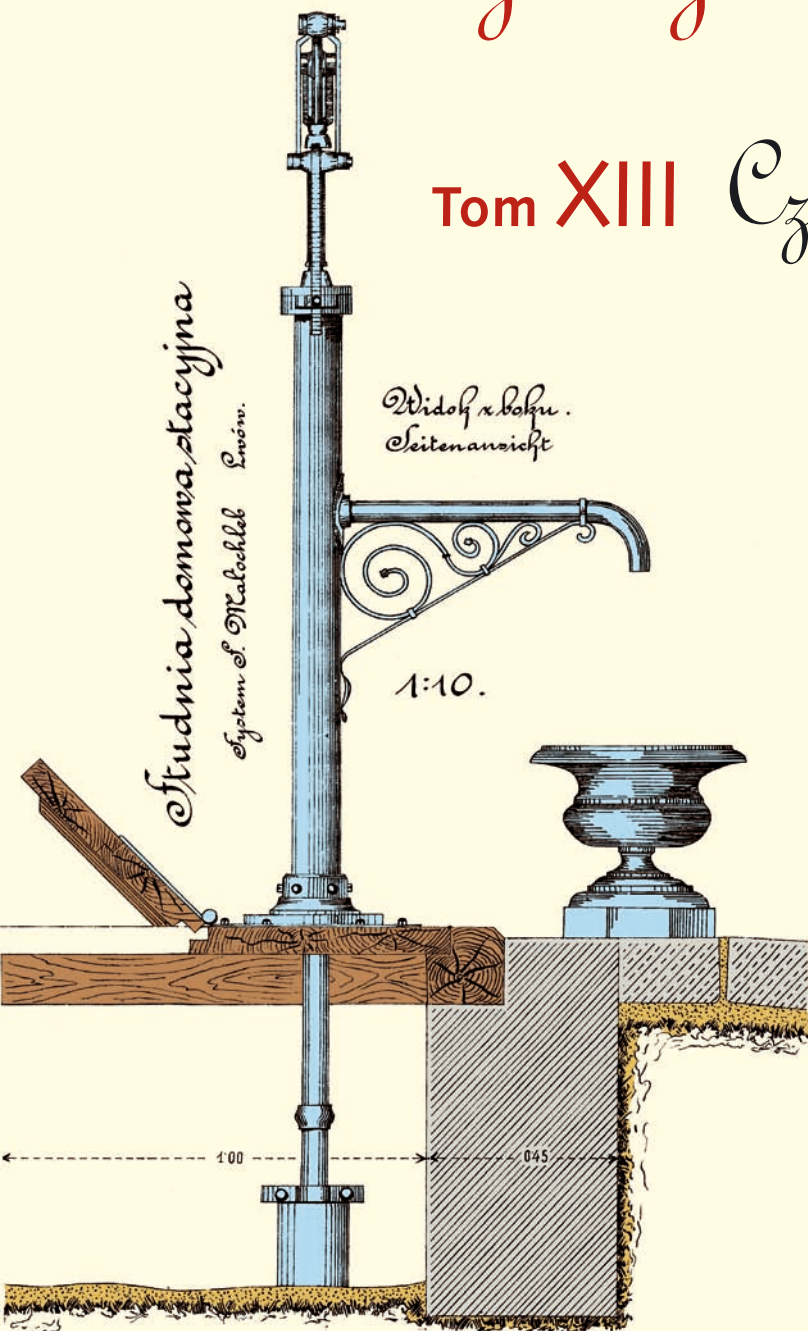


# Współczesne problemy hydrogeologii

Tom XIII Część 2.





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](http://www.pretext.com.pl)

Druk: ROMA-POL, [www.romapol.pl](http://www.romapol.pl)

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

**Andrzej Zuber**

## **Metoda helowa datowania wód podziemnych**

### **Groundwater Dating by Helium Method**

**Słowa kluczowe** Hel, datowanie wód, wody zwykłe, wody termalne, wody mineralne

**Key words** Helium, groundwater dating, fresh waters, thermal waters, mineral waters

**Abstract** Helium-4 excess is linearly correlated with  $^{14}\text{C}$  ages of thermal waters in gneisses of Łądek Spa and granites of Cieplice Spa, Polish Sudetes. In waters of the Triassic carbonates of the Upper Silesia, the concentrations of helium-4 excess can be interpreted in terms of ages using the position of glacial-Holocene transition within the aquifer, which was deduced from other tracer data. The helium dating method is more complex, though still very useful, for aquifers with elevated Cl contents.

Metoda helowa jest najwcześniej zaproponowanym sposobem datowania wód podziemnych, chociaż jej szerszy rozwój rozpoczął się dopiero w latach 70. ubiegłego wieku (Andrews, Lee, 1979; Torgersen, Clarke, 1985). W metodzie tej wykorzystywane jest nagromadzanie się  $^4\text{He}$ , będącego wynikiem emitowania cząstek  $\alpha$  przez jądra pierwiastków szeregów promieniotwórczych uranu i toru. Podobnie do  $^4\text{He}$ , również  $^{40}\text{Ar}$  będący rezultatem rozpadu promieniotwórczego  $^{40}\text{K}$  może być stosowany do datowania wód o wieku wyraźnie przekraczającym 10 ka (10 tys. lat). Zazwyczaj jednak stosunek  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  jest stosowany jakościowo w stosunku do wartości mierzonej w wodach młodych, wynikającej z równowagi z atmosferą, tzn. 295,5. Stężenia Ne, Ar, Kr i Xe służą do określania tzw. temperatury gazów szlachetnych (NGT) i nadmiaru rozpuszczonego powietrza. Obie te wielkości reprezentują warunki istniejące na zwierciadle wody w czasie jej zasilania (Mazor, 1972). Szczegóły metod gazów szlachetnych zostały opisane w szeregu pracach (np. Cook, Herzeg, 2000; Ballentine, Burnard, 2002; Zuber i in., 2007). W niniejszej pracy omówiono niektóre aspekty metody helowej na podstawie doświadczeń uzyskanych w ramach współpracy niemiecko-polskiej. Wszystkie analizy gazów szlachetnych zostały wykonane na Uniwersytecie w Heidelbergu i w Instytucie Hydrologii w Neuherbergu.

Stężenie He w czystej wodzie w równowadze z atmosferą w temperaturze  $10^\circ\text{C}$  i na poziomie morza wynosi  $4,64 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ STP g}^{-1}$ . Hel naturalny składa się z  $^3\text{He}$  i  $^4\text{He}$ , mających w atmosferze stosunek  $140 \cdot 10^{-8}$ . Dlatego, nadmiar He rozpuszczonego w wodzie ponad stężenie wynikające z kontaktu z atmosferą, może być w większości przypadków mierzony metodą chromatografii gazowej określającej całkowite stężenie helu. Najczęściej jednak mierzony jest  $^4\text{He}$  metodą spektrometrii masowej a nadmiar  $^4\text{He}$  wyrażany jest jako  $^4\text{He}_{\text{exc}} = ^4\text{He}_{\text{m}} - ^4\text{He}_{\text{eq}} - ^4\text{He}_{\text{exa}}$ , gdzie  $^4\text{He}_{\text{m}}$ ,  $^4\text{He}_{\text{eq}}$  i  $^4\text{He}_{\text{exa}}$  są odpowiednio stężeniem mierzonym, w równowadze z atmosferą dla danej temperatury i wysokości nad poziomem morza, i wynikającym z nadmiaru rozpuszczonego powietrza.

Wzór (1) pozwala określić wiek wody przy założeniu jego pochodzenia zarówno z wytwarzania *in situ* jak i z dopływu z głębszych warstw (jest to strumień ze skorupy odróżniany od strumienia z magmy) oraz przy założeniach równomiernego rozkładu He w profilu warstwy wodonośnej i braku dyfuzyjnej ucieczki (Torgersen, Ivey, 1985):

$$^4\text{He age} = ^4\text{He}_{\text{exc}} \cdot nh\rho_f / (J_{\text{He}} + nh\rho_f \Lambda P) \quad (1)$$

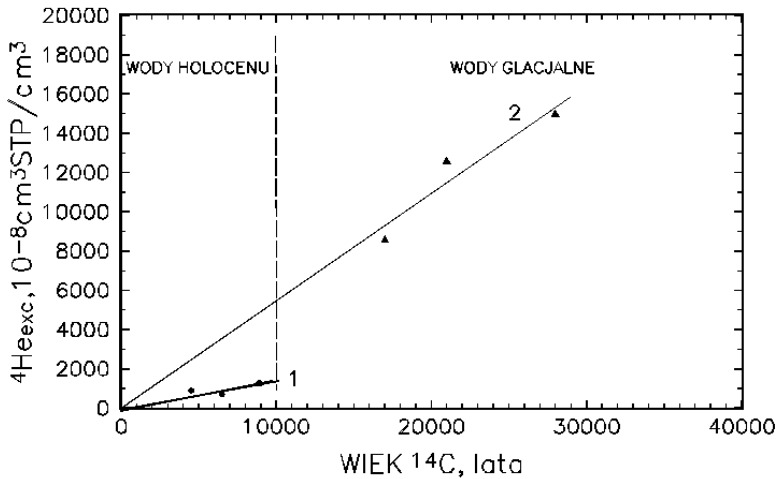
gdzie:  $n$  — całkowity współczynnik połączonej porowatości;  $h$  — miąższość warstwy wodonośnej,  $J_{\text{He}}$  — zewnętrzny strumień netto  $^4\text{He}$  do warstwy wodonośnej;  $\rho_f$  — gęstość wody,  $\Lambda$  — współczynnik uwalniania się  $^4\text{He}$  ze skały i  $P$  — wytwarzanie (produkcja) *in situ*.

Zazwyczaj przyjmuje się  $\Lambda = 1$ , chociaż według Solomona i in. (1996) uwalnianie się  $^4\text{He}$  nagromadzonego w ziarnach materiału warstwy wodonośnej może trwać nawet do 50 milionów lat po zakończeniu ich wcześniejszej historii geologicznej w postaci litej skały. Wytwarzanie *in situ* w  $\text{cm}^3 \text{ STP g}^{-1} \text{ rok}^{-1}$  jest obliczane ze wzoru (2) dla stężeń uranu ( $C_U$ ) i toru ( $C_{Th}$ ) wyrażonych w ppm ( $10^{-6} \text{ g/g}$ ).

$$P_{\text{He}} = (\rho_r/n)(1,19 \cdot 10^{-13} C_U + 0,288 \cdot 10^{-13} C_{Th}) \quad (2)$$

gdzie  $\rho_r$  — gęstość materiału skalnego.

Strumień skorupowy  $^4\text{He}$  wynosi zwykle  $(0,2\pm 8,2)\cdot 10^{-6}$  ze średnią wartością  $2,4\cdot 10^{-6}$   $\text{cm}^3 \text{STP cm}^{-2}\text{a}^{-1}$ , chociaż inne wartości są także podawane. Metoda He obejmuje znacznie szerszy zakres wieków niż inne metody, chociaż jej dokładność silnie zależy od prawidłowej oceny wpływu szeregu parametrów. Dolny próg wynosi najczęściej  $100\pm 300$  lat, chociaż nawet wiek wynoszący 10 lat jest czasem możliwy do określenia (Solomon i in., 1996). Górny zakres jest teoretycznie nieograniczony, ale w praktyce wynosi on kilka milionów lat z powodu możliwej ucieczki dyfuzyjnej helu.



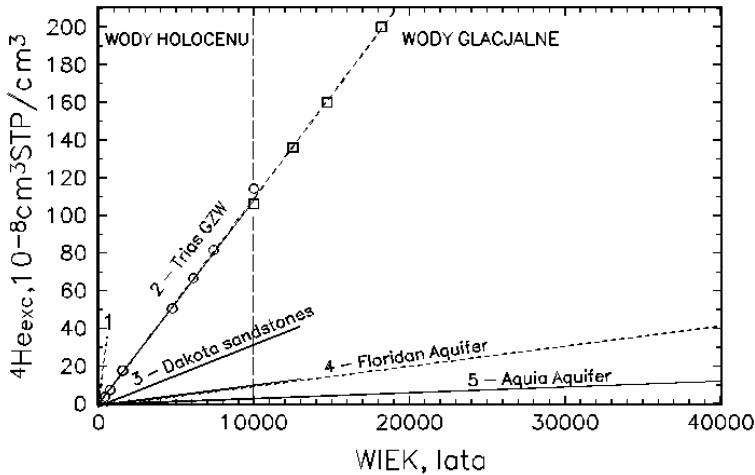
**Rysunek 1.** Stężenia  $^4\text{He}_{\text{exc}}$  w wodach termalnych Lądka (linia 1) i Cieplice (linia 2) w funkcji wieków  $^{14}\text{C}$ . Dane oryginalne wg Ciężkowskiego i in. (1992) i Zuber i in. (1995)

**Figure 1.**  $^4\text{He}_{\text{exc}}$  contents in thermal waters of Lądek (1) and Cieplice (2) versus  $^{14}\text{C}$  ages

Przykłady zależności  $^4\text{He}_{\text{exc}}$  od wieków określonych metodą  $^{14}\text{C}$  dla przepływu tłokowego z poprawką Pearsona (Zuber i in., 2007) pokazane są na rysunku 1. Holocenijski wiek wód termalnych Lądka określony metodą  $^{14}\text{C}$  został potwierdzony wartościami  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$  i NGT oczekiwanymi dla postulowanej wysokości obszaru zasilania (Zuber i in., 1995). Również zmierzone wartości stosunku  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  bliskie 295,5 wykluczyły wiek holocenijski. Zupełnie inna sytuacja istnieje w Cieplicach, gdzie hipoteza dotycząca glacialnego wieku wód termalnych wysunięta była wcześniej na podstawie oznaczeń  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$  i  $^{14}\text{C}$  (Ciężkowski i in., 1985). Jednak dopiero metody gazów szlachetnych dały wiarygodne potwierdzenie tej hipotezy (Ciężkowski i in., 1992; Zuber i in., 1995), gdyż wartości NGT były zgodne z interpretacją klimatyczną oznaczeń  $\delta^{18}\text{O}$  i  $\delta^2\text{H}$ , a wysokie stężenia  $^4\text{He}_{\text{exc}}$  (rys. 1) i wartości stosunku  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  wynoszące 301 do 302 wykluczyły wiek holocenijski tych wód postulowany przez niektórych polskich autorów.

Przykłady stężeń  $^4\text{He}_{\text{exc}}$  obserwowanych w kilku innych systemach pokazane są na rysunku 2, gdzie linie reprezentują w przybliżony sposób punkty doświadczalne, mające nieraz znaczne rozrzuty. Pouczający jest przykład północnego GZW, gdzie metoda  $^{14}\text{C}$  była niewiarygodna ze względu na duży wpływ wymiany izotopowej z minerałami węglanowymi. Położenie linii 2 zostało określone przez punkty reprezentujące wieki współczesne (znacząc-

ne stężenia trytu) na obszarze zasilania i wartości  ${}^4\text{He}_{\text{exc}}$  w dwóch pobliskich otworach w głębi systemu, wynoszących ok.  $110 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ STP g}^{-1}$  (Zuber i in., 2005). Przy czym wartości  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$  i NGT w jednym z otworów wskazywały na zasilanie w klimacie holocenu, a w drugim z otworów na zasilanie w zimniejszym klimacie, co pozwoliło przyjąć podaną wartość  ${}^4\text{He}_{\text{exc}}$  jako odpowiadającą granicy glacjał-holocen (przyjęto 10 ka). Punkty pokazane na rysunku 2 pokazują wieki przypisywane wodom w poszczególnych otworach przy tej interpretacji stężeń  ${}^4\text{He}_{\text{exc}}$ .



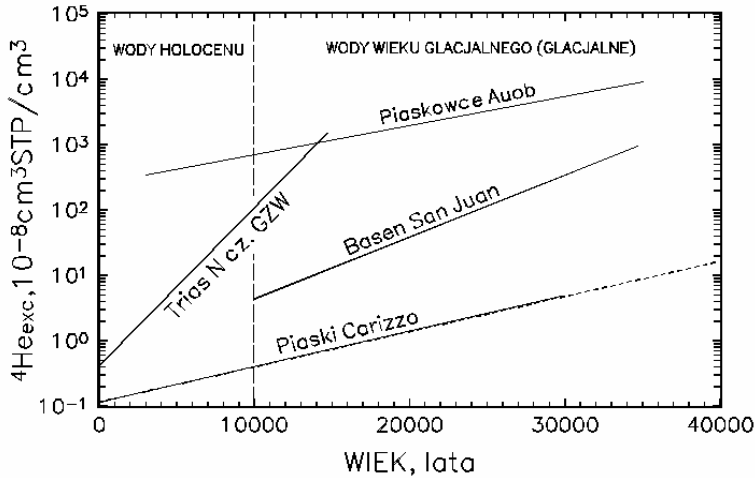
**Rysunek 2.**  ${}^4\text{He}_{\text{exc}}$  w funkcji wieku określonego dla kilku systemów wodonośnych różnymi metodami wg Zuber i in. (2007), dane oryginalne wg Aeschbach-Hertig i in. (2002), Clark i in. (1997, 1998) i Zuber i in. (2005) (linie reprezentują w przybliżeniu położenie danych).  
Objaśnienia: 1 – ekstrapolowane dane kilku systemów piaskowatych zawierających wody współczesne (wg Solomon i in., 1996)

**Figure 2.**  ${}^4\text{He}_{\text{exc}}$  versus ages estimated with the aid of different methods for several groundwater systems (lines represent scattered data in a simplified way).  
Explanation: 1 – extrapolated data of several sandy aquifers with modern waters.

W jednym z otworów triasu GZW, wartości  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$  i NGT wskazywały na zasilanie w okresie zlodowacenia, a stężenie  ${}^4\text{He}_{\text{exc}}$  wyniosło aż  $1\,860 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ STP g}^{-1}$ , co według rysunku 2 daje nieprawdopodobnie duży wiek (wyraźnie ponad  $>100$  ka; punkt poza skalą), zwłaszcza biorąc pod uwagę wartość  ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$  wynoszącą ok. 295,5. Jednak dane literaturowe niektórych systemów sugerują możliwość liniowej zależności  ${}^4\text{He}_{\text{exc}}$  w skali logarytmicznej od wieku (rys. 3). Wtedy, stężeniu  ${}^4\text{He}_{\text{exc}}$  w omawianym otworze odpowiada wiek ok. 14,5 ka, a wieki w innych otworach są wskazane przez wartości mierzonych stężeń pokazane na rysunku 2 przeniesione na rysunek 3.

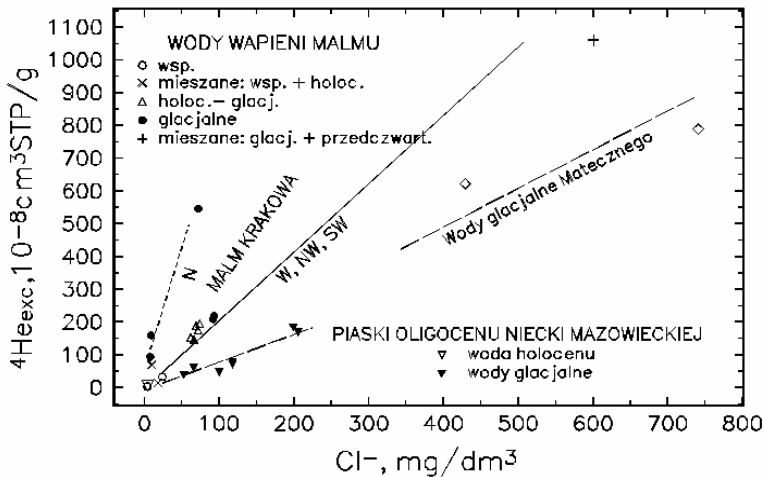
W systemach z podwyższonymi stężeniami Cl<sup>-</sup> obserwuje się często liniowe zależności Cl<sup>-</sup>- ${}^4\text{He}_{\text{exc}}$  (Lehman i in., 1995). Podobne zależności obserwuje się także wapieniach malmu i być może w piaskach trzeciorzędowych Matecznego w rejonie Krakowa oraz w piaskach oligocenu niecki mazowieckiej (rys. 4), gdzie poza wodami Matecznego metoda  ${}^{14}\text{C}$  nie dała jednoznacznych rezul-

tatów (Zuber et al. 2000, 2004, 2007). Te same dane pokazane są na rysunku 5 w skali logarytmicznej razem z wodami mineralnymi Buska Zdroju. Dane z Łądką i Cieplic (rys. 1) oraz z węglanowego triasu północnego GZW (rys. 2) są pominięte na tym rysunku.



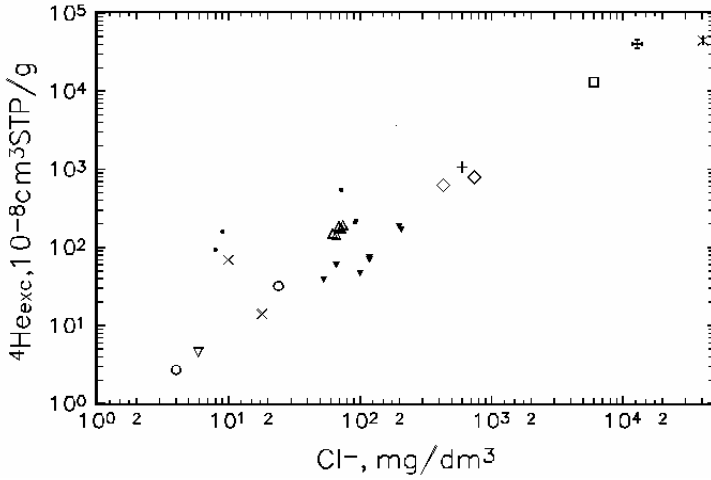
**Rysunek 3.** Przykłady logarytmicznej zależności  ${}^4\text{He}_{\text{exc}}$  od wieków (Zuber i in., 2007; dane oryginalne wg Castro i in., 2000; Zuber i in., 2005)

**Figure 3.** Examples of logarithmic dependences of  ${}^4\text{He}_{\text{exc}}$  on ages



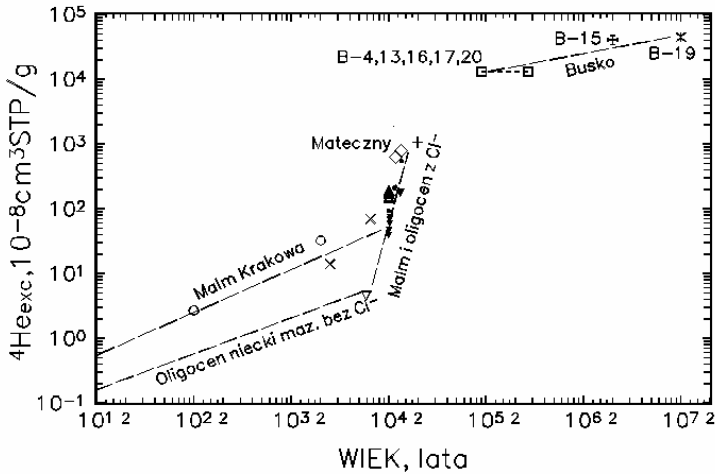
**Rysunek 4.** Przykłady liniowych zależności  $\text{Cl}^-$ - ${}^4\text{He}_{\text{exc}}$  w wodach o podwyższonych stężeniach  $\text{Cl}^-$  (dla wapieni malmu Krakowa w zależności od kierunku napływu)

**Figure 4.** Examples of linear  $\text{Cl}^-$ - ${}^4\text{He}_{\text{exc}}$  relations for waters with elevated  $\text{Cl}^-$  concentrations (for Cracow Malm limestones in dependence on inflow direction)



**Rysunek 5.** Zależności  $\text{Cl}^-$ - ${}^4\text{He}_{\text{exc}}$  w skali logarytmicznej dla wybranych wód obszaru Polski z podwyższonymi stężeniami  $\text{Cl}^-$  (symbole jak na rys. 4 i 6)

**Figure 5.**  $\text{Cl}^-$ - ${}^4\text{He}_{\text{exc}}$  relations shown in logarithmic scales for selected waters in Poland with elevated  $\text{Cl}^-$  concentrations (symbols as in Figs 4 and 6)



**Rysunek 6.** Stężenia  ${}^4\text{He}_{\text{exc}}$  w wodach o podwyższonych stężeniach  $\text{Cl}^-$  dla szerokiego zakresu wieków oszacowanych różnymi metodami (Zuber i in., 2007)

**Figure 6.**  ${}^4\text{He}_{\text{exc}}$  contents in systems with elevated and high  $\text{Cl}^-$  contents for wide ranges of ages estimated by different tracer methods

Korelacje pokazane na rysunkach 4 i 5 sugerują, że w wielu systemach  $\text{Cl}^-$  i  ${}^4\text{He}_{\text{exc}}$  mogą mieć podobne pochodzenie, co może utrudniać datowanie. Jednak i wtedy datowanie jest możliwe, sądząc z rysunku 6, gdzie te same wartości  ${}^4\text{He}_{\text{exc}}$  pokazano w funkcji wieku



określonego mniej lub bardziej dokładnie różnymi metodami. Wieki wód mineralnych Buska Zdroju, oszacowane ze stężeń  $^4\text{He}_{\text{exc}}$  i  $^{40}\text{Ar}$ , okazały się zgodne z wartościami  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$  i NGT sugerującymi zasilanie interglacjalne i przedplejstoceńskie (Zuber et al., 1997).

W konkluzji można stwierdzić, że metoda helowa powinna być bardzo przydatna w datowaniu wód zwykłych i mineralnych w bardzo szerokim zakresie wieków, zarówno przy wykonywaniu analiz metodą spektrometrii masowej jak i chromatografii gazowej.

## Literatura

- Aeschbach-Hertig W., Stute M., Clark J., Reuter R., Schlosser P., 2002: *A paleotemperature record derived from noble gases in groundwater of the Aquia Aquifer (Maryland, USA)*, Geochim. Cosmochim. Acta 66, 797-817.
- Andrews J.N., Lee D.J., 1979: *Inert gases in groundwater from the Bunter Sandstone of England as indicators of age and paleoclimatic trends*. J. Hydrol. 41, 233-252.
- Ballentine C.J., Burnard P.G., 2002: *Production release and transport of noble gases in the continental crust*. [in:] Noble Gases in Geochemistry and Cosmochemistry (red.: Porcelli D., Ballentine C.J., Wieler R.). Reviews in Mineralogy and Geochemistry 47, Mineralogical Society of America, Washington DC, 481-538.
- Castro M.C., Stute M., Schlosser P., 2000: *Comparison of  $^4\text{He}$  ages and  $^{14}\text{C}$  ages in simple aquifer systems: implications for groundwater flow and chronologies*. Appl. Geochem. 15, 1137-1167.
- Ciężkowski W., Grabczak J., Zuber A., 1985: *Pochodzenie wód termalnych Cieplic Śląskich Zdroju i ich eksploatacja w świetle badań izotopowych*. [w:] Aktualne problemy hydrogeologii. Wyd. AGH, Kraków, 225-231.
- Ciężkowski W., Gröning M., Leśniak P.M., Weise S.M., Zuber A., 1992: *Origin and age of thermal waters in Cieplice Spa, Sudeten, Poland, inferred from isotope, chemical and noble gas data*. J. Hydrol. 140, 89-117.
- Clark J.F., Stute M., Schlosser P., Drenkard S., Bonani G., 1997: *A tracer study of the Floridan aquifer in southeastern Georgia: Implications for groundwater flow and paleoclimate*. Water Resour. Res. 33, 281-289.
- Clark J.F., Davisson M.L., Hudson G.B., Macfarlane P.A., 1998: *Noble gases, stable isotopes, and radiocarbon as tracers of flow in the Dakota aquifer, Colorado and Kansas*. J. Hydrol. 211, 151-167.
- Cook P.G., Herczeg A.I. (Eds), 2000: *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology*. Kluwer Acad. Publ., Boston.
- Lehmann B.E., Loosli H.H., Purtschert R., Andrews J.N., 1995: *A comparison of chloride and helium concentrations in deep groundwaters*. [in:] Isotopes in Water Resources Management, Vol. 1. IAEA, Vienna, 3-17.
- Mazor E., 1972: *Paleotemperatures and other hydrological parameters deduced from noble gases dissolved in groundwaters, Jordan Rift Valley, Israel*. Geochim. Cosmochim. Acta 36, 1321-1336.
- Porcelli D., Ballentine C.J., Wieler R. (Eds), 2002: *Noble Gases in Geochemistry and Cosmochemistry*, Reviews in Mineralogy and Geochemistry 47, Mineralogical Society of America, Washington DC.

- Solomon D.K., Hunt A., Poreda J., 1996: *Source of radiogenic helium 4 in shallow aquifers: implications for dating young groundwater*. Water Resour. Res. 32, 1805-1813.
- Torgersen T., Clarke W.B., 1985: *Groundwater dating with helium isotopes, I. An evaluation of sources and the continental flux of crustal  $^4\text{He}$  in the Great Artesian Basin, Australia*. Geochim. Cosmochim. Acta 49, 1211-1218.
- Torgersen T., Ivey G.N., 1985: *Helium accumulation in groundwater II: A model for the crustal  $^4\text{He}$  degassing flux*. Geochim. Cosmochim. Acta 49, 2425-2452.
- Zuber A., Weise S.M., Osenbrück 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.
- Zuber A., Weise S.M., Osenbrück K., Mateńko T., 1997: *Origin and age of saline waters in Busko Spa (southern Poland) determined by isotope, noble gas, and hydrochemical methods: Evidence of interglacial and pre-Quaternary recharge*. Appl. Geochem. 12, 643-660.
- Zuber A., Weise S.M., Osenbrück K., Pajnowska H., Grabczak J., 2000: *Age and recharge pattern of the Mazovian basin (Poland) as indicated by environmental tracers*. J. Hydrol. 233, 174-188.
- Zuber A., Weise S.M., Motyka J., Osenbrück K., Różański K., 2004: *Age and flow pattern of groundwater in a Jurassic limestone aquifer and related Tertiary sands derived from isotope, noble gas and chemical data*. J. Hydrol. 286, 87-112.
- Zuber A., Osenbrück K., Weise S.M., Kowalczyk A., Rubin K., 2005: *Rezultaty badań gazów szlachetnych w GZWP-327, Lubliniec-Myszków*. [w:] Hydrogeologia obszarów zurbanizowanych i uprzemysłowionych, t. 2 (red. Kowalczyk A., Rózkowski A.). Prace Wydz. Nauk o Ziemi UŚ, nr 37, 2005, 189-196.
- Zuber A., Ciężkowski W., Różański K., 2007: *Metody znacznikowe w hydrogeologii – poradnik metodyczny*. Politechnika Wrocławska. Wrocław.