

Jadwiga Zalewska, Marek Dohnalik, Grażyna Sikora

*Instytut Nafty i Gazu, Kraków*

## Możliwości rentgenowskiej tomografii komputerowej w rozpoznawaniu, obrazowaniu i szacowaniu wielkości szczelin

W artykule dokonano przeglądu aktualnych możliwości metody rentgenowskiej tomografii komputerowej w obrazowaniu i szacowaniu szczelin, według publikacji różnych autorów. Przedstawiono także pierwsze własne wyniki.

### The roentgen computer microtomography possibilities in recognition, imaging and extrapolation of aperture size

This paper presents the current possibilities of roentgen computed microtomography (micro-CT) in aperture imaging and extrapolation according to different authors publications. This paper shows first result of measurements and imaging of rock space, using micro-CT method.

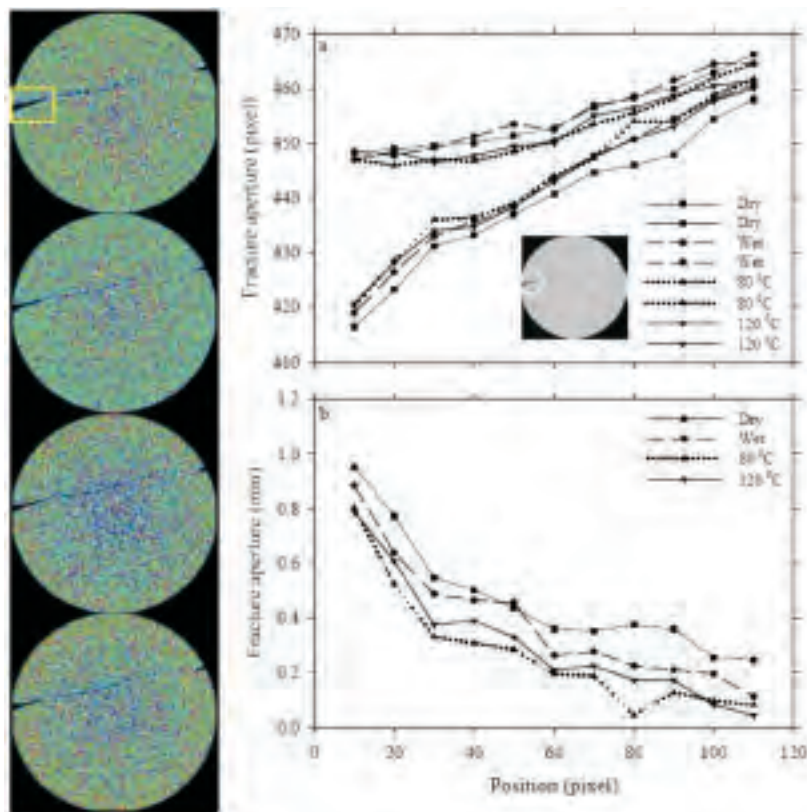
Porowatość i przepuszczalność to podstawowe cechy charakteryzujące skały zbiornikowe, w aspekcie wielkości przepływu węglowodorów do otworu. Dla otrzymania pełnej informacji o właściwościach kolektorskich serii złożowej, ww. parametry należy uzupełnić badaniami szczelinowatości skał. Zagadnienie to jest szczególnie istotne w geologii naftowej, gdy mamy do czynienia ze skałami zbiornikowymi o niskiej porowatości i małej przepuszczalności; gdzie wielkość wydobycia węglowodorów zależy głównie od ilości szczelin otwartych.

Pomiar ilościowy rozkładu przestrzennego szczelin i ich rozwartości jest jednym z kluczowych czynników oceny poprawnych wartości przepływu płynu i właściwości transportu w spękanych skałach. Dane te są niezbędne w kompleksowej interpretacji materiałów geofizyki wiertniczej, a charakterystyczne wartości tych własności stosowane są także jako dane wejściowe do różnych modeli wpływu przestrzeni porowej skał na wartości mierzalnych parametrów fizycznych (np. gęstość, oporność elektryczna, prędkość propagacji fali akustycznej, etc). Istnieje jednak wiele trudności w badaniu rozkładu przestrzennego szczelin, w których może występować kumulacja węglowodorów, lub roztworów krążących w skałach. Trudności badawcze wynikają głównie z wyjątkowo dużego współczynnika kształtu, który jest stosunkiem rozciągłości przestrzennej szczeliny do jej rozwartości.

W laboratoriach stosowane są różne techniki w celu dokładnego określenia otwarcia szczeliny, takie jak: skanowanie dwóch powierzchni szczeliny [2], wstrzykiwanie żywicy utwardzalnych [4] lub metali [11]. Wymienione metody powodowały, iż szczelina stawała się nieprzydatna do dalszych eksperymentów przepływu. Zbadano więc możliwości zastosowania technik nieniszczących do określania otwarcia szczelin, m.in.: tomografię rentgenowską [1, 5, 6, 18, 19, 21], światło przechodzące [3, 12] oraz jądrowy rezonans magnetyczny [7, 12].

Na chwilę obecną wydaje się, że jedną z najlepszych i najnowocześniejszych metod badawczych jest rentgenowska mikrotomografia komputerowa (micro-CT). Technologia ta charakteryzuje się wysoką rozdzielczością aparatury, co wiąże się z bardzo wysoką jakością otrzymywanych obrazów. Poniżej przytoczono możliwości micro-CT w badaniu szczelin, przedstawione przez różnych autorów.

Polak A. i in. [10] podaje, że metoda micro-CT umożliwia badanie szczelinowatości i określanie czynników wpływających na zmianę rozwartości szczelin, np. poprzez rozpuszczanie minerałów przy podwyższonych temperaturach (rysunek 1). Testy przepływowe wykonywał on na szczelinie naturalnej w nowakulicie (99% kwarcu), w temperaturach 20°C, 80°C, 120°C, i 150°C, oraz na szczelinie sztucznej w wapieniu, w temperaturze 20°C. Autor stwierdził,



**Rys. 1.** Dystrybucja pęknięć szczelinowatych [10]

Obszar zaznaczony kwadratem (po lewej) jest przetwarzany na wykresach obok (po prawej), w celu zdefiniowania rozpuszczonej substancji oraz względnego przemieszczenia się szczeliny. Przekroje oddalone są o 47 mm od wlotu, dla próbki o długości 90 mm.

że obrazowanie to pozwala na dobre i wiarygodne oszacowanie rozwartości szczelin.

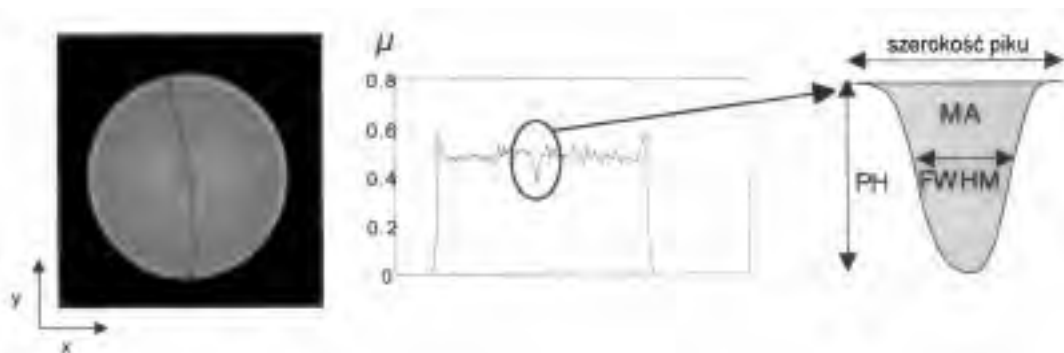
Leonard A. i in. [8] opisuje zastosowanie tomografii rentgenowskiej do badań zmian tekstury, którym ulegają materiały poddawane osuszaniu; określili on profile wewnętrznej wilgotności oraz prześledził proces powstawania i kurczenia się szczelin. Za materiał testowy posłużył autorowi osad ściekowy z dwóch stacji uzdatniania wody.

Vandersteen K. i in. [20] bada różne metody kwantyfikacji otworów szczelinowych za pomocą tomografii rentgenowskiej (CT), z wykorzystaniem obiektów pozornych i mikroskopii optycznej do kalibracji i weryfikacji. Jego wyniki są istotne w badaniach wymagających ilościowej charakterystyki pustek płaskich, np. w badaniach gleby. Autor ten przytacza także różne metody ilościowego opisu rozwartości szczelin i porównuje je (rysunek 2).

Johns R.A. i in. [5] zastosował wartość brakującego tłumienia (MA), wskutek występowania szczeliny, która jest scałkowaną stratą współczynnika tłumienia. Peyton R.L. i in. [9] wykorzystywał wartość szerokości szczeliny odczytaną w połowie maksimum (FWHM) profilu tłumienia w szczelinie. Verhelst F. i in. [21] stosował wartość wysokości szczytowej (PH) w profilu tłumienia szczeliny. Autor podaje, iż wadą wartości PH jest to, że można ją stosować jedynie wtedy, gdy współczynnik tłumienia w szczelinie jest wyższy niż tłumienie w powietrzu.

Zaletą wartości PH w porównaniu z MA i FWHM jest jej niezależność od kierunku pomiaru w szczelinie, podczas gdy MA i FWHM muszą być mierzone prostopadle do kierunku płaszczyzny szczeliny.

Sellers E. i in. [14] bada szczeliny, które powstały przez przyłożenie naprężenia trójosiowego do sześciennych bloków kwarcytowych ze szczelinami płytowymi. Wzory szczelinowatości, ujawnione przez modelowanie 3D danych CT, pomagają zweryfikować prognozowania



**Rys. 2.** Obraz CT próbki wapienia o zmiennym otwarciu szczeliny, skorygowany na artefakty (strona lewa i środek).

Różne metody ilościowego ujęcia rozwarcia szczeliny (po prawej)

MA – wartość brakującego tłumienia, która jest scałkowaną stratą współczynnika tłumienia wskutek występowania szczeliny; FWHM – wartość odczytana w połowie maksimum profilu tłumienia w szczelinie; PH – wartość wysokości szczytowej w profilu tłumienia szczeliny.

wykonane na modelach numerycznych, które obecnie wykorzystywane są do oceny rozwoju szczelin wokół głębokich wykopów górniczych. Autor komentuje także ograniczenia nakładane przez występowanie artefaktów, które utrudniają tworzenie trójwymiarowych obrazów szczelin.

Yoshino N. i in. [22] topografię powierzchni szczeliny próbki skalnej oceniał z wykorzystaniem trójwymiarowej aparatury pomiarowej, wyposażonej w czujnik stykowy (3D); oceniał również właściwości hydrauliczne szczeliny, poprzez testy hydrauliczne w stanie ustalonym. Uzyskane dane porównywał z danymi otrzymanymi z konwencjonalnej, medycznej rentgenowskiej tomografii komputerowej (X-ray CT). W wyniku tego zidentyfikował dwa główne zagadnienia techniczne do rozwiązania w oszacowaniu szczeliny z wykorzystaniem X-ray CT: braku niedopasowania w przestrzeni X-Y skały i braku nachylenia próbki (próbka jest dokładnie sześciennym blokiem skalnym). Chodzi o zestawienie górnego i dolnego elementu, ponieważ nie istnieje obiektywna, satysfakcjonująca metoda potwierdzenia tych efektów.

W celu ustabilizowania rozkładu szczeliny w próbce, przed jej skanowaniem Yoshino N i in. [22] wstrzykiwał do niej żywicę epoksydową. Właściwość wykorzystywana w tomografii rentgenowskiej nazywa się wartością CT, która jest zdefiniowana równaniem:

$$\text{wartość CT} = (\mu_t - \mu_w) \times K/\mu_w \quad (1)$$

gdzie:

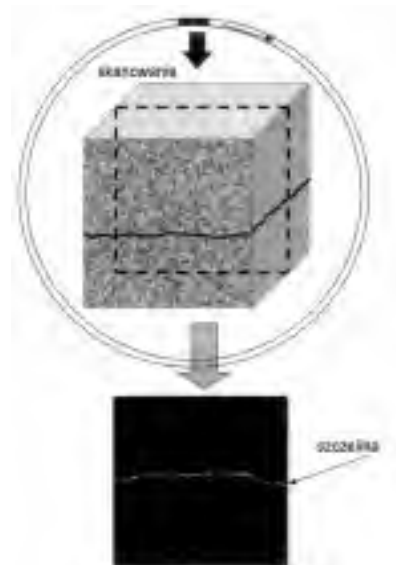
$\mu_t$  – jest współczynnikiem tłumienia liniowego charakterystycznym dla próbki,

$\mu_w$  – jest współczynnikiem tłumienia liniowego charakterystycznym dla wody,

$K$  – jest współczynnikiem proporcjonalności, w opracowaniu  $K = 1000$ .

Ogólnie wartość CT jest proporcjonalna do gęstości próbki. Gęstości skały granitowej i żywicy wynosiły w przybliżeniu odpowiednio  $2,7 \text{ g/cm}^3$  i  $1 \text{ g/cm}^3$ . Rysunek 3 przedstawia sposób skanowania skały granitowej metodą CT.

Rysunek 4 ilustruje przykład rozkładu wartości CT uzyskanych w prezentowanym badaniu wzdłuż kierunku Z. Średnia wartość CT matrycy granitowej wynosiła około 2000 i zmieniała się w granicach od 1000 do 3000. Wartość CT na szczelinie wypełnionej materiałem o niższej gęstości (w porównaniu do matrycy skalnej)



Rys. 3. Sposób skanowania skały granitowej metodą rentgenowskiej tomografii komputerowej (CT) [22]

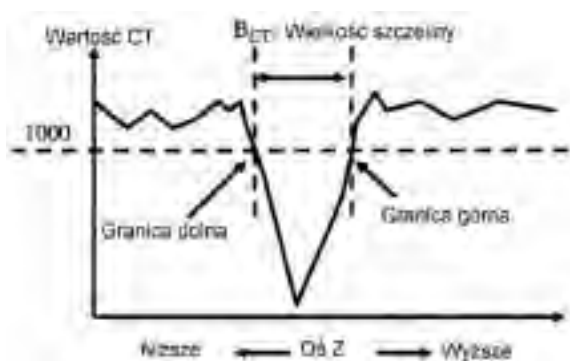


Rys. 4. Przykład rozkładu wartości CT uzyskanych wzdłuż kierunku Z [22]

była mniejsza niż w pozostałym obszarze. Na podstawie rysunku 4 można zidentyfikować miejsce położenia.

W celu uproszczenia procedury pomiaru założono, że granica pomiędzy matrycą skalną a szczeliną określona jest wartością CT równą 1000. Wynikało to z uwzględnienia różnicy średniej wartości CT pomiędzy matrycą skalną, a wypełniającą szczelinę żywicą epoksydową, oszacowaną na podstawie (wyżej wspomnianej) średniej gęstości każdej z nich. Rysunek 5 to schematyczna ilustracja granicy pomiędzy matrycą skalną a szczeliną, dla oceny rozwarcia szczeliny.

Takemura A. i in. [17] analizował siatkę 3D mikropeknięć w odkształconym granicie za pomocą metody tensora pęknięć i stereologii. Jednak w opracowaniach tych nie udało się wykryć szczegółów geometrycznych właściwości 3D, takich jak: kształt, rozwarcie i przewodność szczeliny. W związku z tym autor zaprojektował trójosiowy zbiornik ciśnieniowy, połączony z aparaturą micro-CT, w celu bezpośredniej obserwacji



Rys. 5. Schematyczna ilustracja granicy pomiędzy matrycą skalną a szczeliną, dla oceny rozwarcia szczeliny [22]

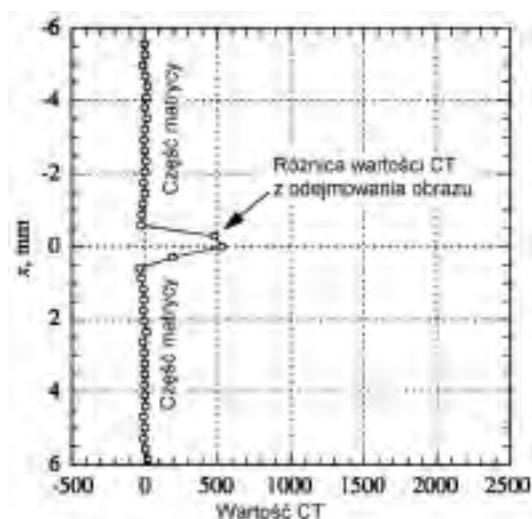
zmian rozwarcia szczeliny przy wzrastającym ciśnieniu ograniczającym. Próbkę poddał odkształceniu w ww. zbiorniku przy ciśnieniu ograniczającym 80 MPa i ustabilizował ją za pomocą żywicy poliestrowej wymieszanej z rozpuszczalnikiem. Efektem tej pracy było zobrazowanie powstawania i ewolucji mikroszczelin w trakcie pęknięcia, pomiar rozwarcia mikroszczeliny oraz jej zmian pod ciśnieniem ograniczającym.

Sugawara K. i in. [15] wprowadził metodę rzutowania szczeliny do szacowania jej rozwarcia i wskazał, że dokładna ocena rozkładu rozwarcia szczeliny jest możliwa w przypadku gdy próbka skalna jest względnie jednorodna. Poprzez te badania zostało pokazane, że rentgenowska CT jest dobrym narzędziem wizualizacji i analizy materiałów geologicznych.

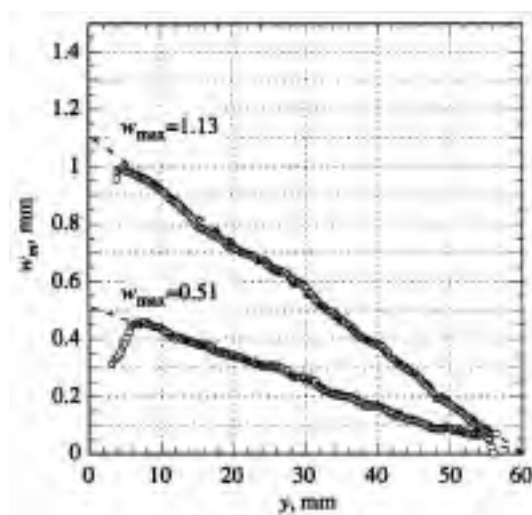
Sato A. i in. [13] zaproponował nową metodą pomiaru rozwarcia szczeliny skalnej – poprzez odejmowanie obrazów rentgenowskiej tomografii komputerowej. W metodzie tej budowane są dwa obrazy CT w różnych warunkach: w pierwszym wewnątrz szczeliny jest wypełnione powietrzem, a w drugim wewnątrz szczeliny wypełnione jest wodą (matryca próbki skalnej nie zmienia się pomiędzy tymi obrazami). W swym opracowaniu autor symuluje sztuczne szczeliny na próbkach skalnych i weryfikuje zasadność metody na próbkach granitu.

Przykład rozkładu wartości CT po odejmowaniu obrazów pokazano na rysunku 6. Na rysunku 7 przedstawiono wynik rozkładu rozwarcia szczeliny uzyskany metodą odejmowania obrazów X-ray CT, natomiast na rysunku 8 przytoczono wynik rozkładu rozwarcia szczeliny uzyskany metodą rzutowania szczeliny.

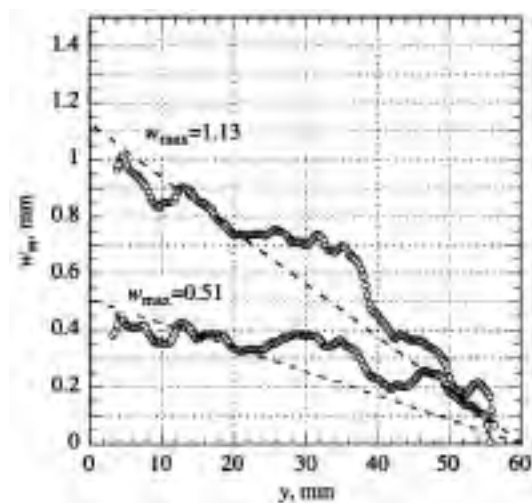
Sato A. i in. [13] dowiódł, że cechą charakterystyczną tej metody jest to, że możliwa jest redukcja zakłóceń związanych z rentgenowskimi obrazami CT, oraz że możliwe jest dokładne przetwarzanie obrazu.



Rys. 6. Rozkład wartości CT po odejmowaniu obrazów rentgenowskiej tomografii komputerowej [13]



Rys. 7. Wynik rozkładu otwarcia szczeliny uzyskany przez odejmowanie obrazów rentgenowskiej tomografii komputerowej [13]



Rys. 8. Wynik rozkładu rozwarcia szczeliny uzyskany metodą rzutowania szczeliny [13]

**Tablica 1.** Podstawowe parametry badanych próbek skał

Nr próbki	Stratygrafia litologia	Otwór wiertniczy	Współczynnik porowatości		Wspól. nasycenia wodą nieredukow.	Przepuszczalność
			całkowitej	efektywnej		
			K <sub>pNMR</sub> [%]	K <sub>pNMR,ef</sub> [%]	Sw, nr [%]	Kprz [mD]
8287	jura górna dolomit	GR-1K	4,64	4,08	12,07	0,94
8290	jura górna kalcyt	GR-1K	2,42	0,69	71,49	0,09
8617	jura górna	GR-2	11,86	10,55	11,05	0,05
3607	wapień cechsztyński dolomit-kalcyt	J-3	10,92	10,11	7,42	26,75

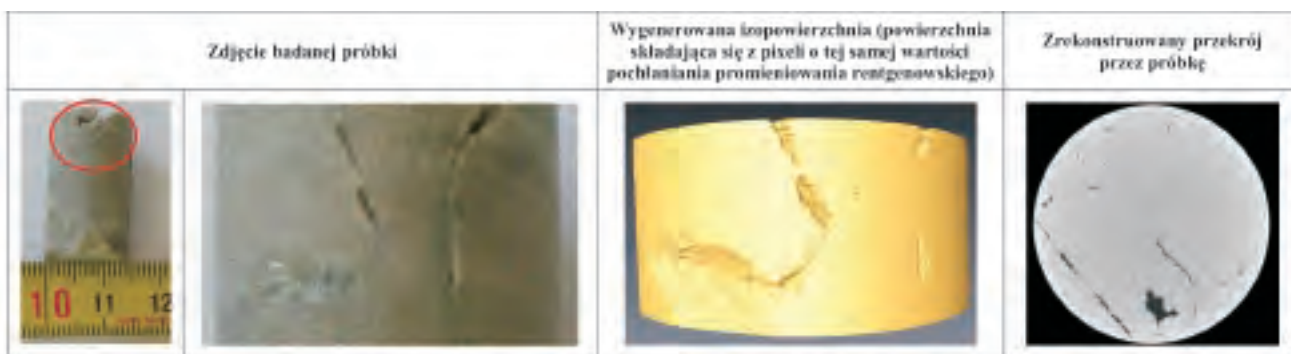
Wykazał również, że metoda odejmowania jest skutecznym narzędziem analizy materiałów heterogenicznych.

Jako przykładowe, w opracowaniu tym badano cztery próbki skał, pochodzące z 3 otworów wiertniczych: GR-1K i 2 oraz J-3. Próbki z otworu GR-1K i 2 reprezentowały utwory jury górnej przedgórze Karpat, a próbka z otworu J-3 pochodziła z utworów wapienia cechsztyńskiego monokliny przedsudeckiej. W tablicy 1 przedstawiono podstawowe parametry analizowanych próbek skał.

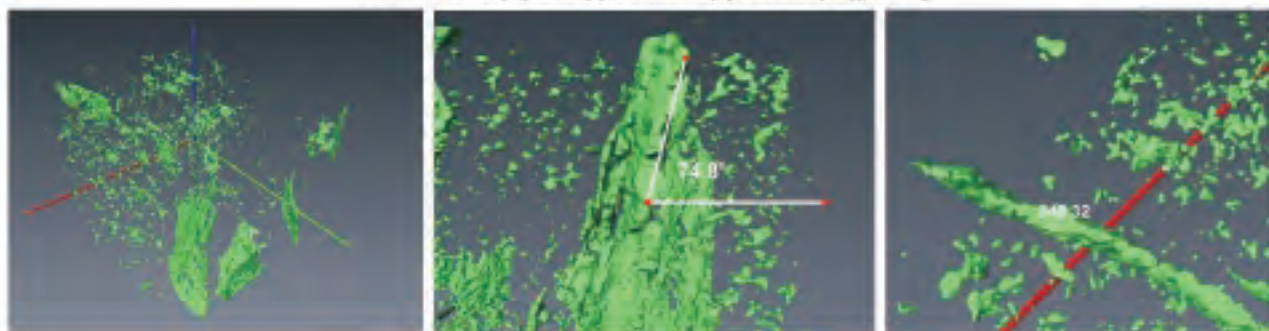
W niniejszym eksperymencie do skanowania rozwartości szczelin zastosowano mikrotomograf rentgenowski Benchtop 160 CT. Aparat ten składa się z działu rentgenowskiego, manipulatora i detektora. Próbkę umieszczano w holderze, który zapewniał jej przesuwanie wzdłuż trzech prostopadłych kierunków

oraz pozwalał na wykonywanie obrotu próbki względem pionowej osi manipulatora. Dzięki temu można było dowolnie powiększać i pomniejszać „cień” próbki na detektorze oraz ustawić w pionie badany jej fragment. Zastosowanie większego powiększenia umożliwiało lepszą rozdzielczość skanowanych obiektów.

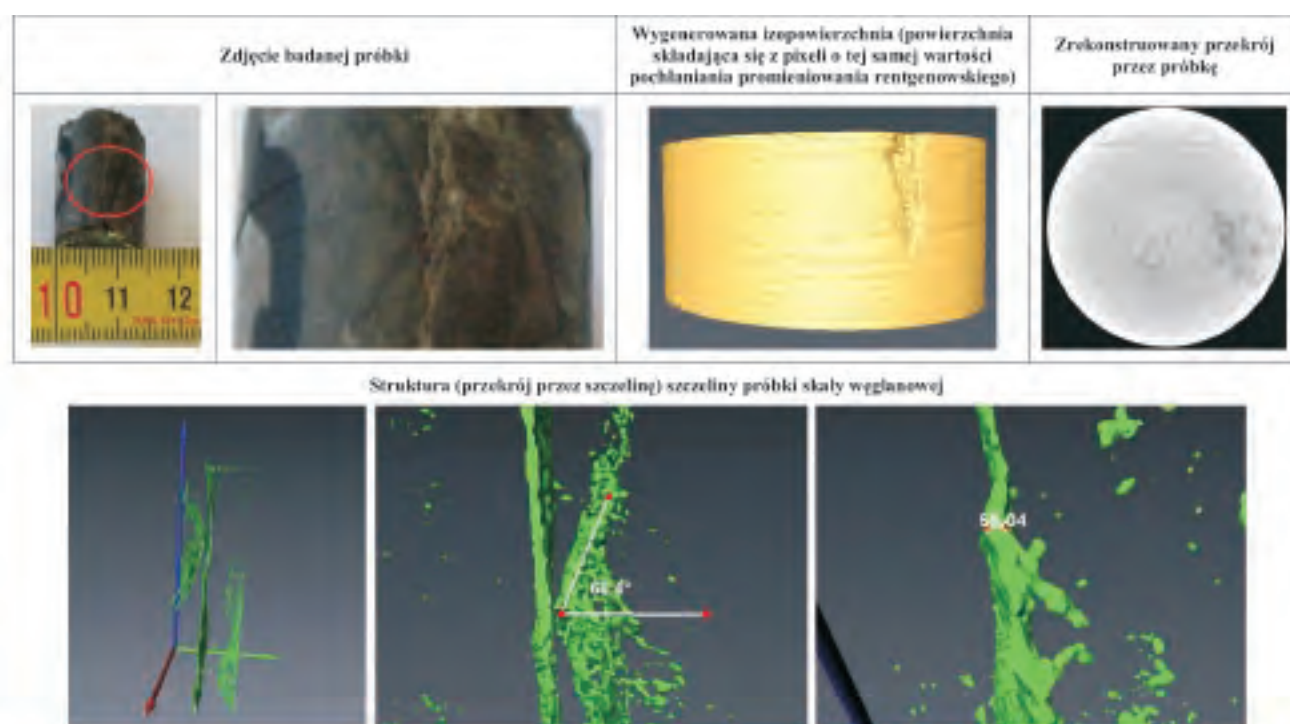
Podczas pomiaru próbka została prześwietlona promieniowaniem rentgenowskim (wykorzystuje się różnice we własnościach absorpcyjnych materiałów, które, w zależności od składu mineralnego, w różny sposób pochłaniają promieniowanie). Pozyskiwane podczas pomiaru dane utworzyły dwuwymiarowe radiogramy, zwane projekcjami. Dane te są gromadzone i zapisywane na twardym dysku komputera. W przedstawionych przykładach (rysunki 9-12) proces akwizycji generował prawie trzy tysiące projekcji.



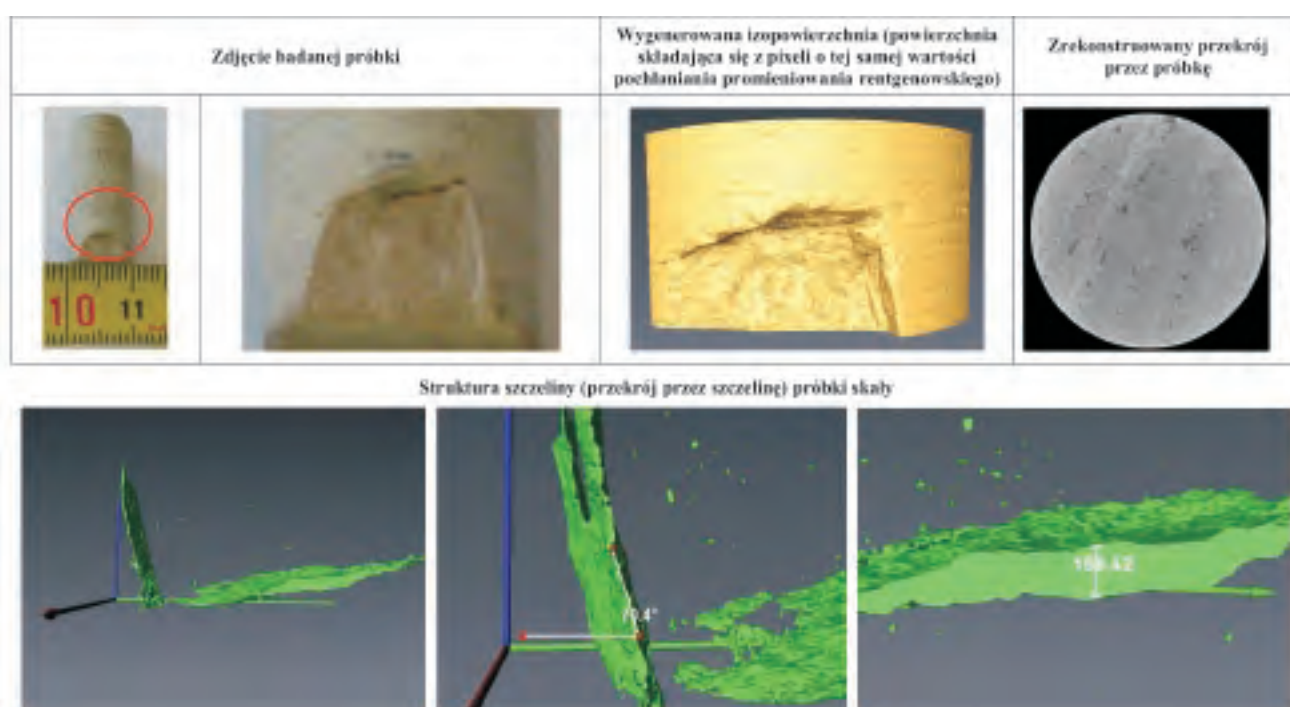
Struktura szczeliny (przekrój przez szczelinę) próbki skały węglanowej



**Rys. 9.** Wizualizacja szczelin wygenerowanych za pomocą mikrotomografu rentgenowskiego dla próbki 8287 otwór GR-1K, głębokość pobrania próbki: 2999,00 m



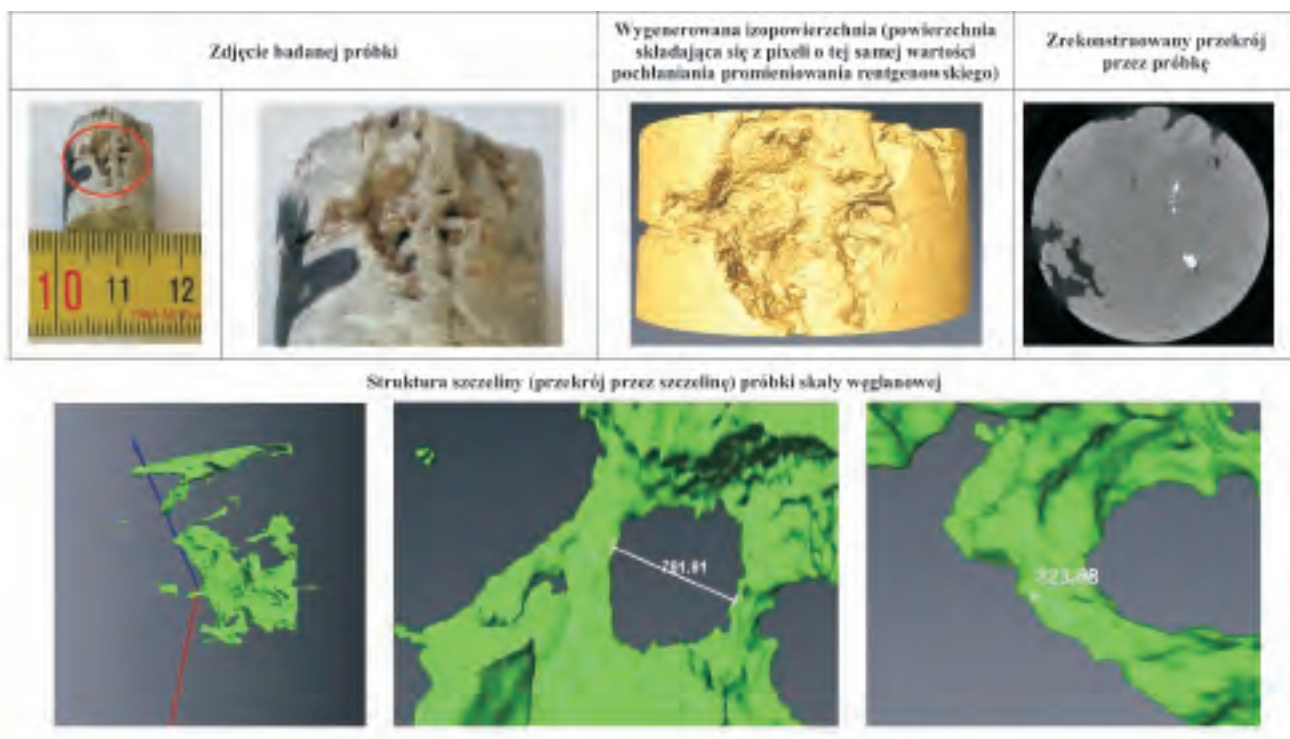
**Rys. 10.** Wizualizacja szczelin wygenerowanych za pomocą mikrotomografu rentgenowskiego dla próbki 8290 otwór GR-1K, głębokość pobrania próbki: 3150,70 m



**Rys. 11.** Wizualizacja szczelin wygenerowanych za pomocą mikrotomografu rentgenowskiego dla próbki 8617 otwór GR-2, głębokość pobrania próbki: 2065,00 m

W pomiarach zastosowano funkcję ograniczającą powstawanie artefaktów o kształcie pierścienia. Następnie zrekonstruowane obrazy poddano segmentacji oraz prostej analizie liczbowej.

Skanowanie próbek zostało przeprowadzone przy napięciu lampy 40-160 kV i natężeniu prądu 0-500  $\mu$ A. Wykonywano jedną projekcję co 0,5°, w zakresie do 360°. Obrazy zrekonstruowano używając algorytmu



**Rys. 12.** Wizualizacja szczelin wygenerowanych za pomocą mikrotomografu rentgenowskiego dla próbki 3607 otwór J-3, głębokość pobrania próbki: 2400,80 m

(programu Avizo) (rekonstrukcja: oprogramowanie CT-Pro, wizualizacja i analiza: program Avizo).

Analizowane próbki to rdzeniki walcowe o średnicy 15 mm i wysokości 20 mm. Uzyskana rozdzielczość przestrzenna obrazu wynosiła poniżej 6,0  $\mu\text{m}$ , co pozwoliło na bardzo dobre odtworzenie wewnętrznej struktury przestrzeni porowej.

Wizualizacja szczelin wygenerowanych za pomocą mikrotomografu rentgenowskiego dla poszczególnych próbek została przedstawiona na rysunkach 9-12. Rysunki te przedstawiają kolejno zdjęcie badanej próbki,

a następnie wygenerowaną izopowierzchnię (charakteryzującą się tą samą absorpcją promieniowania), zrekonstruowany przekrój poprzeczny próbki oraz przekrój przez szczelinę próbki skały węglanowej.

W poszczególnych próbkach wydzielono szczeliny oraz pomierzono ich rozwartość, szerokość, kąt nachylenia oraz odległość pomiędzy sąsiednimi szczelinami. Poza pomiarem kąta uwarstwienia szczelin można również mierzyć procentowy udział objętości szczelin w próbce skały, a co najważniejsze – w dowolnym miejscu dokonać dokładnego pomiaru szerokości szczelin.

### Podsumowanie

Postęp w dziedzinie urządzeń do wizualizacji obrazów i technologii komputerowej sprzyja wdrażaniu bardzo różnorodnych modeli 3D mediów porowatych, które umożliwiają zastosowanie złożonych metod symulacji. Metody te wydają się być bardzo obiecujące dla oceny właściwości petrofizycznych w sposób szybki i przy niskich kosztach, z wykorzystaniem wyłącznie znajomości geometrii porowej 3D skał zbiornikowych.

Chociaż w chwili obecnej skanery mikrotomograficzne nie są jeszcze rutynowo dostępne, to pozwalają

one generować obrazy 2D z rozdzielczością przestrzenną kilku mikrometrów. Obrazy te mogą być wizualizowane jako objętości 3D na tyle szczegółowo, że możliwe jest scharakteryzowanie struktury porowej próbki.

Mikrotomografia rentgenowska jest techniką umożliwiającą wizualizację struktury wewnętrznej materiałów porowatych, pomagającą zrozumieć właściwości petrofizyczne skał zbiornikowych oraz pozwalającą na obliczeniowe symulowanie zjawisk przepływu różnych mediów w przestrzeni porowej skały.

*Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Kostecki*

## Literatura

- [1] Bertels S.P., DiCarlo D.A., Blut M.J.: *Measurement of aperture distribution capillary pressure, relative permeability, and in situ saturation in a rock fracture using computed tomography scanning*. Water Resources Research, 37, p. 649-662, 2001.
- [2] Brown A.R., Kranz R.L., Bonner B.P.: *Correlation between the surfaces of natural rock joints*. Geophysical Research Letters, 13, p. 1430-1433, 1986.
- [3] Detwiler R.L., Pringle S.E., Glass R.J.: *Measurement of fracture aperture fields using transmitted light; an evaluation of measurement errors and their influence on simulations of flow and transport through a single fracture*. Water Resources Research, 35, p. 2605-2617, 1999.
- [4] Gentier S., Bilaux D., Vliet L.V.: *Laboratory testing of the voids of a fracture*. Rock Mechanics, 22, p. 149-157, 1989.
- [5] Johns R.A., Steude J.S., Castanier L.M., Roberts P.V.: *Non-destructive measurements of fracture aperture in crystalline rock cores using X-ray computed tomography*. Journal of Geophysical Research, 98, p. 1889-1900, 1993.
- [6] Keller A.: *High resolution, non-destructive measurement and characterization of fracture aperture*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 35, p. 1037-1050, 1998.
- [7] Kumar A.T.A., Majors P.D., Rossen W.R.: *Measurement of aperture and multiphase flow in fractures using NMR imaging*. In: Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, Paper SPE-30588.
- [8] Leonard A., Blacher S., Marchot P., Pirard J.P., Crine M.: *Image analysis of X-ray microtomograms of soft materials during convective drying*. Journal of Microscopy, vol. 212, Pt 2 November 2003.
- [9] Peyton R.L., Haefner B.A., Anderson S.H., Gantzer C.J.: *Applying X-ray CT to measure macropore diameters in undisturbed soil cores*. Geoderma, 53, p. 329-340, 1992.
- [10] Polak A., Yasuhara H., Elsworth D., Liu J., Grader A., Halleck P.: *The evolution of permeability in natural fractures – the competing roles of pressure solution and free-face dissolution*. Symposium SS03, EUG XI, 2001.
- [11] Pyrak-Nolte L.J., Myer L.R., Cook N.G.W., Witherspoon P.A.: *Hydraulic and mechanical properties of natural fractures in low permeability rock*. In: Herget G., Vongpaisal S. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Congress of Rock Mechanics. Balkema, Rotterdam, p. 225-231, 1987.
- [12] Renshaw C.E., Dadakis J.S., Brown S.R.: *Measuring fracture apertures: a comparison of methods*. Geophysical Research Letters, 27, p. 289-292, 2000.
- [13] Sato A., Fukahori D., Sugawara K.: *Crack opening analysis by the X-ray CT image subtraction method*. X-ray CT for Geomaterials. p. 247-254, 2004.
- [14] Sellers E., Vervoort A., Van Cleynenbreugel J.: *Three-dimensional visualization of fractures in rock test samples, simulating deep level mining excavations, using X-ray computed tomography*. Geological Society, London, Special Publications, vol. 215, p. 69-80, 2003.
- [15] Sugawara K., Obara Y., Sato A.: *Visualization of water saturation process in rock by X-rays CT*. 99' Japan-Korea Joint Symposium on Rock Engineering Fukuoka, p. 503-508, 1999.
- [16] Sugawara K., Fukahori D., Iwatani T., Ikutake T., Kubota S.: *Analysis of wetting process of rock by means of X-ray CT*. X-ray CT for Geomaterials, p. 315-334, 2004.
- [17] Takemura T., Oda M., Takahashi M.: *Microstructure observation in deformed geomaterials using microfocus X-ray computed tomography*. X-ray CT for Geomaterials. p. 299-304, 2004.
- [18] Timmerman A., Vandersteen K., Fuchs T., Van Cleynenbreugel J., Feyen J.: *A flexible and effective pre-correction algorithm for non medical applications with clinical X-ray CT scanners*. In: Proceedings of the Workshop on Modelling of Transport Processes in Soil at Various Scales in Time and Space, Leuven, Belgium, p. 121-131, 24-26 November 1999.
- [19] Van Geet: *Optimisation of microfocus X-ray computer tomography for geological research with special emphasis on coal components (macerals) and fractures (cleats) characterisation*. PhD thesis, K.U. Leuven, Belgium 2001.
- [20] Vandersteen K., Busselen B., Van Den Abeele K., Carmeliet J.: *Quantitative characterization of fracture apertures using microfocus computed tomography*. Geological Society, London, Special Publications, vol. 215, p. 61-68, 2003.
- [21] Verhelst F., Vervoort A., De Bosscher P.H., Marchal G.: *X-ray computerized tomography: determination of heterogeneities in rock*. In: Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Congress of Rock Mechanics. Balkema, Rotterdam, p. 105-108, 1995.
- [22] Yoshino N., Sawada A., Sato H.: *An examination of aperture estimation in fracture rock*. X-ray CT for Geomaterials. p. 255-262, 2004.



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.



Mgr inż. Grażyna SIKORA – absolwentka Politechniki Krakowskiej, kierunek Inżynieria Chemiczna i Procesowa, specjalność Inżynieria Procesów Technologicznych. Od lutego 2007 r. pracownik Zakładu Geofizyki Wiertniczej INiG w Krakowie.