

WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE MASYWÓW KRystalicznych W ŚWIELE BADAŃ REZONANSEM MAGNETYCZNYM NA PRZYKŁADZIE OKOLIC PIŁAWY GÓRNEJ

THE HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF CRYSTALLINE MASSIFS IN THE LIGHT OF MAGNETIC RESONANCE RESEARCH ON THE EXAMPLE OF THE PIŁAWA GÓRNA REGION

TOMASZ OLICHWER¹, ROBERT TARKA¹

Abstrakt. Jedną z metod geofizycznych, pozwalających wskazać lub wykluczyć występowanie uprzywilejowanych stref przepływu wód podziemnych do 50 m p.p.t. jest sondowanie rezonansem magnetycznym (MRS). Do charakterystyki hydrogeologicznej masywów skał krystalicznych wybrano obszar złoża z czynnym wyrobiskiem górniczym w okolicy Piławy Górnej (blok przedsudecki). Do charakterystyki hydrogeologicznej masywów skał krystalicznych reprezentowanych przez gnejsy i amfibolity wybrano obszar złoża z czynnym wyrobiskiem górniczym. Wyniki obu sondowań wskazują na bardzo słabe zawodnienie strefy zwietrzliny i masywu skalnego lub brak zawodnienia. Pokrywa zwietrzelinowa ma miąższość ok. 4 m, zawartość wody w tej strefie wynosi zaledwie 6–7%, przy współczynniku filtracji k równym 2×10^{-6} m/s, co zalicza ten rodzaj zwietrzelin do skał słabo przepuszczalnych. Poniżej głębokości 4 m pojawia się spękaniny masyw skalny, który również charakteryzuje się bardzo słabym zawodnieniem o średniej zawartości wody w skale na poziomie 4%, o współczynniku filtracji szczelinowej 10^{-6} m/s i wodoprzewodności T o wartości 10^{-5} m²/s. Współczynnik filtracji szczelinowej na głębokości 30–40 m wzrasta, osiągając 10^{-4} – 10^{-5} m/s. Jest również widoczny wzrost wodoprzewodności do poziomu 10^{-3} m²/s. Podwyższone wartości wymienionych parametrów są związane z występowaniem lokalnych zawodnień w spękanym masywie skalnym, które są widoczne m.in. w odsłonięciach na terenie kamieniołomu. Wyniki badań MRS zostały potwierdzone przez badania hydrogeologiczne przeprowadzone w otworach geologicznych odwierconych na terenie złoża.

Słowa kluczowe: rezonans magnetyczny, skały krystaliczne, blok przedsudecki, hydrogeologia, geofizyka.

Abstract. Among the geophysical methods that allow indicating or excluding the occurrence of the privileged zones of groundwater flow down to 50 m b.g.l. is magnetic resonance sounding (MRS). Two soundings were carried out approximately 1.5 km north of the village of Piława Górna (Fore-Sudetic Block). The area of active quarry was selected for hydrogeological characteristics of the crystalline rocks massifs represented by metamorphic rocks such as gneisses and amphiboles. Both series of profiling are suggestive of either very low water content in the weathering cover and the rock massif or a complete lack of it. The weathering cover is approximately 4 metres thick, its water content does not exceed 6–7%, and the hydraulic conductivity k equals 2×10^{-6} m/s. This type of rock waste can therefore be classified as low-permeable. At depths greater than 4 metres, the rock massif is cracked, and shows a very low water content (4%), hydraulic conductivity of 10^{-6} m/s, and transmissivity T equalling 10^{-5} m²/s. The hydraulic conductivity increases up to 10^{-4} – 10^{-5} m/s at depths of 30–40 metres. Research has shown a simultaneous increase in the transmissivity to 10^{-3} m²/s. The increase in these parameters is associated with the presence of a small local water inflow within the cracked rock massif, which is visible among others in the exposures of the nearby quarry. The MRS results were confirmed by hydrogeological investigations of boreholes drilled within the quarry.

Key words: magnetic resonance, crystalline rocks, Fore-Sudetic block, hydrogeology, geophysics.

¹ Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych, pl. M. Borna 9, 50-204 Wrocław; e-mail: tomasz.olichwer@uwr.edu.pl.

WSTĘP

W badaniach hydrogeologicznych skały krystaliczne są reprezentowane przez większość skał magmowych i metamorficznych, tworząc szczelinowy ośrodek przepływu wód podziemnych. Wyjątkiem są przeobrażone skały węglanowe (wapienie krystaliczne, marmury, erlany), stanowiące ośrodek o charakterze szczelinowo-krasowym. Cechą skał krystalicznych jest brak występowania w nich klasycznej warstwy wodonośnej, która jest zastępowana strefą wodonośną w miejscach zwiększonego spękania skał. W efekcie tworzą się uprzywilejowane strefy przepływu wód podziemnych. Na spękanych skałach krystalicznych, w wyniku wietrzenia rozwijają się pokrywy rumoszowe i zwietrzelinowe, będące dodatkowym kolektorem wód podziemnych. W tak wykształconym środowisku hydrogeologicznym większość odpływu wód podziemnych odbywa się płytką (kilkadziesiąt metrów) strefą aktywnej wymiany wód. Z kolei krążenie głębsze może osiągać kilkusetmetrowe głębokości (Staśko, Tarka, 2002).

Wielkość zawodnienia skał krystalicznych jest uzależniona od szczelinowatości. Badania hydrogeologiczne (Staśko, 1996) wykazały, że granity, gnejsy, łupki metamorficzne można na ogół zaliczyć do skał o średnich i niskich wartościach wodoprzewodności. Efektem jest uzyskiwanie niewielkich wydajności ze studni. Z drugiej strony dzięki występowaniu uprzywilejowanych stref przepływu wód, skały krystaliczne są uważane za zasobny zbiornik wód podziemnych o dobrych parametrach hydrogeologicznych (Staśko, 2002; Staśko, Tarka, 2010).

Jedną z grup metod badawczych, pozwalających wskazać lub wykluczyć występowanie uprzywilejowanych stref

przepływu wód podziemnych w skałach krystalicznych, są metody geofizyczne. Jedną z nowszych propozycji, jest wykorzystanie rezonansu magnetycznego, pozwalającego scharakteryzować środowisko wodne do głębokości kilkudziesięciu metrów.

Do obecnej chwili nie były publikowane prace opisujące warunki hydrogeologiczne na terenie Polski dzięki zastosowaniu metody sondowania rezonansem magnetycznym (MRS). Wyniki badań prowadzonych przez autorów, są pierwszą syntezą możliwości zastosowania MRS w aspekcie poznania warunków hydrogeologicznych. W literaturze światowej użycie rezonansu magnetycznego pojawia się przede wszystkim w kontekście uzupełnienia informacji hydrogeologicznych pochodzących z innych źródeł, jakimi są np. próbne pompowanie, badania elektrooporowe, dane geologiczne z otworów wiertniczych (Plata, Rubio, 2008; Descloitres i in., 2008; Boucher i in., 2009; Chalikakis i in., 2009). Światowe badania prowadzone od początków XXI w. podkreślają konieczność procesu kalibrowania wyników MRS z wartościami parametrów hydrogeologicznych pochodzących z innych źródeł (Lachassagne i in., 2005). W literaturze zwrócono uwagę na zalety i ograniczenia badań MRS i wynikające z tego błędy. Metodyka pomiaru zakłada zastosowanie tej metody tylko w przypadku małych szumów elektromagnetycznych pochodzenia naturalnego, czy też sztucznego. W przypadku zaistnienia niedogodnych warunków pomiarowych oczekiwania wobec metody mogą ograniczać się jedynie do oszacowania głębokości i miąższości warstwy o największym zawodnieniu, bez dokładnej charakterystyki liczbowej.

OBSZAR BADAŃ

Obszar badań zlokalizowano w środkowej części bloku przedsudeckiego ok. 1,5 km na północ od Piławy Górnej (fig. 1). Badania przeprowadzono na terenie złoża, w bezpośrednim sąsiedztwie czynnego kamieniołomu skał metamorficznych (migmatyty, amfibolity). Teren ten jest położony w obrębie przedsudeckiego fragmentu bloku sowiogórskiego, który jest zbudowany głównie ze zróżnicowanych skał metamorficznych: migmatytów i gnejsów oraz fragmentów skał amfibolitowych (Cymerman, Walczak-Augustyniak, 1986). Nad skałami litymi zalegają migmatyty i amfibolity zwietrzałe. Pokryte są one utworami czwartorzędowymi, wykształconymi w postaci gleby, gliny oraz piasku słabo gliniastego z rumoszem skalnym. Miąższość nadkładu wynosi od 2,0 do 12,8 m, średnio 5,3 m.

W okolicach Piławy Górnej wody podziemne są związane z utworami proterozoicznymi i podrzędnie czwartorzędowymi. Na północ od Piławy Górnej, w rejonie badań oraz dalej na północ brak jest użytkowego poziomu wodonośnego (Kiełczawa, 2000). Płytkie wody podziemne są związane w głównej mierze z pokrywą utworów zwietrzelinowych. Na

obszarach zbudowanych ze skał krystalicznych można wyróżnić trzy strefy determinujące wielkość i tempo wymiany wody z powierzchni terenu do atmosfery i do warstw wodonośnych. Bezpośrednio przy powierzchni terenu występuje strefa I – gliniasto-rumoszowa. W profilu tej strefy wyróżnia się gleby z domieszką frakcji piaskowej, gliny piaszczyste i gliny pylasto-piaszczyste. Występująca poniżej strefa blokowo-rumoszowa II to strefa gęsto spękanych luźnych bloków skały macierzystej, o różnej wielkości, od kilku do kilkudziesięciu centymetrów, wypełnionych drobniejszym materiałem piaszczystym i gliniastym. Strefa III to skały lite poddane słabym spękanom wietrzeniowym, odprężeniowym i tektonicznym. Poniżej znajduje się masywna skała macierzysta o rzadkich spękaniach.

Na większości obszaru bloku sowiogórskiego strefy I i II charakteryzują się dużą pojemnością wodną i mają istotne znaczenie w zasilaniu większości źródeł oraz płytkich ujęć wód podziemnych. Jednak na obszarze sondowań MRS i w bezpośredniej okolicy w strefach I i II brak jest wody wolnej i nie występują w nich większe strefy zawodnienia.

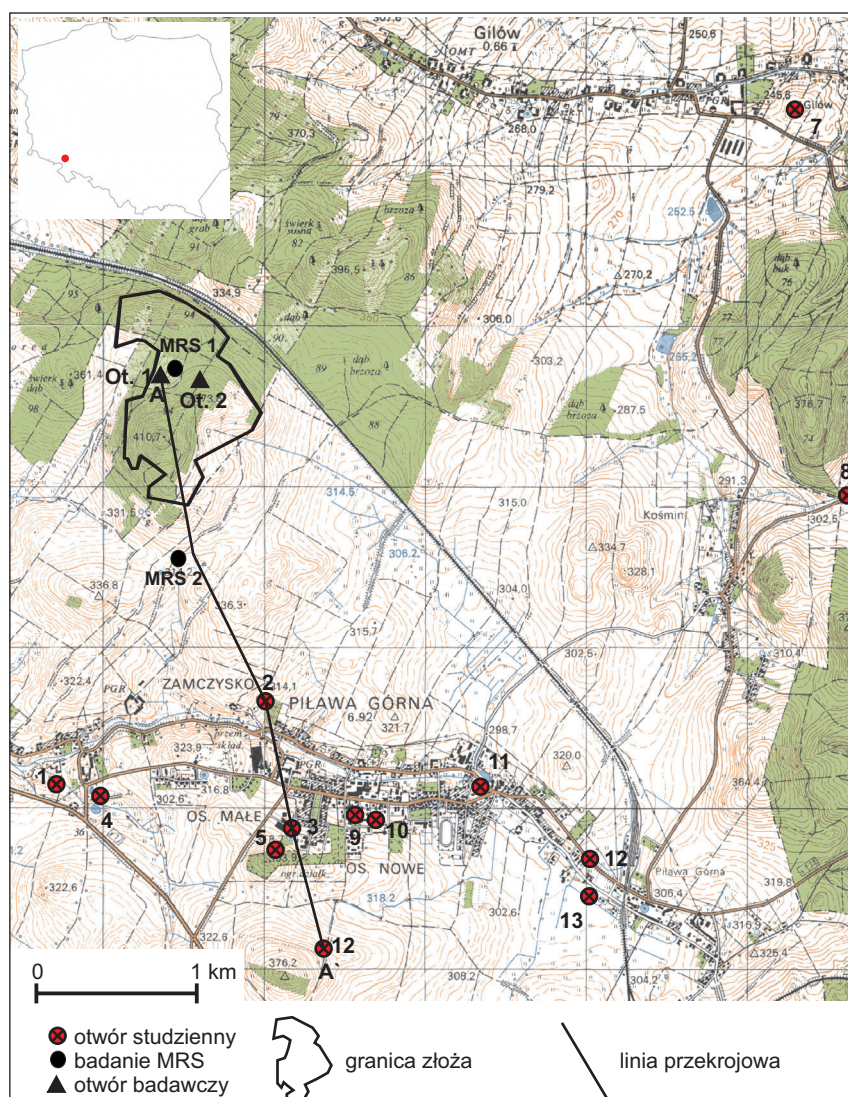


Fig. 1. Lokalizacja obszaru badań

Location of the study area

W samym miejscu badań hydrogeologicznych strefy te charakteryzują się mniejszą pojemnością wodną. Potwierdzają to wykonane otwory wiertnicze na obszarze czynnego kamieniołomu w pobliżu sondowań. Wodę podziemną w najbliższym sąsiedztwie wyrobiska napotkano dopiero na głębokości kilkunastu metrów (Ot. 1). Strefy I i II odgrywają, więc na tym obszarze jedynie rolę przekaźnika wód do strefy III.

Woda w strefie III występuje w strefach rozluźnień tektonicznych masywu skalnego. Na ścianach kamieniołomu obrazują się jako miejsca zawilgocenia ścian wyrobisk. Dopływy z tych stref nie stanowią problemu podczas funkcjono-

wania kopalni. Na terenie wyrobiska nie prowadzi się prac odwodnieniowych.

Niską wodonośność skał w najbliższej okolicy potwierdza również analiza ujęć wód podziemnych. Wydajność jednostkowa studni zawiera się w przedziale 0,07–0,06 m³/h·m. Jedynie w dwóch przypadkach, w studni zlokalizowanej na strefie dyslokacyjnej o głębokości otworu 70 i 103 m, uzyskano wysokie wydajności odpowiednio 43,5 i 67,0 m³/h przy depresji ponad 30 m. Do głębokości 120 m nie stwierdzono statystycznie istotnych zmian wodoprzewodności, która wynosiła średnio $T=7 \times 10^{-5}$ m²/s (Staśko, Tarka, 1995).

METODY BADAŃ

W badaniach terenowych zastosowano przyrząd Numis Lite firmy Iris (prod. francuskiej). Zastosowana tu metoda rezonansu magnetycznego pozwala rozpoznać środowisko

występowania wód podziemnych do głębokości 50–60 m. MRS jest bardzo przydatna jako uzupełnienie tradycyjnych metod geofizycznych czy wiertniczych i jest to nieinwazyjna

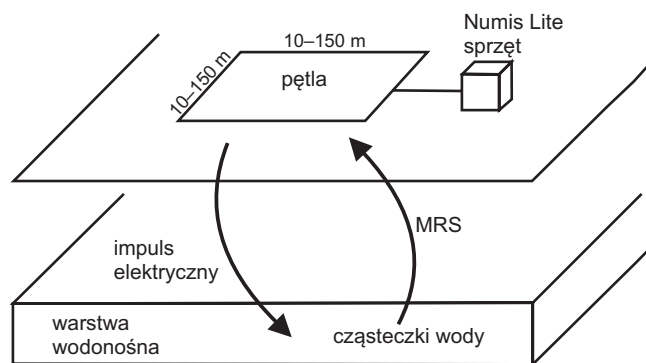


Fig. 2. Schemat działania MRS

Principle of the magnetic resonance method

metoda pozwalająca bezpośrednio zbadać zbiornik wód z powierzchni terenu (Legchenko, Valla, 2002; Roy, Lubczyński, 2003; Lubczyński, Roy, 2004; Legchenko i in., 2004).

Rezonans magnetyczny, na potrzeby badania środowiska wody podziemnej, wzbudza protony wodoru zawarte w cząsteczce wody, które są aktywowane w celu zidentyfikowania i scharakteryzowania warstwy wodonośnej. Atomy wodoru cząsteczek wody znajdujące się w gruncie są pobudzone przez prąd, wysyłający impulsy o właściwej częstotliwości (ok. 2000 Hz) z pętli rozłożonej na powierzchni terenu, zasilanej przez akumulatory. Atomy wodoru wytwarzają pole magnetyczne, które jest z powrotem mierzone i analizowane

dla różnych momentów wzbudzeń impulsów (iloczyn = czas trwania \times intensywność). Impuls prądu o danej częstotliwości jest transmitowany do pętli. Następnie wraca sygnał wytworzony przez protony wody zawartej w środowisku i jest mierzony w granicach tej samej pętli (fig. 2).

Do interpretacji należy wziąć pod uwagę trzy pola magnetyczne:

- pole magnetyczne Ziemi, którą określa precesja częstotliwości protonów wodoru: $f(\text{Hz}) = 0,04258 \text{ B(nT)}$;
- pole magnetyczne pobudzenia wytworzone przez prąd przepływający do pętli leżącej na powierzchni gruntu (średnia powierzchnia sondowania $625\text{--}3600 \text{ m}^2$);
- pole magnetyczne wytworzone jako sygnał powrotny od protonów wodoru, po tym jak zostały wzbudzone przez pole magnetyczne wytworzone w granicach pętli.

Interpretacja pomiarów pozwala ocenić zawartość wody w skale, przepuszczalność ośrodka skalnego reprezentowaną przez współczynnik filtracji (k) oraz wodoprzewodność (T). Ponadto możemy poznać głębokości zalegania warstw zawodnionych i ich miąższości (Lubczyński, Roy, 2003, 2004, 2005; Vouillamoz i in., 2005). Te parametry są użyteczne by określić perspektywiczne miejsca do gromadzenia się wód podziemnych.

W trakcie badań terenowych wykonano dwa pomiary (tab. 1) za pomocą przyrządu Numis Lite (fig. 3). W obu przypadkach powierzchnia badań wyniosła 3600 m^2 (kwadrat o boku 60 m). Głębokość penetracji wyniosła 50 m.

WYNIKI BADAŃ MRS

Efektom sondowań MRS są graficzne wykresy prezentujące zawartość wody na różnych głębokościach, współczynników filtracji k oraz wodoprzewodności T (fig. 4). Wyniki wskazują na bardzo słabe zawodnienie strefy zwietrzliny i masywu skalnego lub brak zawodnienia. W obu przypadkach badania pokazują, że pokrywa zwietrzelinowa ma miąższość ok. 4 m. Zawartość wody w tej strefie wynosi zaledwie 6–7 %, przy współczynniku filtracji równym $2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, co zalicza ten rodzaj zwietrzelin do skał słabo przepuszczalnych. Notuje się również niewielkie wartości wodoprzewodności na poziomie $10^{-6}\text{--}10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Poniżej głębokości 4 m pojawia się spękany masyw skalny, który również charakteryzuje się bardzo słabym zawodnieniem o średniej zawartości wody w skale na poziomie

4%, o współczynniku filtracji szczelinowej 10^{-6} m/s (skały słabo przepuszczalne) i wodoprzewodności o wartości $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Wyjątkiem od tych wartości są strefy na głębokości ok. 40 m (315 m n.p.m.) (pomiar 1) oraz strefy na głębokości 30 m (292 m n.p.m.) (pomiar 2), gdzie notuje się zwiększoną wartość współczynnika filtracji szczelinowej ($10^{-4}\text{--}10^{-5} \text{ m/s}$). Widoczny jest również wzrost wodoprzewodności do poziomu $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Podwyższone wartości wyżej wymienionych parametrów są związane z występowaniem lokalnych zawodnień w spękanym masywie skalnym, które są widoczne m.in. w odsłonięciach na terenie kamieniołomu, znajdującego się kilkaset metrów od miejsca sondowań MRS.

Tabela 1

Lokalizacja pomiarów MRS

Location of MRS measurements

Nr pomiaru	Rzędna pomiaru	Współrzędne		Uwagi
		x	y	
MRS 1	355 m n.p.m.	16°44.117	50°42.417	pomiar w lesie 50 m na N od kamieniołomu, 50 m od Ot. 1
MRS 2	322 m n.p.m.	16°44.130	50°41.719	pomiar na łące 700 m na S od kamieniołomu, 900 m na S od Ot. 2

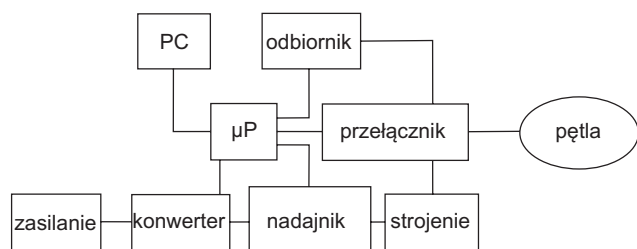


Fig. 3. Konfiguracja zestawu Numis Lite

NUMIS LITE schematic diagram

Na podstawie dostępnych informacji geologicznych i hydrogeologicznych z otworów studziennych zlokalizowanych w najbliższej okolicy granic złoża wynika, że zawodnionych stref można się spodziewać na głębokościach od 4 m w strefach dolnych do ponad 40 m na wyniesieniach cokołu krystalicznego (fig. 5). Ponadto na podstawie wstępnego kartowania hydrogeologicznego okolic złoża, analizując rzędne położenia źródeł można zauważyć, że dominującym przedziałem wysokościowym jest 310–325 m n.p.m., gdzie skupia się większość naturalnych wypływów wody podziemnej. Ten zakres wysokościowy koresponduje z rzędnymi zawodnieniami masywu skalnego na terenie kopalni.

PORÓWNANIE WYNIKÓW BADAŃ MRS Z TRADYCYJNYMI BADAŃMI HYDROGEOLOGICZNYMI

Badania z zastosowaniem rezonansu magnetycznego wskazują na słabe zawodnienie masywu skał krystalicznych reprezentowanych przez gnejsy i migmatyty. Ze względu na brak wykrycia uprzywilejowanych dróg przepływu wód podziemnych, badany obszar należy zaliczyć do terenów o małej zasobności wodnej.

Potwierdzeniem poprawności otrzymanych wyników z badań geofizycznych, wskazujących na bardzo słabe zawodnienie strefy zwietrzliny i masywu skalnego była analiza dwóch otworów geologicznych Ot. 1 i Ot. 2 (fig. 1), wykonanych na terenie złoża w odległościach 50–70 m od czynnego wyrobiska.

Pierwszy z otworów odwiercono do głębokości 65 m. W profilu wiercenia dało się obserwować szereg stref rozluźnień. Podczas wiercenia woda pojawiła się na głębokości 14 m. Po wykonaniu otworu woda ustabilizowała się na głębokości 4,8 m. W otworze tym przeprowadzono próbne pompowanie. Podczas pompowania z wydajnością 0,19 m³/h uzyskano depresję 0,7 m. Dało to wydajność jednostkową 0,27 m³/h·m. Po zakończeniu pompowania rozpoczęto obserwację powrotu zwierciadła wody, które posłużyły do oce-

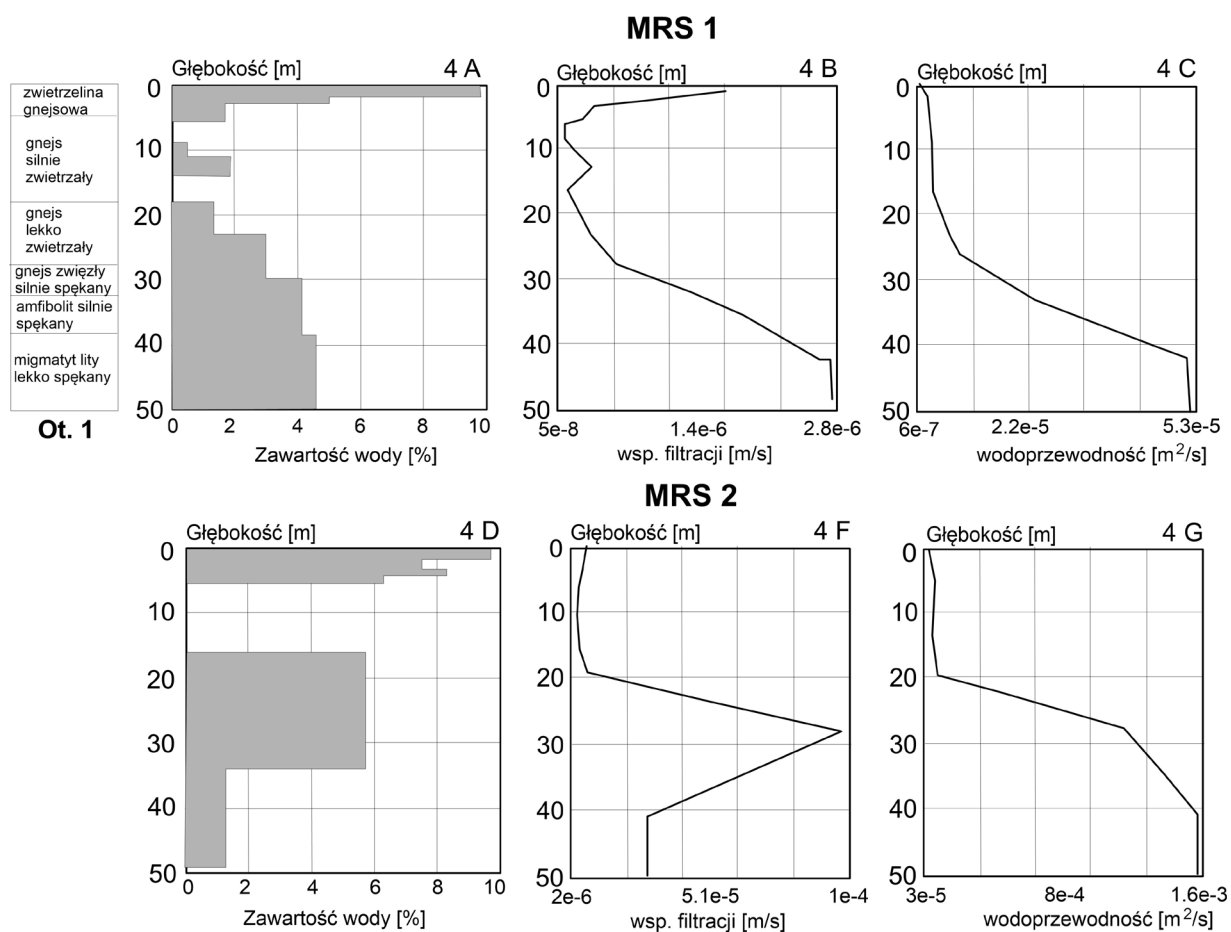


Fig. 4. Wyniki pomiarów MRS

Results of MRS measurements

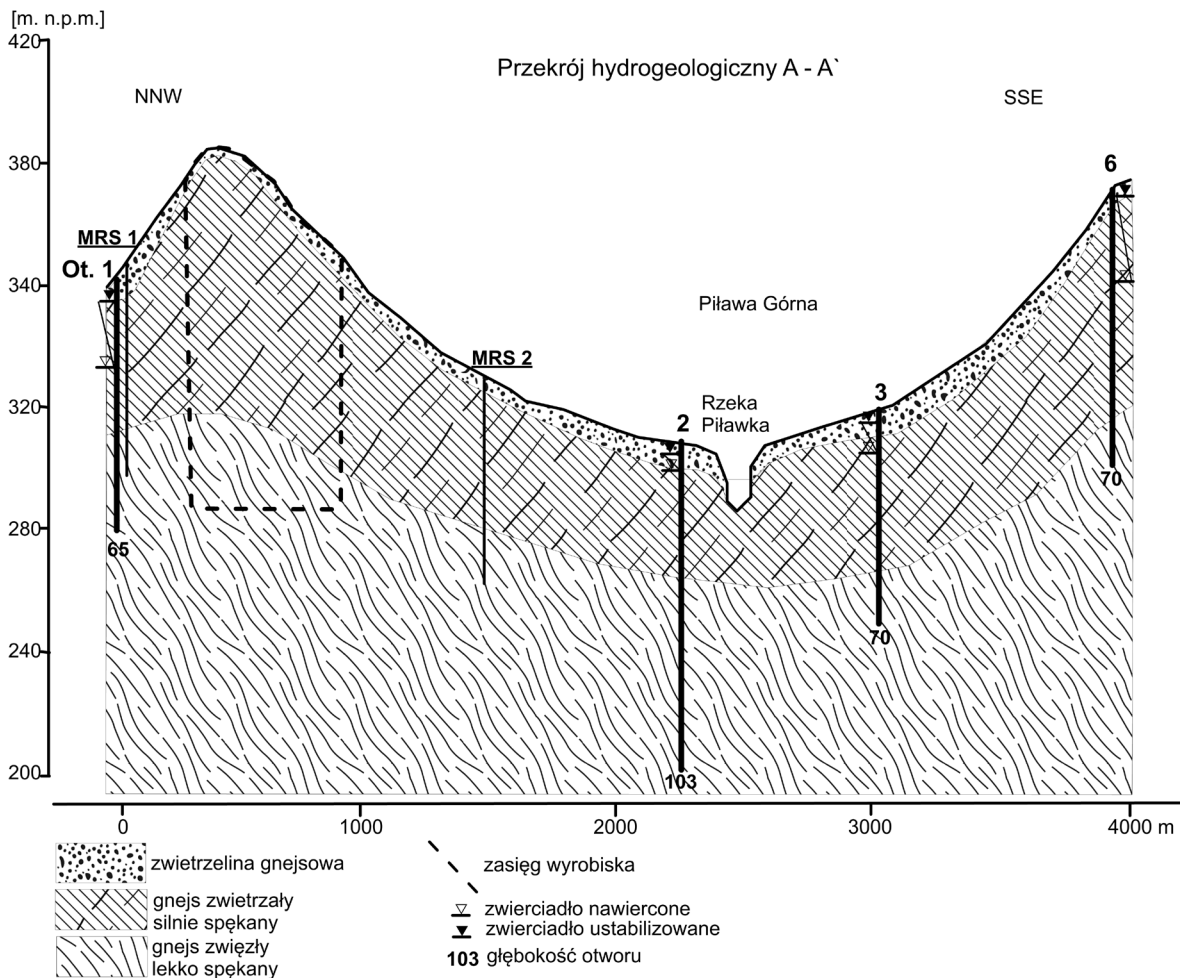


Fig. 5. Przekrój hydrogeologiczny A-A'

Hydrogeological cross-section A-A'

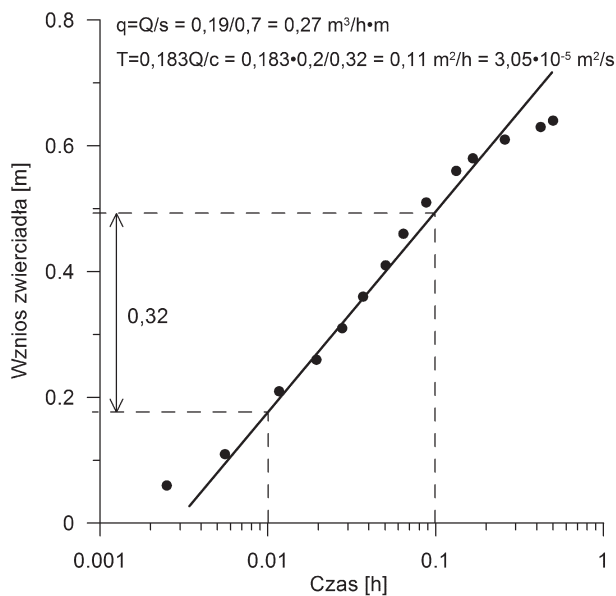


Fig. 6. Wznios zwierciadła wody podziemnej w otworze nr 1

q – wydajność jednostkowa, Q – wydajność studni, s – depresja studni, T – wodoprzewodność

The rise of groundwater table in borehole No. 1

q – specific discharge, Q – well discharge, s – well drawdown, T – transmissivity

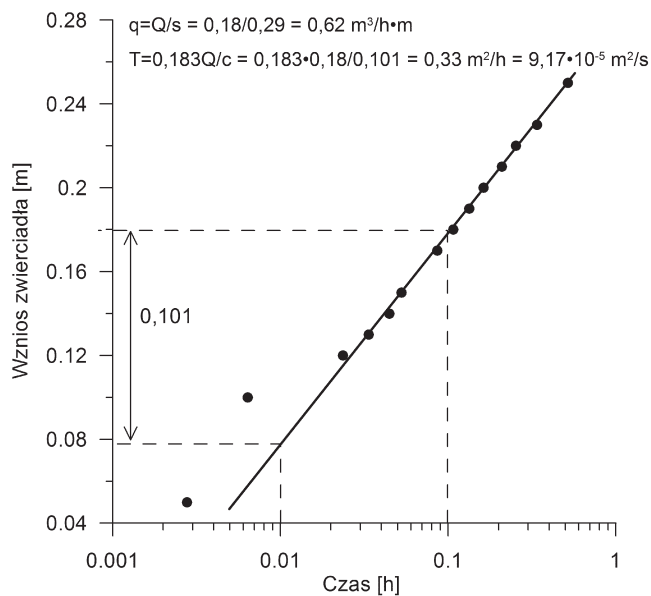


Fig. 7. Wznios zwierciadła wody podziemnej w otworze nr 2

The rise of groundwater table in borehole No. 2

Tabela 2

Podstawowe dane o otworach studziennych z okolicy obszaru badań

Characteristics of wells located around the research area

Nr	Lokalizacja	Rzędna	Strop/Spąg [m]	Głęb. zw. wody [m]	Wydajność [m ³ /h]	Depresja [m]	Wsp. filtr. [m/d]	Przewodność [m ² /d]
1	Piława Górna wodociąg	293,4	20,0/>51,0	-0,1	7,1	28,0	0,3	
2	Piława Górna Dom Dziecka	301,9	15,0/>40,0	0,8	3,3	20,6	0,2	
3	Piława Górna Zakład Wychowawczy	320,0	13,5/>45,0	13,5	3,1	15,0	0,1	
4	Piława Górna wodociąg	289,2	25,0/>60,0	-0,1	6,2	33,3	0,3	
5	Piława Górna szkoła	330,0	13,1/>20,5	5,7	2,5	5,3		
6	Piława Górna szkoła	340,0	13,2/>19,2	6,6	0,5	9,0	0,3	
7	Gilów wodociąg	247,5	43,0/70,0	4,1	8,5	16,5	3,8	104
8	Košmin kamieniołom	290,8	4,2/>40,0		0,8	19,1		
9	Piława Górna wodociąg	305,0	23,0/32,2	13,8	2,6	8,6	38,6	359
10	Piława Górna wodociąg	303,6	19,0/24,5		1,8	8,1	0,9	5
11	Piława Gr. Zak. Przem. Jedwabniczego	298,4	8,0/>103,0	0,4	67,8	30,3	1,3	
12	Piława Górna wodociąg	301,8	32,0/>70,0	4,0	9,1	31,5	0,3	
13	Piława Górna wodociąg	303,0	32,0/>70,0	0,9	45,3	33,0	1,5	

Numery studni zgodne z figurze 1 / The numbers of wells as in Figure 1

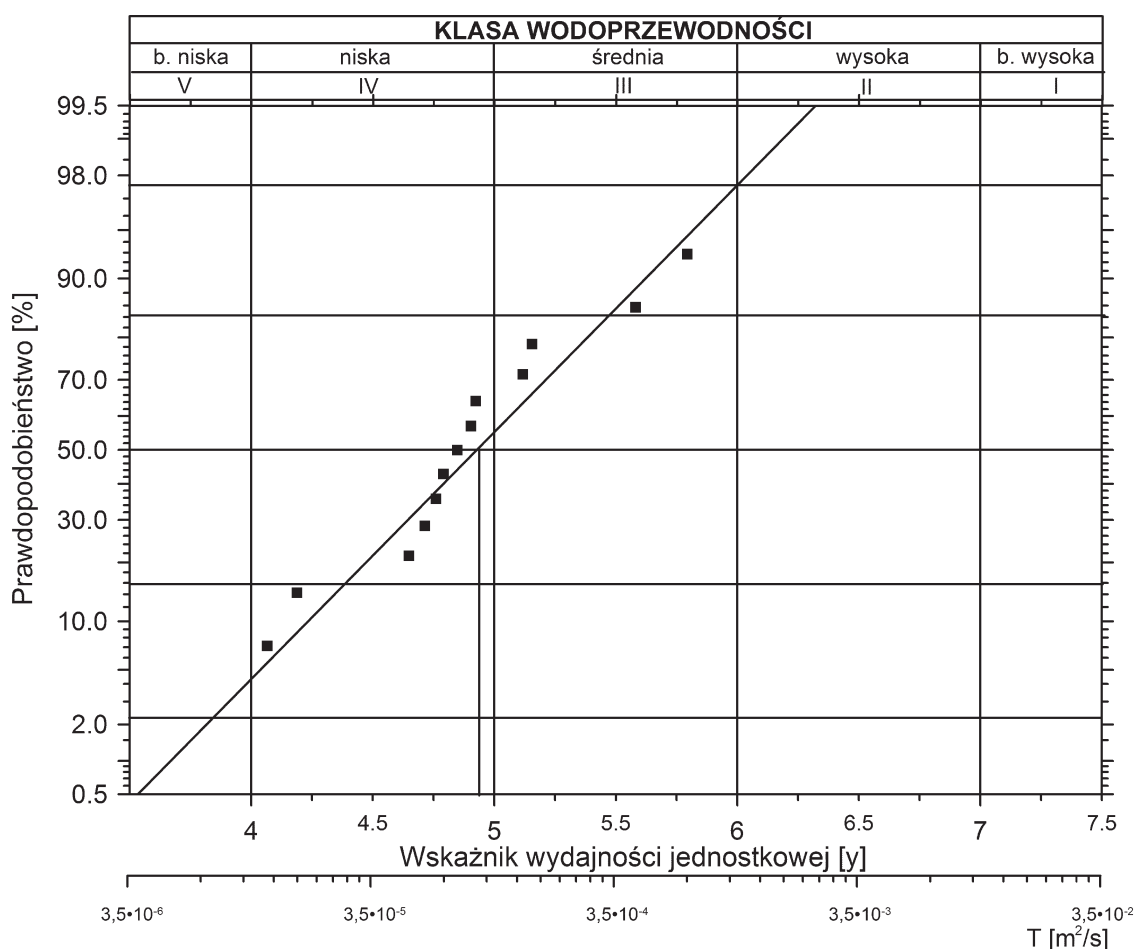


Fig. 8. Klasy wodoprzewodności T ujętych warstw wodonośnych ujęć wód podziemnych z okolicy obszaru badań

The classes of transmissivity of aquifers exploited by groundwater intakes located around the study area

ny wodoprzewodności T (fig. 6). Na podstawie obliczeń uzyskano wartość $T = 0,11 \text{ m}^2/\text{h} = 3,0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

W drugim otworze zwierciadło stabilizowało się na głębokości 12,33 m. W otworze tym przeprowadzono próbne pompowanie. Podczas pompowania z wydajnością $0,18 \text{ m}^3/\text{h}$ uzyskano depresję 0,29 m. Dało to wydajność jednostkową $0,62 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}$. Po zakończeniu pompowania rozpoczęto obserwację powrotu zwierciadła wody (fig. 7) Na podstawie obliczeń uzyskano wartość wodoprzewodności $T = 0,33 \text{ m}^2/\text{h} = 9,2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Ocenę zawodnienia skał krystalicznych dodatkowo przeprowadzono na podstawie analizy wydajności studni ujęciowych. W najbliższej okolicy obszaru badań zebrano dane o otworach, z czego 13 posiadało dane z próbnych pompowań (fig. 1). Przeciętne wartości parametrów hydrogeologicznych (tab. 2), charakteryzujących przepuszczalność środowiska skalnego, korespondują z wartościami otrzymanymi w trakcie badań MRS i próbnych pompowań otworów badawczych.

PODSUMOWANIE

Badania przeprowadzono na terenie złoża, w bezpośrednim sąsiedztwie czynnego kamieniołomu surowców skalnych w okolicy Piławy Górnej. Badania geofizyczne MRS wykazały brak występowania uprzywilejowanych dróg przepływu do głębokości 50 m w obrębie masywu skał krystalicznych. Potwierdzają to również przeprowadzone badania hydrogeologiczne w dwóch otworach geologicznych zlokalizowanych na terenie wyrobiska. W profilu stwierdzano strefy rozluźnień tektonicznych i miejsca zwiększonej gęstości spękań na zmiennych głębokościach. Efektem tego są niewielkie dopływy wody do kopalni, nie wymagające prac odwodnieniowych. Są one związane ze strefami większego spękania masywu skalnego. Na podstawie otworów wykonanych w bezpośrednim sąsiedztwie odkrywki należy stwierdzić, że parametry hydrogeologiczne skał są niskie (wodoprzewodność $T = 3 \times 10^{-5} - 9 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$).

Względnie większe zawodnienie skał jest związane z masywem skalnym lekko zwietrzałym i silnie spękanym, co wykazały badania geofizyczne oraz analiza profili otworów z obszaru wyrobiska. Rejestruje się tam zwiększone

Wydajności jednostkowe studni obliczone na podstawie danych z tabeli 2 zawierają się w przedziale od 0,04 do $2,24 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}$, a wartość średnia wynosi $0,49 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}$. Liczba ta jest zbliżona do wartości uzyskanych podczas pompowania otworów badawczych (Ot. 1 oraz Ot. 2) odwierconych na obszarze złoża. Otwory badawcze były zlokalizowane kilkadziesiąt metrów od konturu wyrobiska górniczego.

Kolejnym elementem potwierdzającym słabe zawodnienie skał obszaru badań oraz odpowiadające temu wyniki MRS jest wykonana analiza rozkładu wskaźnika wydajności jednostkowej y ujętych warstw wodonośnych okolic obszaru badań. Wykorzystano wzór $y = \log_{10} q$, gdzie: q oznacza wydatek jednostkowy studni wyrażony w $\text{l/s}\cdot\text{m}$ (fig. 8). Wyniki analizy wskazują, że skały jako warstwy wodonośne w okolicach obszaru badań charakteryzują się niską wodoprzewodnością w granicach $10^{-4} - 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ oraz należą do środowiska o średniej heterogeniczności.

wartości współczynnika filtracji szczelinowej ($2,8 \times 10^{-6} \text{ m/s}$) oraz wodoprzewodności ($5,3 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$). Z tych stref są największe dopływy wody podziemnej do otworów.

Porównując wyniki badań MRS z analizą profili otworów znajdujących się w bliskim sąsiedztwie sondowań MRS, widoczna jest korelacja z wartościami wodoprzewodności T oraz współczynnika filtracji k przypisywanym poszczególnym wydzieleniom. Informacje o profilu geologicznym pochodzą z otworu nr 1 wykonanego w zależności miejsca sondowania MRS ok. 50 m na W (pomiar 1) do 900 m na N (pomiar 2). Na wiarygodność obu sondowań wskazuje również powtarzalność uzyskanych wyników. Wykonane w niedużej odległości od siebie ($\sim 1,2 \text{ km}$) i w zbliżonych warunkach hydrogeologicznych pomiary, odbiegają od siebie nieznacznie. Sondowanie 1, a tym bardziej 2 były zlokalizowane poza zasięgiem niewielkiego leja depresji wytworzonego przez czynne wyrobisko. Położenia zwierciadeł wód podziemnych nawierconych i ustabilizowanych w Ot. 1 i Ot. 2 nawiązują do wartości uzyskiwanych z istniejących już otworów studziennych (fig. 5)

LITERATURA

- BOUCHER M., FAVREAU G., VOULLAMOZ J.M., NAZOU-MOU Y., LEGCHENKO A., 2009 — Estimating specific yield and transmissivity with magnetic resonance sounding in an unconfined sandstone aquifer (Niger). *Hydrogeol. J.*, 17: 1805–1815.
- CHALIKAKIS K., NIELSEN M.R., LEGCHENKO A., HAGENSEN T.F., 2009 — Investigation of sedimentary aquifers in Denmark using the magnetic resonance sounding method (MRS). *C. R. Geoscience*, 341: 918–927.
- CYMERMAN Z., WALCZAK-AUGUSTYNIAN M., 1986 — Mapa geologiczna Sudetów w skali 1:25 000, arkusz Dzierżoniów. Wydaw. Geol., Warszawa.
- DESCLOITRES M., RUIZ L., SEKHAR M., LEGCHENKO A., BRAUN J.J., MOHAN KUMAR M.S., SUBRAMANIAN S., 2008 — Characterization of seasonal local recharge using electrical resistivity tomography and magnetic resonance sounding. *Hydrol. Process.*, 22: 384–394.

- KIELCZAWA J., 2000 — Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1 : 50 000, arkusze Dzierżoniów. Wydawnictwo Państwowy Instytut Geologiczny i Ministerstwo Środowiska, Warszawa.
- LACHASSAGNE P., BALTASSAT J.M., LEGCHENKO A., MACHARD DE GRAMONT H., 2005 — The links between MRS parameters and the hydrogeological parameters. *Near Surface Geophysics*, **3**, 4: 259–265.
- LEGCHENKO A., VALLA P., 2002 — A review of the basic principles for proton magnetic resonance sounding measurements. *J. Appl. Geophys.*, **50**: 3–19.
- LEGCHENKO A., BALTASSAT J.M., BOBACHEV A., MARTIN C., ROBAIN H., VOULLAMOZ J.M., 2004 — Magnetic resonance sounding applied to aquifer characterization. *Ground Water*, **42**: 363–373.
- LUBCZYNSKI M.W., ROY J., 2003 — Hydrogeological interpretation and potential of the new magnetic resonance sounding (MRS) method. *J. Hydrol.*, **283**: 19–40.
- LUBCZYNSKI M.W., ROY J. 2004 — Magnetic Resonance Sounding: New method for ground water assessment. *Ground-water*, **42**, 2: 291–303.
- LUBCZYNSKI M.W., ROY J. 2005 — MRS contribution to hydrogeological system parameterization. *Near Surface Geophysics*, **3**: 131–139.
- PLATA J.L., RUBIO F.M., 2008 — The use of MRS in the determination of hydraulic transmissivity: The case of alluvial aquifers. *J. App. Geophys.*, **66**, 3: 128–139.
- ROY J, LUBCZYŃSKI M., 2003 — The magnetic resonance sounding technique and its use for groundwater investigations. *Hydrogeol. J.*, **11**: 455–465.
- STAŠKO S., 1996 — Wody podziemne w skałach krystalicznych na podstawie badań wybranych obszarów Sudetów Polskich. Acta Universitatis Vratislavenensis I. No 1870. *Pr. Geol.-Miner.*, **53**. Wyd. Uniw. Wroc., Wrocław.
- STAŠKO S., 2010 — O wodach podziemnych w utworach krystalicznych Sudetów i ich przedpola. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **440**: 135–144.
- STAŠKO S., TARKA R., 1995 — Przewodność hydrauliczna skał krystalicznych bloku przedsudeckiego. *Prz. Geol.*, **43**, 9: 767–771.
- STAŠKO S., TARKA R., 2002 — Hydrogeologia. Zasilanie i drenaż wód podziemnych w obszarach górskich na podstawie badań w Masywie Śnieżnika. Wyd. Uniw. Wroc., Wrocław.
- VOULLAMOZ J.M., DESCLOITRES M., TOE G., LEGCHENKO A., 2005 — Characterization of crystalline basement aquifers with MRS: comparison with boreholes and pumping tests data in Burkina Faso. *Near Surface Geophysics*, **3**: 107–111.

SUMMARY

Among the geophysical methods that allow indicating or excluding the occurrence of the privileged zones of groundwater flow down to 50 m b.g.l. is a magnetic resonance sounding (MRS). It also provides a non-invasive way to assess hydrogeological conditions at depths of down to 50 m. Magnetic Resonance Sounding is a non-invasive geophysical method that has been used in hydrogeological research for more than 10 years. It enables the assessment of the water content, water permeability and transmissivity of different layers of rock while remaining relatively cheap.

This method involves exciting the hydrogen protons of the pore water with an artificial magnetic field that oscillates with the local Larmor frequency of the hydrogen protons. The Larmor frequency value depends on the intensity of the Earth's magnetic field at the local survey area. In MRS, the magnetic field is generated by a circular, square or octagonal antenna loop on the ground that is energized by an alternating current. The size of the wire loop (50–150 m) depends on the depth of the target aquifer. The vertical resolution is highest close to the surface (up to a few metres below the ground) and lowest at large depths; at depths greater than approximately half the loop size, aquifers cannot be defined without additional information from, e.g. boreholes. A current oscillating at the Larmor frequency is passed through the transmitter loop to create a magnetic field. When the current is abruptly turned off in the transmitter loop, the loop acts as a receiver that records the secondary magnetic field amplitude produced by the protons going back to their original state. The secondary magnetic field fades with time. The sounding is performed using several current steps, while the pulse

duration is kept constant. The resulting sounding curve is analyzed to estimate the depth and thickness of the aquifer, the MRS free water content, and the MRS hydraulic conductivity.

A commercial version of the MRS technique, called NUMIS LITE by Iris Instrument, was used in fieldwork. This version is a reduced power version of NUMIS PLUS, designed for shallow-water investigations (about 50 m). Two soundings were carried out approximately 1.5 km north of the village of Piława Górna. The area of active quarry was selected for hydrogeological characteristics of the crystalline rocks massifs represented by metamorphic rocks such as migmatite and gneiss, as well as fragments of amphiboles.

MRS results show that the weathering cover is approximately 4 metres thick, its water content does not exceed 6–7 %, and the hydraulic conductivity k equals 2×10^{-6} m/s. This type of rock waste can therefore be classified as low-permeable. Transmissivity values are low, at 10^{-6} – 10^{-7} m²/s.

At depths greater than 4 metres, the rock massif is cracked and shows very low water content (2%), hydraulic conductivity of 10^{-6} m/s (low-permeable rocks) and transmissivity equalling 10^{-5} m²/s. The permeability increases at depths of 40 metres (measurement No. 1) and 30 metres (measurement No. 2), where it reaches 10^{-4} – 10^{-5} m/s. The research has shown a simultaneous increase in the transmissivity to 10^{-3} m²/s. The increase in these parameters is associated with the presence of a small local water inflow within the cracked rock massif, which is visible, among others, in the exposures of the nearby quarry. Both series of profiling are suggestive of either very low water content of the weathering cover and rock massif, or a complete lack of it.

MRS studies showed the lack of preferential flow paths to a depth of 50 m within the massif of crystalline rocks. The MRS results were confirmed by hydrogeological studies of borehole drilled within the quarry. In the geological profile were observed zones of increased density of cracks at variable depths. This results in low water inflows to the quarry. Groundwater inflows are connected with zones of increased fracturing of the crystalline rock massif. Relatively more inflows are associated with rock massif slightly weathered and heavily cracked, as shown by geophysical researches and analysis of the geological profiles of boreholes drilled within the quarry.

Considering the other test sites under study, where MRS readings were processed, there seems to be a marked correlation between the porosity and hydraulic conductivity attributed to each site. The data regarding the geological profiles come from boreholes, drilled either 200 metres to the east (measurement no. 1) or 1000 metres to the north (measurement no. 2), depending on the sounding point. The repetitiveness of the results confirms the reliability of both soundings. The measurements carried out in close proximity to each other (~1.2 km) and under similar hydrogeological conditions, differ slightly from each other.