

Modele kompaktacji i diagenetyzacji utworów facji eolicznej czerwonego spągowca jako narzędzie do prognozowania ich porowatości

Models of compaction and diagenesis of Rotliegend aeolian formations as a tool for predicting porosity

Tomasz Słoczyński, Konrad Ziemianin, Karol Spunda

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: W artykule przedstawiono wyniki modelowania procesów diagenetyzacji w utworach piaskowcowych facji eolicznej czerwonego spągowca. Celem pracy było stworzenie narzędzia do prognozowania porowatości tych skał, istotnej w kontekście poszukiwań złóż węglowodorów, podziemnego magazynowania gazu ziemnego oraz sekwestracji CO₂. W pracy omówiono geologiczne tło utworów czerwonego spągowca, które osadzały się w permie w basenie kontynentalnym. Wskazano na zróżnicowaną miąższość tych osadów, wynoszącą od kilkuset do 1000 metrów, oraz ich szerokie zastosowanie jako zbiorników gazu ziemnego. Podkreślono także wpływ nieprzepuszczalnych ewaporatów w nadkładzie na występowanie nadciśnień i ich znaczenie dla porowatości. Przeprowadzono analizę danych petrograficzno-petrofizycznych próbek skał pobranych z materiału rdzeniowego. Skały te reprezentowały w głównej mierze drobnoziarniste i bardzo drobnoziarniste arenity subarkozowe, a rzadziej obserwowano odmiany kwarcowe i sublityczne. Omówiono główne procesy diagenetyczne i zbadano ich wpływ na porowatość. Kluczowe znaczenie miała tu kompaktacja mechaniczna i cementacja. Kompaktacja mechaniczna redukuje porowatość poprzez nacisk i przemieszczanie się ziaren, podczas gdy chemiczna polega na ich rozpuszczaniu. Stworzono dwa modele. Pierwszy to model kompaktacji mechanicznej oparty na zależnościach Athy'ego, uwzględniający wpływ naprężeń efektywnych. Drugi to model diagenetyzacji wykorzystujący algorytm Walderhauga, analizujący wpływ cementacji kwarcowej na porowatość. Cementacja taka, jako jeden z głównych typów spoiw, była obserwowana w analizowanych próbkach. Autigeniczny kwarc utworzył obwódki na powierzchni ziaren kwarcu. Jego udział często był limitowany obecnością obwódek ilasto-żelazistych. Modelowanie przeprowadzono z użyciem danych kalibracyjnych z odwiertu G-2, uzyskując dobrą zgodność wyników z danymi empirycznymi. Artykuł opisuje narzędzia wspierające modelowanie systemów naftowych i prognozowanie parametrów zbiornikowych w systemach geologicznych. Podkreśla także znaczenie interdyscyplinarnego podejścia do badania porowatości piaskowców eolicznych oraz wykorzystanie opracowanych modeli jako skutecznego narzędzia do przewidywania ich właściwości zbiornikowych.

Słowa kluczowe: czerwony spągowiec, model kompaktacji, model diagenetyzacji, porowatość, cementacja.

ABSTRACT: The article presents the results of modeling diagenesis processes in sandstone formations of the Rotliegend aeolian facies. The aim of the work was to create a tool for predicting the porosity of these rocks, which is important in the context of hydrocarbon exploration, underground storage of natural gas, and CO₂ sequestration. The paper discusses the geological background of the Rotliegend sediments deposited in the Permian continental basin. The varied thickness of these sediments, ranging from several hundred to 1000 meters, and their wide use for natural gas underground storage were indicated. The influence of impermeable evaporites in the overburden on the occurrence of overpressures and their importance for porosity was also emphasized. Petrographic and petrophysical data from analyses of core samples was investigated. These rocks represented mainly fine-grained and very fine-grained subarkosic arenites while quartz and sublithic varieties were less frequently observed. The main diagenetic processes were discussed and their influence on porosity was investigated. Mechanical compaction and cementation were crucial here. Mechanical compaction reduces porosity by pressing and moving the grains, while chemical compaction involves dissolving them. Two models were created. The first is a mechanical compaction model, based on Athy's relations and taking into account the influence of effective stresses. The second is a diagenesis model which uses the Walderhaug algorithm that analyzes the effect of quartz cementation on porosity. Such cementation, as one of the main types of cements, was observed in the analyzed samples. Authigenic quartz formed rims on the surface of quartz grains. Their content was often limited by the presence of clay-iron rims. Modeling was performed with the use of calibration data from

the Grundy-2 well and good agreement of the results with empirical data was obtained. This publication provides tools for supporting the modeling of petroleum systems and forecasting reservoir parameters in geological systems. It also emphasizes the importance of an interdisciplinary approach in the investigations of porosity of aeolian sandstones and also the use of the developed models as an effective tool for predicting their reservoir properties.

Key words: Rotliegend, compaction model, diagenesis model, porosity, cementation.

Wstęp

Prognozowanie porowatości skał jest zagadnieniem bardzo ważnym zarówno w kontekście poszukiwań złóż węglowodorów, jak też struktur geologicznych o potencjale podziemnego magazynowania gazu ziemnego czy też sekwestracji dwutlenku węgla. Jej wielkość jest kształtowana w wyniku procesów diagenetycznych (np. kompaktacja, cementacja, rozpuszczanie) zachodzących w basenie sedymentacyjnym i oddziałujących na siebie w trakcie pograżania. Wydajność tych procesów stanowi funkcję wielu zmieniających się w czasie ewolucji basenu parametrów, takich jak np. naprężenia efektywne, temperatura, skład mineralny, mineralizacja wód itp., dlatego prognozowanie porowatości na określonych głębokościach jest zagadnieniem szczególnie trudnym do rozwiązania. W celu predykcji porowatości skał na określonych głębokościach tworzone są modele kompaktacji i diagenetyzacji wiążące jej wartość z różnymi parametrami. Udostępnione są one i wykorzystywane w specjalistycznym oprogramowaniu przeznaczonym do modelowania systemów naftowych.

Utwory piaszczyste facji eolicznej czerwonego spągowca stanowią w Europie jeden z głównych poziomów zbiornikowych dla gazu ziemnego (kilkaset złóż gazu ziemnego odkrytych na obszarach Wielkiej Brytanii, Holandii, Niemiec i Polski). Ze względu na własności kolektorskie, horyzontalny zasięg, duże miąższości oraz szeroki przedział głębokości zalegania są one perspektywiczne zarówno w kontekście poszukiwań nowych złóż węglowodorów, jak i sekwestracji dwutlenku węgla (Maćkowski, 2008; Warnecki, 2011, 2012, 2013).

Fakt ten skłonił autorów do opracowania modelu kompaktacji i diagenetyzacji dla utworów eolicznych czerwonego spągowca, który to model będzie mógł być wykorzystywany jako narzędzie do predykcji ich porowatości w pracach związanych z modelowaniem systemów naftowych czy też struktur geologicznych do zatłaczania dwutlenku węgla.

Tło geologiczne

Utwory klastyczne czerwonego spągowca osadzały się w basenie, który na obszarze Polski stanowił wschodnią część południowego, europejskiego basenu permskiego. Na obszarze Polski był to typowy basen kontynentalny izolowany ze

wszystkich stron rozległymi, wyżej wyniesionymi obszarami. W permie znajdował się on w strefie podzwrotnikowej. Na skutek postępującej peneplenizacji zwiększała się radykalnie powierzchnia pokrywy osadowej, ponadto procesy tektoniki synsedymentacyjnej zachodzące we wcześniej powstałych rowach tektonicznych umożliwiały powstawanie i zachowanie osadów o znacznej miąższości, w niektórych miejscach sięgającej 1000 m (Kiersnowski, 1997; Protas et al., 2000).

Utwory piaszczyste stanowiące górny kompleks czerwonego spągowca – saksonu reprezentowane są przez typowe formacje platformowe, które osadzały się w różnych systemach depozycyjnych. Głównymi czynnikami determinującymi rozwój facji depozycyjnych były: modyfikowana ruchami tektonicznymi morfologia terenu oraz zmieniający się klimat, który doprowadził do ukształtowania się czterech głównych systemów depozycyjnych: eolicznego, fluwialnego, plał oraz systemu depozycyjnego białego spągowca. Sedymentacja odbywała się w warunkach klimatu ciepłego i suchego. Dominowała w nim sedymentacja eoliczna oraz fluwialna powiązana z systemem depozycyjnym plał. Na obszarach obniżonych, występujących w centralnej części basenu polskiego, związanych ze strefami o największej subsydencji, panowały warunki sprzyjające sedymentacji osadów jeziornych – plał, natomiast sedymentacja piaszczysta eoliczna zachodziła na obszarach częściowo wyniesionych (Kiersnowski i Buniak, 2006).

Głębokość zalegania utworów górnego czerwonego spągowca jest bardzo zróżnicowana. W Sudetach oraz w okolicach Krzeszowic odsłania się on na powierzchni, w otworze Września-IG1 nawiercony zastał na głębokości przekraczającej 4000 m, natomiast w centralnej części basenu polskiego może zalegać na głębokości nawet 10 000 m. Ich miąższość w basenie polskim jest zróżnicowana. Po północno-wschodniej stronie wału wolsztyńskiego zmienia się od 0 do 300 m, w strefie przykrawędziowej w rejonie Wrześni dochodzi do 800 m i maksymalnie do 900 m w rowie Kórnik. W ich nadkładzie, prawie na całym obszarze występowania, zalegają ewaporaty cechsztynu, których miąższość w rejonie Kujaw i Wielkopolski może przekraczać 1000 m, a niekiedy nawet 1500 m. Obecność nieprzepuszczalnych ewaporatów w nadkładzie bardzo często jest przyczyną występowania naciśnień w zalegających pod nimi warstwach utworów klastycznych czerwonego spągowca, które to naciśnienia w dużym stopniu wpływają na porowatość.

Na przestrzeni ostatnich lat w strefie przykrawędziowej wału wolsztyńskiego, jak i w głębszej części basenu w niecce poznańskiej zostało odkrytych wiele złóż gazu ziemnego, które występują na głębokościach 3500–4000 m. Z obszarem tym związane są duże nadzieje na odkrycie kolejnych złóż, przede wszystkim w pułapkach strukturalnych bezpośrednio pod uszczelnieniem cechsztyńskim, dlatego predykcja ich parametrów zbiornikowych jest bardzo ważna.

Baza danych petrograficzno-petrofizyczno-sedymentologicznych

Podstawą dla zaprezentowanych w pracy modeli były dane petrograficzno-petrofizyczno-sedymentologiczne dla 190 próbek skalnych, pobranych z materiału rdzeniowego z kilkunastu odwiertów na terenie Polski, reprezentujących osady czerwonego spągowca. Komplet danych zawierał informacje o przynależności facjalnej, wykształceniu litologicznym i składzie mineralogicznym (skład szkieletu ziarnowego i cementów). W przypadku większości próbek dysponowano również wartościami porowatości, określonej dzięki zastosowaniu porozymetrii rtęciowej i piknometrii helowej.

Przebadane próbki reprezentowały utwory czterech systemów depozycyjnych: eolicznego, fluwialnego, jeziornego (plai) oraz systemu depozycyjnego białego spągowca. Większość próbek (82%) reprezentowała utwory facji eolicznych, które na Niziu Polskim najczęściej stanowią potencjalne poziomy zbiornikowe dla złóż węglowodorów. Próbki reprezentujące utwory pozostałych facji stanowiły od 2% do 10% ogółu, co w przybliżeniu odzwierciedlało proporcje ich udziału w profilach analizowanych odwiertów. Tak mały ich udział, a także niewystarczająca liczebność próbek je reprezentujących nie tylko nie uzasadniały konieczności, lecz wręcz pozbawiała sensu tworzenia dla nich modeli litologicznych, co ostatecznie zadecydowało o opracowywaniu modelu litologicznego jedynie dla facji eolicznej. Szczegółowo charakterystyka środowisk depozycyjnych utworów czerwonego spągowca omówiona została w szeregu publikacji, np.: Buniak i Mikołajewski, 1997; Buniak et al., 1999, 2009; Aksamitowska, 2003; Kiersnowski i Buniak, 2006.

Eoliczny system depozycyjny

Facje reprezentujące eoliczny system depozycyjny zdominowane są przez arenity, w głównej mierze subarkozowe, czasem kwarcowe i sublityczne. Są to utwory drobnoziarniste i bardzo drobnoziarniste, o wysortowaniu od średniego do dobrego (zwykle średnio dobrze wysortowane).

Głównym składnikiem szkieletu ziarnowego jest kwarc, zarówno monokrystaliczny, jak i mniej liczny polikrystaliczny (tabela 1). Ziarnom kwarcu towarzyszą skaleni, najczęściej potasowe, a rzadziej plagioklasy. Wśród skaleni obserwuje się m.in. niezblźniaczony skałen potasowy i polisyntetycznie zblźniaczony mikroklin oraz mikropertyt mikroklinowy, albit szachownicowy, podrzędnie oligoklaz. Istotnym składnikiem szkieletu są również litoklasty, wśród których obecne są fragmenty skał magmowych (wylewne kwaśne – ryolitoidy i głębinowe – granitoidy), metamorficznych (łupki kwarcowo-lyszczykowe) oraz osadowych (piaskowce, mułowce, iłowce). Wymienionym składnikom mogą towarzyszyć blaszki muskowitu i minerały akcesoryczne (cyrkon, rutyl, turmalin, apatyt i tlenki żelaza).

Spośród spoiw i cementów wyróżnia się:

- matriks – utworzony jest przez mieszaninę pyłu kwarcowego, drobnych ziaren skaleni i blaszek lyszczyków, a także tlenków i wodorotlenków żelaza oraz listewek minerałów ilastych (głównie illitu). Tworzy cienkie otoczki wokół ziaren detrytycznych (rysunek 3A);
- minerały ilaste – pochodzą z rozdrobnienia i redepozycji wcześniej utworzonych osadów bądź też występują jako minerały autigeniczne (chloryty oraz illit). Chloryty obecne są w postaci drobnych blaszek lub bardzo cienkich obwódek na ziarnach detrytycznych. Illit występuje w postaci łuseczek, włókien oraz tworzy obwódki na ziarnach detrytycznych (rysunek 3B);
- minerały węglanowe – w przebadanych arenitach obserwuje się w głównej mierze kalcyt i dolomit (rysunki 3C i 3D). Kalcyt najczęściej występuje w postaci kryształów anhedralnych, tworząc spoiwa typu porowego. Dolomit jest obecny w postaci różnej wielkości romboedrów;
- minerały siarczanowe – najczęściej występuje anhydryt (rysunek 3E) oraz rzadziej baryt. Anhydryt tworzy cement porowy, złożony z pojedynczych tabliczek i ich skupień. Baryt obecny jest w postaci tabliczek;
- kwarc autigeniczny – występuje w postaci pojedynczych, euhedralnych kryształów. Miejscami tworzy syntaksjalne obwódki regeneracyjne na ziarnach kwarcu detrytycznego, które stykając się ze sobą, szczelnie wypełniają przestrzenie porowe skał (rysunek 3F).

W przebadanych skałach obserwuje się następujące procesy diagenetyczne:

- kompakcję mechaniczną i chemiczną – jest jednym z głównych i najdłużej działających procesów diagenetycznych (Buniak et al., 2009). W jej wyniku doszło do zmniejszenia objętości piaskowców, co odbywało się poprzez reorientację ziaren i ich spękań, stopniowe zagęszczanie ziaren oraz deformacje plastyczne niektórych składników. W wyniku działania kompaktacji wzrastało upakowanie ziaren szkieletu,

- a przestrzeń międzyziarnowa ulegała redukcji. Kompakcję mechaniczną utrudniała obecność usztywniających osad obwódek na ziarnach detrytycznych (obwódki ilaste, ilasto-żelaziste i kwarcowe). Kompakcja chemiczna, której efektem są wklęsło-wypukłe i zazębiające kontakty międzyziarnowe, jest obecna w minimalnym stopniu;
- cementację – obserwuje się cementację minerałami węglanowymi (kalcyt i dolomit), siarczanowymi (głównie anhydryt) oraz kwarcem autogenicznym, który tworzy cementy obwódkowe i porowe. Obwódki syntaksjalne tworzące się w diagenecie wczesnej na ziarnach kwarcu usztywniały osad, utrudniając niszczenie porowatości przez kompakcję mechaniczną. Podobną rolę pełniły obwódki ilasto-żelaziste;
 - rozpuszczanie – jest efektem aktywności roztworów porowych krążących w osadzie (Kuberska et al., 2008). Ślady powierzchniowego korodowania obserwowane są na powierzchniach ziaren detrytycznych (głównie skaleni, po których nierzadko zostały jedynie obwódki) oraz w obrębie kryształów cementów węglanowych, anhydrytowych i kwarcowych. Rozpuszczanie spowodowało wytworzenie się porowatości wtórnej, wzrost średnicy porów i rozwój kapilar (Buniak et al., 2009);
 - zastępowanie – proces ten ma ścisły związek z cementacją. Obserwuje się częściowe lub całkowite pseudomorfozy kalcytowe po ziarnach detrytycznych. Zastępowaniu ulegały głównie ziarna skaleni, w części także okruchy wulkaniczne. Proces ten nie miał znaczenia dla rozwoju porowatości osadów;
 - przeobrażanie – zjawiska przeobrażania, polegające na niszczeniu starych i tworzeniu nowych faz mineralnych, przyczyniły się do rozwoju porowatości wtórnej. W analizowanych piaskowcach obecny jest diagenetyczny illit, mogący być produktem przeobrażeń skaleni i okruchów wulkanitów (Kuberska, 2004).

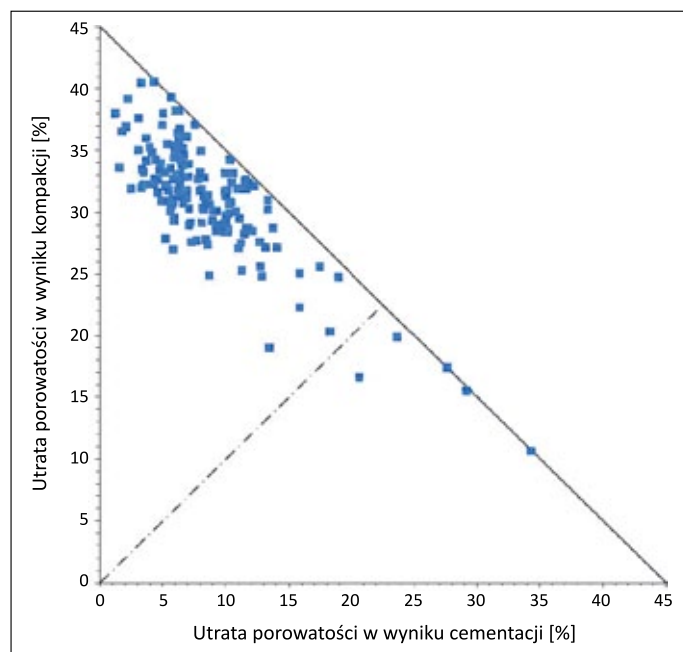
Przebadane próbki charakteryzują się porowatością na poziomie od 2% do 28% (średnio 10,5%; rysunek 2). Na zachowanie pierwotnej porowatości negatywny wpływ miały kompakcja i cementacja, natomiast proces rozpuszczania ziaren (głównie skaleni i litoklastów) przyczynił się do jej zwiększenia. Stosując metodykę zaproponowaną przez Lundegarda (1992), zbadano wpływ kompakcji i cementacji na utratę pierwotnej porowatości analizowanych skał. W przypadku zdecydowanej większości skał procesem mającym największy wpływ na utratę porowatości okazała się kompakcja. Wyniki przedstawiono na rysunku 1.

Przebadano również zmienność udziału cementów oraz porowatości w odniesieniu do głębokości. Obserwuje się trend spadku porowatości wraz ze wzrostem głębokości, natomiast zmienność udziału cementów nie wydaje się z nią powiązana

Tabela 1. Zakres zmienności udziału głównych składników szkieletu oraz typów spoiw w utworach eolicznego systemu dyspozycyjnego

Table 1. Content ranges of main rock components of the aeolian depositional system sediments

Główne składniki szkieletu i typy spoiw		Zakres zmienności udziału [%]	Średni udział [%]
Szkielet ziarnowy – główne składniki	kwarc	45–79	64
	skalenie	0–10	5
	litoklasty	0–10	3
Typy spoiw	matriks	0–33	8
	minerały ilaste	0–12	1
	węglany	0–35	7
	siarczany	0–22	1
	kwarc autogeniczny	0–12	3
Porowatość		2–28	11



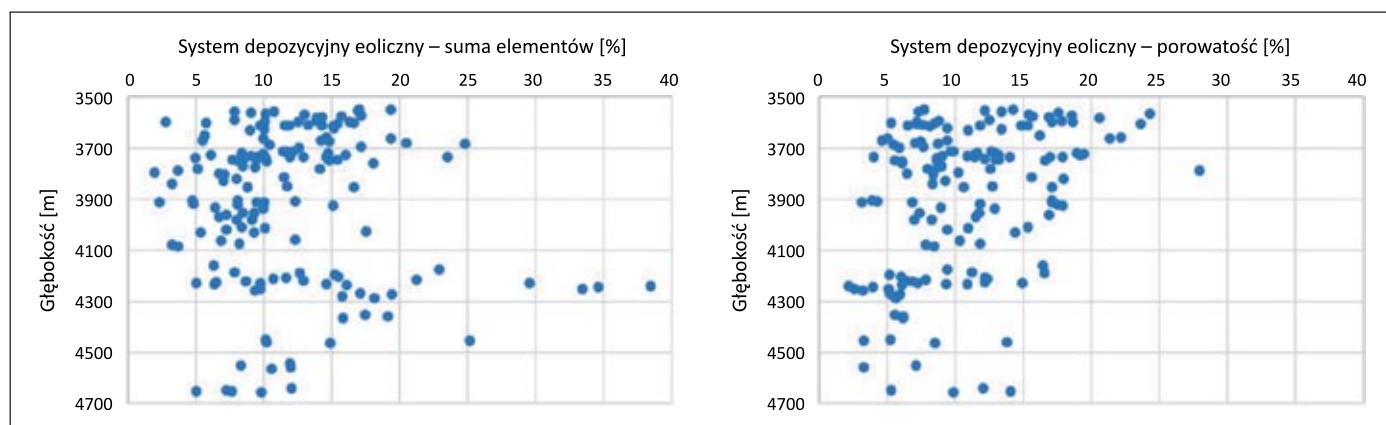
Rysunek 1. Wpływ kompakcji i cementacji na redukcję pierwotnej porowatości w odniesieniu do eolicznego systemu depozycyjnego

Figure 1. The influence of compaction and cementation processes on the reduction of primary porosity

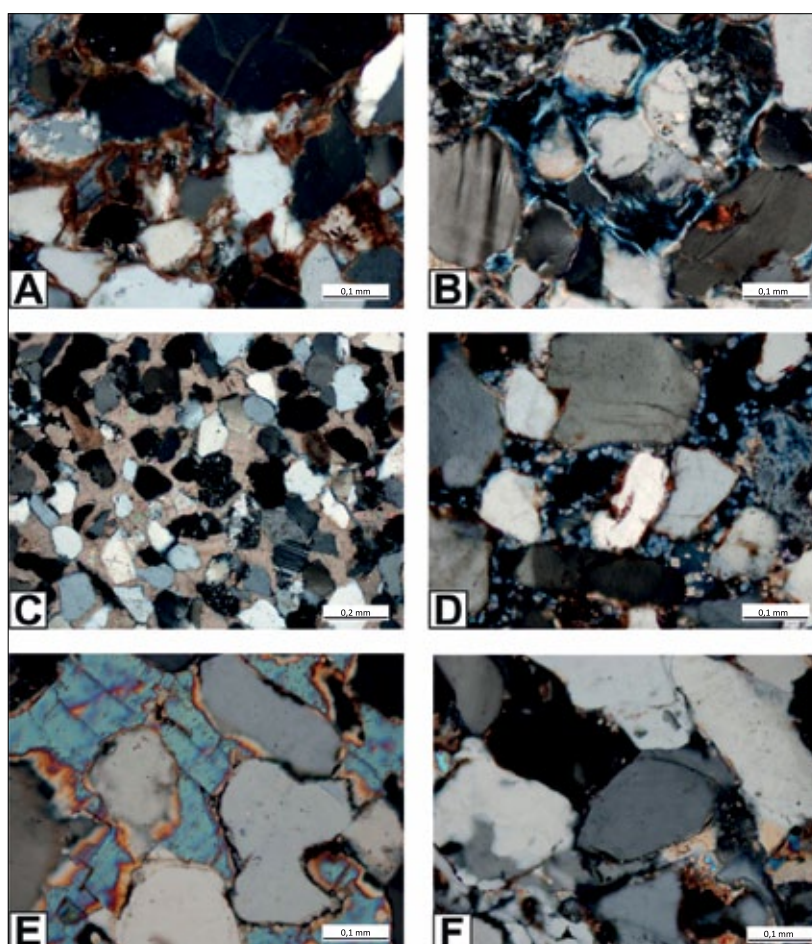
(rysunek 2). Przykłady różnego typu cementów w przebadanych próbkach zaprezentowano na rysunku 3.

Mechanizmy kompakcji i diagenety osadów

Kompakcja osadów zachodzi na skutek zjawisk czysto mechanicznych, jak i mechaniczno-chemicznych. Jednym z najważniejszych czynników determinujących jej efektywność jest wielkość naprężenia efektywnego, definiowanego



Rysunek 2. Udział cementów i porowatość utworów reprezentujących eoliczny system depozycyjny w odniesieniu do głębokości
Figure 2. Content of cements and porosity in sediments representing the aeolian depositional system in relation to depth



Rysunek 3. Najczęstsze typy spoiw w przebadanych próbkach. A – Spoiwo ilasto-żelaziste typu matriks w bardzo drobnoziarnistej wacie kwarcowej; B – autigeniczne minerały ilaste w przestrzeni porowej bardzo drobnoziarnistego arenitu subarkozowego; C – porowy cement kalcytowy o charakterze bazalnym, redukujący w znacznym stopniu przestrzeń porową w bardzo drobnoziarnistym arenicie subarkozowym; D – cement węglanowy wykształcony w postaci niewielkich romboedrów dolomitu w drobnoziarnistym arenicie subarkozowym; E – cement siarczanowy (anhydryt) krystalizujący w przestrzeni porowej drobnoziarnistego arenitu subarkozowego; F – cement kwarcowy w postaci niepełnych obwódek na ziarnach detrytycznych w bardzo drobnoziarnistym arenicie kwarcowym; A–F – nikole X

Figure 3. The most common types of cements in the analyzed samples. A. Clay-iron matrix in a very fine-grained quartz wacke; B – authigenic clay minerals in the pore space of very fine-grained subarkose; C – basal calcite cement, significantly reducing the pore space in very fine-grained subarkose; D – carbonate cement developed in the form of small, dolomite crystals in fine-grained subarkose; E – sulphate cement (anhydrite) crystallizing in the pore space of fine-grained subarkose; F – quartz cement in the form of incomplete rims on detrital grains in very fine-grained quartz arenite; A–F – crossed nicols

jako różnica pomiędzy ciśnieniem litostatycznym a ciśnieniem porowym (Terzaghi, 1923). Głównym jej skutkiem jest redukcja pierwotnej miąższości i porowatości osadów, która następuje w trakcie ich pograżania. Duży wpływ na efektywność i przebieg kompaktacji mechanicznej skał klastycznych ma skład mineralny materiału detrytycznego, wielkość ziaren, ich kształt i wysortowanie. Rosnący nacisk sedymentującego nadkładu powoduje pękanie i przemieszczanie się ziaren, co wymusza przepływ wód porowych powodujących reorientację ziaren, co w efekcie prowadzi do zagęszczenia osadu (Athy, 1930; Chuhan et al., 2002; Chester et al., 2004).

Kompaktacja chemiczna, polegająca na rozpuszczaniu i wytrącaniu minerałów (co prowadzi do zmniejszenia porowatości i zwiększenia gęstości), determinowana jest przez zupełnie inne czynniki niż kompaktacja mechaniczna. Reakcje chemiczne zarówno w piaskowcach, jak i mułowcach są kontrolowane przez termodynamikę i kinetykę i przebiegają w kierunku bardziej stabilnego zespołu minerałów o niższej energii swobodnej Gibbsa (Bjørlykke, 2014). Rozpuszczanie chemiczne zasadniczo zachodzi na kontaktach ziaren. Obecność substancji organicznej jest czynnikiem przyspieszającym reakcję rozpuszczania pod ciśnieniem. Jego efektami są wklęsło-wypukłe lub zazębające kontakty ziaren będące efektem rozpuszczania pod ciśnieniem (Bjørlykke, 1989; Walderhaug i Bjørkum, 2003).

Na małych głębokościach, ze względu na przepływ wód gruntowych, rozpuszczenie składników, dyfuzję i parowanie, może dochodzić do wytrącania cementów z roztworów. Pomimo to na małych głębokościach udział zagęszczania mechanicznego skał osadowych jest większy niż mechaniczno-chemicznego, podczas gdy na większych głębokościach jest odwrotnie. Strefa przejściowa dla piaskowców znajduje się prawdopodobnie na głębokości około 1,5 km (Schmidt i McDonald, 1979; Bloch et al., 1986). Efektywność kompaktacji piaskowców zależy również od ich granulacji, co w swoich pracach wykazywali m.in. Schneider et al. (1996) i Walderhaug (2000).

Zarówno kompaktacja mechaniczna, jak i chemiczna skał osadowych są funkcjami pierwotnego składu teksturalnego i mineralogicznego, który to skład jest kontrolowany przez wiele czynników, takich jak litologia obszaru alimentacyjnego, rodzaj transportu, środowisko depozycyjne czy też klimat. Blisko powierzchni, w strefie penetracji przez wody meteoryczne, pierwotny skład może być modyfikowany w wyniku rozpuszczania i transportu rozpuszczonych składników mineralnych. W strefie penetracji wód meteorycznych może dochodzić do tworzenia się przestrzeni porowej (porowatości wtórnej) na skutek rozpuszczania skaleni i wytrącania kaolinitu.

W głębiej pogrzebanych osadach klastycznych (2–3 km) i w wyższych temperaturach (od 70°C do 100°C) może dochodzić do rozpuszczania i wytrącania kwarcu, dlatego najważniejszymi czynnikami kontrolującymi porowatość są temperatura

i skład mineralny osadu. Generalnie w próbkach skał klastycznych obserwowana jest ujemna korelacja pomiędzy porowatością a udziałem cementu kwarcowego, przy czym udział cementu zależy od pierwotnej, skumulowanej powierzchni klastów kwarcowych dostępnej do wytrącania cementu kwarcowego (Storvoll et al., 2002; Hantschel i Kauerauf, 2009). Wielkość tej powierzchni zależy od udziału objętościowego klastów kwarcowych oraz ich granulacji. Obecność ilastych i żelazistych powłok oblekających ziarna kwarcu redukuje wielkość powierzchni dostępnej do krystalizacji kwarcu, negatywnie wpływając na krystalizację cementu kwarcowego, a tym samym na redukcję porowatości (Walderhaug, 1996, 2000; Storvoll et al., 2002). Krzemionka może uwalniać się również podczas procesu illityzacji wytrącającego się *in situ* smektytu i krystalizując, wytwarza sieć mikrokwarcu połączoną z agregatami autigenicznych kryształów illitu. Ten proces cementacji powoduje znaczącą i gwałtowną zmianę sztywności szkieletu ziarnowego na początku reżimu chemicznej kompaktacji (Bjørlykke, 2014). Przebieg tych procesów kontrolowany jest głównie przez temperaturę, co przekłada się na jej wpływ na redukcję porowatości (Schmoker i Gautier, 1988; Bjørkum et al., 1998). W bardzo drobnoziarnistych piaskowcach i mułowcach wytrącający się na powierzchni ziaren kwarcu cement kwarcowy powoduje zwężenie gardzieli porów skutkujące zmniejszeniem przepuszczalności. W efekcie dalsze pograżanie i wzrost całkowitych naprężeń prowadzą do gwałtownego wzrostu ciśnień porowych, które redukują wzrost naprężeń efektywnych i hamują proces kompaktacji mechanicznej (Terzaghi, 1923). Mechanizm ten tłumaczy często obserwowaną, anomalnie wysoką porowatość piaskowców na znacznych głębokościach.

Procesy determinujące porowatość skał opisywane były przez wielu badaczy, m.in. przez wyżej cytowanych, lecz ich kwantyfikacja, z uwagi na ich często jednoczesny przebieg i nakładające się na siebie (niekiedy przeciwne) skutki, jest niemożliwa. Dlatego prognozowanie porowatości na określonych głębokościach jest bardzo trudne. Próby predykcji porowatości podejmowało wielu autorów, tworząc modele oparte na jej empirycznych zależnościach od różnych parametrów, takich jak np.: wielkość naprężeń efektywnych, temperatura, skład petrograficzny, wielkość ziaren, jakość i ilość cementów itp.

Model kompaktacji mechanicznej

W 1930 roku Athy wykazał wykładniczą zależność porowatości od głębokości (Athy, 1930), jednakże w profilach wielu odwiertów na większych głębokościach obserwowane są często odbiegające od tej reguły anomalnie wysokie porowatości. W 1971 roku Smith występowanie tych odstępstw powiązał

ze strefami anomalnych ciśnień porowych i (wykorzystując zależność Athy'ego) wykazał wykładniczą zależność porowatości od maksymalnego naprężenia efektywnego, definiowanego jako różnica między naprężeniami całkowitymi a ciśnieniami porowymi (Smith, 1971).

Schmoker i Gautier (1988) wykazali, że porowatość piaskowców pochodzących z różnych basenów można opisać funkcją potęgową dojrzałości termicznej: $f = A(M)^B$, gdzie f to porowatość, a M to miara dojrzałości termicznej reprezentująca zintegrowaną historię czasu i temperatury; A i B to stałe dla danego piaskowca o jednorodnych właściwościach, ale pochodzącego z różnych basenów.

Do opracowania modelu kompaktacji mechanicznej piaskowców eolicznych czerwonego spągowca wykorzystano algorytm zaproponowany przez Smitha (1971) wykorzystujący zależność Athy'ego w odniesieniu do naprężeń efektywnych. Wybór ten uzasadniony był powszechnym występowaniem anomalnych ciśnień porowych w poziomach utworów czerwonego spągowca. Anomalie te wynikają z obecności w nadkładzie nieprzepuszczalnych ewaporatów i wpływają na wartości naprężeń efektywnych determinujących efektywność kompaktacji mechanicznej.

$$\phi(\sigma) = \phi_1 + (\phi_0 - \phi_1)e^{-k\sigma}$$

gdzie:

k – stała Athy'ego dla specyficznej litologii,

σ – naprężenie efektywne [MPa],

ϕ – porowatość [%],

ϕ_1 – porowatość minimalna [%] (minimalna wartość graniczna porowatości, do jakiej może zostać zredukowana w wyniku procesu kompaktacji),

ϕ_0 – porowatość inicjalna [%]

(początkowa – po zdeponowaniu, przed rozpoczęciem procesów kompaktacji).

Kompaktacja mechaniczna jest prawie nieodwracalna. W związku z tym porowatość zostaje zachowana, gdy efektywne naprężenie zmniejsza się w wyniku wyporu wód porowych, erozji lub wzrostu nadciśnienia. Można wówczas nadal stosować ogólną zależność naprężenia efektywnego od porowatości, ale z maksymalną wartością naprężenia efektywnego zamiast rzeczywistego naprężenia efektywnego.

Procedura konstrukcji modelu kompaktacji dla określonego litotypu wymaga m.in. przyjęcia założeń dotyczących granicznych wartości porowatości, tzn. wartości inicjalnej (maksymalnej – w momencie deponowania osadu) oraz minimalnej, do której wraz z pograżaniem asymptotycznie zmierza wartość porowatości. W modelach litotypów piaskowcowych wartości porowatości inicjalnych przyjmowane są w granicach 40–45%, a porowatości minimalnych na ogół 1% (Walderhaug, 2000; Hantschel i Kauerauf, 2009). Ponadto w przypadku wykorzystywania algorytmu Athy'ego należy iteracyjnie dobrać taką wartość stałej Athy'ego, dla której uzyskuje się najlepsze dopasowanie krzywej kompaktacji do pomiarów porowatości, które to pomiary wykorzystywane są jako dane kalibracyjne.

W opracowanym modelu jako inicjalną wartość porowatości przyjęto 45%, a wartości porowatości minimalnej 1%. Najlepsze dopasowanie krzywej kompaktacji do wartości pomiarowych uzyskano dla wartości stałej Athy'ego k wynoszącej 33 GPa^{-1} . Kalibracji modelu dokonano, wykorzystując wyniki badań petrograficznych z odwiertu G-2 (rysunek 4). Należy przy tym zaznaczyć, że do tego celu nie użyto obecnych porowatości (objętości porów), lecz objętości przestrzeni międzyziarnowych, definiowanych jako suma objętości porów i cementów, które znane były z analiz mikroskopowych (tabela 2). Takie podejście pozwala na oddzielną ocenę ilościowych udziałów procesów kompaktacji mechanicznej i cementacji w całkowitej redukcji porowatości.

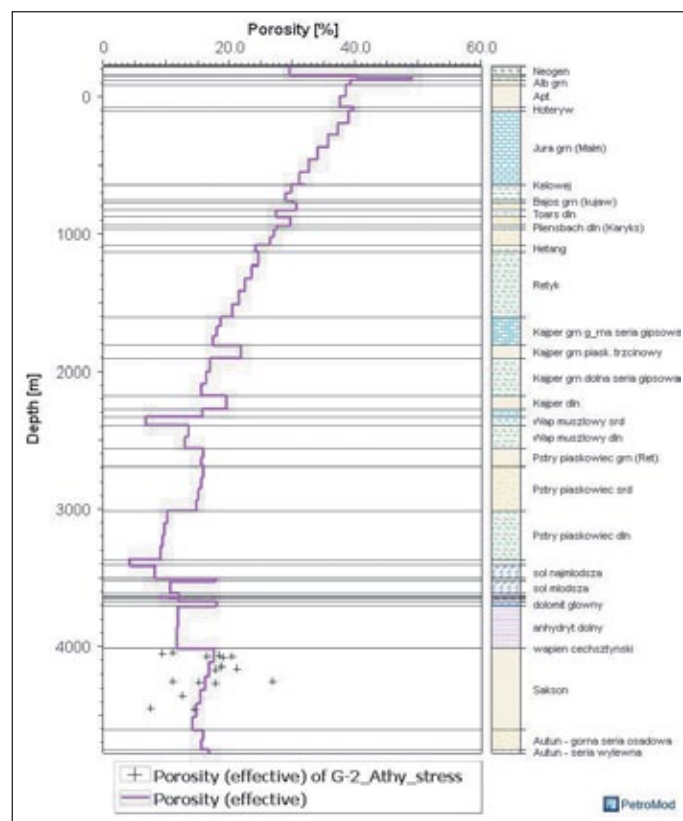
Tabela 2. Bilans objętościowy składu petrograficznego próbek piaskowców górnego czerwonego spągowca z odwiertu G-2

Table 2. Volume balance of the petrographic composition of Upper Rotliegend sandstone samples from the G-2 well

Głębokość [m]	Udział objętościowy [%]					
	szkielet	kwarc	matriks	cement	pory	pory + cement
4251,50	73,57	70,22	15,50	9,73	1,20	10,93
4259,40	77,74	70,97	12,90	9,35	0,00	9,35
4268,25	72,59	68,72	9,03	17,10	1,27	18,37
4274,35	79,05	72,07	0,63	19,37	0,94	20,31
4279,20	77,38	72,13	6,23	15,74	0,65	16,39
4286,00	78,34	70,04	2,67	18,10	0,88	18,98
4351,25	79,45	66,99	1,87	17,45	1,23	18,68
4359,50	78,24	69,58	0,60	19,11	2,05	21,16
4367,70	79,06	71,96	3,23	15,81	1,90	17,71
4450,90	71,14	63,10	17,86	10,12	0,88	11,00
4454,95	73,10	66,88	0,00	25,16	1,74	26,90

cd. Tabela 2/cont. Table 2

Głębokość [m]	Udział objętościowy [%]					
	szkielet	kwarc	matriks	cement	pory	pory + cement
4460,60	82,64	74,93	2,20	10,19	4,96	15,15
4465,75	76,33	66,23	5,94	14,85	2,88	17,73
4558,25	69,36	63,23	18,07	11,94	0,64	12,58
4647,40	73,04	71,16	19,44	7,21	0,31	7,52
4656,40	80,00	71,38	5,65	9,81	4,53	14,35



Rysunek 4. Kalibracja modelu kompaktacji mechanicznej piaskowców górnego czerwonego spągowca z wynikami danych pomiarowych próbek z odwiertu G-2

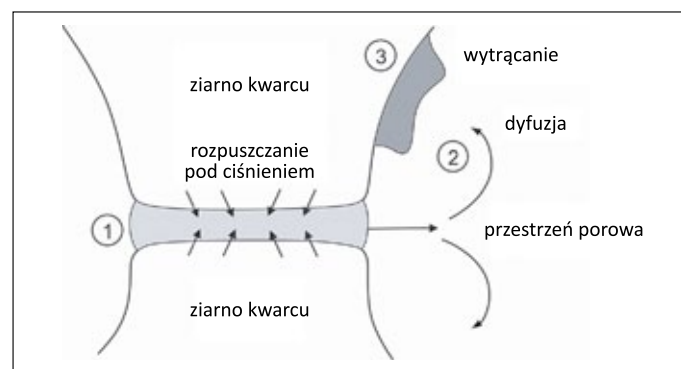
Figure 4. Calibration of the mechanical compaction model of the Upper Rotliegend sandstones with the results of laboratory measurements of samples from the G-2 well

Model diagenety

Diageneza jest tu definiowana jako sumaryczny efekt kompaktacji chemicznej rozumianej jako rozpuszczanie ziaren mineralnych i cementacji osadu – procesów prowadzących finalnie do redukcji porowatości, która następuje wraz z pograżaniem na skutek wzrostu naprężeń efektywnych.

Ilościową oceną tych procesów zajmowało się wielu autorów, którzy wyniki swych prac opublikowali w bogatej literaturze (m.in. Schneider et al., 1996; Walderhaug, 2000; Walderhaug et al., 2000).

Cementację kwarcu można rozpatrywać jako proces trzyetapowy: rozpuszczanie kwarcu na styku ziarno–ziarno, transport rozpuszczonej krzemionki w przestrzeni porów i wytrącanie krzemionki na powierzchni wolnych ziaren kwarcu (Walderhaug, 1996; Walderhaug i Bjorkun, 2003). Transport substancji rozpuszczonych odbywa się poprzez dyfuzję lub przepływ wody w porach. Wszystkie trzy procesy (rozpuszczanie, transport substancji rozpuszczonej i wytrącanie) mają różny wpływ na redukcję porowatości i zmianę ciśnienia w porach. Szybkość cementowania jest kontrolowana przez wiele czynników: przepływ i skład chemiczny wody, temperaturę, całkowite naprężenie pionowe i ciśnienie w porach. Natężenie przepływu wody zależy od przepuszczalności sąsiednich skał, a skład chemiczny wody charakteryzuje się rozpuszczonymi minerałami i wartością pH. Podczas rozpuszczania objętość skały stalej zmniejsza się o ilość rozpuszczonego kwarcu, przy czym objętość porów wzrasta o tę samą ilość (Schneider et al., 1996). Wytrącanie krzemionki jako cementu występuje na powierzchniach ziaren, preferując przewężenia porów, co znacznie zmniejsza przepuszczalność. W wyniku wytrącania się krzemionki zwiększa się ilość materiału stałego i w tej samej mierze zmniejsza przestrzeń porów. Cały proces daje znacznie



Rysunek 5. Schemat chemicznej kompaktacji piaskowców: 1 – rozpuszczanie pod ciśnieniem krzemionki do wody porowej; 2 – dyfuzja rozpuszczonej krzemionki w porach; 3 – wytrącanie krzemionki przy ziarnach kwarcu

Figure 5. Scheme of chemical compaction of sandstones: 1 – dissolution of silica into pore water under pressure; 2 – diffusion of dissolved silica in pores; 3 – precipitation of silica near quartz grains

niższą porowatość przy wysokich efektywnych naprężeniach, niż wynikałoby to z czystej mechanicznej kompaktacji.

Twórcy programów wykorzystywanych do modelowania systemów naftowych nie oferują domyślnych modeli kompaktacji chemicznej dla standardowych litologii, jednakże udostępniają narzędzie umożliwiające ich konstrukcję i implementację do modeli symulacyjnych. Modele kompaktacji chemicznej definiują przebieg procesów diagenetycznych takich jak cementowanie, które mają ostateczny wpływ na rozwój porowatości.

Schneider et al. (1996) w zaproponowanym modelu utratę porowatości wiążą ze wzrostem naprężenia efektywnego wzrastającego na skutek rozpuszczania kwarcu na styku ziaren. Szybkość utraty porowatości jest proporcjonalna do lepkości osadu, której wartość spada wraz ze wzrostem temperatury.

Model diagenety Walderhauga (2000) definiuje ilościowo redukcję porowatości jako efektu procesu cementacji kwarcowej, którego tempo kontrolowane jest przez temperaturę i powierzchnię kwarcu dostępną dla wytrącania krzemionki. Wielkość tej powierzchni zależy od udziału objętościowego klastów kwarcowych, ich średniej wielkości oraz udziału powierzchni ziaren pokrytej powłoką (ilasto-żelazistą), zapobiegającą wytrącaniu krzemionki.

Na podstawie cech mineralogicznych i teksturalnych piaskowców eolicznych czerwonego spągowca do opracowania dla niego modelu diagenety wykorzystano dostępny w programie PetroMod algorytm zaproponowany przez Walderhauga (2000), w którym szybkość utraty porowatości spowodowanej wytrącaniem kwarcu wyrażona jest zależnością:

$$\frac{\partial \phi_c}{\partial t} = - \frac{M_q}{\rho_q} \frac{6(1-f_q)f_v}{d_q} \frac{\phi}{\phi_0} A e^{-E/RT}$$

gdzie:

f_q – współczynnik pokrycia ziaren kwarcu powłoką ilasto-żelazistą (od 0 do 1), zapobiegającą wytrącaniu krzemionki (wartość 1 – całkowity brak możliwości cementacji),

f_v – ułamek udziału objętościowego ziaren detrytycznych kwarcu w próbce (od 0 do 1),

d_q – średnia średnica ziaren kwarcu [cm],

A – współczynnik częstości Arrheniusa [mol/cm²/s],

E – energia aktywacji wytrącania kwarcu [kcal/mol],

M_q – masa molowa kwarcu [kg/mol],

ρ_q – gęstość kwarcu [kg/m³],

R – stała gazowa (8,3145 [J·mol⁻¹·K⁻¹]),

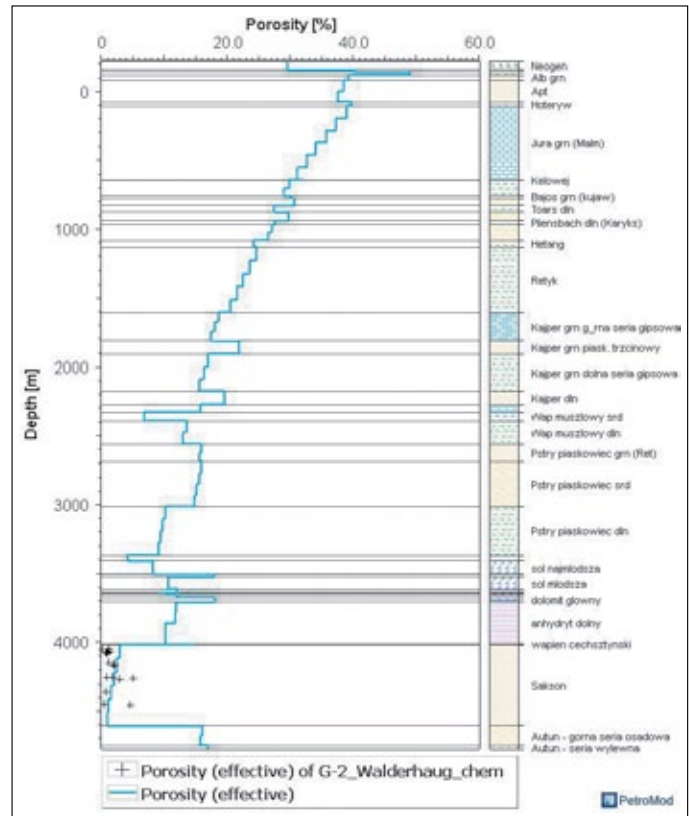
ϕ – porowatość w bieżącym kroku czasowym [%],

ϕ_0 – porowatość inicjalna [%].

Stałe parametry to: $M_q = 0,06009$ kg/mol, $\rho_q = 2650$ kg/m³, $R = 8,31447$ J·mol⁻¹·K⁻¹.

Wyniki badań petrograficznych były podstawą do przyjęcia w opracowanym modelu następujących wartości

poszczególnych parametrów: $f_q = 0,1$; $f_v = 0,6$; $d_q = 0,025$ cm; $\phi_0 = 45\%$. Kalibracja modelu polegała na iteracyjnym doborze parametrów kinetycznych reakcji wytrącania kwarcu, do momentu uzyskania optymalnego dopasowania krzywej kompaktacji (porowatości) do wyników pomiarów porowatości piaskowców eolicznych czerwonego spągowca z odwiertu G-2 (rysunek 6). Efekt osiągnięto dla wartości $E_a = 15,87$ kcal/mol i $A = 9^{-12}$ mol/cm²/s.



Rysunek 6. Kalibracja modelu diagenety piaskowców górnego czerwonego spągowca wynikami danych pomiarowych próbek z odwiertu G-2

Figure 6. Calibration of the Upper Rotliegend sandstone diagenesis model with the results of laboratory measurements of samples from the G-2 well

Podsumowanie

Prognozowanie porowatości skał zalegających na określonych głębokościach jest trudne ze względu na równoczesny przebieg szerokiego spektrum złożonych i oddziałujących na siebie procesów oraz konieczność uwzględnienia wielu parametrów (np. składu mineralnego, temperatury, naprężeń efektywnych), które determinują ich przebieg i efektywność.

Procesy kompaktacji mechanicznej oraz chemicznej (rozpuszczanie i cementacja) są kluczowe dla redukcji porowatości piaskowców eolicznych czerwonego spągowca. Mechaniczna kompaktacja dominuje w płytkich warstwach, podczas gdy chemiczna zyskuje na znaczeniu na większych głębokościach.

Występowanie w piaskowcowych utworach czerwonego spągowca nadeisnień porowych, które spowodowane jest obecnością w ich nadkładzie nieprzepuszczalnych ewaporatów cechstyńskich, wpływa na zachowanie porowatości, co tłumaczy anomalnie wysoką porowatość na dużych głębokościach. Ewaporaty działają jako uszczelnienie dla złóż węglowodorów, co czyni je istotnym czynnikiem w modelowaniu parametrów zbiornikowych.

Opracowane modele kompaktacji mechanicznej i diagenety skutecznie opisują zmiany porowatości w piaskowcach eolicznych czerwonego spągowca. Model kompaktacji mechanicznej bazujący na zależności Athy'ego (w odniesieniu do naprężenia efektywnego) pozwala na ilościową predykcję redukcji ich porowatości w warunkach anomalnych ciśnień porowych. Model diagenety oparty na algorytmie Walderhauga, który tempo cementacji kwarcowej uzależnia głównie od temperatury i powierzchni dostępnej do wytrącania cementu, umożliwia ilościowe odwzorowanie utraty porowatości piaskowców na skutek procesu cementacji. Modele zostały skalibrowane z wykorzystaniem wyników pomiarów porowatości z odwiertu G-2.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Opracowanie modeli kompaktacji dla piaskowców czerwonego spągowca na podstawie wyników badań mikroskopowych próbek rdzeniowych z wybranych profili odwiertów*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0065/SG/2023, nr archiwalny: DK-4100-0048/2023.

Literatura

- Aksamitowska A., 2003. Środowiska sedymentacji i rozwój depozycji osadów górnego czerwonego spągowca w rejonie Poznania. *Przegląd Geologiczny*, 51(2): 168–174.
- Athy L.F., 1930. Density, porosity and compaction of sedimentary rocks. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 14(1): 1–24. DOI: 10.1306/3D93289E-16B1-11D7-8645000102C1865D.
- Björkum A., Oelkers E., Nadeau P., Walderhaug O., Murphy W., 1998. Porosity prediction in quartzose sandstones as a function of time, temperature, depth, stylolite frequency, and hydrocarbon saturation. *American Association Petroleum Geologists Bulletin*, 82(4): 637–648.
- Björlykke K., 1989. *Sedimentology and Petroleum Geology*. Springer-Verlag, Berlin.
- Björlykke K., 2014. Relationships between depositional environments, burial history and rock properties. Some principal aspects of diagenetic processes in sedimentary basins. *Sedimentary Geology*, 301: 1–14. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2013.12.002.
- Bloch S., Suchecki R.K., Duncan J.R., Björlykke K., 1986. Porosity prediction in quartz-rich sandstones: Middle Jurassic. Haltenbanken Area, offshore central Norway. *American Association Petroleum Geologists Bulletin*, 70: 567.
- Buniak A., Kuberska M., Kiersnowski H., 2009. Petrograficzno-petrofizyczna charakterystyka piaskowców eolicznych strefy Siekierki–Winna Góra (koło Poznania) w aspekcie poszukiwań złóż gazu zamkniętego w osadach czerwonego spągowca. *Przegląd Geologiczny*, 57(4): 328–334.
- Buniak A., Mikołajewski Z., 1997. Środowiska depozycyjne, petrografia i diagenety osadów czerwonego spągowca w rejonie Poznania. *Geologos*, 2: 201–214.
- Buniak A., Mikołajewski Z., Protas A., 1999. Depositional environment and petrology of Rotliegend deposits from Unisław–Waldowo Królewskie region. *Geologos*, 4: 5–27.
- Chester J.S., Lenz S.C., Chester F.M., Lang R.A., 2004. Mechanisms of compaction of quartz sand at diagenetic conditions. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(3–4): 435–451. DOI: 10.1016/S0012-821X(04)00054-8.
- Chuhan F., Kjeldstad A., Björlykke K., Høeg K., 2002. Porosity loss in sand by grain crushing: experimental evidence and relevance to reservoir quality. *Marine and Petroleum Geology*, 19(1): 39–53. DOI: 10.1016/S0264-8172(01)00049-6.
- Hantschel T., Kauer A.I., 2009. Fundamentals of Basin and Petroleum Systems Modeling. *Springer*. DOI: 10.1007/978-3-540-72318-9.
- Kiersnowski H., 1997. Depositional development of the Polish Upper Rotliegend Basin and evolution of its sediment source areas. *Kwartalnik Geologiczny*, 41(4): 433–456.
- Kiersnowski H., Buniak A., 2006. Evolution of the Rotliegend Basin of northwestern Poland. *Geological Quarterly*, 50(1): 119–138.
- Kuberska M., 2004. Diagenety osadów czerwonego spągowca w strefie Szczecinek–Bydgoszcz (Pomorze Zachodnie). *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 411: 87–168.
- Kuberska M., Maliszewska A., Grotek I., 2008. Diagenety a rozwój przestrzeni porowej w piaskowcach górnego czerwonego spągowca Pomorza Zachodniego. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 430: 43–64.
- Lundegard R.D., 1992. Sandstone porosity loss – A „big picture” view of the importance of compaction. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62: 250–260.
- Maćkowski T., 2008. Analiza karbońsko-dolnopermjskiego systemu naftowego w aspekcie poszukiwań pól litologicznych i strukturalnych w utworach czerwonego spągowca w strefie Śrem–Koszalin–Konin. *Rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków*.
- Protas A., Kiersnowski H., Buniak A., Mikołajewski Z., 2000. Czerwony spągowiec podłoża Wielkopolski. [W:] Biernacka J., Skoczylas J. (red.), *Geologia i ochrona środowiska Wielkopolski. 71. Zjazd Polskiego Towarzystwa Geologicznego, Poznań*.
- Schmidt V., McDonald D.A., 1979. The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis. *Special Publications of SEPM*. DOI: 10.2110/pec.79.26.0175.
- Schmoker J.W., Gautier D.L., 1988. Sandstone porosity as a function of thermal maturity. *Geology*, 16: 1007–1010. DOI: 10.1130/0091-7613(1988)016<1007:SPAAFO>2.3.CO;2.
- Schneider F., Potdevin J.L., Wolf S., Faille I., 1996. Mechanical and chemical compaction model for sedimentary basin simulators. *Tectonophysics*, 263(1): 307–317. DOI: 10.1016/S0040-1951(96)00027-3.
- Smith J.E., 1971. The dynamics of shale compaction and evolution of pore-fluid pressures. *Mathematical Geology*, 3(3): 239–263. DOI: 10.1007/BF02045794.
- Storvoll V., Björlykke K., Karlsen D., Saigal G., 2002. Porosity preservation in reservoir sandstones due to grain-coating illite: a study of the Jurassic Garn Formation from the Kristin and Lavrans fields, offshore Mid-Norway. *Marine and Petroleum Geology*, 19(6): 767–778. DOI: 10.1016/S0264-8172(02)00035-1.
- Terzaghi K., 1923. Die Berechnung der Durchlässigkeitsziffer des Tones im Verlauf der hydrodynamischen Spannungserscheinungen. *Akademie Wissenschaft Vienna, Math. –Naturwissenschaft Klasse IIa*, 132: 125–138.
- Walderhaug O., 1996. Kinetic modeling of quartz cementation and porosity loss in deeply buried sandstone reservoirs. *AAPG Bulletin*, 80(5): 731–745. DOI: 10.1306/64ED88A4-1724-11D7-8645000102C1865D.

- Walderhaug O., 2000. Modeling quartz cementation and porosity in Middle Jurassic Brent Group sandstones of the Kvitebjørn Field, Northern North Sea. *AAPG Bulletin*, 84(9): 1325–1339. DOI: 10.1306/A9673E96-1738-11D7-8645000102C1865D.
- Walderhaug O., Bjørkum P.A., 2003. The effect of stylolite spacing on quartz cementation in the Lower Jurassic Stø Formation in well 7120/6-1, southern Barents Sea. *Journal of Sedimentary Research*, 73: 145–155. DOI: 10.1306/090502730146.
- Walderhaug O., Lander R.H., Bjørkum P.A., Oelkers O.E., Bjørlykke K., Nadeau P.H., 2000. Modelling of quartz cementation and porosity in reservoir sandstones: examples from the Norwegian Continental Shelf. *International Association of Sedimentologists Special Publication*, 29: 39–49. DOI: 10.1002/9781444304237.ch3.
- Warnecki M., 2011. Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z programem ich monitorowania. 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. 362/KB, *Archiwum Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego, Kraków*.
- Warnecki M., 2012. Analiza możliwości pozyskiwania pozabilansowych zasobów gazu ziemnego z nasyconych poziomów solankowych w procesach sekwestracji CO₂. Nr zlec. 0068/KB, *Archiwum Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego, Kraków*.
- Warnecki M., 2013. Analiza możliwości pozyskania pozabilansowych zasobów gazu ziemnego z nasyconych poziomów solankowych w procesach sekwestracji CO₂. *Nafta-Gaz*, 69(1): 34–41.



Dr Konrad ZIEMIANIN
Adiunkt w Zakładzie Geologii i Geochemii
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: konrad.ziemianin@inig.pl



Mgr inż. Tomasz SŁOCZYŃSKI
Główny specjalista inżynierjno-techniczny
w Zakładzie Geologii i Geochemii
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: tomasz.sloczynski@inig.pl



Mgr inż. Karol SPUNDA
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie
Geologii i Geochemii
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: karol.spunda@inig.pl