

Grażyna Łykowska

*Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

## Ocena właściwości zbiornikowych i sprężystych w aspekcie szczelinowatości skał

Zasadniczymi celami charakterystyki skał zbiornikowych są opis i konstrukcja modelu geologicznego poprzez określenie objętości przestrzeni porowej i geometrii. Niezbędne dane uzyskuje się z analiz laboratoryjnych rdzeni wiertniczych oraz płynów złożowych, jak również z pomiarów geofizycznych. W opracowaniu badano wpływ szczelinowatości skał na właściwości zbiornikowe i sprężyste. W pierwszym etapie wykonano wizualizację przestrzeni porowej analizowanych skał w celu zidentyfikowania naturalnych szczelin. Zaprezentowano wyniki uzyskane na podstawie konwencjonalnych badań laboratoryjnych próbek rdzeni wiertniczych. Reprezentowały one różne typy litologiczne: piaskowce, wapień oraz dolomity. Przeprowadzono analizę wpływu struktury porowej (szczelin) na gęstość oraz przepuszczalność. Wyznaczono nasycenie przestrzeni porowej oraz współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną metodą jądrowego rezonansu magnetycznego (NMR). Przeanalizowano również wpływ szczelinowatości na prędkości propagacji fal podłużnych i poprzecznych, wyznaczonych za pomocą defektoskopu ultradźwiękowego UMT-17. Określenie zależności pomiędzy pomierzonymi właściwościami petrofizycznymi skał jest ważnym krokiem prowadzącym do prawidłowego opisu ośrodka skalnego. Wzajemne związki między fizycznymi parametrami skał, wyznaczonymi metodami laboratoryjnymi na próbkach rdzeni, są wykorzystywane w interpretacji ilościowej otworowych pomiarów geofizycznych.

Słowa kluczowe: właściwości zbiornikowe, właściwości sprężyste, szczeliny.

### Evaluation of reservoir and elastic properties in the aspect of rocks fracture apertures

The main objective characterization of reservoir rocks is the description and construction of a geological model by determining the volume of pore space and geometry. The necessary data are obtained from laboratory analyses of drill cores and reservoir fluids, as well as from geophysical measurements. In this paper, the effect of fracture apertures on reservoir properties and elastic properties was investigated. In the first stage of the study the visualization of pore space of analyzed rocks was performed in order to identify the natural fracture apertures. Presented results were based on conventional laboratory tests of drill cores samples. The samples represents different lithological types: sandstones, limestones and dolomites. The impact of the pore structure (fracture apertures) on the density and permeability was analyzed. Pore space saturation and irreducible water saturation factor was determined by nuclear magnetic resonance method (NMR). Also analyzed was the impact of fracture apertures on longitudinal and transverse waves velocity propagation determined by ultrasonic detector UMT-17. Defining the relationship between the measured petrophysical properties of rocks is an important link leading to the correct description of the rock. Mutual relationships between the physical parameters of rocks, determined by laboratory methods on cores samples are used in the quantitative interpretation of borehole geophysical measurements.

Key words: reservoir properties, elastic properties, fracture apertures.

### Wprowadzenie

W opracowaniu przedstawiono właściwości zbiornikowe skał uzyskane na podstawie konwencjonalnych badań labora-

toryjnych próbek rdzeni wiertniczych pochodzących z dwóch otworów wiertniczych: A-1 oraz G-2 położonych na południu

Polski. Rdzenie reprezentowały różne typy litologiczne: piaskowce (12 prób), wapienie (26 prób) oraz dolomity (10 prób). Z każdego rdzenia zostały wycięte dwie próbki. Serię próbek, które nie posiadały szczelin, oznaczono kolejnymi numerami, a drugą serię, ze szczelinami, opisano tymi samymi numerami z symbolem *S*. Na próbkach *S* wykonano analizy metodą

micro-CT w celu zwizualizowania naturalnych szczelin. Na wszystkich próbkach zostały zrealizowane badania w kolejności: XRD – ilościowy skład mineralny, gęstość właściwa, gęstość objętościowa, porowatość całkowita, przepuszczalność absolutna, NMR – jądrowy rezonans magnetyczny,  $V_p$ ,  $V_s$  – prędkość propagacji fal podłużnych i poprzecznych.

**Metodyka prowadzenia badań**

W pierwszym etapie badań wykonano ilościową analizę rentgenowską wszystkich analizowanych próbek. Scharakteryzowano skład mineralny skał w poszczególnych otworach wiertniczych. Zestawienie wyników przedstawiono w tablicach 1 i 2.

Skład mineralny badanych skał charakteryzował się zróżnicowaniem w poszczególnych interwałach głębokościowych. Analizowane próbki podzielono na grupy z dominacją określonych typów litologicznych: piaskowce, wapienie i dolomity.

W grupie piaskowców przebadano 6 próbek (nr 13267, 13274, 13329, 13332, 13333, 13335). Dominującym minerałem w tym przypadku był kwarc, którego zawartość wynosiła

od 28% do 53%. Obok kwarcu w znaczącej ilości występowały również skalenie (od 18% do 27%). We wszystkich próbkach stwierdzono obecność kalcytu (1÷8%) i dolomitu (1÷13%). Ilość pozostałych składników (halitu, syderytu, piryty, anhydrytu) nie przekraczała 1%. W tej grupie występowały również minerały ilaste w ilości 8÷42%.

W grupie wapieni przebadano łącznie 13 próbek (nr 13279, 13280, 13251, 13253, 13254, 13258, 13337, 13338, 13346, 13348, 14514, 14516, 14519). Zawartość kalcytu wynosiła w nich od 63% do 100%. Mineralami akcesorycznymi w tych próbkach były: kwarc, dolomit, ankeryt i syderyt. W pojedynczych próbkach stwierdzono obecność halitu (nr 14514) oraz piryty i markasytu (nr 14516).

Tablica 1. Zestawienie wyników rentgenowskiej analizy ilościowej składu mineralnego skał z otworu A-1 (procentowa zawartość minerałów)

Numer próbki	Głębokość pobrania próbki [m]	Skład mineralny								
		kwarc	skalenie	kalcyt	dolomit	halit	syderyt	piryt	anhydryt	suma min. ilastych
		<i>Q</i> [%]	<i>Sk</i> [%]	<i>C</i> [%]	<i>D</i> [%]	<i>Ha</i> [%]	<i>Sy</i> [%]	<i>P</i> [%]	<i>A</i> [%]	$\Sigma il$ [%]
<b>PIASKOWCE</b>										
13267	1515,40	50	20	8	13	<1	–	<1	–	8
13274	1521,55	53	18	8	12	–	–	<1	–	8
13329	2400,00	29	24	1	<1	1	–	<1	<1	42
13332	2404,35	29	27	2	<1	1	<1	<1	1	38
13333	2405,05	28	25	4	<1	1	–	<1	1	41
13335	2408,05	30	24	1	<1	1	<1	<1	<1	41
<b>WAPIENIE</b>										
13279	2084,35	<1	–	93	5	–	–	–	2	–
13280	2089,35	<1	–	100	–	–	–	–	–	–
13251	2215,00	<1	–	97	2	–	–	–	<1	–
13253	2217,00	<1	–	97	3	–	–	–	–	–
13254	2218,00	2	–	88	1	–	–	–	9	–
13258	2223,90	<1	–	81	5	–	–	–	13	–
13337	2504,90	1	–	98	<1	–	–	–	–	–
13338	2505,35	33	–	66	1	–	–	–	–	–
13346	2657,25	<1	–	97	3	–	–	–	–	–
13348	2659,00	<1	–	99	<1	–	–	–	–	–

Tablica 2. Zestawienie wyników rentgenowskiej analizy ilościowej składu mineralnego skał z otworu G-2 (procentowa zawartość minerałów)

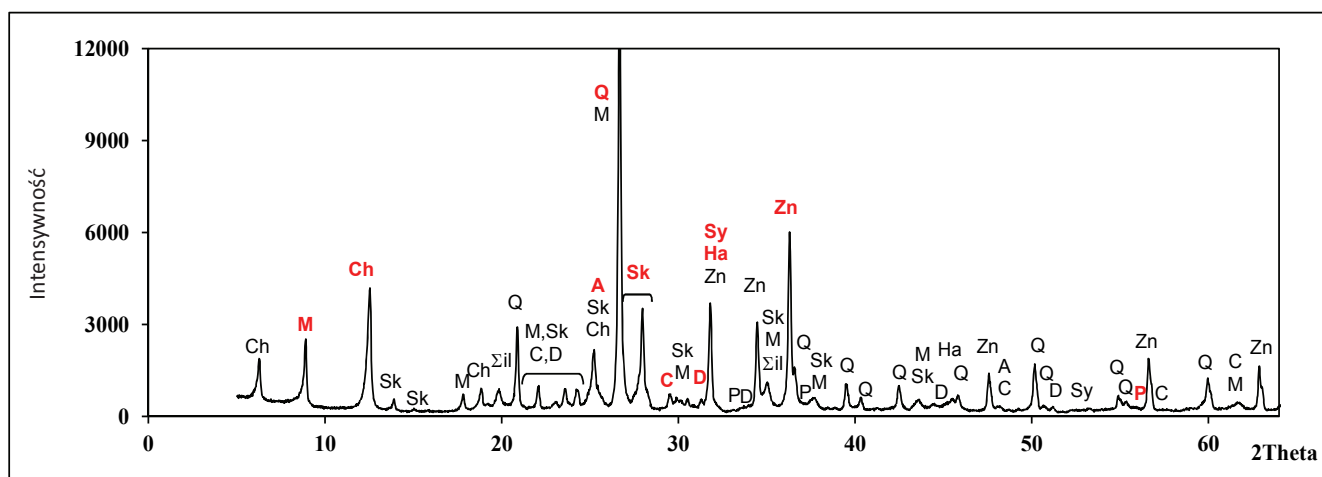
Numer próbki	Głębokość [m]	Skład mineralny								
		kwarc	dolomit	ankeryt	kalcyt	halit	syderyt	piryt	markasyt	suma min. ilastych
		<i>Q</i> [%]	<i>D</i> [%]	<i>An</i> [%]	<i>C</i> [%]	<i>Ha</i> [%]	<i>Sy</i> [%]	<i>P</i> [%]	<i>Mr</i> [%]	$\Sigma il$ [%]
<b>WAPIENIE</b>										
14514	1471,2	23,6	3,0	2,1	65,9	0,7	0,7	–	–	4,0
14516	1483,0	10,1	1,0	11,0	63,0	–	0,3	3,1	0,4	10,7
14519	1488,7	2,3	–	8,4	88,0	–	1,3	–	–	–
<b>DOLOMITY</b>										
14597	1576,5	0,4	–	97,7	1,9	–	–	–	–	–
14668	1731,9	0,4	97,4	–	2,2	–	–	–	–	–
14669	1735,0	0,3	97,2	–	2,5	–	–	–	–	–
14670	1899,5	0,2	96,2	–	2,2	0,7	0,7	–	–	–
14672	1904,7	0,2	79,7	12,4	6,3	0,7	0,7	–	–	–

W trzeciej grupie przebadano 5 próbek (nr 14597, 14668, 14669, 14670, 14672). Wszystkie to niemal czyste dolomity, w których zawartość tego minerału wynosiła od 92% do 98%. Minerale akcesoryczne w tych próbkach były: kwarc (<1%), kalcyt (2÷6%), halit (<1%) oraz syderyt (<1%). Na rysunkach 1a, 1b oraz 1c przedstawiono przykładowe dyfraktogramy reprezentujące różne typy litologiczne.

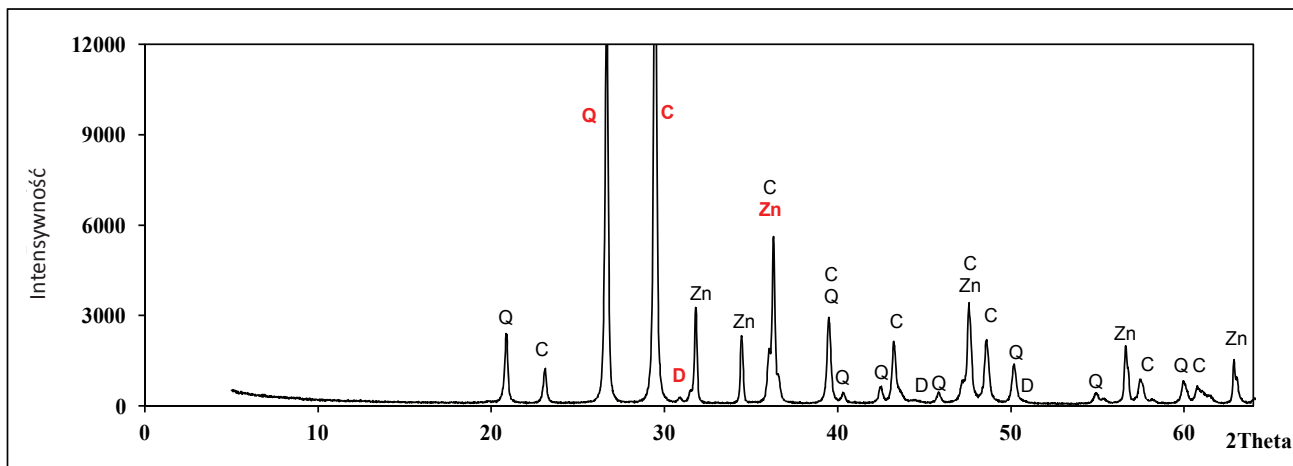
W następnym etapie badań wykonano wizualizację przestrzeni porowej analizowanych skał w celu zidentyfikowania naturalnych szczelin. W eksperymencie pomiary realizowane były przy zastosowaniu mikrotomografu rentgenowskiego Benchtop 160 CT. Ta aparatura badawcza została szczegółowo omówiona we wcześniejszych pracach, m.in. w pracy zbiorowej pod kierunkiem J. Zalewskiej [7]. Wykonano 3 etapy: akwizycję danych za pomocą programu Inspect-X, rekonstrukcję projekcji programem CT-Pro oraz trójwymiarową

wizualizację obrazu przy użyciu programu Avizo. Badania mikrotomograficzne próbek skał przeprowadzono według metodyki opracowanej w pracy statutowej z 2009 r. [3] oraz omawianej w artykułach [4, 8].

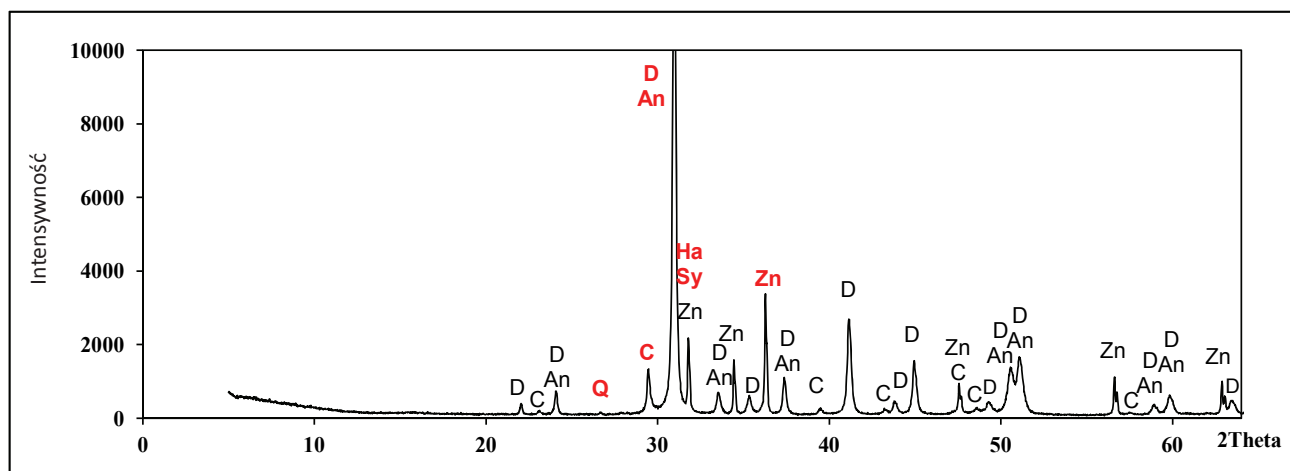
Pomiary wykonano na próbkach o średnicy 1" i wysokości ok. 30 mm. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe wyniki trójwymiarowej wizualizacji naturalnych szczelin analizowanych próbek dla trzech typów litologicznych. Do każdego przykładu dołączono zrekonstruowany przekrój poprzeczny w obrazie mikrotomograficznym, na którym widoczna jest obecność i lokalizacja pustek. Obszary jasne odpowiadają rejonom o wysokiej gęstości, a ciemne przypisane są do niskiej gęstości. W programie Avizo wykonano wizualizację przestrzeni porowej badanych próbek. Następnie zaprezentowano obrazy mikrotomograficzne przekroju przez szczeliny poszczególnych próbek. Zastosowano układ



Rys. 1a. Dyfraktogram próbki nr 13332, piaskowiec, otwór wiertniczy: A-1, głębokość pobrania rdzenia: 2404,35 m



Rys. 1b. Dyfraktogram próbki nr 13338, wapienie, otwór wiertniczy: A-1, głębokość pobrania rdzenia: 2505,35 m



Rys. 1c. Dyfraktogram próbki nr 14672, dolomit, otwór wiertniczy: G-2, głębokość pobrania rdzenia: 1904,70 m

trzech współrzędnych ( $X, Y, Z$ ). Oś  $Z$  (oznaczona kolorem niebieskim) jest równoległa do osi próbki.

Na podstawie badań micro-CT zaobserwowano szczeliny w 24 próbkach. Generalnie na analizowanych obrazach mikrotomograficznych próbek skał występowały wyraźne szczeliny lub sieci szczelin. Ich płaszczyzny były dobrze widoczne i nie budziły wątpliwości w interpretacji. Wykonane wizualizacje szczelin bardzo dobrze korespondują ze zrekonstruowanym przekrojem przez próbkę.

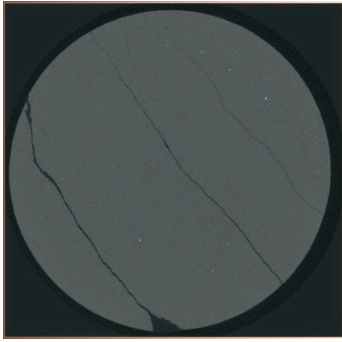
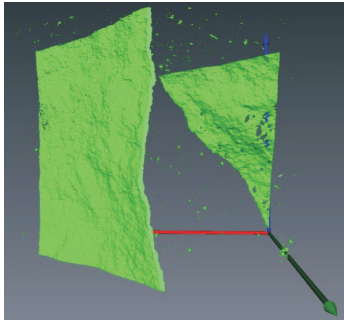
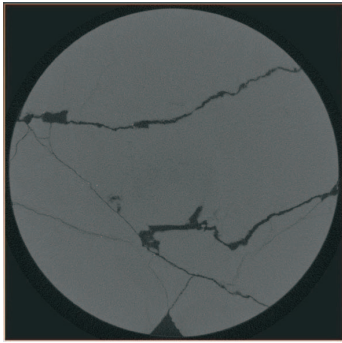
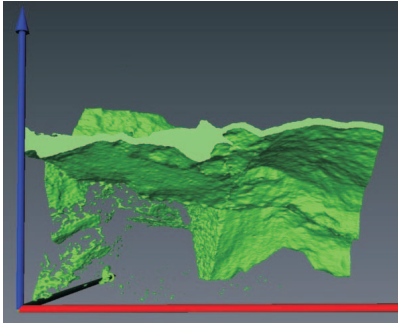
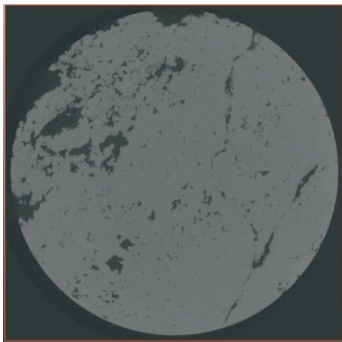
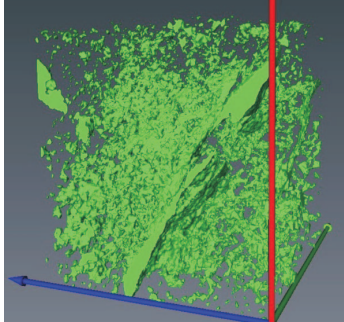
W kolejnym etapie badań przeprowadzono analizę wpływu struktury porowej (szczelin) na gęstość właściwą i objętościową oraz przepuszczalność absolutną. Pomiar wykonano przy pomocy dwóch współpracujących ze sobą aparatów: AccuPyca 1330 i GeoPyca 1360, znajdujących się w INiG – PIB w Krakowie. Urządzenia te określają odpowiednio gęstość właściwą i objętościową skał, a następnie na tej podstawie wyliczają ich porowatość. Zmianę współczynnika porowatości całkowitej badanych próbek skalnych przedstawia rysunek 3. Współczynnik przepuszczalności określono, przy wykorzystaniu azotu, za pomocą aparatu Gas Permeameter firmy Temco, znajdującego się w INiG – PIB

w Krakowie. Zmianę współczynnika przepuszczalności absolutnej badanych próbek skalnych przedstawia rysunek 4.

Analizowane próbki cechowały się zróżnicowaniem wartości porowatości całkowitej. Próbki piaskowcowe, pochodzące z otworu A-1, nieposiadające szczelin charakteryzowały się porowatością całkowitą w zakresie od 1,05% do 20,41% ( $Kp_{sr} = 7,58\%$ ) i przepuszczalnością absolutną od 0,01 mD do 0,04 mD ( $Kprz_{sr} = 0,02$  mD). Natomiast porowatość całkowita próbek, w których zaobserwowano występowanie szczelin, mieściła się w zakresie od 4,65% do 22,38% ( $Kp_{sr} = 11,32\%$ ), a ich przepuszczalność absolutna wynosiła od 15,43 mD do 33,83 mD ( $Kprz_{sr} = 22,49$  mD).

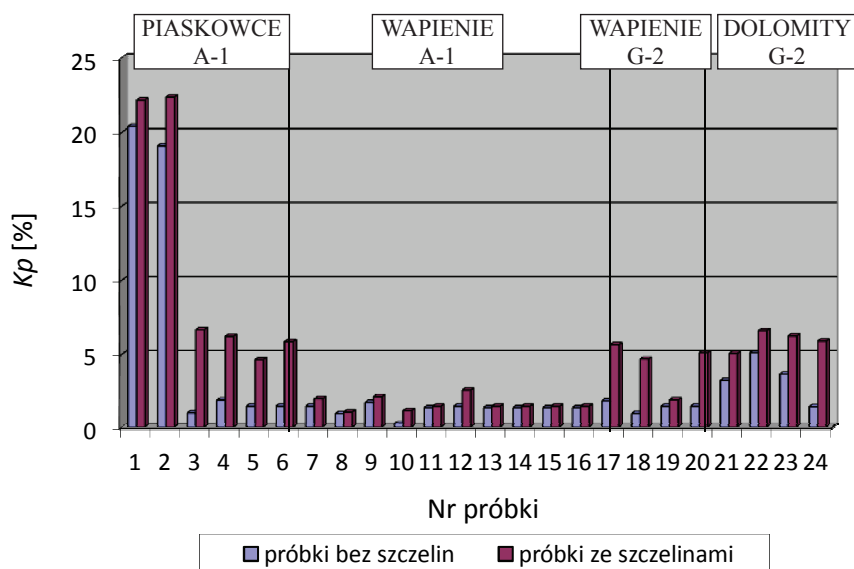
Nieszczelinowe wapienie z otworów A-1 oraz G-2 posiadały porowatość całkowitą od 0,30% do 1,86% ( $Kp_{sr} = 1,38\%$ ), a przepuszczalność absolutną w zakresie od 0,01 mD do 0,08 mD ( $Kprz_{sr} = 0,03$  mD). Porowatość całkowita wapieni, w których zanotowano obecność szczelin, zmieniała się od 0,94% do 5,66% ( $Kp_{sr} = 2,17\%$ ), a ich przepuszczalność absolutna wynosiła od 0,10 mD do 2,88 mD ( $Kprz_{sr} = 1,23$  mD).

W ostatniej grupie próbek pochodzących z otworu G-2, czyli dolomitach nieszczelinowych, współczynnik porowa-

Metryka i litologia próbki	Zrekonstruowany przekrój przez próbkę	Wizualizacja szczelin
<b>PIASKOWIEC</b> Otwór wiertniczy: A-1 Próbkę nr: 13332S Głębokość pobrania rdzenia: 2404,35 m		
<b>WAPIEŃ</b> Otwór wiertniczy: A-1 Próbkę nr: 13338S Głębokość pobrania rdzenia: 2505,35 m		
<b>DOLOMIT</b> Otwór wiertniczy: G-2 Próbkę nr: 14672S Głębokość pobrania rdzenia: 1904,70 m		

Rys. 2. Wyniki badań micro-CT.

Oznaczenie kolorów na rysunku: szary – matryca skalna, czarny – pusta przestrzeń, zielony – zwizualizowane szczeliny, pory

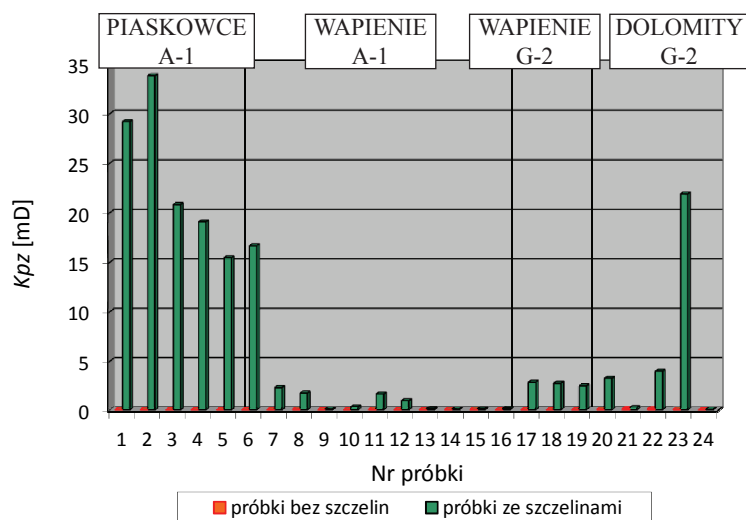
Rys. 3. Zmiana współczynnika porowatości  $K_p$  [%] badanych próbek skalnych

tości całkowitej zmieniał się w zakresie od 1,47% do 5,12% ( $K_{p_{sr}} = 3\%$ ). Przepuszczalność absolutna zawierała się w przedziale od 0,0 mD do 0,17 mD ( $K_{prz_{sr}} = 0,09$  mD). Natomiast porowatość całkowita dolomitów, w których zaobserwowano występowanie szczelin, mieściła się w zakresie od 5,06% do 6,59% ( $K_{p_{sr}} = 5,78\%$ ), a ich przepuszczalność absolutna wynosiła od 0,07 mD do 21,89 mD ( $K_{prz_{sr}} = 5,91$  mD).

Na podstawie laboratoryjnych badań porowatości całkowitej oraz przepuszczalności absolutnej skał odnotowano wzrost mierzonych wielkości w próbkach zawierających szczeliny.

Następnie przy użyciu metody jądrowego rezonansu magnetycznego (NMR)





Rys. 4. Zmiana współczynnika przepuszczalności  $K_{prz}$  [mD] badanych próbek skalnych

wyznaczono nasycenie przestrzeni porowej wodą nieredukowalną, kapilarną i wolną oraz współczynnik nasycenia wodą nieredukowalną. Badano czas relaksacji poprzecznej składowej magnetyzacji  $T_2$ , wykorzystując w tym celu sekwencję pomiarową CPMG. Nasycenie przestrzeni porowej na podstawie NMR przykładowych próbek przedstawiono na rysunku 5. Na podstawie otrzymanych rozkładów  $T_2$  wyznaczono współczynniki porowatości całkowitej  $K_{p_{NMR}}$  i efektywnej  $K_{p_{NMR,ef}}$  oraz określono, jaką część przestrzeni porowej zajmuje woda nieredukowalna (związana w minerałach ilastych i mikroporach –  $K_{p_1}$ ), woda kapilarna ( $K_{p_2}$ ) i woda wolna ( $K_{p_3}$ ). Wyniki obliczeń przedstawiono w tabelicy 3.

W wyniku badań metodą NMR zaobserwowano, że rozkłady  $T_2$  są bardzo zróżnicowane, w większości

Tablica 3. Wyniki pomiarów NMR

Nr próbki	Zawartość wody [%]			Współcz. porowat. całkowitej $K_{p_{NMR}}$ [%]	Współcz. porowat. efektywnej $K_{p_{NMR,ef}}$ [%]	Współcz. nasycenia wodą niereduk. $S_{w_{nr}}$ [%]
	niereduk. $K_{p_1}$	kapilarnej $K_{p_2}$	wolnej $K_{p_3}$			
13267	7,32	10,71	3,51	21,54	14,22	33,98
13267S	7,48	11,36	3,79	22,63	15,15	33,05
13274	6,86	9,83	3,92	20,61	13,75	33,28
13274S	6,91	9,92	4,76	21,59	14,68	32,01
13329	8,24	0,13	0,26	8,63	0,39	95,48
13329S	9,32	0,68	0,64	10,64	1,32	87,59
13332	5,86	0,22	0,13	6,21	0,35	94,36
13332S	8,41	0,56	0,51	9,48	1,07	88,71
13333	6,60	0,12	0,14	6,86	0,26	96,21
13333S	8,20	0,48	0,40	9,08	0,88	90,31
13335	8,33	0,16	0,18	8,67	0,34	96,08
13335S	8,50	0,47	0,58	9,55	1,05	89,01
13279	1,03	0,91	0,22	2,16	1,13	47,69
13279S	1,39	1,55	0,54	3,48	2,09	39,94
13280	2,07	1,76	0,47	4,30	2,23	48,14
13280S	2,24	1,63	1,06	4,93	2,69	45,44
13251	1,28	2,17	0,39	3,84	2,56	33,33
13251S	1,22	2,29	0,36	3,87	2,65	31,52
13253	1,51	0,66	0,23	2,40	0,89	62,92
13253S	1,43	0,92	0,46	2,81	1,38	50,89
13254	1,14	0,58	0,14	1,86	0,72	61,29
13254S	1,22	1,01	0,66	2,89	1,67	42,21
13258	1,42	1,20	0,40	3,02	1,60	47,02
13258S	1,76	1,33	0,55	3,64	1,88	48,35

cd. Tablica 3

Nr próbki	Zawartość wody [%]			Współcz. porowat. całkowitej	Współcz. porowat. efektywnej	Współcz. nasycenia wodą niereduk.
	niereduk.	kapilarnej	wolnej			
	$Kp_1$	$Kp_2$	$Kp_3$	$Kp_{NMR}$ [%]	$Kp_{NMR,ef}$ [%]	$Sw_{nr}$ [%]
13337	1,71	0,35	0,21	2,27	0,56	75,33
13337S	1,94	0,47	0,58	2,99	1,05	64,88
13338	1,33	0,45	0,18	1,96	0,63	67,86
13338S	1,42	0,69	0,65	2,76	1,34	51,45
13346	0,99	0,27	0,16	1,42	0,43	69,72
13346S	1,24	0,42	0,18	1,84	0,60	67,39
13348	1,15	0,33	0,05	1,53	0,38	75,16
13348S	1,05	0,44	0,09	1,58	0,53	66,46
14514	1,96	3,69	0,10	5,75	3,79	34,09
14514S	1,89	3,78	0,56	6,23	4,34	30,34
14516	2,53	2,21	0,37	5,11	2,58	49,51
14516S	1,83	3,47	0,66	5,96	4,13	30,70
14519	2,30	0,99	0,29	3,58	1,28	64,25
14519S	1,72	1,24	0,59	3,55	1,83	48,45
14597	1,68	0,65	0,84	3,17	1,49	53,00
14597S	1,44	0,72	3,01	5,17	3,73	27,85
14668	2,60	2,76	0,74	6,10	3,50	42,62
14668S	2,63	2,89	1,16	6,68	4,05	39,37
14669	1,31	1,82	5,05	8,18	6,87	16,01
14669S	1,48	2,06	5,06	8,60	7,12	17,21
14670	1,48	1,61	4,78	7,87	6,39	18,81
14670S	1,83	1,95	5,21	8,99	7,16	20,36
14672	1,26	0,97	3,67	5,90	4,64	21,36
14672S	0,97	1,12	4,52	6,61	5,64	14,67

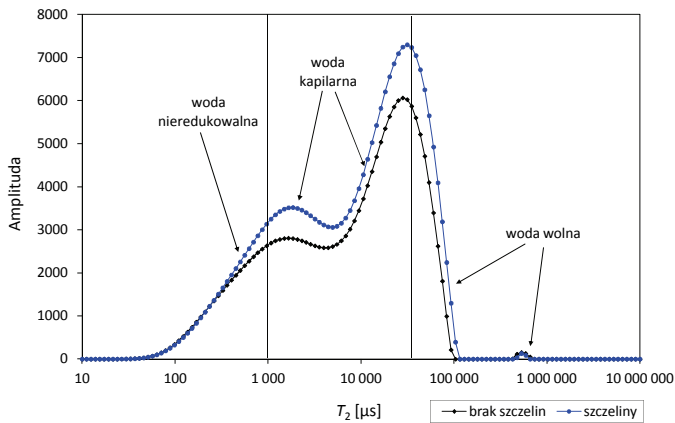
przypadków bardzo szerokie, z trzema wyraźnymi maksimumami lokalnymi. Obok tych rozkładów występują również rozkłady zdominowane przez duże pory, z maksimum leżącym w obrębie wody wolnej  $Kp_3$ . Analizowane próbki wyraźnie się różnią pod względem właściwości zbiornikowych. Szczeliny w omawianych próbkach, zarówno piaszczystych, jak i węglanowych, powodują podwyższenie  $Kp_1$ ,  $Kp_2$ ,  $Kp_3$ , porowatości całkowitej  $Kp_{NMR}$ , porowatości efektywnej  $Kp_{NMR,ef}$  i jednocześnie wpływają na obniżenie współczynnika nasycenia wodą nieredukowalną  $Sw_{nr}$ .

Przeanalizowano również wpływ szczelinowatości na prędkości propagacji fal podłużnych i poprzecznych. Badania laboratoryjne prędkości propagacji fal sprężystych przeprowadzono defektoskopem ultradźwiękowym UMT-17 firmy Ultramet S.C., znajdującym się w INiG – PIB w Krakowie,

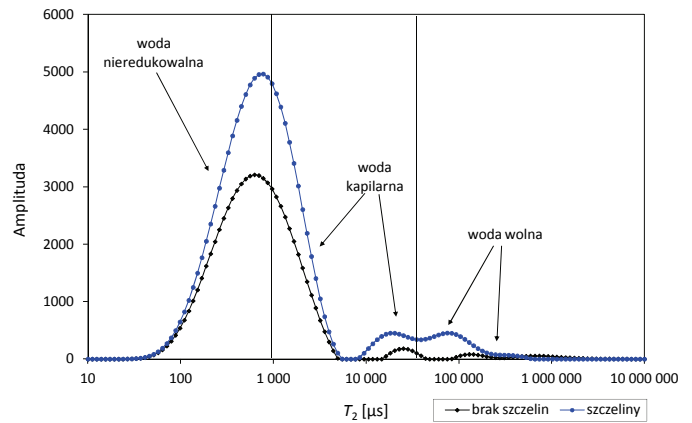
przeznaczonym do badań właściwości sprężystych skonsolidowanych materiałów. Pomiarzy zrealizowano na próbkach nasyconych solanką o stężeniu 50 g NaCl/l.

Prędkości propagacji fali podłużnej i poprzecznej w skałach zbiornikowych są funkcją wielu zmiennych, a w szczególności współczynnika porowatości i konfiguracji przestrzeni porowej, jej nasycenia wodą i węglowodorami, składu mineralnego oraz obecności materiału ilastego w porach skalnych lub szkieletcie (matrycy). Te czynniki, obok takich jak zmienne ciśnienie i temperatura, warunkują właściwości sprężyste ośrodków porowatych. Szereg badaczy, np. Anselmetti i Eberli [1, 2], Romero i Montoya [5] oraz Wang [6], wykazało, iż prędkość propagacji fal ultradźwiękowych skał węglanowych i piaszczystych jest głównie kontrolowana przez porowatość i typ porów.

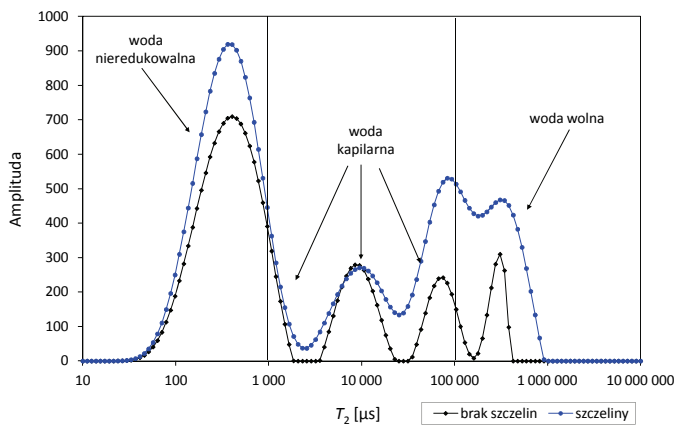
Próbki nr 13274 i 13274S – PIASKOWCE



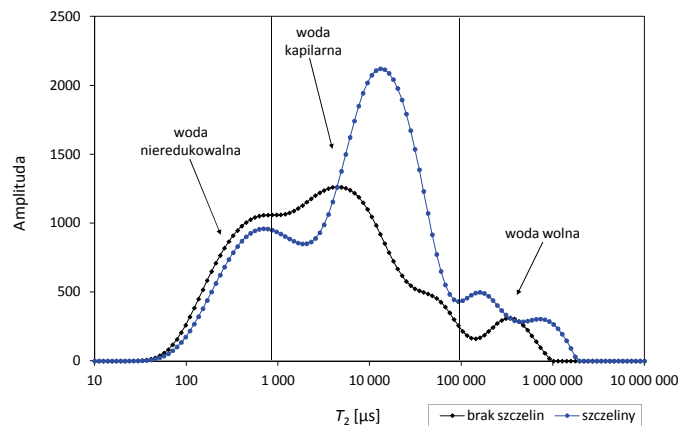
Próbki nr 13332 i 13332S – PIASKOWCE



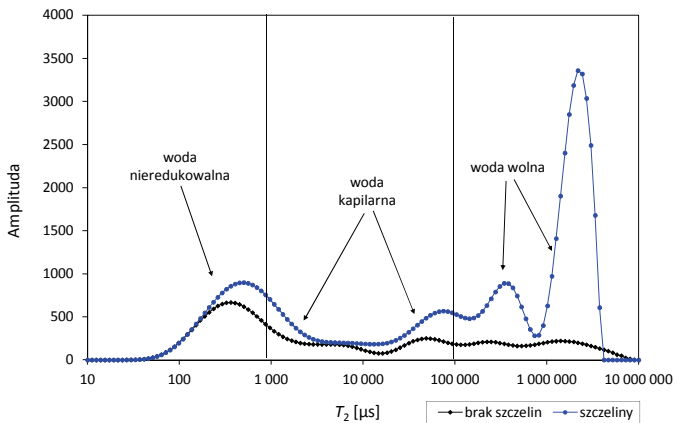
Próbki nr 13338 i 13338S – WAPIENIE



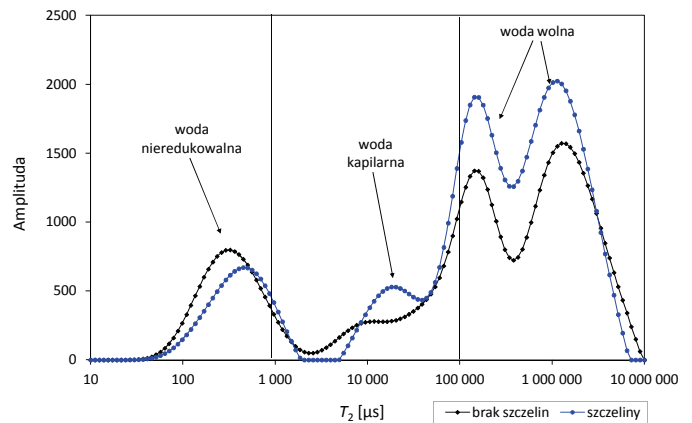
Próbki nr 14516 i 14516S – WAPIENIE



Próbki nr 14597 i 14597S – DOLOMITY



Próbki nr 14672 i 14672S – DOLOMITY



Rys. 5. Nasylenie przestrzeni porowej skał wodą wolną, kapilarną i nieredukowalną na podstawie dystrybucji  $T_2$  w metodzie NMR

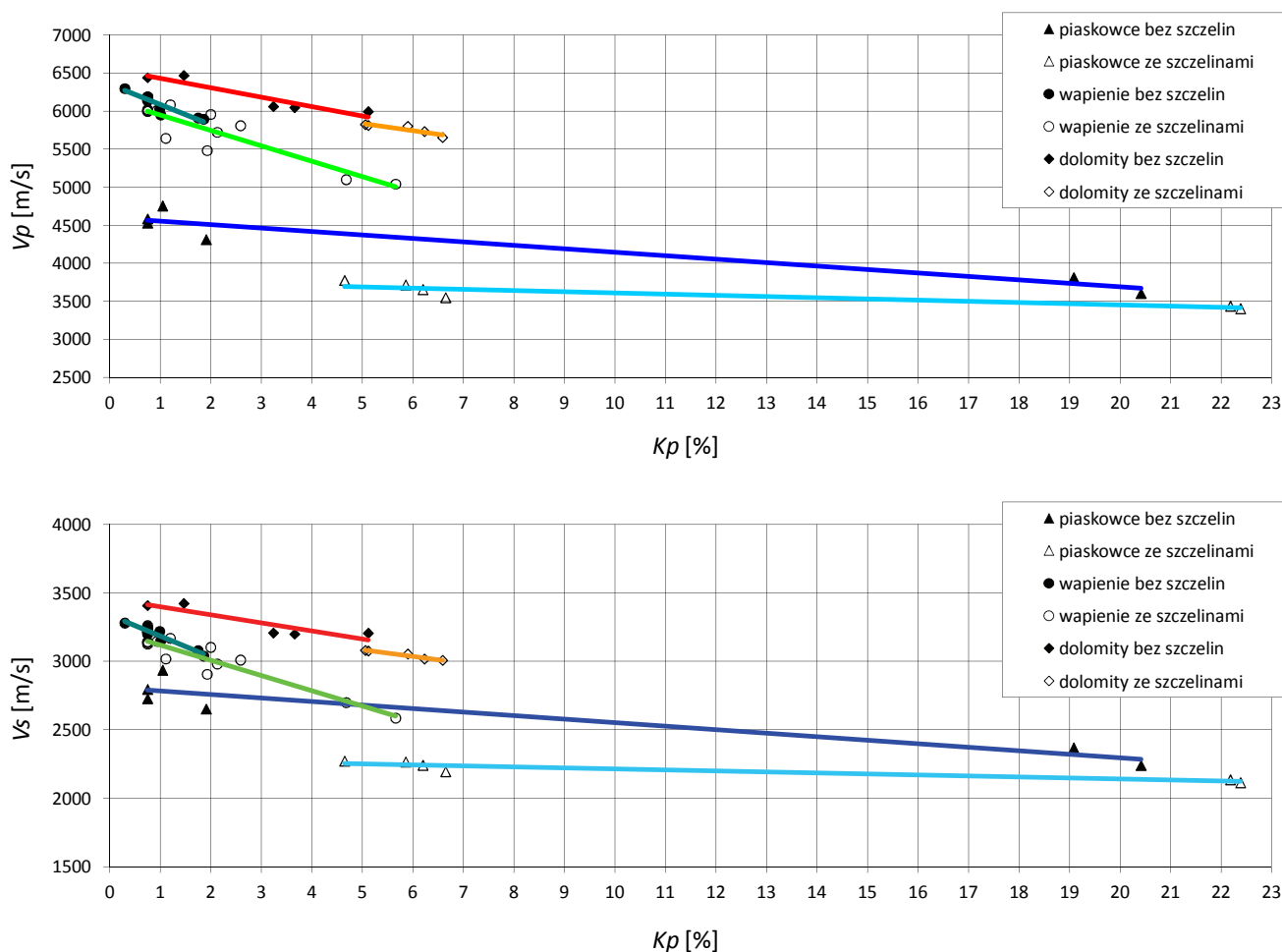
W niniejszej pracy przeanalizowano zależność prędkości propagacji fali podłużnej i poprzecznej od porowatości całkowitej dla całego zbioru próbek, co zostało zilustrowane na rysunku 6. Rysunek ten przedstawia również wpływ litologii na prędkość propagacji fal w analizowanych próbkach.

Analizując zależność  $V_p = f(Kp)$  oraz  $V_s = f(Kp)$ , można wnioskować, że porowatość i skład mineralny skał osadowych mają istotny wpływ na wartość prędkości propagacji fali. Prędkość fal w skałach węglanowych (dolomity, wapienie)

jest większa niż w piaskowcach. Zależność  $V_p = f(Kp)$  oraz  $V_s = f(Kp)$  aproksymowano funkcją liniową. Równania liniowe opisujące ten związek dla skał piaskowcowych oraz węglanowych (próbki bez szczelin i ze szczelinami) przedstawiono na rysunku 7 i w tabelicy 4.

Równania liniowe opisujące związek  $V_p = f(Kp)$  oraz  $V_s = f(Kp)$  dla próbek skał bez szczelin, jak i ze szczelinami przedstawiono w tabelicy 4. Rysunki 7A, 7B i 7C potwierdzają widoczne trendy pomiędzy prędkościami propagacji





Rys. 6. Zależność prędkości propagacji ultradźwiękowej fali:  
A) podłużnej  $V_p$ , B) poprzecznej  $V_s$  od współczynnika porowatości  $K_p$

fal a porowatością  $K_p$ . Wartości prędkości fali podłużnej  $V_p$  i poprzecznej  $V_s$  pozostają w zależności funkcyjnej od porowatości. Generalnie wartości  $V_p$  i  $V_s$  maleją wraz ze wzrostem porowatości.

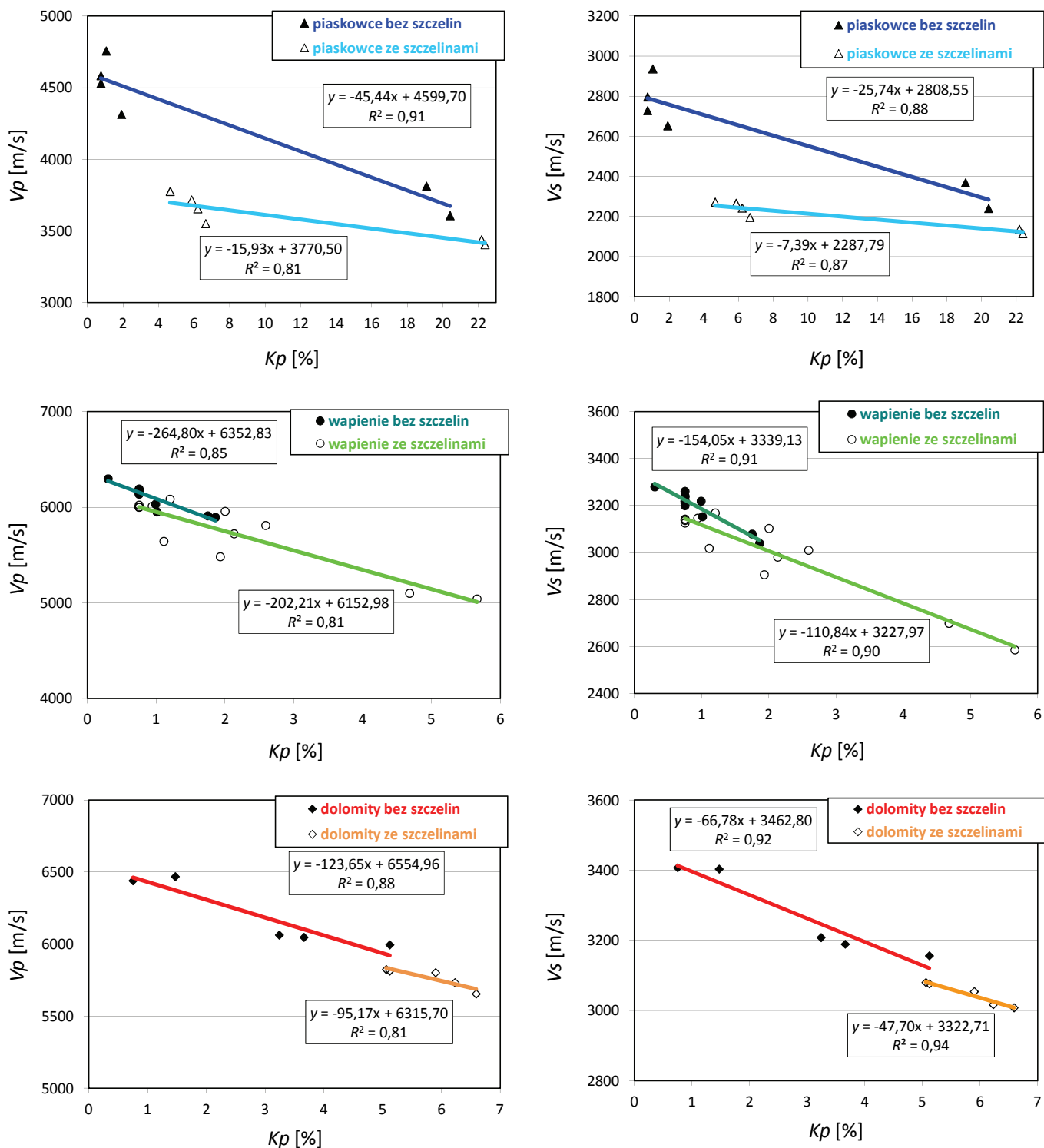
Wykonane badania laboratoryjne potwierdzają dane literaturowe, że porowatość i prędkość fali przechodzącej

przez porowaty ośrodek skalny są w zależności odwrotnie proporcjonalnej. Zaobserwowano obniżenie prędkości  $V_p$  i  $V_s$  w próbkach posiadających szczeliny, co także jest zgodne z danymi literaturowymi, że każda pusta przestrzeń zwiększa czas przejścia fali w skale, czyli zmniejsza jej prędkość w ośrodku.

Tablica 4. Zbiorcze zestawienie zależności prędkości propagacji fali podłużnej  $V_p$  i poprzecznej  $V_s$  od porowatości  $K_p$

Typ litologii	Zależność prędkości fali podłużnej $V_p$ od porowatości dla próbek					
	brak szczelin	$R^2$	$n$	szczeliny	$R^2$	$n$
Piaskowce	$V_p = 4599,70 - 45,44 K_p$	0,91	6	$V_p = 3770,50 - 15,93 K_p$	0,81	6
	$V_s = 2808,55 - 25,74 K_p$	0,88	6	$V_s = 2287,79 - 7,39 K_p$	0,87	6
Wapienie	$V_p = 6352,83 - 264,80 K_p$	0,85	13	$V_p = 6152,98 - 202,21 K_p$	0,81	13
	$V_s = 3339,13 - 154,05 K_p$	0,91	13	$V_s = 3227,97 - 110,84 K_p$	0,90	13
Dolomity	$V_p = 6554,96 - 123,65 K_p$	0,88	5	$V_p = 6315,70 - 95,17 K_p$	0,81	5
	$V_s = 3462,80 - 66,78 K_p$	0,92	5	$V_s = 3322,71 - 47,70 K_p$	0,94	5

$R^2$  – współczynnik determinacji  
 $n$  – liczebność w grupie



Rys. 7. Zależność prędkości propagacji ultradźwiękowej fali podłużnej  $V_p$  i poprzecznej  $V_s$  od współczynnika porowatości  $K_p$  dla skał: A) piaskowców, B) wapieni, C) dolomitów

### Podsumowanie

Określenie zależności pomiędzy pomierzonymi właściwościami petrofizycznymi skał jest ważnym ogniwem prowadzącym do prawidłowego opisu ośrodka skalnego. Wzajemne związki między fizycznymi parametrami skał, wyznaczonymi metodami laboratoryjnymi na próbkach rdzeni,

są powszechnie wykorzystywane w interpretacji ilościowej otworowych pomiarów geofizycznych.

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych stwierdzono, że dominującym czynnikiem wpływającym na właściwości zbiornikowe i sprężyste skał jest porowatość,

ale równie ważne są też charakter i typ przestrzeni porowej. Oprócz podanych wyżej czynników należy wymienić skład mineralny skały. Wszystkie te parametry wpływają

zarówno na kształtowanie się przestrzeni porowej, jak i na sztywność szkieletu, układ ziaren skalnych oraz ich strukturę i teksturę.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2014, nr 8, s. 509–519

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Analiza szczelinowatości skał w aspekcie własności zbiornikowych i sprężystych* – praca INiG na zlecenie MNiSW; nr zlecenia 35/13/SW, nr archiwalny DK-4100-35/13.

## Literatura

- [1] Anselmetti F. S., Eberli G. P.: *Controls on sonic velocity in carbonates*. Pure Appl. Geophys. 1993, vol. 141, pp 287–323.
- [2] Anselmetti F. S., Eberli G. P.: *The velocity deviation log: A tool to predict pore type and permeability trends in carbonate drill holes from sonic and porosity or density logs*. AAPG Bulletin 1999, vol. 83, pp. 450–466.
- [3] Lykowska G.: *Opracowanie metodyki rozpoznawania, obrazowania i szacowania wielkości oraz rozwartości szczelin metoda mikrotomografii rentgenowskiej*. Praca statutowa INiG na zlecenie MNiSW, nr archiwalny DK-4100-15/09, nr zlecenia 15/09/SW, s. 1–116.
- [4] Lykowska G.: *Trojwymiarowa wizualizacja szczelin metoda mikrotomografii rentgenowskiej*. Nafta-Gaz 2012, nr 12, s. 959–964.
- [5] Romero P., Montoya N.: *NMR and ultrasonic studies in core plug samples from carbonates and sandstones' tight formations*. SCA 2001-61.
- [6] Wang Z.: *Seismic properties of carbonate rocks* [w:] Palaz I., Markurt K. J.: *Carbonate Seismology*. Chapter 3, USA 1997, pp. 29–52.
- [7] Zalewska J., Dohnalik M., Lykowska G.: *Rentgenowska mikrotomografia komputerowa w badaniu skał węglanowych*. Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu 2012, nr 171, s. 1–263.
- [8] Zalewska J., Dohnalik M., Sikora G.: *Możliwości rentgenowskiej tomografii komputerowej w rozpoznawaniu, obrazowaniu i szacowaniu wielkości szczelin*. Nafta-Gaz 2009, nr 4, s. 296–303.



Mgr inż. Grażyna ŁYKOWSKA  
Asystent w Zakładzie Geofizyki Wiertniczej;  
kierownik ds. Jakości Laboratorium Geofizycznych  
Parametrów Skał i Płynów Złożowych.  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25A, 31-503 Kraków  
E-mail: [lykowska@inig.pl](mailto:lykowska@inig.pl)

## OFERTA

### ZAKŁAD GEOFIZYKI WIERTNICZEJ

Zakres działania:

- trójwymiarowa wizualizacja i analiza wewnętrznej struktury przestrzeni porowej skał metodą mikrotomografii rentgenowskiej (micro-CT);
- określanie rozkładu nasycenia wodą przestrzeni porowej próbek skał i kamienia cementowego metodą magnetycznego rezonansu jądrowego (NMR);
- oznaczanie jakościowego i ilościowego składu mineralnego skał oraz wydzielonej frakcji ilastej na podstawie analizy rentgenowskiej;
- wyznaczanie zawartości naturalnych pierwiastków promieniotwórczych: uranu, toru i potasu w skałach, płuczkach wiertniczych i materiałach budowlanych;
- ocena elektrycznych parametrów skał (wskaźnika struktury porowej i zwilżalności);
- określanie zależności elektrycznej oporności właściwej płuczek wiertniczych od temperatury;
- ocena prędkości propagacji fal ultradźwiękowych w skałach, kamieniach cementowych i płuczkach wiertniczych;
- interpretacja profilowań geofizycznych w zakresie oceny stanu zacementowania rur okładzinowych w otworach;
- profilowanie rdzeni wiertniczych (bezpośrednio na otworze) w celu określenia całkowitej energii promieniowania gamma emitowanego przez naturalne pierwiastki promieniotwórcze (U+Th+K) – metodą spektrometrii gamma (Gamma Logger).



**Kierownik:** dr inż. Marek Dohnalik  
**Adres:** ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków  
**Telefon:** 12 617-74-70  
**Faks:** 12 653-16-65  
**E-mail:** [marek.dohnalik@inig.pl](mailto:marek.dohnalik@inig.pl)

