



## Możliwości wykorzystania wysokorozdzielczej mikrotomografii komputerowej w badaniach geologiczno-inżynierskich na przykładzie analizy iłów mio-pleoceńskich

Łukasz Kaczmarek<sup>1,2</sup>



**The possibility of using high-resolution X-ray computed microtomography in engineering geology analysis, based on a study of Mio-Pliocene clays.** Prz. Geol. 64: 105–112.

*Abstract.* The paper considers the use of high-resolution X-ray computed microtomography ( $\mu$ CT) as a possible method in engineering-geological laboratory research for indicating areas of weakness, location of fissures and determining homogeneity of clay samples. Furthermore, the studies were used to provide methodological guidance. Mio-Pliocene (Neogene) clay samples were taken from an excavation site of the Kopernik underground station in Warsaw. First, natural humidity, bulk density and fraction analyses of samples were made. Secondly,  $\mu$ CT scans were conducted, with the use of copper filters. In the final stage of the study, internal structure images for samples were processed and analysed. Furthermore, a numerical model of dry sample was developed. During the study it

was observed that the increase of temperature caused by X-ray radiation has a destructive effect on the sample. This effect was eliminated by applying a protective layer on the sample, using engine oil. The article quantifies the ratio of radiation-heated fissure volume to dry sample volume and the natural fissure volume to sample volume. Moreover, sample areas with different densities or chemical composition were studied. The results lead to the conclusion that the  $\mu$ CT technique is applicable to characterise of Mio-Pliocene clay, supplying internal structure assessment and fissure quantification that allow for samples verification to further engineering geology in-depth analysis.

**Keywords:** computed microtomography, engineering geology, Mio-Pliocene clay, Kopernik underground station

Jednymi z podstawowych parametrów w budownictwie są parametry wytrzymałościowe, świadczące o właściwościach mechanicznych gruntu. Założeniem teoretycznym mechaniki gruntów, wyjaśniającym zależność powierzchni poślizgu (zniszczenia) gruntu od stanu naprężeń, jest izotropowy ośrodek gruntowy (Wiłun, 1976). Z tego powodu wiarygodne i rzetelne wyznaczenie parametrów wymaga wykorzystania miarodajnej oraz „izotropowej” serii próbek o nienaruszonej strukturze (NNS), pobranych i przechowywanych w sposób zapewniający zachowanie naturalnej wilgotności (PN-88/B-04481). Tymczasem jak pokazują badania dotyczące analizowanego gruntu, posiada on ukryte cechy strukturalne w postaci predysponowanych powierzchni poślizgu oraz mikroszczelin o genezie glacictektonicznej (Wysocki, 1976; Kumor, 1985; Gorączko i Kumor, 2011). W celu przedstawienia przykładu wpływu niejednorodności próbek gruntu na zaburzenie wyników parametrów wytrzymałościowych, warto przywołać powszechnie stosowane badanie w komorze trójosiowego ściskania. Elementarna forma tego badania, upraszczając, polega na osiowym ściskaniu próbki przy stałym naprężeniu bocznym (Head, 1986). Podczas ściskania próbki są rejestrowane odkształcenia oraz stawiany przez nią opór. W przypadku istnienia naturalnych, predysponowanych starych powierzchni ścięcia, szczelin czy też obecności ziaren gruntu o większej frakcji następuje obniżenie parametrów wytrzymałościowych gruntu. W konsekwencji otrzymane wyniki badań są niemiarodajne. Idealnym rozwiązaniem byłoby sprawdzenie jednorodności próbki przed jej zniszczeniem, w celu wytypowania próbek o podobnych

cechach strukturalnych i teksturalnych. Współczesnym narzędziem pozwalającym na tego typu badanie jest metoda wysokorozdzielczej mikrotomografii komputerowej (inaczej mikrotomografii rentgenowskiej –  $\mu$ CT lub CMT).

Szczegółowy opis metodyki analiz z wykorzystaniem mikrotomografu został przedstawiony w artykułach Ketchama i Carlsona (2001) oraz Landisa i Keane’a (2010). W literaturze można znaleźć również różne implementacje  $\mu$ CT. Na początku metoda ta znalazła zastosowanie w medycynie (Oldendorf, 1961; Cormack, 1963; Mirvis, 1989), następnie w produkcji żywności (Piąkowski, 2009). Wraz ze wzrostem rozdzielczości i powiększenia zaczęto ją wykorzystywać w inżynierii materiałowej (Hejłak i in., 2009). Obecnie jest to metoda stosowana również w różnych dziedzinach geologii (Baker i in., 2012; Gnutde & Boone, 2013), a szczególnie w geologii złożowej (Appoloni i in., 2007; Machado i in., 2014), która wykorzystuje możliwości określenia porowatości próbek (Bielecki i in., 2013; Beckers i in., 2014). Aktualnie są prowadzone badania nad techniką tomografii komputerowej z użyciem synchrotronu (Fusseis i in., 2014). Metody tomografii komputerowej, mikrotomografii komputerowej oraz mikrotomografii z wykorzystaniem synchrotronu różnią się m.in.: czasem pomiaru, intensywnością użytego promieniowania, sposobem wzbudzenia promieniowania rentgenowskiego, rozdzielczością i wielkością otrzymywanego obrazu. W badaniach wykorzystano mikrotomograf MicroXCT-400, wykonany przez amerykańską firmę Xradia. Dwa główne komponenty tego urządzenia to źródło (inaczej lampa lub działło) promieniowania rent-

<sup>1</sup> Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; lukasz.kaczmarek@uw.edu.pl.

<sup>2</sup> Wydział Inżynierii Materiałowej, Politechnika Warszawska, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa.

genowskiego oraz detektor promieniowania, którym jest kamera z matrycą CCD (układ wielu elementów światłoczułych). Najmniejsza możliwa wielkość piksela obrazu uzyskiwana w badaniach, podawana przez producenta, to ok. 1  $\mu\text{m}$ . Warto zaznaczyć, że wartość ta jest wypadkową m.in. wielkości skanowanej próbki (im mniejsza próbka, tym mniejszy piksel i większa dokładność).

### CEL PRACY

W artykule zostało postawione pytanie o możliwość wykorzystania wysokorozdzielczej mikrotomografii komputerowej w laboratoryjnych badaniach geologiczno-inżynierskich dla określenia: struktury wewnętrznej oraz jednorodności próbki, stref osłabienia gruntu i obecności szczelin/mikroszczelin. Celem przeprowadzonych badań było sformułowanie wskazówek dotyczących metodologii nieniszczących i nieinwazyjnych analiz budowy wewnętrznej gruntu. Kolejne zadanie stanowiła analiza iłów mio-plioceńskich (neogeńskich) dla weryfikacji przydatności do dalszych badań wytrzymałościowych. Następnym etapem prac było obliczenie procentowego stosunku objętości szczelin do objętości próbek. Dodatkowo przeanalizowano możliwość stworzenia numerycznego modelu próbek zawierających spękania naturalne lub spowodowane przesuszeniem w wyniku niedokładnego zabezpieczenia materiału do badań (wykorzystując obrazy „prześwietleń” rentgenowskich). Na podstawie takiego modelu można przeprowadzić symulację przepływu z oceną wpływu rozwarcia szczelin na właściwości filtracyjne gruntu (Dvorkin i in., 2009; Tölke i in., 2010).

### MATERIAŁ BADAWCZY

Do badań wykorzystano serie próbek czarnozielonych iłów neogeńskich, wyciętych i przygotowanych z pobranych monolitów, pozyskanych ze ściany wykopu stacji metra Kopernik (przy ul. Dynasy) w Warszawie, z głębokości 10 m p.p.t. Jest to obszar lewobrzeżnego tarasu Wisły (Sarnacka, 1992). Materiał badawczy to montmoryllonitowo-illitowy ił w stanie półzwartym (Wysokiński, 2013). Iły wykorzystane do badań charakteryzowały się średnią wilgotnością 25%, gęstością objętościową 1,91  $\text{Mg/m}^3$  oraz średnią zawartością frakcji iłowej 46%, frakcji pyłowej 39% i frakcji piaskowej 15%.

Badane próbki miały kształty walców oraz prostopadłościaków, co było podyktowane projektowanymi w następnej kolejności badaniami wytrzymałościowymi. Jednym z takich badań będzie powszechnie stosowana analiza parametrów kąta tarcia wewnętrznego oraz spójności w aparacie trójosiowego ściskania. Do takiego badania wykorzystuje się próbki o stosunku średnicy do wysokości 1 : 2, np. walcowe próbki o średnicy 3,6 cm i wysokości 7,2 cm (PKN-CEN ISO/TS 17892-9). Innym testem do określenia charakterystyki wytrzymałościowej, również residualnej, próbek gruntu jest badanie w aparacie bezpośredniego ścinania, gdzie są wymagane próbki w kształcie prostopadłościaku o wymiarach 6,0  $\times$  6,0  $\times$  2,0 cm (PKN-CEN ISO/TS 17892-10). Po wykonaniu obrazowania mikrotomograficznego próbek bez zabezpieczenia przed wysychaniem, w mikrotomografii umieszczono próbki z zabezpieczeniem i przeprowadzono



Ryc. 1. Przygotowywana próbka iłu (zabezpieczona przed wysychaniem) do badania w mikrotomografii

Fig. 1. Clay specimen, protected from drying and prepared for X-ray microtomography testing

badanie, które polegało na wypełnieniu olejem silnikowym szczelnego plastikowego pojemnika z próbką (ryc. 1). Przeanalizowano również wpływ rozmiaru próbek na mierzoną adsorpcję promieniowania. Wykorzystanie oleju miało na celu wypełnienie porów na brzegu próbki gruntu oraz odbieranie ciepła radiacyjnego. Ważnym kryterium doboru oleju jest jego jak najmniejsza gęstość, taka żeby absorpcja oleju nie wpływała w istotny sposób na jakość otrzymywanych obrazów uzyskanych techniką  $\mu\text{CT}$ . Istotne jest również, aby próbka gruntu podczas obrotu w mikrotomografii była stabilna, z tego powodu lepkość oleju powinna być stosunkowo duża i nie powinna zmieniać się ze wzrostem temperatury.

### METODYKA

W pierwszym etapie badań określono wilgotność naturalną, gęstość objętościową oraz skład granulometryczny próbek na podstawie PN-88/B-04481. Wilgotność została wyznaczona poprzez suszenie w suszarce laboratoryjnej w temperaturze 105°C, natomiast do uzyskania gęstości objętościowej wykorzystano metodę wyporu hydrostatycznego (Myślińska, 1998). Analizę składu granulometrycznego materiału badawczego wykonano za pomocą metody areometrycznej. Następnym etapem było kolejno przygotowywanie pojedynczych próbek i przeprowadzanie na bieżąco pomiarów mikrotomograficznych, w celu uniknięcia wysychania próbek (analizowana może być tylko jedna próbka). W dalszym ciągu badań wyniki skanowania opracowano komputerowo, w tym m.in. określono zawartość szczelin w próbkach niezabezpieczonych i zabezpieczonych przed wysychaniem. Uzupełniając, dla oceny efektywności wykorzystania oleju, wykonano pomiar wilgotności przed i po badaniu w mikrotomografii, w celu sprawdzenia zmian wilgotności. Ostatnim etapem było oczyszczenie zabezpieczonych próbek, poprzez odcięcie powierzchni, na których doszło do interakcji z olejem.

## WYKONYWANIE, PRZETWARZANIE I ANALIZA OBRAZÓW TECHNIKĄ $\mu$ CT

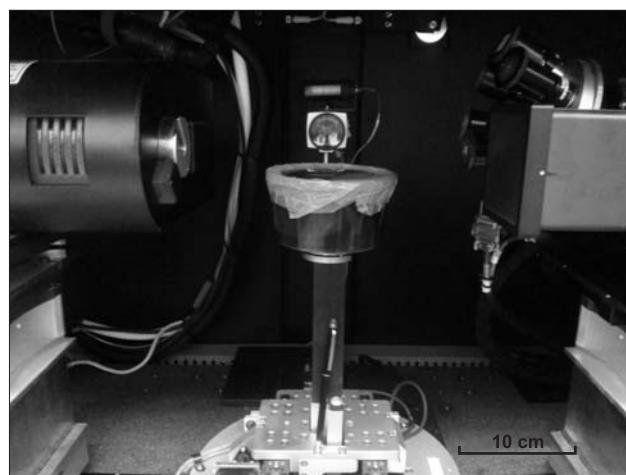
Mikrotomografia komputerowa to obrazowanie cząstek i obszarów o różnych liniowych współczynnikach absorpcji promieniowania rentgenowskiego. Im większy kontrast współczynników, tym wyraźniej można określić wewnętrzną strukturę analizowanych próbek. Uogólniając, liniowy współczynnik absorpcji jest funkcją gęstości oraz składu chemicznego badanego materiału, jak również energii padających kwantów promieniowania na cząsteczki gruntu. Grunty ilaste stanowią rozdrobniony materiał badawczy o wysokim współczynniku absorpcji i jego małym kontraście, co powoduje, że są wymagane zabiegi techniczne oraz odpowiednie przetwarzanie obrazu, pozwalające na zwiększenie kontrastu oraz eliminację zakłóceń. Badanie metodą  $\mu$ CT można podzielić na trzy główne etapy: rejestracja danych w mikrotomografie, rekonstrukcja projekcji oraz przetwarzanie obrazów i trójwymiarowa wizualizacja. W czasie rejestracji następuje skanowanie obracającej się próbki (wokół własnej osi o kąt  $360^\circ$ ), z jednoczesną rejestracją przez detektor promieniowania rentgenowskiego, tworzącego dwuwymiarowe projekcje próbki (tzw. radiografy). Podczas rekonstrukcji następuje złożenie wszystkich obrazów z projekcji, dzięki czemu otrzymuje się trójwymiarowy obraz przeskanowanej próbki. Zrekonstruowane obrazy tomograficzne prezentuje się zwykle w skali odcieni szarości w ten sposób, że obszary o większym współczynniku pochłaniania promieniowania X (większa gęstość i/lub większa liczba atomowa pierwiastków składowych cząstek iłu) są jaśniejsze. Na tym etapie wygenerowano również wysokorozdzielczy zestaw dwuwymiarowych obrazów próbki zapisywanych w formacie bitmap (BMP). Ostatnim etapem jest przetworzenie obrazów BMP mające na celu usunięcie zakłóceń i uzyskanie obrazu binarnego (czyli przypisanie każdemu pikselowi obrazu informacji w systemie 0-1 określającej, czy jest on materiałem stanowiącym część analizowanej próbki), na podstawie którego można stworzyć trójwymiarowy model numeryczny. Główną zaletą metody  $\mu$ CT jest możliwość przeprowadzenia nieniszczącej analizy wewnętrznej struktury i tekstury próbki oraz proste i szybkie przygotowanie próbki do badania. Na rycinie 2 przedstawiono wykorzystany mikrotomograf Xradia MicroXCT-400 (Xradia, 2010).

Promieniowanie X, o geometrii stożkowej (wachlarzowej), było generowane za pomocą lampy rentgenowskiej (z anodą wolframową) Hamamatsu L8121-03 chłodzonej powietrzem (ryc. 3), która posiada możliwość regulacji napięcia przyspieszającego w zakresie 40–150 kV oraz mocy od 1 do 10 W. Obraz powstający podczas skanowania jest konwertowany do postaci cyfrowej (16-bitowej) za pomocą systemu matrycy detektora scyntylacyjnego CCD, który posiada rozdzielczość  $2048 \times 2048$  pikseli. Pierwszą warstwą detektora, jaką napotyka promieniowanie jonizujące, jest cezowo-jodkowy scyntylator o strukturze krystalicznej. Promieniowanie powoduje wzbudzenie atomów lub molekuł scyntylatora, które, oddając uzyskaną w ten sposób energię, emitują kwanty promieniowania światła widzialnego. Następnie znajduje się warstwa fotodiod, która przetwarza sygnał świetlny na elektryczny, zapisywany w postaci obrazu (Zalewska, 2010).

Podczas skanowania otrzymano radiografy. Zostały one poddane rekonstrukcji, za pomocą algorytmu projekcji



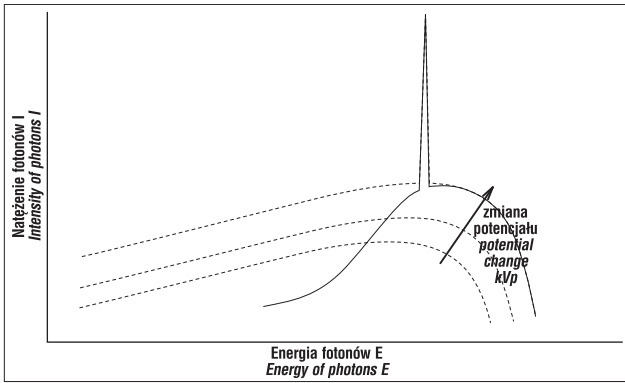
**Ryc. 2.** Walcowa próbka w komorze mikrotomografu Xradia MicroXCT-400, między lampą rentgenowską Hamamatsu L8121-034 (z lewej strony) a detektorem CCD (z prawej strony)  
**Fig. 2.** Cylindrical sample in a chamber of the MicroXCT-400 Xradia microtomography, between the Hamamatsu L8121-034 X-ray source (left) and the CCD detector (right)



**Ryc. 3.** Próbką w kształcie prostokąta zabezpieczoną przed wysychaniem (zamkniętą w szczelnym pojemniku zalanym olejem silnikowym) w mikrotomografie  
**Fig. 3.** Rectangular sample protected from drying (in a sealed container flooded with engine oil) in the X-ray microtomography

wstecznej z filtrowaniem (Feldkamp i in., 1984). Wybór tego algorytmu był związany ze stożkową geometrią wiązki promieniowania X (Zalewska, 2010). Po rekonstrukcji uzyskano zestaw wysokorozdzielczych obrazów BMP. Przy eksportowaniu radiografów do formatu BMP wykonano redukcję z zapisu 16-bitowego do 8-bitowego (256 poziomów szarości), w celu przyspieszenia procesu przetwarzania danych. Nie spowodowało to zauważalnej zmiany jakości obrazów. Następnie zestaw obrazów został złożony, w wyniku czego otrzymano wizualizację przekrojów wewnętrznych próbek (ryc. 4 i 5). Dalej wykonano binaryzację metodą progowania (ang. *thresholding*) z wykorzystaniem analizy kształtu histogramu (wykres liczby zliczeń pikseli do ich zaczerwienia), z powodu łatwości przeprowadzenia tej operacji oraz widocznych i możliwych do rozdzielania na histogramie różnych faz. Metoda ta polega na określaniu granicznych wartości zaczerwień charakterystycznych dla poszczególnych faz (Zalewska, 2010). Dzięki binaryzacji uzyskana segmentacja (podział na obszary równe pod względem wartości tłumienia promieniowania) obrazu pozwoliła na automatyczne przetworzenie do elementów

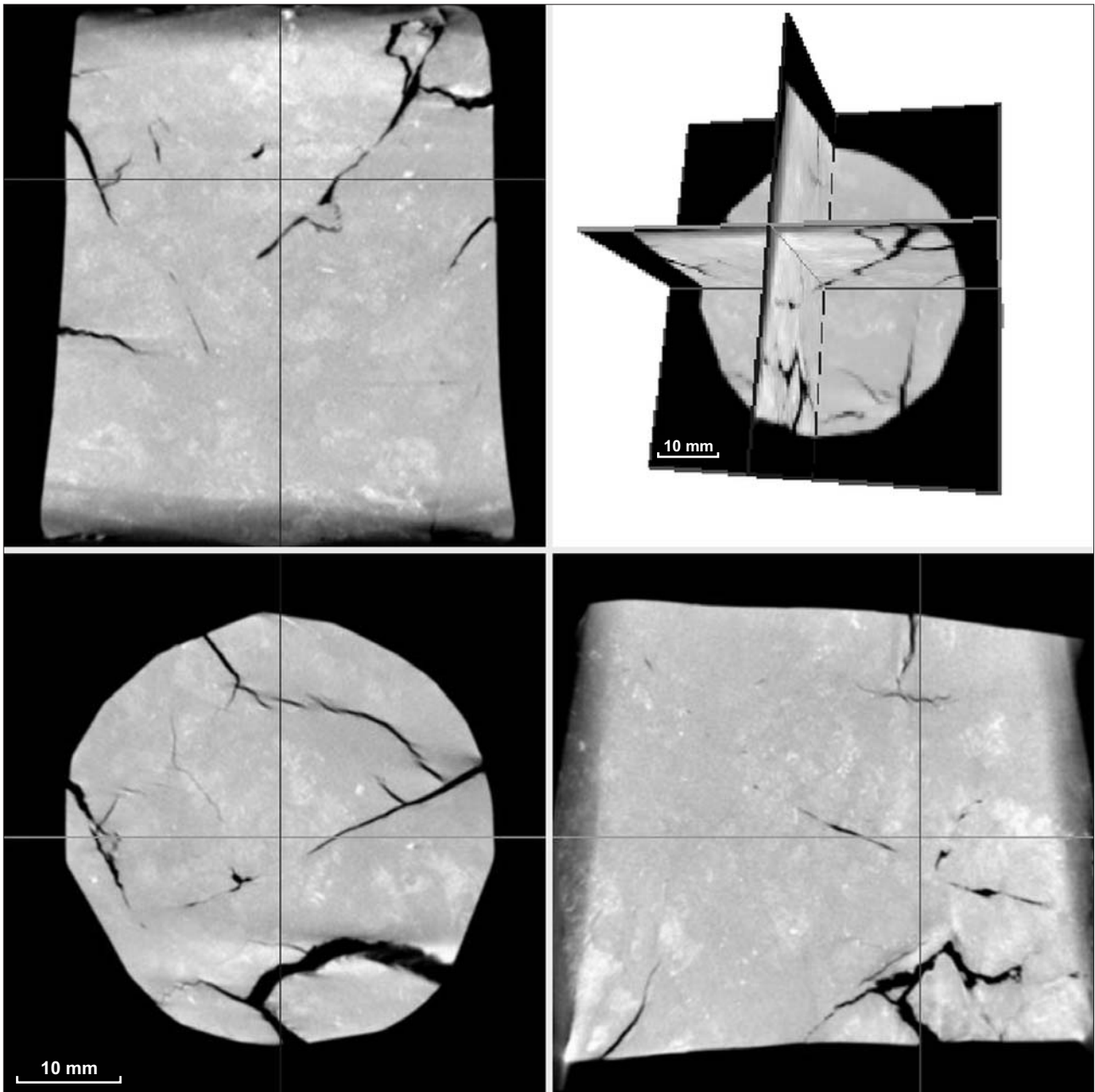




**Rys. 4.** Wpływ zastosowania miedzanego filtra na widmo energii fotonów, przy różnych napięciach przyspieszających, gdzie: linia przerywana to napięcie przyspieszające, linia ciągła to efekt zastosowania filtra (Stock, 2009)

**Fig. 4.** The effect of copper filter application on a photon energy spectrum at different acceleration voltages, where: dotted line is the accelerating voltage; solid line is the result of filter application (Stock, 2009)

objętościowych numerycznego modelu 3D próbki (ryc. 5). Do przetwarzania i analiz obrazu zostały wykorzystane programy CT-Analyser oraz DataView firmy Bruker, natomiast do stworzenia modelu numerycznego próbek iltu użyto programu Avizo 8.0 firmy FEI. Otrzymane wyniki pozwoliły na rozpoznanie szczelin oraz różnych gęstościowo



**Ryc. 5.** Zrekonstruowane i przetworzone przekroje próbki iltu, pokazujące wewnętrzną strukturę powstałych szczelin oraz obszary o zróżnicowanej gęstości lub składzie chemicznym

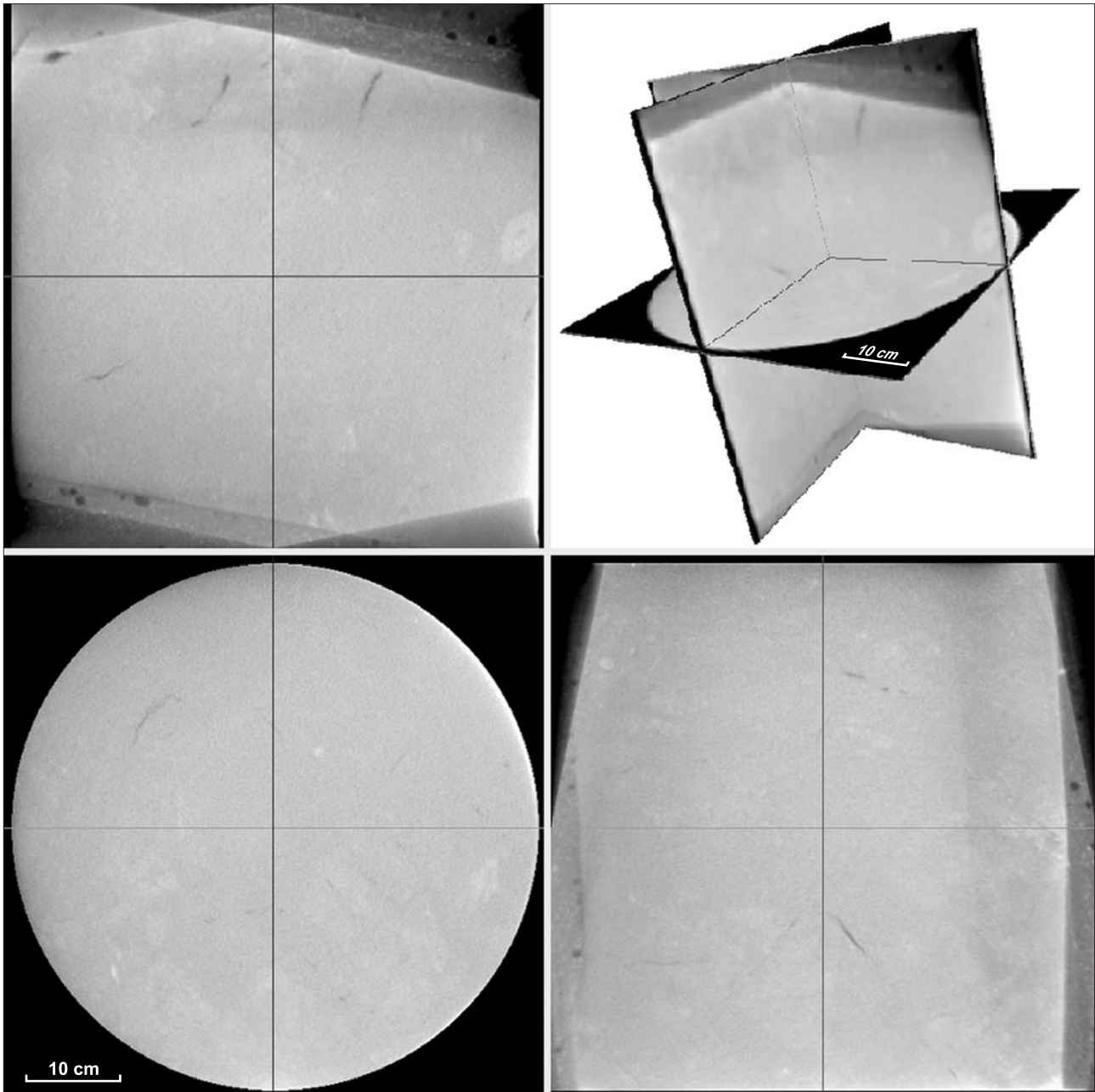
**Fig. 5.** Reconstructed and processed sections of clay sample, revealing the internal structure with created cracks and areas of different densities or chemical compositions

obszarów cząstek mineralnych wewnątrz próbki. Dodatkowym wynikiem analizy próbek ilów przy zastosowaniu  $\mu$ CT była możliwość obliczenia procentowego udziału objętości szczelin naturalnych oraz powstałych w wyniku wysychania do objętości próbek (Vv).

Dokładność metody  $\mu$ CT, wyrażająca się w wielkości piksela obrazu próbki, jest uzależniona od wielkości próbki (wraz ze wzrostem wielkości analizowanego obszaru spada wielkość piksela) i parametrów technicznych mikrotomografu (np. intensywności promieniowania rentgenowskiego i czasu ekspozycji próbki na promieniowanie). Parametry techniczne wpływają na tempo nagrzewania się próbek oraz powstawanie szczelin. Z tego powodu ważnym etapem badań było określenie wielkości piksela tak, żeby była możliwa analiza obrazu i identyfikacja ewentualnych szczelin. Uzyskane rozmiary piksela stanowiły od 20 do 50  $\mu$ m, w zależności od

wielkości obszaru analizy. Czas pomiaru wynosił 4h, przy 4-sekundowym naświetlaniu pojedynczego zdjęcia z serii 1024 zdjęć rentgenowskich. Długość pomiaru była uzależniona od uzyskania odpowiedniej do dalszego przetwarzania liczby zliczeń zaczernionych pikseli (w 256-kolorowej skali szarości). Piksele te tworzą cyfrowy obraz zapisany przez detektor w wyniku konwersji osłabionego sygnału promieniowania X, penetrującego próbkę. Podczas pomiaru napięcie oraz natężenie lampy rentgenowskiej wynosiły odpowiednio 130 kV i 54  $\mu$ A. Parametry te zostały pomniejszone z początkowych 150 kV oraz 67  $\mu$ A, w celu zmniejszenia ilości ciepła wytwarzanego przy maksymalnej mocy lampy.

Ograniczeniami techniki  $\mu$ CT są tzw. artefakty, czyli sztuczne elementy obrazu powstałe podczas rekonstrukcji. W czasie analizy iltu neogeńskiego wystąpiły m.in. artefakty niewspółosiowości, związane z niedoskonałym osiowaniem



**Ryc. 6.** Zrekonstruowane i przetworzone przekroje próbki iltu (zabezpieczonej przed utratą wilgotności naturalnej), pokazujące wewnętrzną strukturę analizowanego materiału oraz obszary o zróżnicowanej gęstości

**Fig. 6.** Reconstructed and processed sections of clay sample (protected from natural moisture loss) revealing the internal structure with created cracks and areas of different densities or chemical compositions

źródła, detektora oraz osi obrotu (Zalewska, 2010). Artefakt ten można zaobserwować na rycinach 5 i 6. Obraz próbek blisko krawędzi jest zaburzony i zdeformowany. Innym artefaktem, który zdołano usunąć za pomocą analizy obrazu podczas rekonstrukcji, są koncentryczne pierścienie w postaci pełnych lub częściowych okręgów. Przyczyną powstania tego rodzaju artefaktów są najczęściej wypalone piksele detektora lub błędne odczyty intensywności promieniowania (Sijbers & Postnov, 2004). Kolejnym rodzajem artefaktu, który wystąpił podczas badania, najbardziej uciążliwym (van Geet i in., 2000), było tzw. twarwienie wiązki. Występowanie tego zjawiska jest konsekwencją emitowania przez lampę rentgenowską wiązki polichromatycznej promieniowania X. Efekt ten występuje, gdyż wraz ze wzrostem drogi penetracji promieniowania średnia energii rośnie (Dohnalik, 2013). Jest to spowodowane tym, że fotony o niższej energii są łatwiej absorbowane na powierzchni próbki (van de Castele, 2004). Artefakt ten został zmarginalizowany przez zastosowanie jednorodnych filtrów wykonanych z miedzi (o grubości 0,1 oraz 0,5 mm), położonych między lampą rentgenowską a badaną próbką. Zadaniem metalowych filtrów jest absorbowanie niskoenergetycznego spektrum wiązki promieniowania (Dohnalik, 2013). Rysunek opublikowany przez Stocka (2009) przedstawia rezultat zastosowania filtru (zmianę widma energii przy wzroście napięcia przyspieszającego).

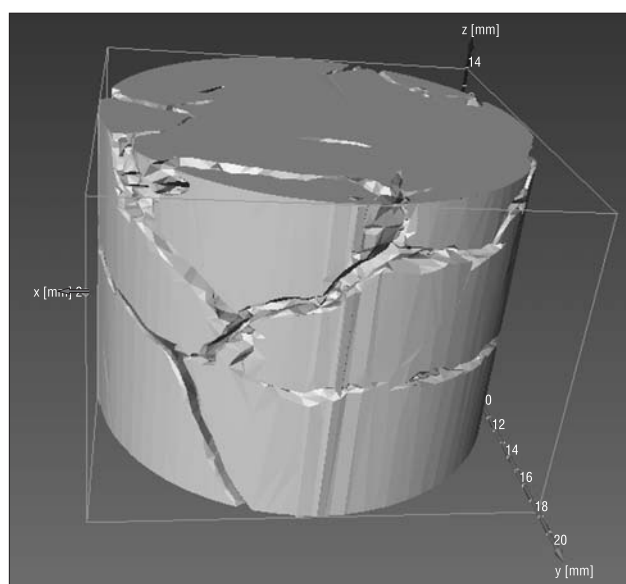
## WYNIKI I DISKUSJA

Otrzymane wyniki badań wilgotności naturalnej, gęstości objętościowej oraz składu granulometrycznego, które zostały przedstawione we wcześniejszym rozdziale dotyczącym opisywanego materiału badawczego, są zbieżne z rezultatami opracowań regionalnych iłów neogeńskich z obszaru Warszawy (Kaczyński, 2011). Głównym etapem badań było sprawdzenie możliwości wykorzystania  $\mu$ CT w analizie przykładowych, powszechnie występujących gruntów w Warszawie. W tym celu w pierwszym badaniu oceniono wpływ promieniowania rentgenowskiego na badaną próbkę gruntu. Po pomiarze zaobserwowano makroskopowo powstanie szczelin na powierzchni próbki oraz na przekrojach wysokorozdzielczych obrazów mikrotomograficznych przedstawiających strukturę wewnętrzną próbki. Obecność szczelin eliminuje możliwość wykorzystania próbek gruntu do dalszych badań wytrzymałościowych. Podczas skanowania odnotowano wzrost temperatury o ok. 10°C, co odpowiada temperaturze ok. 30°C w mikrotomografii. Wykonując przetwarzanie obrazów techniką  $\mu$ CT, określono piksele stanowiące objętość szczelin w próbce i wyznaczono ich stosunek do objętości całej walcowej próbki, który wyniósł  $V_v \approx 1,98\%$ . Na rycinie 5 przedstawiono strukturę wewnętrzną próbek iłów neogeńskich po badaniu z użyciem mikrotomografu. Następnym krokiem było powtórzenie badania, ale przy wykorzystaniu próbki o mniejszych rozmiarach (średnicy 2,5 cm i wysokości 5 cm). W tym przypadku udział szczelin wzrósł do poziomu  $V_v \approx 2,32\%$ .

Kolejną fazą badań w mikrotomografii było sprawdzenie możliwości zmniejszenia zmian wilgotności w próbce gruntu za pomocą oleju. W tym badaniu wykorzystano próbkę o kształtach prostopadłościanu. Najpierw poddano naświetleniu próbkę bez zabezpieczenia i uzyskano wynik

szczelinowości  $V_v \approx 2,48\%$ . Następnie zbadano próbkę zabezpieczoną za pomocą oleju oraz szczelnego opakowania, co dało pozytywne rezultaty w postaci braku szczelin na powierzchni próbki oraz  $V_v \approx 0,05\%$ . Analizując wyniki wykorzystania oleju silnikowego do ograniczenia wpływu temperatury, wykonano badanie wilgotności. Przed pomiarem średnia z pięciu pomiarów  $w_n$  była równa 25,39% ( $\sigma = 1,5\%$ ), natomiast bezpośrednio po skanowaniu  $w$  wynosiło 24,58%. Takie rezultaty świadczą o korzystnym zminimalizowaniu wpływu wahań temperatury. Do ostatnich pomiarów w mikrotomografii wykorzystano dwie próbki badanych iłów, przeznaczonych do dalszych badań wytrzymałościowych. Obecność szczelin była marginalna i wynosiła  $V_v \approx 0,08\%$  oraz  $V_v \approx 0,06\%$ . Rycina 6 przedstawia wyniki analizy metodą  $\mu$ CT próbki iłów pobranych z wykopu stacji metra, na której można zobaczyć drobne szczeliny w górnej części oraz jedną w dolnej. Analizując odcienie szarości, świadczące o niejednorodności, gdzie ciemniejsze odcienie szarości stanowią obszary o mniejszej gęstości lub mniejszej liczbie atomowej, natomiast jaśniejsze – o większej gęstości lub większym ciężarze atomów budujących cząstki iltu, można stwierdzić, że próbka posiada małą zmienność gęstości oraz składu chemicznego. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów należy wysnuć wnioski, że do wyselekcjonowania próbek do planowanych w następnym etapie badań wytrzymałościowych można wykorzystać technikę wysokorozdzielczej mikrotomografii komputerowej. Warunkiem koniecznym do spełnienia jest odpowiednie zabezpieczenie badanych próbek. Uzyskane wielkości piksela (20–50  $\mu$ m) podczas skanowania mikrotomografem pozwalają na identyfikację szczelin o minimalnej rozwarości 20  $\mu$ m. Zgodnie z PN 86/B 02480 wielkość frakcji pylastej i iltowej jest mniejsza lub równa 0,05 mm. Przy dokładności otrzymanej techniką  $\mu$ CT próbki iltu mio-pliocenińskiego mogą być analizowane dla określenia struktury próbek oraz ilościowego stosunku objętości szczelin do objętości próbki. Uzyskana dokładność nie pozwala jednak na badanie pojedynczych cząstek iltu.

W celu analizy próbek, w których powstały szczeliny, podjęto próbę stworzenia numerycznego modelu (ryc. 7).



Ryc. 7. Model numeryczny spękanej próbki po badaniu przy użyciu mikrotomografu

Fig. 7. The numerical model of cracked sample after the  $\mu$ CT test



Celem tej analizy było sprawdzenie możliwości tworzenia modeli próbek z naturalnie rozwiniętą siecią szczelin, które można by zastosować do numerycznych nieinwazyjnych analiz współczynnika filtracji (Dvorkin i in., 2009). Numeryczny model próbki gruntu może być wykorzystany do symulacji przepływu wody lub innej cieczy z wyznaczeniem linii kierunku przepływu. Należy jednak zaznaczyć, że obliczenia takie wymagają odpowiedniej mocy obliczeniowej oraz uwzględnienia dodatkowych czynników wynikających z wielkości szczelin (np. sił kapilarnych).

### PODSUMOWANIE

Jednorodność oraz brak czynników determinujących wytrzymałość na zniszczenie (np. szczelin) jest podstawowym założeniem badań parametrów mechanicznych w geologii inżynierskiej.

Nieniszcząca i nieinwazyjna metoda wysokorozdzielczej mikrotomografii komputerowej umożliwia analizę jednorodności oraz struktury wewnętrznej próbek gruntu. Metoda ta jest użyteczna w weryfikacji przydatności próbek gruntu do badań wytrzymałościowych. Wykonane skanowania z wykorzystaniem techniki mikrotomografii pozwoliły na analizę wpływu promieniowania rentgenowskiego na zmiany wilgotności w próbce oraz na obserwację powstałych podczas badań szczelin. W przypadku próbek ilów mio-plioceńskich, zabezpieczonych przed wysychaniem za pomocą oleju silnikowego oraz szczelnego opakowania, analizowana metoda umożliwiła zlokalizowanie naturalnych szczelin oraz obszarów cząstek gruntu o różnych gęstościach lub składzie chemicznym. Z powodu występowania artefaktu twardnienia wiązki, wykorzystano miedziane filtry zamontowane pomiędzy wolframową anodą lampy rentgenowskiej a próbką, co pozwoliło na usunięcie promieniowania o niższej energii. Obliczono również stosunki objętości szczelin powstałych podczas pomiaru do objętości całkowitych próbek, które znalazły się w zakresie 1,98–2,48%. Na zróżnicowanie wyników miały wpływ rozmiary próbek iłu oraz intensywność promieniowania rentgenowskiego. Wyniki obliczeń stosunku naturalnych szczelin do objętości całkowitych próbek były na poziomie marginalnym, w zakresie 0,05–0,08%. Otrzymane radiografy po rekonstrukcji umożliwiły zbudowanie trójwymiarowego obrazu próbek materiału badawczego. Wykonano również numeryczny model próbki, który można poddać matematycznej symulacji przepływu wody lub innej cieczy, co pozwala na analizy współczynnika filtracji. Na podstawie wykorzystanej metody wytypowano próbki, charakteryzujące się brakiem zauważalnych szczelin oraz stosunkowo jednorodną strukturą, z małymi obszarami cząstek gruntu różniącymi się gęstością lub składem chemicznym. Wybrane próbki zostaną wykorzystane do dalszych szczegółowych geologiczno-inżynierskich analiz wytrzymałościowych.

Autor pragnie wyrazić podziękowania dr. hab. P. Dobakowi, Recenzentom – dr. Z. Frankowskiemu oraz drugiemu, anonimowemu – za cenne uwagi i komentarze, które przyczyniły się do ulepszenia niniejszej pracy. Autor chciałby również podziękować pracownikom laboratorium badań tomografii komputerowej Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej za pomoc w badaniach.

### LITERATURA

- APPOLONI C., FERNANDES C. & RODRIGUES C. 2007 – X-ray microtomography study of a sandstone reservoir rock. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, 580: 629–632.
- BAKER D., MANCINI L., POLACCI M., HIGGINS M., GUALDA G., HILL R. & RIVERS M. 2012 – An introduction to the application of X-ray microtomography to the three-dimensional study of igneous rocks. *Lithos*, 148: 262–276.
- BECKERS E., PLOUGONVEN E., ROISIN C., HAPCA S., LEONARD A. & DEGRE A. 2014 – X-ray microtomography: A porosity-based thresholding method to improve soil pore network characterization. *Geoderma*, 219–220: 145–154.
- BIELECKI J., JARZYNA J., BOŻEK S., LEKKI J., STACHURA Z. & KWIATEK W. 2013 – Computed microtomography and numerical study of porous rock samples. *Radiat. Phys. Chem.*, 93: 59–66.
- CORMACK A. M. 1963 – Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. *J. Appl. Phys.*, 34 (9): 2722–2727.
- DOHNALIK M. 2013 – Zwiększenie możliwości wyznaczania parametrów zbiornikowych skał z wykorzystaniem rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej. Rozprawa doktorska, AGH, Kraków: 6–26.
- DVORKIN J., DERZHI N., FANG Q., NUR A., NUR B., GRADER A., BALDWIN C., TONO H. & DIAZ E. 2009 – From micro to reservoir scale: Permeability from digital experiments. *The Leading Edge*, 28 (12): 1446–1452.
- FELDKAMP L., DAVIS L. & KRESS J. 1984 – Practical cone-beam algorithm. *J. Opt. Am.*, 1: 612–619.
- FUSSEIS F., XIAO X., SCHRANK C. & DE CARLO F. 2014 – A brief guide to synchrotron radiation-based microtomography in (structural) geology and rock mechanics. *J. Struct. Geol.*, 65: 1–16.
- GNUDE V. & BOONE M. 2013 – High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications. *Earth-Sci. Rev.*, 123: 1–17.
- GORAŃCZKO A. & KUMOR M.K. 2011 – Pęcznienie mio-plioceńskich ilów serii poznańskiej z rejonu Bydgoszczy na tle ich litologii. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 446: 305–314.
- HEAD K.H. 1986 – *Manual of Soil Laboratory Testing*, Vol. 3: Effective Stress Tests. Pentech Press, London: 743–958.
- HELJAK M., JAROSZEWICZ J., ŚWIĘSZKOWSKI W. & KURZYDŁOWSKI K. 2009 – Mikrotomografia rentgenowska jako metoda obrazowania w inżynierii materiałowej. *Badania Nieniszczące*, 1/08/2009: serwis internetowy, [www.badania-nieniszczace.info](http://www.badania-nieniszczace.info) (data odsłony 3.11.2014).
- KACZYŃSKI R. 2011 – Geologiczno-inżynierskie charakterystyki typowych gruntów występujących w Polsce. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 446: 329–340.
- KETCHAM R. & CARLSON W. 2001 – Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. *Comp. Geosci.*, 27: 381–400.
- KUMOR M.K. 1985 – Zmiany wytrzymałości i struktury iłu plioceńskiego pod wpływem zamrażania. *Arch. Hydrotech.*, 32: 461–473.
- MACHADO A., LIMA I. & LOPES R. 2014 – Effect of 3d computed microtomography resolution on reservoir rocks. *Radiat. Phys. Chem.*, 95: 405–407.
- MIRVIS S.E. 1989 – Applications of magnetic resonance imaging and three-dimensional computed tomography in emergency medicine. *Ann. Emerg. Med.*, 18 (12): 1315–1321.
- MYŚLIŃSKA E. 1998 – *Laboratoryjne badania gruntów* (II wyd.). PWN, Warszawa: 37–38; 53–58; 105–107.
- LANDIS E.N. & KEANE D.T. 2010 – X-ray microtomography. *Mater. Charact.*, 61 (12): 1305–1316.
- OLDENDORF W.H. 1961 – Isolated flying spot detection of radiodensity discontinuities displaying the internal structural pattern of a complex object. *IRE Trans Bio-Med. Electron.*, 8: 68–72.
- PKN-CEN ISO/TS 17892-9: 2009 – *Badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 9: Badanie gruntów w aparacie trójosiowego ściskania po nasyceniu wodą.*
- PKN-CEN ISO/TS 17892-10: 2009 – *Badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 10: Badanie w aparacie bezpośredniego ściskania.*
- PN 86/B 02480 – *Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.*
- PN-88/B-04481 – *Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.*
- PLĄSKOWSKI W. 2009 – *System X-ray w przemyśle spożywczym. Badania Nieniszczące*, 1/08/2009: serwis internetowy, [www.badania-nieniszczace.info](http://www.badania-nieniszczace.info) (data odsłony 3.11.2014).

- SARNACKA Z. 1992 – Stratygrafia osadów czwartorzędowych Warszawy i okolic. Pr. Państw. Inst. Geol., 138: 4–7.
- SIJBERS J.C. & POSTNOV A. 2004 – Reduction of ring artefacts in high resolution micro-CT reconstructions. *Phys. Med. Biol.*, 49 (14): N247–N253.
- STOCK S.R. 2009 – Microcomputed tomography: methodology and applications. Crc Press, Boca Raton: 9–48.
- TÖLKE J., BALDWIN C., MU Y., DERZHI N., FANG Q., GRADER A. & DVORKIN J. 2010 – Computer simulations of fluid flow in sediment: From images to permeability. *The Leading Edge*, 29: 68–74.
- VAN DE CASTEELE E. 2004 – Model-based approach for Beam Hardening Correction and Resolution Measurements in Microtomography. Ph. D. Dissertation, University of Antwerp, Antwerpen: 4–8.
- VAN GEET M., SWENNEN R., & WEVERS M. 2000 – Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocus X-ray computerised tomography. *Sediment. Geol.*, 132 (1/2): 25–36.
- WIŁUN Z. 1976 – Zarys geotechniki. Wyd. Komunikacji i Łączności sp. z o.o., Warszawa: 149–224.
- WYSOKIŃSKI L. 1976 – Kryterium dynamiki zbroczy na przykładzie badań brzegów zbiornika Włocławek. Rozprawa habilitacyjna. Wyd. Geol. UW, Warszawa: 43–49.
- WYSOKIŃSKI L. 2013 – Ekspertyza dotycząca określenia uwarunkowań realizacyjnych przy budowie tuneli szlakowych D13 tarczami zmechanizowanymi TBM pod Skarpą Warszawską podczas budowy odcinka centralnego II linii metra w Warszawie. Metro Warszawskie Sp. z o.o.
- XRADIA 2010 – MicroXCT-200 and MicroXCT-400 User's Guide. Xradia, Concord.
- ZALEWSKA J. 2010 – Rentgenowska mikrotomografia komputerowa w badaniu skał węglowych. INiG, Kraków: 19–64.

Praca wpłynęła do redakcji 31.12.2014 r.

Akceptowano do druku 17.03.2015 r.