

Charakterystyka i zintegrowane (statyczne i dynamiczne) modelowanie złóż gazu ziemnego Kościan i Brońsko

Jacek Dudek¹, Weronika Mikołajewska^{1,2}, Zbigniew Mikołajewski¹, Sławomir Ochalik¹, Marcin Preiss¹, Piotr Wójcik¹

Characterization and integrated (static and dynamic) modelling of the Kościan and Brońsko gas fields. *Prz. Geol.*, 72: 576–583; doi: 10.7306/2024.36

Abstract. Efficient production of hydrocarbons from carbonates, due to their highly variable geological and petrophysical properties, provides unique challenges for both geologists and production engineers. Therefore, it was decided to consolidate information coming from different disciplines into coherent, integrated (static and dynamic) models of the Kościan and Brońsko reservoirs. This process started with analysing core data and building a sedimentological model while simultaneous interpretation of well data (logs and laboratory tests). The results of this work were used as an input data for construction of static models, which were then iteratively history matched to the production data in the dynamic model until a satisfactory result was achieved. The calibrated model obtained in this way was used to prepare production forecasts with a relatively high level of confidence.

Keywords: 3D modelling, dynamic modelling, integrated modelling

Eksploatacja złóż węglowodorów występujących w skałach węglanowych, ze względu na ich skomplikowaną budowę geologiczną i charakterystykę petrofizyczną, stawia przed geologami i inżynierami złożowymi spore wyzwania. Skały węglanowe charakteryzują się dużą heterogenicznością, co utrudnia prognozowanie reakcji złoża na proces wydobywania. W takich warunkach kluczowe znaczenie ma szczegółowy opis wszystkich dostępnych danych, w tym geologicznych, petrofizycznych i produkcyjnych, a także ich integracja w ramach jednego, spójnego modelu numerycznego. Studium przypadku złóż Kościan i Brońsko ilustruje, jak podejście interdyscyplinarne, łączące wiedzę z różnych dziedzin, umożliwia stworzenie zintegrowanego (stycznego i dynamicznego) modelu złoża. Wyniki modelowania statycznego bywają niejednoznaczne. Zmniejszenie ryzyka błędnych prognoz umożliwia natomiast kalibracja dynamiczna na podstawie danych produkcyjnych. Taki model, oparty na szerokim wachlarzu danych, pozwala nie tylko na lepsze zrozumienie złożoności struktur węglanowych, ale również na efektywniejsze planowanie i optymalizację procesu eksploatacji, co ma bezpośredni wpływ na zwiększenie współczynnika wydobywania.

MODEL FACJALNY JAKO NARZĘDZIE SŁUŻĄCE DO OPISU PRZESTRZENNEJ ZMIENNOŚCI SKAŁ

Ważnym elementem modelu geologicznego, np. złoża węglowodorów, opracowywanym jako jeden z pierwszych po interpretacji wyników badań sejsmicznych skalibrowanych danymi otworowymi, jest model facjalny skał. W konstrukcji takiego modelu uwzględnia się nie tylko klasyczną analizę facjalną, umożliwiającą rekonstrukcję paleośrodowiskową rozpatrywanych poziomów stratygraficznych

(Catuneanu, 2022), ale także wpływ przeobrażeń diagenetycznych, jakim były poddane badane skały. Zwraca się także uwagę na wszelkie struktury tektoniczne widoczne w rdzeniach, np. szczeliny czy uskoki subsejsmiczne, których nie można zidentyfikować na podstawie danych sejsmicznych. Tego typu analiza nie jest niezbędnym elementem modelu geologicznego, jednak w przypadku znacznej zmienności litologiczno-facjalnej utworów analizowanego obiektu może się okazać niezwykle przydatna. Na potrzeby konstruowania modeli geologicznych złóż Kościan i Brońsko (ryc. 1A) opracowano jedynie model litologiczno-facjalny złoża Brońsko.

Złoże gazu ziemnego Brońsko znajduje się w kompleksie rafowym należącym do górnopermskiego poziomu wapienia cechsztyńskiego (Wagner, 1994). Jest to największe ze złóż w obrębie tzw. raf wolsztyńskich (Buniak i in., 2008).

Podatność skał węglanowych na przeobrażenia diagenetyczne wpływa na ich znaczną zmienność litologiczną (wapienie, dolomity, skały o mieszanym chemizmie), a w konsekwencji także na znaczne zróżnicowanie parametrów petrofizycznych (porowatość, przepuszczalność, szczelino-watość itd.), co znacznie utrudnia przestrzenną interpretację tych utworów i uchwycenie zmienności na podstawie niskorozdzielczych danych sejsmicznych.

Dzięki pełnemu rdzeniowaniu zdecydowanej większości analizowanych otworów przewiercających utwory wapienia cechsztyńskiego dysponowano unikatowym, wyjściowym materiałem badawczym. Pierwszym etapem prac było profilowanie osadów wapienia cechsztyńskiego z rdzeni 22 otworów wiertniczych zlokalizowanych w różnych częściach złoża Brońsko (materiały archiwalne ORLEN S.A.). Celem tych prac była ocena zmienności

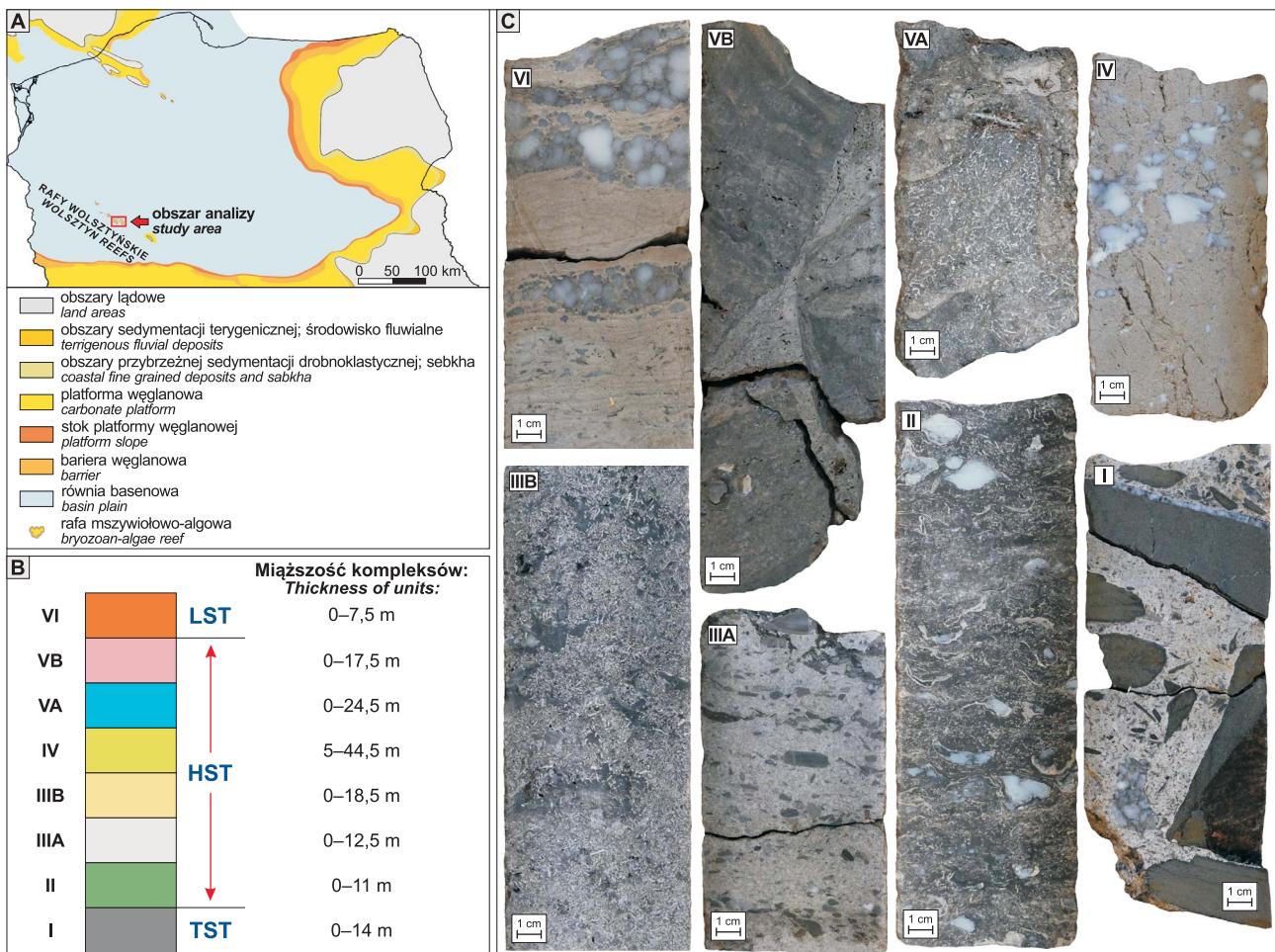
¹ ORLEN S.A. Oddział Geologii i Eksploatacji PGNiG w Warszawie, ul. Kasprzaka 25a, 01-224 Warszawa; jacek.dudek@pgnig.pl; weronika.mikolajewska@pgnig.pl; zbigniew.mikolajewski@pgnig.pl; slawomir.ochalik@pgnig.pl; marcin.preiss@pgnig.pl; Piotr.p.wojcik@pgnig.pl; ORCID ID: J. Dudek – 0000-0002-4474-5560, M. Preiss – 0009-0001-2363-4992, W. Mikołajewska – 0009-0002-3931-8430, Z. Mikołajewski – 0009-0008-0535-3629, S. Ochalik – 0009-0000-1175-2329, P. Wójcik – 0009-0003-9218-5793

² AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; ORCID ID: 0009-0002-3931-8430

litologicznej i miąższościowej wapienia cechsztyńskiego w rejonie złoża. Wstępną analizę makroskopową wsparto analizą szczegółową płytek cienkich, pod kątem rozpoznania mikrofacji i procesów diagenetycznych (materiały archiwalne ORLEN S.A.). Do analizy wykorzystano także dane z 6 otworów w złożu Brońsko, z których nie pobrano rdzeni wiertniczych – były to profilowania geofizyki wiertniczej, w szczególności dane pochodzące z imagerów mikroopornościowych odwzorowujących obraz ściany otworu wiertniczego.

W każdym z 28 analizowanych profili wydzielono charakterystyczne kompleksy skalne (ryc. 1, 2), które odpowiadają poszczególnym etapom rozwoju basenu wapienia

cechsztyńskiego (TST – etap transgresywny, HST – etap wysokiego stanu morza, LST – etap niskiego stanu morza). W niektórych rafowych profilach wapienia cechsztyńskiego, rozwiniętych na północnej krawędzi wyniesienia wolsztyńskiego, kompleksy te rozpoznano już wcześniej (Dyjażyński i in., 2001; Kiersnowski i in., 2010; Peryt i in., 2010, 2012; Fheed i in., 2022). Na potrzeby opisywanej analizy podział ten zmodyfikowano w ten sposób, by można było wykorzystać do analizowania całego złoża oraz tak, aby rozdzielczość podziału była zbliżona z rozdzielczością planowanego modelu statycznego. Zwracano też uwagę na wszelkie cechy skał, mogące znacząco pogarszać lub poprawiać parametry petrofizyczne w poszczególnych



Ryc. 1. **A** – lokalizacja analizowanego obszaru na mapie paleogeograficznej wapienia cechsztyńskiego (Buniak i in., 2008); **B** – charakterystyczne kompleksy skalne wydzielone w profilu wapienia cechsztyńskiego w obszarze złoża Brońsko i zakresy ich miąższości: **I** – kompleks brekcji złożonych z ekstraklastów karbońskich, przerobionych podczas transgresji cechsztyńskiej; **II** – kompleks bioklastyczny (ramienionogi); **IIIA** – kompleks bioklastyczny (mszywioly) z drobnymi ekstraklastami karbońskimi; **IIIB** – kompleks bioklastyczny (mszywioly); **IV** – kompleks bioklastyczny (mszywioly, małże, otwornice itd.) ze znacznym udziałem anhidrytu; **VA** – kompleks skał redeponowanych, pochodzących z niszczenia skał bioklastycznych; **VB** – kompleks skał redeponowanych, pochodzących z niszczenia stromatolitów i mat mikrobalnych; **VI** – kompleks płytkowodnych utworów biogenicznych (maty algowe, stromatolity) oraz utworów środowiska sebkha, **TST** – etap transgresywny, **HST** – etap wysokiego stanu morza, **LST** – etap niskiego stanu morza; **C** – przykłady rdzeni wiertniczych reprezentatywnych dla wydzielonych kompleksów skalnych

Fig. 1. **A** – Location of the study area on the paleogeographic map of the Zechstein Limestone (Buniak et al., 2008); **B** – distinguished rock units within the Zechstein Limestone section of the Brońsko gas field, and the thickness of these units: **I** – breccia complex composed of Carboniferous extraclasts, reworked during the Zechstein transgression; **II** – bioclastic complex (brachiopods); **IIIA** – bioclastic complex (bryozoans) with small Carboniferous extraclasts; **IIIB** – bioclastic complex (bryozoans); **IV** – bioclastic complex (bryozoans, bivalves, foraminifers, etc.) with a significant amount of anhydrite; **VA** – complex of rocks consisting of destroyed and re-deposited bioclastic rocks; **VB** – complex of rocks consisting of destroyed and re-deposited stromatolites and microbial mats; **VI** – complex of shallow-water biogenic deposits (algal mats, stromatolites) and sabkha environment deposits, **TST** – transgressive stage, **HST** – highstand stage, **LST** – lowstand stage; **C** – examples of drillcores representing the distinguished rock units

miejscach analizowanego obiektu, oceniając jednocześnie ich możliwy zasięg przestrzenny.

W wyniku analiz utworów wapienia cechsztyńskiego w rejonie złóż gazu ziemnego Kościan i Brońsko wydzielono 8 kompleksów skalnych (ryc. 1B i 1C), zaczynając od spągu: I – kompleks brekcji złożonych z ekstraklastów karbońskich, przerobionych podczas transgresji cechsztyńskiej; II – kompleks bioklastyczny (ramienionogi); IIIA – kompleks bioklastyczny (mszywioly) z drobnymi ekstraklastami karbońskimi; IIIB – kompleks bioklastyczny (mszywioly); IV – kompleks bioklastyczny (mszywioly, małże, otwornice itd.) ze znacznym udziałem anhydrytu; VA – kompleks skał redeponowanych, pochodzących z niszczenia skał bioklastycznych; VB – kompleks skał redeponowanych, pochodzących z niszczenia stromatolitów i mat mikrobialnych; VI – kompleks płytkowodnych utworów biogenicznych (maty algowe, stromatolity) oraz utworów środowiska sebhya. Jedynym wydzieleniem, którego obecność stwierdzono na całym obszarze złoża Brońsko, był kompleks IV (ryc. 2). Na potrzeby modelu statycznego połączono wydzielenia IIIA i IIIB oraz VA i VB, uzyskując w efekcie 6 kompleksów skalnych.

Wszelkie anomalie litologiczne, strefy podwyższonej porowatości, szczelinowatości itd., rozpoznane w trakcie analizy rdzeni wiertniczych, dowiązane do informacji pochodzących z geofizyki otworowej, a następnie do zapisu sejsmicznego w konkretnym otworze i wykorzystano do opracowania modelu geologicznego.

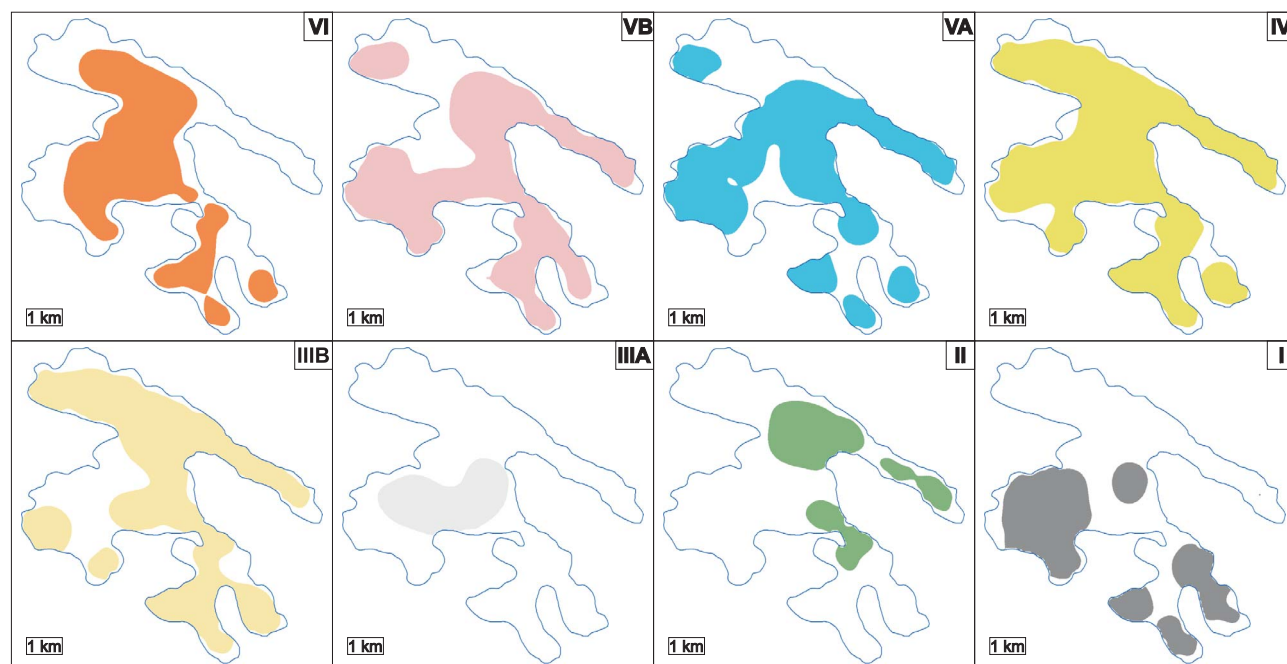
MODEL PETROFIZYCZNY JAKO INTEGRACJA DANYCH LABORATORYJNYCH I POMIARÓW GEOFIZYKI WIERTNICZEJ

Podczas budowy trójwymiarowego modelu złoża jednym z głównych zadań jest opis zmienności przestrzennej właściwości zbiornikowych skał (porowatości, przepuszczalności i nasycenia). Opis ten opiera się na wynikach interpretacji petrofizycznych rdzeni z odwiertów przewier-

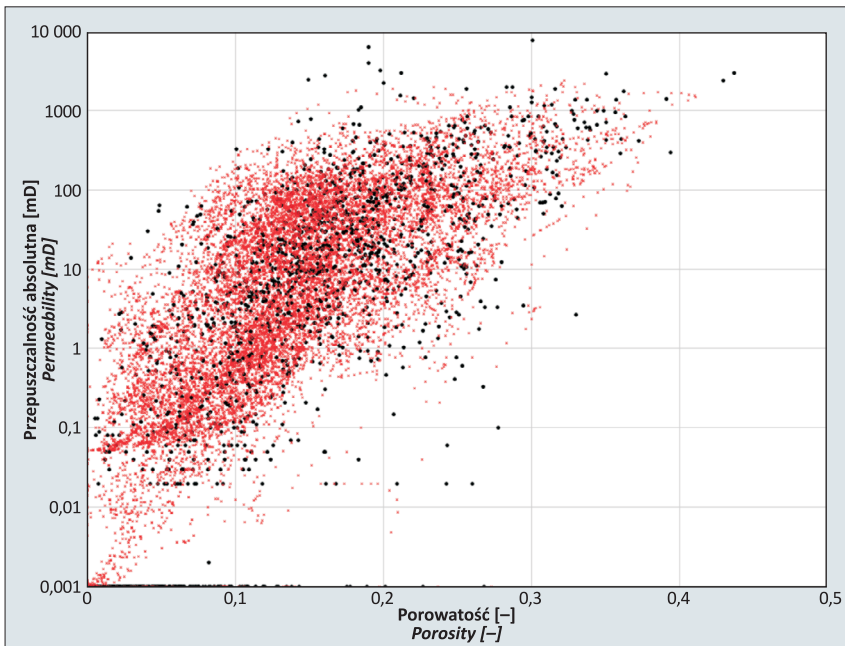
cających złoża. Kluczowe znaczenie dla budowy modelu ma poprawne wyznaczenie granicy pełnego nasycenia wodą FWL (*Free Water Level*) asocjacji petrofacjalnych, czyli poziomu zerowego ciśnienia kapilarnego, i wydzielenie asocjacji skalnych charakteryzujących się podobnymi wielkościami gardzieli porowych oraz zbliżoną porowatością i przepuszczalnością. Odbywa się to poprzez integrację danych laboratoryjnych i pomiarów geofizyki wiertniczej.

Pierwszym krokiem w modelowaniu parametrów złoża Brońsko była interpretacja danych geofizyki wiertniczej – określenie porowatości i nasycenia skał (w tym głębokości granicy gaz–woda) we wszystkich profilach odwiertów w złożu. Drugim było wyznaczenie przepuszczalności utworów wapienia cechsztyńskiego. W celu odtworzenia dużego zróżnicowania właściwości tych skał dokonano tego za pomocą modelu predykcyjnego. Do predykcji przepuszczalności użyto algorytmu sieci neuronowych, wykorzystując przepuszczalność laboratoryjną z najbliższych otworów oraz podstawowe pomiary geofizyki wiertniczej, takie jak: gęstość, mikrooporność i naturalna promieniotwórczość (ryc. 3). Następnie przystąpiono do wydzielenia asocjacji petrofacjalnych. Wyniki badania ciśnień kapilarnych MICP (*Mercury Injection Capillary Pressure*) wykonanych na próbkach rdzeni z 6 otworów wskazują na istnienie 3 typów skał o odmiennej charakterystyce petrofizycznej (ryc. 4): Są to:

- skały o porowatości małej do dużej i dobrej przepuszczalności, w których typowa kapilara jest większa niż 2 μm (asocjacja RRT3);
- skały o porowatości małej do dużej i umiarkowanej przepuszczalności, w których wielkość gardzieli porowych jest rzędu 0,5–10 μm (asocjacja RRT2);
- skały o bardzo małej do umiarkowanej porowatości i słabej przepuszczalności, w których dominują kapilary o wielkości 0,05–2 μm (asocjacja RRT1).

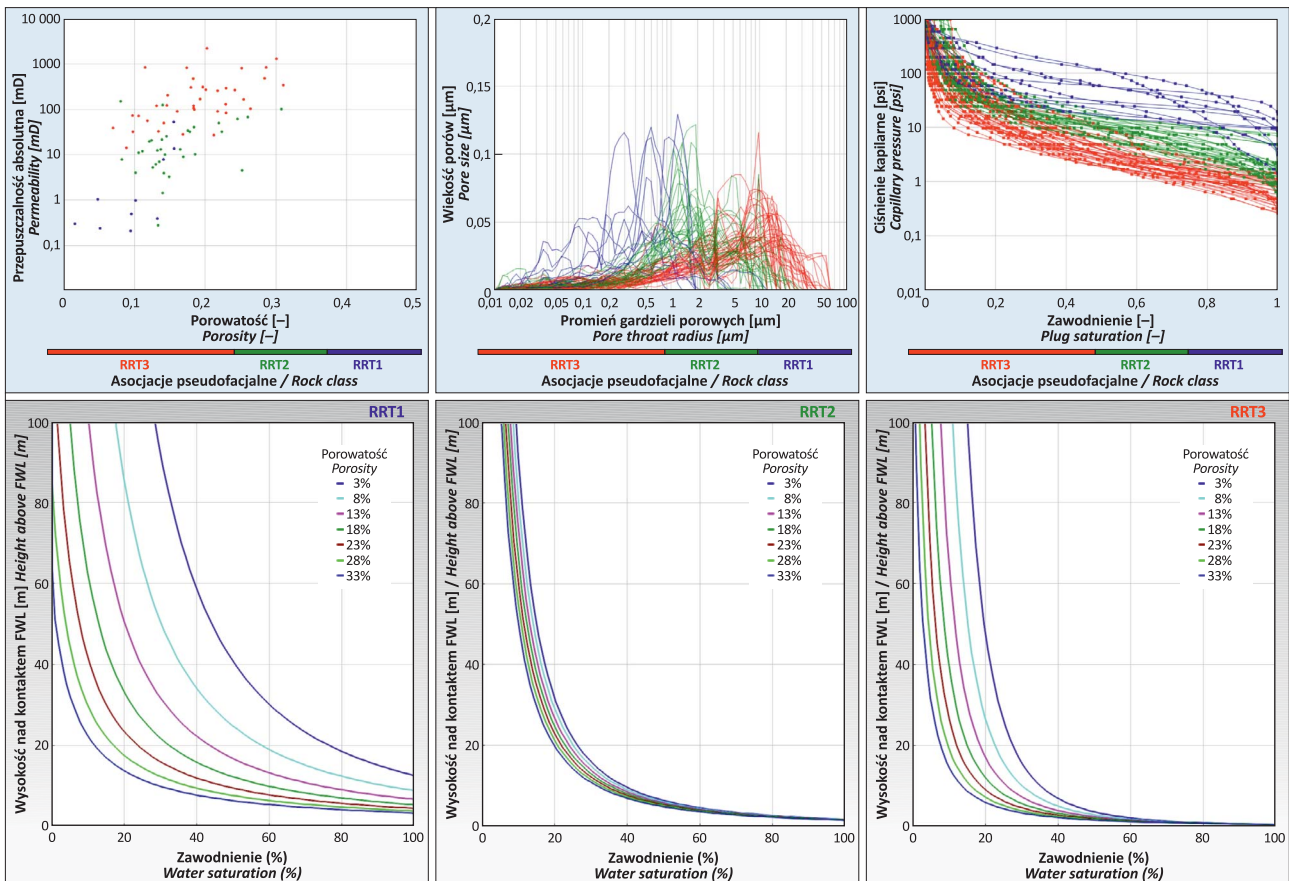


Ryc. 2. Mapy zasięgów wydzielonych kompleksów skalnych na obszarze złoża Brońsko. Objaśnienia symboli I–VI jak na ryc. 1
Fig. 2. Maps of extents of particular rock units within the Brońsko gas field. Explanation of symbols I–VI as in Figure 1



Ryc. 3. Pole Brońsko – zależność przepuszczalności od porowatości wapienia cechsztyńskiego: **czarne punkty** – wyniki laboratoryjne, **czworne krzyżyki** – dane wyinterpretowane z krzywych geofizyki wiertniczej

Fig. 3. Brońsko field – porosity vs. permeability of the Zechstein Limestone: **black dots** – lab data, **red crosses** – interpreted data



Ryc. 4. Analiza wyników badania ciśnien kapilarnych (MICP) w próbkach rdzeni ze złóż Kościan i Brońsko. **U góry:** wykres porowatości w zależności od przepuszczalności laboratoryjnej, wykres dystrybucji wielkości gardzieli porowych oraz wykres nasycenia względem ciśnienia kapilarnego. Na wszystkich wykresach kolorem oznaczono asocjacje skał RRT1–RRT3. **U dołu:** wykresy nasycenia wodą względem wysokości powyżej granicy FWL poszczególnych typów skał z uwzględnieniem ich porowatości

Fig. 4. Analysis of Mercury Injection Capillary Pressure (MICP) data. **On the top:** core porosity vs. pore size, saturation vs. capillary pressure. In all charts, the rock associations RRT1–RRT3 are marked in color. **On the bottom:** plots of water saturation vs. height above free water level for the particular rock types. Porosity of a specific rock type on Z axis

Dla każdego typu skały wyznaczono formułę nasycenia w funkcji ciśnienia kapilarnego. Finałem tego etapu badań było rozpropagowanie wydzielonych asocjacji na całą miąższość modelowanych poziomów.

Na koniec obliczono zawodnienie, wykorzystując wyznaczone uprzednio zależności nasycenia w funkcji ciśnienia kapilarnego i przyjmując rzeczywistą gęstość płynów złożowych.

Integracja danych laboratoryjnych i pomiarów geofizyki wiertniczej na potrzeby budowy modeli geologicznych jest procesem iteracyjnym. W przemyśle nafty i gazu stosuje się kilka schematów postępowania. Każdy z nich zawiera element predykcji (do określenia przepuszczalności albo do rozpropagowania asocjacji, jednostek przepływu lub facji w domenie otworu), co wymaga częstej walidacji modelu i wprowadzania w nim zmian.

BUDOWA TRÓJWYMIAROWEGO (STATYCZNEGO) MODELU GEOLOGICZNEGO

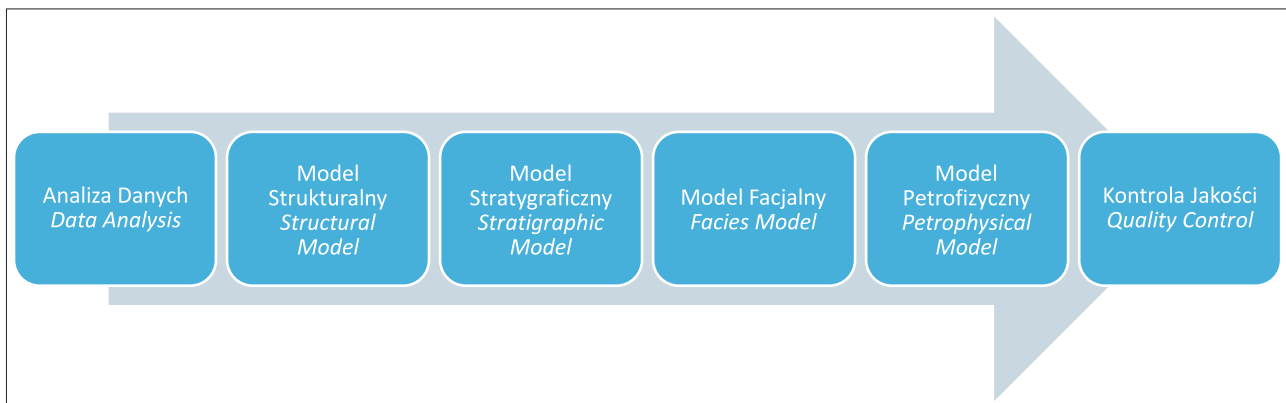
Budowa trójwymiarowego modelu złoża jest zadaniem interdyscyplinarnym i wymaga integracji wszystkich dostępnych danych w jeden, spójny zestaw, który następnie jest wykorzystywany m.in. do symulacji wydobywania węglowodorów ze złoża. Proces iteracyjnej konstrukcji modelu geologicznego złóż Kościan i Brońsko można podzielić na kilka etapów (ryc. 5). Pierwszym była analiza danych, która polegała głównie na analizie jakościowej oraz ilościowej danych wejściowych, czyli wyinterpretowanych horyzontów sejsmicznych (strop oraz spąg wapienia cechsztyńskiego), opisów rdzeni i wydzielonych warstw oraz krzywych porowatości, przepuszczalności i nasycenia wodą. Następnie zbudowano model strukturalny, który w przypadku obu złóż jest relatywnie prosty ze względu na brak uskoków, które mogłyby zniekształcać siatkę przestrzenną modelu.

Powierzchniami ograniczającymi modele złóż Kościan i Brońsko są horyzonty sejsmiczne. W modelu geologicznym złoża Brońsko uwzględniono wewnątrz podział złoża na strefy zróżnicowane pod względem litologiczno-petrofizycznym i wykorzystano do jego konstrukcji model facjalny. Rozmiar siatki przestrzennej modelu wyznaczono na 50 m w kierunkach x i y , natomiast rozdzielczość pionową ustalono na ok. 1 m, aby z jednej strony uzyskać rozdzielczość niezbędną do oddania heterogeniczności ośrodka, a z drugiej zapewnić racjonalny czas symulacji wydobywania gazu ziemnego ze złoża. Taki strukturalny szkielet modelu wypełniono następnie danymi o asocjacjach petrofacyalnych, wyinterpretowanych uprzednio z zastosowaniem przestrzennej propagacji, charakteryzujących się podobnymi parametrami petrofizycznymi. W tym celu skorzystano z algorytmu SIS (*Sequential Indicator Simu-*

lator), który został ograniczony kombinacją trendów pionowych 1D asocjacji (*Vertical Proportion Curve*), dostrzeżonych w danych otworowych, oraz trendów poziomych, wynikających z zaobserwowanej korelacji petrofacji z atrybutami sejsmicznymi. Dodatkowym parametrem kontrolnym była procentowa zawartość każdej z asocjacji petrofacyalnych w złożu (bądź strefie), pochodząca z danych otworowych. Kolejnym etapem było modelowanie porowatości: każda z rozpropagowanych facji charakteryzuje się unikalnym rozkładem porowatości, który odwzorowano w modelu za pomocą algorytmu *Gaussian Random Function Simulation*. Następnym parametrem rozpropagowanym na siatce 3D była przepuszczalność modelowana z zastosowaniem procesu *cloud transform*. Algorytm ten jest często używany do modelowania przepuszczalności, gdyż stosunkowo wiernie odtwarza w przestrzeni trójwymiarowej związek porowatości i przepuszczalności zaobserwowany w danych otworowych (Pyrzcz, Deutch, 2014).

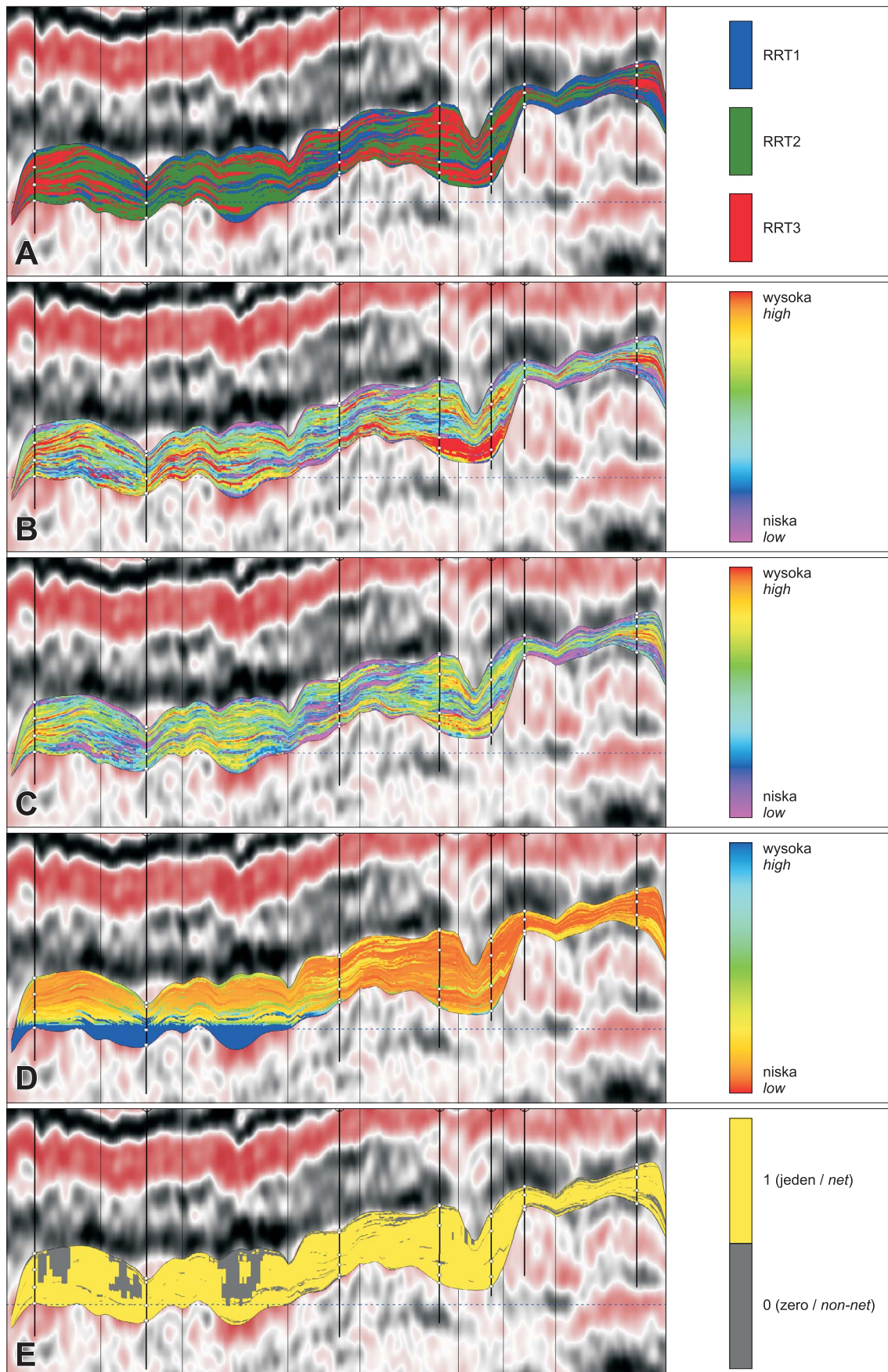
Model nasycenia wodą wykonano zgodnie z analizą danych laboratoryjnych, korzystając z równań do wyznaczenia wartości nasycenia w zależności od właściwości petrofizycznych danej asocjacji petrofacyalnej oraz jej wysokości nad granicą woda–gaz.

Ostatnim parametrem niezbędnym do budowy modelu geologicznego jest *Net-to-Gross* (NTG), który określa, jaka część złoża może być efektywnie eksploatowana (tzn. ma korzystne cechy petrofizyczne). W modelu złoża Kościan parametr ten oznaczono jako wartość dyskretną. W przypadku, gdy porowatość skał jest większa niż zadana wartość minimalna, wtedy parametr NTG jest równy jeden, w przeciwnym wypadku jest równy zero. Podobne założenie przyjęto w modelu geologicznym złoża Brońsko, jednak w procesie kalibracji tego modelu z danymi produkcyjnymi okazało się ono niewystarczające. Po powtórnej analizie danych sejsmicznych zdecydowano o ekstrakcji elementów złoża o odmiennych właściwościach petrofizycznych, które miały negatywny wpływ na przepływ płynów w złożu i przypisano im wartość zero. Przykładową sekcję sejsmiczną przechodzącą przez model geologiczny złoża Brońsko, wraz z naniesionymi modelami poszczególnych parametrów, przedstawia ryc. 6. Tak przygotowany model geologiczny przekazano inżynierowi złożowemu do symulacji właściwości dynamicznych złoża.



Ryc. 5. Schemat procesu budowy modelu geologicznego

Fig. 5. Schematic process of static geological model construction



Ryc. 6. Przekrój sejsmiczny przez złożo Brońsko pokazujący wyniki modelowania: facjalnego (A), porowatości (B), przepuszczalności (C), nasycenia wodą (D) oraz *Net-to-Gross* (E). Czarne, pionowe linie oznaczają trajektorie otworów wiertniczych

Fig. 6. Seismic section through the Brońsko field with: facies model (A), porosity model (B), permeability model (C), water saturation (D) and *Net-to-Gross* (E). Black vertical lines represent well trajectories

BUDOWA DYNAMICZNEGO MODELU ZŁOŻA

W klasycznym procesie modelowania złóż po przygotowaniu statycznego modelu złoża kolejnym etapem prac jest budowa modelu dynamicznego, łączącego model statyczny z właściwościami dynamicznymi, takimi jak rozkład zmian ciśnienia i nasycenia węglowodorami oraz profil wydobywania w funkcji czasu (ryc. 7). W górnictwie ropy i gazu symulację dynamiczną złoża wykonuje się przeważnie zgodnie ze sposobem postępowania, jaki zaproponował Abou-Kassem i in. (2020). Proces ten składa się z sześciu głównych etapów prac:

- ❑ analizy danych – zebrania, sprawdzenia i przygotowania danych wsadowych oraz planowania wymaganych mocy obliczeniowych na podstawie liczby i czasu planowanych symulacji złożowych;
- ❑ dopasowania modelu statycznego do potrzeb symulacji dynamicznej;
- ❑ modelowania parametrów płynu złożowego (ropa naftowa, gaz ziemny, woda złożowa);
- ❑ inicjalizacji modelu;
- ❑ kalibracji modelu do danych historycznych (jeżeli tego typu dane są dostępne);
- ❑ wykonania prognoz produkcji połączonych z analizą, interpretacją i raportowaniem uzyskanych wyników symulacji.

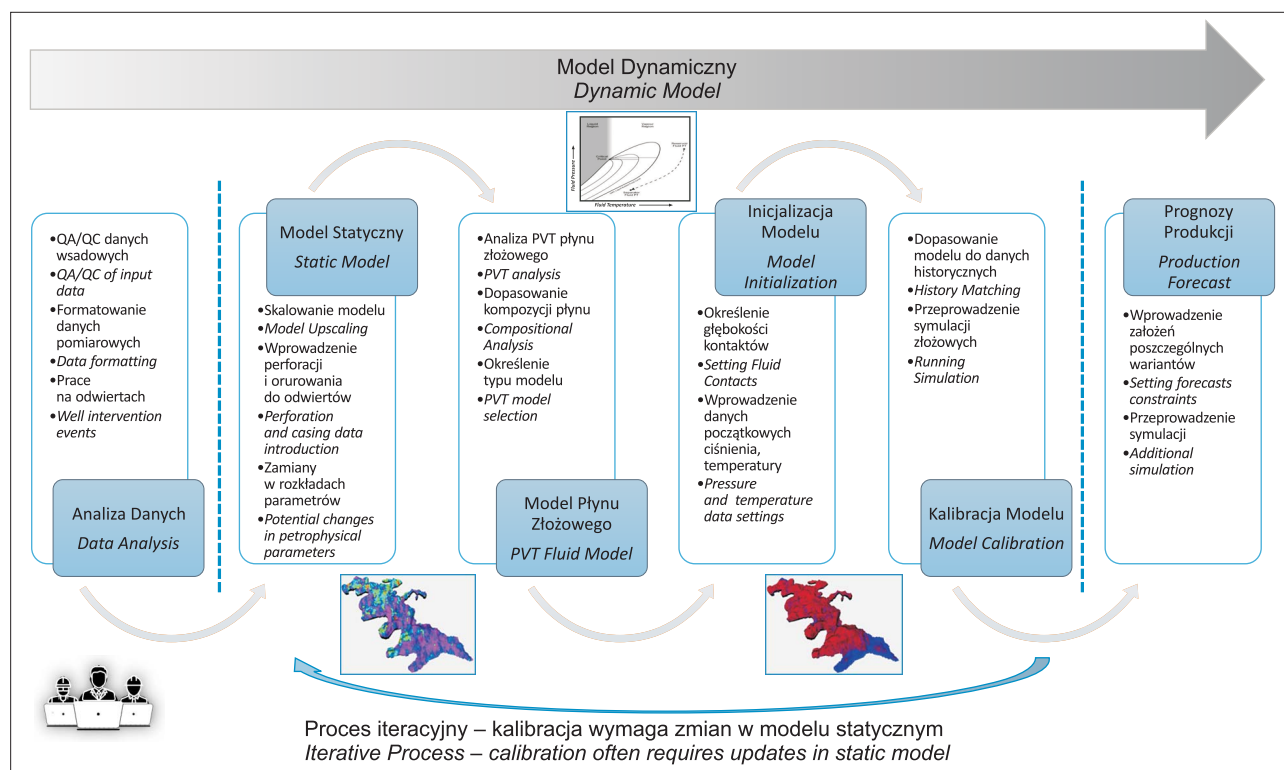
Do modeli dynamicznych złóż Kościan i Brońsko wprowadzono następujące parametry: płyn złożowy (gaz ziemny, woda złożowa), głębokość kontaktów (woda–gaz) oraz temperaturę i ciśnienie złożowe. Oba modele wykonano zgodnie z procedurą Abou-Kassemiego in. (2020). W trakcie prac przetestowano kilkadziesiąt iteracji modeli

kalibracyjnych, w których głównymi zmiennymi były: asocjacje petrofacjalne, porowatość oraz przepuszczalność skał (wartości tych parametrów przyjęto na podstawie wyników profilowań geofizyki wiertniczej, opisów rdzeni i badań laboratoryjnych). Po przeprowadzeniu tej symulacji różnica między parametrami generowanymi przez symulację dynamiczną a danymi pomiarowymi nie przekraczała 1–2% zarówno w przypadku ciśnień dennych i głowicowych, jak i wydobywania gazu, co świadczy o bardzo dobrym dopasowaniu do danych historycznych (ryc. 8). Brak idealnego dopasowania możliwości wydobywania gazu ziemnego do danych pomiarowych wynika z miesięcznego interwału w symulacji, podczas gdy dane pomiarowe wykonywano w kroku dziennym.

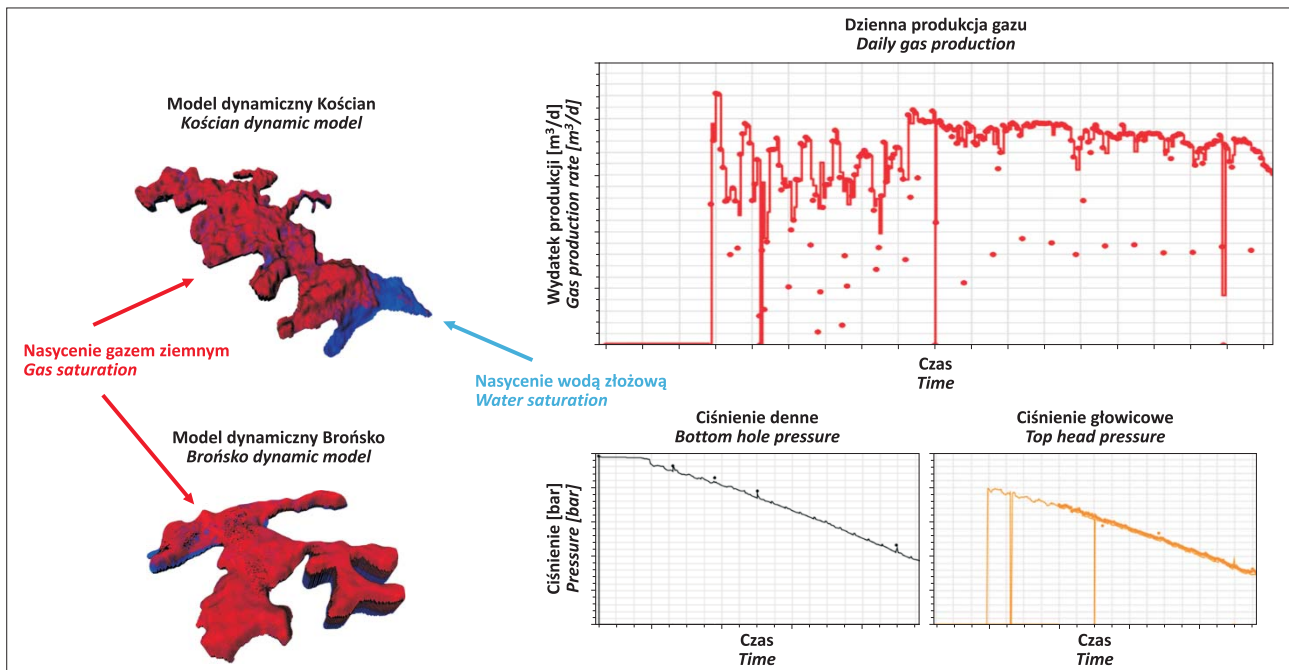
Na podstawie skalibrowanych modeli dynamicznych sporządzono prognozy parametrów produkcyjnych złoża, będące podstawą decyzji inwestycyjnych związanych zarówno z bieżącą, jak i przyszłą działalnością kopalni gazu ziemnego.

PODSUMOWANIE

W trakcie cyfrowego modelowania węglanowych złóż węglowodorów Kościan i Brońsko wypracowano metodę integracji danych. W efekcie uwzględnienia danych pochodzących z różnych źródeł udało się ograniczyć niejednoznaczności modelowania geologicznego poprzez kalibrację modelu w symulacji dynamicznej. Złoża węglowodorów w skałach węglanowych cechują się dużą heterogenicznością właściwości petrofizycznych, w związku z tym w ich modelowaniu konieczne jest uwzględnienie wszystkich dostępnych wyników badań i danych, gdyż



Ryc. 7. Iteracyjny proces przygotowania, budowy i kalibracji modelu dynamicznego złoża wraz z wykonaniem prognoz wydobywania
Fig. 7. An iterative process of preparation, construction and calibration of a dynamic reservoir model combined with production forecasts



Ryc. 8. Model dynamiczny dziennego wydobywania gazu, ciśnienia dennego oraz ciśnienia głowicowego w złożach Kościan i Brońsko wraz z przykładowym dopasowaniem wygenerowanych profili produkcyjnych (linia ciągła) do historycznych danych pomiarowych (kropki)

Fig. 8. Presentation of a dynamic model of gas production per day, bottom pressure and head pressure for the Kościan and Brońsko fields, combined with an example of correlation of the generated production profiles (solid line) with historical measurement data (dots)

nawet subtelne, przestrzenne zmiany parametrów modelu zauważalnie wpływają na optymalizację eksploatacji złoża. Podejście to, zgodne z międzynarodowymi trendami, pozwala na dokładniejszy opis ośrodka skalnego i zwiększa predykcijną wartość modelu, a w konsekwencji umożliwia efektywniejsze zarządzanie złożem.

Autorzy dziękują Dyrekcji Oddziału Geologii i Eksploatacji PGNiG w Warszawie (ORLEN S.A.) za udzielenie zgody na wykorzystanie danych, które posłużyły do przygotowania niniejszego artykułu.

LITERATURA

ABOU-KASSEM J.H., RAFIQUŁ ISLAM M., FAROUQ-ALI S.M. 2020 – Petroleum reservoir simulation: the engineering approach. Elsevier.
 BUNIAK A., MIKOŁAJEWSKI Z., WAGNER R. 2008 – Mapa paleogeograficzna wapienia cechsztyńskiego (Ca1) [W:] Wagner R, Buniak A, Dadlez R., Grotek I., Kiersnowski H., Kuberska M., Kudrewicz R., Lis P., Maliszewska A., Mikołajewski Z., Papiernik B., Pokorski J., Poprawa P., Skowroński L., Słowakiewicz M., Szewczyk J., Wolnowski T. 2008 – Zasoby prognostyczne, nieodkryty potencjał gazu ziemnego w utworach czerwonego spągowca i wapienia cechsztyńskiego w Polsce – badania geologiczne. CAG Państw. Inst. Geol., Warszawa, nr CBDG 951613.

CATUNEANU O. 2022 – Principles of sequence stratigraphy (Second Edition). Elsevier, Newnes.

DYJACZYŃSKI K., GÓRSKI M., MAMCZUR S., PERYT T.M. 2001 – Reefs in the basal facies of the Zechstein Limestone (Upper Permian) of Western Poland: a new gas play. *J. Petrol. Geol.*, 24 (3): 1248–1256.
 FHEED A., ŚWIERCZEWSKA A., STRZELECKI P.J., RADZIK-HOTŁOŚ N., GEBUS-CZUPYT B. 2022 – Influence of substrate morphology on reef diagenesis: Examples from the Zechstein Limestone formation (SE Wolsztyn Ridge, W Poland). *Marine and Petrol. Geol.*, 136: 105442.

KIERSNOWSKI H., PERYT T.M., BUNIAK A., MIKOŁAJEWSKI Z. 2010 – From the intra-desert ridges to the marine carbonate island chain: middle to late Permian (Upper Rotliegend – Lower Zechstein) of the Wolsztyn–Pogorzela high, west Poland. *Geol. J.*, 44: 319–335.

PERYT T.M., GELUK M.C., MATHIESEN A., PAUL J., SMITH K. 2010 – Zechstein. [W:] Doornbeek J.C., Stevenson A.G. (red.), *Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area*. EAGE Publications b.v. (Houten): 123–147.

PERYT T.M., RACZYŃSKI P., PERYT D., CHŁÓDEK K. 2012 – Upper Permian reef complex in the basal facies of the Zechstein Limestone (Ca1), Western Poland. *Geol. J.*, 47 (5): 537–552.

PYRCZ M.J., DEUTSCH C.V. 2014 – Geostatistical reservoir modeling. Oxford University Press, USA.

WAGNER R. 1994 – Stratygrafia osadów i rozwój basenu cechsztyńskiego na Niżu Polskim. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 146: 1–71.

Praca wpłynęła do redakcji 25.09.2024 r.

Akceptowano do druku 14.10.2024 r.