

Zawartość trytu i skład izotopowy tlenu w płytkich wodach podziemnych w punktach badawczych krajowej sieci monitoringu

Zbigniew Nowicki¹, Paweł M. Leśniak¹, Andrzej Wilamowski¹

Tritium content and oxygen isotopic composition in shallow groundwater in observation points of the national monitoring network. Prz. Geol., 63: 976–980.

Abstract: The points of the national network of groundwater monitoring comprise a stable benchmarks in quality and quantity monitoring. The obtained data (tritium and $\delta^{18}O$) are important for understanding the groundwater cycling and are indirect indicators of aquifer vulnerability to anthropogenic pollution. The goal of this paper is to present the relation of the tritium content and delta value of stable isotopes of oxygen against the groundwater sampling depth in 2004–2012. It is demonstrated that the remains of “nuclear” tritium concentration is still present in groundwater as a tritium peak at depths around 30 m. Determination of dynamics of recharge in groundwater bodies, based on national network observation points is associated to the estimation of the groundwater residence time in aquifers and remains one the vital problem of hydrogeology.

Keywords: tritium, stable isotopes, residence time, shallow groundwater

W ocenie stanu wód podziemnych niezwykle ważnym elementem w interpretacji wyników danych hydrogeologicznych jest informacja o „wieku” tych wód, zwanym również czasem przepływu wody w warstwie wodonośnej, w stanie ustalonym lub okresem pobytu cząsteczki wody w warstwie wodonośnej (Dowgiałło & Nowicki, 2000). Jest on fundamentalnym parametrem określającym charakter przepływu podziemnego wód. Bezpośrednim wskaźnikiem „wieku” wód współczesnych (do 60 lat) oraz wskaźnikiem wrażliwości warstwy wodonośnej na zanieczyszczenie antropogeniczne jest zawartość trytu (Felter & Nowicki, 1997).

W Polsce badania hydrogeologiczne z wykorzystaniem oznaczeń trytowych jako znacznika środowiska wodnego rozpoczęły się już w pierwszej połowie lat 60. XX w. (Florkowski, 1964; Krotowicz, 1968). Początkowo wzbudzały one ogromne zainteresowanie, a czasami wręcz entuzjizm w hydrogeologicznych ośrodkach naukowych i badawczo-rozwojowych. Działo się tak ze względu na unikatowe (uprzednio niedostępne) możliwości zastosowania tej metody do wyznaczania dróg przepływu wód podziemnych oraz określania parametrów hydrodynamicznych, jak choćby rzeczywiste prędkości przepływów między punktami obserwacyjnymi, czy „wiek” wód podziemnych. W następnych latach napotkano jednak trudności interpretacyjne głównie ze względu na stopień skomplikowania budowy geologicznej strefy przypowierzchniowej w Polsce oraz oscylacyjny charakter i zmienność stężeń trytu w opadach atmosferycznych, przyjmowanej w modelach obliczeniowych jako funkcja wejścia znacznika (trytu) do systemu wodonośnego. Mimo tych trudności, metoda trytowa była i jest z powodzeniem stosowana w bardzo wielu badaniach hydrogeologicznych, choć pojawiały się również opinie, że „rola trytu w określaniu wieku wód zmniejsza się z każdym rokiem wraz z rozpadem wielkich ilości tego radionuklidu, jakie dostały się do wód podziemnych w związku z próbami jądrowymi dokonywanymi w atmosferze na początku lat 60. XX wieku” (Dowgiałło i in., 2002).

Obecnie średnie stężenie trytu w opadach atmosferycznych na terenie Polski wynosi 10,7 T.U. (średnia ważona) przy niewielkiej zmienności sezonowej wynoszącej ok. 1,0 T.U. (Duliński i in., 2014), co oznacza, że wartość ta praktycznie wróciła do poziomu sprzed okresu prób nuklearnych (lata 1953–1954). W opinii autorów sytuacja ta powoduje, że rola trytu w określaniu wieku wód wzrasta z każdym rokiem, choćby ze względu na znaczne uproszczenie funkcji wejścia, którą można traktować teraz jako iniekcję planarną i stałą w czasie.

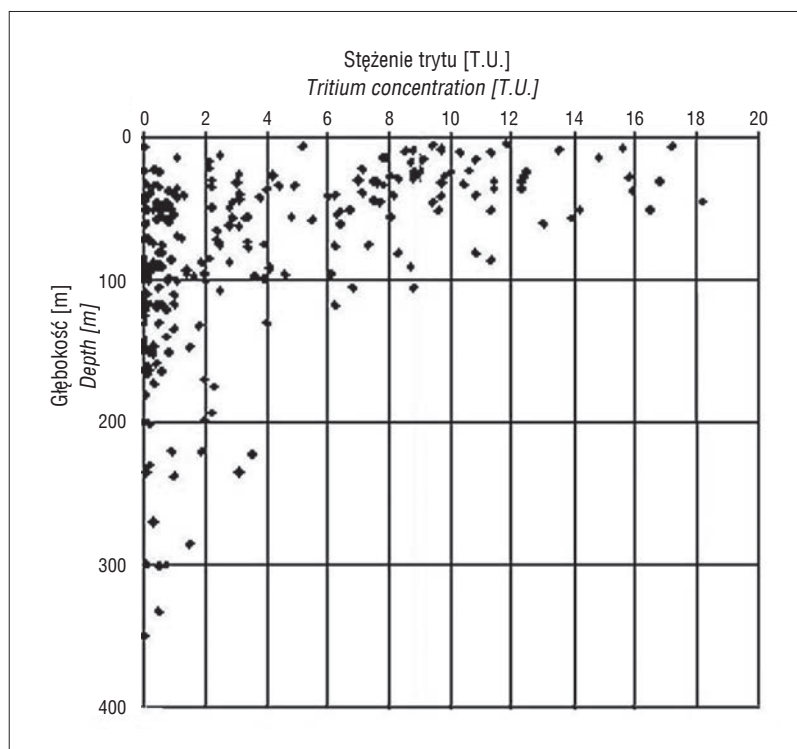
BADANIA TRYTOWE W LATACH 2004–2006

W latach 2004–2006, w ramach działalności państwowej służby hydrogeologicznej, wykonano niemal 600 oznaczeń trytu w wodach podziemnych (Nowicki, 2004, 2005, 2006) odnotowanych w punktach sieci obserwacji hydrogeologicznych (SOH) oraz w wybranych punktach monitoringu sieci krajowej, opróbowywanych w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska (PMS). Ogółem opróbowano ponad 300 punktów obu sieci.

Punkty SOH jako punkty obserwacyjne poziomu zwierciadła wód podziemnych nie były eksploatowane natomiast w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska, którego zadaniem była ocena chemizmu wód podziemnych (i jego zmian) na terenie Polski, pobierano próbki również z pracujących ujęć wód podziemnych oraz stref odwodnień. Wyniki oznaczeń w sieciach SOH i PMS w funkcji średniej głębokości zafiltrowania warstwy wodonośnej przedstawiono na rycinie 1.

Zasięg głębokościowy występowania trytu powyżej poziomu oznaczalności ($\pm 0,5$ T.U.) w wodach podziemnych w Polsce, stwierdzony na podstawie badań monitoringowych, nie przekracza 400 m. Należy tu jednak przypomnieć, że największa głębokość w Polsce, na której stwierdzono występowanie trytu, dotyczyła otworu Zakopane IG 1, w którym wydobywano wody z głębokości ponad 1600 m (Nowicki & Sołtyk, 1973; Małecka & Nowicki,

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; zbigniew.nowicki@pgi.gov.pl, pawel.lesniak@pgi.gov.pl, andrzej.wilamowski@pgi.gov.pl.



Ryc. 1. Stężenia trytu w wodach podziemnych w funkcji średniej głębokości zafiltrowania w punktach opróbowanych w latach 2004–2006

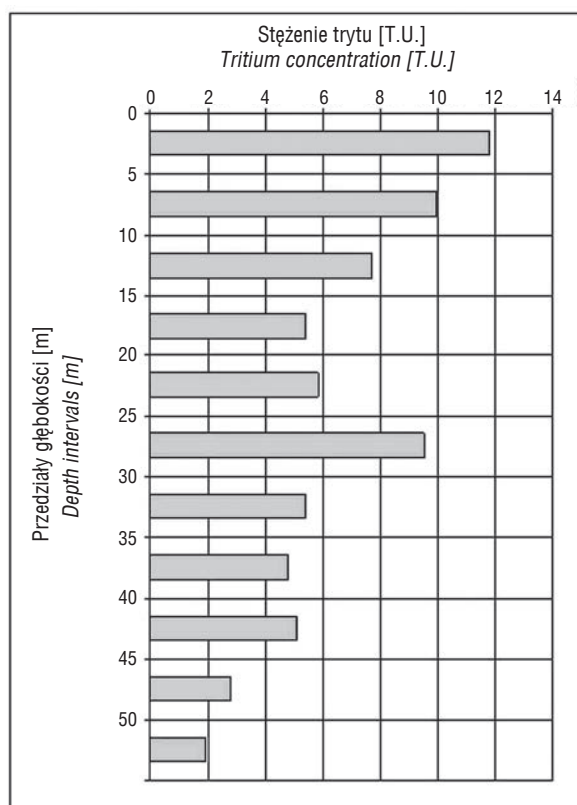
Fig. 1. Tritium content as a function of average of filter depth in the sampling points in the time span of 2004–2006

2002). Rozkład głębokościowy uzyskany z badań w latach 2004–2006, a przedstawiony na rycinie 1, obejmuje wyniki oznaczeń trytu w wodach podziemnych pochodzących, jak to uprzednio wskazano, zarówno z otworów eksploatacyjnych, jak i odwodnień, co oczywiście oznacza, że jest to

obraz uwzględniający wpływy o charakterze antropogenicznym w strefach wymuszonego dopływu. Dlatego też szczególnie interesujący rozkład stężeń trytu wraz z głębokością (ryc. 2) przedstawiono dla zbioru wyników dotyczących otworów obserwacyjnych poziomego zwierciadła wód podziemnych sieci obserwacji hydrogeologicznych PIG-PIB, a więc studni nieeksploatowanych i pozostających poza oddziaływaniem eksploatacji. Na rycinie 2 widać, że frekwencja w poszczególnych przedziałach wynosiła od 12 do 20 wyników.

Zasięg głębokościowy występowania trytu w stężeniach mierzalnych ($>0,5$ T.U.) w studniach nieeksploatowanych nie przekracza 55 m. Najwyższe średnie stężenia trytu, o wartościach zbliżonych do średnich rocznych stężeń ^3H w opadach atmosferycznych, występują na głębokościach najmniejszych (do ok. 20 m). To dość oczywista prawidłowość, bowiem tryt naturalny w strefie przy powierzchniowej jest izotopem wyłącznie atmosferycznym (kosmogogenicznym i antropogenicznym). Na głębokościach ok. 30 m występuje niewielki wzrost średnich wartości stężeń ^3H , co jest zapewne pozostałością po infiltracji w okresach prowadzenia prób z bronią jądrową (głównie lata 1962–1963).

Rozkład występowania trytu wraz z głębokością przy uwzględnieniu czasu połowicznego rozpadu tego izotopu pozwala postawić tezę (Nowicki, 2010), że średni (!) czas wymiany wód podziemnych w warunkach naturalnych do



Ryc. 2. Średnie stężenia trytu w sieci SOH w przedziałach głębokości co 5 m w latach 2004–2006

Fig. 2. Average tritium concentration in samples taken from the SOH observational network in every 5 m division depth in the time span of 2004–2006

głębokości 50–60 m na terenie Polski wynosi około 60 lat. Przyjmując, że wzrost stężeń trytu na głębokościach 30–40 m jest związany z jego dopływem w okresie prowadzenia prób z bronią jądrową, średni czas wymiany wód w tym przedziale głębokości wynosi ok. 50 lat. To niezwykle ważna informacja dająca pogląd na dynamikę odnawialności wód podziemnych w naszym kraju oraz na skalę ich zagrożenia zanieczyszczeniami antropogenicznymi. Należy również brać pod uwagę to, że przedstawiony rozkład stężeń trytu odnosi się do wartości średnich w skali całego kraju, co oznacza, że w skali lokalnej zjawisko to może przebiegać nieco inaczej lub nie być obserwowane.

Warto w tym miejscu zaznaczyć, że opisany powyżej rozkład głębokościowy średnich zawartości trytu jest efektem wielu procesów, np. mieszania z wodami beztrytowymi, rozpad znacznika, dyspersja w trakcie przepływu itd. Oznacza to, że nie można w tym przypadku stosować prostych modeli obliczeniowych typu *piston flow* (przepływ tłokowy). Przedmiotem analizy jest układ znacznikowy typu krzywa wejścia (*input*) – krzywa obserwowana (*output*).

BADANIA TRYTOWE I SKŁADÓW IZOTOPÓW TLENU W 2012 r.

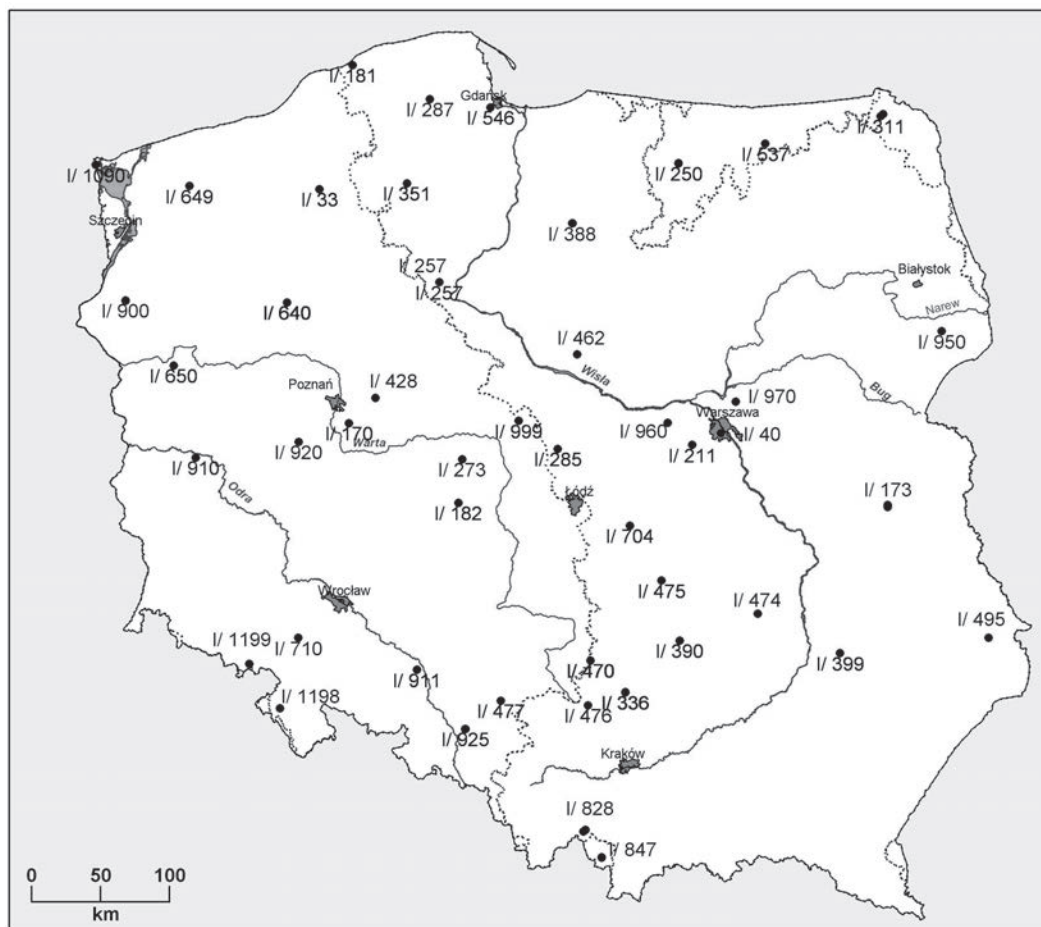
Celem badań było określenie dynamiki zasilania wód podziemnych w punktach monitoringu JCWPd (jednolitych części wód podziemnych) i określenie podatności

obserwowanych warstw wodonośnych na zanieczyszczenie na podstawie oznaczeń stężeń trytu i składu izotopów trwałych tleniu i wodoru (Leśniak i in., 2015). Zagadnienie to jest związane m.in. z określeniem czasu wymiany wód podziemnych. Badania przeprowadzono w 37 stacjach hydrogeologicznych krajowej sieci monitoringu – ich lokalizację przedstawiono na rycinie 3.

Do badań trytowych w 2012 r. wybrano płytkie otwory w obrębie stacji hydrogeologicznych tak, żeby reprezentowały strefę o największym wskaźniku odnawialności wód podziemnych. Jest to również strefa największych zmian stężeń trytu i wartości $\delta^{18}\text{O}$, wynikających z mieszania się wód infiltrujących w różnych porach roku. Otrzymane wyniki rozkładu stężeń trytu wraz z głębokością przedstawiono na rycinie 4.

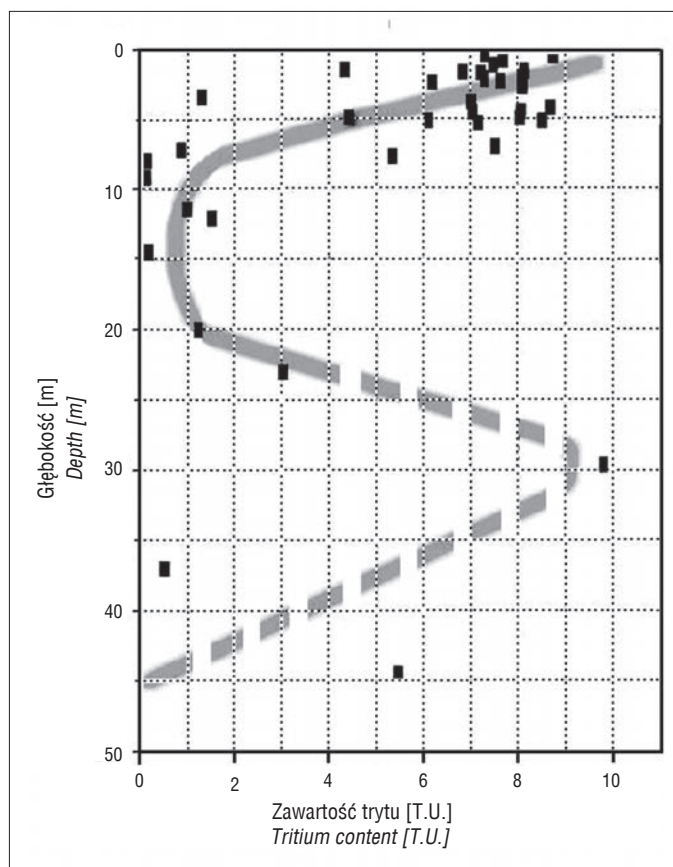
Rozkład stężeń trytu uzyskany na podstawie badań przeprowadzonych w 2012 r. jest zbliżony z obserwacjami z lat 2004–2006, a pozostałość po infiltracji z początku lat 60. XX w. prawdopodobnie nadal jest widoczna w wodach podziemnych jako wzrost zawartości trytu na głębokości ok. 30 m. Należy podkreślić, że obraz ten jest rozpoznawalny mimo różnych lokalizacji i dat poboru próbek oraz różnej liczebności zbiorów przyjętych do analizy. Uściślenie przebiegu krzywej trytowej, zwłaszcza w strefie głębokości 25–50 m, nastąpi po opracowaniu ponad 200 wyników oznaczeń z 2014 r.

Pozostałość po okresie prób z bronią jądrową, w postaci piku stężeń występującego na głębokości ok. 30–40 m, ma



Ryc. 3. Lokalizacja stacji hydrogeologicznych I rzędu krajowej sieci monitoringu wód podziemnych opróbowanych w 2012 r.

Fig. 3. Location of hydrogeological station of national monitoring network of the first order sampled in 2012



Ryc. 4. Stężenia trytu w funkcji głębokości w wybranych otworach stacji hydrogeologicznych I rzędu (2012 r.)

Fig. 4. Tritium content as a function of depth sampling in selected hydrogeological stations of the first order in 2012

charakter efemeryczny i za kilkanaście lat będzie już praktycznie niezauważalna w wyniku naturalnego rozpadu ^3H .

Analizując wyniki oznaczeń wartości $\delta^{18}\text{O}$, stwierdzono wyraźne zróżnicowanie, związane z oddziaływaniem efektu kontynentalnego przy (na ogół) dobrej zgodności z mapą składu izotopowego wód infiltrujących na terenie Polski przedstawioną przez d'Obyrna i in. w 1997 r. Głównym zadaniem w tym przypadku było jednak wychwytenie efektu sezonowego, który lokalnie umożliwia datowanie wód podziemnych w przedziale czasu poniżej 1 roku. Na terenie Polski zmienność wartości $\delta^{18}\text{O}$ w ciągu roku w opadach jest bardzo wyraźna i wynosi:

- maksimum letnie, $\delta^{18}\text{O}$ zazwyczaj mieści się w przedziale od -7 do -5‰ ;
- minimum zimowe, $\delta^{18}\text{O}$ zazwyczaj mieści się w przedziale od -18 do -15‰ ;
- przy wartościach średnich, rocznych dla Polski Centralnej od $-10,2$ do $-9,8\text{‰}$.

Efekt sezonowy zaobserwowano jedynie w kilku otworach, mimo że w profilu opróbowania ponad 50% otworów miała głębokość mniejszą niż 10 m, a poziom wodonośny nie był izolowany od powierzchni terenu. Przykład, w którym zmiany sezonowe sięgały 2 promili przedstawiono na rycinie 5.

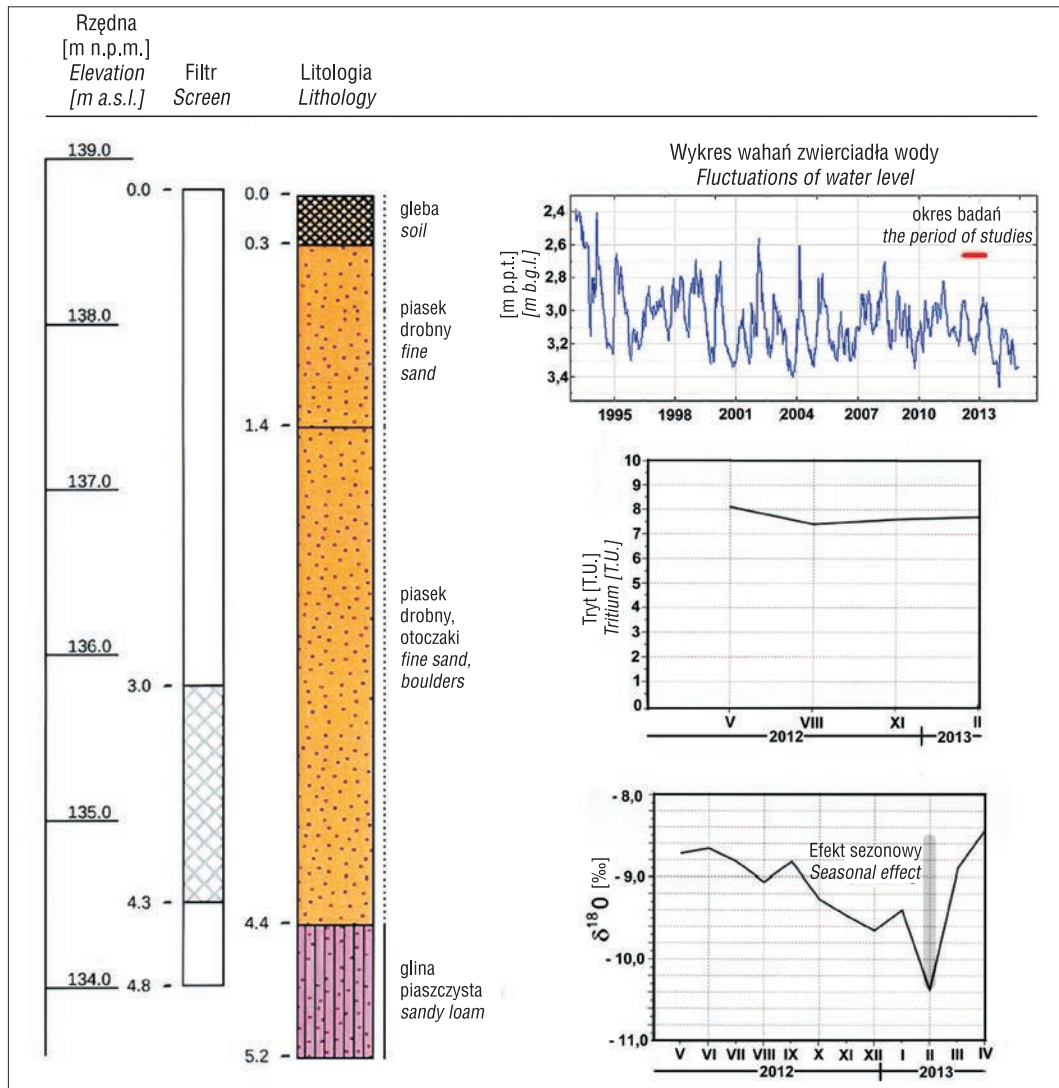
W przedstawionym powyżej przykładzie jest wyraźnie widoczny natychmiastowy dopływ wód roztopowych w lutym 2013 r., obniżający wartość delty tlenowej do poziomu

$-10,4\text{‰}$, przy wartości średniej w roku wynoszącej ok. $-9,2\text{‰}$. W innych przypadkach obserwowano występowanie efektu sezonowego przesuniętego w czasie, co pozwoliło na określenie czasu dopływu wód infiltracyjnych rzędu kilku miesięcy.

UWAGI KOŃCOWE

Wykonane badania izotopowe pozwoliły na ocenę zasięgu głębokościowego występowania trytu w wodach podziemnych Polski w warunkach naturalnych, a więc bez wpływu antropopresji eksploatacyjnej. Tego typu badania umożliwia jedynie krajowa sieć monitoringu wód podziemnych PIG-PIB. Dalsze badania pozwolą na określenie zależności czasowej rozkładu głębokościowego trytu, a tym samym uściślenie „wieku” wód podziemnych w warunkach infiltracji naturalnej, tj. bez wpływu efektu antropopresji wywołanej eksploatacją.

Analizy izotopowe trytu wykonano głównie w laboratorium Zespołu Fizyki Środowiska Wydziału Fizyki i Informatyki AGH oraz w laboratorium Instytutu Chemii Jądrowej w Warszawie. Analizy izotopowe tlenu i wodoru wykonano w laboratorium hydrogeochemicznym PIG-PIB przy pomocy miernika laserowego DLT-100 firmy LosGatos Research. Przedstawione wyniki badań są fragmentem prac wykonanych w ramach realizacji zadań państwowej służby hydrogeologicznej.



Ryc. 5. Przykład „Karty otworu – badania izotopowe” z wyraźnie widocznym efektem sezonowym składu izotopowego tlenu (stacja Spore, otwór I-33-5)
Fig. 5. An example of “Water well card – isotope data” demonstrating sharp seasonal effect in stable isotope of water oxygen (station Spore well I-33-5)

Autorzy składają serdeczne podziękowania dr hab. inż. Markowi Dulińskiemu za długoletnią i efektywną współpracę przy realizacji zadań związanych z badaniami trytowymi.

LITERATURA

- d'OBYRN K., GRABCZAK J. & ZUBER A. 1997 – Mapa składów izotopowych infiltracji holoceniowej na obszarze Polski. [W:] Współczesne Problemy Hydrogeologii. T. VII. Kiekrz k. Poznań: 331–333.
- DOWGIAŁO J., KLECZKOWSKI A.S., MACIOSZCZYK T. & RÓŻKOWSKI A. (red.) 2002 – Słownik hydrogeologiczny. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- DOWGIAŁO J. & NOWICKI Z. 2000 – Ocena „wieku” wód podziemnych w oparciu o niektóre oznaczenia izotopowe. [W:] Krajewski S. (red.), Hydrogeologia na przełomie wieków. Biul. Państw. Inst. Geol., 388: 61–77.
- DULIŃSKI M., KUC T. & RÓŻAŃSKI K. 2014 – Oznaczenia laboratoryjne trytu w 428 próbach wód podziemnych wraz z opisem wyników. Towarzystwo Badania Przemian Środowiska „GEOSFERA”, Kraków.
- FLORKOWSKI T. 1964 – Możliwości oznaczania trytu w próbkach wody w zastosowaniu do badań hydrogeologicznych. Geol. Quart., 8 (4): 888–897.
- FELTER A. & NOWICKI Z. 1997 – Tryt – bezpośredni wskaźnik wrażliwości warstwy wodonośnej na antropopresję. Prz. Geol., 45 (9): 862–864.
- KROTOWICZ J. 1968 – Tryt w badaniach hydrogeologicznych. Wyd. Geol., Warszawa.
- LEŚNIAK P.M., NOWICKI Z. & WILAMOWSKI A. 2015 – Dynamika zasilania wód podziemnych w punktach monitoringu JCWPd. Raport PSH, PIG-PIB, Warszawa.
- MAŁECKA M. & NOWICKI Z. 2002 – Skład izotopowy wód podziemnych Tatr i Podhala. Referat zamawiany. [W:] Sadurski A. (red.), Hydrogeologia ośrodków szczelinowych i krasowych. Biul. Państw. Inst. Geol., 404: 67–84.
- NOWICKI Z. 2004 – Wykonanie oznaczeń trytowych i określenie wieku wód w ok. 200 punktach obserwacyjnych. Etap I. Raport PSH. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- NOWICKI Z. 2005 – Wykonanie oznaczeń trytowych i określenie wieku wód w ok. 200 punktach obserwacyjnych Etap II. Raport PSH. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- NOWICKI Z. 2006 – Wykonanie oznaczeń trytowych i określenie wieku wód w ok. 200 punktach obserwacyjnych Etap III. Raport PSH. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- NOWICKI Z. 2010 – Tryt w wodach podziemnych jako identyfikator presji i podatności na zagrożenia wód podziemnych. [W:] Ocena stanu chemicznego i ilościowego jednolitych części wód podziemnych w 2007 roku. Opr. Zespołowe. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa. 37–40.
- NOWICKI Z. & SOŁTYK W. 1973 – Badania trytowe wód termalnych w otworze IG-1 Zakopane. PPG Warszawa.