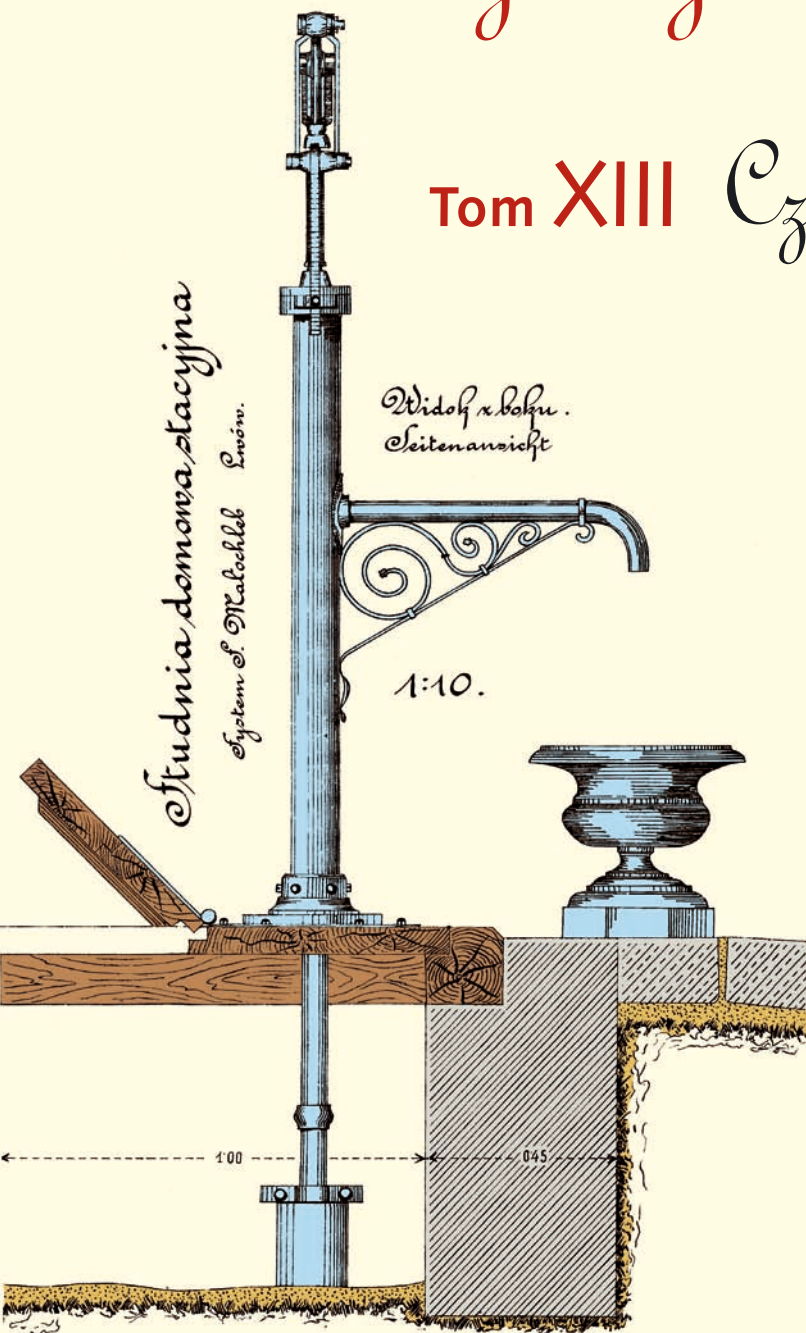


Współczesne problemy hydrogeologii

Tom XIII Część 3.





Wydanie publikacji zostało sfinansowane przez
Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej

Recenzenci:

Jadwiga Szczepańska
Wojciech Ciężkowski
Józef Górski
Andrzej Kowalczyk
Ewa Krogulec
Grzegorz Malina
Jerzy Małecki
Marek Marciniak
Jacek Motyka
Marek Nawalany
Jan Przybyłek
Andrzej Rózkowski
Andrzej Sadurski
Andrzej Szczepański
Stanisław Staško
Stanisław Witczak
Andrzej Zuber

Redakcja: Andrzej Szczepański, Ewa Kmiecik, Anna Żurek

Teksty artykułów w częściach 2. i 3. zostały wydrukowane z wersji elektronicznej dostarczonej przez Autorów, metodą bezpośredniej reprodukcji (*camera ready*)

Projekt okładki i stron tytułowych: Andrzej Tomaszewski

Na okładce: fragment projektu studni miejskiej we Lwowie z 1906 roku
— ze zbiorów prof. **Antoniego S. Kleczkowskiego** (1922–2006)

Korekta: Zespół

Skład komputerowy systemem $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$: pre $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ t, www.pretext.com.pl

Druk: ROMA-POL, www.romapol.pl

ISBN-13 978-83-88927-16-4

Andrzej Zuber, Lucyna Rajchel

Geneza wód mineralnych Matecznego, Kraków

Origin of Mineral Waters in Kraków-Mateczny

Słowa kluczowe Kraków-Mateczny, woda mineralna, znaczniki środowiskowe, geneza wody, wiek wody

Key words Kraków-Mateczny, mineral water, environmental tracers, water origin, water age

Abstract Mineral waters of Mateczny, near the centre of Krakow, have been used for balneology since 1905. They are exploited by wells 36 to 63 m deep screened in karstic depressions of Malm limestones filled by Paleogene and Neogene sands and marls which are separated from Pleistocene sands by Miocene clays. The chemical type is $\text{SO}_4\text{-Cl-Na-Ca-Mg}$, H_2S with the presence of useful trace elements. After removal of H_2S and saturation with CO_2 very tasteful and healthy table water is obtainable. Stable isotope and ^{14}C data collected in the period of 1983–2001 indicate the glacial age with a small (ca. 10%) contribution of modern water (with the mean age of about 30 years) to one of the wells, which means a very good protection against anthropogenic pollutants. Slowly increasing ^{14}C ages and decreasing $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values indicate changes in flowpath pattern and perhaps some overexploitation.

Wprowadzenie

Nazwa Mateczny kojarzy się większości krakowian wyłącznie z ruchliwym rondem komunikacyjnym blisko centrum Krakowa. Niewielu wie, że występuje tam woda mineralna odkryta już w 1839 r. przy poszukiwaniu węgla (Torosiewicz, 1849). Jednak za jej odkrywcę powszechnie uważa się Antoniego Matecznego, który przy poszukiwaniu wody słodkiej nawiercił ją w 1899 r. i następnie od 1905 r. udostępnił do celów kąpielowych. Przez wiele lat po drugiej wojnie światowej była ona dostępna także jako doskonała woda stołowa, po usunięciu H_2S ($1,0 \div 7,4 \text{ mg/dm}^3$) i nasyceniu w CO_2 . Woda ta obecnie służy jedynie do kąpieli kosmetycznych, co należy uznać za marnotrawstwo, gdyż znany krakowski lekarz, prof. Julian Aleksandrowicz, wysoko ocenił jej właściwości, zalecając ją dla profilaktyki zdrowotnej. Zaletą tej wody jest duża zawartość magnezu i wapnia, oraz obecność innych pierwiastków śladowych ważnych dla prawidłowego funkcjonowania organizmu.

Blizsze informacje o wodzie Matecznego można znaleźć w wielu publikacjach (np. Bogacz, 1974; Kleczkowski, Myszką 1989; Motyka, Rajchel, 2002). Niniejsza praca ma na celu zapoznanie polskiego czytelnika z wieloletnimi badaniami izotopowymi dotyczącymi genezy i wieku tych wód podsumowanymi w anglojęzycznej publikacji Zuber a in. (2004).

Geologia i hydrogeologia rejonu Matecznego

Rejon Matecznego znajduje się w obrębie zapadliska przedkarpackiego wypełnionego osadami miocenu (Rutkowski, 1993) i o bardzo zróżnicowanym morfologicznie podłożu, poprzecinanych licznymi uskokami tworzącymi rowy i zręby tektoniczne (Bogacz, 1974; Rutkowski, 1993). Wody Matecznego znajdują się w lokalnym rowie tektonicznym o kierunku NW-SE, ograniczonym zrębami Krzemionek, Bonarki i Zakrzówka pokazanymi na rysunku 1. Ta skomplikowana budowa geologiczna wpływa na różnorodne i złożone warunki hydrogeologiczne tego rejonu.

Najstarszymi osadami, które odsłaniają się na powierzchni w rejonie Matecznego są uławiczone i spękane wapienie skaliste górnej jury, zawierające liczne konkrecje krzemionkowe. W wapieniach tych występują różne formy krasowe w postaci szczelin, lejów, kanałów, studni i jaskiń wypełnionych osadami różnego wieku. Studnie o średnicy kilku metrów oraz głębokości kilkunastu metrów łączą się z poziomymi rozmyciami i kanałami, będąc wypełnione piaskami, łąkami, jak również ostrokrawędzistymi blokami wapieni jurajskich, margli senońskich i wapieni turońskich (Radwan, Węclawik, 1987). Formy krasowe i ich wypełnienia są starsze od zaburzeń tektonicznych, tworzących zręby i rowy. Utworom tym przypisuje się wiek paleogeński a ich genezę wiąże się z procesami intensywnego niszczenia pokrywy utworów kredowych (Gradziński, 1962; Bogacz, 1974).

Wody Matecznego związane są z „kieszzeniami” krasowymi wypełnionymi drobnoziarnistymi piaskami paleogenu i neogenu, z gniazdami i laminami gipsów i anhydrytów oraz brackicznymi wapieniami i marglami (Bogacz, 1974; Kleczkowski, Myszką 1989; Chowaniec, Felisiak, 1995). Osady te są przykryte łąkami i marglami warstw skawińskich, które w naturalny sposób chronią złożę przed zanieczyszczeniami antropogenicznymi a także oddzielają go od poziomu wodonośnego czwartorzędowych piasków i żwirów, jak to pokazano na rysunku 2. Według

Chowańca i Felisiaka (1995) źródłem mineralizacji wód są magnezowe cementy kalcytowe utworów karpatu powstałe w warunkach wietrzenia pustynnego (sebha).

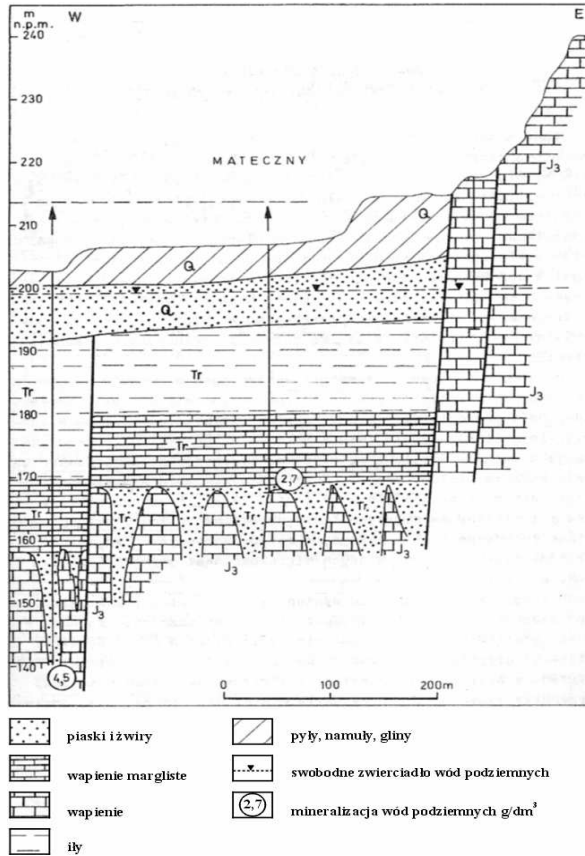


Rysunek1. Szkic tektoniczny rejonu Matecznego z zaznaczoną topografią (adaptowane z Rutkowskiego, 1993)

Figure 1. Simplified tectonics of the Mateczny region with topography (adapted from Rutkowski, 1993)

We wszystkich otworach Matecznego stwierdzono dwa poziomy wodonośne; górny swobodny z wodą słodką, związany jest z utworami czwartorzędowymi, oraz dolny artezyjski z wodą mineralną, związany z utworami trzeciorzędowymi (Kleczkowski, Mysza, 1989). Obecnie na Matecznym znajdują się trzy ujęcia wód mineralnych uznanych za lecznicze, a ich zasoby eksploatacyjne wynoszą $8,5 \text{ m}^3/\text{h}$ na rzędnej samowypływu 203,5 m npm (Rajchel, 1998; Motyka, Rajchel, 2002). Otwór Geo-2A o głębokość 37,5 m odwiercono w latach 1984-1985 blisko ul. Konopnickiej, w miejscu zlikwidowanych otworów Geo-1 i Geo-2. Otwór ten bezpośrednio po odwierceniu zawierał wodę bez trytu, ale wkrótce zaczął dostarczać wodę identyczną z wodą z Geo-2. Otwór M-3 o głębokości 62,5 m od-

wiercono w latach 1980-1983. Znajduje się on w północno-zachodniej części parceli Matecznego w odległości 224 m od odwiertu M-4. Otwór M-4 o głębokości 36 m; został odwiercony w pobliżu otworu Geo-2A w 1968 r.



Rysunek 2. Uproszczony przekrój hydrogeologiczny rejon Matecznego (Kleczkowski, 1983)

Figure 2. Simplified hydrogeological cross-section (after Kleczkowski, 1983)

Próbné pompowania wykazały, że wszystkie otwory są połączone hydraulicznie. Wskutek braku szczegółowych i wiarygodnych danych, trudno jest oszacować ilość wody mineralnej dotychczas wyeksploatowanej. W niektórych okresach eksploatacja wynosiła ok. 14 m³/d (5 000 m³/rok) lub 40 m³/d (14 000 m³/rok). Zatwierdzone zasoby eksploatacyjne w wysokości 8,5 m³/h = 204 m³/d = 75 500 m³/rok są zdecydowanie zbyt wysokie, biorąc pod uwagę omówione w dalszej części zmiany wieku wód. Można przypuszczać, że całkowita objętość dotychczas wyeksploatowanej wody mieści się w granicach (0,6÷1,5)·10⁶m³.

Dane izotopowe i hydrochemiczne oraz ich interpretacja

Dane izotopowe i niektóre dane hydrochemiczne oraz oszacowane wieki wód zestawiono w tabeli 1 razem z przykładami innych wód o podwyższonej mineralizacji na obszarze Krakowa (Zuber i in., 2004). Podane zakresy mineralizacji wód Matecznego obrazują wahania obserwowane w okresie od 1983 do 2005 r. W tabeli pominięto analizy $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ wód Matecznego, którym nie towarzyszyły analizy ^{14}C . Wody Matecznego i z ul. Pylnej nawiercone zostały w utworach trzeciorzędowych a pozostałe w wapieniach malmu. Według składów izotopowych i zawartości trytu, wody rejonu Zakrzówka są wodami całkowicie współczesnymi z zasoleniem pochodzącym z infiltracji brzegowej zanieczyszczonych wód Wisły (Zuber i in., 2004). We wszystkich pozostałych przypadkach zdecydowanie dominuje woda pochodząca z końca ostatniego zlodowacenia. Wieki glacialne większości tych wód zostały potwierdzone wysokimi stężeniami nadmiaru ^4He wynoszącymi ok. $(200 \pm 1\ 060) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$ oraz niskimi temperaturami zasilania określonymi ze stężeń rozpuszczonych atmosferycznych gazów szlachetnych (Ne, Kr, Ar i Xe) (Zuber i in., 2007). Oznaczenia nadmiaru ^4He w Geo-2A i M-3 wyniosły odpowiednio $622 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$ i $788 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ STP/g}$, a temperatury zasilania 5,9 i 3,2 °C, czyli ok. 5,5 °C poniżej współczesnej temperatury przyziemnego powietrza w tym rejonie, co jest w przybliżeniu zgodne z wodami wieku glacialnego na innych obszarach Polski i Europy (Zuber i in., 2007). Powyżej podane stężenia nadmiaru ^4He są wyższe ok. 200 razy od stężenia obserwowanego w wodzie o średnim wieku ok. 100 lat, występującej na obszarze zasilania wapieni malmu na północ od Krakowa. Przez nadmiar ^4He rozumie się nadwyżkę nad stężeniem wynikającym z równowagi z atmosferą i z obecności rozpuszczonego powietrza.

Według interpretacji stężeń trytu za pomocą prostych modeli matematycznych, w otworze Geo-2A występuje ok. 10% wody współczesnej o średnim wieku ok. 30 lat (Zuber i in. 2004). Ta składowa może dopływać od pobliskiego zrębu Krzemionek. Natomiast obszar zasilania wód Matecznego o wieku glacialnym pozostaje nierozpoznany. Może on znajdować się na wyniesieniu terenu na SSW od Matecznego lub na SW w rejonie Kurdwanowa (rys. 1).

Bardzo istotnym dla określenia genezy mineralizacji tych wód jest obserwowany wzrost stężenia chlorków skorelowany z bardziej ujemnymi wartościami $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$. W przypadku domieszki sedymentacyjnej wody morskiej korelacja ta powinna mieć przebieg odwrotny. Również wartości stosunku $r(\text{Na}/\text{Cl})$ sugerują inne pochodzenie zasolenia niż od reliktywnej wody morskiej, chociaż ten wskaźnik nie jest zbyt miarodajny w przypadku stężeń Cl^- poniżej ok. 1 g/dm^3 . Podwyższone stężenia Cl^- mają także niektóre wody wieku glacialnego występujące w wapieniach malmu w lewobrzeżnej części Krakowa; jednak ich najwyższe wartości w otworze na pl. Biskupim i źródle przy klasztorze Paulinów związane są z dopływem ascensyjnym starszych wód infiltracyjnych (Zuber i in., 2004). Wyraźnie podwyższone stężenia chlorków w wodach lewobrzeżnych utworów trzeciorzędowych na ul. Pylnej oraz w prawobrzeżnych wodach Matecznego prawdopodobnie wiążą się z ługowaniem inkluzji solnych w osadach miocenu. W wodach tych obserwuje się też znacznie wyższe stężenia siarczanów niż w wodach wieku glacialnego zawartych w wapieniach malmu, przy czym stężenia te są inaczej skorelowane ze stężeniami chlorków (Zuber i in., 2004).

Tabela 1. Izotopy środowiska i wybrane dane hydrochemiczne wód Matecznego i innych wód Krakowa
Table 1. Environmental isotopes and chosen hydrochemical data in Mateczny and other Krakow water

Nr	Miejsce	Data	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^2\text{H}$ ‰	Tryt T.U.	^{14}C pmc	$\delta^{13}\text{C}$ ‰	Typ chemiczny	M g/dm ³	Cl ⁻ g/dm ³	r(Na/Cl)	Okres zasilania (Wiek ^{14}C , tys. lat)
27	Mateczny, Geo-2, Mateczny, Geo-2a	12.83	-10,4	-74	13,6	18,5	-12,3	Na-Ca-SO ₄ -Cl-HCO ₃ , H ₂ S	1,6÷2,7	0,43	1,63	Glacjal+wsp. (8,3) (9,1) (8,5) (11,3) (11,7)
		04.85	-10,4	-72	14,5	16,1	-12,0					
		03.87	-10,7	-75	13,8	17,0	-11,8					
		02.94	-10,4	-76	5,7	12,5	-12,2					
	06.01	-10,6	-76	3,5	12,5	-12,8						
28	Mateczny M-3	12.83	-12,1	-87	0,3	4,0	-5,1	SO ₄ -Cl-Na-Mg-Ca, H ₂ S	3,1+4,5	0,74	1,40	Glacjal (13,5) (16,4) - (19,9)
		02.94	-11,3	-81	0,0	5,0	-9,0					
		08.95	-11,1	-82	0,4	n.m.	n.m.					
		06.01	-12,8	-85	0,0	2,1	-5,8					
29	Mateczny M-4	12.83	-11,1	-77	0,0	16,2	-10,4	SO ₄ -Cl-Na-Mg-Ca, H ₂ S	2,8÷3,2	0,41	1,65	Glacjal+hol. (7,8) (11,8) - (14,0)
		02.94	-10,5	-75	4,2	12,0	-12,5					
		08.95	-10,9	-78	0,3	n.m.	n.m.					
		06.01	-11,1	-79	0,0	7,1	-9,6					
26	ul. Pylna, C-1	12.97	-11,2	-78	n.m.	n.m.	n.m.	Na-SO ₄ -HCO ₃ -Cl	3,1	0,48	3,06	Glacjal
16	ul. Kościuszki	11.89	-12,1	-85	0,0	1,5	-4,0	Na-Mg-Ca-SO ₄ -HCO ₃	1,0	0,093	2,72	Glacjal
15	Plac Sikorskiego	01.93	-13,2	-93	0,1	0,0	-3,8	Na-SO ₄ -HCO ₃ -Cl	1,1	0,092	4,42	Glacjal
20	Nowa Huta, P-1	12.94	-11,5	-83	n.m.	n.m.	n.m.	Na-Ca-Mg-SO ₄ -Cl-HCO ₃	1,2	0,18	1,79	Glacjal
21	Nowa Huta, P-3	03.95	-12,0	-86	0,0	0,0	-0,6	Na-Mg-Ca-SO ₄ -HCO ₃ -Cl	1,2	0,13	2,61	Glacjal
22	Nowa Huta, P-4	01.97	-12,2	-86	0,1	0,7	-0,7	SO ₄ -HCO ₃ -Na-Mg-Ca	1,3	0,10	2,66	Glacjal
24	Zakrzówek, S-1	01.89	-10,0	-72	28,1	n.m.	n.m.	SO ₄ -HCO ₃ -Cl-Ca-Mg-Na	1,5	0,16	1,49	Współczesna
25	Zakrzówek, S-7	03.89	-10,1	-71	26,9	n.m.	n.m.	Ca-Na-Mg-HCO ₃ -SO ₄ -Cl	0,98	0,12	1,10	Współczesna
18	Plac Biskupi	12.92	-11,3	-79	0,4	2,0	-4,4	Na-Mg-Cl-SO ₄	2,2	0,60	1,28	Glacjal+p-plejst.
19	Klasztor Paulinów	06.94	-10,2	-74	n.m.	n.m.	n.m.	Na-Cl-SO ₄	4,3	1,79	1,00	Glacjal+p-plejst.

Niepewności (\pm) analiz izotopowych: $\delta^{18}\text{O} - 0,1\text{‰}$, $\delta^2\text{H} - 1\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C} - 0,1\text{‰}$, $^3\text{H} - 0,5+1,5\text{ T.U.}$, $^{14}\text{C} - 1,0\text{ pmc}$. Numeracja otworów wg Zuber i in. (2004).

W tabeli 1 podano także wielkości wieków radiowęglowych badanych wód uzyskane za pomocą najprostszego modelu przepływu (model tłokowy) oraz najprostszego modelu hydrochemii ^{14}C (tzw. poprawka Pearsona):

$$\text{Wiek [tys. lat]} \cong 8300 \times \ln \left[\frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{CaCO}_3}}{\delta^{13}\text{C}_{\text{gleba}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{CaCO}_3}} C_o / ^{14}\text{C} \right] \quad (1)$$

gdzie C_o — początkowa zawartość ^{14}C (przyjmowana za 100% węgla współczesnego); ^{14}C — wartość mierzona; $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ — mierzona wartość dla całkowitego rozpuszczonego węgla nie-organicznego; $\delta^{13}\text{C}_{\text{gleba}}$ — założone jako -25‰ dla CO_2 glebowego i $\delta^{13}\text{C}_{\text{CaCO}_3}$ — założone jako 0‰ dla „martwego” węgla w węglanach podlegających rozpuszczaniu. Bliższe opisy zastosowanych modeli można znaleźć w pracy Zuber i in. (2007).

Wartości $\delta^{13}\text{C}$ w wodach Matecznego są wyraźnie bardziej ujemne niż wartości obserwowane w wodach wieku glacialnego zawartych w wapieniach malmu. Obliczone wieki ^{14}C sugerują zasilanie w końcowych etapach ostatniego zlodowacenia, czyli są jakościowo zgodne z oczekiwaniem wydedukowanym ze składów izotopowych wody, co również wyraźnie różni wody Matecznego od wód wapieni malmu, gdzie wody zasilane pod koniec ostatniego zlodowacenia mają wyraźnie zawyżone wieki radiowęglowe. Na tych podstawach można przypuszczać, że przepływ wód Matecznego zachodzi głównie w utworach niewęglanowych, co jest sprzeczne z budową geologiczną pokazaną na rysunku 2.

Podsumowanie i wnioski

Wszystkie wody mające niższe wieki niż wiek ostatniej transgresji morskiej na danym obszarze nie są odseparowane od współczesnego obiegu. Oznacza to, że wody Matecznego mają również gdzieś współczesny obszar zasilania, ale ich zasilanie jest ograniczone wskutek wolnego przepływu, o czym świadczą wieki wynoszące ponad 10 tys. lat. Położenie obszaru zasilania pozostaje nieznane, ale ani morfologia terenu, ani znana geologia rejonu nie wskazują, aby obszar ten mógł znajdować się na dużej odległości. Wartości ^{14}C i $\delta^{13}\text{C}$ wód Matecznego porównane z wartościami obserwowanymi w wodach wapieni malmu rejonu Krakowa sugerują dominujący udział przepływu przez utwory niewęglanowe.

Wiek wód Matecznego wykazuje tendencję rosnącą a równocześnie wartości $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ stają się coraz to bardziej ujemne, co sugeruje dopływ wody zasilanej w coraz zimniejszym klimacie, czyli coraz to starszej w okresie wzrastającego ocieplenia, jakie zachodziło pod koniec ostatniego zlodowacenia. Oznacza to, że wody Matecznego są być może nadmiernie eksploatowane, gdyż eksploatacja zgodna z zasobami dynamicznymi nie powinna prowadzić do wyraźnej zmiany wieku wód. Jednak zmiana wód w kierunku większych wartości może być też związana ze zmianą kierunków przepływu, które niekoniecznie oznaczają nadmierną eksploatację (Zuber i in., 2007). W każdym przypadku zalecane są ostrożność i dalsze obserwacje prowadzone z rozsądną częstotliwością poboru próbek.

Glacialny wiek wód Matecznego i napięty charakter zwierciadła wody oznaczają ogólnie bardzo dobrą ochronę naturalną przed potencjalnymi zanieczyszczeniami antropogenicznymi, chociaż nie są całkowicie wolne od zagrożenia wskutek istnienia składowej współczesnej w dopływie do Geo-2A. Nie ulega wątpliwości, że woda mineralna Matecznego jest znacznie cenniejsza dla

celów pitnych niż kąpielowych. Do solanek kąpielowych należy raczej wykorzystywać sól z Wieliczki, a dla kąpeli siarczkowych powinny wystarczyć pobliskie Swoszowice.

Literatura

- Bogacz K., 1974: *Pozycja geologiczna złóż wód mineralnych Mateczny w Krakowie*. Spraw. z Pos. Kom. PAN, Oddz. w Krakowie, 17, 202-204.
- Chowaniec J., Felisiak I., 1995: *Sebha – geneza mineralizacji wód uzdrowiska Mateczny w Krakowie*. Tradycja a nowoczesność w interpretacjach sedimentologicznych. IV Krajowe Spotkanie Sedymetologów. Kraków, 60-61.
- Gradziński R., 1962: *Rozwój podziemnych form krasowych w południowej części Wyżyny Krakowskiej*. Roczn. Pol. Tow. Geol. 32, 429-492.
- Kleczkowski A., Myszka J., 1989: *Hydrogeologia Krakowa*. [w:] Przewodnik 60 Zjazdu Pol. Tow. Geol. (red.: Rutkowski J.). 14-16 IX 1998, Kraków: 162-180.
- Motyka J., Rajchel L., 2002: *Wody mineralne i akrotopegi*. [w:] Modelowe studium kompleksowego wykorzystania i ochrony surowców balneologicznych Krakowa i okolic (red.: Ney R.). IGSMiE PAN, Kraków, 11-27.
- Radwan J., Węclawik S., 1987: *Występowanie i ochrona wód mineralnych Mateczny w świetle badań geologicznych*. [w:] Problemy Ekologiczne Krakowa. O zdrową wodę dla Krakowa, Wyd. AGH. Kraków, 11: 9-15.
- Rajchel L., 1998: *Wody mineralne i akrotopegi Krakowa*. Przegląd Geologiczny, 46/11: 1139-1145.
- Rutkowski J., 1993: *Objaśnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski 1:50 000. Arkusz Kraków*, Państw. Inst. Geol., Warszawa, 1-46.
- Torosiewicz T., 1849: *Źródła mineralne w królestwie Galicyi i na Bukowinie, pod względem fizyczno-chemicznych własności opisane*. Instytut Narodowy Imienia Ossolińskich, Lwów, 173.
- Zuber A., Weise S.M., Motyka J., Osenbrück K., Róžański K., 2004: *Age and flow pattern of groundwater in a Jurassic limestone aquifer and related Tertiary sands derived from combined isotope, noble gas and chemical data*. J. Hydrol. 286, 87-112.
- Zuber A., Ciężkowski W., Róžański K., (2007) – *Metody znacznikowe w badaniach wód podziemnych – poradnik metodyczny*. Politechn. Wrocław., Wrocław.

Praca została zrealizowana w ramach badań statutowych AGH, nr umowy 11.11.140.890.