

Jadwiga Zalewska, Marek Dohnalik
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Anna Poszytek
Uniwersytet Warszawski

Charakterystyka przestrzeni porowej utworów czerwonego spągowca na podstawie rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej

Wstęp

Badanie porowatości skał w aspekcie ich własności kolektorskich i drożności przestrzeni porowej, warunkującej migrację mediów, należy do ważniejszych zastosowań rentgenowskiej tomografii komputerowej [np. 4].

Mikrotomografia rentgenowska (micro-CT) umożliwia wizualizację wewnętrznej struktury obiektów, determinowaną przez różnice w gęstości. Na jej podstawie otrzymujemy duże ilości równoległych przekrojów 2D, które pozwalają na trójwymiarowe odwzorowanie wybranych właściwości [m.in. 1-5].

W tym opracowaniu przedstawiono wyniki uzyskane z użyciem mikrotomografu rentgenowskiego Benchtop 160CT. Pomiaru wykonano przy napięciu lampy 110 kV oraz natężeniu 73 μA . Czas skanowania dla jednej próbki wynosił około 4 godzin. Woksel miał około 6 μm dla próbek o średnicy 10 mm.

Badaniom poddano próbki walcowe o średnicy 1 cm, ponieważ dla takiego rozmiaru próbek możliwe było zastosowanie dwudziestodwukrotnego powiększenia podczas wykonywania pomiaru, co bezpośrednio przełożyło się na otrzymanie dobrej rozdzielczości uzyskanych obrazów (na poziomie 5,8 μm) i umożliwiło bardzo dobrą wizualizację mikrostruktury.

Próbka była skanowana z umieszczonym na jej górze wzorcem gęstości. Celem tej operacji było sprawdzenie, czy warunki pomiaru dla próbki były rzeczywiście jednakowe i porównywalne. Z każdego pomiaru uzyskano około 3000 projekcji dla jednej próbki, a każda z nich powstała z uśrednienia dwóch projekcji wykonanych dla danej pozycji manipulatora, w celu poprawy stosunku sygnału do szumu.

Wyniki

Interpretacja danych mikrotomografii rentgenowskiej obejmowała analizę jakościową i ilościową, w oparciu o uzyskane wizualizacje 3D oraz wykresy krzywych kumulacyjnych i krzywych rozkładu z porozymetrii rてciowej, a także została uzupełniona wynikami badań mikroskopowych opisujących czynniki, które mogły doprowadzić do ukształtowania obecnej sieci porowej.

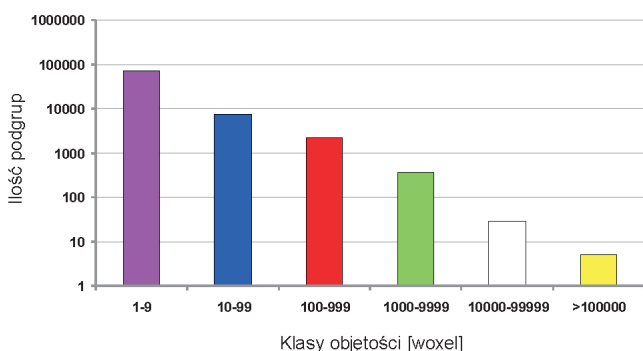
W pierwszej kolejności wykonano przestrzenną wizualizację pierwotnej struktury całej skały, a następnie przeprowadzono analizę rozkładu porowatości, która bazowała

na podziale sieci porowej na podgrupy. Każda z podgrup to zespół porów połączonych ze sobą, lecz nieskomunikowanych z innymi podgrupami. Podgrupy zostały podzielone na klasy ze względu na swoją objętość. Jednostką klas objętości był woksel. Woksel to w grafice trójwymiarowej najmniejszy element przestrzeni. W grafice dwuwymiarowej jego odpowiednikiem jest piksel. W wykonanych badaniach 1 woksel miał wymiary $6 \times 6 \times 6 \mu\text{m}^3$, czyli 1 woksel = 216 μm^3 i była to najmniejsza objętość, jaką można zdiagnozować przy użyciu tego mikrotomografu.

W każdej z próbek wydzielono sześć podtypów porów, największych pod względem objętościowym:

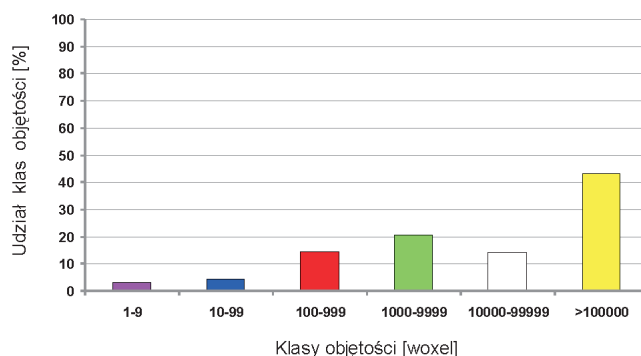
- I. 1-9 wokseli – (kolor fioletowy),
- II. 10-99 wokseli – (kolor niebieski),
- III. 100-999 wokseli – (kolor czerwony),
- IV. 1000-9999 wokseli – (kolor zielony),
- V. 10000-99999 wokseli – (kolor biały),
- VI. > 100000 wokseli – (kolor żółty),

co zostało zilustrowane na wykresach, które wykonano w dwóch wersjach. Pierwszy przedstawia wykres liczebności podgrup w poszczególnych klasach objętości, pokazujący jak bardzo podzielona jest dana klasa (rysunek 1). Drugi to wykres rozkładu klas objętości sieci porowej (rysunek 2) i na jego podstawie możliwa była przybliżona analiza statystyczna tej sieci. Uzyskane wykresy rozkładu były porównywane z rozkładem normalnym Gauss'a i na tej podstawie klasyfikowane pod względem skośności czy dominanty. Podstawą tej oceny nie był jednak zbiór danych,

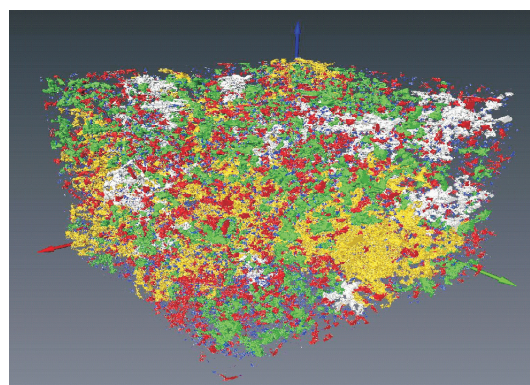


Rys. 1. Wykres liczebności podgrup w poszczególnych klasach objętości (przykładowa próbka 7468A)

tylko uzyskany wykres, stąd jest to analiza przybliżona. Rysunek 3 przedstawia dystrybucję przestrzenną poszczególnych klas porów dla przykładowej próbki 7468A, gdzie każdej klasie objętości odpowiada jeden kolor.



Rys. 2. Wykres przedstawiający procentowy udział poszczególnych klas porów (przykładowa próbka 7468A)



Rys. 3. Obraz przedstawiający dystrybucję przestrzenną poszczególnych klas objętości (przykładowa próbka 7468A)

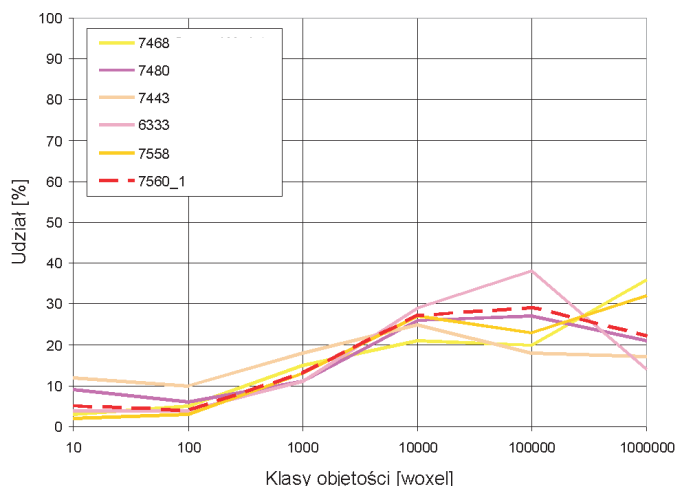
Typy skał zbiornikowych

Badane próbki piaskowców czerwonego spągowca podzielono na dwie grupy genetyczne: twory eoliczne i fluwialne, z uwzględnieniem podgrup sieci porowej w każdej z nich. Po analizie obrazów przedstawiających dystrybucję przestrzenną klas objętości dla poszczególnych próbek dokonano wydzielenia podtypów A, B, C w każdym typie osadów. Zaprezentowaną klasyfikację wzbogacono o trójwymiarowe obrazy przedstawiające przestrzenny rozkład poszczególnych klas objętości w próbkach.

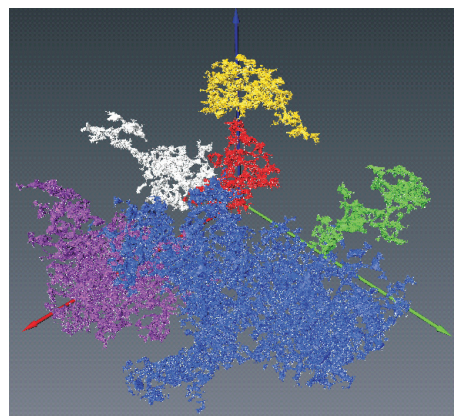
PIASKOWIEC EOLICZNY TYP A – charakteryzuje się tym, że we wszystkich próbkach występuje VI klasa objętości, która często jest dominantą lub współwystępuje z drugą dominantą klasy IV lub V (rysunek 4). Typ ten cechuje się także niskim udziałem I, II i III klasy objętości.

Na rysunku 6 przedstawiono dystrybucję przestrzenną poszczególnych klas objętości w próbkach reprezentujących typ eoliczny A. Na wizualizacjach 3D widać wyraźną, regularną nierównomierność w rozkładzie porowatości, związaną prawdopodobnie ze strukturami sedymentacyjnymi.

W próbkach występują „warstwy” zdominowane przez wyższe klasy objętości (V i VI). Ich rozprzestrzenienie w obrębie tych warstw jest jednak nieregularne. Prawdopodobnie dominanta w VI klasie jest związana z porowatością rozwiniętą na etapie sedymentacji (próbki 7468 i 7558). Próbki te charakteryzują się najlepszymi wartościami porowatości. Dominanta w IV lub V klasie objętości wskazuje na procesy diagenetyczne. W tym przypadku związane jest to z ilością cementu wypełniającego przestrzeń porową. Próbka 7480 charakteryzuje



Rys. 4. Krzywe rozkładu klas objętości dla utworów eolicznych typu A



Rys. 5. Próbką 7468A. Podgrupy sieci porowej w obrębie klasy VI. Typ eoliczny A

Próbka 7468	Próbka 7480	Próbka 7443
Próbka 6333	Próbka 7558	Próbka 7560

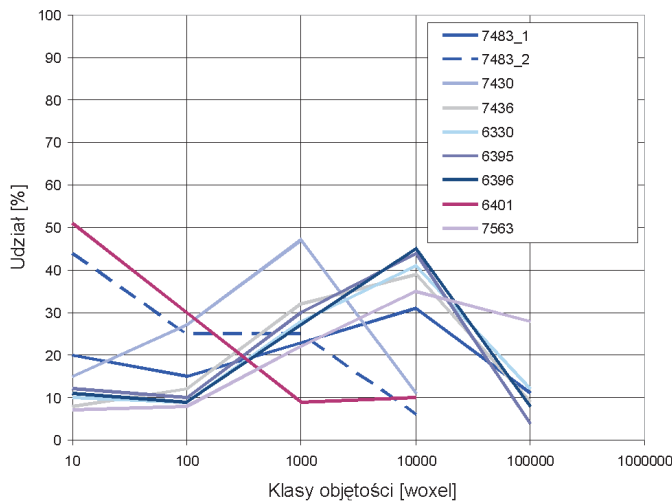
Rys. 6. Obraz przedstawiający dystrybucję przestrzenną poszczególnych klas objętości w próbkach reprezentujących typ eoliczny A

się najmniejszą porowatością i równocześnie największą ilością cementów spośród pozostałych. Jednak charakter porowatości próbki 7480 – jej wewnętrzna struktura – jest bardzo zbliżony do pozostałych próbek. Ostateczna wartość współczynnika porowatości zależy od ilości podgrup w poszczególnych klasach, szczególnie w klasie dominującej; im klasy dominujące są bardziej podzielone, tym pomierzona porowatość jest niższa.

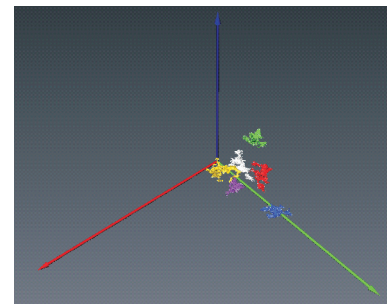
PIASKOWIEC EOLICZNY TYP B – charakteryzuje się brakiem klasy VI oraz obecnością jednej dominanty

w klasie III lub IV (rysunek 7). Można też dodatkowo wyróżnić podtyp próbek, dla których dominanta jest w klasie I. Petrograficznie są to skały gorzej wysortowane, o większej ilości cementu w przestrzeni międzyziarnowej niż w eolicznym typie A.

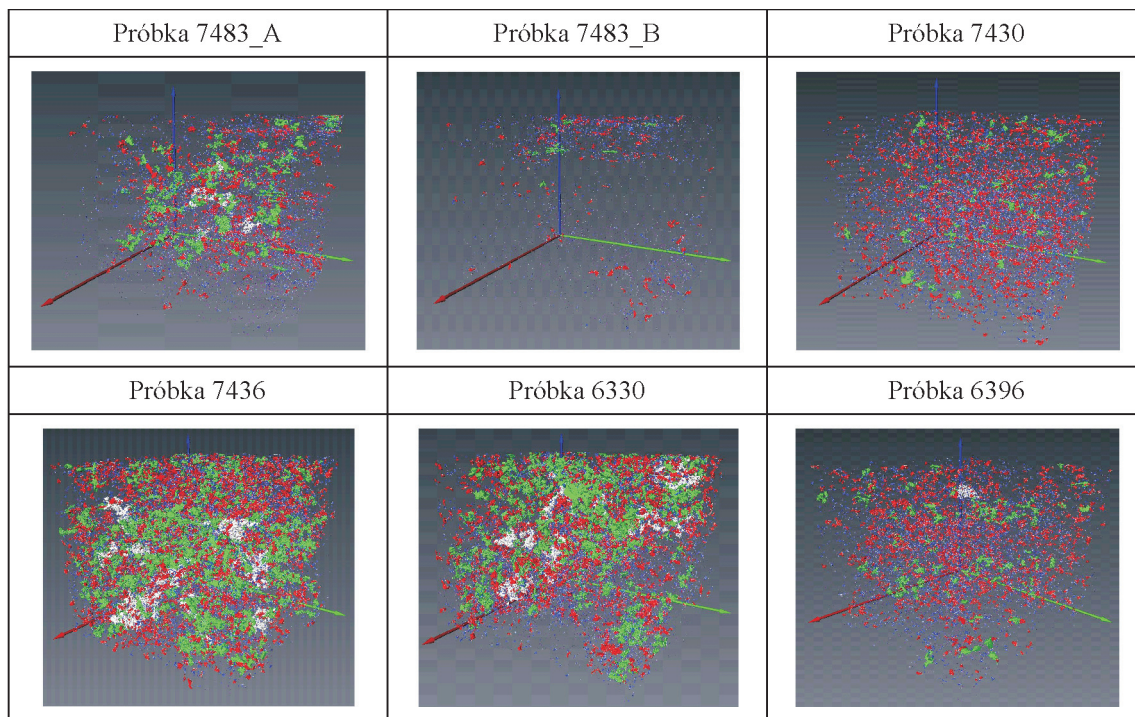
Należy jednak podkreślić, że nie ma prostych zależności między petrografią tych utworów, a ich pomierzoną porowatością i strukturą sieci porowej z mikrotomografu. Np. próbka 7430, której krzywa kumulacyjna sugeruje niskie właściwości zbiornikowe (przesunięcie dominanty w kierunku niskich klas) ma najwyższą porowa-



Rys. 7. Krzywe rozkładu klas objętości dla utworów eolicznych typu B



Rys. 8. Próbka 7483A. Podgrupy sieci porowej w obrębie klasy V. Typ eoliczny B

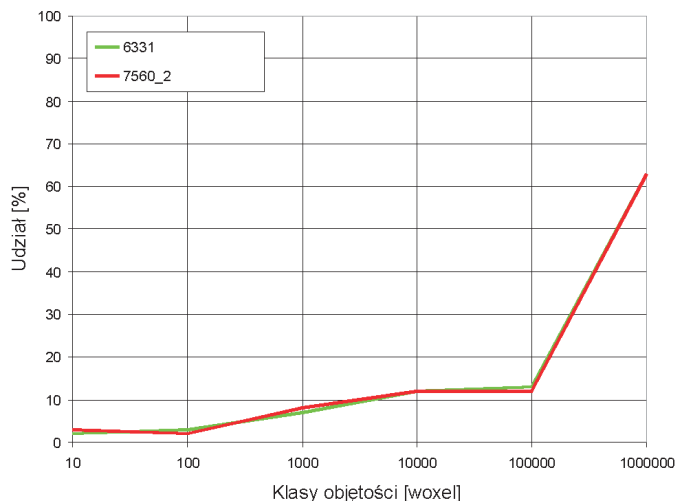


Rys. 9. Obraz przedstawiający dystrybucję przestrzenną poszczególnych klas objętości w próbkach reprezentujących typ eoliczny B

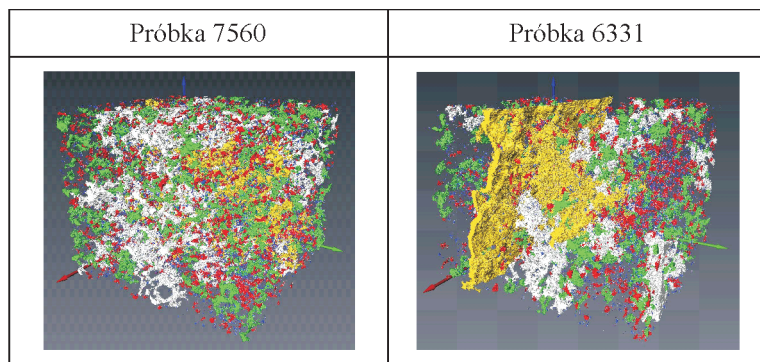
tość porozymetryczną. Porowatość z mikrotomografu potwierdza obserwacje z wykresu krzywych rozkładu. Nakładanie się na siebie i przenikanie procesów sedymentacyjnych i diagenetycznych doprowadziło do znacznego zróżnicowania próbek. Generalnie na skutek gorszego wysortowania mogły w ogóle nie powstać przestrzenie porowe o objętości z VI klasy, lub jeśli powstały to na skutek kompaktacji zostały szybko zredukowane do niższych klas objętości. Całości dopełniła wieloetapowa cementacja.

W zależności od intensywności wszystkich procesów, dominanta przesunęła się w stosunku do eolicznego typu A z klasy V-VI do III-IV. Dominanta w klasie I oznacza bardzo intensywną cementację i istnienie mikroporowatości związanej z rozpuszczaniem ziaren i cementów (próbka 7483) lub obecnością w przestrzeni porowej minerałów ilastych (kaolinit w próbce 6401). Uwzględniając fakt, że dla obydwu tych próbek udział procentowy rośnie wraz ze zmniejszaniem się objętości klasy, można przyjąć, że udział porowatości o objętości poniżej 1 woksela ($216 \mu\text{m}^3$) jest znaczny.

PIASKOWIEC EOLICZNY TYP C – charakteryzuje się zdecydowaną przewagą VI klasy objętości (ponad 50%) (rysunek 10). Ten typ utworów był reprezentowany jedynie przez dwie spośród badanych próbek. Pomimo swego podobieństwa i podobnych porowatości – są to całkowicie odmienne próbki (rysunek 13).



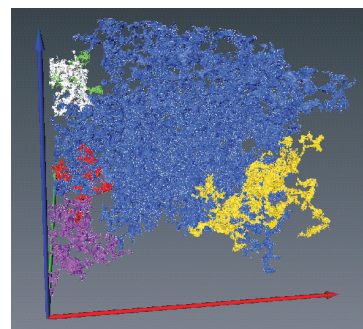
Rys. 10. Krzywe rozkładu klas objętości dla utworów eolicznych typu C



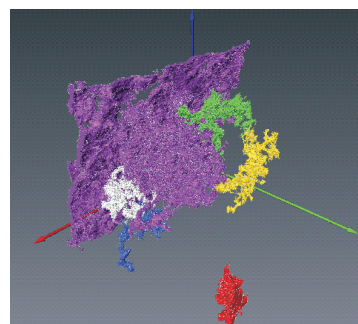
Rys. 13. Obraz przedstawiający dystrybucję przestrzenną poszczególnych klas objętości w próbkach reprezentujących typ eoliczny C

Próbka 7560 reprezentuje próbkę źle wysortowaną, o luźno upakowanych ziarnach, z małym udziałem cementów. W układzie sieci porowej klasy VI widoczne są także zarysy ziaren, co jest możliwe gdy występuje mało cementów, a ziarna są luźno upakowane. Jest to próbka o najlepszej sieci porowej ze wszystkich próbek poddanych badaniom mikrotomograficznym, jednak wizualizacja 3D pokazuje, że rozprzestrzenienie klasy VI nie jest równomierne (rysunek 11), co może być spowodowane złym wysortowaniem ziaren oraz obecnością cementów.

W próbce 6331 występuje otwarta szczelina, w której mieści się większość przestrzeni porowej z VI klasy objęto-



Rys. 11. Próbka 7560B. Podgrupy sieci porowej w obrębie klasy VI. Typ eoliczny C



Rys. 12. Próbka 6331A. Podgrupy sieci porowej w obrębie klasy V i VI. Typ eoliczny C – szczelina

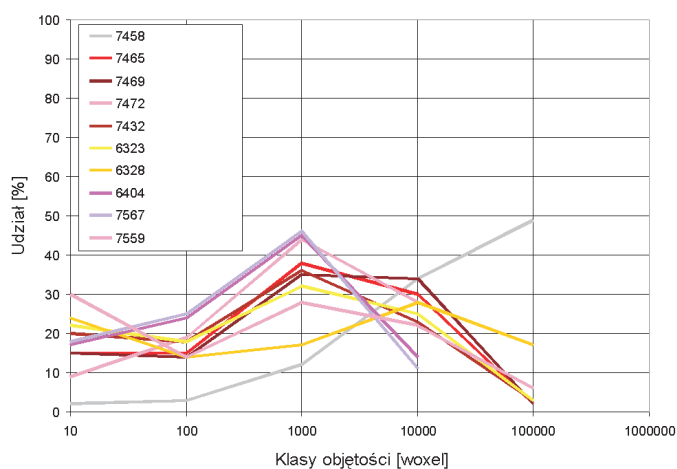
ści. Wynika z tego, że występowanie szczeliny w próbkach eolicznych daje podobny obraz do próbki eolicznej o dobrych właściwościach zbiornikowych. Rozstrzygająca jest analiza wizualizacji 3D (rysunek 12).

PIASKOWIEC FLUWIALNY TYP A – charakteryzuje się brakiem klasy VI oraz obecnością jednej dominanty w klasie III lub IV (rysunek 14). Przebieg krzywych rozkładu jest bardzo zbliżony do eolicznego typu B (rysunek 7), jednak poszczególne dominanty z klas objętości podzielone są na większą ilość podgrup niż w utworach eolicznych. Petrograficznie są to utwory źle wysortowane, ze znacznym udziałem cementów, nasilonym procesem kompaktacji, jak również znacznym udziałem porowatości wtórnej (rozpuszczanie ziaren).

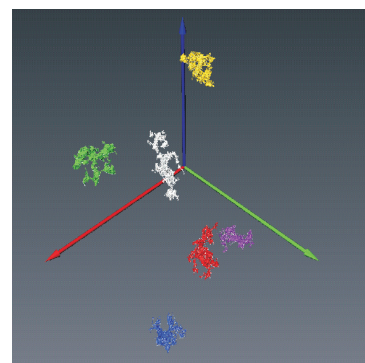
Wśród krzywych rozkładu klas objętości wyróżnia się próbka 7458, która ma inny przebieg niż pozostałe, zbliżony do krzywych z eolicznego typu A, jednak nie zawiera VI klasy objętości, a dominanta podzielona jest na większą ilość podgrup. Próbka ta charakteryzuje się najlepszą siecią porową ze wszystkich utworów fluwialnych. Pozostałe próbki charakteryzują się wyraźnym przesunięciem dominant w kierunku niższych klas. Utwory fluwialne

względem eolicznych są znacznie gorzej wysortowane, co już na początku daje gorszą sieć porową utworów fluwialnych niż w przypadku eolianitów. Gorsze wysortowanie

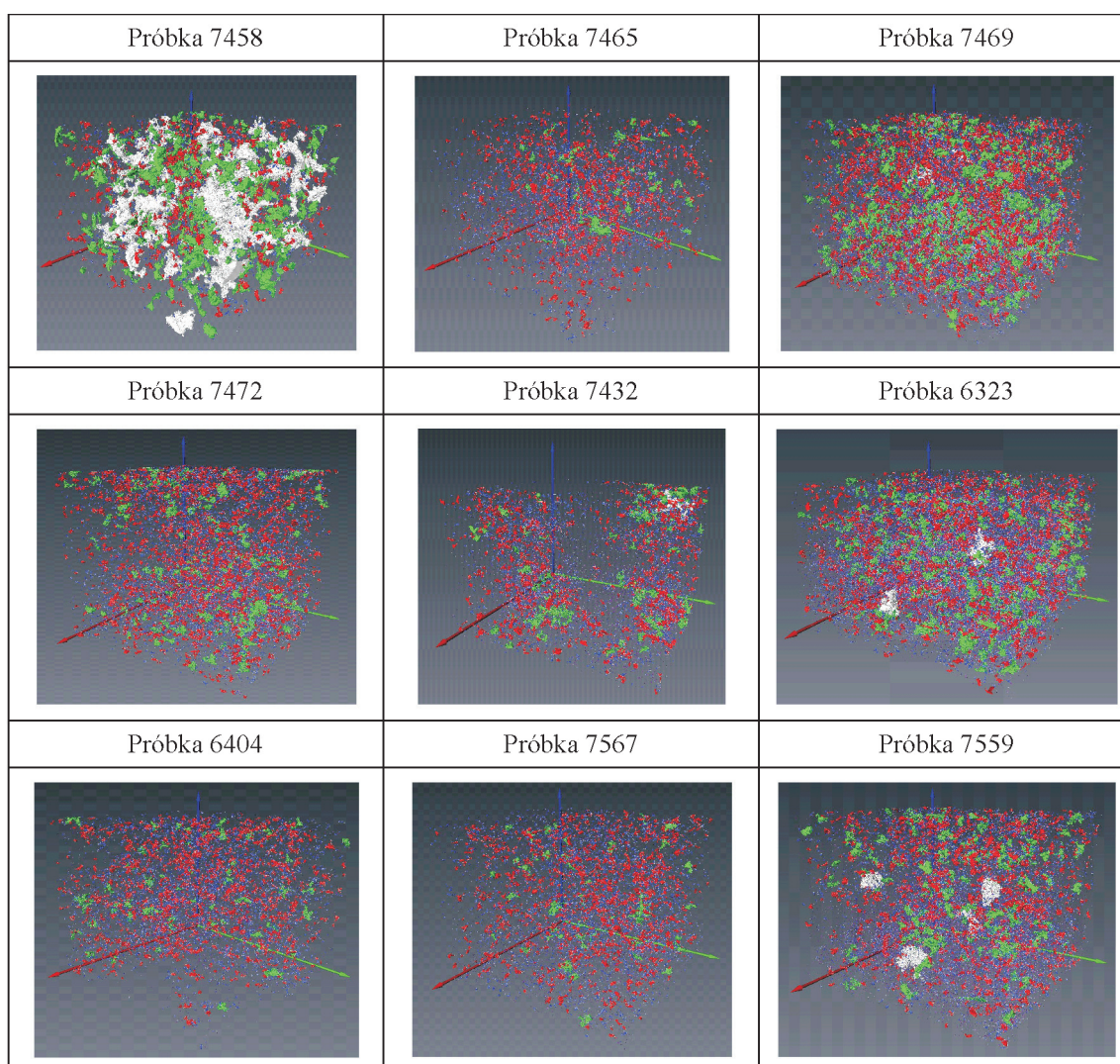
sprzyja nasileniu procesów kompaktacji, co powoduje dalszą degradację sieci porowej. Do tego dochodzą wieloetapowe procesy cementacji, które mocno redukują sieć porową.



Rys. 14. Krzywe rozkładu klas objętości dla utworów fluwialnych typu A



Rys. 15. Próbką 7469. Podgrupy sieci porowej w obrębie klasy III. Typ fluwialny A



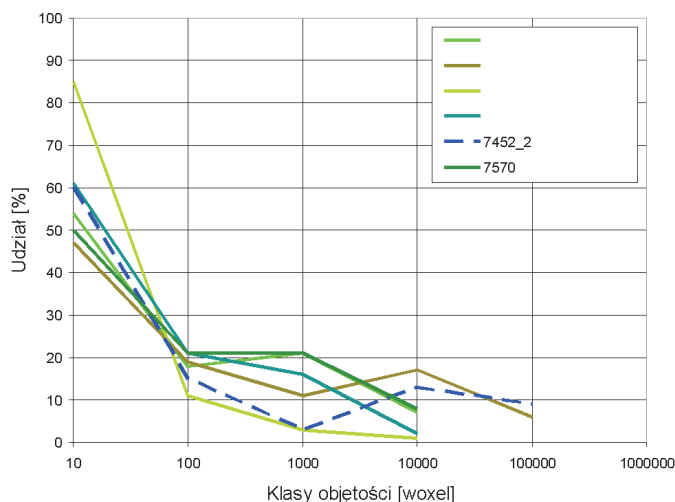
Rys. 16. Obraz przedstawiający dystrybucję przestrzenną poszczególnych klas objętości w próbkach reprezentujących typ fluwialny A

Korzystnym procesem jest rozpuszczanie ziaren i cementów, jednak w wyniku tego często powstają przestrzenie porowe o średnicach poniżej 5 μm, tj. poniżej rozdzielczości mikrotomografu.

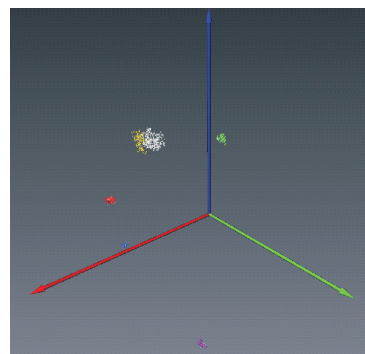
PIASKOWIEC FLUWIALNY TYP B – charakteryzuje się brakiem udziału VI klasy objętości i wyraźną dominantą w pierwszej klasie objętości (rysunek 17).

W dwóch próbkach pojawia się niewielka druga dominanta w IV klasie objętości. Przebieg krzywych kumulacyjnych

jest zbliżony do podtypu w obrębie eolicznego typu B (próbki 6401 i 7483B), jednak w stosunku do utworów eolicznych utwory fluwialne podzielone są na znacznie większą ilość podgrup. Petrograficznie są to utwory źle wysortowane, ziarna są ściśle upakowane i występuje duży udział cementów. Dominanta w pierwszej klasie objętości wskazuje na znaczną obecność mikroporowości (poniżej 5 μm). Potwierdzają to badania mikroskopowe, na podstawie których stwierdzono znaczny udział porowości wtórnej, związanej z rozpuszczaniem ziaren. Dodatkowo



Rys. 17. Krzywe rozkładu klas objętości dla utworów fluwialnych typu B



Rys. 18. Próбка 7434. Podgrupy sieci porowej w obrębie klasy I. Typ fluwialny B

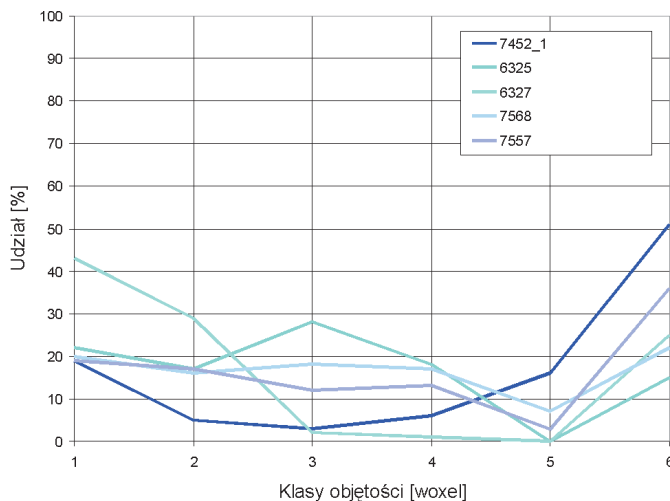
Próbka 7462	Próbka 7478	Próbka 7434
Próbka 7449	Próbka 7452_B	Próbka 7570

Rys. 19. Obraz przedstawiający dystrybucję przestrzenną poszczególnych klas objętości w próbkach reprezentujących typ fluwialny B

znaczne rozbieżności porowatości (pomiędzy badaniami porozymetrii rтęciovęj i mikrotomograficznymi) wskazują na duży udział mikroporowatości w opisywanym typie skał.

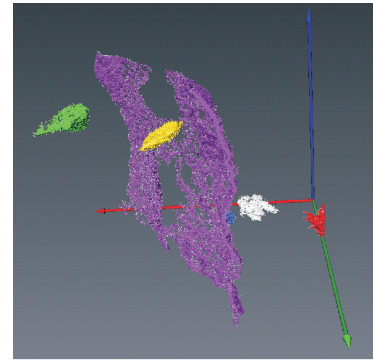
PIASKOWIEC FLUWIALNY TYP C – charakteryzuje się obecnością VI klasy objętości, która w niektórych próbkach jest główną dominantą, a w innych dominantą drugą (rysunek 20). Występowanie VI klasy objętości jest związane z obecnością szczelin, w których lokują się wysokie klasy objętości sieci porowej (rysunki 21 i 22).

Petrograficznie utwory te są źle wysortowane, uległy silnej kompaktacji i charakteryzują się znaczną ilością spoiwa. Potwierdzają to krzywe rozkładu. Odcinki krzywych poza klasą VI odzwierciedlają sieć porową bez uwzględnienia szczelin. Dominanty znajdują się w I klasie, rzadziej w III

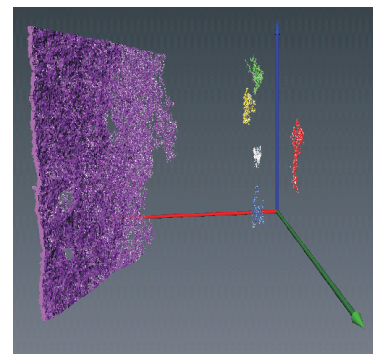


Rys. 20. Krzywe rozkładu klas objętości dla utworów fluwialnych typu C

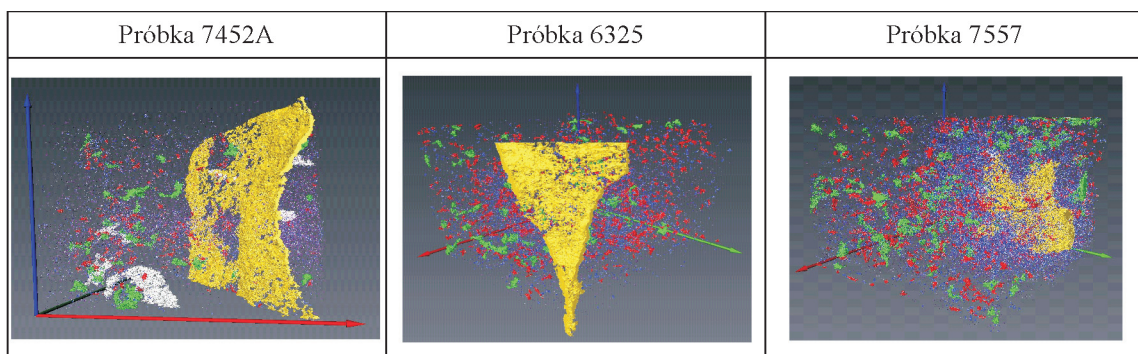
czy IV, co odpowiada fluwialnemu typowi B. Sieć porowa jest mocno zredukowana. Dodatkowo wizualizacje 3D (rysunek 23) wskazują, że szczeliny są tylko częściowo otwarte, a częściowo uległy cementacji, bądź pory są na tyle małe, że nie zostały rozpoznane w badaniach mikrotomografem.



Rys. 21. Próbka 7452A. Podgrupy sieci porowej w obrębie klasy VI. Typ fluwialny C – szczelina



Rys. 22. Próbka 6327A. Podgrupy sieci porowej w obrębie klasy VI. Typ fluwialny C – szczelina



Rys. 23. Obraz przedstawiający dystrybucję przestrzenną poszczególnych klas objętości w próbkach reprezentujących typ fluwialny C

Podsumowanie

Przestrzeń porowa utworów czerwonego spągowca była analizowana w odniesieniu do klas objętości sie-

ci porowej, tzn. połączonych ze sobą zespołów porów (podgrup), wskazując na objętości podgrup. Wyróżnio-

no 6 typów skał zbiornikowych, uwzględniając genezę skał, charakter rozkładu klas objętości w próbkach oraz wizualizacje 3D. Na tej podstawie stwierdzono, że analizowane próbki posiadały słabo rozwiniętą sieć porową i wykazywały znaczne różnice w charakterze tej sieci pomiędzy utworami eolicznymi i fluwialnymi. Utwory eoliczne cechował znacznie mniejszy udział niskich klas objętości (I i II) niż utwory fluwialne, gdzie często klasa I i II dominowały. W utworach fluwialnych nie występowała klasa VI, z wyjątkiem próbek ze szczelinami – wtedy zespoły porów o największych objętościach były związane z tymi szczelinami.

Badania metodą porozymetrii rtęciowej zostały wykonane w Zakładzie Geologii i Geochemii INiG przez Zespół pod kierunkiem doc. dr hab. Piotra Sucha.

Artykuł nadesłano do Redakcji 30.06.2009. Przyjęto do druku 29.10.2009.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

Literatura

- [1] Lindquist W.B., Venkatarangan A., Dunsmuir J., Wong T-F.: *Pore and throat size distributions measured from synchrotron X-ray tomographic images of Fontainebleau sandstones*. Journal of Geophysical Research, vol. 105, p. 21509-21527, 2000.
- [2] Rivers M.: *Tutorial Introduction to X-ray Computed Microtomography Data Processing*. University of Chicago, 1999.
- [3] Van Geet M., Lagrou D., Swennen R.: *Porosity measurements of sedimentary rocks by means of microfocuss X-ray computed tomography (μ CT)*. Geological Society, London, Special Publications, vol. 215, p. 51-60, 2003.
- [4] Van Geet M., Swennen R., Wevers M.: *Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocuss X-ray computerised tomography*. Sedimentary Geology, 132, p. 25-36, 2000.
- [5] Wellington S.L., Vinegar H.J.: *X-ray Computerized Tomography*. Journal of Petroleum Technology, 39, p. 885-898, 1987.



Mgr inż. Marek DOHNALIK – absolwent Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Krakowskiej. Pracownik Zakładu Geofizyki Wiertniczej INiG w Krakowie. Specjalizuje się w badaniach skał metodą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej.



Mgr inż. Jadwiga ZALEWSKA – geolog, absolwentka AGH. Kierownik Zakładu Geofizyki Wiertniczej Instytutu Nafty i Gazu. Realizuje prace badawcze w zakresie laboratoryjnych pomiarów parametrów rdzeni i płuczek wiertniczych pod kątem ilościowej interpretacji profilowań geofizycznych.



Dr Anna POSZYTEK – absolwentka Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego, gdzie obroniła pracę doktorską na temat właściwości zbiornikowych utworów górnego czerwonego spągowca monokliny przedsudeckiej. Obecnie pracuje jako adiunkt na Wydziale Geologii UW w Zakładzie Geologii Złóż, kontynuując tematykę badawczą.