

O WODACH PODZIEMNYCH W UTWORACH KRYSZALICZNYCH SUDETÓW I ICH PRZEDPOLA

ON GROUNDWATER IN CRYSTALLINE ROCKS OF THE SUDETES AND THEIR FORELAND

STANISŁAW STAŚKO¹

Abstrakt. W prezentowanym artykule przedstawiono ewolucję i postęp w rozwiązywaniu poszczególnych problemów badawczych, związanych z występowaniem wód podziemnych w skałach krystalicznych (o niskiej porowatości pierwotnej) Sudetów i bloku przedsudeckiego. Opisano trójstrefowy schemat występowania wód podziemnych i podkreślono rolę pokryw zwietrzelinowych w gromadzeniu wód oraz stref spękań w ich przewodzeniu. Przedstawiono uwarunkowania procesu zasilania. Otrzymano znaczne wartości zasilania wód podziemnych od 22 do 50% opadów. Wskazano jak różne wyniki otrzymuje się, stosując punktowe i regionalne metody analizy. Zaprezentowano tok postępowania dla poszukiwania obszarów perspektywicznych oraz stosowane metody badawcze, w tym nowe metody VLF i MRS. Dyskusji poddano zagadnienia zasobowe wód podziemnych. Udokumentowano, że zasoby obliczone różnymi metodami wykazują odpływ podziemny bazalny rzędu 3–5 l/s·km². W tych warunkach najlepszą techniką ujmowania wód podziemnych są ujęcia drenażowe, źródeł oraz studni wierconych. Przedstawiono charakterystykę mineralizacji oraz odczynu chemicznego wód. Wskazano na podwyższone zawartości radonu oraz lokalnie fluoru oraz arsenu. W obszarach zarzuconej eksploatacji węgla kamiennego stwierdzono objawy kwaśnego drenażu.

Słowa kluczowe: wody podziemne, jakość wód podziemnych, techniki ujmowania wód podziemnych, skały krystaliczne, Sudety.

Abstract. The paper presents the evolution and progress in research on groundwater occurrence and resources in low porosity crystalline formations of the Sudetes Mts. and the Fore-Sudetic block. Description a three-zone scheme of groundwater occurrence and circulation, and the important role of alterites (weathered and decayed rocks) and rock fracturing in the accumulation of water are described. Constraints on the groundwater recharge process are also discussed. High water infiltration rates in (22 to 50% of annual precipitation) were measured in the Sudetes Mts. The differences in the received results are explained by the application of the methods of punctual and regional analyses. A procedure in the evaluation of the most promising groundwater water zones and research methods are discussed, including the new methods of VLF and MRS. A discussion on groundwater resources is also presented. The groundwater resources calculated with different methods show that the value of basic groundwater runoff is 3–5 l/s·km². Different techniques of groundwater supply including a drainage technique (horizontal intakes), natural springs and typical vertical water drillholes are evaluated. The groundwater is characterized by low mineralization values and slightly acidic pH. There is a large area of high radium content, and only locally of fluorine and arsenic contents. In areas of abandoned hard coal exploitation, an effect of acid drainage is noticed. Suggestions regarding future research and problems are included.

Key words: groundwater, groundwater quality, groundwater supply techniques, hard rocks (crystalline rocks), the Sudetes.

¹ Instytut Nauk Geologicznych, Uniwersytet Wrocławski, pl. M. Borna 9, 50-204 Wrocław; e-mail: stanislaw.stasko@ing.uni.wroc.pl

HISTORIA I STAN BADAŃ NAD WODONOŚNOŚCIĄ SKAŁ KRYSZALICZNYCH SUDETÓW

Od czasów pierwszej pracy Różyckiego (1955), dotyczącej warunków hydrogeologicznych Dolnego Śląska, upłynęło ponad 50 lat. Szerszy, systematyczny opis występowania wód podziemnych w formacjach krystalicznych ukazał się w artykule Michała Różyckiego pt. O wodach szczelinowych w krystaliniku sudeckim (1976). Autor tych prac trafnie i krytycznie stwierdza, że „... cały obszar krystaliniku, obejmujący połowę powierzchni Sudetów i prawie cały blok, przedstawia się pod względem hydrogeologicznym w dużej mierze jeszcze jako *terra incognita*”. Następnie zaproponował podział krystaliniku na trzy poziomy wód: szczelinowo-rumoszowych, szczelinowych płytkich i głębokich oraz szczelinowych głębinowych. Podział ten utrzymuje się i jest rozwijany do dziś. Do opisu warunków hydrogeologicznych wykorzystał Różycki również analizę wydajności źródeł i 52 otworów studziennych.

Do roku 1970 dominował pogląd o niskiej zasobności wodnej, lub tzw. bezwodności skał krystalicznych, wyrażany w wielu atlasach i mapach (np. Atlas Hydrologiczny Polski, 1987, czy Atlas Zasobów, Waloryzacji i Zagrożeń Środowiska Geograficznego Polski, 1994). Zmiany tego poglądu i pierwszy okres rejestracji objawów zawodnienia zapoczątkował zespół pod kierunkiem doc. M. Różyckiego (1976). Kolejne wyniki badań nad odpływem podziemnym w masywie Śnieżnika i w Karkonoszach zaprezentowali J. Kryza (1983, 1988) oraz J. Kryza i H. Kryza (1988). Dostrzeżona została też hydrogeologiczna rola zwietrzelin rozwijających się na zwięzłym podłożu skalnym (Kryza H., 1983; Kryza J., Kryza H., 1983). Równoległe podjęto badania składu chemicznego (np. Mroczkowska, 1983) i parametrów szczelinowatości skał masywnych (Michniewicz, 1983; Gierwielaniec, 1986) oraz rozważania nad genezą wód podziemnych (Ciężkowski i in., 1986; Ciężkowski, Kryza J., 1989; d'Obyrn i in., 1995; Zuber i in., 1995) na podstawie ich składu izotopowego. Etap ten wieńczy ocena zasobowa i wyróżnienie zmienności odpływu podziemnego jako kryterium regionalizacji (Kryza H., Kryza J., 1986; Kryza H. i in., 1989). Powoli te „bezwodne” masywy zaczęto postrzegać jako wodonośne, a ich zasoby ulegały uściśleniu (Kryza J., 1988; Staško, 1996). Kontynuowane były analizy zawodnienia skał w Karkonoszach i ich otoczeniu (Marszałek, 1989, 1998). Kowalski (1992), opisując główne czynniki naturalne warunkujące występowanie wód podziemnych i regionizację hydrostrukturalną, za główne kryterium podziału przyjął jednostki geologiczne. Badaniom wód zwykłych towarzyszyły studia nad wodami mineralnymi (np. Fistek, 1979) oraz syntetyczne studium i szczegółowy podział wód lecznicze i termalnych Sudetów (Dowgiałło, 1976, 1978; Ciężkowski, 1990). Rozwijały się badania nad specyficznymi składnikami, jak np. radon. Następne zagadnienie przed jakimi stanęli badacze to pierwsze opisy i analizy procesu zasilania (Staško, Tarka, 1993) oraz warunki zasilania poprzez pokrywy zwietrzelinowe utworów krystalicznych (Tarka, 1993, 1997). Jednocze-

śnie przedmiotem szczegółowych analiz stały się wyniki próbnych pompowań z tej formacji na bloku przedsudeckim, gdzie niejednorodność wydajności i parametrów hydraulicznych zaznacza się bardzo wyraźnie (Staško, Tarka, 1995). Na podstawie analizy 44 wyników wierceń i próbnych pompowań Staško i Tarka (*op. cit.*) wykazali, że w 36% otworów uzyskano wydajności powyżej 10 m³/h, z pojedynczej studni – maksymalnie 67 m³/h. Niemniej jednak przeważająca liczba studni pionowych dostarcza tylko 2–5 m³/h wody.

Pozycję skał krystalicznych Sudetów i ich przedpola na tle kraju w ujęciu regionalnym zilustrował Paczyński (1995), a metodyczne zasady oceny wód mineralnych i termalnych podali Dowgiałło i Paczyński (2002). Natomiast charakterystykę sudeckich wód termalnych przedstawili Dowgiałło (2002) oraz Dowgiałło i Fistek (2007).

W ostatnich latach na podstawie wieloletnich szczegółowych badań na poligonie doświadczalnym w masywie Śnieżnika opisano przebieg i zmienność procesu zasilania wód podziemnych i stabilność drenażu (Staško, Tarka, 2002). Podano przy tym zarówno opisowy, jak i ilościowy model warunków występowania wód w środowisku skał szczelinowych (Staško, 2002). Na podstawie szczegółowych pomiarach, w latach 1997–2002 wykazano, że w warunkach górskich, o wysokich wartościach opadów atmosferycznych, wielkość zasilania wód podziemnych jest wysoka i zawiera się w przedziale od 22 do ponad 50% sumy opadów (Staško, Tarka, 2002). Ważne są wnioski metodyczne jakie wynikają z tych badań. Metody punktowe, tj. lizymetryczne, wykazały wartość zasilania efektywnego 15–22% opadów, podczas gdy metoda wahań zwierciadła wód podziemnych – w zakresie 30–48%. Najwyższe wartości zasilania otrzymano metodą rozdziału hydrogramu rzeki, aż 50–55%. Tak wysokie zasilanie można by tłumaczyć dopływem spoza obszaru bilansowego, jednak w świetle udokumentowanych ucieczek wód do zlewni sąsiednich Morawy (Ciężkowski i in., 1986) jest to mało prawdopodobne, chociaż nadal niewykluczone.

W schemacie właściwości hydraulicznych skał krystalicznych udokumentowano i opisano trzy poziomy (strefy) wzajemnie powiązane. Poziom górny – pokryw zwietrzelinowych i rumoszowych – charakteryzuje się zmienną miąższością, wysoką pojemnością wodną i niską wodoprzewodnością. Ich miąższość jest zależna od położenia geomorfologicznego i wynosi od 1 m w partiach szczytowych do 20 m w dolinach. Wysokiej porowatości tej strefy, dochodzącej do 20%, towarzyszy niska wartość współczynnika filtracji – rzędu 1,1·10⁻⁶ m/s. Poziom środkowy obejmuje strefę sępek wietrzeliowych masywu skalnego o wysokiej przewodności i niskiej pojemności. Osiąga ona miąższości od 6 do 34 m w granitach i dochodzi do 63 m w skałach metamorficznych, takich jak gnejsy, łupki łyszczykowe czy granitognejsy, przy czym niskiej wartości odsączalności, rzędu 1–5% w zależności od typu skał towarzyszy wysoka wartość współczynnika filtracji około 1,1·10⁻⁵ m/s.

Trzeci, dolny poziom to sieć głębokich spękań i strefy tektoniczne o znaczeniu regionalnym, o zasięgu do 300–500 m, a w przypadku wód termalnych nawet do 2000 m. Ta strefa wykazuje na ogół najniższe wartości odsączalności rzędu 0,1–0,01 i wartości $k = 10^{-8} \div 10^{-9}$ m/s, jakkolwiek lokalnie wyższe, np. w Cieplicach Śląskich-Zdroju.

Ostatnie badania i interpretacje wyników badań izotopowych dowodzą, że wiek wód zwykłych w masywie Śnieżnika wynosi od 7 do 10 lat. Wyniki tych badań wsparte szczegółowymi obliczeniami bilansowymi wskazują, że tempo wymiany wód w tego typu środowiskach skalnych wynosi 7–10 lat (Staško, 2002). Dokumentowany był jednocześnie udział odpływu źródłami w odpływie podziemnym, według

Olichwera (2007), wynosi on zaledwie 12% w relacji do odpływu podziemnego całkowitego, co oznacza, że dominującą formą jest liniowy dopływ do koryt rzek i potoków. Badania te wskazują na wysokie zasoby wód podziemnych Ziemi Kłodzkiej. W ostatnich latach opisano również czynniki warunkujące zmienność składu chemicznego w tego typu utworach (Buczyński, Modelska, 2007; Modelska, Buczyński, 2007). Najnowszy opis warunków hydrogeologicznych skał krystalicznych Sudetów, w ujęciu regionalnym, przedstawili Staško i Michniewicz (2007). W roku 2008 zakończono badania i tworzenie bazy danych źródeł Ziemi Kłodzkiej, dokumentując zasobność i specyfikę omawianych formacji skalnych.

METODY POSZUKIWANIA WÓD PODZIEMNYCH I LOKALIZACJI STREF PERSPEKTYWICZNYCH

Pomimo licznych, lecz mało wydajnych źródeł, badania wykazały, że znaczące zasoby wód podziemnych gromadzą się głównie w strefach uprzywilejowanych dla ich przepływu. Mamy więc do czynienia ze strumieniami skupionymi w odróżnieniu od strumieni rozproszonych. Poszukiwanie miejsc o wysokich wydajnościach wymaga metod precyzyjnej lokalizacji uprzywilejowanych stref wodonośnych. To wymusza dokładne umiejscowienie studni w wysoko przepuszczalnej strefie spękań lub przewodzących uskoków nie tylko w planie, ale również na określonej głębokości i winno być określone z dokładnością kilkudziesięciu metrów. Metody te, we wstępnej fazie, obejmują interpretacje zdjęć lotniczych i satelitarnych oraz analizy strukturalne stref naprężeń rozważanych obszarów do określenia dogodnych dla przepływu wód stref spękań. Następnie, już w mniejszej skali, wskazana jest weryfikacja poprzez metody geofizyczne, począwszy od klasycznych metod elektrooporowych po najnowsze metody VLF i rezonansu magnetycznego. Nowoczesne metody VLF i rezonansu magnetycznego uzupełniają stosowane od lat metody elektrooporowe w poszukiwaniach obszarów perspektywicznych.

Lassachange i inni (2001) zaproponowali tworzenie map obszarów perspektywicznych (lub inaczej o wysokim potencjale) dla ujmowania wód podziemnych opartych na analizie wieloczynnikowej. Analiza ta obejmuje: litologię skał, właściwości hydrogeologiczne poszczególnych wydzieleni oraz stopień spękania skał, pochodzenie i właściwości pokryw zwietrzelinowych, głębokość do zwierciadła wód podziemnych, nachylenie stoków, przebieg stref uskokowych i lineamentów, a także prognozę spodziewanego składu chemicznego. Metoda ta w skali regionu realizowana może być poprzez nakładanie warstw informacyjnych w formacie map (GIS).

Jak wynika z doświadczeń francuskich z Masywu Centralnego najlepsze właściwości wśród skał krystalicznych wykazują kwarcyty i skały żyłowe (kwarcowe), niższe – masywne granity i skały metamorficzne, a najniższe – leukogranity. Obserwacje i zestawienia z obszarów Sudetów są odmienne w odniesieniu do skał metamorficznych, takich jak gnejsy czy

leukogranity. Na przykład gnejsy formacji strońskiej w masywie Śnieżnika wykazują zbliżone właściwości do spękanych granitów (Staško, 1996; Staško, Tarka 2002), a leukogranity (np. w masywie Ślęży) są grupą, w której stwierdza się najwyższej objawy zawodnienia, co manifestują stwierdzone tam wydajne źródła.

Właściwości hydrogeologiczne skał w strefie zasięgu procesów wietrzeniowych są znane zarówno z badań prowadzonych dla potrzeb budownictwa, jak i hydrogeologicznych, a zestawienie ich głównych parametrów wykonał Staško w 1996 r.

Geneza, skład i miąższość pokryw zwietrzelinowych to czynniki o największym znaczeniu dla lokalizacji stref wodonośnych w utworach krystalicznych. Obecność pokryw stwarza efekt „gąbki” zasobnej w wody. Jej znaczenie zauważył już Krasny (1993a), a potwierdzają zarówno badania Lachassagne i innych (2001), jak i opracowania krajowe (Kryza H., Kryza J., 1983; Kowalski, 1992; Staško, Tarka, 2002). Rodzaje pokryw, ich rozprzestrzenienie i głębokościowy zasięg procesów wietrzeniowych zależy od wielu czynników, w tym od warunków paleoklimatycznych, rozkładu powierzchni zrównań, tektoniki, erozji itd.

Najbardziej sprzyjające do występowania stref zasobnych w wody podziemne są te obszary, gdzie miąższość pokryw zwietrzelinowych wynosi 20–30 m. Dobre – gdy wynosi ona powyżej 10 m. W Sudetach największe powierzchnie tworzą pokrywy o grubości 5–10 m. Zestawienie map tej „formacji” jest jednak trudne, ze względu na brak szczegółowych danych.

Morfologia, wyrażona kątem nachylenia stoku, wykazuje najbardziej sprzyjające warunki gromadzenia wód podziemnych dla stoków połączonych, o nachyleniu poniżej 5%, a najmniej korzystne dla stoków stromych rzędu 20%.

Głębokość do zwierciadła wód podziemnych możliwa jest do określenia na podstawie map hydrogeologicznych i baz danych dotyczących źródeł. Jest ona bardzo zmienna w rozpatrywanych utworach krystalicznych i wymaga analizy pola hydrodynamicznego w kontekście występowania stref zawodnionych i słabowodonośnych.

Analiza stref uskokowych i towarzyszących intensywnych spękań różnego rodzaju możliwa jest na podstawie map geologicznych, konfrontowanych z rozpoznaniem terenowym oraz badań teledetekcyjnych. Pierwsza próba zestawienia zdjęć satelitarnych oraz interpretacji lineamentów na terenie całej Polski została zamieszczona na Mapie fotogeologicznej Polski w skali 1:1 000 000 (Bażyński i in., 1984). Duże podobieństwo w rozkładzie kierunków wykazują lineamenty na obszarze Sudetów i zapadliska Karpackiego. Charakteryzują się one kierunkami NNE–SSW (20–30°), NW–SE (Sudety – 140–150°), oraz ENE–WSW (70–80°) (Graniczny, 1989). Materiał wyjściowy do rozważań, na terenie Sudetów, nad lokalizacją stref uprzywilejowanych stanowi mapa fotolineamentów (Bażyński i in., 1984), a przykładowe jej wykorzystanie w hydrogeologii podaje między innymi Doktor i inni (1989). Lineamenty i strefy nieciągłości strukturalnych są interpretowane z map satelitarnych oraz lotniczych i mogą stanowić perspektywiczne strefy wodonośne.

Geologiczna weryfikacja tej tezy jest możliwa na bazie metody bardzo niskiej częstotliwości (VLF). Metoda ta jest powszechnie znana jako najlepsze narzędzie do odwzorowania na mapie stref spękań, o wysokiej przewodności w środowisku skał zwięzłych i krystalicznych. Jest to bierna metoda pola elektromagnetycznego, która wykorzystuje nadajniki o dużej mocy, działające między 15–30 kHz jako podstawowe źródło fal elektromagnetycznych. Pole emitowane od nadajnika VLF, ponad jednolitą albo poziomo warstwowaną skałą, składa się z pionowych i poziomych składowych, a linie te są prostopadłe do kierunku propagacji. Ponieważ źródło pola elektromagnetycznego jest zwykle większe niż 80 km, to długie fale tworzą pole płaskie. Podstawowe pole magnetyczne jest ukierunkowane poziomo i prostopadłe do jego źródła, w strefach nieciągłości wywołuje wtórne pole magnetyczne, które jest ukierunkowane jako suma dwóch pól o elipsoidalnym nachyleniu. Kąt nachylenia jest w przybliżeniu równy części pionowego komponentu pola magnetycznego elipsy i jest jakościowo interpretowany na podstawie formuły Frasera. Efekt Frasera określa strefy o wysokiej przewodności jako anomalie poziomego nachy-

lenia rzeczywistego składowej wtórnego pola magnetycznego. Wartości anomalii Frasera są wyrażone w procentach intensywności podstawowego pola wtórnego, docierającego bezpośrednio od odbiornika. Generalnie przyjmuje się anomalie o natężeniu powyżej 20% jako intensywne, 20–10 średnie i 5–10% jako niskie strefy spękań. Amplitudy i poziome wymiary anomalii odpowiadają intensywności i szerokości stref nieciągłości. Niektóre z anomalii VLF mogą powstawać na granicach litologicznych, dlatego identyfikacja stref zawsze wymaga interpretacji geologicznej. Przykłady zastosowania podaje m.in. Farbisz (2001).

Drugą zalecaną metodą jest metoda rezonansu magnetycznego (MRS – *Magnetic Resonance Sounding*) opisana między innymi przez Lubczyńskiego i Roy'a (2004). Metoda ta pozwala na bezinwazyjne określenie zawartości wody w profilu geologicznym, porowatości skał i głębokości występowania zasobnych horyzontów wodonośnych. W zależności od typu urządzenia możliwa jest penetracja do 50 lub 150 m głębokości. Metoda ta pozwala na bezpośredni pomiar zawartości wolnej wody z powierzchni terenu. Wykorzystywane jest w niej zjawisko wzbudzenia protonów – cząstek wodoru – poprzez pole magnetyczne w antenie nadawczej o określonej częstotliwości. Amplituda prądów wzbudzonych podczas powrotu protonów do pozycji wyjściowej jest funkcją zawartości wody, podczas gdy czas powrotu do fazy wyjściowej jest zależna od porowatości efektywnej i przepuszczalności ośrodka. Umożliwia to wykreślenie zawartości wody wolnej w profilu do głębokości maksymalnej 150 m oraz rozkładu średnich rozmiarów przestrzeni porowej, a pośrednio przewodności wodnej skał. Ograniczenia tej metody to oddzielenie wielkości pomierzonych od naturalnych szumów pola elektromagnetycznego powstających w pobliżu linii i urządzeń energetycznych, konstrukcji oraz ogrodzeń metalowych. Metoda nie może być stosowana dla skał o właściwościach magnetycznych, jak również jej pomiary nie pozwalają na rozróżnienie wód zasolonych od słodkich.

W większości naturalnych obszarów o typowej budowie geologicznej daje dobre wyniki. Pierwsze pomiary rezonansu magnetycznego z zastosowaniem urządzenia NUMIS Lite zostały przeprowadzone w ośrodku wrocławskim.

ZASOBY WÓD PODZIEMNYCH

Określenie wielkości zasobów wód podziemnych jest zadaniem złożonym z kilku powodów. Brak jest wystarczającej liczby otworów wiertniczych i wyników pompowań badawczych. Klasyczne metody, stosowane dla ośrodków ciągłych, nie znajdują zastosowania w tego typu środowisku, ze względu na znaczne zróżnicowanie parametrów – od typowych skał nieprzepuszczalnych po bardzo wodoprzepuszczalne strefy uskokowe. Najlepsze rozpoznanie zasobowe, a szczególnie określenie odpływu bazalnego rzek i potoków oraz źródeł, możliwe jest przy zastosowaniu metod hydrologicznych (Staško, Tarka, 1993, 2001). Wielkości te najlepiej

charakteryzują zasobność poszczególnych struktur, co ilustruje tabela 1.

W omawianych obszarach stwierdza się od 2 do 8 zmiennych i mało zmiennych źródeł na km², o przeważających średnich wydajnościach od 0,1 do 1,0 l/s. Zastosowanie metody źródeł reprezentatywnych do obliczeń odpływu podziemnego pozwala określić wartość odpływu źródłanego jako wielkość około 1,0 l/s·km². Przy powierzchni występowania skał krystalicznych równej 4500 km² daje to w rezultacie 388 tys. m³/dobę zasobów dyspozycyjnych. Pamiętając, że odpływ źródłany stanowi zaledwie 12–18% odpływu pod-

Tabela 1

**Zestawienie wskaźników wodonośności skał krystalicznych Sudetów według różnych autorów
(wg Staško, 2002 z uzupełnieniami)**

Comparison of water-bearing properties of crystalline rocks in the Sudetes according to different authors
(after Staško, 2002, modified)

Parametry	Wartości min.–max.	Autor (rok)	Rejon
Odpływ podziemny – moduł odpływu podziemnego M [l/s km ²]	>7	Jokiel (1994)	Sudety
	2,8–17,4	Paczyński (1995)	Sudety
	1,3–11,9; śr. 5,08	H. Kryza, J. Kryza (1986)	wartości dla Sudetów
	0,6–20,3	H. Kryza (1986)	Masyw Śnieżnika
	2,5–24,5	Staško, Tarka (1994)	
	6,48–14,17	Marszałek (1996)	Karkonosze (cz. zach.) i Góry Izerskie (cz. wsch.)
	1,1–6,15	Bocheńska i inni (1994)	Góry i Pogórze Kaczawskie
	1,4–7,2	Staško (1996)	Góry Sowie
Źródła – wskaźnik krenologiczny Wk [1/km ²] – wydajność Q [l/s] – wskaźnik zmienności R	Wk 2,92; Q 0,05–6,0	Kryza H. (1983)	Masyw Śnieżnika
	Wk 5,6–18,6; Q 0,1–11,0; R 2,3–31,9	Staško, Tarka (1994); Staško (1996)	
	Wk 2,06–7,3; Q 0,05–18,7; R 3,7–32,7	Marszałek (1996,2007)	Karkonosze (cz. zach.) i Góry Izerskie (cz. wsch.)
	Wk 0,11–1,11; śr 0,57 Q 0,1–2,0; R 1,04–11,0	Bocheńska i inni (1994)	Góry i Pogórze Kaczawskie
	Q 0,09–6,49 *; R 3–429**	Wojtkowiak (2000)	Sudety Zachodnie
	Wk 1,8; Q 0,01–2,7; R 3–90	Staško (1996)	Góry Sowie
Studnie – wydajność studni, Q [m ³ /h] – depresja, S [m]	Q 0,75–67; Q sr =5,2; S 3,0–56,3	Staško (1996)	Rejon Łądko–Kamienicy, Gór Sowich i Jeleniej Góry
	Q 0,7–27,8; S 2–46	Marszałek (2007)	Karkonosze, Jelenia Góra–Cieplice
Współczynnika filtracji k [m/d]	0,11 0,6–49 0,6–8,6 0,6–10,2 0,6–1,68	Michniewicz (1983) H. Kryza, J. Kryza (1983) Marszałek (1996, 2007) Tarka (1997)*** Wojtkowiak (2000)	wschodnia osłona Karkonoszy Karkonosze Karkonosze i Góry Izerskie Masyw Śnieżnika Sudety Zachodnie
Wodoprzewodność T [m ² /d]	4,5–120 1,7–112	Staško (1996) Marszałek (2007)	Góry Sowie, Śnieżnik Podregion izersko-karkonoski

* – wartości średnie i średnie niskie; ** – wskaźnik zmienności z uwzględnieniem maksymalnych stanów podczas powodzi 1997; *** – wartość dla utworów pokrywowych

* – average and low average values; ** – variability coefficient considering maximum water stage during flood in 1997; *** – value for weathering zone

ziemnego całkowitego (zachodzącego głównie do koryt rzecznych, np. Olichwer, 2007) otrzymujemy zasoby odnawialne rzędu 1320 tys. m³/d. Wielkości te potwierdzają zarówno badania krajowe w warunkach niskich przepływów rzek i potoków (np. Jokiel, 1994; Dubicki, red., 2002), jak również badania na terenie Republiki Czech (Krasny, 1993b). Tak na przykład, wartość odpływu podziemnego z lat 1945–2000 udokumentowana wieloletnimi pomiarami na ujęciu Bielawa mieści się w przedziale 3,7–5,6 l/s·km² (Staško,

Wojtkowiak, 2001). Oczywiście znane są również skrajnie niskie wartości, np. dla Gór Kaczawskich, rzędu 1,1 l/s·km² (Bocheńska i in., 1994) i skrajnie wysokie stwierdzone w masywie Śnieżnika ponad 20,0 l/s·km². Obliczenia zasobów wód podziemnych oparte na metodach hydrologicznych (rozdziału hydrogramu rzeki), na przykładzie kotliny Kłodzkiej i rzeki Nysy Kłodzkiej po przekrój wodowskazowy w Kłodzku, wykazały dla powierzchni zlewni 1081 km² zasoby dynamiczne rzędu 492 tys. m³/d (Olichwer, 2007). Szczegółowe pomiary

w zlewniach cząstkowych rzek odprowadzających wody z gór potwierdzają te wielkości. Podobne wielkości zasobów odnawialnych otrzymano dla zbiornika Karkonosze, stosując kilka metod badawczych. Zasoby odnawialne obliczono jako wartość średnią 219 tys. m³/d dla powierzchni zbiornika 215 km², a wartości niskie 118 tys. m³/d podaje Marszałek (2007).

Obliczenia zasobów odnawialnych czy dynamicznych pozwalają z kolei obliczyć zasoby dyspozycyjne i eksploatacyjne (Staško, Michniewicz, 2007). Utrzymanie przepływów nienaruszalnych i zagospodarowania na poziomie 50–60% wcześniej określonych zasobów dyspozycyjnych, pozwala uzyskać 790 tys. m³/d zasobów eksploatacyjnych z utworów krystalicznych. O tak wysokich zasobach, decydująca jest pojemność wodna pokryw zwietrzelinowych

(Staško, 2002 ; Staško, Tarka 2002) i wysokie zasilanie będące efektem wysokich wartości opadów atmosferycznych.

Dużego znaczenia nabierają w tych warunkach badania źródeł, które przy niskiej liczbie otworów studziennych uzupełniają stopień rozpoznania obszaru. Jak wcześniej wspomniano, rejestracja objawów zawodnienia, kartowanie źródeł i badanie ich zmienności trwa od lat 70. ubiegłego stulecia. Ostatnio zakończone prace zaowocowały elektroniczną bazą danych źródeł Ziemi Kłodzkiej. Zebrano i pomierzono ponad 3100 punktowych wypływów wód podziemnych na powierzchni 1250 km² oraz zestawiono informacje o ich składzie chemicznym (Staško i in., 2008). W porównaniu do liczby źródeł jakie analizował Różycki (1976) stanowi to znaczący postęp w tej dziedzinie.

JAKOŚĆ WÓD PODZIEMNYCH

Zagadnienie jakości wód podziemnych było przedmiotem zainteresowania wielu autorów, począwszy od pierwszych badań. Na ogół, wody w utworach krystalicznych wykazują dobry skład chemiczny, niską mineralizację i niski odczyn pH. Badania przeprowadzone w 139 ujęciach w skałach krystalicznych wykazały, że wody te charakteryzują się mineralizacją ogólną w zakresie 50–300 mg/dm³ (Staško, Wojtkowiak, 2004). Średnie stężenia głównych jonów wynoszą odpowiednio: HCO₃ – 74,2, SO₄ – 33,2, Cl – 6,4, NO₃ – 9,8, Ca – 28,2, Mg – 7,3 mg/dm³. Wskaźnikiem pozytywnych zmian, w odniesieniu do średnich wartości z lat 80. ubiegłego stulecia, gdy notowano kwaśny odczyn wód, jest obecnie znaczny wzrost pH. Wartość średnia wynosi obecnie około 6,5 w stosunku do wartości 5,6 w latach poprzednich. Niemniej jednak pojawiają się lokalnie anomalnie wysokie zawartości substancji i pierwiastków swoistych takich jak: radon, arsen, bar, czy fluor. Najszersze studium występowania radonu w wodach podziemnych przedstawił Przylibski (2005) i Adameczyk-Lorenc (2007). Autorzy cytowanych prac stwierdzają, że 1/6 Sudetów (polskiej części) to obszary, gdzie stężenie ²²²Rn w wodach podziemnych jest wyższe niż 74 Bq/dm³. Najwyższe pomierzone wartości w Sudetach zarejestrowano w wodach ze sztolni Śnieżnik – 2964 Bq/dm³, Świeradowie-Zdroju – 2893 Bq/dm³ i w Szklarskiej Porębie – 1772 Bq/dm³. Typowe wartości występowania radonu (tło hydrogeochemiczne) w wodach podziemnych dla 11 jednostek geologicznych Sudetów wyrażone w Bq/dm³ prezentuje się następująco: metamorfik Łądko-Śnieżnika (36–1250), intruzja granitowa kłodzko-złotostocka (6–242), metamorfik Gór Bystrzyckich i Orlickich (8–309), struktura bardzka (4–24), kra sowiogórska (6–47), niecka śródsudecka (5–50), metamorfik Rudaw Janowickich (3–36), granit Karkonoszy (21–868), metamorfik izerski (10–691), metamorfik kaczawski (3–36), niecka północnosudecka (4–55). Tło regionalne Sudetów zostało określone w zakresie 4–306 Bq/dm³. Badania wykazały, że najważniejszym czynnikiem decydującym o genezie i stężeniu radonu w wodach podziemnych są współczynniki

emanacji skał zbiornikowych oraz stężenie radu ²²⁶Ra w skałach zbiornikowych. W mniejszym stopniu wpływa wydajność strumienia filtracyjnego. Wysokie wartości współczynników emanacji ($K_{em} > 0,5$) stwierdza się w strefach uskoku, co wykorzystuje się do ich lokalizacji. Według Przylibskiego (2005), najwyższe zawartości radu 226 stwierdza się w aplitach, granitach, gnejsach, leukogranitach i granitognejsach, niższe w łupkach łuszczkowych oraz bazaltach i marmurach.

Podwyższone zawartości arsenu opisano w Sudetach Wschodnich w rejonie Złotego Stoku, gdzie płynie potok o sugestywnej nazwie Złoty (Trujący) i gdzie stwierdzono stężenia 0,99–26,6 mg As/dm³ (Marszałek, Wąsik, 2000). Towarzyszą one złożom złotoносnym. Niższe wartości stwierdza się również w rejonie Kudowy.

Fluor, podobnie jak krzemionka, są wskaźnikami głębokiego krążenia wód podziemnych. Wysokie stężenia jonu F w wodach podziemnych stwierdza się w Górach i Pogórze Izerskim oraz w Karkonoszach (Marszałek, 2007). W wodach słodkich występujących w formacji skał pokrywowych, jak i głębszych poziomach skał zwięzłych Sudetów Zachodnich, tło hydrochemiczne fluoru zawiera się w przedziale 0,15–0,32 mg/dm³. Anomalnie wysokie zawartości do 12 mg/dm³ towarzyszą wodom termalnym Cieplic Śląskich-Zdroju. Podwyższone stężenia stwierdza się w rejonie Starej Kamienicy, Jakuszyc, Szklarskiej Poręby, Kowar i Janowic Wielkich (Marszałek, 2007), Gór Sowich i w masywie Śnieżnika (Staško, 1996). Na przedgórzu Sudetów wysokie zawartości tego pierwiastka (do 10 mg/dm³) stwierdza się w rejonie Nysy. Lokalnie w obszarach zatapianych kopalń węgla kamiennego obserwuje się objawy, tzw. kwaśnego drenażu. Wody wypływające z nieczynnych szybów oraz osadnika wykazują znaczne obniżenia jakości i podwyższone zawartości żelaza, manganu, siarczanów, wapnia, magnezu, potasu oraz glinu, ołowiu, kadmu i niklu. W warunkach kwaśnego odczynu wód (pH 3,6–5,5) stwarza to niekorzystne zmiany w środowisku (Chudy, 2008).

OPTYMALNE TECHNIKI UJMOWANIA WÓD PODZIEMNYCH

Typowe studnie pionowe, nie zapewniają zadawalających ilości wody i nie są najlepszym sposobem ujmowania wód podziemnych w tego rodzaju środowisku skalnym. Jak wykazują badania i studia literaturowe (np. Różycki, 1976; Staško, 1996; Staško, Wojtkowiak, 2004) stanowią one, np. w Sudetach, tylko 20% wszystkich ujęć. Najliczniej reprezentowane w Sudetach są ujęcia drenażowe (41%) i ujęcia na bazie naturalnych źródeł – 28%.

Źródła, szczególnie stałe lub mało zmienne, są najczęstszym sposobem zaopatrzenia w wodę i dominują w przypadku niskiego zapotrzebowania na wodę. Wodę ze źródła ujmuje się poprzez zabudowanie miejsca wypływu obudową kamienną lub kręgiem betonowym, a na dnie lub pod obsypką z piasku/żwiru umieszcza się końcówkę filtra poziomego i rurociągu. Ujęcia takie dostarczają dobrych jakościowo wód i są powszechnie stosowane w Górach Bystrzyckich, Górach Sowich, Górach Izerskich i Karkonoszach. Wydajność ich jest niska i zawiera się dla typowych źródeł w przedziale 0,1–1,0 l/s (0,36–3,6 m³/h). Większe ujęte źródła, o wydajnościach gwarantowanych powyżej 1–2 l/s (3,6–7,2 m³/h), stanowią bazę zaopatrzenia dla całych miejscowości, przykładem są ujęcia w Gorzanowicach, w Betlejem i w Mioszowie. Dostarczają one od 250 do 1850 m³/d. Na terenach o wyższym zapotrzebowaniu na wodę stosuje się ujęcia drenażowe. Ujęcia te budowane są w obszarach, w których zwierciadło wód podziemnych zalega płytko (do 5 m), a warstwa wodonośna ma niewielką miąższość. Składa się ono z perforowanych rurociągów ułożonych we wkopie z obsypką piaszczystą lub żwirową. W zależności od potrzeb stosuje się systemy drenażowe jedno- lub wielogłęziowe, rozbudowane oraz poddenne, ułożone prostopadle do kierunku spływu wód podziemnych. Ujęcia drenażowe obejmują, poza rurociągiem drenażowym, studnie kontrolne i zbiorcze oraz zbiorniki wyrównawcze. Wydajności takich ujęć są zróżnicowane, lecz znacznie wyższe od pojedynczych źródeł i wynoszą od 10 do 100 m³/h. Najlepszym przykładem ujęć drenażowych są ujęcia w Górach Sowich, zbudowane na początku ubiegłego stulecia, a zaopatrujące do chwili obecnej takie miasta jak Bielawa, Nowa Ruda czy Dzierżoniów. Obejmując powierz-

chnie drenażu często od kilku do 10 km² i ciągi drenażowe o długości 4000 metrów, dostarczają od 2600 do 3900 m³/d, jak w przypadku Bielawy. Do grupy tej należą również ujęcia dla takich miejscowości jak: Głuszycza, Szklarska Poręba, Walim i Kowary. Przy czym istotne jest stwierdzenie ze charakteryzują się one stałą wydajnością i stabilnym składem chemicznym wód. Obok ujęć drenażowych znane są również galerie drenażowe, o średnicy 0,7–1,8 m, zbudowane równoległe do stoku w spękanych formacjach skalnych. Pojęcia ujęcie drenażowe nie należy mylić z systemem drenarskim, to pierwsze ujmuje wody o różnej genezie przepływu, głównie głębokiego systemu odpływu, podczas gdy drugie, lokalizowane w strefach podmokłych, ujmuje wody płytkiego krążenia.

Typowe studnie głębinowe, wiercone o średnicach do 250 mm, zakończone w utworach zwietrzelinowych bądź w spękanych skałach, charakteryzują się niską wydajnością w zakresie 0,2–5,2 m³/h. Jedynie studnie położone na bloku przedsudeckim, ujmujące spękane gnejsy i granitognejsy, sporadycznie osiągają wydajności do 67 m³/h przy znacznych depresjach (Staško, Tarka, 1995). Ważne jest, że te masywne skały są wodonośne w strefach spękań nawet do 250 m (Staško, 1996). Częstą praktyką w Sudetach jest drażnienie studni o dużej średnicy – do 2,5 m.

W litych skałach, prostopadle do morfologii stoku kute są chodniki i sztolnie zbierające wody z głębszych stref wodonośnych. Obecnie działające sztolnie wykorzystywane dla zaopatrzenia ludności w wodę znajdują się np. w Głuszycy, w Karpaczu i Kuźnicach Świdnickich. Jednak najwyższe wydajności, od 65 m³/h do ponad 100 m³/h, zanotowano w zarzuconej sztolni pod Śnieżnikiem (Staško, 2002).

Główne zadania jakie stawiają nadchodzące lata dotyczyć będą czynników formowania się zasobów wodnych skał krystalicznych oraz ich racjonalnego ujmowania. Należy doskonalić techniki lokalizacji stref perspektywicznych i kartograficznego odwzorowania, uwzględniając wszystkie wskaźniki zawodnienia w tym źródła. Ważnym kierunkiem badań winny stać się zagadnienia przeobrażeń składu chemicznego wód podziemnych pod wpływem antropopresji.

PODSUMOWANIE

Zwięzłe skały krystalicznych nie stwarzają sprzyjających warunków do gromadzenia znacznych ilości wód podziemnych. W zespołach skalnych o heterogenicznym i anizotropowym rozkładzie właściwości występują strefy uskokowe, spękań, żył, intruzji, które stanowią strefy uprzywilejowane dla przepływu i głębokiego krążenia wód podziemnych. Tworzą one, wraz z pokrywą skał zwietrzelinowych, wyspy niskiego i średniego zawodnienia oraz strefy bardzo zasobne w wody podziemne. Najlepsze właściwości do gromadzenia i przewodzenia wód podziemnych wykazują dwie górne

strefy, tj. warstwa pokryw zwietrzelinowych i strefa spękań wietrzeniowych masywu skalnego. Jak wykazały wieloletnie badania, formacje te zapewniają ujęcie wód podziemnych w ilości rzędu 3–5 l/s·km², wyrażone jako odpływ podziemny. Ze względu na specyficzne warunki występowania wód podziemnych, najlepszą techniką ich ujmowania są ujęcia drenażowe oraz ujęcia źródeł, niższe wydajności mają studnie wiercone.

Metodyka badań tych skał powinna uwzględniać całą gamę poszukiwań geologicznych od petrologiczno-minera-

logicznych poprzez tektonikę, teledetekcję aż po metody hydrogeologiczne i hydrologiczne. W badaniach należy uwzględniać: obecność pokryw (zwietrzelinowych, kompleksów osadowych), szczelinowatość, objawy zawodnienia i metody elektromagnetyczne w tym VLF i MRS.

Wody podziemne charakteryzuje niska mineralizacja oraz lekko kwaśny odczyn. Na 1/6 powierzchni Sudetów stwierdza się podwyższone zawartości radu, a tylko lokalnie fluoru oraz arsenu. W obszarach zarzuconej eksploatacji węgla kamiennego stwierdza się objawy kwaśnego drenażu.

LITERATURA

- ADAMCZYK-LORENC A., 2007 — Tło hydrogeochemiczne radonu w wodach podziemnych Sudetów [praca doktorska]. Arch. PWroc., Wrocław.
- ATLAS HYDROLOGICZNY POLSKI, IMGW (red. J. Stachy), 1987 — Wyd. Geol., Warszawa.
- ATLAS ZASOBÓW, WALORÓW I ZAGROŻEŃ ŚRODOWISKI GEOGRAFICZNEGO POLSKI (red. S. Kozłowski), 1994 — Agencja Rekl.-Wyd. A. Grzegorzczak, Warszawa.
- BAŻYŃSKI J., DOKTÓR S., GRANICZNY M., 1984 — Mapa fotogeologiczna Polski, skala 1:100.000. Wyd. Geol., Warszawa
- BOCHEŃSKA T., GURWIN J., WĄSIK M., 1994 — Hydrogeologia zlewni Górnej Kaczawy. *Acta Univ. Wratisl., 1684 Pr. Geol.-Miner.*, **47**: 1–65.
- BUCZYŃSKI S., MODELSKA M., 2007 — Wody podziemne bloku przedsudeckiego tła hydrogeochemiczne i jakość. *Prz. Geol.*, **55**, 2: 145–150.
- CHUDY K., 2008 — Zmiany warunków hydrogeologicznych w rejonie niecki Nowej Rudy w związku z likwidacją kopalni węgla kamiennego. *Acta Univ. Wratisl. Hydrogeol.*, **3053**: 1–140.
- CIEŻKOWSKI W., 1990 — Studium hydrogeochemii wód leczniczych Sudetów polskich. *Pr. Nauk. Inst. Geotech. PWroc.*, **60**, *Monogr.*, **19**: 1–133.
- CIEŻKOWSKI W., KRYZA J., 1989 — Deuter i tlen-18 w zwykłych wodach podziemnych Sudetów. *Pr. Nauk. Inst. Geotech. PWroc.*, **58**, *Konferencje*, **29**: 183–188.
- CIEŻKOWSKI W., GRABCZAK J., ZUBER A., 1986 — Wstępne wyniki badań trytu i izotopów trwałych w wodach leczniczych Sudetów. *Pr. Nauk. Inst. Geotech. PWroc.*, **49**, *Konferencje*, **21**: 23–26.
- CIEŻKOWSKI W., PULINA M., ŘEHAK J., 1986 — Wyniki najnowszych polsko-czeskich badań w masywie Śnieżnika (Sudety). *Pr. Nauk. Inst. Geotech. PWroc.*, **49**, *Konferencje*, **21**: 27–34.
- DOWGIAŁŁO J., 1976 — Wody termalne Sudetów. *Acta Geol. Pol.*, **26**, 4: 617–640.
- DOWGIAŁŁO J., 1978 — Pochodzenie dwutlenku węgla w szczawach Karpat i Sudetów na obszarze Polski. *Biul. Inst. Geol.*, **312**: 191–217.
- DOWGIAŁŁO J., FISTEK J., 2007 — Prowincja sudecka. *W: Hydrogeologia regionalna Polski, t. II. Wody mineralne, lecznicze i termalne oraz kopalniane: 57–77. Państw. Inst. Geol., Warszawa.*
- DOWGIAŁŁO J., PACZYŃSKI B. (red.), 2002 — Ocena zasobów wód potencjalnie leczniczych. Poradnik metodyczny. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- DOWGIAŁŁO J., 2002 — The Sudetic geothermal region of Poland. *Geothermics*, **31**: 343–359.
- DOKTÓR S., GRANICZNY M., SADOWSKA M., 1989 — Rozpoznanie warunków hydrogeologicznych SW części ziemi kłodzkiej przy zastosowaniu metod teledetekcyjnych. *Pr. Nauk. Inst. Geotech. PWroc.*, **58**, *Konferencje*, **29**: 189–194.
- DUBICKI A. (red.), 2002 — Zasoby wodne w dorzeczu górnej i środkowej Odry w warunkach suszy: 1–107. IMGW, Warszawa.
- D'OBYRN K., ZUBER A., GRABCZAK J., 1995 — Wyniki badań izotopowych wód holocénkich w południowo-zachodniej Polsce. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, **7**, 2: 361–368. Wyd. Profil, Kraków.
- FARBISZ J., 2001 — Dokumentacja badań geofizycznych – Rozpoznanie struktury hydrogeologicznej Cieplicy. Arch. Przed. Badań Geof., Warszawa.
- FISTEK J., 1979 — Wody lecznicze i mineralne oraz peloidy. *W: Surowce mineralne Dolnego Śląska* (red. K. Dziedzic i in.): 430–442. Ossolineum, Wrocław.
- FISTEK J., STAŠKO S., ZIELIŃSKI W., 1995 — Wody podziemne bloku przedsudeckiego. Wycieczka. *W: Geologia i ochrona środowiska bloku przedsudeckiego: 255–271. Przewodnik LXVI Zjazdu PTG. Ann. Soc. Geol. Pol. wyd. spec., cz. 1. Wrocław.*
- GIERWIELANIEC J., 1986 — Wody szczelinowe krystalicznych masywów skalnych Sudetów i podsudecia. *Pr. Nauk. Inst. Geotech. PWroc.*, **49**, *Konferencje*, **21**: 53–58.
- GRANICZNY M., 1989 — Fotolineamenty i ich znaczenie geologiczne. *Instr. Met. Bad. Geol.*, **50**.
- JOKIEL P., 1994 — Zasoby, odnawialność i odpływ wód podziemnych strefy aktywnej wymiany w Polsce. *Acta Geogr. Lodz.*, **66/67**.
- KOWALSKI S., 1992 — Czynniki naturalne warunkujące występowanie wód podziemnych w regionie sudeckim. *Acta Univ. Wratisl., 1324, Pr. Geol.-Miner.*, **25**.
- KRASNY J., 1993a — Classification of transmissivity magnitude and variation. *Ground Water*, **31**, 2: 230–236.
- KRASNY J., 1993b — Prevailing of transmissivity of rocks in the Czech part of the Krkonoše and Jizerske Hory Mountains. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, **6** (red. L. Poprawski, T. Bocheńska): 79–86. Oficyna Wydawnicza Sudety, Wrocław.
- KRYZA H., 1983 — Wody podziemne północnej części Masywu Śnieżnika. *W: Współczesne problemy hydrogeologii regionalnej. II Ogólnopolskie Sympozjum Łądek Zdrój, 13–16 października 1982 r.*: 59–77. Wyd. UWroc., Wrocław.
- KRYZA H., 1986 — Zróżnicowanie przestrzenne odpływu podziemnego zlewni sudeckich na przykładzie zlewni Kamienicy (Masyw Śnieżnika). *Pr. Nauk. Inst. Geotech. PWroc.*, **49**, *Konf.*, **21**: 101–107.
- KRYZA H., KRYZA J., 1983 — Hydrogeologiczna rola zwietrzelin granitu na przykładzie zlewni Górnej Kamiennej (Karkonosze). *W: Współczesne problemy hydrogeologii regionalnej. II Ogólnopolskie Sympozjum Łądek Zdrój, 13–16 października 1982 r.*: 78–89. Wyd. UWroc., Wrocław.
- KRYZA H., KRYZA J., 1986 — Odpływ podziemny i zasoby odnawialne Sudetów i ich przedpola jako kryterium regionalizacji hydrogeologicznej. *Pr. Nauk. Inst. Geotech. PWroc.*, **49**, *Konferencje*, **21**: 109–119.
- KRYZA H., KRYZA J., 1988 — Hydrogeologiczne warunki występowania naturalnych wpływów wód podziemnych w masywie granitowym rejonu Jakuszyca na przykładzie zlewni Kamiennej. *Acta Univ. Wratisl., 964, Pr. Geol.-Miner.*, **11/2**: 99–125.

- KRYZA H., KRYZA J., LIMISIEWICZ P., 1989 — Zmienność odpływów niskich obszaru sudeckiego i jego przyczyny. *Pr. Nauk. Inst. Geotech. PWroc.*, 58, *Konferencje*, 29: 69–74.
- KRYZA J., 1983 — Systemy wodonośne Sudetów i obecny stan ich rozpoznania. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, 6: 4–20. Wrocław.
- KRYZA J., 1988 — Zasoby wód podziemnych Sudetów na tle odpływu podziemnego. *Acta Univ. Wratisl.*, 964, *Pr. Geol.-Miner.*, 11, 2: 25–37.
- LACHASSAGNE P., WYNS R., BERARD P., BRUEL T., CHERY L., COUTAND T., DESPRATS J. F., LE STRAT P., 2001 — Exploitation of high-yields in hard rock aquifers: downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones. *Ground Water*, 39, 4: 568–581.
- LUBCZYŃSKI M.W., ROY J., 2004 — Magnetic resonance sounding: New method for groundwater assessment. *Ground Water*, 42: 291–303.
- MARSZAŁEK H., 1989 — Hydrogeologia źródeł w zlewni Kamiennej. *Pr. Nauk. Inst. Geotech.*, 58, *Konferencje*, 29: 107–115.
- MARSZAŁEK H., 1996 — Hydrogeologia górnej części zlewni Kamiennej w Sudetach Zachodnich. *Acta Univ. Wratisl.* 1881, *Pr. Geol.-Miner.*, 54.
- MARSZAŁEK H., 1998 — Quality of groundwater in the Karkonosze granite in the light of monitoring studies. *Munchner Geol. Hefte*, B 8: 87–93.
- MARSZAŁEK H., 2007 — Kształtowanie zasobów wód podziemnych w rejonie Kotliny Jeleniogórskiej. *Acta Univ. Wratisl. Hydrogeol.*, 2993.
- MARSZAŁEK H., WAŚIK M., 2000 — Influence of arsenic-bearing gold deposits on water quality in Złoty Stok mining area (SW Poland). *Environ. Geol.*, 39, 8: 888–892.
- MICHNIEWICZ M., 1983 — Parametry szczelinowości jako jeden z elementów charakterystyki warunków hydrogeologicznych w sudeckich wodonoścach szczelinowych. *W: Współczesne problemy hydrogeologii. II Ogólnopolskie Sympozjum Łądek Zdrój*, 13–16 październik 1982 r.: 90–98. Wyd. UWroc., Wrocław.
- MODELSKA M., BUCZYŃSKI S., 2007 — Zastosowanie analizy czynnikowej w badaniach hydrochemicznych wybranych zlewni sudeckich. *Prz. Geol.*, 55, 4: 319–323.
- MROCZKOWSKA B., 1983 — Chemizm wód podziemnych masywu Śnieżnika. *W: Współczesne problemy hydrogeologii. II Ogólnopolskie Sympozjum Łądek Zdrój*, 13–16 październik 1982 r.: 271–284. Wyd. UWroc., Wrocław.
- OLICHWER T., 2007 — Zasoby wód podziemnych Ziemi Kłodzkiej. *Acta Univ. Wratisl., Hydrogeol.*, 3022: 1–77.
- PACZYŃSKI B. (red.), 1995 — Atlas hydrogeologiczny Polski w skali 1:500 000. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- PRZYLIBSKI T.A., 2005 — Radon składnik swoisty wód leczniczych Sudetów. Oficyna Wydawnicza PWroc., Wrocław.
- RÓŻYCKI M., 1955 — Warunki hydrogeologiczne Śląska. *Prz. Geol.*, 3, 9: 405–415.
- RÓŻYCKI M., 1976 — O wodach szczelinowych w krystaliku Sudeckim. *Biul. Geol. Wydz. Geol. UW*, 21: 193–201.
- STAŚKO S., 1996 — Wody podziemne w skałach krystalicznych na podstawie badań wybranych obszarów Sudetów polskich. *Acta Univ. Wratisl. Pr. Geol.-Miner.*, 53: 1–85.
- STAŚKO S., 2002 — Zawodnienie szczelinowych skał krystalicznych w Sudetach. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 404: 249–262.
- STAŚKO S., BUCZYŃSKI S., OLICHWER T., TARKA R., 2008 — Baza danych źródeł jako narzędzie rozpoznawania warunków hydrogeologicznych dla obszarów górskich na przykładzie Ziemi Kłodzkiej. *Pol. Tow. Geol., Kraków*.
- STAŚKO S., MICHNIEWICZ M., 2007 — Subregion Sudetów. *W: Hydrogeologia regionalna Polski* (red. B. Paczyński, A. Sądurski): 306–327. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- STAŚKO S., TARKA R., 1994 — Obliczanie zasobów wód podziemnych w obszarach górskich na przykładzie badań wybranych zlewni Sudetów. *Zesz. Nauk. AR Wroc.* 248, *Konf.* 5: 279–286.
- STAŚKO S., TARKA R., 1993 — Wstępne wyniki badań zasilania wód podziemnych w obszarach górskich Sudetów. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, 6 (red. L. Poprawski, T. Bocheńska): 123–127. Oficyna Wydawnicza Sudety, Wrocław.
- STAŚKO S., TARKA R., 1995 — Przewodność hydrauliczna skał krystalicznych bloku przedsudeckiego. *Prz. Geol.*, 43, 9: 767–771.
- STAŚKO S., TARKA R., 2001 — Groundwater flow in fractured hard rocks based on field data from Sudety Mts., SW Poland. *W: New approaches characterising groundwater flow*, t. 2: 1069–1072. A.A. Balkema Publishers, Munich.
- STAŚKO S., TARKA R., 2002 — Zasilanie i drenaż wód podziemnych w obszarach górskich na podstawie badań w masywie Śnieżnika. *Acta Univ. Wratisl., Hydrol.*, 2528: 1–86.
- STAŚKO S., WOJTKOWIAK A., 2001 — Ujęcia drenażowe Gór Sowich na przykładzie miasta Bielawy i wody podziemne w skałach krystalicznych SW Polski. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, 10, 2: 524–529. Inst. Nauk. Geol. UWroc., Wrocław.
- STAŚKO S., WOJTKOWIAK A., 2004 — Występowanie i jakość wód podziemnych w skałach krystalicznych Sudetów na podstawie badań ujęć. *Prz. Geol.*, 52, 1: 69–75.
- TARKA R., 1993 — Formy zasilania a odpływ podziemny na przykładzie zlewni górskiej w Masywie Śnieżnika. *Acta Univ. Wratisl., 1517, Pr. Geol.-Miner.*, 36: 129–144.
- TARKA R., 1997 — Zasilanie wód podziemnych w górskich masywach krystalicznych na przykładzie Masywu Śnieżnika w Sudetach. *Acta Univ. Wratisl., 1964, Pr. Geol.-Miner.*, 56.
- WOJTKOWIAK A., 2000 — Reżim źródeł obszarów krystalicznych Sudetów Zachodnich. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 390: 167–206.
- ZUBER A., WEISE S.M., OSENBRUCK K., GRABCZAK J., CIĘŻKOWSKI W., 1995 — Age and recharge area of thermal waters in Łądek Spa (Sudeten, Poland) deduced from environmental isotope and noble gas data. *J. Hydrol.*, 167: 327–349.

SUMMARY

Crystalline hard rocks generally are not favourable for groundwater accumulation. Rock formations exhibiting heterogeneous and anisotropic distribution of the property reveal faulted zones, fractures, veins, and intrusions which are preferential zones for groundwater flow (deep circulation). They cause together with the weathering cover (alterites)

a picture of low and average water yield appear islands (zones) very rich into groundwater. A three-layer model of hydraulic properties of water-bearing zones in hard rocks have been developed (Fig. 1). It includes the top layer of a weathering zone, which is composed mostly of sandy clay, 2–20 m in thickness in the valley bottom; the second one is

formed of a dense fracture network in the massif rocks and it occurs up to approximately 50 m below ground level. The third one is represented by a deep fracture system, reaching a depth of 300–500 m. The top zone is characterised by high water storage (capacity) and relatively low permeability. The second zone shows low storage ability, but high transmissivity. The lowest storage and hydraulic parameters are typical of a deep fractured zone, which is the bridge between fresh and mineral water and is reported up to a depth of 500–700 m.

The best properties for groundwater occurrence of the first water-bearing level are shown by the two upper zones, i.e. alterites covers and fracture zones of the rock massif. Many years research of evaluated groundwater resources with different methods expressed as the runoff or base flow assure resources of waters of the range 3–5 l/s·km². In experimental study four methods were applied to determine recharge in mountainous condition. Three of them gave consistent recharge-to-rainfall ratio, indicating also that yearly recharge represented approximately 50% of the rainfall and increase of yearly rainfall. The lysimeter method gave substantially lower recharge estimates (15–21%), most likely because of the local soil heterogeneity and/or influence of forest interception and root water uptake.

It has been proved that under these circumstances, the best technology of groundwater intake construction is horizontal drainage and spring intakes, whereas lower efficiencies (2–5 m³/h) are typical of vertical drilling wells. Comparison

of water-bearing properties of hard rock in the Sudetes (Tab. 1) illustrated that not only a vertical well but also groundwater runoff based on hydrograph separation, water level fluctuation and springs density discharge and variability should be considered.

The methodology of research of these rocks should include all possible of geological exploration: from petrologic-mineralogical across the tectonics till geophysical, hydrologic and hydrogeological methods. It is recommended to take into account of the properties such as the presence of covers complexes, to study fractures, and to use electromagnetic methods like VLF Very Low Frequencies or MRS – Magnetic Resonance Sounding.

The recent study allowed collecting data and measurements from 3,100 springs and outflows of groundwater over the area of 1,250 km², and summarizing their chemical composition which provides important information on water quality and quantity.

The groundwater is characterized by low mineralization of 60–300 mg/l typical of fresh water and shows slightly acidic pH. Increased contents of ²²²Rn in groundwater, exceeding 74 Bq/dm³, are observed in about 1/6 of the area of the Sudetes, but fluorine and arsenic contents are increased only locally. In areas of abandoned hard coal exploitation, an effect of acid drainage is noticed. Recommendation for further research on both the processes of groundwater flow formation and water quality is given.