

WYZNACZANIE POROWATOŚCI OGÓLNEJ I PARAMETRÓW SZKIELETOWYCH UTWORÓW WĘGLANOWYCH NA PODSTAWIE POMIARÓW PRĘDKOŚCI FAL SPRĘŻYSTYCH I GĘSTOŚCI

TOTAL POROSITY AND MATRIX PARAMETERS OF CARBONATE ROCKS BASED ON THE ELASTIC WAVE VELOCITY AND DENSITY MEASUREMENTS

JADWIGA JARZYNA¹, EDYTA PUSKARCZYK¹, EWA OGÓREK¹, JACEK MOTYKA¹

Abstrakt. Badania wykonano w celu wykazania zależności między prędkościami fal sprężystych uzyskanymi w wyniku pomiarów laboratoryjnych a parametrami otrzymanymi w badaniach hydrogeologicznych (porowatością i gęstością objętościową). Pomiarzy przeprowadzono na 73 próbkach skalnych, pochodzących w większości z poziomów wodonośnych z rejonu Olkusza. Zestawienie prędkości fali podłużnej P oraz gęstości objętościowej z porowatością otwartą, obliczoną w badaniach hydrogeologicznych, pokazało zakres zmian prędkości oraz gęstości szkieletowej w badanych skałach. Parametry szkieletowe wprowadzono do wzorów na obliczenie porowatości ogólnej badanych próbek. Na podstawie prędkości fal sprężystych, zmierzonych na próbkach wyciętych z rdzeni w dwóch prostopadłych kierunkach, wykonano także analizę anizotropii, co pozwoliło zidentyfikować szczeliny w skale. Połączenie różnorodnych parametrów, uzyskanych w wyniku badań hydrogeologicznych i petrofizycznych, pozwoliło uzyskać dodatkowe informacje o właściwościach zbiornikowych poziomów wodonośnych.

Słowa kluczowe: Aparatura ULT-100 P&S Ultrasonic Velocity Measurement, fale sprężyste, obrazy falowe, parametry petrofizyczne, gęstość objętościowa, wapienie jurajskie, Olkusz.

Abstract. The purpose of the research was to find relationship between elastic waves velocities obtained from lab measurements and parameters from hydrogeological research. Measurements were conducted on 73 rock samples originating mostly from Jurassic limestone of the Olkusz area. Additional information about the rock samples was obtained when the elastic wave velocities were compared with reservoir parameters such as porosity, permeability and density. Plots of elastic waves velocities vs. porosity and bulk density vs. porosity gave information about the range of P wave velocities from the boundary velocity to the values when porosity is equal to zero. Matrix velocity and density values were introduced into the formulas used to calculate porosity. Anisotropy analysis was made on the basis of elastic wave velocities measured on cores cut in two perpendicular directions. This allowed for identification of fractures in rocks. Results showed that by comparing various petrophysical parameters it was possible to get better information about reservoir properties of aquifers.

Key words: ULT-100 P&S Ultrasonic Velocity Measurement, elastic waves, acoustic waveforms, petrophysical parameters, bulk density, Jurassic limestones, Olkusz.

WSTĘP

Informacja o prędkości rozchodzenia się fal sprężystych (podłużnej P i poprzecznej S) w ośrodku skalnym jest bardzo ważna dla geofizyków, geologów inżynierskich, geo-

techników i innych specjalistów, wykorzystujących dane o właściwościach sprężystych skał, np. budowniczych dróg, zapór, wałów przeciwpowodziowych i różnorodnych konstrukcji ziemnych. W pracy postawiono pytanie, czy pomierzona na próbkach skalnych prędkość fal sprężystych może

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: jarzyrna@agh.edu.pl, puskar@agh.edu.pl, motyka@agh.edu.pl.

być wykorzystana w badaniach hydrogeologicznych. Dokładne dane o prędkościach propagacji fal sprężystych można otrzymać wykonując pomiary laboratoryjne na próbkach wyciętych z rdzeni wiertniczych. Taka informacja może być wykorzystywana do obliczenia porowatości ogólnej. Może także służyć do skalowania wyników pośrednich pomiarów geofizycznych wykonywanych na powierzchni Ziemi (np. sejsmicznych) lub w otworach wiertniczych (profilowanie akustyczne w ramach geofizyki otworowej).

Prędkość fal sprężystych zależy od wielu czynników, m.in. od składu mineralnego, wielkości i kształtu przestrzeni porowej oraz rodzaju medium nasycającego pory, struktury i tekstury skały, głębokości pobrania próbki oraz głębokości, na której powstawała skała, ciśnienia i temperatury. Znajomość prędkości fal podłużnych i poprzecznych umożliwia dodatkowo wyznaczenie dynamicznych modułów sprężystości badanych utworów.

METODA POMIAROWA

APARATURA POMIAROWA

Do pomiarów prędkości fal sprężystych na próbkach skalnych wykorzystano aparaturę ULT-100 P&S Ultrasonic Velocity Measurement System firmy GCTS, będącą na wyposażeniu Katedry Geofizyki Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie (CATS, 1994–2004). Aparatura pomiarowa składa się z generatora fal sprężystych oraz czujników, które mają płytki testowe z wmontowanymi kryształami piezoelektrycznymi (fig. 1). Do pomiarów wykorzystano czujniki o częstotliwości własnej drgań 200 kHz. Zapis wyników pomiarów wraz z automatyczną, cyfrową rejestracją przebiegów falowych wykonano z użyciem spe-

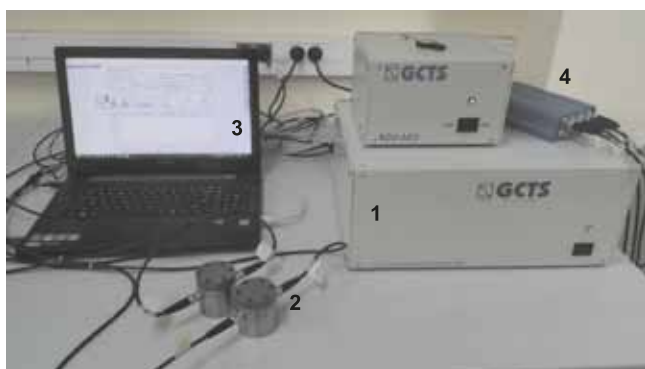


Fig. 1 Aparatura ULT-100 P&S Ultrasonic Velocity Measurement System firmy GCTS

1 – elementy elektroniczne aparatury; 2 – czujniki; 3 – komputer z oprogramowaniem GCTS Ultrasonic Velocity; 4 – panel połączenia czujników z aparaturą

ULT-100 P&S Ultrasonic Velocity Measurement System of GCTS co

1 – electronic elements; 2 – transducers; 3 – computer with GCTS Ultrasonic Velocity software; 4 – measurement system and transducers connector

cialistycznego oprogramowania GCTS Ultrasonic Velocity, które pozwala na automatyczne sterowanie amplitudą impulsów, częstotliwością próbkowania, wzmocnieniem wejściowym oraz wzmocnieniem amplitud fal. Na ekranie komputera jest wyświetlany obraz falowy (fig. 2) z graficznie zaznaczonym przybliżonym miejscem pierwszego wystąpienia fali. Jest to możliwe dzięki wbudowanej do oprogramowania obszernej bazie prędkości fal ultradźwiękowych w powszechnie stosowanych materiałach, takich jak: metale, pospolite skały, gleby, oraz możliwości zastosowania automatycznych pikierów pierwszych wstąpień.

Do wyznaczenia prędkości najbardziej interesująca jest początkowa część obrazów falowych, na której identyfikuje się miejsca pierwszych wstąpień fal sprężystych (fig. 2). Istnieje także możliwość obejrzenia widma częstotliwościowego oraz zastosowania różnego rodzaju filtracji. Filtracja ma na celu dostarczenie sygnału użytecznego po usunięciu zakłóceń z surowego zapisu. Źródłem zakłóceń może być np. sieć energetyczna. Filtracja jest przeprowadzana w domenie częstotliwości. Dynamiczne moduły sprężystości są obliczane przez program według standardowych wzorów (Plewa, Plewa, 1992) na podstawie wyznaczonych prędkości fal sprężystych oraz gęstości objętościowej próbki.

WYKONANIE POMIARÓW

W pierwszym etapie badań zważono każdą walcową próbkę oraz pomierzono jej wysokość i średnicę. Dokładność pomiaru masy, wcześniej skalibrowaną wagą laboratoryjną, wynosiła 0,001 g. Dokładność pomiaru parametrów geometrycznych próbki wynosiła 0,05 cm. Do programu GCTS Ultrasonic Velocity wpisano litologię próbki oraz za-

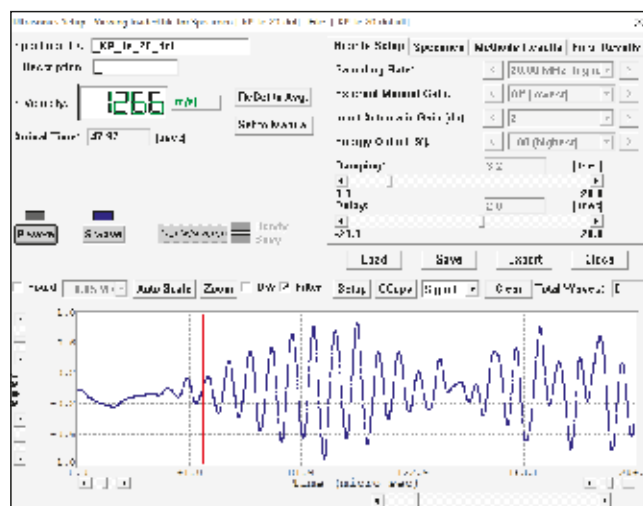


Fig. 2 Przykładowy obraz falowy z zaznaczonym czasem przyścia fali S

Czerwona linia oznacza czas pierwszego wstąpienia fali, niebieska – wartość poprawki na przejście fali przez płytki czujników

Exemplary waveform S

Wave first arrival marked in red, blue line shows the correction related to face to face time in transducers

znaczono jej szczególne cechy (jeżeli była nierówna, spękana, nie miała płaskich powierzchni).

Składanie i generowanie uśrednionego obrazu falowego wykonywano na 8. obrazach falowych. Wybrano czas próbkowania równy 0,5 μ s oraz automatyczne wzmocnienie 2 dB. Wprowadzono poprawki do czasów pierwszych wstąpień fal P i S, odpowiednio równe 10,73 i 17,09 μ s, uzyskane podczas pomiaru przy zetkniętych płytkach testowych czujników. Dokładność wyznaczenia prędkości oraz dynamicznych modułów sprężystości zależała od niepewności pomiarowych poszczególnych elementów oraz dokładności wyznaczania czasów pierwszych wstąpień fal. Niepewność pomiaru wyznaczono z prawa przenoszenia niepewności (BIMP i in., 1999). Założono, że pierwsze wstąpienia zostały „wypikowane” poprawnie (w dużym stopniu decyduje o tym doświadczenie i wiedza interpretatora), uzyskano następujące niepewności pomiarowe dla:

- prędkości fali P: 4 m/s;
- prędkości fali S: 2 m/s;
- modułu Younga: 0,04 GPa;
- współczynnika Poissona: 0,003;
- modułu odkształcenia postaci: 0,01 GPa;
- modułu odkształcenia objętości: 0,04 GPa.

PARAMETRY CHARAKTERYZUJĄCE SKAŁY ZBIORNIKOWE

Porowatość

Porowatość jest jedną z podstawowych właściwości skał (Plewa, Plewa, 1992; Tiab, Donaldson, 1996; Schön, 2015), która ma znaczący wpływ na większość właściwości fizycznych, m.in. na prędkości fal sprężystych i gęstość objętościową. Porowatość całkowita (ogólna) jest definiowana jako stosunek sumy objętości wszystkich pustych przestrzeni oraz całkowitej objętości próbki:

$$\varphi_t = \frac{v_p}{v_b} = \frac{v_b - v_s}{v_b} \quad (1)$$

gdzie:

- φ_t – porowatość ogólna;
- v_b – całkowita objętość próbki;
- v_p – objętość porów;
- v_s – objętość szkieletu skały, objętość ziaren.

Wyróżnia się także porowatość otwartą, w petrofizyce często nazywaną efektywną, opisującą stosunek objętości porów połączonych w próbce do jej całkowitej objętości. Porowatość jest wyznaczana przez pomiary bezpośrednie (laboratoryjne) lub pośrednie (geofizyka otworowa i sejsmika). Pomiary pośrednie są oparte na korelacji porowatości z innymi parametrami (np. gęstością objętościową, czasem interwałowym przy profilowaniu akustycznym, amplitudą i prędkością fal sejsmicznych). Pomiary laboratoryjne mogą być wykonywane różnymi metodami, np. z zastosowaniem piknometri helowej, porozymetri rtęciowej, eksperymentu z wykorzystaniem zjawiska magnetycznego rezonansu ją-

drowego (Tiab, Donaldson, 1996; Schön, 2015) albo wprost przez nasywanie wysuszonej próbki wodą w komorze próżniowej (Wilk i in., 1985). Pomiar wykonany wspomnianą wyżej metodą polega na wykorzystaniu prawa Archimedesza do określenia objętości próbki. Próbkę wysuszoną w temperaturze 105°C po zważeniu nasyca się wodą w komorze próżniowej, a następnie waży w powietrzu oraz przy pełnym zanurzeniu w wodzie. Korzystając z tej metody, obliczono porowatość w badaniach hydrogeologicznych w tej pracy. Jest to tzw. porowatość otwarta, wyrażona za pomocą wzoru:

$$\varphi_o = \frac{\sigma_{np} - \sigma_s}{\sigma_{np} - \sigma_{nw}} \quad (2)$$

gdzie:

- φ_o – porowatość otwarta;
- σ_{np} – masa próbki nasyconej wodą, ważonej w powietrzu [g];
- σ_{nw} – masa próbki nasyconej wodą, ważonej w wodzie [g];
- σ_s – masa suchej próbki [g].

Przepuszczalność i współczynnik filtracji

Przepuszczalność fizyczna jest parametrem, który określa zdolność skały do ruchu medium w jej przestrzeni porowej (Plewa, Plewa, 1992). Zależy od kilku czynników, m.in. od porowatości efektywnej, wielkości i kształtu ziaren, stopnia ich wysortowania oraz konsolidacji. Duże znaczenie ma spoiwo w skale – jeżeli jest ilaste i zawiera minerały pęczniące pod wpływem wody, przepuszczalność wyraźnie się zmniejsza. Skały nieporowate są nieprzepuszczalne.

Przepuszczalność jest definiowana za pomocą wzoru:

$$u = -\frac{K}{m} \frac{dp}{dl} \quad (3)$$

gdzie:

- u – prędkość cieczy [m/s];
- K – przepuszczalność porowatej skały [D];
- μ – lepkość dynamiczna cieczy [Pa·s];
- l – długość próbki [m];
- $\frac{dp}{dl}$ – gradient ciśnienia w kierunku przepływu [Pa/m].

Miarą przepuszczalności skał w hydrogeologii jest współczynnik filtracji, który charakteryzuje zdolność przewodzenia wody przez skały porowate. Zależność prędkości ruchu cieczy od współczynnika filtracji można także wyrazić wzorem:

$$u = -k_f \cdot \text{grad}H \quad (4)$$

gdzie:

- u – prędkość cieczy [m/s];
- k_f – współczynnik filtracji [m/s];
- H – wysokość hydrauliczna [–].

Współczynnik filtracji może być wyznaczony za pomocą wzorów empirycznych. W ten sposób, np. na podstawie wykresu podającego zależność współczynnika filtracji od uziarnienia oraz wartości porowatości, uzyskuje się przybliżone

wartości. Inną metodą jest użycie laboratoryjnych aparatów filtracyjnych ze stałym lub zmiennym spadkiem hydraulicznym. Współczynnik filtracji można także wyznaczać metodami polowymi, które dają najdokładniejsze wyniki, ale są drogie i pracochłonne. Korelacja między porowatością i przepuszczalnością ma w praktyce duże znaczenie. Przepuszczalność powinna wzrastać wraz z porowatością i rozmiarem porów. Zależność ta nie występuje lub słabo się zaznacza w skałach spękanych, w których o przepuszczalności decyduje wymiar pustki poprzeczny do kierunku przepływu wody, a nie ogólna objętość pustek (porowatość).

Gęstość

Gęstość jest parametrem wyrażonym przez iloraz masy m i objętości próbki V :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5)$$

W petrofizyce oraz badaniach hydrogeologicznych wykorzystuje się: a) gęstość objętościową, która jest średnią gęstością skały zawierającej pory, b) gęstości poszczególnych minerałów budujących skałę, c) średnią gęstość szkieletu skalnego bez uwzględnienia nasycenia porów, d) średnią gęstość mediów wypełniających pory. Przy takim podejściu zakłada się, że układ jest dwufazowy: faza stała – szkielet i medium w przestrzeni porowej.

Gęstość objętościowa zależy od składu mineralnego skały oraz jej porowatości i gęstości mediów porowych. Wraz ze wzrostem porowatości oraz spadkiem nasycenia wodą, a wzrostem nasycenia węglowodorami, następuje spadek gęstości. Zależność między porowatością a gęstością można wyrazić w następujący sposób:

$$\varphi_i = \frac{\rho_{ma} - \rho}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (6)$$

gdzie:

φ_i – porowatość ogólna [–];

ρ_{ma} – gęstość szkieletu mineralnego [g/cm^3];

ρ_f – gęstość medium wypełniającej pory [g/cm^3];

ρ – gęstość objętościowa [g/cm^3].

CHARAKTERYSTYKA GEOLOGICZNA PRÓBEK SKALNYCH

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem 73 próbek skalnych pochodzących z różnych obszarów: 57 próbek skał jury górnej z rejonu Olkusza, 8 próbek skał jury górnej z rejonu Krakowa oraz 8 próbek skał dewonu środkowego z rejonu Klucz. Próbkę z rejonu Olkusza były w przeważającej części wapieniami oraz sporadycznie marglami i dolomitami. Rdzenie, z których zostały wycięte, pobrano z otworów hydrogeologicznych lub rozpoznawczych, znajdujących się na obszarze występowania złóż rud cynku i ołowiu (Wilk i in., 1985; Motyka i in., 1998). Spośród wyodrębnionych przez Motykę (1998) elementów sieci hydraulicznej w ska-

łach węglanowych badaniami objęto przestrzeń porową według Choquette'a i Praya (1970).

Badane próbki pochodziły z trzech pięter wodonośnych występujących w rejonie olkuskim: jurajskiego, triasowego i karbońsko-dewońskiego.

Jurajskie piętro wodonośne znajduje się we wschodniej oraz północno-wschodniej części rejonu olkuskiego. Jest ono reprezentowane przez utwory malmu, które składają się głównie z wapieni płytowych, skalistych i kredowatych (Żurek i in., 2010). Tworzą one zbiornik wód podziemnych typu szczelinowo-krasowego, więc przestrzeń porowa jurajskich skał węglanowych w niewielkim stopniu przewodzi i magazynuje wodę. Według przeprowadzonych badań hydrogeologicznych (Juško i in., 2015) wartości porowatości otwartej tych skał wynoszą 0,58–18,68 % (tab. 1). Natomiast wartości współczynnika filtracji przestrzeni porowej próbek wapieni jurajskich zmieniają się w szerokim przedziale $0,03\text{--}419 \cdot 10^{10}$ m/s (tab. 1).

Triasowe piętro wodonośne pod względem litologicznym jest dwudzielne. W części górnej jest zbudowane z dolomitów i wapieni górnego pstręgo piaskowca oraz wapienia muszlowego. Dolną część stanowią pstre piaski oraz piaskowce środkowego i dolnego pstręgo piaskowca z przeławieniami utworów ilastych. Zbiornik wód podziemnych typu porowo-szczelinowo-krasowego tworzą skały węglanowe (wapienie i dolomity). Na podstawie wykonanych w tym rejonie próbnych pompowań obliczono, że średnia wartość współczynnika filtracji wynosi $6,5 \cdot 10^{-5}$ m/s (Motyka, Wilk, 1976; Staško, 1992). Wspomniana wcześniej dwudzielność piętra triasowego jest skutkiem wykształcenia litologicznego i wynika z faktu, że utwory wapienia muszlowego są bardziej przepuszczalne niż utwory górnego pstręgo piaskowca.

ANALIZA WYNIKÓW

Dane z rejonu Olkusza obejmują interwał głębokościowy 12,0–127,5 m, z rejonu Krakowa 55,9–78,5 m, a z rejonu Klucz 262,2–497,8 m. W tabeli 1 zamieszczono podstawowe statystyki wyników badań hydrogeologicznych (gęstości objętościowej – ρ_{bh} , porowatości otwartej – φ_o i współczynnika filtracji – k_f) oraz petrofizycznych (gęstości objętościowej – ρ_{bp} , prędkości fal sprężystych: podłużnej P – Vp oraz poprzecznej S – Vs , stosunku wyżej wymienionych prędkości – Vp/Vs , współczynnika Poissona – ν , modułu Younga – E , współczynniki sprężystości objętości – μ i postaci – G). Zbiory próbek w rejonie Olkusza, na których wykonano oznaczenia hydrogeologiczne i badania petrofizyczne nie były równoliczne: pozyskano 44 dane hydrogeologiczne i 57 petrofizycznych. W tabeli 2 przedstawiono podstawowe statystyki dla próbek z rejonu Krakowa i Klucz. W każdym ze zbiorów dysponowano 8 próbkami.

Dane zawarte w tabelach 1 i 2 pozwalają wstępnie scharakteryzować badane formacje skalne (Ogórek, 2017). Porównanie prędkości rozchodzenia się fal P i S w węglanach jury górnej wskazuje większy przedział zmienności prędkości fali P w rejonie Olkusza w porównaniu do Krakowa.

Średnie prędkości obu typów fal w rejonie Olkusza są wyższe, natomiast mediany są przesunięte w obu przypadkach w stronę niższych wartości, wskazując na ich dominację. Minimalna gęstość objętościowa próbek w rejonie Krakowa jest wyższa. Maksymalne i średnie porowatości otwarte próbek z rejonu Olkusza są wyższe w porównaniu do pró-

bek z rejonu Krakowa. Najwyższe wartości parametrów sprężystych charakteryzują utwory dewońskie, najniższe – górnourajskie węglany z rejonu Olkusza.

Na podstawie wstępnej charakterystyki można wnioskować, że skały węglanowe jurajskiego piętra wodonośnego w rejonie Olkusza i Krakowa różnią się. Dewońskie próbki

Tabela 1

Podstawowe statystyki wyników badań hydrogeologicznych i petrofizycznych – próbki z rejonu Olkusza

Simple statistics of the hydrogeological and petrophysical investigations results; samples from Olkusz area

Parametr	Minimum	Maksimum	Średnia arytmetyczna	Mediana	Odchylenie standardowe
ρ_{bp} [g/cm ³]	2,12	2,59	2,42	2,41	0,01
V_p [m/s]	1244	3342	2555	2140	244
V_s [m/s]	811	1840	1461	1236	100
V_p/V_s	1,28	1,99	1,75	1,73	0,06
ν [-]	0,13	0,33	0,26	0,25	0,03
E [GPa]	3,25	22,26	13,23	9,24	1,73
μ [GPa]	1,47	18,44	9,21	6,19	1,76
G [GPa]	1,44	8,73	5,31	3,70	0,62
ρ_{bh} [g/cm ³]	2,13	2,77	2,45	2,49	0,01
φ_o [%]	2,16	18,68	8,55	7,03	1,74
$k_f \cdot 10^{-10}$ [m/s]	0,03	15,30	0,12*)	0,17	0,16

*) – średnia geometryczna w przypadku współczynnika filtracji / geometric mean for hydraulic conductivity

Tabela 2

Podstawowe statystyki wyników badań hydrogeologicznych i petrofizycznych – próbki z rejonu Krakowa i Klucz

Simple statistics of the hydrogeological and petrophysical investigations results; samples from Krakow and Klucze areas

Parametr	Minimum	Maksimum	Średnia arytmetyczna	Mediana	Odchylenie standardowe
ρ_{bp} [g/cm ³]	2,40	2,62	2,54	2,54	0,06
V_p [m/s]	1820	3205	2465	2251	605
V_s [m/s]	766	1752	1327	1262	449
V_p/V_s	1,70	2,38	1,90	1,81	0,17
ν [-]	0,23	0,39	0,30	0,28	0,06
E [GPa]	5,86	20,11	12,81	10,86	7,08
μ [GPa]	5,32	16,75	10,48	7,62	3,25
G [GPa]	2,22	8,03	4,99	4,33	2,97
ρ_{bh} [g/cm ³]	2,62	2,66	2,64	2,65	0,01
φ_o [%]	0,69	2,22	1,25	0,89	0,28
$k_f \cdot 10^{-10}$ [m/s]	0,05	16,00	2,20*)	2,31	0,95
rejon Klucz, węglany dewonu środkowego, interwał głębokościowy: 262,2–497,8 m					
ρ_{bp} [g/cm ³]	2,53	2,78	2,63	2,62	0,04
V_p [m/s]	1927	3212	2904	2943	83
V_s [m/s]	1629	1994	1783	1684	78
V_p/V_s	0,97	1,77	1,64	1,75	0,03
ν [-]	0,23	0,27	0,25	0,26	0,01
E [GPa]	17,56	23,03	20,33	18,63	1,26
μ [GPa]	11,15	15,53	13,64	12,76	0,19
G [GPa]	7,01	9,33	8,13	7,42	0,58
ρ_{bh} [g/cm ³]	2,59	2,81	2,67	2,64	0,04
φ_o [%]	0,58	4,19	1,97	2,34	1,34
$k_f \cdot 10^{-10}$ [m/s]	0,73	419	4,28*)	4,48	1,88

*) – średnia geometryczna w przypadku współczynnika filtracji / geometric mean for hydraulic conductivity

z Klucz mają inną charakterystykę. Wyższe gęstości objętościowe wskazują z jednej strony na większy udział dolomitów, z drugiej – na mniejsze porowatości. Próbki z Klucz pobrano z większych głębokości w porównaniu do pozostałych. Zróżnicowanie wartości gęstości objętościowych węglanów z Olkusza oraz Klucz i Krakowa może być także odbiciem mechanizmów wpływających na powstawanie porowatości w skałach węglanowych oraz wskazuje na prze wagę węglanu wapnia czy dolomitu w badanych skałach.

Ze względu na liczniejsze zbiory danych i bardziej reprezentatywne statystyki więcej uwagi poświęcono wynikom z rejonu Olkusza. Dalsze rozważania przeprowadzono tylko dla zbioru tych próbek.

HISTOGRAMY

Uzyskane wyniki przedstawiono w postaci histogramów (fig. 3–5). Dominują prędkości fali podłużnej (V_p) z przedziału 2250–3000 m/s i fali poprzecznej (V_s): 1300–1750 m/s. Najwięcej próbek występuje w przedziałach 2500–2750 m/s (V_p) oraz 1450–1600 m/s (V_s). Oba rozkła-

dy charakteryzują się asymetrią lewostronną, co wskazuje na dominację niższych wartości. W obydwu przypadkach mediany są mniejsze niż średnia arytmetyczna (tab. 1).

Przedziały zmienności gęstości objętościowej, wyznaczonej przy pomiarach prędkości ρ_{bp} i hydrogeologicznych ρ_{bh} , różnią się, ale wartości średniej arytmetycznej i mediany są podobne (tab. 1). W przypadku gęstości wyznaczonej przy pomiarach prędkości średnia i mediana są prawie sobie równe. W przypadku gęstości z pomiarów hydrogeologicznych mediana jest nieco większa niż średnia. Najwięcej próbek w obu przypadkach znajduje się w przedziale gęstości objętościowej 2,4–2,5 g/cm³. Widać wyraźnie, że w przypadku obu pomiarów gęstości wartości małe (<2,3 g/cm³) i duże (>2,6 g/cm³) występują rzadko (fig. 4).

Współczynnik Poissona ν przyjmuje wartości z przedziału 0,13–0,33. Jego rozkład wskazuje na dominację wartości z przedziału 0,20–0,29 (fig. 5A), a kształt jest zbliżony do rozkładu normalnego.

Na histogramie współczynnika ściśliwości objętości μ (fig. 5B) widać, że najwięcej wartości występuje w przedziale 4–12 GPa, a wartości współczynnika sprężystości postaci

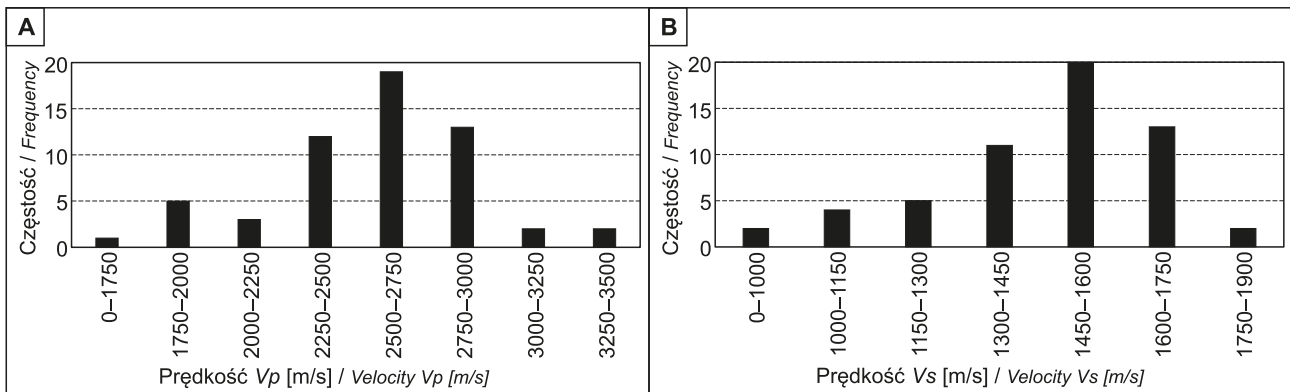


Fig. 3. Histogramy prędkości: A – fali podłużnej V_p [m/s], B – fali poprzecznej V_s [m/s]

Histogram of: A – V_p velocity [m/s], B – V_s velocity [m/s]

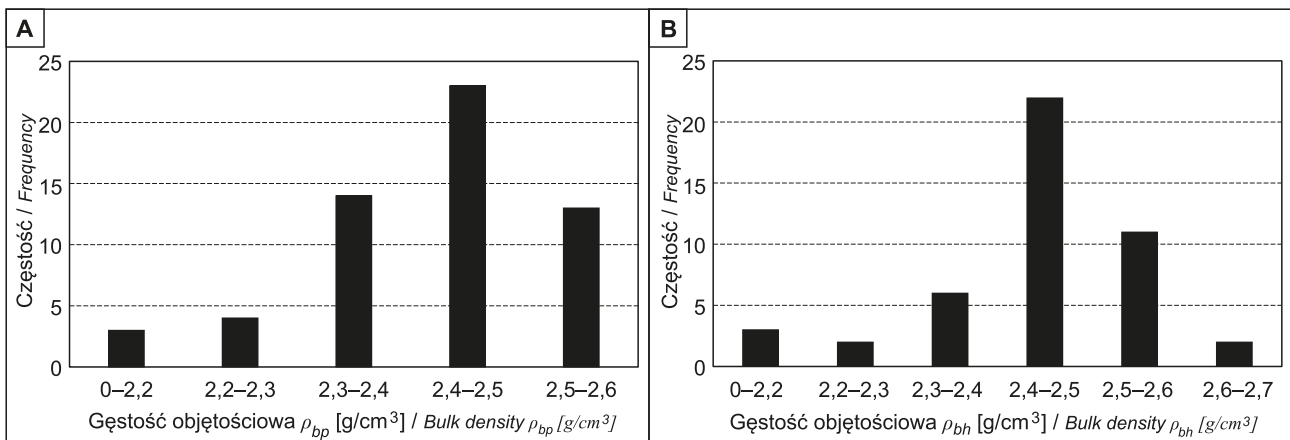


Fig. 4. Histogramy: A – gęstości objętościowej wyznaczonej przy pomiarach prędkości ρ_{bp} [g/cm³], B – gęstości objętościowej wyznaczonej przy pomiarach hydrogeologicznych ρ_{bh} [g/cm³]

Histograms: A – bulk density determined together with velocity measurements ρ_{bp} [g/cm³], B – bulk density determined during hydrogeological measurements ρ_{bh} [g/cm³]

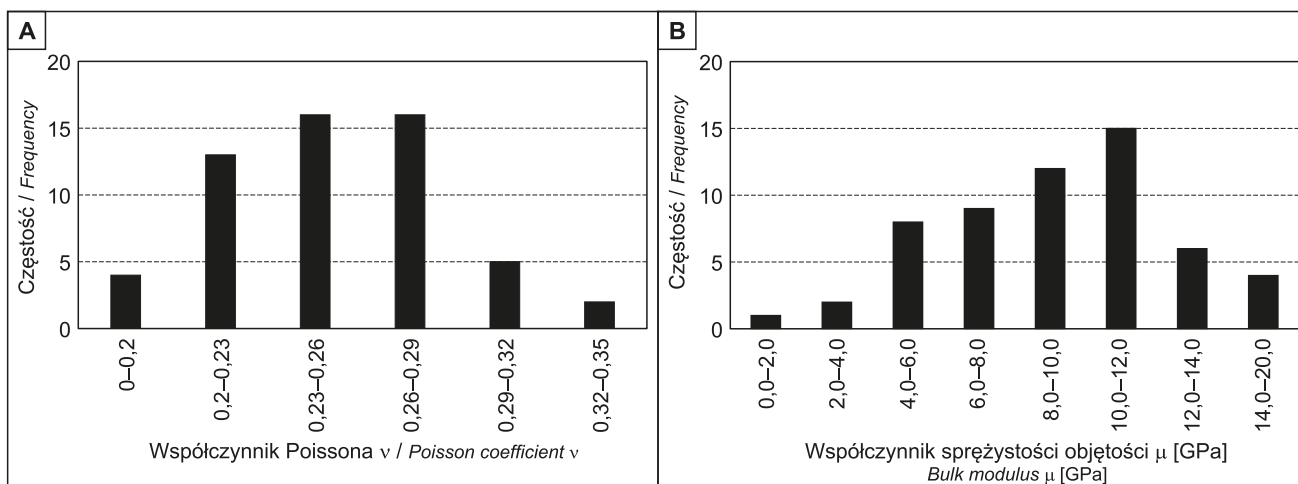


Fig. 5. Histogramy współczynników: A – Poissona ν i B – sprężystości objętości μ [GPa]

Histograms: **A** – Poisson coefficient ν , **B** – bulk modulus μ [GPa]

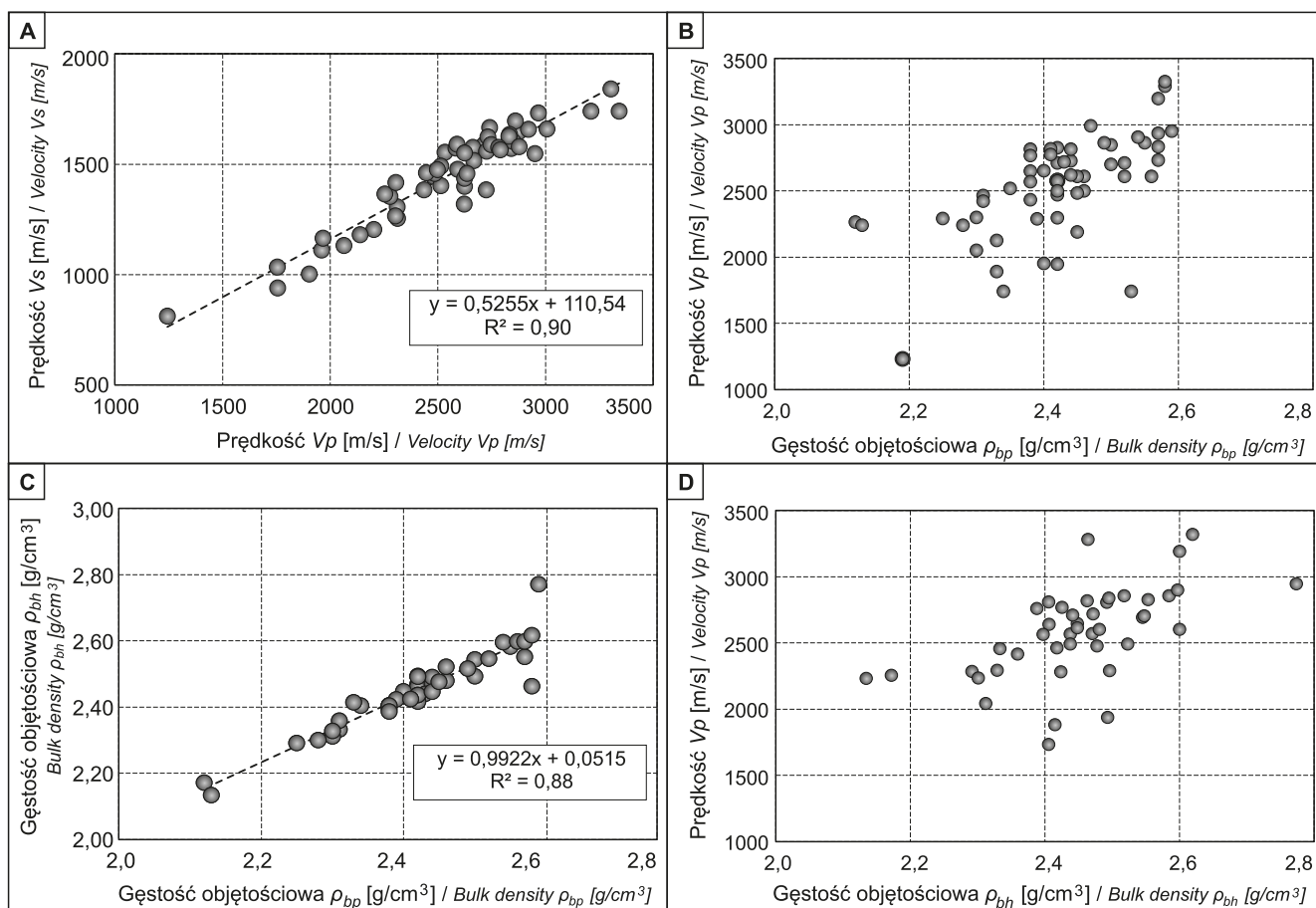


Fig. 6. Zależności między: A – prędkościami fal P a S; B – prędkością fali P a gęstością objętościową wyznaczoną podczas pomiaru prędkości; C – gęstością objętościową z pomiaru hydrogeologicznego a petrofizycznego; D – prędkością fali P a gęstością objętościową wyznaczoną podczas badań hydrogeologicznych

Relationship between: **A** – V_p vs. V_s relationship; **B** – P wave velocity and bulk density from petrophysical measurements; **C** – bulk density from hydrogeological and petrophysical measurements; **D** – P wave velocity and bulk density from hydrogeological measurements

G (nie pokazane jako histogram) dominują w przedziale 3,5–8,5 GPa. Omówione parametry mieszczą się w przedziałach zmienności dla węglanów występujących na niewielkich głębokościach (Plewa, Plewa, 1992; Tiab, Donaldson, 1996; Schön, 2015).

Zależności między parametrami

Przedstawione korelacje miały na celu pokazanie zależności między parametrami z obu grup – petrofizycznej i hydrogeologicznej. Zaprezentowano związki między parametrami z tej samej grupy: prędkościami fal sprężystych (fig. 6A) oraz prędkością fali P a gęstością objętościową (fig. 6B). Zilustrowano także wzajemną zależność gęstości objętościowej z obu pomiarów (fig. 6C) oraz związek między prędkością fali P a gęstością z pomiarów hydrogeologicznych (fig. 6D). Podkreślono, że można wymienić wykorzystać parametry konieczne do oceny potencjału zbiornikowego skały porowatej i przepuszczalnej.

Zależność między prędkościami charakteryzuje się wysokim współczynnikiem determinacji. Obserwuje się jednak rozrzut danych, który jest wynikiem niedokładności pomiarów, na które składał się przede wszystkim nieregularny kształt próbek, skutkujący niedokładną oceną objętości próbki. W pewnej mierze należy brać pod uwagę także wpływ szczelin i pęknięć w skałach węglanowych, których obecność wyraźnie obniża prędkość fali P, a mniej wpływa na prędkość fali S.

Podobnie wysoką korelację obserwuje się dla gęstości objętościowych. Również w tym przypadku wyniki odbiegające od linii trendu są efektem błędów pomiarowych (wysokości, średnicy i masy) lub spękania próbki. Dla dwóch próbek w obu pomiarach uzyskano bardzo małe wartości gęstości objętościowej, ok. 2,1 g/cm³ (fig. 6C). Wyniki te jednak dobrze wpasowały się w cały zbiór danych. Wysokie wartości gęstości dwóch innych próbek (fig. 6C) znacząco różnią się wyznaczonymi wartościami. Wśród dostępnych informacji nie znaleziono jednak ewidentnej przyczyny rozbieżności.

POROWATOŚĆ OGÓLNA

Do obliczenia porowatości ogólnej wykorzystano równanie Wylliego (Wyllie i in., 1956; Jarzyna i in., 1999), które przedstawia związek między prędkością propagacji fali podłużnej a porowatością ogólną:

$$\frac{1}{V} = \frac{\varphi_t}{V_f} + \frac{1-\varphi_t}{V_{ma}} \quad (7a)$$

gdzie:

V – prędkość fali P w ośrodku [m/s];

V_f – prędkość fali P w cieczy, która nasyca przestrzeń porową [m/s];

V_{ma} – prędkość fali P w szkielecie skalnym (charakterystyczna dla danej litologii) [m/s];

φ_t – porowatość ogólna [–].

Równanie Wylliego jest wyrażane także z wykorzystaniem czasu interwałowego, czyli odwrotności prędkości, parametru mierzzonego w profilowaniu akustycznym:

$$\varphi_t = \frac{\Delta T - \Delta T_{ma}}{\Delta T_f - \Delta T_{ma}} \quad (7b)$$

gdzie:

ΔT – czas interwałowy w skale [μs/m];

ΔT_{ma} – czas interwałowy w szkielecie mineralnym [μs/m];

ΔT_f – czas interwałowy w medium porowym [μs/m].

Wzory (7a i 7b) są bliźniaczo podobne do wzoru (6) dlatego, że wszystkie powstały na podstawie najprostszego modelu skały, zbudowanej ze szkieletu mineralnego oraz przestrzeni porowej wypełnionej medium złożowym.

Obliczanie porowatości ogólnej na podstawie wzorów (6) i (7a lub 7b) wymaga znajomości gęstości szkieletowej i czasu interwałowego w szkielecie mineralnym skały. Żeby oszacować te wielkości zestawiono porowatość otwartą (z pomiarów hydrogeologicznych) z pomierzoną prędkością fali P (czas interwałowy jest odwrotnością prędkości; fig. 7A) oraz gęstość objętościową (fig. 7B). Dla zerowej porowatości otwartej oszacowano parametry szkieletowe (prędkość i gęstość). Na podstawie równań regresji wyznaczono prędkość szkieletową dla porowatości otwartej równej zero: $V_{p_szk} = 2988$ m/s oraz gęstość szkieletową równą 2,64 g/cm³. W obliczeniach rozważano również jako prędkość szkieletową fali P najwyższą wartość uzyskaną w badaniach ($V_p = 3342$ m/s), a jako gęstość szkieletową najwyższą wartość z pomiarów petrofizycznych (2,59 g/cm³; tab. 1). Rozważano także taki dobór wartości prędkości szkieletowej, żeby porowatość ogólna była jak najbardziej zbliżona do porowatości otwartej. Wykonano testy dla prędkości szkieletowej $V_{p_szk} = 3165$ oraz 4200 m/s.

Prędkość (czas interwałowy) medium w przestrzeni porowej we wzorach (7a i 7b) jest dobierana na podstawie znajomości wypełnienia porów w próbkach skalnych. W analizowanym przypadku próbki pochodziły z niewielkich głębokości, ale przynajmniej częściowo z poziomów wodonośnych. W stanie naturalnym należałoby rozpatrywać nasycenie wodą lub częściowe nasycenie wodą i powietrzem. Próbki poddane badaniom prędkości były jednak wysuszone (przebywały przez wiele lat w suchych pomieszczeniach). Założono zatem, że pory w badanych próbkach skalnych były wypełnione jedynie powietrzem. Stąd też do obliczeń przyjęto czas interwałowy równy 3030 μs/m. W gęstościowym wariancie obliczania porowatości ogólnej przyjęto gęstość powietrza w przestrzeni porowej równą 0,3 g/cm³. Wykonano także test przy założeniu, że w przestrzeni porowej suchej próbki znajduje się jednak pewna objętość wody. Obecność wody zaznaczono przez zmniejszenie czasu interwałowego medium w przestrzeni porowej do wartości 2700 μs/m.

Wykorzystując wzór Wylliego do obliczania porowatości ogólnej na podstawie profilowania akustycznego ważne jest też uwzględnienie poprawek na brak zwięzłości i na zawartość frakcji ilowej (zailenie). Poprawka na zailenie wymaga znajomości tego parametru, czym nie dysponowano

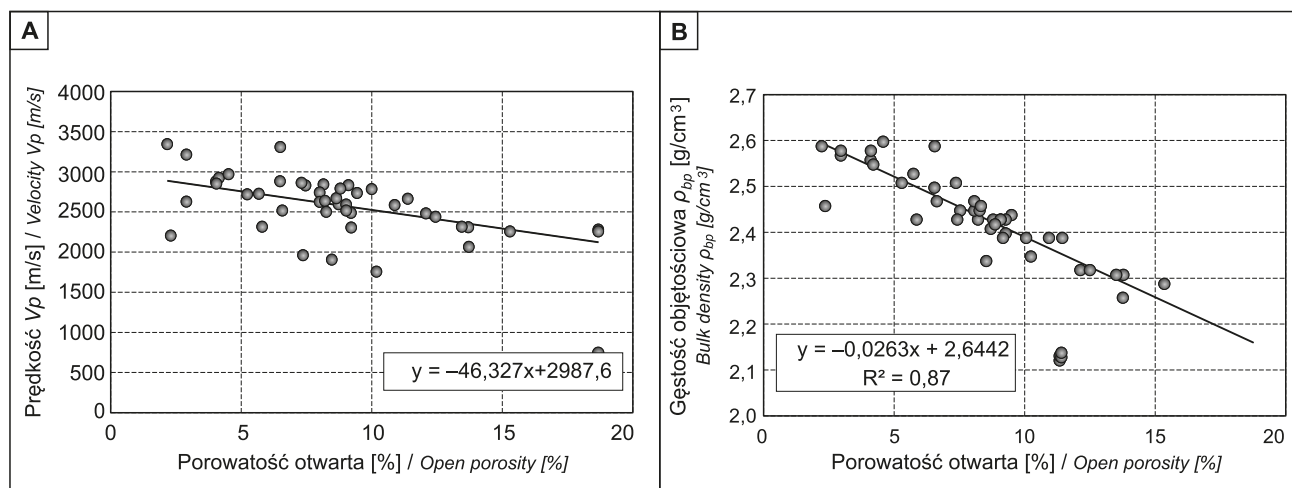


Fig. 7. Zależność: A – prędkości fali P od porowatości otwartej, B – gęstości objętościowej od porowatości otwartej

A – P wave velocity vs. open porosity relationship, B – Bulk density from petrophysical measurements vs. open porosity

w omawianym przypadku. Wzmiankowana obecność margli w poziomach wodonośnych spowodowała, że prędkość szkieletowa fali P była obniżona w porównaniu do czystych węglanów. Poprawka na brak zwięzłości jest wprowadzana jako mnożnik wyliczany na podstawie ilorazu czasu interwałowego w formacji ilastej w badanym ośrodku oraz standardowego czasu interwałowego w iłach, równego 330 μ s/m. Badane próbki były skałami twardymi, zbitymi, mimo tego, że zostały pobrane z niewielkich głębokości, dlatego nie wprowadzono poprawki na brak zwięzłości.

Wykorzystując równania (6) i (7a i 7b) i uwzględniając wyżej omówione wartości szkieletowe oraz parametry medium w przestrzeni porowej obliczono porowatość ogólną próbek skalnych (tab. 3).

Porównanie wartości w tabeli 3 pokazuje, że ze wzrostem prędkości szkieletowej rośnie porowatość ogólna. Największe wartości porowatości ogólnej uzyskano przy założonej wartości $V_{p_szk} = 4200$ m/s (na podstawie cytowanych podręczników można przyjąć, że jest to wartość zbliżona do maksymalnej dla płytko zalegających utworów

węglanowych). Przy tej wartości prędkości założono częściowe wypełnienie porów wodą złożową. Wszystkie wyniki zachowują podobną tendencję dotyczącą mediany i średniej arytmetycznej (mediana jest nieco większa, co oznacza, że więcej próbek ma mniejsze porowatości). Porowatość otwarta, prezentowana także w tabeli 3 dla porównania, nie spełnia tej prawidłowości.

Korelacje na figurach 8A–D wyraźnie się różnią. Porowatość ogólna obliczona na podstawie prędkości fali P różni się od porowatości otwartej wyznaczonej na podstawie prawa Archimidesa. Dobór prędkości szkieletowej z przedziału wartości dostępnych dla płytko zalegających utworów węglanowych wskazuje na wzrost porowatości ogólnej ze wzrostem prędkości szkieletowej (fig. 8B). Wpływ zmiennej wartości prędkości medium wypełniającego przestrzeń porową ma mniejsze znaczenie. Różnica w prędkości fali P w powietrzu (330 m/s) i powietrzu z udziałem wody (370 m/s) nie powoduje wyraźnej różnicy w porowatości ogólnej. O niedopasowaniu parametrów szkieletowych świadczą mniejsze wartości porowatości ogólnej w stosunku do otwartej.

Tabela 3

Podstawowe statystyki porowatości ogólnej obliczonej na podstawie prędkości fali P oraz gęstości objętościowej

Simple statistics of total porosity calculated from P wave velocity and bulk density

ϕ_t [%]	Prędkość szkieletowa [m/s]				Gęstość szkieletowa [g/cm ³]		Porowatość otwarta [%]
	2988*	3342*	3165*	4200**	2,59	2,64	
Minimum	0,11	0,01	0,61	2,49	0,44	2,14	2,16
Maksimum	17,43	18,49	17,98	22,98	20,52	22,22	18,68
Średnia	2,70	3,69	3,29	6,57	7,48	9,33	8,55
Mediana	3,05	4,3	3,70	7,24	7,86	9,82	7,03
Odchylenie standardowe	0,85	0,84	0,84	0,93	0,44	0,42	1,74

* wypełnienie porów powietrzem, ** wypełnienie porów powietrzem z niewielką ilością wody

* pores filled with air, ** pores filled with air with some volume of water

Z definicji wynika, że porowatość ogólna powinna być większa lub równa porowatości otwartej. Dobra znajomość litologii, w tym przypadku proporcji między wapieniem i dolomitom oraz rozpoznany udział margli, przyczyniłaby się wyraźnie do poprawnego wyznaczenia porowatości ogólnej (Motyka, 1998). Ważnym czynnikiem, który zapewniłby podniesienie dokładności wyznaczenia porowatości ogólnej na podstawie laboratoryjnych pomiarów prędkości byłoby ich wykonanie na świeżych próbkach. Przedstawiona metoda wyznaczania porowatości ogólnej na podstawie prędkości fali P dostarcza dobrych wyników pod warunkiem zapewnienia poprawnych danych wejściowych, co jest potwierdzone skutecznym stosowaniem profilowania akustycznego jako jednej z podstawowych metod wyznaczania porowatości formacji zbiornikowych przewierczanych otworami.

Na podstawie korelacji na wykresach 8C i 8D stwierdzono, że korzystając z gęstości objętościowej, wyliczonej

przy pomiarze prędkości (ρ_{bp}) i dobierając odpowiednio gęstość szkieletową można uzyskać znacznie lepszą zgodność niż w przypadku prędkości. Porowatość ogólna obliczona na podstawie gęstości jest zawyżona w stosunku do porowatości otwartej, ale wszystkie wyniki są znacznie bardziej zbliżone do siebie niż te uzyskane na podstawie prędkości. Charakteryzują się także najmniejszym odchyleniem standardowym, co w tym przypadku kwalifikuje gęstość objętościową jako stabilny parametr do wyznaczania porowatości ogólnej.

Sprawdzono również relację porowatości i współczynnika filtracji. Rozrzut punktów na figurach 9A (korelacja logarytmu współczynnika filtracji i porowatości otwartej) i 9B (korelacja logarytmu współczynnika filtracji i porowatości ogólnej, obliczonej na podstawie gęstości objętościowej, przy założeniu szkieletowej gęstości $2,59 \text{ g/cm}^3$) jest znaczny w obu przypadkach i stwierdzono słabe dopasowanie.

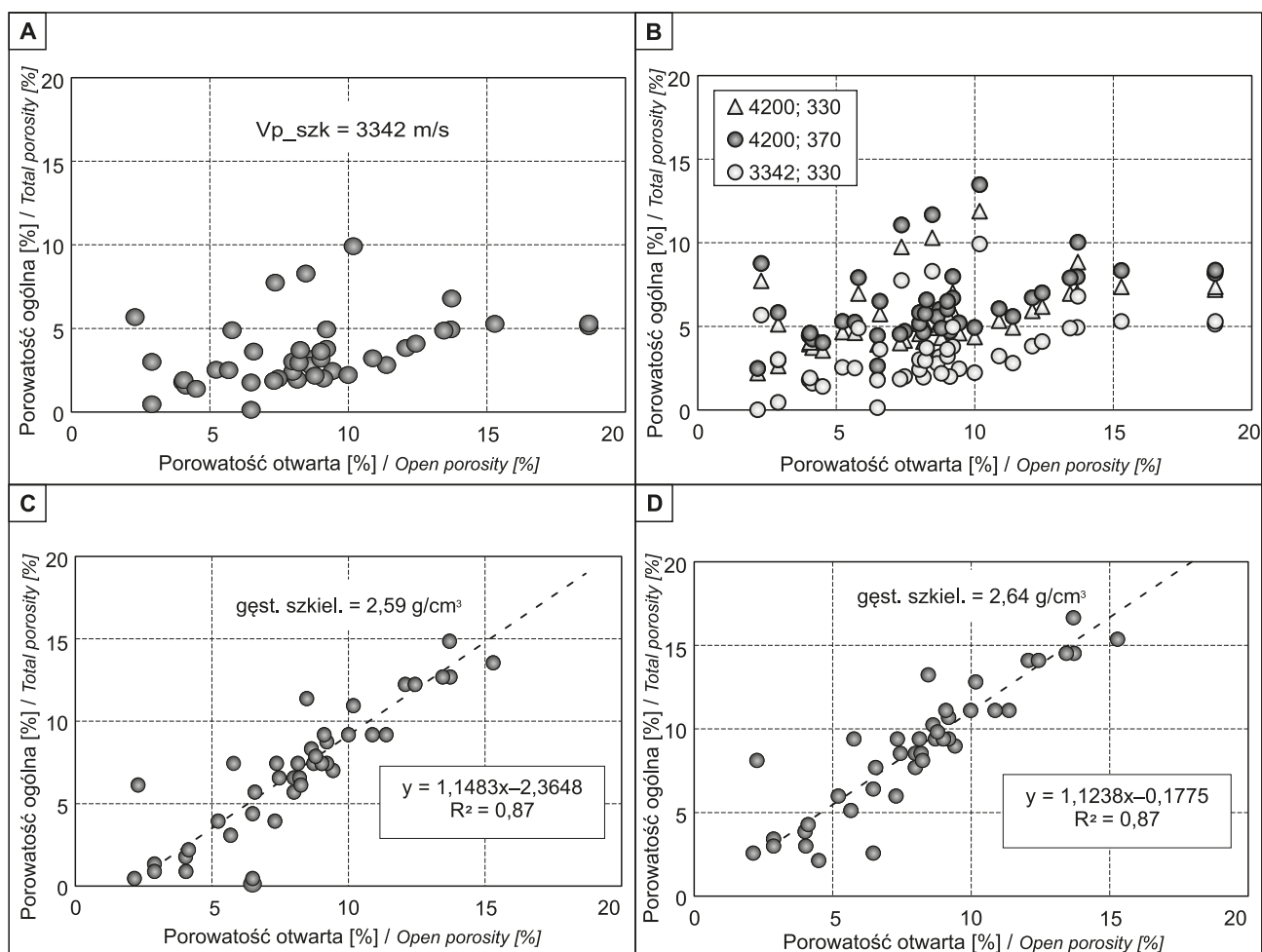


Fig. 8. Zależność porowatości ogólnej obliczonej na podstawie: A – wzoru Wylliego przy $V_{p_szk} = 3342 \text{ m/s}$ i porowatości otwartej, B – wzoru Wylliego przy $p_{szk}=3342$ oraz 4200 m/s i porowatości otwartej; druga liczba w legendzie oznacza prędkość w medium wypełniającym pory, C – gęstości objętościowej przy szkieletowej wartości równej $2,59 \text{ g/cm}^3$ i porowatości otwartej, D – gęstości objętościowej przy szkieletowej wartości równej $2,59 \text{ g/cm}^3$ i porowatości otwartej

A – Total porosity from Wyllie formula ($V_{p_skel} = 3342 \text{ m/s}$) vs. open porosity, B – Total porosity from Wyllie formula ($V_{p_skel} = 3342$ and 4200 m/s) vs. open porosity; second d number in legend means P wave velocity in porous medium, C – Relationship between total porosity from bulk density when skeletal density = 2.59 g/cm^3 vs. open porosity, D – Relationship between total porosity from bulk density when skeletal density = 2.64 g/cm^3 vs. open porosity

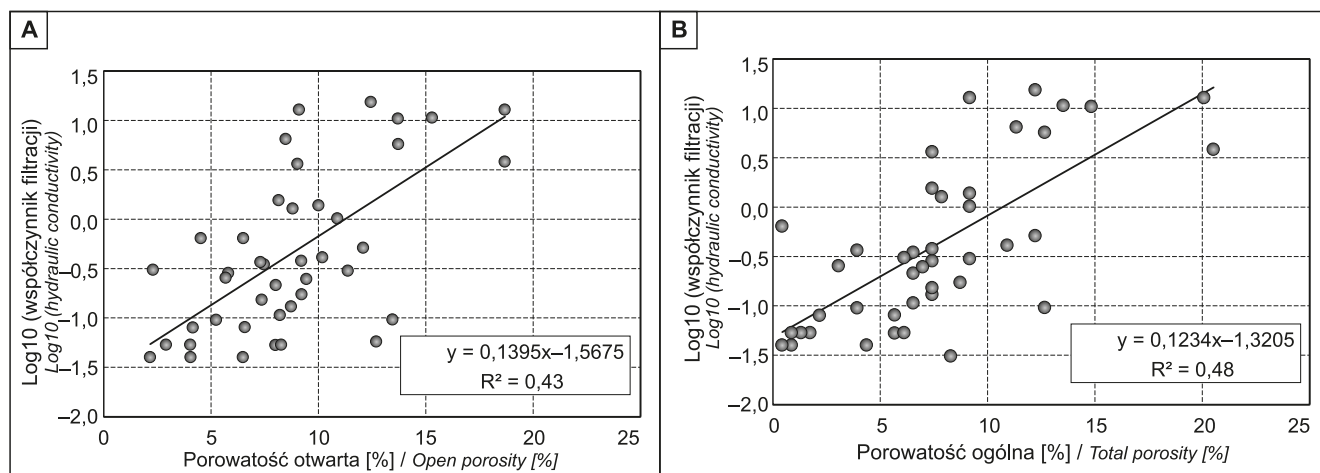


Fig. 9. A – Zależność logarytmu współczynnika filtracji i porowatości otwartej; B – Zależność logarytmu współczynnika filtracji i porowatości ogólnej, obliczonej na podstawie gęstości objętościowej, przy założeniu szkieletowej gęstości 2,59 g/cm³

A – Relationship between hydraulic conductivity logarithm vs. open porosity; B – Relationship between hydraulic conductivity logarithm vs. total porosity calculated from bulk density; skeletal density = 2.59 g/cm³

Na obu wykresach widać jednak podobny kształt (współczynnik kierunkowy i odcięcie) zależności liniowej.

ANIZOTROPIA WŁAŚCIWOŚCI SPRĘŻYSTYCH FORMACJI WĘGLANOWYCH

Część walcowych próbek była wycięta z rdzeni wiertniczych prostopadle i równolegle do warstwowania. Dzięki temu można było wykonać pomiary prędkości w dwóch prostopadłych kierunkach i stwierdzić występującą różnicę w wartościach. Wykonano podział próbek według kierunku badań. Obliczono średnie prędkości fal sprężystych oraz stosunki tych średnich prędkości dla każdego kierunku osobno. W większości przypadków prędkość fali podłużnej rozchodzącej się równolegle do uwarstwienia była większa niż w przypadku jej propagacji prostopadle do warstwowania. Dla próbek z rejonu Olkusza, w których możliwy był pomiar w dwóch kierunkach, średnia prędkość fali P zmierzona pro-

stopadle do uwarstwienia wyniosła $V_{p\downarrow} = 2591$ m/s, a równolegle $V_{p\rightarrow} = 2543$ m/s, średnia prędkość fali S była równa odpowiednio: $V_{s\downarrow} = 1460$ m/s, a $V_{s\rightarrow} = 1507$ m/s. Na podstawie powyższego wyniku trudno jednoznacznie określić wpływ kierunku badań na wartości prędkości. Można jedynie zauważyć niewielki spadek prędkości fali P oraz wzrost prędkości fali S w kierunku równoległym do uwarstwienia. Stosunek prędkości fal sprężystych V_p/V_s ma natomiast większą wartość dla kierunku prostopadłego do uwarstwienia. Na pięciu próbkach możliwe było przeanalizowanie anizotropii, ponieważ pochodziły one z tej samej głębokości i były mierzone zarówno prostopadle, jak i równolegle do zalegających warstw przeciętych otworem. Zauważono zmiany wartości prędkości fal sprężystych wraz z kierunkiem pomiaru (tab. 4).

Na podstawie danych z tabeli 4 widać, że wartości prędkości fal sprężystych zmierzone prostopadle do uławicenia są większe niż te mierzone równolegle. Jedynie w przypadku próbki KP-9 100,8 wartość prędkości fali S jest większa dla

Tabela 4

Zestawienie wyników otrzymanych z badania próbek pochodzących z tych samych głębokości i zmierzonych w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach w celu analizy anizotropii

Data set from velocity and elastic moduli measurements on the same depth samples measurements in two perpendicular directions

Symbol	H [m]	Kierunek	V_p [m/s]	V_s [m/s]	V_p/V_s	E [GPa]	ϕ_o	$K_f \cdot 10^{-10}$ [m/s]
KP-3	44,5	↓	2877	1647	1,75	17,39	4,04	0,05
KP-3	44,5	→	2716	1589	1,71	15,63	5,23	0,09
KP-9	26,6	↓	2534	1553	1,63	13,59	–	–
KP-9	26,5	→	2480	1445	1,72	11,96	12,08	0,51
KP-9	100,8	↓	2841	1571	1,81	15,27	8,15	1,54
KP-9	100,8	→	2741	1666	1,65	16,31	8,01	0,213
KP-9	102,2	↓	2829	1616	1,75	16,03	7,47	0,35
KP-9	102,4	→	2668	1516	1,76	13,88	8,65	0,03
KP-9	116,5	↓	2922	1658	1,76	17,63	4,15	0,08
KII-9	116,5	→	2850	1602	1,78	16,73	4,05	0,04

pomiaru równoległego do uławicenia. Można zatem stwierdzić, że szczeliny w ośrodku skalnym są ułożone zgodnie z uwarstwieniem.

PODSUMOWANIE

Wykazano, że zmierzone na próbkach skał prędkość podłużnych fal sprężystych oraz gęstość objętościowa mogą być przydatne do celów hydrogeologicznych, przede wszystkim do oceny porowatości ogólnej, na podstawie której można szacować potencjał zbiornikowy skał budujących poziomy wodonośne.

Pomiary laboratoryjne i obliczenia parametrów wykonano na próbkach wyciętych z rdzeni wiertniczych z otworów hydrogeologicznych i poszukiwawczych pochodzących z rejonów: Olkusza, Krakowa i Klucz. Badania przeprowadzono na utworach węglanowych, głównie wapieniach, z udziałem dolomitów i margli wieku górnjurajskiego i dewońskiego, płytko leżących pod powierzchnią Ziemi.

Wyznaczono wartości prędkości fal sprężystych P i S z użyciem aparatury ULT-100 P&S Ultrasonic Velocity Measurement oraz obliczono dynamiczne moduły sprężystości. Pomiary okazały się powtarzalne, a wyznaczone prędkości oraz wartości modułów mieściły się w granicach wskazanych przez wielu autorów.

Prędkości fal sprężystych zależą od wielu czynników, a zatem ich znajomość umożliwia poszerzenie informacji na temat badanego ośrodka geologicznego. Dodatkowe informacje można otrzymać dzięki analizie relacji między prędkościami a innymi parametrami petrofizycznymi. Znajomość porowatości otwartej, obliczonej w badaniach hydrogeologicznych, w połączeniu z pomierzonymi wartościami prędkości fali podłużnej P oraz gęstości objętościowej była podstawą wyznaczenia prędkości i gęstości w szkielecie skał. Wartości szkieletowe posłużyły do wyliczenia porowatości ogólnej poszczególnych próbek skalnych. Precyzyjna informacja litologiczna zdecydowanie przyczyniłaby się do podniesienia dokładności uzyskanych wyników, przede wszystkim przy doborze indywidualnych parametrów szkieletowych poszczególnych próbek.

Na podstawie korelacji między różnorodnymi parametrami stwierdzono pewne niedoskonałości metodyczne, np. niewielka siła korelacji między porowatością otwartą a współczynnikiem filtracji wskazuje, że jest konieczne udoskonalenie sposobu wyznaczania tych parametrów lub wprowadzenie poprawek. Podobnie, na podstawie stosunkowo niskiej korelacji między porowatością ogólną a gęstością objętościową stwierdzono, że warto zwrócić uwagę na dokładność wyznaczenia obu wielkości. W obu wskazanych przypadkach porównywano wyniki z tej samej grupy, w pierwszym – hydrogeologiczne, w drugim – petrofizyczne, co warto podkreślić, ponieważ porównywanie wielkości pomiarów wykonywanych w zróżnicowanym czasie i odmiennych warunkach daje zwykle większy rozrzut wyników. Wykonanie pomiarów prędkości na świeżych próbkach w pełni nasyconych wodą podniosłoby dokładność obli-

czenia porowatości ogólnej. Mówiąc o niedoskonałościach metodycznych warto także zwrócić uwagę na stosunkowo dużą wartość odchylenia standardowego zbioru porowatości otwartej. Jest to wynik naturalnej zmienności tego parametru w utworach węglanowych, który wskazuje na konieczność pracy na dużych zbiorach danych, żeby obliczane statystyki były wiarygodne.

Wyniki pomiarów prędkości na próbkach wyciętych prostopadle i równoległe do uwarstwienia pozwoliły na wyciągnięcie wniosków odnośnie anizotropii parametrów sprężystych. Na podstawie różnicy wartości prędkości obu typów fal stwierdzono, że warto zwrócić uwagę na ten parametr także w skałach węglanowych, ponieważ na podstawie zmienności kierunkowej można wnioskować o przebiegu szczelin.

Przeprowadzona analiza i interpretacja parametrów petrofizycznych pochodzących z badań hydrogeologicznych oraz pomierzonych wartości prędkości fal sprężystych i dynamicznych modułów sprężystości pozwala stwierdzić, że połączone wyniki poszerzają i uzupełniają wiedzę na temat właściwości zbiornikowych badanych skał.

Przedstawione wyniki pochodziły ze stosunkowo płytko położonych formacji wodonośnych, z których dostępne były próbki. Omówiona metodyka może być wykorzystana także w głębszych formacjach na podstawie wyników profilowań geofizyki otworowej, m.in. akustycznego i gęstościowego. Profilowania geofizyczne dostarczają podobne parametry, co badania laboratoryjne na próbkach. Informacja ta wydaje się ważna w chwili, gdy wody pitnej szuka się coraz głębiej, a profilowania geofizyki otworowej dostarczają w sposób ciągły parametrów mierzonych z dużą dokładnością. Kompleksowa interpretacja zestawu profilowań geofizyki otworowej umożliwia rozwiązanie litologiczne w postaci wyznaczonego składu mineralnego, co zdecydowanie ułatwia dobór parametrów szkieletowych do obliczeń prowadzonych na podstawie pojedynczych pomiarów oraz dostarcza także porowatość ogólną.

LITERATURA

- CATS, 1994–2004 – Ultrasonics 1.95. User's Guide and Reference. Geotechnical Consulting & Testing Systems, United States.
- CHOQUETTE P.W., PRAY L.C., 1970 – Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.*, **54**, 2: 207–250.
- BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 1999 – Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik. Główny Urząd Miar, Warszawa.
- JARZYNA J., BAŁA M., ZORSKI T., 1999 – Metody geofizyki otworowej: pomiary i interpretacja. Wydaw. Nauk.-Dydakt. AGH, Kraków.
- JUŠKO K., MOTYKA J., POSTAWA A., 2015 – Porowatość macrycy wapieni i margli jury górnej w rejonie Olkusza. *Prz. Geol.*, **63**, 10–1: 801–804.
- MOTYKA J., WILK Z., 1976 – Pionowe zróżnicowanie wodopruszczalności węglanowych skał triasowych w świetle statystycznej analizy wyników próbnych pompowań (monoklina śląsko-krakowska). *Kwart. Geol.*, **20**, 2: 381–399.

- MOTYKA J., 1998 – A conceptual model of hydraulic networks in carbonate rocks, illustrated by examples from Poland. *Hydrogeol. J.*, **6**, 4: 469–482.
- MOTYKA J., PULDO-BOSCH A., BORCZAK S., GISBERT J., 1998 – Matrix hydrogeological properties of Devonian carbonate rocks of Olkusz (Southern Poland). *J. Hydrol.*, **211**: 140–150.
- OGÓREK E., 2017 – Pomiar prędkości fal sprężystych na wybranych próbkach skał i interpretacja wyników w połączeniu z innymi parametrami petrofizycznymi. Bibl. WGGiOŚ AGH, Kraków [pr. magister.].
- PLEWA M., PLEWA S., 1992 – Petrofizyka. Wydaw. Geol., Warszawa.
- SCHÖN J., 2015 – Physical properties of rocks. Fundamentals and principles of petrophysics. Second edition. Elsevier, Austria.
- STAŚKO S., 1992 – Wody podziemne w węglanowych utworach triasu opolskiego. *Pr. Geol.-Miner. UW*, **32**: 1–74.
- TIAB D., DONALDSON E., 1996 – Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rocks and Fluid Transport Properties. Gulf Publishing Company, Houston, Texas.
- WILK Z., MOTYKA J., BORCZAK S., MAKOWSKI Z., 1985 – Własności mikrohydrauliczne utworów wapienia muszlowego i retu południowej części Monokliny Śląsko-Krakowskiej. *Ann. Soc. Geol. Pol.*, **55**, 3/4: 485–508.
- WYLLIE M.R., GREGORY R.J., GARDNER H.F., 1956 – Elastic waves velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics*, **21**, 1: 41–70.
- ŻUREK A., CZOP M., MOTYKA J., 2010 – Azotany w wodach jurajskiego piętrowa wodonośnego w rejonie Olkusza. *Geol. AGH*, **36**, 1: 109–134.

SUMMARY

The goal of paper was to show that elastic waves velocities and bulk density measurements from rock plug samples are credible sources of hydrogeological information. Porosity is shown to be the basis for estimating reservoir potential of aquifers. Laboratory measurements were made on rock samples cut from cores available in hydrogeological and prospecting boreholes in Olkusz, Kraków and Klucze regions. The rock samples consisted of the Upper Jurassic and Devonian carbonates, mainly limestones with dolomites and marls from relatively shallow aquifers.

ULT-100 P&S Ultrasonic Velocity Measurement equipment was used for P- and S-wave velocities measurements, which were the basis for dynamic elastic moduli calculations. Measurements were repeatable and the lab measured bulk density, P- and S-waves velocities and dynamic elastic moduli were in the same ranges as presented by other authors.

Velocities of elastic waves depend on variety of parameters. Additional information can be also obtained by studying the relationship between these velocities and petrophysical parameters. Porosity from hydrogeological measurements when compared with measured P wave velocity and bulk density formed the basis for determining skeletal/matrix values. Results may have been more accurate by having precise information on the lithology of the rock plugs in the study. Also, velocity measurements on fresh rock plugs fully saturated with formation water may have provided better results for porosity calculations.

The correlations between different parameters revealed lessons learned. For instance a low correlation score between open porosity and hydraulic conductivity pointed out the necessity of improved measurements. Similarly, low correlation between total porosity and bulk density showed that attention should be paid to improved accuracy in laboratory measurements. Another lesson learned is that it is important to compare results in similar time-frame groups of data. This means that hydrogeological and petrophysical data should be obtained just after getting cores from boreholes. Bigger data scattering is observed in relationships between quantities measured in different time. Porosity shows large ranges in standard deviation as a result of natural variability of this parameter in carbonates. It is recommended to work on big data sets to assure higher credibility of results.

Velocity measurements on rock plugs cut horizontally and vertically from cores showed anisotropy of the elastic properties in carbonates. Fracturing in rock formations can be recognized on the basis of these differences between velocities measured in two perpendicular directions.

Results presented in this paper were from rock samples available from the relatively shallow aquifers. The presented methodology should also be applicable in deep formations using well logging results instead of laboratory measurements. Sonic and density logs could provide continuous data of bulk density and elastic waves velocities the same as laboratory results. Lithological interpretation of well logs provides the porosity solution that is the basis for prospecting for potable water in deeper and deeper formations.

