

ANALIZA ELEMENTÓW RYZYKA GEOLOGICZNEGO REJONU SULISZEWO–RADEĆCIN W KONTEKŚCIE SKŁADOWANIA CO₂

ANALYSIS OF GEOLOGICAL RISK ELEMENTS IN THE SULISZEWO–RADEĆCIN AREA FROM THE POINT OF VIEW OF CARBON DIOXIDE STORAGE

MICHAŁ MICHNA¹, BARTOSZ PAPIERNIK¹

Abstrakt. Artykuł skupia się na analizie elementów ryzyka dolnojurskiej formacji zawodnionej w rejonie Radęcin–Suliszewo. Skalami zbiornikowymi są tutaj piaskowce synemuru oraz pliensbachu a uszczelniają je mułowce i iłowce toarku. Autorzy stworzyli model strukturalny a następnie bazowe modele parametryczne rejonu Radęcin–Suliszewo. Na podstawie modeli bazowych oszacowano wyjściową wartość możliwego do zatłoczenia CO₂. W kolejnym etapie, używając procedury Uncertainty Analysis w programie Petrel dokonano analizy czterech elementów niepewności (nasycenia gazem, położenia kontaktu woda/gaz, porowatości, proporcji skał zbiornikowych do uszczelniających) wpływających na wartości wolumetryczne. Określono rozkład oraz zakres poszczególnych elementów niepewności. Dzięki symulacji metodą Monte Carlo wykonano losowanie prób dla wymienionych parametrów niepewności. Dla każdej realizacji wyliczono objętość gazu w warunkach złożowych. Wyniki przedstawiono w postaci histogramów oraz wykresu tornado. W ten sposób określono, w jakim stopniu poszczególne elementy niepewności wpływają na ilość CO₂ możliwego do zmagazynowania. Największy wpływ na ilość możliwego do zmagazynowania gazu ma odpowiednio założony model nasycenia gazem (93–116% względem modelu bazowego) następnie określony kontakt między mediami złożowymi (93,5–106,5% względem modelu bazowego). Porowatość wpływa w tym przypadku w granicy 97–103,5% na wyniki analizy, natomiast różnica w progowej wartości skały zbiornikowe/skały uszczelniające jest nieznaczna i można ją zaniedbać.

Słowa kluczowe: ryzyko geologiczne, modelowanie 3D, modelowanie strukturalne, składowanie dwutlenku węgla.

Abstract. The paper presents the analysis of risk elements in the Lower Jurassic water-saturated formation in the Radęcin–Suliszewo area. The reservoir rocks in this area are represented by Sinemurian and Pliensbachian sandstones sealed by Toarcian mudstones and claystones. The authors constructed a structural model and then base parametric models for the Radęcin–Suliszewo area. Based on the base models, an output value of the CO₂ amount possible to be injected was estimated. In the next stage, following the Uncertainty Analysis procedure in Petrel, analysis of four elements affecting volumetric values was carried out (i.e. gas saturation, location of gas/water contact, porosity, and the ratio of reservoir rocks versus sealing rocks). With application of the Monte Carlo method, sampling for the above uncertainty elements was performed. For each realization, gas volume in reservoir conditions was computed. The results were presented in the form of histograms and a tornado chart. In this way, the authors determined to what degree the individual uncertainty elements affect the CO₂ amount possible to be injected. The strongest effects on the amount are associated with the properly assumed model of gas saturation (93–116% in relation to the base model) and then the determined contact between reservoir media (93.5–106.5% in relation to the base model). Porosity affects from 97–103.5% of the analysis results and the difference in the threshold value of the reservoir rocks/sealing rocks ratio is insignificant and can be neglected.

Key words: geological risk, uncertainty analysis, 3D modeling, structural modeling, carbon capture and storage (CCS).

¹ Akademia Górniczo–Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Surowców Energetycznych, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: michna@agh.edu.pl, papiernik@geol.agh.edu.pl

WSTĘP

Trójwymiarowe modelowania parametryczne są już standardem w eksploracji ropy naftowej i gazu ziemnego w Polsce. Wiedza na ten temat została wykorzystana również w dziedzinie sekwestracji CO₂ (Pearce i in., 1996). Należy pamiętać, że częścią modelowań jest również ewaluacja ryzyka obecnego na każdym etapie rozpoznania i modelowania (Caers, 2005). Zadaniem geostatystycznych metod szacowania ryzyka jest określenie, w jakim zakresie, przyjęty model bazowy może się różnić od rzeczywistej sytuacji.

W niniejszej pracy autorzy skupili się na analizie ryzyka czterech parametrów niepewności (nasylenia gazem, położenia kontaktu woda/gaz, porowatości, proporcji skał

zbiornikowych do uszczelniających) dla rejonu Suliszewo–Radęcin na bloku Gorzowa.

Strukturę Radęcina wybrano bazując na kryteriach analizowanych w projektach SACS, SACS2 oraz CO2STORE, w których badano możliwości wykorzystania formacji solankowych do sekwestracji CO₂ na skalę przemysłową, uwzględniając czynniki ekonomiczne i geologiczne (Chadwick i in., 2008; Stolarz, 2009; Tarkowski i in., 2009).

Prace wykonano w ramach tematu „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania“, zamówionego przez MŚ i finansowanego przez NFOŚiGW.

MODEL STRUKTURALNY ORAZ PARAMETRYCZNY

Do stworzenia osnowy strukturalnej modelu bazowego *Base Case* posłużyły dane wejściowe z 28 otworów znajdujących się na terenie badań. Wydzielenia stratygraficzne zostały określone w 18 otworach. Dane wejściowe zaczerpnięte zostały z Centralnego Archiwum Geologicznego Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego oraz Bazy Danych Geotermalnych Katedry Surowców Energetycznych. Zaimportowane wydzielenia

zostały ujednolicone i tak przygotowaną stratygrafię przekształcono w syntetyczne krzywe otworowe. Osnowę strukturalną modelu 3D zbudowano na podstawie regionalnych map opracowanych w formie regularnych siatek interpolacyjnych o oczku 250*250m (Górecki i in., 2006; Pletsch i in., 2010). Stratygrafia w otworach pozwoliła na dokładniejsze rozdzielanie modelu strukturalnego (fig. 1, 2).

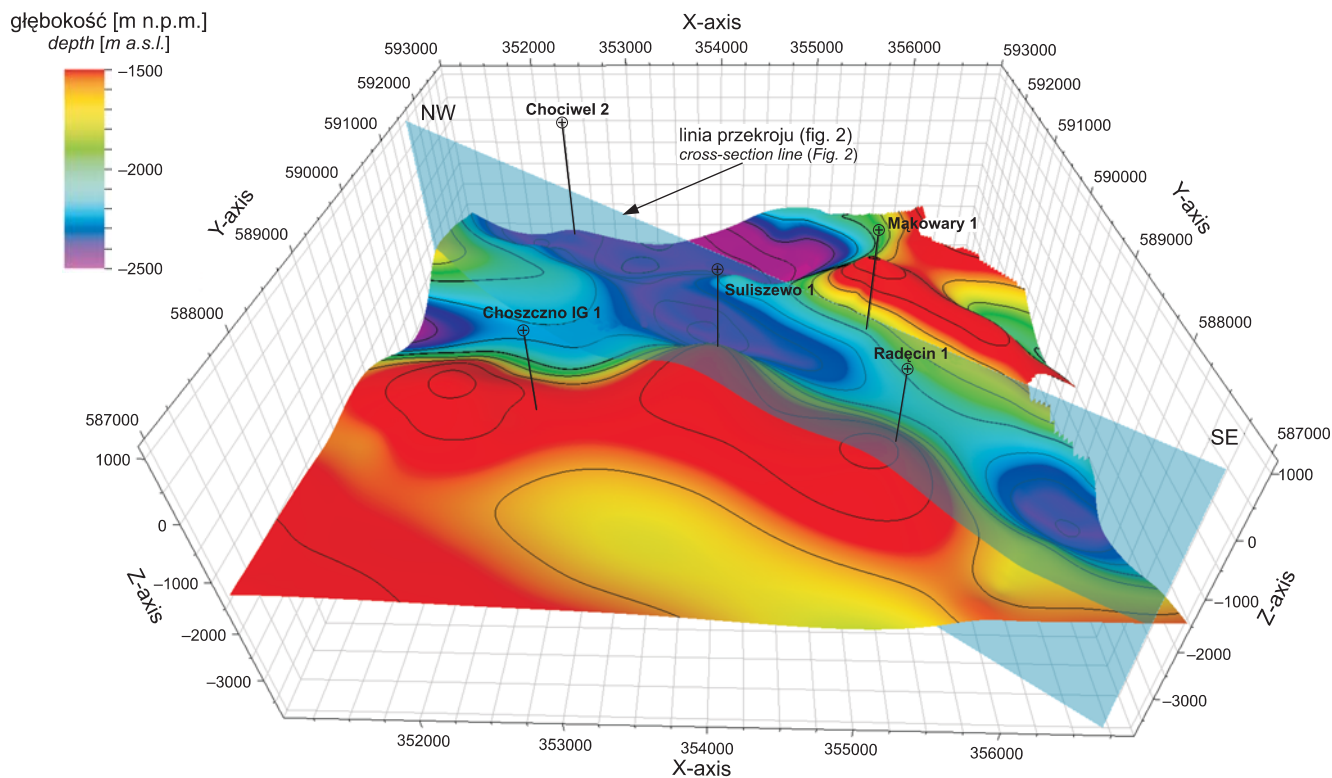


Fig. 1. Model strukturalny stropu hetangu z zaznaczoną linią przekroju
Structural model of the top of Hettangian strata (cross-section line is indicated)

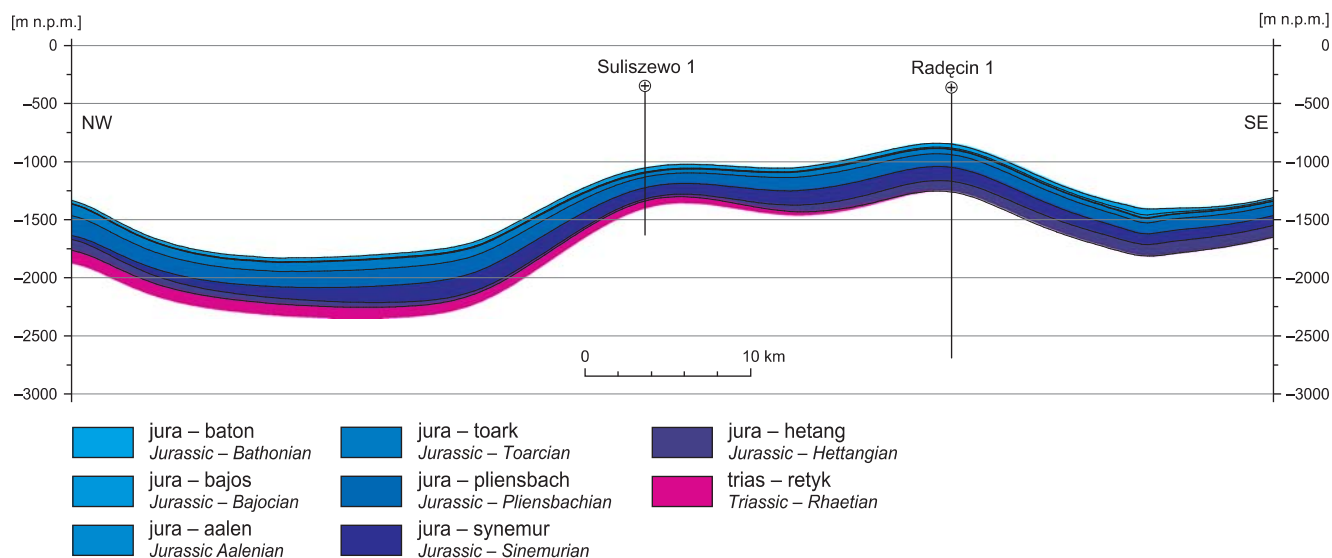


Fig. 2. Zmienność utworów interwału retyk–spag keloweju w strukturze Suliszewo–Radęcin

Linia przekroju zaznaczona na fig. 1

Lithologic variability of the Rhaetian–base of Callovian interval within the Suliszewo–Radęcin structure

Cross-section line is indicated on Figure 1

Krzywe rozkładu parametrów petrofizycznych otrzymane z interpretacji danych geofizyki otworowej (Kperm – przepuszczalności, PHIE – porowatości efektywnej, VCL – zailenia) znajdują się w 5 otworach i obejmują jedynie dolną jurę. Posłużyły one do stworzenia modeli parametrycznych.

We wstępnej analizie należało wykonać modele bazowe poszczególnych parametrów. Należały do nich:

- model litologiczny
- model zailenia
- model porowatości całkowitej
- model przepuszczalności
- dyskretny model rozmieszczenia skał zbiornikowych i niezbiornikowych (*Net-to-Gross*, NTG)

Bazowy model zailenia powstał z wykorzystaniem algorytmu Kriging. Stworzenie wariogramu pozwoliło na dość dokładne biorąc pod uwagę ilość otworów rozestymowanie parametru zailenia. Bazowy model przepuszczalności został wykonany na podstawie 10 realizacji stochastycznych. Wykonane modele przepuszczalności uśredniono wykorzystując operację średniej geometrycznej. Bazowy model rozmieszczenia skał zbiornikowych (NTG) został wykonany z użyciem bazowego modelu zailenia. Próg odcięcia między skałami zbiornikowymi a uszczelniającymi został wyznaczony na 35% zailenia. Wyjściowe położenie kontaktu woda/gaz zostało ustalone na 1100 m p.p.m., przyjmując tę głębokość jako bezpieczną granicę napełniania pułapki dwutlenkiem węgla.

METODYKA

Według procedur przetwarzania stosowanych przez firmę Schlumberger, klasyczną analizę ryzyka geologicznego wykonuje się, gdy elementy niepewności nie wpływają na siebie wzajemnie. W przypadku, gdy są one w jakiś sposób powiązane, np.: kontakty złożowe, nasycenie wodą, porowatość, zailenia litologia etc należy zastosować bardziej skomplikowaną analizę czułości. Pozwala ona określić wpływ poszczególnych elementów na wynik końcowy, jakim będzie faktyczna ilość dwutlenku węgla możliwa do składowania w całej strukturze. Na figurze 3 przedstawiono schemat postępowania w analizie ryzyka dla rejonu Suliszewo–Radęcin.

Pierwszym etapem analizy ryzyka jest stworzenie modelu bazowego zwanego *Base Case* lub też *Best Guess* oraz obliczenie na jego podstawie bazowego wyniku wolumetrycz-

nego, który będzie stanowił punkt odniesienia do całej analizy. Model ten pokazuje najlepsze na stan obecny rozpoznanie struktury. Jest on wynikiem interpretacji wszystkich dostępnych informacji wejściowych.

Kolejnym etapem był wybór elementów niepewności oraz określenie rodzaju rozkładu i zakresu zmienności poszczególnych parametrów. Wyjściowe położenie kontaktu woda / CO₂ zostało ustalone na głębokości 1100 m p.p.m. Głębokość ta została określona, z dużą dozą bezpieczeństwa, aby nie dopuścić do „przelania się” nadkrytycznego CO₂ poza strukturę. Do analizy ryzyka przyjęto kontakt wahający się rozkładem trójkątnym w granicach 1095–1105 m p.p.m. przy wartości średniej określonej na poziomie przyjętego kontaktu bazowego, czyli 1100 m p.p.m. Wykonano 50 alternatywnych modeli

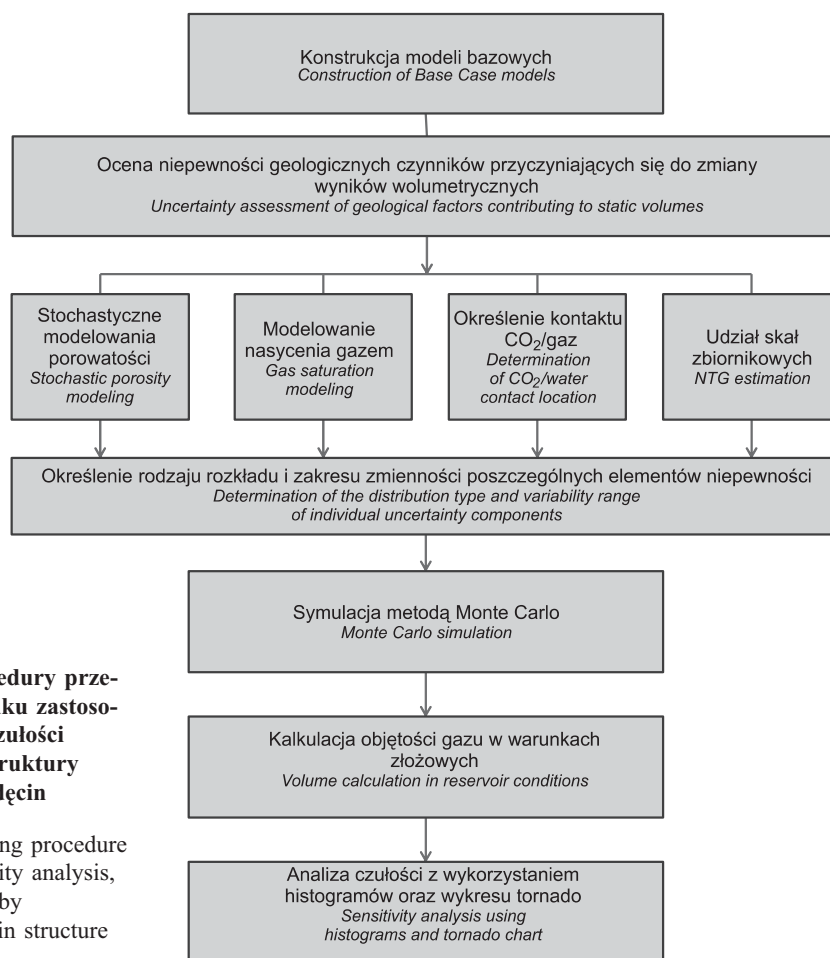


Fig. 3. Schemat procedury przetwarzania w przypadku zastosowania analizy czułości na przykładzie struktury Suliszewo–Radęcin

Scheme of the processing procedure in case of the sensitivity analysis, exemplified by the Suliszewo–Radęcin structure

położenia kontaktu. Dostępne dane nie obejmowały krzywych nasycenia wodą. Z tego względu przyjęto stałą wartość bazową równą 0,6. W modelowaniu ryzyka ustalono rozkład nasycenia gazem na trójkątny, z wartością minimalną ustaloną na poziomie 0,55 i wartością maksymalną ustaloną na poziomie 0,7. Za wartość średnią przyjęto nasycenie gazem równe 0,6. Podobnie jak w modelowaniu nasycenia gazem, wykonano 50 alternatywnych modeli nasycenia gazem. Celem analizy ryzyka zmienności porowatości było określenie w jak dużym stopniu wykorzystanie metod stochastycznych wpływa na obliczenia wolumetryczne. Analiza zmienności

porowatości obejmowała stworzenie 50 alternatywnych stochastycznych modeli porowatości przy zastosowaniu anizotropii rozkładu parametru jak w *Base Case* tworzonym metodą Krigingu. Zostały stworzone alternatywne modele NTG poprzez przeliczenie bazowego modelu zailenia na modele dyskretne. *Base Case* dla progu odcięcia został ustalony na poziomie zailenia równym 35%. Do analizy ryzyka przyjęto rozkład trójkątny z wartością minimalną równą 30%, wartością maksymalną – 40% i średnią – 35%.

Finalnie dzięki symulacjom Monte Carlo można określić końcowy rozkład poszczególnych parametrów.

WYNIKI

Ostatnim etapem analizy czułości jest korelacja wszystkich elementów niepewności na wykresie tornado (fig. 4). Pokazuje on jak poszczególne elementy niepewności wpływają na efektywną objętość struktury. Na figurze 4 przedstawiono badane elementy i ich odchylenie od modeli bazowych. Z wykresu wynika, że największy wpływ na ilość możliwego do zmagazynowania gazu ma odpowiednio założony model nasycenia gazem, następnie określony kontakt między mediami złożowymi. Porowatość wpływa w tym przypadku w granicach 97–103,5% względem mode-

lu bazowego, natomiast różnica w progowej wartości skały zbiornikowe/skały uszczelniające jest nieznaczna i można ją zaniedbać.

Przy założonych warunkach złożowych (tj. temperaturze równej 60°C, ciśnieniu – 13 MPa oraz gęstości CO₂ – 505,35 kg/m³) określono ilość możliwego do składowania CO₂ (wyrażonego w tonach). Wyniki wpływu poszczególnych elementów niepewności zostały również przedstawione w postaci histogramów z zaznaczonymi percentylami P10, P50 i P90 (fig. 5). Sumaryczna analiza ryzyka wymie-

Fig. 4. Diagram tornado ukazujący wpływ poszczególnych parametrów niepewności na objętość CO₂

Tornado chart showing the effects of individual uncertainty parameters on CO₂ volume

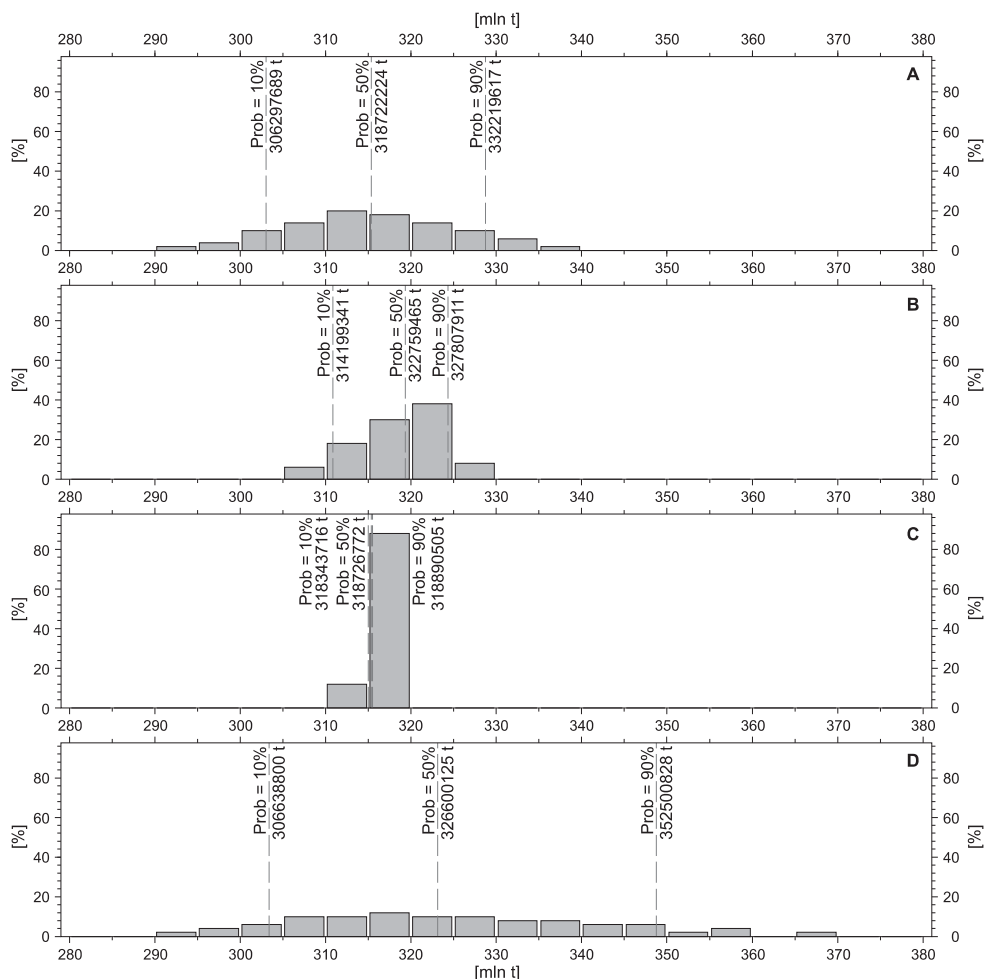
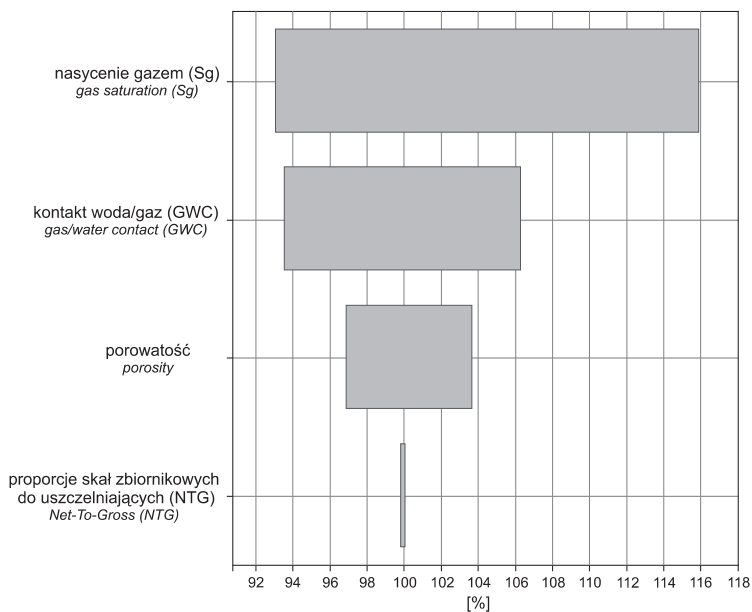


Fig. 5. Histogramy wpływu poszczególnych elementów ryzyka na ilość CO₂ możliwego do zatłoczenia z zaznaczonymi percentylami P10, P50 i P90

A – kontakt woda / CO₂, B – porowatość, C – proporcje skał zbiornikowych do uszczelniających, D – nasylenie gazem

Histograms of the effects of individual risk elements on CO₂ amounts possible to be injected (the P10, P50 and P90 percentiles are indicated)

A – CO₂ / water contact (GWC), B – porosity, C – Net-to-Gross (NTG), D – gas saturation

nionych parametrów wskazuje, że średnią ilość gazu, jaką można zatłoczyć do struktury to ok. 319 mln t CO₂. Percen-tyl P10 w tym przypadku wynosi 311 mln t CO₂, a P90 – 335 mln t CO₂.

Przedstawione badania wykonano w 2011 roku w KSE AGH w ramach realizacji tematu „Rozpoznanie formacji

i struktur do bezpiecznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania“ . Do opracowania wykorzystywanych modeli 3D w KSE AGH wykorzystano program Petrel 2010.2 udostępniony Wydziałowi Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH przez SIS Schlumberger w ramach umowy o wspieraniu działalności dydaktycznej i naukowej.

LITERATURA

- CAERS J., 2005 — Petroleum Geostatistics. Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX.
- CHADWICK A., ARTS R., BERNSTONE C., MAY F., THIBEAU S., ZWEIGEL P., 2008 — Best Practice for the Storage of CO₂ in Saline Aquifers – Observations and Guidelines from the SACS and CO2STORE projects. *British Geological Survey Occasional Publication*, **14**. British Geological Survey, Nottingham.
- GÓRECKI W. (red), 2006 — Atlas zasobów geotermalnych formacji mezozoicznej na Niżu Polskim. AGH, Kraków.
- PEARCE J. M., HOLLOWAY S., WACKER H., NELIS M. K., ROCHELLE C., BATEMAN K., 1996 — Natural occurrences as analogues for the geological disposal of carbon dioxide. *Energy Conversion and Management*, **37**, 6–8: 1123–1128.
- PLETSCH T., APPEL J., BOTOR D., CLAYTON C.J., DUIN E.J.T., FABER E., GÓRECKI W., KOMBRINK H., KOSAKOWSKI P., KUPER G., KUS J., LUTZ R., MATHIENSEN A., OSTER-TAG-HENNING C., PAPIERNIK B., VAN BERGEN F., 2010 — Petroleum Generation and Migration. *W: Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area* (red. J.C. Doornenbal and A.G. Stevenson): 225–253. EAGE Publications b.v., Houston.
- STOLARZ J., 2009 — Możliwości wykorzystania horyzontów jurajskich na Niżu Polski do celów sekwestracji dwutlenku węgla w świetle modelowań komputerowych. Archiwum KSE, WG-GiOŚ, AGH, Kraków. [Pr. magist.]
- TARKOWSKI R., MAREK S., ULIASZ-MISIAK B., 2009 — Wstępna geologiczna analiza struktur do składowania CO₂ w rejonie Bełchatowa, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, **25**, 2: 37–45.

SUMMARY

The paper presents the uncertainty elements influencing the results of static geomodeling. A very speculative element of the analysis is Gas Saturation parameter (Sg), assumed as constant values for the whole structure, equal to 0.55, 0.6 and 0.7 for the min., mean and max. value respectively. The results obtained for these assumptions were very variable. Cutoff analysis of discrete Net-to-Gross models shows that, in case of the Radęcin structure, the being described parameter plays minor role, due to good and stable reservoir properties of the Sinemurian and Pliensbachian deposits. Shale content cutoff settings, accepted in different variants, varied from 30 to 40%, fitting to the geological conditions.

In practice, it leaves reservoir-seal in practice intact. The low variability and high quality of the reservoir are also reflected by permeability values reaching a few thousands of milidarcy. A possible very wide range of the results of uncertainty and sensitivity analyses clearly shows that they have to obey strictly statistical assumptions on distribution types. The results are preliminary; they will be tuned after reinterpretation of seismic data in depth domain in the research area, or some new parametric data. However, the results can be treated as the first reliable approximation of the static volume of CO₂ in the structure. The applied workflow is sufficient, but it can be easily modified in case of data set extension.