

WIZUALIZACJA PRZESTRZENI POROWEJ SKAŁ Z WYKORZYSTANIEM MIKROTOMOGRAFII RENTGENOWSKIEJ

Visualization of pore space using Roentgen microtomography

Jadwiga ZALEWSKA & Marek DOHNALIK

*Instytut Nafty i Gazu;
ul. Lubicz 25a, 31-503 Kraków;
e-mail: zalewska@inig.pl, dohnalik@inig.pl*

Abstract: Roentgen computed microtomography (micro-CT) allows visualizing internal structure of measured objects determined by density differences. Micro-CT measurements enable obtaining of many parallel 2D cross sections, which allows to project in 3D particular properties. Main micro-CT applications are porosity measurements and visualizations. The paper shows first results of measurements and imaging of rock porous space, using micro-Ct method.

Key words: microtomography, visualization, pore space, sandstone

Słowa kluczowe: mikrotomografia, wizualizacja, przestrzeń porowa, piaskowiec

TECHNIKA SKANOWANIA TRÓJWYMIAROWEGO PRZY POMOCY RENTGENOWSKIEJ MIKROTOMOGRAFII KOMPUTEROWEJ

Rentgenowska mikrotomografia komputerowa (micro-CT), pierwotnie została opracowana jako technika mająca zastosowanie w medycynie, gdzie umożliwiała dwu- i trójwymiarowe rekonstrukcje właściwości wewnętrznych obiektu. Z uwagi na jej szerokie rozpowszechnienie i zastosowania, geolodzy zaimplementowali tą technikę do swoich badań (Wellington *et al.* 1987, Fabre *et al.* 1989, Raynaud *et al.* 1989, Swennen *et al.* 1990, Orsi *et al.* 1994, Boespflug *et al.* 1995, Verhelst *et al.* 1996). Wspomniane opracowania jasno wykazały ogromne możliwości zastosowania micro-CT w badaniu próbek geologicznych.

Rentgenowska mikrotomografia komputerowa ma zastosowanie do analizy jakościowej i ilościowej wewnętrznych właściwości materiałów geologicznych, o ile badana próbka odznacza się wystarczająco dużym zróżnicowaniem absorpcji promieniowania rentgenowskiego przez poszczególne jej elementy. Jednym z ważniejszych zastosowań rentgenowskiej tomografii komputerowej jest badanie porowatości, co ułatwia silny kontrast gęstości pomiędzy fazą stałą a powietrzem. Przykłady zastosowań wymienionej metody obejmują charakterystykę skał zbiornikowych (Van Geet *et al.* 2000, 2003). Kontrast gęstościowy elementów

badanego obiektu jest również wykorzystywany jako podstawa do wizualizacji zewnętrznej morfologii obiektów, np. dla celów analizy chropowatości powierzchni, (Fohrer *et al.* 1999) lub dla dokumentowania morfologii skamieniałości (Rogers 1999). Kontrast pomiędzy fazą ciekłą i powietrzem znajduje szerokie zastosowanie w badaniu właściwości hydraulicznych w geologii naftowej (Peters *et al.* 1996). Ostatnie usprawnienia technologiczne w zakresie tomografii neutronowej umożliwiają rozróżnianie pomiędzy porami pustymi i wypełnionymi wodą (Dierick *et al.* 2005).

Instytut Nafty i Gazu w Krakowie posiada mikrotomograf rentgenowski, Benchtop CT160, który jest bardzo nowoczesnym urządzeniem, posiadającym ogromne możliwości badawcze w związku z wysoką rozdzielczością obrazu oraz możliwością ustawienia odpowiedniego powiększenia badanych próbek i prędkości ich skanowania. Zasadniczymi elementami mikrotomografu rentgenowskiego są: źródło promieniowania rentgenowskiego i detektor oraz umieszczony pomiędzy nimi manipulator. Manipulator zapewnia przesuwanie próbek wzdłuż 3 prostopadłych kierunków, co umożliwia powiększanie i pomniejszanie rzutu próbki na detektorze i ustawienie interesującego fragmentu. Manipulator sterowany jest za pomocą trzech joysticków.

Zadaniem rentgenowskiej tomografii komputerowej jest odtworzenie przekroju obiektu na podstawie tłumienia promieniowania X . Wiązka promieni rentgenowskich przechodząc przez warstwę materii ulega osłabieniu w wyniku rozpraszania i absorpcji. Zmniejszenie natężenia promieniowania ($-dI$) w wyniku przejścia wiązki przez elementarną grubość absorbenta jest według prawa Beera-Lamberta proporcjonalne do natężenia I oraz do grubości warstwy dx :

$$dI = -\mu \cdot I \cdot dx \quad (1)$$

Dla absorbenta o grubości x , po rozwiązaniu równania różniczkowego otrzymuje się wykładniczą postać prawa pochłaniania:

$$I = I_0 \cdot e^{\mu x} \quad (2)$$

gdzie: I – natężenie wiązki po przejściu przez ośrodek; I_0 – natężenie wiązki padającej; x – grubość absorbenta; μ – całkowity współczynnik absorpcji (pochłaniania) – zwany również współczynnikiem tłumienia liniowego, który jest sumą trzech współczynników absorpcji (comptonowskiej, fotoelektrycznej, tworzenia par), w zależności od energii promieniowania względny udział poszczególnych składowych może się znacznie zmieniać.

Współczynnik tłumienia liniowego μ zależy od gęstości elektronowej (gęstości średniej) ρ i liczby atomowej Z pierwiastka, a wartość jego określa wzór (Wellington *et al.* 1987):

$$\mu = \rho \left(a + \frac{b \cdot Z^{3.8}}{E^{3.2}} \right) \quad (3)$$

gdzie: a – współczynnik niemal niezależny od energii promieniowania rentgenowskiego, nazywany współczynnikiem Klein-Nishina; b – stała; E – energia fotonu.

Rentgenowska mikrotomografia komputerowa opiera się na zapisywaniu projekcji promieniowania X badanego obiektu dla kolejnych pozycji kątowych położenia próbki w zakresie $0 \div 360^\circ$. Do rekonstrukcji wirtualnego przekroju przez obiekt, wykorzystywany jest algorytm projekcji wstecznej, efektem którego jest zobrazowanie zmienności współczynnika

pochłaniania liniowego. Obrazy zostały wykonane przy napięciu lampy 75 kV oraz natężeniu 110 μ A. Czas skanowania wynosił około 4 godziny dla jednej próbki, a rozmiar woksela dla próbek o średnicy 10 mm wynosił około 6 μ m.

Bezpośrednim wynikiem pracy mikrotomografu są projekcje (Fig. 1), będące rzutami trójwymiarowego obiektu na matrycę 2D. Każdy taki obraz zawiera informacje o redukcji intensywności promieniowania w środku trójwymiarowego obiektu. Dopiero po dalszej obróbce (rekonstrukcji) tych projekcji możliwe jest uzyskanie przestrzennego obrazu próbki.

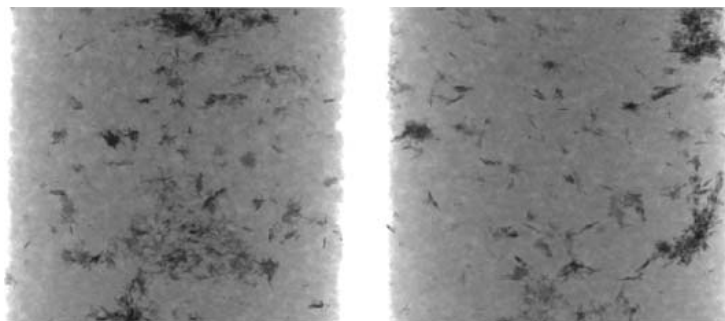


Fig. 1. Projekcje piaskowca czerwonego spągowca

Fig. 1. Rotliegend sandstone projections

Efektem pierwszych własnych badań, przeprowadzonych w INiG na mikrotomografii rentgenowskiej, były przekroje wewnętrznej struktury próbek piaskowców oraz wygenerowanie trójwymiarowych obrazów przestrzeni porowej i szkieletu skalnego. Algorytm do tej części obróbki obrazu tomograficznego stanowił moduł oprogramowania Avizo.

Na figurze 2 przedstawiono mapy gęstości promieniowania X dla czterech próbek piaskowców czerwonego spągowca z otworu CzW wykonane mikrotomografem rentgenowskim. Obrazy zostały uzyskane z walcowych próbek o średnicy 10 mm i wysokości 30 mm. Całkowita porowatość badanych próbek została określona za pomocą metody helowej. Pokazane na figurze 2 porowatości całkowite próbek mają wartości $Kp=3, 8, 19$ i 29% . Zrekonstruowane obrazy mają rozdzielczość 5.7 μ m i składają się z $800 \times 800 \times 800$ przekrojów.

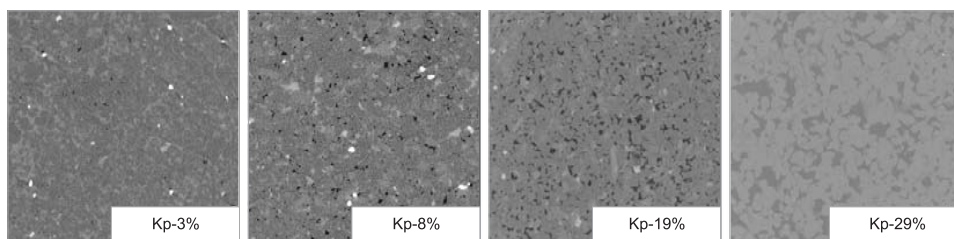


Fig. 2. Mapy gęstości promieniowania X dla czterech próbek piaskowca czerwonego spągowca z otworu CzW wyekstrahowanych z objętości 8003 wokseli przy rozdzielczości 5.7 mikronów, o porowatościach 3, 8, 19 i 29%

Fig. 2. X-rays density maps for four sandstone samples from CzW well, extracted from 8003 voxel volume at 5.7 microns resolution with 3, 8, 19, 29% porosity

Z powodu małego rozmiaru zdjęć zamieszczonych na figurze 2 dość trudno jest rozróżnić pory (kolor czarny lub ciemnoszary) od szkieletu mineralnego (kolor jasnoszary), szczególnie dla próbek o małej porowatości. W celu ułatwienia tego rozróżnienia omawiane obrazy przedstawiono w wersji binarnej (Fig. 3) – przestrzeni porowej przypisano kolor czarny, a szkieletowi kolor biały. Kolejne obrazy wykazują coraz większy udział koloru czarnego, co jest zgodne ze wzrostem współczynnika porowatości dla badanych próbek.

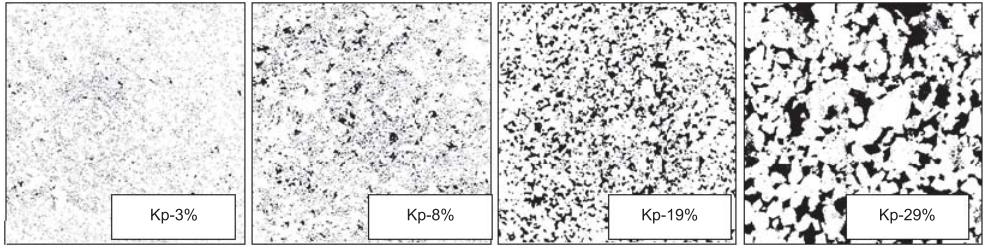


Fig. 3. Przekroje wewnętrznej struktury próbek skał w wersji binarnej dla tych samych czterech próbek piaskowca czerwonego spągowca, co prezentowane na figurze 2

Fig. 3. Binarized cross sections of internal structure of the same four rotliegend sandstone samples as on figure 2

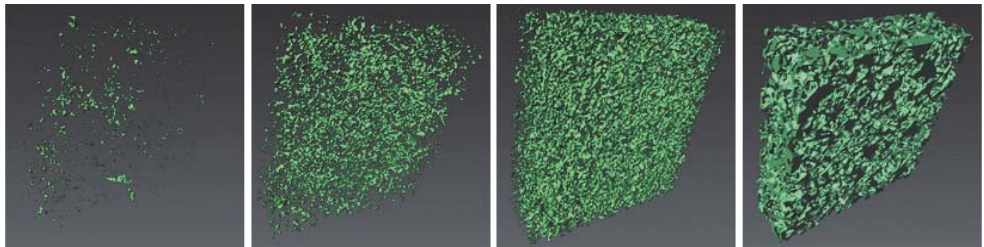


Fig. 4. Obraz wydzielonej przestrzeni porowej dla tych samych czterech próbek piaskowca czerwonego spągowca, które przedstawiono na figurze 2

Fig. 4. Extracted pore space for the same samples as on figure 2

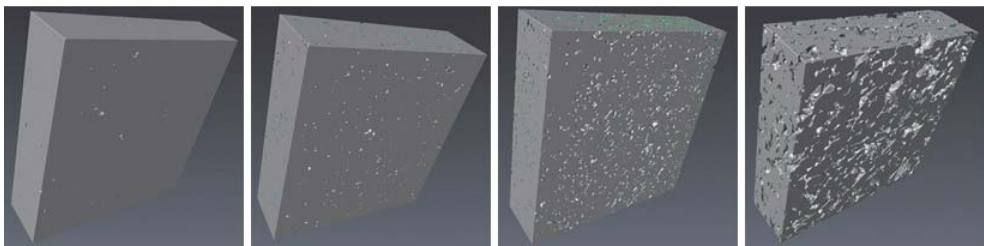


Fig. 5. Obraz bryły próbki piaskowca czerwonego spągowca pomniejszony o przestrzeń porową próbki (jak na figurze 2)

Fig. 5. Sandstone sample matrix for samples as on figure 2

Na figurze 4 przedstawiono obrazy wewnętrznej wydzielonej przestrzeni porowej, uzyskane po wysegmentowaniu struktury porów. Segmentacja służy do uproszczenia opisu obrazu poprzez zmniejszenie nadmiarowej informacji; grupowanie pikseli o zbliżonych intensywnościach lub łączenie pikseli opisujących poszczególne elementy.

Figura 5 przedstawia obraz bryły próbki piaskowca czerwonego spagowca pomniejszony o przestrzeń porową próbki. Wzrost porowatości widoczny na figurze 4 przejawia się na figurze 5 większymi ubytkami w bryle skały.

Figura 6 prezentuje wizualizację mikrotomograficzną wysegmentowanej przestrzeni porowej (kolor zielony) wykonaną dla przykładowych 2 próbek pochodzących z utworów miocennskich, z otworu M-1 (przedgórze Karpat). Pierwsza próbka (Fig. 6A) posiada dobre parametry zbiornikowe (wysoka porowatość efektywna, wysoka przepuszczalność i niski współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną), natomiast druga próbka (Fig. 6B) ma znacznie gorsze parametry – niską porowatość efektywną, niską przepuszczalność i wysoki współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną.

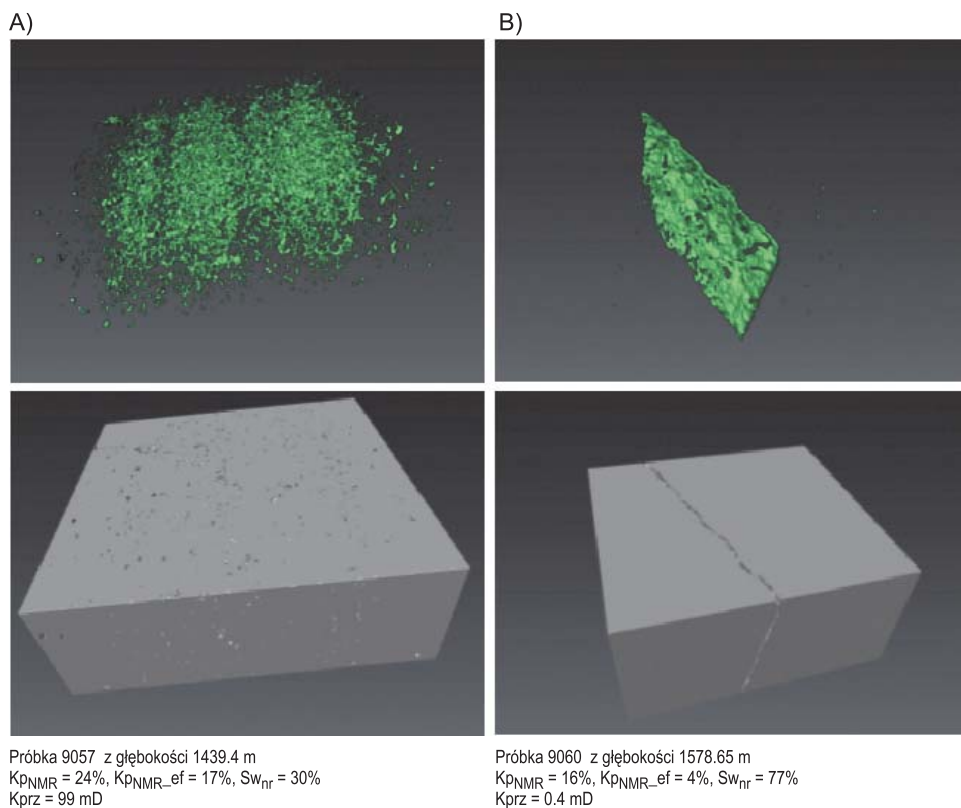


Fig. 6. Wizualizacja struktury przestrzeni porowej skał miocennskich uzyskana metodą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej (otwór M-1)

Fig. 6. Visualization of the Miocene samples pore structure obtained using computed microtomography (well M-1)

Na figurze 7 przedstawiono wizualizację struktury przestrzeni porowej skał miocennskich (otwór D-12) uzyskaną metodą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej. Są to dwie próbki posiadające niemal identyczny, wysoki współczynnik porowatości ogólnej (odpowiednio 22% i 23%).

Próbki różnią się współczynnikiem porowatości efektywnej i przepuszczalności, co wskazuje na ich odmienne właściwości zbiornikowe i filtracyjne. Na figurze 7A widzimy pory połączone ze sobą, tworzące jakby jedną całość; figura 7B przedstawia pojedyncze pory nie komunikujące się ze sobą.

Odmienna struktura porowa badanych próbek została potwierdzona wynikami badań przeprowadzonych metodą jądrowego rezonansu magnetycznego.

Podkreślić należy, że wyniki badań wykonanych techniką mikrotomograficzną przedstawiane są w formie filmów, natomiast przytoczone w tej pracy zdjęcia (Fig. 6, 7) nie odzwierciedlają dobrze przestrzennych informacji prezentowanych na filmie.

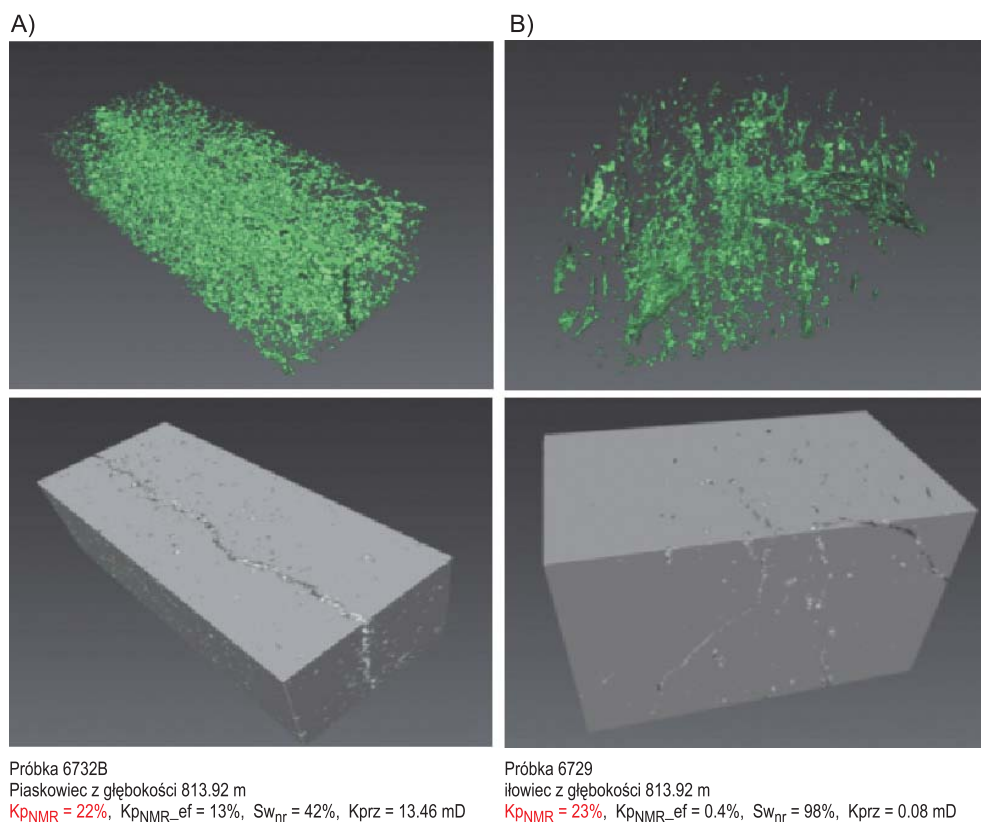


Fig. 7. Wizualizacja struktury przestrzeni porowej skał miocennskich uzyskana metodą rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej (otwór D-12)

Fig. 7. Visualization of the Miocene samples pore structure obtained using computed microtomography (well D-12)

PODSUMOWANIE

Pojawienie się nieniszczących metod badania przy użyciu techniki skanowania trójwymiarowego, takich jak rentgenowska tomografia komputerowa było dużym wydarzeniem w świecie naukowym. Początkowo techniki te rozwijano na potrzeby medycyny na poziomie makro, obecnie w coraz większym stopniu obrazy 3D stosowane są w innych dziedzinach badań naukowych (zarówno na poziomie makro jak i mikro) i wykorzystywane do wykonywania analiz jakościowych i ilościowych. Badanie zjawisk fizycznych w skali mikro (np. mikro-strukturalne zachowanie naturalnych i wykonanych przez człowieka materiałów, dynamika mikroprzepływów itd.) stało się powszechne. Sama wizualizacja tego, co dzieje się wewnątrz próbek oraz obrazowanie przepływu mediów w strukturach porowych skał jest pierwszym krokiem w stronę dalszych odkryć. Dane uzyskane z takich analiz umożliwiają badaczowi połączyć niezauważalne do tej pory zjawiska z przyjętymi wcześniej założeniami, znanymi powszechnie od wielu lat.

Praca była prezentowana na VII Konferencji Naukowo-Technicznej pt. „Geofizyka w geologii, górnictwie i ochronie środowiska” organizowanej z okazji jubileuszu 90-lecia AGH na WGGiOŚ.

LITERATURA

- Boespflug X., Long B.F.N. & Occhietti S., 1995. Cat-scan marine stratigraphy, a quantitative approach. *Marine Geology*, 122, 281–301.
- Dierick M., Vlassenbroeck J., Masschaele B., Cnudde V., Van Hoorebeke L. & Hillenbach A., 2005. High-speed neutron tomography of dynamic processes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A 542, 296–301.
- Fabre D., Mazerolle F. & Raynaud S., 1989. Caracterisation tomodensitometrique de la porosite et la fissuration de roches sedimentaires. In: Maury Y. & Fourmaintraux D. (eds), *Rock at Great Depth*, Balkema, Rotterdam, 297–304.
- Fohrer N., Berkenhagen J., Hecker J.M. & Rudolph A., 1999. Changing soil and surface conditions during rainfall. Single rainstorm/subsequent rainstorms. *Catena*, 37, 355–375.
- Orsi T.H., Edwards C.M. & Anderson A.L., 1994. X-ray computed tomography: a nondestructive method for quantitative analysis of sediment cores. *Journal of Sedimentary Research*, A64, 690–693.
- Peters E.J., Gharbi R. & Afzal N., 1996. A look at dispersion in porous media through computed tomography imaging. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 15, 23–31.
- Raynaud S., Fabre D., Mazerolle F., Geraud Y. & Latiere H.J., 1989. Analysis of the internal structure of rocks and characterization of mechanical deformation by a non-destructive method: X-ray tomodensitometry. *Tecnophysics*, 149–159.
- Rogers S.W., 1999. Allosaurus, crocodiles, and birds: evolutionary clues from spiral computed tomography of an endocast. *Anatomical Record*, 257, 162–173.
- Swennen R., Poot B. & Marchal G., 1990. Computerized tomography as a tool in reservoir characterization. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I*, 1105–1124.

- Verhelst F., David P., Fermont W., Jegers L. & Vervoort A., 1996. Correlation of 3D – computerized tomographic scans and 2D colour image analysis of Westphalian coal by means of multivariate statistic. *International Journal of Coal Geology*, 29, 1–21.
- Van Geet M., Swennen R. & Wevers M., 2000. Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocus X-ray computerised tomography. *Sedimentary Geology*, 132, 25–36.
- Van Geet M., Lagrou D. & Swennen R., 2003. Porosity measurements of sedimentary rocks by means of microfocus X-ray computed tomography (μ CT). *Geological Society, London, Special Publications*, 215, 51–60.
- Wellington S.L. & Vinegar H.J., 1987. X-ray Computerized Tomography. *Journal of Petroleum Technology*, 39, 885–898.