów zatłaczających do odwiertów wydobywczych. W miarę ekspansji obszarów pełnego nasycenia ośrodka porowatego ditlenkiem węgla zwiększają się ilości metanu uwalnianego i kierowanego ku wyższym warstwom modelu, w których zlokalizowane są odwierty wydobywcze. Gaz akumulujący się w pułapce w górze struktury, w postaci wolnej fazy lotnej, spowalnia obniżanie się ciśnienia w złożu (wynikające z jego ciągłej eksploatacji) oraz zapobiega potencjalnej inwazji wody podścielającej, co spowodowałoby zalanie odwiertów wydobywczych.



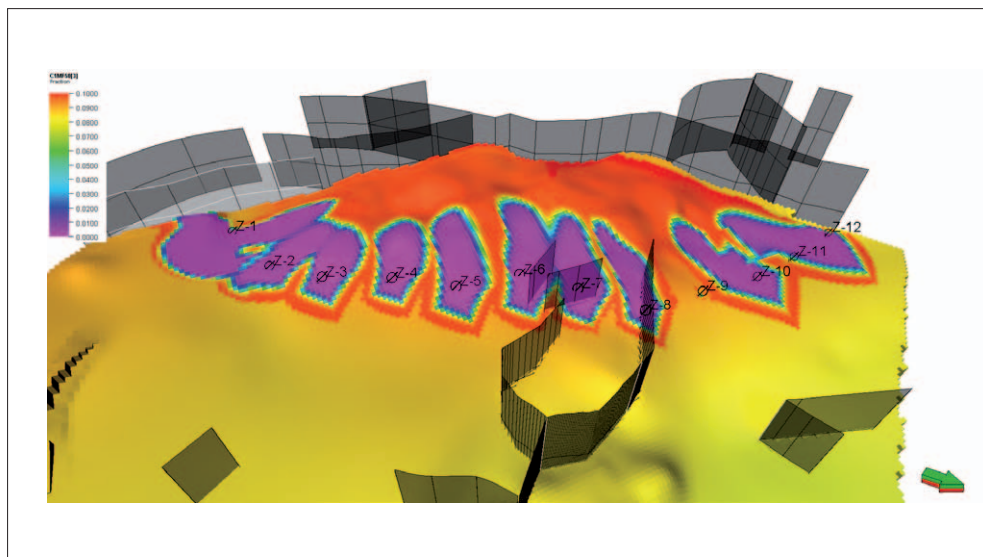
Rys. 6.10. Nasylenie ośrodka porowatego metanem w fazie gazowej w kilka dni po rozpoczęciu zatłaczania CO₂ (rok 0) – warstwa 9



Rys. 6.11. Nasylenie ośrodka porowatego metanem w fazie gazowej po 10 latach od rozpoczęcia zatłaczania CO₂ – warstwa 9



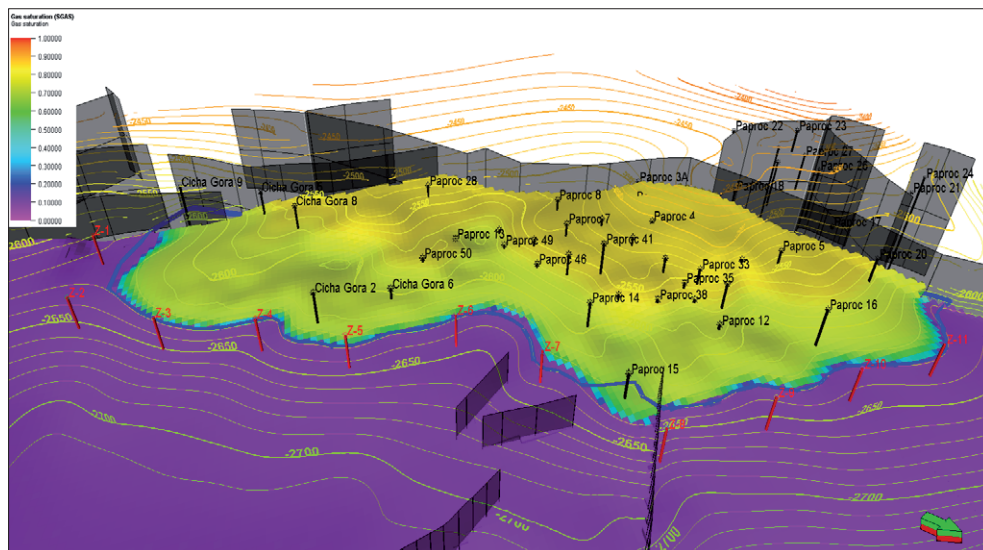
Rys. 6.12. Nasylenie ośrodka porowego metanem w fazie gazowej po 25 latach od rozpoczęcia zatłaczania CO₂ – warstwa 9



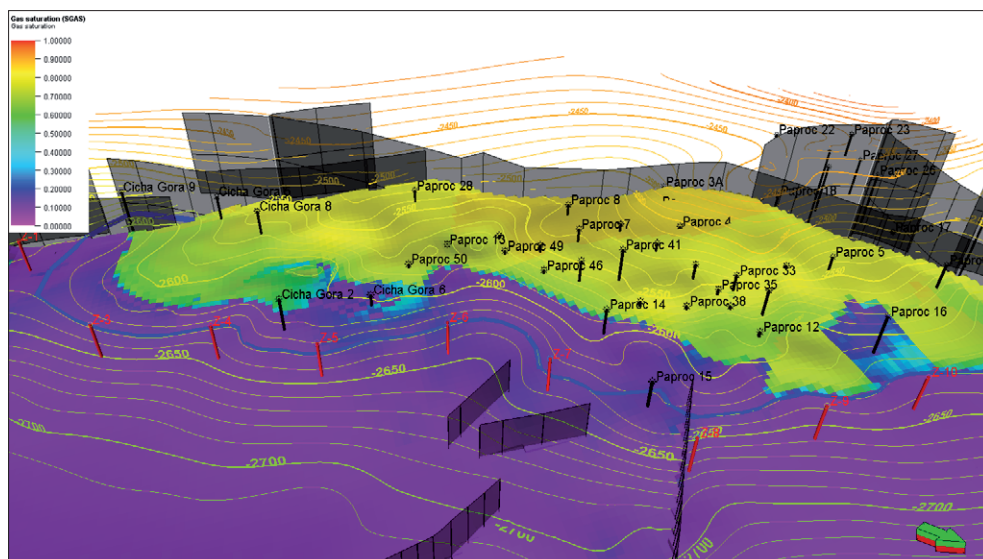
Rys. 6.13. Nasylenie ośrodka porowego metanem w fazie gazowej w momencie zakończenia zatłaczania CO₂ (rok 50) – warstwa 9

Kolejne rysunki (6.14–6.16) ilustrują rozkład nasycenia ośrodka porowatego wolną fazą gazową, na przestrzeni 50 lat prowadzenia procesu zatłaczania CO₂ i jednoczesnej eksploatacji złoża gazu, zaprezentowany na tle mapy stropu warstw stanowiących skałę zbiornikową. Poziomy wodonośne podścielające złoża gazu Paproć–Cicha Góra zawierają w swojej objętości porowej około 9% gazu metanowego w postaci fazy lotnej – jako zdyspergowane banieczki rozproszone w środowisku wodnym (kolor fioletowy). Strefa złożowa w postaci czapy gazowej reprezentowana jest głównie przez kolor żółty, jej nasycenie gazem ziemnym zawiera się w zakresie 70÷83% objętości porowej. Uwzględniono rezydualne nasycenie ośrodka zbiornikowego wodą związaną na poziomie 17% (jest to wartość uśredniona określona na podstawie pomiarów). Linia niebieską zaznaczono „pierwotny” kontur wód podścielających – stan na rok 0. Uruchomienie procesu zatłaczania CO₂ z jednoczesnym odbiorem gazu ze złoża powoduje stopniowe podnoszenie się poziomu wód podścielających w strukturze oraz przemieszczanie się stref zwiększonego nasycenia porów gazem. O drogach migracji mieszaniny nadkrytycznego ditlenku węgla i metanu decyduje wiele czynników, w tym: przepuszczalność, porowatość i topografia warstw, jak również realna wydajność odwiertów zatłaczających. Dla przykładu, umiejscowienie odwiertów Z1 i Z2 w pobliżu lokalnego obniżenia struktury spowodowało, że duża część zatłaczanego przez nie CO₂ (oraz zdesorbowanego metanu) przemieściła się w kierunku przeciwnym niż oczekiwany i zaczęła nagromadzać się w lokalnym przewyższeniu położonym na południe od złoża Paproć–Cicha Góra z potencjałem utworzenia tam wtórnej czapy gazowej. Podobną enklawę zwiększonego nasycenia gazem zaobserwować można w pobliżu odwiertów Cicha Góra-6 i Paproć-50. Anomalie w rozkładzie nasycień, spowodowane prawdopodobnie brakiem zatłaczania CO₂ przez odwierty Z9 i Z11, wystąpiły wokół odwiertu Paproć-16 (rys. 6.16).

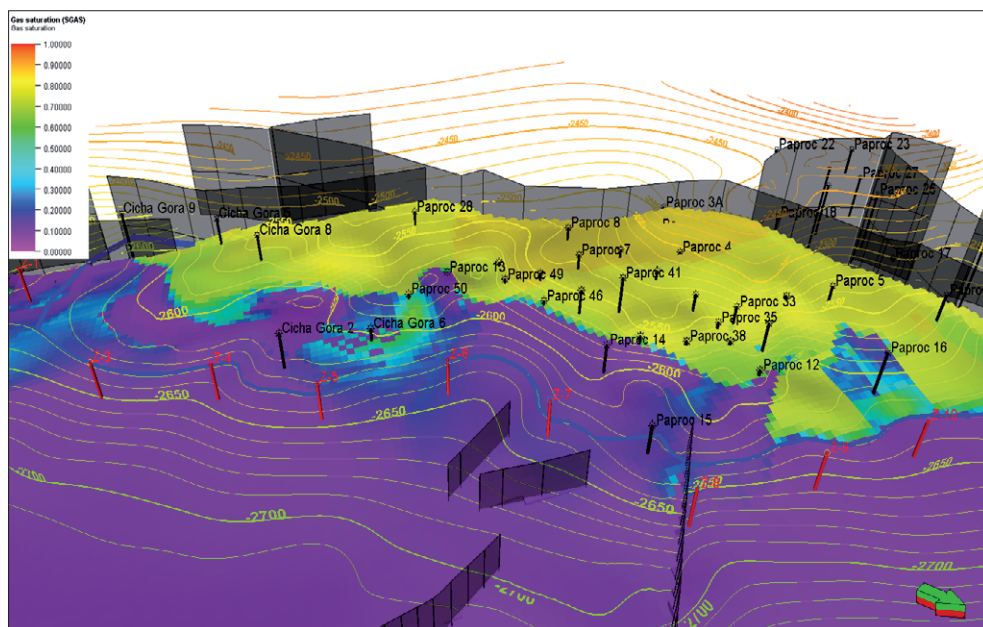
W trakcie 50 lat kontynuowania procesu zatłaczania CO₂ (w wariantcie nr 1) do omawianej struktury złożowej zatłoczono 12 Mt CO₂. Dla porównania: Zespół Elektrociepłowni Poznańskich S.A. na przestrzeni ostatnich lat emituje średnio ok. 2,5 Mt CO₂ rocznie. Jednocześnie całkowite wydobycie gazu ziemnego ze złoża (w przeliczeniu na metan) wyniosło w tym okresie 5,6 mld Nm³. Przez ponad 25 lat od rozpoczęcia procesu udawało się utrzymywać na stałym poziomie wydobycie gazu (rys. 6.17) oraz wydajność zatłaczania CO₂. Po tym okresie, z uwagi na założone limity, następowało stopniowe wyłączenie odwiertów produkcyjnych, co pociągało za sobą również ograniczenie intensywności iniekcji ditlenku węgla – tzw. tryb *voidage replacement*. Jedną z zalet przyjętego sposobu prowadzenia procesu jest zapobieganie nadmiernemu wzrostowi ciśnienia w systemie. Podnoszenie się ciśnienia skutkowałoby wzmocnieniem rozpuszczania się gazu w wodach złożowych, a więc (częściowo) ponownym wnikaniem gazu z fazy lotnej w środowisko wodne, czyli



Rys. 6.14. Nasylenie ośrodka porowatego fazą gazową w kilka dni po rozpoczęciu zatłaczania CO₂ (rok 0)



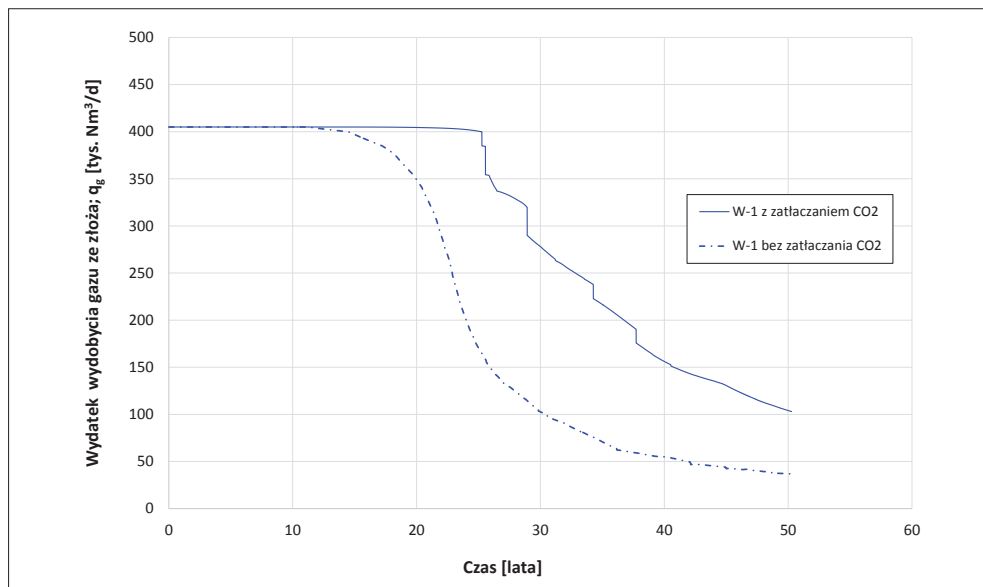
Rys. 6.15. Nasylenie ośrodka porowatego fazą gazową po 25 latach od rozpoczęcia zatłaczania CO₂



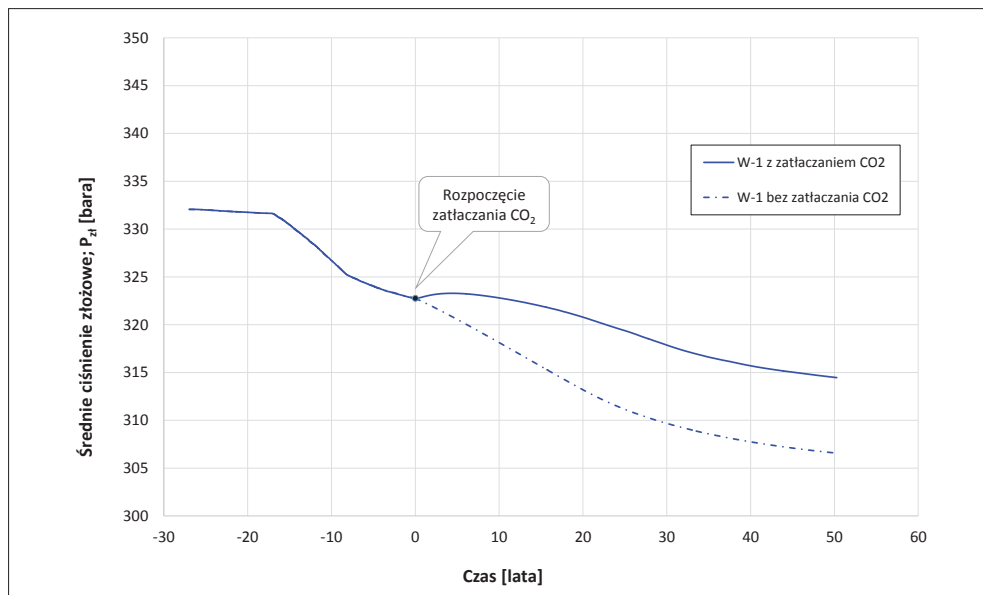
Rys. 6.16. Nasylenie ośrodka porowatego fazą gazową w momencie zakończenia zatłaczania CO₂ (rok 50)

w rzeczywistości efektem byłyby ubywanie zasobów (tradycyjnie rozumianego/definiowanego) złoża. Przebieg spadku ciśnienia w omawianej strukturze sekwestracyjno-złożowej przedstawiono na rysunku 6.18. Okres poprzedzający rok zerowy stanowi historyczną część eksploatacji złoża Paproć–Cicha Góra (odtworzoną na etapie kalibracji modelu), natomiast przedział czasowy następujący po tej dacie prezentuje wyniki symulacji. Linią przerywaną zaznaczono prognozowany przebieg ciśnienia w przypadku niestosowania zatłaczania CO₂ do struktury – dalsza tradycyjna eksploatacja złoża. W wyniku wprowadzania ditlenku węgla linia spadku średniego ciśnienia złożowego ma charakter bardziej łagodny, jednakże na samym końcu omawianego procesu (rok 50) ciśnienie pozostaje wyższe od odpowiedniej wartości referencyjnej (tj. przy konwencjonalnej eksploatacji) o jedyne 8 bar.

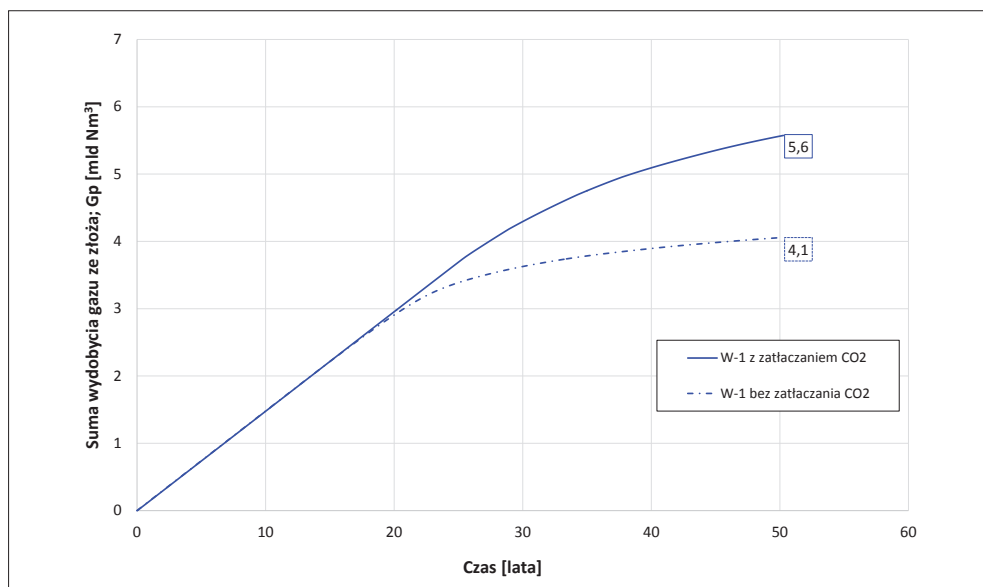
Według przeprowadzonych symulacji numerycznych na przestrzeni 50 lat prowadzenia procesu eksploatacji złoża i jednoczesnego zatłaczania CO₂ wydobyto 5,6 mld Nm³ metanu. W przypadku niestosowania zatłaczania CO₂, a jedynie kontynuowania eksploatacji w sposób tradycyjny prognozowana ilość pozyskanego w ten sposób gazu wyniosłaby ok. 4,1 mld Nm³. Zyskujemy zatem znaczny, bo aż 36,6-procentowy wzrost wydobycia (rys. 6.19).



Rys. 6.17. Wydatek wydobywania gazu ziemnego ze złoża – wariant nr 1



Rys. 6.18. Zmiany ciśnienia złożowego w funkcji czasu – wariant nr 1



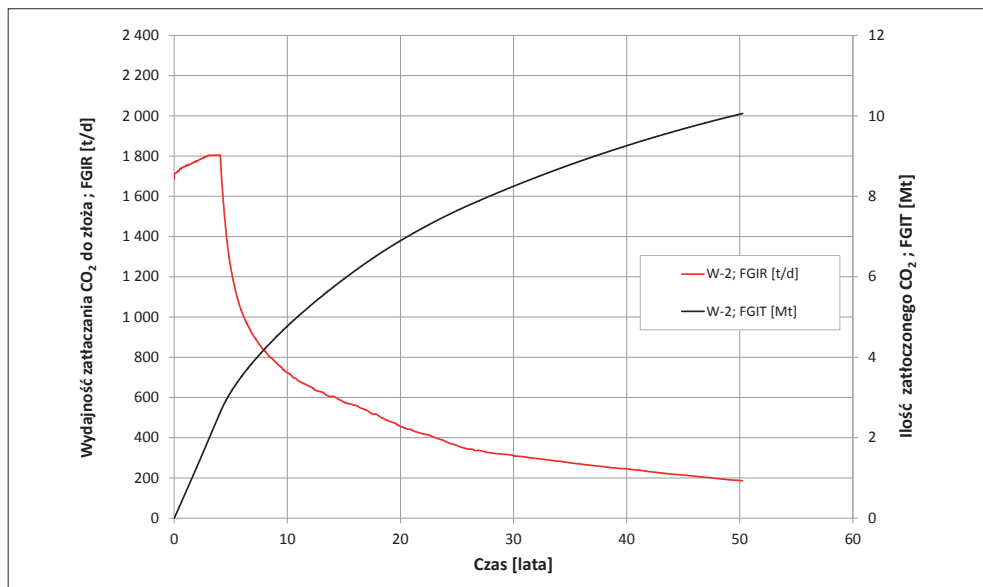
Rys. 6.19. Wydobycie gazu ziemnego ze złoża – wariant nr 1

Wariant nr 2

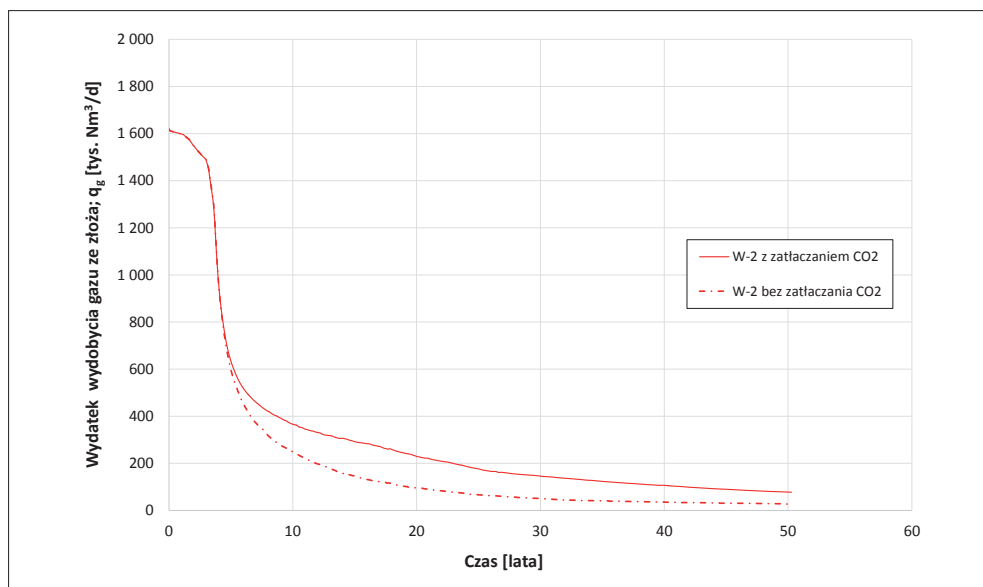
Założenia:

- zatłaczanie CO₂ dwunastoma pionowymi odwiertami rozmieszczonym po wschodniej stronie złoża;
- stała wydajność zatłaczania dla każdego z odwiertów: 100 tys. Nm³/d;
- zatłaczanie ditlenku węgla w stanie nadkrytycznym do strefy wodonośnej.

W drugim wariantcie prowadzenia procesu zwiększono wydajność zatłaczania CO₂ z 50 tys. do 100 tys. Nm³/d na odwiert. Jednocześnie, aby zapobiec wzrostowi ciśnienia w strukturze, w tożsamy sposób zwiększono wydobycie gazu ziemnego z odwiertów. Tak jak w pierwszym wariantcie prowadzenia procesu uzyskana rzeczywista wydajność zatłaczania CO₂ (z uwzględnieniem narzuconych limitów) była niższa niż pierwotnie założono/dopuszczono. Po około czterech latach od rozpoczęcia procesu wydatek zatłaczania CO₂ osiągnął maksimum, tj. 913 tys. Nm³ na dobę, a więc do warstw wodonośnych codziennie zatłaczano około 1800 ton ditlenku węgla (rys. 6.20).



Rys. 6.20. CO₂ zatłaczany do złoża – wariant nr 2



Rys. 6.21. Wydatek wydobywania gazu ziemnego ze złoża – wariant nr 2

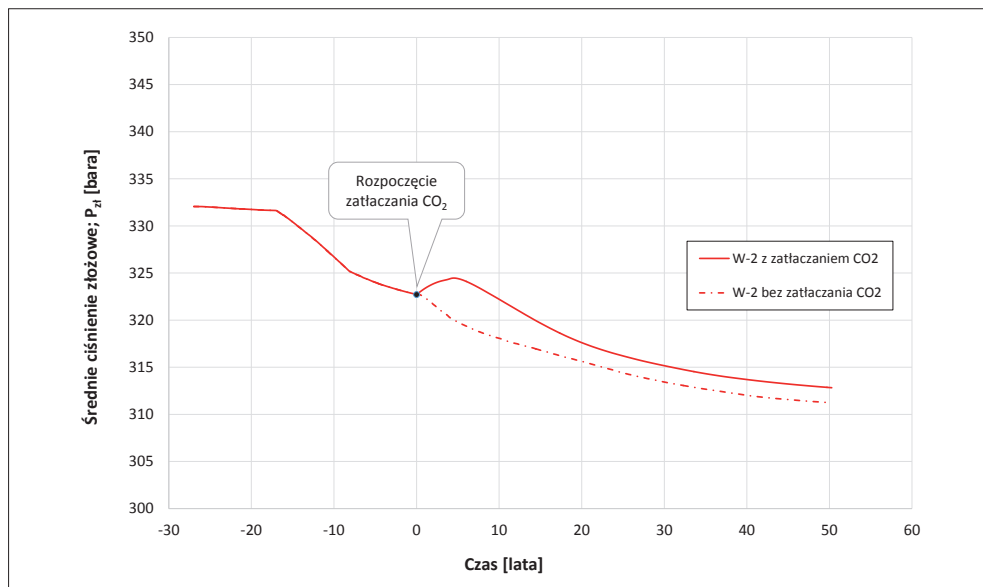
Analogicznie do wcześniej opisywanego przypadku powodem niższych wydajności tłoczenia, determinującego intensywność wydobycia, była niska chłonność niektórych odwiertów i ograniczanie ich ciśnienia dennego dynamicznego do 350 bara.

W prezentowanym przykładzie zachodzą identyczne zjawiska jak w pierwszym wariantcie symulacji. Inna jest natomiast dynamika migracji płynów złożowych ze względu na bardziej intensywną „wymianę” mediów w rozpatrywanej strukturze – prowadzi się symultaniczne zatłaczanie ditlenku węgla i wydobycie gazu ziemnego.

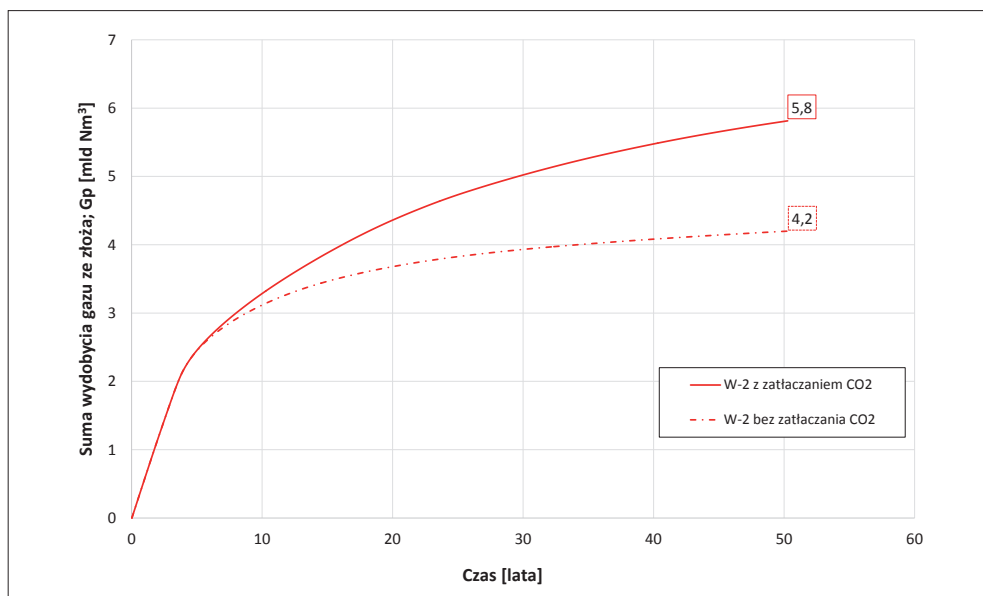
Różnica w rozpuszczalności CH_4 i CO_2 w solance pozwala zaobserwować zjawisko desorpcji zawartego w środowisku wodnym metanu, którego miejsce konsekwentnie zajmuje łatwo rozpuszczający się w wodzie złożowej CO_2 . Kontynuowanie procesu wprowadzania ditlenku węgla do warstw zawodnionych struktury powoduje zwiększanie obszarów o znikomej zawartości metanu – zarówno w formie rozpuszczonej, jak i zdyspergowanej w środowisku wodnym. Uwolniony metan migruje w kierunku złoża Paproć–Cicha Góra, wzbogacając jego zasoby.

Podczas 50 lat prowadzenia procesu zatłaczania CO_2 (w wariantcie nr 2) do wybranej struktury złożowej zatłoczono 10 Mt CO_2 . Całkowite wydobycie gazu ziemnego ze złoża (w przeliczeniu na metan) w tym wariantcie wyniosło 5,8 mld Nm^3 . Bardzo wysoką wydajność wydobycia gazu notowano w okresie pierwszych 5 lat prowadzenia procesu, w ciągu następnych 5 lat produkcja spadła do około 400 tys. Nm^3 na dobę i do końca zatłaczania CO_2 obserwuje się już ciągłe łagodne zmniejszanie się wydobycia z odwiertów (rys. 6.21). Gwałtowny spadek ilości pozyskiwanego gazu w pierwszych latach trwania procesu spowodowany jest narzuconymi na odwierty limitami. Główną rolę odgrywa tutaj ograniczenie koncentracji CO_2 w odbieranym gazie ziemnym oraz, dosyć restrykcyjnie zadany, wykładnik wodny – razem składają się one na wyłączenie z procesu kolejnych odwiertów eksploatacyjnych. Porównując krzywe odzwierciedlające przebieg wydobycia metanu ze złoża (w wariantcie bez zatłaczania oraz z zatłaczaniem CO_2) po około 15 latach od rozpoczęcia procesu, obserwuje się efekt podwojenia, a nawet potrojenia dziennego wydobycia gazu ze złoża uzyskiwany dzięki zatłaczaniu CO_2 . Zwielokrotnienie dobowego wydobycia utrzymuje się do końca prowadzenia procesu – rok 50.

Przebieg spadku średniego ciśnienia w strukturze przedstawiono na rysunku 6.22. Okres poprzedzający rok zerowy stanowi historyczną część eksploatacji złoża Paproć–Cicha Góra, a przedział czasowy następujący po tej dacie prezentuje wyniki symulacji. Przerywaną linią zaznaczono prognozowany przebieg spadku ciśnienia w przypadku prowadzenia konwencjonalnej eksploatacji złoża, a więc niestosowania zatłaczania CO_2 do struktury. Wprowadzenie ditlenku węgla skutkuje niewielkim zwiększeniem się średniego ciśnienia w rozpatrywanym systemie złożowym. Tendencja wzrostowa utrzymuje



Rys. 6.22. Zmiany średniego ciśnienia struktury w funkcji czasu – wariant nr 2



Rys. 6.23. Wydobyć gazu ziemnego ze złoża – wariant nr 2

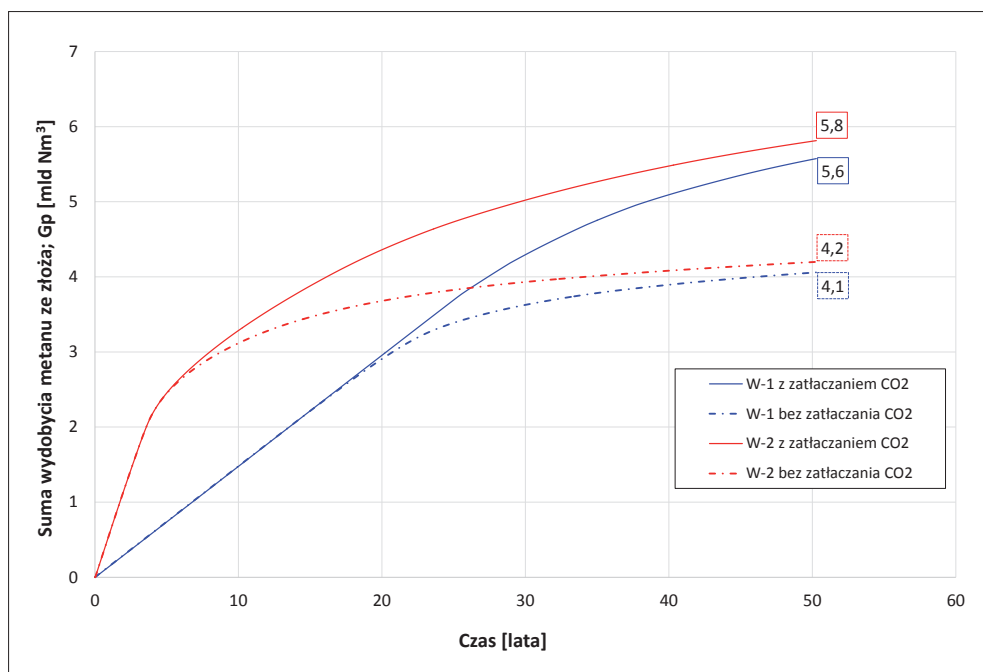
się na przestrzeni około 5 lat od zapoczątkowania zatłaczania CO₂ – dalej obserwuje się łagodny spadek średniego ciśnienia złożowego. Na końcu omawianego procesu (rok 50.) ciśnienie pozostaje wyższe od odpowiedniej wartości referencyjnej (tj. przy tradycyjnej eksploatacji) o około 2 bary.

Według przeprowadzonych symulacji numerycznych (w wariantcie nr 2) na przestrzeni 50 lat prowadzenia procesu eksploatacji złoża i jednoczesnego zatłaczania CO₂ wydobyto 5,8 mld Nm³ metanu. W przypadku niestosowania zatłaczania CO₂, a jedynie kontynuowania eksploatacji w sposób tradycyjny prognozowana ilość pozyskanego w ten sposób gazu wyniosłaby ok. 4,2 mld Nm³. Zyskujemy zatem znaczny, bo aż 38-procentowy wzrost wydobycia (rys. 6.23).

Na rysunku 6.24 porównano oba wyżej zaprezentowane warianty zatłaczania CO₂. W pierwszym wariantcie prowadzenia procesu w wybranej strukturze udało się zgromadzić ok. 12 Mt, a w wariantcie drugim nieco mniej, tj. 10 Mt ditlenku węgla. Biorąc pod uwagę jedynie potencjał składowania CO₂, wariant nr 1 byłby bardziej efektywny. Jednakże pod względem ilości „pozabilansowego metanu”, który ostatecznie uzyskano po zakończeniu długoletniego procesu zatłaczania CO₂ – rozumianego także jako metoda wspomagania wydobycia gazu ze złoża, drugi prezentowany wariant okazuje się korzystniejszy. Bilans końcowego wydobycia nie wyróżnia istotnie którejś z dwóch opcji (wariant nr 1: 5,6 mld Nm³; wariant nr 2: 5,8 mld Nm³), aczkolwiek pozytywną cechą przebiegu eksploatacji złoża w drugim wariantcie jest znacznie wyższa wydajność gazu ziemnego odbieranego ze struktury przez pierwsze kilkanaście lat trwania procesu, co praktycznie podwaja całkowite wydobycie gazu wyliczone w okresie początkowych 15 lat. Powyższy fakt przekłada się na szybszy zwrot poniesionych nakładów inwestycyjnych i może mieć decydujący wpływ na ostateczny wybór sposobu prowadzenia procesu.

Na wyjaśnienie zasługuje fakt odnotowania różnic w przebiegu krzywych wydobycia i całkowitej ilości pozyskanego gazu w pierwszym i drugim wariantcie prowadzenia procesu, w opcji bez zatłaczania CO₂ (rys. 6.24; linie przerywane). W wykonanych symulacjach oba warianty kontynuowania konwencjonalnej eksploatacji (W-1 bez zatłaczania CO₂ i W-2 bez zatłaczania CO₂) stanowiły punkt odniesienia do prowadzonych modelowań z zastosowaniem zatłaczania ditlenku węgla do struktury złożowej. Oba warianty prowadzenia tradycyjnej eksploatacji złoża różnią się między sobą ze względu na limity nałożone na odwierty, a to z kolei decyduje o sposobie/tempie eksploatacji złoża. Według założeń symulacji eksploatacja złoża w wariantcie drugim miała przebiegać ze zdwojoną wydajnością w stosunku do wariantu pierwszego, co jest pośrednim wynikiem założonych wydajności zatłaczania CO₂, tj.: 100 tys. i 50 tys. Nm³/dobę na odwiert, i trybu zastępowania objętości mediów w złożu (*voidage replacement*). W związku z powyższym inaczej postępuje eksploatacja złoża

w obu wariantach bazowych, co widać wyraźnie przy porównaniu przebiegów krzywych dziennego wydobycia gazu (rys. 6.17 i 6.21). Jak wspomniano, w omawianych przypadkach na tempo eksploatacji złoża znaczący wpływ wywierają narzucone limity, a przede wszystkim – wyłączenie z eksploatacji odwiertów wskutek nadmiernego wzrostu wykładnika wodnego wydobywanego gazu (do poziomu 0,0001 m³ wody na 1 Nm³ gazu), co z kolei spowodowane jest inwazją wody podścielającej złoża i zjawiskiem tworzenia się stożków wodnych. Wymienione problemy eksploatacyjne są w większości możliwe do uniknięcia na drodze prowadzenia poprawnej polityki zarządzania złożem, które można racjonalnie eksploatować, mając na celu jak najdłuższe zachowanie jak największej liczby odwiertów wydobywczych. W prezentowanych symulacjach z góry narzucono pewne ograniczenia, które sztywno utrzymywały zadany reżim dla procesów zatłaczania i eksploatacji. Odwierty niespełniające kryteriów były automatycznie wyłączane. Pozostaje duży obszar do zagospodarowania związany z zagadnieniami optymalizacji podczas przygotowywania/projektowania ewentualnego wdrożenia zatłaczania CO₂ w rzeczywistych warunkach złożowych.



Rys. 6.24. Porównanie obu wariantów prowadzenia procesu jednoczesnej eksploatacji gazu i zatłaczania CO₂ do złoża

Obecnie, wykorzystując nowoczesne narzędzia programistyczne do modelowania i symulacji procesów złożowych, można – poprzez zmiany wielu parametrów (począwszy od rodzaju, ilości i lokalizacji odwiertów zatłaczających) – mnożyć warianty, dokonywać kolejnych prognoz i próbować odnaleźć najbardziej korzystny sposób wspomagania wydobycia gazu przy jednoczesnej sekwestracji CO₂. W zaprezentowanych wariantach przedstawiono jedynie istotę zachodzących zjawisk, oszacowanie ilościowe i jakościowe, a zagadnienia optymalizacji (w celu najbardziej efektywnego poprowadzenia procesu) to oddzielny temat badawczy, wykraczający poza zakres niniejszej pracy.

W efekcie wykonanych symulacji w skali in situ wykazano, że proces zatłaczania CO₂ do nasyconych gazem ziemnym poziomów solankowych jest efektywną metodą pozyskiwania pozabilansowych ilości gazu ziemnego z równoczesną sekwestracją znacznych objętości ditlenku węgla.

7. Wnioski

- 1) Na podstawie przedstawionego studium dotychczas przeprowadzonych badań i rodzaju stosowanych technik pozyskiwania gazu ziemnego zawartego w głębokich poziomach solankowych można zauważyć, że w żadnej z prezentowanych technologii nie zaproponowano wykorzystania sekwestracji CO₂ jako metody pozwalającej na wypieranie rozpuszczonych w wodach węglowodorów – głównie metanu. Jedynym procesem związanym z CO₂ jest koncepcja redukcji ilości ditlenku węgla zawartego w wydobywanym gazie ziemnym poprzez jego absorpcję w wyżejleżących poziomach wodonośnych, co tylko pośrednio nawiązuje do problematyki sekwestracji. Powszechnie proponowane metody pozyskania gazów rozpuszczonych w poziomach wodonośnych bazują na wydobyciu i napowierzchniowej separacji nasyconej gazem solanki lub na fizycznej desorpcji gazu wymuszonej zmianą warunków PVT w złożu poprzez wywołanie w strefie przyodwiertowej depresji o ograniczonym zasięgu. Wskazywane dotychczas koncepcje różnią się w zasadzie jedynie konstrukcją stosowanych odwiertów, rodzajem wyposażenia w głębnego czy napowierzchniowego lub sposobem pozbycia się odgazowanej solanki.
- 2) Ditlenek węgla w warunkach ciśnienia i temperatury niecki poznańskiej znajduje się w stanie nadkrytycznym – tzw. gęsty gaz. Jego gęstość przyjmuje bardzo wysoką wartość (ok. 0,58 g/cm³ – w warunkach PT złoża Porajyn), zbliżoną do gęstości cieczy. Badania przeprowadzone w aparaturze PVT wykazały, że w rozpatrywanych warunkach złożowych CO₂ posiada cechy bardziej zbliżone do cieczy aniżeli do gazu.

- 3) Podczas zatłaczania CO₂ do złoża i mieszania się go z rodzimym gazem ziemnym powstają mieszaniny pośrednie, których główne parametry szczegółowo zbadano na przykładzie gazów pochodzących ze złóż Porażyn i Ujazd.
- 4) Podczas zatłaczania ditlenku węgla do wód akifera nasyconych rodzimym gazem ziemnym rozpoczyna się proces stopniowego rozpuszczania i nasycania solanki przez CO₂. Objętość wody, dodatkowo nasyconej ditlenkiem węgla, odpowiednio wzrasta – zjawisko to nazywane jest spęcznieniem, a charakteryzujący je parametr to współczynnik spęcznienia (S_v). Badania wykonane w komorze ciśnieniowej aparatury PVT wykazały, że zwiększenie objętości wód akifera, wynikające z zatłaczania doń CO₂, jest stosunkowo małe – wręcz znikome. Określony współczynnik spęcznienia w warunkach złożowych niecki poznańskiej jest bliski jedności.
- 5) Badana koncepcja pozyskiwania dodatkowych ilości gazu ziemnego, pierwotnie zawartych w poziomach solankowych, opiera się na znacznych różnicach w rozpuszczalności CO₂ i gazu ziemnego w solance. W rozdziale 4 przedstawiono szereg wykonanych badań laboratoryjnych służących wyznaczeniu krzywych (izoterm) rozpuszczalności badanych gazów ziemnych i ditlenku węgla w wodzie – zarówno w solankach złożowych, jak i w wodzie destylowanej. Przeprowadzone badania potwierdziły wartości rozpuszczalności zmierzone w latach 70. z użyciem próbek nagazowanej solanki pochodzących z głębszych próbników złoża, tj. $R_s = 2,4 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$. W tych samych warunkach złożowych rozpuszczalność CO₂ określono na poziomie ok. 10-krotnie wyższym od rozpuszczalności gazu ziemnego. Eksperymenty prowadzone w warunkach złoża Porażyn ($P_{zi} = 266 \text{ bara}$; $T_{zi} = 100^\circ\text{C}$) wykazały, że w rodzimej solance złożowej podścielającej złożo rozpuszczone jest minimum $1,8 \text{ Nm}^3$ gazu w 1 m^3 solanki – wielkość tę można bezpośrednio wykorzystać do obliczenia pozabilansowych zasobów gazu rozpuszczonego w wodach akifera. Należy mieć również na uwadze, że poziom nasycenia gazem rośnie z głębokością zalegania warstw wodonośnych, co związane jest ze wzrostem ciśnienia w systemie. W tych samych warunkach rozpuszczalność ditlenku węgla w solance Porażyn określono na poziomie $16 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$ – wartość ta również rośnie ze wzrostem ciśnienia.

- 6) Badania z użyciem wody destylowanej wykazały znaczną zależność rozpuszczalności gazów od stopnia mineralizacji solanki. Dowiedziono, że w przebadanym zakresie ciśnień w wodzie destylowanej może rozpuścić się dwukrotnie więcej gazu ziemnego niż w badanej solance złożowej. Przy jeszcze wyższym stopniu mineralizacji solanki różnice te mogą ulec dalszemu zwiększeniu. Podobnym zależnościom podlega również rozpuszczalność CO₂ w wodzie.
- 7) W tzw. badaniach różnicowych określono współczynniki objętościowe (B_w) nasyconej gazem solanki, co pozwoliło na wykreślenie przebiegu zmian badanego parametru w zakresie ciśnienia 1÷400 bara dla temperatur: 30°C i 100°C. Wymienione badania, charakterem zbliżone nieco do eksperymentów wykonanych przy oznaczeniu współczynników spęczniecia, potwierdziły fakt niskiego zwiększenia się objętości solanki podczas nasycania jej gazem.
- 8) Podczas eksperymentu symulującego proces wypierania (prowadzonego na fizycznym modelu pozbawionym ośrodka porowatego) poprzez zatłaczanie CO₂ z solanki udało się wydzielić i pozyskać ok. 90% rodzimego gazu ziemnego – pierwotnie całkowicie rozpuszczonego w wodzie. Tym samym tylko 10% metanu pozostało w solance po zakończeniu procesu. Dzięki wprowadzeniu CO₂ do modelu symulującego odpowiedni system złożowy (czapa gazowa i nasycona gazem woda podścielająca) możliwe było znaczne wzbogacenie zasobów modelowego złoża. Dodatkowe ilości gazu węglowodorowego, wyparte z poziomów wodonośnych, stają się wydobywalne, stanowiąc pozabilansowe zasoby dodatkowe.
- 9) Dla lepszego odtworzenia zjawisk zachodzących podczas wprowadzania CO₂ do systemu złożowego składającego się z solanki pozostającej w równowadze z nasycającym ją rodzimym gazem ziemnym skonstruowano specjalne stanowisko badawcze. Jego głównym elementem jest wypełniona kwarcytowym piaskiem komora ciśnieniowa, stanowiąca ośrodek porowaty fizycznego modelu złoża. Odpowiednio zaprojektowane i przeprowadzone (w warunkach PT złożowych) eksperymenty dowiodły, że dzięki zatłaczaniu CO₂ możliwe jest wydzielenie z warstw wodonośnych pierwotnie rozpuszczonego w nich gazu metanowego.

- 10) W zaprezentowanych w monografii eksperymentach po 9÷13 dobach trwania procesu wypierania zdesorbowano z solanki 16÷27% mol metanu, który, przekraczając nasycenie krytyczne, stał się mobilny, a następnie przemieścił się grawitacyjnie i zakumulował w najwyższej strefie modelu złoża w postaci wolnej fazy gazowej – tzw. czapy. Czas migracji zdesorbowanego z solanki gazu do czapy, jej wielkość i skład fazy gazowej zależą od wielu czynników, w tym: sposobu zatłaczania i ilości zatłaczanego CO₂, parametrów PT złożowych, cech skały zbiornikowej.
- 11) Wyniki wybranego eksperymentu wypierania gazu ziemnego poprzez zatłaczanie CO₂ na fizycznym modelu złoża z ośrodkiem porowatym posłużyły do wykonania symulacji badanych zjawisk z zastosowaniem specjalistycznego oprogramowania. Wykorzystano moduł GASWAT z pakietu Eclipse firmy GeoQuest Schlumberger. Powyższe miało m.in. na celu sprawdzenie, czy użycie wskazanego oprogramowania i zbudowanie numerycznego modelu złoża umożliwia oddanie charakteru zjawisk zarejestrowanych podczas eksperymentów laboratoryjnych na modelu fizycznym. Symulacje komputerowe dały pozytywne rezultaty, dlatego kolejnym etapem było użycie narzędzi programistycznych na wybranym rzeczywistym fragmencie geologicznej struktury niecki poznańskiej.
- 12) W symulacjach komputerowych skupiono się na zachodnim obszarze niecki poznańskiej, obejmującym jedno z większych gazowych złóż regionu, tj. Paproć–Cicha Góra. W badanych wariantach prowadzenia procesu założono zastosowanie 12 nowych pionowych odwiertów zatłaczających, realizujących ciągle wprowadzanie CO₂ (w stanie nadkrytycznym) do warstw wodonośnych struktury, przy jednoczesnej eksploatacji złoża gazu. Badania symulacyjne wykazały, że w okresie 50 lat w pierwszym wariantcie prowadzenia procesu w wybranej strukturze udało się zgromadzić ok. 12 Mt, a w wariantcie drugim 10 Mt ditlenku węgla. Zaobserwowano zjawisko wypierania rodzimego gazu ziemnego przez CO₂, najpierw ze stref przyodwiertowych odwiertów zatłaczających, a następnie z coraz bardziej rozległych obszarów zawodnionych, będących w zasięgu rozprzestrzeniającego się strumienia ditlenku węgla, który rozpuszczając się w wodzie, desorbował z niej metan.

- 13) Celem modelowania numerycznego było m.in. oszacowanie dodatkowych ilości gazu ziemnego możliwych do pozyskania dzięki zastosowaniu opisywanej koncepcji zatłaczania CO₂. W pierwszym wariantcie prowadzenia procesu osiągnięto blisko 37-procentowy wzrost wydobywania gazu (tj. o ok. 1,5 mld Nm³). W wariantcie nr 2 na przestrzeni 50 lat prowadzenia procesu eksploatacji złoża i jednoczesnego zatłaczania ditlenku węgla uzyskano 38-procentowe zwiększenie wydobywania – tj. o ok. 1,6 mld Nm³ gazu więcej (w przeliczeniu na metan). Prezentowane obliczenia wielkości/przyrostu wydobywania dokonano w odniesieniu do wariantu referencyjnego, czyli kontynuowania normalnej eksploatacji złoża – bez zatłaczania CO₂.
- 14) Obserwując rezultaty symulacji numerycznych na trójwymiarowym modelu złoża, można zauważyć pewne dodatkowe efekty zatłaczania CO₂, pozytywnie wpływające na mechanizmy złożowe:
- wprowadzenie ditlenku węgla do struktury przyczynia się do podtrzymania bądź spowolnienia spadku ciśnienia złożowego;
 - rozpuszczanie się CO₂ w wodzie powoduje desorpcję gazu metanowego, inicjując jego grawitacyjną migrację;
 - przemieszczające się w górę struktury, w kierunku odwiertów wydobywczych, bańki gazu ziemnego zwiększają swoją objętość (ze spadkiem ciśnienia) i zapobiegają wkraczaniu wody w okolice odwiertów wydobywczych;
 - CO₂, wypierając metan ze środowiska wodnego, zwiększa jego ilość w czapie gazowej, co zapobiega inwazji wody w strefach odwiertów eksploatacyjnych;
 - ditlenek węgla, który w pewnych warunkach geologiczno-złożowych nie zdołał całkowicie rozpuścić się w wodzie, wraz z desorbowanym z solanki rodzimym gazem ziemnym tworzy mieszaninę, w postaci wolnej fazy gazowej, która z racji swojej znacznej przepuszczalności w ośrodku zbiornikowym mocno ogranicza przepływy solanki – charakteryzującej się zdecydowanie niższą przepuszczalnością fazową.
 - Wymienione czynniki sprzyjają utrzymaniu wód złożowych w niższych rejonach struktury złożowo-sekwestracyjnej, a tym samym zapobiegają zalewaniu wodą odwiertów wydobywczych.

- 15) Przeprowadzone badania laboratoryjne, eksperymenty na fizycznych modelach złożeń oraz symulacje komputerowe na trójwymiarowym modelu kompozycyjnym wybranej struktury wodonośnej pozwalają sądzić, iż głębokie solankowe poziomy wodonośne niecki poznańskiej mogą wykazać się dużą przydatnością dla programu wielkoprzemysłowej sekwestracji CO₂. Korzystną cechą tej megastuktury, w porównaniu z innymi podobnymi obiektami zawodnionymi, jest szczelność zweryfikowana w czasie geologicznym. To jej istnienie zapewniło powstanie szeregu mniejszych złóż gazu ziemnego (obecnie w dużej mierze wyeksploatowanych) w przystropowej części megazbiornika uszczelnionego od góry kompleksem ewaporatów cechsztyńskich. Duża miąższość kilkusetmetrych poziomów zawodnionych w rejonie niecki poznańskiej stwarza wyjątkowo korzystne i unikalne warunki geologiczne do przyszłej sekwestracji CO₂ emitowanego np. przez pobliski Zespół Elektrociepłowni Poznań, a w dalszej perspektywie – przez obiekty takie jak elektrociepłownia Bełchatów. Ważną cechą megazbiornika jest znaczne nasycenie wód wglębnych rodzimym gazem węglowodorowym, co potwierdzono w zaprezentowanych badaniach laboratoryjnych. Daje to możliwość zwiększenia zasobów istniejących złóż o pozabilansowe ilości gazu, niemożliwe do pozyskania tradycyjnymi metodami eksploatacji.
- 16) Na tle dotychczas stosowanych w świecie technologii pozyskiwania gazów ziemnych rozpuszczonych we wglębnych poziomach solankowych opracowano zupełnie nową technologię wydobycia pozabilansowych zasobów gazu ziemnego, wykazując równocześnie jej efektywność.

Literatura

- [1] Anciferov A. S.: *Formirovanie neftegazowych zalezey i metodika ich poiskov w juznykh rajonach Sybirskoj platformy*. Geologija Nefti i Gaza 1976, nr 12, Moskwa.
- [2] Buckley et al.: *Distribution of Dissolved Hydrocarbons in Subsurface Waters*. Habitat of Oil, L. C. Weeks Ed., American Association of Petroleum Geologists Special Publication 1958, s. 850–882.
- [3] Buniak A.: *Mapa paleograficzna górnego czerwonego spągowca. Monoklina przedsudecka i blok Gorzowa, skala 1:200000*. PGNiG, Zielona Góra 2010.
- [4] Cook H. L. Jr., Geer E. C., Katz D. L.: *Method for increasing the recovery of natural gas from a geo-pressured aquifer*. United States Patent No. 4,116,276, 1978.
- [5] Cornelius A. J., Needham R. B.: *CO₂ removal from hydrocarbon gas in water bearing underground reservoir*. United States Patent No. 4187910, 1980.
- [6] Dodson C. R., Standing M. B.: *Pressure-Volume-Temperature And Solubility Relations For Natural-Gas-Water Mixtures*. Drilling and Production Practice 1944, API-44-1731, New York.
- [7] Dudek J., Piesik W., Kustroń K., Dorynek L.: *Rozpoznanie warunków akumulacji w nowo zagospodarowanych złożach gazowych czerwonego spągowca w basenie permskim*. Zlec. wew. 114/NP, praca niepublikowana. Archiwum INiG – PIB, Kraków 1990.
- [8] *Eclipse 300 – Simulation Software Manual Release 2008.2*, Symulator firmy GeoQuest I, Schlumberger 2008.
- [9] Elliot G. R. B., Vanderborgh N. E., McDaniel M. W.: *Recovery of natural gas from deep brines*. United States Patent No. 4377208, 1981.
- [10] Glennie K. W.: *Permian Rotliegende of north-west Europe interpreted in light of modern desert sedimentation studies*. Amer. Assoc. Petrol. Geo1. Bull. 1972, vol. 56, no. 6, s. 1048–1071.

-
- [11] Gotgilf A. V.: *Sostav rastvorenykh gazov i ich koncentracji v plastowych vodach*. Geologija Nefti i Gaza 1978, nr 10, Moskwa.
- [12] Grocholski W.: *Waryscydy południowej Wielkopolski*. Przegląd Geologiczny 1975, vol. 23, nr 4, s. 171–174.
- [13] Gumułczyński J. et al.: *Opracowanie praktycznych możliwości uzyskania gazu ziemnego z wód złożowych*. Dokumentacja IGNiG, Archiwum INiG, Kraków 1985.
- [14] Gurari F. et al.: *Nowy gazowo-geochemiczny wskaźnik warunków tworzenia się złóż gazu*. Nafta 1977, nr 5, s. 145–147.
- [15] Isokrari O. F.: *Natural Gas Production from Geothermal Geopressed Aquifers*. SPE 1976 preprint 6073, 9 p., Society of Petroleum Engineers of AIME, Dallas, Texas.
- [16] Jaracz C.: *Niekonwencjonalne źródła węglowodorów*. Dokumentacja IGNiG, Archiwum INiG, Kraków 2001.
- [17] Jones P. H.: *Geothermal and Hydrocarbon Regimes, Northern Gulf of Mexico Basin*. Proceedings of the First Symposium on the Geopressed Geothermal Resources of the Gulf Basin, Austin, Texas: The University of Texas at Austin 1975, s. 15–89.
- [18] Jones P. H.: *Method and apparatus for natural gas and thermal energy production from aquifers*. United States Patent No. 4359092, 1982.
- [19] Jones P. H.: *Natural gas production from geopressed aquifers*. United States Patent No. 4279307, 1981.
- [20] Jones P. H.: *Natural Gas Resources of the Geopressed Zones in the Northern Gulf of Mexico Basin*. [W:] *Natural Gas from Unconventional Geologic Sources*. Board on Mineral Resources, Commission on Natural Resources, National Academy of Sciences, Washington, D.C. 1976, s. 17–33.
- [21] Karnkowski P.: *Formowanie się złóż gazu ziemnego na obszarze przedsudeckim*. Nafta 1979, nr 8–9, s. 254–258.
- [22] Karnkowski P.: *Oil and gas deposits in Poland*. Edited by W. Górecki, Geosynopsis Society „GEOS”, University of Mining and Metallurgy 1999, ISBN 83-86695-01-3, Cracow.
- [23] Karnkowski P., Krzysztofowicz Z., Solak M.: *Podcechsztyńska budowa geologiczna basenu permjskiego*. Kwartalnik Geologiczny 1978, t. 22, nr 4, s. 735–751.
- [24] Karnkowski P., Sokołowski J., Stemulak J.: *Odkrycie pierwszego w Polsce złoża gazu w utworach czerwonego spągowca*. Geofizyka i Geologia Naftowa 1966, nr 1–2, s. 1–6.
- [25] Karnkowski P. H.: *Analiza facjalna utworów czerwonego spągowca w północnej części monokliny przedsudeckiej (rejon Poznań – Śrem)*. Acta Geologica Polonica 1977, vol. 27, no. 4, s. 481–495.

- [26] Karnkowski P. H.: *Złoża gazu w osadach czerwonego spągowca w basenie polskim: skład gazu ziemnego i jego geneza*. Przegląd Geologiczny 1999, vol. 47, nr 5, s. 481.
- [27] Katzung G.: *Tektonik. Klima und sedimentation in der Mitteleuropaischen Saxon-Senke und in angrenzeuden Gebieten*. Geologie 1975, nr 11, s. 1453–1472.
- [28] Kotarba M. J. et al.: *Potencjał węglowodorowy skał macierzystych i geneza gazu ziemnego akumulowanego w utworach czerwonego spągowca i karbonu w północnej części Pomorza Zachodniego*. Przegląd Geologiczny 1999, vol. 47, nr 5, s. 480.
- [29] Kotarba M., Piela J., Żołnierczuk T.: *Geneza gazu ziemnego akumulowanego w permsko-karbońskich pułapkach litologicznych złoża Paproć w świetle badań izotopowych*. Przegląd Geologiczny 1992, vol. 40, nr 4.
- [30] Krukowska M.: *Najwięksi truciele w Polsce*. Strona internetowa magazynu Forbes, 5.08.2014, <http://csr.forbes.pl/najbardziej-emisyjne-elektrownie-w-polsce,artykuly,181064,1,2.html> (dostęp: 5.08.2014).
- [31] Lokhorst H., Kotarba M., Miłaczewski M., Gerling P. et al.: *Gas atlas of the north-western Europe*. CD-ROM version 1998.
- [32] Lubaś J.: *Pionierskie doświadczenia Polski w zakresie sekwestracji dwutlenku węgla*. Przegląd Geologiczny 2007, vol. 55, nr 8.
- [33] Lubaś J.: *Rtęć w permsko-karbońskich gazach ziemnych Niżu Polskiego*. Monografia, Prace Instytutu Górnictwa Naftowego i Gazownictwa 1986, nr 56, Kraków.
- [34] Lubaś J. et al.: *Doskonalenie technologii powrotnego zatłaczania gazów kwaśnych do zawodnionych stref złóż gazu ziemnego i poziomów roponośnych*. Zlec. wewn. INiG 441/KE, Krosno 1999.
- [35] Lubaś J., Kiersnowski H.: *Możliwości geologicznej sekwestracji CO₂ w utworach czerwonego spągowca basenu Poznania*. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego 2012, nr 448 (1), s. 17–26.
- [36] Lubaś J., Krępilec P.: *Technologia powrotnego zatłaczania gazów kwaśnych nowoczesnym sposobem zagospodarowania złóż zasiarczonych*. Nafta-Gaz 1999, nr 6, s. 329–333.
- [37] Lubaś J., Warnecki M.: *Badanie rozpuszczalności CO₂ w solankach rejonu Bełchatowa*. Przegląd Geologiczny 2010, vol. 58, nr 5, s. 408–415.
- [38] Lubaś J., Warnecki M., Krępilec P., Wolnowski T.: *Greenhouse gas sequestration in aquifers saturated by natural gases*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi 2008, t. 24, z. 3/1, s. 299–308.
- [39] McCain W. D. Jr.: *The Properties of Petroleum Fluids – 2nd ed.* PennWell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma 1990.

- [40] MacElvain R. C.: *Mechanics of Gaseous Ascension Through a Sedimentary Column*. Proceedings of Symposium on Unconventional Methods in Exploration for Petroleum and Natural Gas, Institute for the Study of Earth and Man, Southern Methodist University, Dallas, Texas 1969, s. 15–27.
- [41] Marsden S. S.: *The Status of Dissolved Gas in Japan*. Petroleum Engineer 1980, s. 23–34.
- [42] Marsden S. S., Kawai K.: *Suiyosei-Ten'nengasu. A Special Type of Japanese Natural Gas Deposit*. American Association of Petroleum Geologists Bull. 1965, vol. 49, no. 3, s. 286–295.
- [43] Materiały udostępnione INiG – PIB przez Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy w 2011 r.
- [44] Materiały udostępnione INiG – PIB przez Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo Oddział w Zielonej Górze w 2011 r.
- [45] Matyasik I., Janiga M.: *Geochemia naftowa. Kluczowe zadania geochemii w szacowaniu ryzyka poszukiwawczego*. [W:] J. Raczkowski (red.), *Rzeczpospolita łupkowa. Studium wiedzy o gazie z formacji łupkowych*. Praca Naukowa INiG 2012, nr 183, s. 89–112, PL ISSN 0209-0724, Kraków.
- [46] Merta H.: *Skały macierzyste w podłożu czerwonego spągowca w basenie polskim*. Przegląd Geologiczny 1999, vol. 47, nr 5, s. 479.
- [47] Merta H., Kopczyńska G.: *Skład gazu ziemnego w osadach czerwonego spągowca*. Przegląd Geologiczny 1999, vol. 47, nr 5, s. 481.
- [48] Miłek K., Szott W., Warnecki M.: *Symulacyjne badanie procesów wypierania metanu rozpuszczonego w wodach złożowych poprzez zatłaczanie gazów kwaśnych w ramach ich sekwestracji*. Zlec. wew. nr 65/KZ. Archiwum INiG – PIB, Kraków 2012.
- [49] Parysek J. J.: *Aglomeracje miejskie w Polsce oraz problemy ich funkcjonowania i rozwoju. Wybrane problemy rozwoju i rewitalizacji miast: aspekty poznawcze i praktyczne*. Poznań. Wydawnictwo Naukowe Bogucki 2008, IGSEiGP UAM, s. 38.
- [50] Pedersen K. S. et al.: *Instrukcja obsługi oprogramowania PVTsim firmy Calsep. PVTsim16 Method Documentation & Help On*. Copenhagen, Denmark 2007.
- [51] Pedersen K. S., Christensen P. L.: *Phase behavior of petroleum reservoir fluids*. Taylor & Francis Group 2007.
- [52] Piesik W.: *Hydrodynamiczne modelowanie basenów sedymentacyjnych – ocena warunków migracji i akumulacji węglowodorów w basenie czerwonego spągowca monokliny przedsudeckiej*. Materiały niepublikowane. Zlec. wew. 23/KP. Archiwum INiG – PIB, Kraków 2004.

- [53] Piesik W.: *Studium geologiczne nad wykształceniem litologicznym czerwonego spągowca na NE skłonie wyniesienia wolsztyńskiego w celu dalszego rozpoznania warunków akumulacji hydrodynamicznych i energetycznych*. Materiały niepublikowane. Praca INiG nr 23/KP. Archiwum INiG – PIB, Kraków 2003.
- [54] Pokorski J.: *The Rotliegenden of the Polish Lowlands*. Przegląd Geologiczny 1976, vol. 24, nr 6, s. 318–324.
- [55] Poprawa P.: *Co kryje się pod terminem niekonwencjonalne złoża gazu?* Strona internetowa PIG – PIB, 2.02.2012, <http://www.pgi.gov.pl/instytut-geologiczny-surowce-mineralne/4059-gaz-upkowy-1-co-kryje-si-pod-terminem-niekonwencjonalne-zo-a-gazu> (dostęp: 2.02.2012).
- [56] Randolph P. L.: *Natural Gas from Geopressed Aquifers*. SPE 1977 preprint 6826, 8 p., Society of Petroleum Engineers of AIME, Dallas, Texas.
- [57] Reeves S. R.: *Italian Oil and Gas Resources*. American Association of Petroleum Geologists Bull. 1953, vol. 37, no. 4, s. 625–628.
- [58] Richardson J. G., Christian L. D.: *Method for recovering gas from solution in aquifer waters*. United States Patent No. 4149596, 1979.
- [59] Saukow A., Ajdinian N., Ozierowa N.: *Oczerki geochimii rtuti*. Izd. Nauka, Moskwa 1972.
- [60] Siemek J.: *Zmiany temperatury przy przepływie gazu w ośrodku porowatym oraz ich wpływ na proces eksploatacji złóż gazowo-kondensatowych*. Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej. Górnictwo 1972, z. 50. Prace Instytutu Wiertniczo-Naftowego.
- [61] Siemek J., Kolenda Z., Nagy S.: *The Non-Isothermal and Non-Stationary Flow of Dry and Condensate Gas in the Vicinity of Well*. International Journal of Thermodynamics 2003, vol. 6.
- [62] Sikorski B.: *Kaledońskie formy fałdowe na Pomorzu*. Geofizyka i Geologia Naftowa 1974, nr 5–6, s. 129–134.
- [63] Skałba W. et al.: *Technologia odzyskiwania gazu ziemnego ze złóż zawadnionych*. Dokumentacja IGNiG, Archiwum INiG, Kraków 1987.
- [64] Sokołowski J.: *Role of Permo-Mesozoic and Cainozoic vertical movements in the development of the present day geological structure of Poland*. Mater. Pr. Inst. Geof. 1975, vol. 82, s. 15–36.
- [65] Sultanov et al.: *Solubility of Methane in Water at High Temperatures and Pressures*. Gazovaja promshlennost 1972, vol. 17, no. 5, s. 6–7.
- [66] Szott W.: *Symulacja laboratoryjnych testów wypierania mieszanego dla polskich złóż ropno-gazowych przy pomocy symulatora Eclipse Compositional*. Archiwum INiG – PIB, Kraków 2006.

- [67] Szott W. et al.: *Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z programem ich monitorowania. Zadanie 1.1.15. Opracowanie szczegółowych statycznych modeli ośrodka geologicznego składowisk – Struktura niecki poznańskiej w formacjach czerwonego spągowca*. Zlec. wew. 372/KZ. Archiwum INiG – PIB, Kraków 2010.
- [68] Szott W. et al.: *Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z programem ich monitorowania. Zadanie 1.1.16. Modelowanie dynamiczne procesów zatłaczania CO₂ do składowiska – Struktura niecki poznańskiej*. Zlec. wew. 375/KZ. Archiwum INiG – PIB, Kraków 2011.
- [69] Szott W. et al.: *Symulacyjne modelowanie procesów sekwestracji gazów kwaśnych w zawodnionych poziomach złoża Borzęcin. Konstrukcja modelu symulacyjnego do badań procesów migracji gazów w strukturach geologicznych Borzęcin*. Archiwum INiG – PIB, Kraków 2009.
- [70] Szuflika S.: *Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego składowania CO₂ wraz z programem ich monitorowania. Zad. 1.1.14 Zebranie szczegółowych informacji geologicznych, geofizycznych, hydrogeologicznych, złożowych, geomechanicznych*. Zlec. wew. 374/KB. Archiwum INiG – PIB, Kraków 2011.
- [71] Wagner R., Pokorski J.: *W poszukiwaniu ropy i gazu*. Strona internetowa PIG – PIB, <http://www.pgi.gov.pl/sosnowiec/oddzial-gornoslaski/sep1-sos/artykuly/126-kopalnia-wiedzy-nowe/surowce-mineralne/448-w-poszukiwaniu-ropy-i-gazu.html>, (dostęp: 18.01.2012).
- [72] Warnecki M.: *Analiza możliwości pozyskania pozabilansowych zasobów gazu ziemnego z nasyconych poziomów solankowych w procesach sekwestracji CO₂*. Nafta-Gaz 2013, nr 1, s. 34–41.
- [73] Warnecki M.: *Atrakcyjna technologia*. Przegląd Gazowniczy 2004, nr 4, s. 13–15.
- [74] Warnecki M.: *Badania laboratoryjne procesów wypierania rodzimego gazu ziemnego rozpuszczonego w solankowych poziomach wodonośnych niecki poznańskiej z wykorzystaniem zatłaczanego CO₂*. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego 2012, nr 448 (1), s. 95–106.
- [75] Warnecki M.: *Badania procesów wypierania metanu przy udziale sekwestracji CO₂*. Nafta-Gaz 2015, nr 3, s. 159–166.
- [76] Warnecki M.: *Modelowanie i badanie zjawiska wypierania gazu ziemnego rozpuszczonego w wodach złożowych gazami kwaśnymi w procesach powrotnego zatłaczania*. Nafta-Gaz 2005, nr 5, s. 210–218.
- [77] Warnecki M.: *Modelowanie procesów wypierania metanu zawartego w głębokich poziomach solankowych przy udziale sekwestracji CO₂*. Nafta-Gaz 2016, nr 6, s. 393–402.

- [78] Warnecki M.: *Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z programem ich monitorowania. Zad. 1.3.2. Oznaczenia parametrów petrofizycznych próbek skał zbiornikowych i uszczelniających oraz parametrów PVT. Badanie zjawiska wypierania rodzimego gazu ziemnego rozpuszczonego w warstwach wodonośnych poprzez zatłaczany CO₂ na fizycznym modelu złoża.* Nr zlec. wew. 362/KB. Archiwum INiG – PIB, Kraków 2011.
- [79] Warnecki M.: *Rozpuszczalność CO₂ i rodzimych gazów ziemnych w solance złożowej.* Nafta-Gaz 2010, nr 1, s. 19–26.
- [80] Warnecki M.: *Wspomaganie wydobycia węglowodorów w szcerpanych złożach gazu ziemnego poprzez zatłaczanie CO₂ do solankowego poziomu wodonośnego niecki poznańskiej.* Zlec. wew. 319/KB, praca niepublikowana. Archiwum INiG – PIB, Kraków 2009.
- [81] Warnecki M.: *Zwiększenie stopnia szcerpania kondensatu i ropy naftowej poprzez zatłaczanie gazu zaazotowanego z wykorzystaniem modelu złoża „cienka rurka”.* Zlec. wew. INiG nr 542/KBZ, praca niepublikowana. Archiwum INiG – PIB, Kraków 2006.
- [82] Wolnowski T.: *Perspektywy poszukiwań złóż ropy naftowej i gazu ziemnego na niżu polskim.* Wiadomości Naftowe i Gazownicze. Strona internetowa wnp.pl, 28.08.2007, <http://www.wnp.pl/foto/6375.html>, (dostęp: 28.08.2007).
- [83] Ziegler P. A.: *Geological Atlas of Western and Central Europe.* Shell Int. Petr. Maa. B.V. 1990.

Spis rysunków i tabel

rysunki

Rys. 1.1. Formy występowania gazu ziemnego związane z obecnością konwencjonalnego złoża gazu.....	21
Rys. 1.2. Rozpuszczalność metanu w wodzie słodkiej [65].....	24
Rys. 1.3. Sposób wydobycia gazu ziemnego rozpuszczonego w wodach złożowych – patent US4116276 [4].....	27
Rys. 1.4. Sposób wydobycia gazu ziemnego rozpuszczonego w wodach złożowych – patent US4116276 [4].....	28
Rys. 1.5. Sposób oczyszczania gazu ziemnego z CO ₂ z użyciem poziomów wodonośnych – patent US4187910 [5].....	30
Rys. 1.6. Sposób wydobycia gazu ziemnego rozpuszczonego w wodach złożowych – patent US4149596 [58].....	32
Rys. 1.7. Rozmieszczenie pierwszych odwiertów na złożu – patent US4359092 [18].....	35
Rys. 1.8. Wyidealizowany kształt stożków depresji ciśnienia w strukturze wodonośnej po 3., 10. i 30. dniach od rozpoczęcia wydobycia – patent US4359092 [18].....	35
Rys. 1.9. Konstrukcja odwiertu przeznaczonego do jednoczesnego pozyskiwania gazu ziemnego i wód termalnych – patent US4359092 [18].....	37
Rys. 1.10. Konstrukcja typowego odwiertu zaprojektowanego do wydobycia gazu ziemnego według prezentowanej koncepcji – patent US4279307 [19].....	39
Rys. 1.11. Stożek spadku ciśnienia i początkowe warunki wydobycia wody – patent US4279307 [19].....	40
Rys. 1.12. Uformowanie się wtórnej czapy gazowej wynikające z kontrolowanego wypływu płynów z odwiertu – patent US4279307 [19].....	41

Rys. 1.13. Rysunek schematyczny urządzeń do odgazowania i cyrkulacji solanki. Z prawej strony etap rozruchu procesu, z lewej etap pozyskiwania gazu ziemnego – patent US4377208 [9].....	42
Rys. 2.1. Paleogeografia czerwonego spągowca północnej Europy [83, 31].....	50
Rys. 2.2. Lokalizacja megastruktury wodonośnej niecki poznańskiej (linia zielona) na tle mapy paleogeograficznej schyłku górnego czerwonego spągowca (zmodyfikowane za Wolnowskim [82]).....	52
Rys. 2.3. Przekrój geologiczny SW-NE zachodniej Polski – strzałką zaznaczono strukturę osadów czerwonego spągowca niecki poznańskiej [43].....	54
Rys. 2.4. Granice obszaru niecki poznańskiej wydzielone dla potrzeb projektu składowania CO ₂ [35, 3].....	65
Rys. 2.5. Koncepcja pozyskiwania pozabilansowych źródeł gazu ziemnego przy udziale sekwestracji CO ₂ – niecka poznańska [74].....	66
Rys. 2.6. Model strukturalno-geologiczny fragmentu niecki poznańskiej wydzielonego dla potrzeb projektu geologicznego składowania CO ₂ [35, 68].....	67
Rys. 2.7. Model południowo-zachodniej części niecki poznańskiej z naniesionymi lokalizacjami przekrojów pionowych [35, 68].....	68
Rys. 2.8. Przekrój „A” (W-E) obrazujący zmiany przepuszczalności skały złożowej w wydzielonych warstwach modelu [35, 68].....	69
Rys. 2.9. Przekrój „B” (N-S) obrazujący zmiany przepuszczalności skały złożowej w wydzielonych warstwach modelu [35, 68].....	69
Rys. 2.10. Przekrój „C” (N-S) obrazujący zmiany przepuszczalności skały złożowej w wydzielonych warstwach modelu [35, 68].....	70
Rys. 3.1. Trójkienna komora ciśnieniowa w zestawie do badań PVT [81].....	72
Rys. 3.2. Aparatura do badań PVT firmy Chandler Engineering – Model 2370-3000-G PVT System [81].....	73
Rys. 3.3. Panel sterowania z graficznym wglądem w proces osiągnięcia zadanej temperatury [81].....	74
Rys. 3.4. Konstrukcja dolnej części komory kondensatowej [81].....	74
Rys. 3.5. Komora ropna (z lewej) i kondensatowa (z prawej) w powietrznej łaźni termostatycznej aparatury PVT [81].....	75
Rys. 3.6. Współczynnik objętościowy gazu B_g – badania kontaktowe [80].....	79
Rys. 3.7. Współczynnik ściśliwości gazu Z – badania kontaktowe [80].....	79
Rys. 3.8. Współczynnik objętościowy gazu B_g – badania kontaktowe [80].....	83
Rys. 3.9. Współczynnik ściśliwości gazu Z – badania kontaktowe [81].....	83
Rys. 3.10. Współczynnik objętościowy gazu B_g – badania kontaktowe CO ₂ [80].....	86
Rys. 3.11. Współczynnik ściśliwości gazu Z – badania kontaktowe CO ₂ [80].....	86

Rys. 3.12. Diagramy fazowe mieszanin gazu Ujazd-15 i CO ₂ – wg PVTsim [80].....	89
Rys. 3.13. Współczynnik ściśliwości Z mieszanin gazu Ujazd-15 i CO ₂ w funkcji ciśnienia – wg PVTsim (T _{zi} = 100°C) [80].....	89
Rys. 3.14. Gęstość mieszanin gazu Ujazd-15 i CO ₂ w funkcji ciśnienia – wg PVTsim (T _{zi} = 100°C) [80].....	90
Rys. 3.15. Lepkość dynamiczna mieszanin gazu Ujazd-15 i CO ₂ w funkcji ciśnienia – wg PVTsim (T _{zi} = 100°C).....	90
Rys. 3.16. Diagramy fazowe mieszanin gazu Porażyn-2A i CO ₂ – PVTsim [80].....	93
Rys. 3.17. Współczynnik ściśliwości Z mieszanin gazu Porażyn-2A i CO ₂ w funkcji ciśnienia – wg PVTsim (T _{zi} = 100°C) [80].....	93
Rys. 3.18. Gęstość poszczególnych mieszanin gazu Porażyn-2A i CO ₂ – PVTsim (T _{zi} = 100°C) [80].....	94
Rys. 3.19. Lepkość dynamiczna mieszanin gazu Porażyn-2A i CO ₂ w funkcji ciśnienia – wg PVTsim (T _{zi} = 100°C).....	94
Rys. 4.1. Badanie kontaktowe solanki złożowej Porażyn-2A po zatłoczeniu do niej 0,05 mol CO ₂	105
Rys. 4.2. Badanie kontaktowe solanki złożowej Porażyn-2A po zatłoczeniu do niej 0,10 mol CO ₂	105
Rys. 4.3. Badanie kontaktowe solanki złożowej Porażyn-2A po zatłoczeniu do niej 0,15 mol CO ₂	106
Rys. 4.4. Badanie kontaktowe solanki złożowej Porażyn-2A po zatłoczeniu do niej 0,20 mol CO ₂	106
Rys. 4.5. Zmiany wykładnika gazowego solanki złożowej Porażyn-2A podczas zatłaczania do niej CO ₂	108
Rys. 4.6. Zmiany ciśnienia punktu nasycenia solanki złożowej Porażyn-2A podczas zatłaczania do niej CO ₂	108
Rys. 4.7. Zmiany objętości w poszczególnych punktach nasycenia solanki złożowej Porażyn-2A podczas zatłaczania do niej CO ₂	109
Rys. 4.8. Współczynnik spęcznienia (S _v) solanki złożowej Porażyn-2A podczas zatłaczania do niej CO ₂	109
Rys. 4.9. Komora ciśnieniowa w łaźni termostatycznej aparatury PVT.....	111
Rys. 4.10. Izotermy rozpuszczalności gazu ziemnego Ujazd-15 w solance złożowej.....	114
Rys. 4.11. Izotermy rozpuszczalności gazu ziemnego Porażyn-2A w solance złożowej.....	115
Rys. 4.12. Izotermy rozpuszczalności gazu złożowego Porażyn-2A i CO ₂ w wodzie destylowanej.....	116
Rys. 4.13. Rozpuszczalność CO ₂ w wodzie złożowej Porażyn-2A.....	120
Rys. 4.14. Współczynnik objętościowy solanki Porażyn-2A nasycanej CO ₂	120

Rys. 4.15. Rozpuszczalność CO ₂ w wodzie destylowanej i solance Porażyn-2A.....	122
Rys. 4.16. Współczynnik objętościowy wody destylowanej oraz solanki Porażyn-2A nasyconej CO ₂	122
Rys. 4.17. Zebrane wyniki badań rozpuszczalności gazów ziemnych i CO ₂ w solankach i wodzie destylowanej.....	124
Rys. 5.1. Schemat stanowiska do badania procesu wypierania rodzimego gazu ziemnego rozpuszczonego w warstwach wodonośnych poprzez zatłaczany CO ₂ [74].....	127
Rys. 5.2. Zespół komór ciśnieniowych będących częścią stanowiska do badania procesu wypierania [80].....	127
Rys. 5.3. Dyfuzor z piaskowką chęcińskiego [80].....	128
Rys. 5.4. Wydatek zatłaczanego CO ₂ i odbieranego gazu z komory wypierania w funkcji czasu, P = constans [80].....	134
Rys. 5.5. Suma zatłoczonego CO ₂ i odebranego gazu z komory wypierania w funkcji czasu, P = constans [80].....	135
Rys. 5.6. Skład gazu odbieranego z komory wypierania w funkcji ilości zatłoczonego CO ₂ – P = constans [80].....	136
Rys. 5.7. Rozgazowanie solanki po badaniach, WG = f(V _{SN}), P = constans [80].....	138
Rys. 5.8. Schemat poglądowy procesu odbioru solanki z komory wypierania po zakończeniu eksperymentu [80].....	139
Rys. 5.9. Bilans metanu w procesie wypierania gazu ziemnego zatłaczanym CO ₂ [80].....	141
Rys. 5.10. Stanowisko badawcze do modelowania procesów wypierania gazu rozpuszczonego w solankach [78].....	143
Rys. 5.11. Schemat stanowiska do badania procesu wypierania gazu ziemnego rozpuszczonego w warstwach wodonośnych przez zatłaczany CO ₂ [78].....	144
Rys. 5.12. Wprowadzanie do modelu solanki nasyconej gazem ziemnym – przebieg zmian wykładnika gazowego na wyjściu z modelu w funkcji objętości porowej PV [78].....	145
Rys. 5.13. Zmiany objętości układu podtrzymującego ciśnienie złożowe w modelu, odzwierciedlające dynamikę badanego procesu [78].....	147
Rys. 5.14. Odbiór płynu z modelu złoża – przebieg zmian wykładnika gazowego [78].....	148
Rys. 5.15. Odbiór płynu z modelu złoża – zawartość metanu w odbieranym gazie [78].....	148
Rys. 5.16. Odbiór płynu z modelu złoża – zawartość metanu w odbieranym gazie [78].....	149
Rys. 5.17. Wprowadzanie do modelu solanki nasyconej gazem ziemnym – przebieg zmian wykładnika gazowego na wyjściu z modelu w funkcji objętości porowej PV.....	151
Rys. 5.18. Zmiany objętości układu podtrzymującego ciśnienie złożowe w modelu, odzwierciedlające dynamikę badanego procesu.....	151

Rys. 5.19. Odbiór płynu z modelu złoża – przebieg zmian wykładnika gazowego.....	152
Rys. 5.20. Odbiór płynu z modelu złoża – zawartość metanu w odbieranym gazie.....	152
Rys. 5.21. Odbiór płynu z modelu złoża – zawartość metanu w odbieranym gazie.....	153
Rys. 5.22. Wprowadzanie do modelu solanki nasyconej gazem ziemnym – przebieg zmian wykładnika gazowego w funkcji objętości porowej PV.....	154
Rys. 5.23. Zmiany objętości układu podtrzymującego ciśnienie złożowe w modelu, odzwierciedlające dynamikę badanego procesu.....	155
Rys. 5.24. Odbiór płynu z modelu złoża – przebieg zmian wykładnika gazowego.....	156
Rys. 5.25. Odbiór płynu z modelu złoża – koncentracja metanu w odbieranym gazie.....	156
Rys. 5.26. Odbiór płynu z modelu złoża – koncentracja metanu w odbieranym gazie.....	157
Rys. 5.27. Sumaryczna ilość solanki odebranej z modelu ośrodka porowatego podczas trwania eksperymentu; etapy I, II i III [48].....	161
Rys. 5.28. Sumaryczna ilość gazu odebranego z modelu ośrodka porowatego podczas trwania eksperymentu; etapy I, II i III [48].....	162
Rys. 5.29. Sumaryczna ilość gazu odebranego z modelu ośrodka porowatego podczas trwania eksperymentu; etapy II i III [48].....	162
Rys. 5.30. Zawartość CO ₂ w odbieranym gazie; etapy II i III [48].....	163
Rys. 5.31. Etap I, stan przed zatłaczaniem nr 1 (31.05.2012 r., godz. 15:30) [48].....	164
Rys. 5.32. Etap I, stan po zatłaczaniu nr 1 (31.05.2012 r., godz. 15:38) [48].....	165
Rys. 5.33. Etap I, stan przed zatłaczaniem nr 2 (4.06.2012 r., godz. 9:30) [48].....	165
Rys. 5.34. Etap I, stan po zatłaczaniu nr 2 (4.06.2012 r., godz. 9:34) [48].....	166
Rys. 5.35. Etap I, stan przed zatłaczaniem nr 3 (6.06.2012 r., godz. 14:20) [48].....	166
Rys. 5.36. Etap I, stan po zatłaczaniu nr 3 (6.06.2012 r., godz. 14:24) [48].....	167
Rys. 5.37. Etap I, stan przed zatłaczaniem nr 4 (8.06.2012 r., godz. 8:45) [48].....	167
Rys. 5.38. Etap I, stan po zatłaczaniu nr 4 (8.06.2012 r., godz. 8:49) [48].....	168
Rys. 5.39. Etap I, stan przed zatłaczaniem nr 5 (11.06.2012 r., godz. 7:50) [48].....	168
Rys. 5.40. Etap I, stan po zatłaczaniu nr 5 (11.06.2012 r., godz. 7:54) [48].....	169
Rys. 5.41. Etap I, stan przed zatłaczaniem nr 6 (13.06.2012 r., godz. 8:30) [48].....	169
Rys. 5.42. Etap I, stan po zatłaczaniu nr 6 (13.06.2012 r., godz. 8:34) [48].....	170
Rys. 5.43. Etap II, stan przed odbiorem czapy gazowej (14.06.2012 r., godz. 8:00) [48].....	170
Rys. 5.44. Etapy II i III, stan po odbiorze czapy gazowej, a przed odbiorem zgazowanej solanki (14.06.2012 r., godz. 9:00) [48].....	171
Rys. 5.45. Etap III, stan po odbiorze zgazowanej solanki (14.06.2012 r., godz. 9:35) [48].....	171
Rys. 5.46. Koncentracja CH ₄ oraz CO ₂ w solance na poszczególnych odległościach od górnego końca modelu złoża [48].....	173

Rys. 6.1. Obszar niecki poznańskiej obejmujący złożę gazu Paproć–Cicha Góra wydzielony dla potrzeb modelowania numerycznego [3, 35].....	176
Rys. 6.2. Rozmieszczenie odwiertów zatłaczających CO ₂ na tle mapy stropu wybranej struktury złożowej.....	181
Rys. 6.3. Główni emitenci CO ₂ w Polsce według Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami w 2012 r. [30].....	182
Rys. 6.4. CO ₂ zatłaczany do złoża – wariant nr 1.....	185
Rys. 6.5. Koncentracja metanu rozpuszczonego w wodzie kilka dni po rozpoczęciu zatłaczania CO ₂ (rok 0) – warstwa 9.....	186
Rys. 6.6. Koncentracja metanu rozpuszczonego w wodzie po 5 latach od rozpoczęcia zatłaczania CO ₂ – warstwa 9.....	186
Rys. 6.7. Koncentracja metanu rozpuszczonego w wodzie po 25 latach od rozpoczęcia zatłaczania CO ₂ – warstwa 9.....	187
Rys. 6.8. Koncentracja metanu rozpuszczonego w wodzie w momencie zakończenia zatłaczania CO ₂ (rok 50) – warstwa 9.....	187
Rys. 6.9. Koncentracja metanu rozpuszczonego w wodach omawianej struktury w momencie zakończenia zatłaczania CO ₂ (rok 50).....	188
Rys. 6.10. Nasycenie ośrodka porowatego metanem w fazie gazowej w kilka dni po rozpoczęciu zatłaczania CO ₂ (rok 0) – warstwa 9.....	189
Rys. 6.11. Nasycenie ośrodka porowatego metanem w fazie gazowej po 10 latach od rozpoczęcia zatłaczania CO ₂ – warstwa 9.....	189
Rys. 6.12. Nasycenie ośrodka porowatego metanem w fazie gazowej po 25 latach od rozpoczęcia zatłaczania CO ₂ – warstwa 9.....	190
Rys. 6.13. Nasycenie ośrodka porowatego metanem w fazie gazowej w momencie zakończenia zatłaczania CO ₂ (rok 50) – warstwa 9.....	190
Rys. 6.14. Nasycenie ośrodka porowatego fazą gazową w kilka dni po rozpoczęciu zatłaczania CO ₂ (rok 0).....	192
Rys. 6.15. Nasycenie ośrodka porowatego fazą gazową po 25 latach od rozpoczęcia zatłaczania CO ₂	192
Rys. 6.16. Nasycenie ośrodka porowatego fazą gazową w momencie zakończenia zatłaczania CO ₂ (rok 50).....	193
Rys. 6.17. Wydatek wydobycia gazu ziemnego ze złoża – wariant nr 1.....	194
Rys. 6.18. Zmiany ciśnienia złożowego w funkcji czasu – wariant nr 1.....	194
Rys. 6.19. Wydobycie gazu ziemnego ze złoża – wariant nr 1.....	195
Rys. 6.20. CO ₂ zatłaczany do złoża – wariant nr 2.....	196
Rys. 6.21. Wydatek wydobycia gazu ziemnego ze złoża – wariant nr 2.....	196
Rys. 6.22. Zmiany średniego ciśnienia struktury w funkcji czasu – wariant nr 2.....	198

Rys. 6.23. Wydobycie gazu ziemnego ze złoża – wariant nr 2.....	198
Rys. 6.24. Porównanie obu wariantów prowadzenia procesu jednoczesnej eksploatacji gazu i zatłaczania CO ₂ do złoża.....	200

tabele

Tabela 2.1. Parametry wybranych złóż gazu zlokalizowanych w permskich osadach obszaru niecki poznańskiej [44, 52, 7].....	61
Tabela 3.1. Badanie kontaktowe gazu złożowego z odwiertu Ujazd-15 – test CME (T = 22°C ±0,2°C).....	76
Tabela 3.2. Badanie kontaktowe gazu złożowego z odwiertu Ujazd-15 – test CME (T = 60°C ±0,2°C).....	77
Tabela 3.3. Badanie kontaktowe gazu złożowego z odwiertu Ujazd-15 – test CME (T = 100°C ±0,2°C).....	78
Tabela 3.4. Badanie kontaktowe gazu złożowego z odwiertu Porążyn-2A – test CME (T = 21°C ±0,2°C).....	80
Tabela 3.5. Badanie kontaktowe gazu złożowego z odwiertu Porążyn-2A – test CME (T = 60°C ±0,2°C).....	81
Tabela 3.6. Badanie kontaktowe gazu złożowego z odwiertu Porążyn-2A – test CME (T = 100°C ±0,2°C).....	81
Tabela 3.7. Badanie kontaktowe ditlenku węgla (CO ₂ techniczny) – test CME (T = 30°C ±0,2°C).....	84
Tabela 3.8. Badanie kontaktowe ditlenku węgla (CO ₂ techniczny) – test CME (T = 100°C ±0,2°C).....	85
Tabela 3.9. Skład badanych mieszanin gazu złożowego Ujazd-15 i CO ₂ [% mol] – wg PVTsim.....	87
Tabela 3.10. Wybrane parametry mieszanin gazu Ujazd-15 i CO ₂ w warunkach złożowych – wg PVTsim PT Flash w: 91 bara; 100°C.....	88
Tabela 3.11. Skład badanych mieszanin gazu złożowego Porążyn-2A i CO ₂ [% mol] – wg PVTsim.....	91
Tabela 3.12. Wybrane parametry mieszanin gazu Porążyn-2A i CO ₂ w warunkach złożowych – wg PVTsim PT Flash w: 266 bara; 100°C.....	92
Tabela 4.1. Badanie kontaktowe solanki złożowej z odwiertu Porążyn-2A po zatłoczeniu do niej 0,05 mol CO ₂ – mieszanina 1 (ustalenie warunków nasycenia – test CME nr 1).....	98

Tabela 4.2. Badanie kontaktowe solanki złożowej z odwiertu Porażyn-2A po zatłoczeniu do niej 0,10 mol CO ₂ – mieszanina 2 (ustalenie warunków nasycenia – test CME nr 2).....	100
Tabela 4.3. Badanie kontaktowe solanki złożowej z odwiertu Porażyn-2A po zatłoczeniu do niej 0,15 mol CO ₂ – mieszanina 3 (ustalenie warunków nasycenia – test CME nr 3).....	102
Tabela 4.4. Badanie kontaktowe solanki złożowej z odwiertu Porażyn-2A po zatłoczeniu do niej 0,20 mol CO ₂ – mieszanina 4 (ustalenie warunków nasycenia – test CME nr 4).....	103
Tabela 4.5. Zebrane rezultaty badań kontaktowych solanki z odwiertu Porażyn-2A podczas zatłaczania do niej CO ₂ w warunkach złożowych (<i>swelling test</i>).....	107
Tabela 4.6. Skład gazu złożowego z odwiertu Ujazd-15 i Porażyn-2A [% mol].....	112
Tabela 4.7. Wyniki pomiarów i oznaczeń chemicznych badanych wód złożowych.....	113
Tabela 4.8. Rozpuszczalność gazu ziemnego Ujazd-15 w solance złożowej.....	114
Tabela 4.9. Rozpuszczalność gazu ziemnego Porażyn-2A w solance złożowej.....	115
Tabela 4.10. Rozpuszczalność gazu ziemnego Porażyn-2A i CO ₂ w wodzie destylowanej – T = 30°C ±0,2°C.....	116
Tabela 4.11. Badanie różnicowe mieszaniny złożonej z solanki Porażyn-2A i CO ₂ – T = 30°C ±0,2°C.....	117
Tabela 4.12. Badanie różnicowe mieszaniny złożonej z solanki Porażyn-2A i CO ₂ – T = 100°C ±0,2°C.....	118
Tabela 4.13. Badanie różnicowe mieszaniny złożonej z wody destylowanej i CO ₂ – T = 30°C ±0,2°C.....	121
Tabela 4.14. Zebrane wyniki badań rozpuszczalności gazów złożowych Ujazd-15, Porażyn-2A i CO ₂ w solankach złożowych oraz w wodzie destylowanej.....	124
Tabela 5.1. Główne parametry badania procesu wypierania gazu ziemnego z solanki z użyciem CO ₂	128
Tabela 5.2. Przebieg procesu wypierania rodzimego gazu rozpuszczonego w solance złożowej przez zatłaczany CO ₂ (ciśnienie tłoczenia P _{Tł} ≈ ciśnienie odb. gazu; P _{OG} = ciśnienie zł.; P _{zł} = 266 bara; T _{zł} = 100°C).....	130
Tabela 5.3. Całkowity bilans gazu w eksperymencie wypierania.....	140
Tabela 5.4. Bilans gazu w procesie wypierania z rozbiem na poszczególne składniki gazu.....	141
Tabela 5.5. Harmonogram prowadzenia eksperymentu.....	158
Tabela 5.6. Wybrane rezultaty symulacji [48].....	174

