



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy

Państwowa służba geologiczna
Państwowa służba hydrogeologiczna

Raport z realizacji zadania pt.

GENEZA I „WIEK” WÓD PODZIEMNYCH ZALICZONYCH DO KOPALIN

Kierownik zadania

Kierownik Programu

.....
mgr Agnieszka Felter

.....

Warszawa, 2018 r.



MINISTERSTWO
ŚRODOWISKA



Sfinansowano ze środków Narodowego Funduszu
Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej

Zespół autorski

mgr Agnieszka Felter

upr. geol. nr V-1278

dr Mariusz Socha

mgr Jakub Sokołowski

upr. geol. nr IV-0425

mgr Jadwiga Stożek

dr Beata Wiktorowicz

upr. geol. nr V-1698

Współpraca

dr Zbigniew Nowicki

Wykonawca badań laboratoryjnych

Towarzystwo Badania Przemian Środowiska

Geosfera

al. Mickiewicza 30

30-059 Kraków

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE	3
2. CEL PRACY	4
3. METODYKA INTERPRETACJI OZNACZEŃ IZOTOPOWYCH	5
3.1. Szacowanie „wieku” wód metodą trytową	5
3.2. Tryt jako wskaźnik podatności wód na antropogeniczne zagrożenia jakości i zasobów	8
3.3. Szacowanie „wieku” wód metodą radiowęglową	9
3.4. Określanie genezy wód metodą izotopów trwałych tlenu i wodoru	12
4. PRACE ZREALIZOWANE W RAMACH ZADANIA	17
4.1. Wytypowanie ujęć wód podziemnych zaliczonych do kopalin do opróbowania izotopowego	18
4.2. Pobór próbek wód z wytypowanych ujęć	20
4.3. Laboratoryjne badania izotopowe wód	22
5. INTERPRETACJA WYNIKÓW OZNACZEŃ IZOTOPOWYCH	25
5.1. Niecka szczecińsko-miechowska	25
5.1.1. Wody termalne	27
5.2. Wał środkowopolski	36
5.2.1. Wody termalne	37
5.3. Monoklina przedsudecka	41
5.3.1 Wody termalne	42
5.4. Sudety	44
5.4.1. Wody lecznicze	47
5.4.2. Wody termalne	51
5.5. Zapadlisko przedkarpackie	61
5.5.1. Wody termalne	62
5.6. Karpaty zewnętrzne	65
5.6.1. Wody lecznicze	67
6. PODSUMOWANIE	83
7. LITERATURA	86

1. WPROWADZENIE

Niniejsze opracowanie jest raportem z prac wykonanych w okresie od 1.04.2015 r. do 31.03.2018 r., w ramach przedsięwzięcia pn. *Prowadzenie Banku Danych Wód Podziemnych Zaliczonych do Kopalin (solanki, wody lecznicze i termalne)*. Przedstawiono w nim wyniki oceny „wieku” i określenia genezy wód leczniczych i termalnych z wykorzystaniem metod izotopowych (tzw. znaczników środowiska). Zadanie zostało zrealizowane przez zespół Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego początkowo pod kierunkiem, a następnie we współpracy z dr Zbigniewem Nowickim. Wykonawcą laboratoryjnych badań izotopowych było Towarzystwo Badania Przemian Środowiska Geosfera z Krakowa.

Metody izotopowe w badaniach wód podziemnych w Polsce są obecnie dość powszechnie stosowane. W przypadku wód podziemnych zaliczonych do kopalin wykorzystanie tych metod w dokumentowaniu zasobów stało się w ciągu ostatnich kilkunastu lat standardem. Krajowe laboratoria dysponują urządzeniami umożliwiającymi wykonywanie oznaczeń różnorodnych znaczników środowiskowych w wodach, m.in. stosunków izotopów trwałych tlenu i wodoru ($\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$), stężeń trytu (^3H), zawartości radiowęglu w rozpuszczonych węglanach (^{14}C i pomocniczo $\delta^{13}\text{C}$), zawartości izotopów siarki siarczkowej oraz rozpuszczonych siarczanów ($\delta^{34}\text{S}$), zawartości uranu i stosunku aktywności ^{234}U do ^{238}U , stężeń gazów szlachetnych (He, Ne, Ar), zawartości ^{222}Rn oraz ^{226}Ra i ^{228}Ra . Spośród wymienionych badań najpowszechniej stosowanymi w praktyce hydrogeologicznej są oznaczenia izotopów stabilnych tlenu i wodoru, trytu oraz radiowęglu. O ich wyborze decyduje przede wszystkim przydatność uzyskanych wyników, łatwość poboru próbek oraz dostępność laboratoriów badawczych. Te stosunkowo mało kosztowne badania pozwalają na określenie „wieku” wód, ich genezy oraz położenia obszarów zasilania, jak również na identyfikację procesów mieszania wód o różnym pochodzeniu, ocenę prędkości przepływu wód oraz ich podatności na zagrożenia zasobów i jakości, służą one do formułowania modeli koncepcyjnych oraz do kalibracji i walidacji modeli matematycznych przepływu wód, a także do wielu innych celów (Zuber, 2007). Stosowanie metod znacznikowych weszło do procedur państwowej służby hydrogeologicznej. W ciągu ostatnich kilkunastu lat w ramach prac służby wykonano niemal 1500 oznaczeń trytu w punktach monitoringu sieci krajowej. Pozwoliły one m.in. na wyznaczenie naturalnych rozkładów głębokościowych występowania ^3H w wodach podziemnych na obszarach niezakłóconych eksploatacją oraz na usystematyzowanie wiedzy na temat aktualnych rozkładów stężeń tego izotopu w hydrosferze na terenie Polski w warunkach obserwowanej stabilizacji jego zawartości w opadach (Nowicki i in., 2015b).

W przypadku wód podziemnych zaliczonych do kopalin badania izotopowe prowadzone są, poza dokumentowaniem zasobów, na ogół w skali lokalnej, w ramach prac naukowych. Systematyczne, regionalne badania zawartości trytu oraz składu izotopowego tych wód przeprowadzono w latach 90. XX w. przez zespół pod kierownictwem Wojciecha Ciężkowskiego i posłużyły wyznaczeniu obszarów zasilania wód leczniczych pochodzenia infiltracyjnego (Ciężkowski i in., 1996).

2. CEL PRACY

W ramach przedsięwzięcia pn. *Prowadzenie Banku Danych Wód Podziemnych Zaliczonych do Kopalin (solanki, wody lecznicze i termalne)* realizowanego w Państwowym Instytucie Geologicznym - Państwowym Instytucie Badawczym od 2009 r. prowadzone są systematyczne badania izotopowe wód podziemnych zaliczonych do kopalin w skali całego kraju. Ich celem jest określenie „wieku” i genezy wód leczniczych oraz termalnych, a także wskazanie ujęć i obszarów narażonych w sposób szczególny na antropopresję. Wyniki realizowanych prac są interesujące nie tylko ze względów badawczych, lecz również gospodarczych. Zmiany składu izotopowego wód i zawartości w nich izotopów promieniotwórczych, po wykluczeniu efektu sezonowego, są nierzadko pierwszym sygnałem o uruchomieniu dopływu wód zasilanych w odmiennych warunkach i czasie, które mogą modyfikować właściwości fizyczno-chemiczne wód wykorzystywanych w wielu dziedzinach gospodarki. Niestabilność parametrów eksploatacyjnych wód - składu chemicznego, mineralizacji, temperatury na wypływie i wydajności - może wpływać w sposób niekorzystny na efekt ekonomiczny przedsięwzięć związanych z wykorzystaniem tych wód, a w przypadku wód leczniczych może pozbawić możliwości wykorzystywania ich do celów balneoterapeutycznych.

W III etapie prac objętym niniejszym raportem, przeprowadzonych w okresie od kwietnia 2015 r. do marca 2018 r., badaniami objęto 16 ujęć wód leczniczych i termalnych. W pobranych z nich próbkach wykonano łącznie 40 oznaczeń izotopowych, w tym 8 oznaczeń radiowęglą, 16 trytu oraz 16 izotopów stabilnych tlenu i wodoru. W grupie wytypowanych ujęć znalazły się naturalne wypływy wód oraz otwory wiertnicze ujmujące poziomy wodonośne występujące na głębokości od 35 do 1962 m.

W dwóch poprzednich etapach prac zrealizowanych w latach 2009-2015 prowadzono badania zawartości trytu oraz izotopów trwałych tlenu i wodoru w ponad 100 ujęciach wód leczniczych na obszarze całego kraju. Z uwagi na zakres wykonywanych oznaczeń opróbowaniem objęto ujęcia, w których ze względu na głębokość występowania poziomy wodonośnego lub warunki

zasilania mogły występować wody współczesne zawierające tryt, odznaczające się znaczną wrażliwością na czynniki antropogeniczne (Nowicki i in., 2013, 2015a).

3. METODYKA INTERPRETACJI OZNACZEŃ IZOTOPOWYCH

Mianem „wieku” wód podziemnych określa się czas, jaki upłynął od momentu infiltracji wody atmosferycznej lub uformowania składu izotopowego jej składników w wyniku procesów fizyczno-chemicznych zachodzących w strefie przy powierzchniowej do czasu poboru próbki wody (Dowgiałło i Nowicki, 1999). Określenie to ma charakter umowny, gdyż czas przebywania izotopu w systemie wodonośnym może różnić się od czasu przebywania wody w tym systemie. Podstawowymi i najczęściej stosowanymi wskaźnikami wieku są **tryt (^3H)**, w przypadku wód występujących w strefie aktywnej wymiany, oraz **radiowęgiel (^{14}C wraz z $\delta^{13}\text{C}$)**, w przypadku wód głębszych systemów przepływu.

Wśród metod stosowanych **do określania genezy wód** najbardziej przydatną i najczęściej stosowaną jest metoda oparta na analizie **składu izotopów trwałych tlenu i wodoru w wodzie**. Zagadnienia dotyczące metod znacznikowych stosowanych w hydrologii oraz hydrogeologii popularyzowane są przez liczne opracowania o charakterze naukowym i edukacyjnym, których autorami są m.in. Fritz i Fontes (1980), Clarck i Fritz (1997), Cook i Herczeg (2000), Mook (2005), Calmon i Garnier-Laplace (2006) czy Aggarwal i in. (2010). Również w Polsce w 2007 r. ukazał się poradnik metodyczny dotyczący zastosowania metod znacznikowych w hydrogeologii pod redakcją Zuberę (2007).

3.1. Szacowanie „wieku” wód metodą trytową

Tryt (^3H) jest najcięższym i najtrwalszym promieniotwórczym (promieniowanie β^-) izotopem wodoru. Jego czas połowicznego rozpadu ($T_{1/2}$) wynosi 12,32 roku, a stężenie podawane jest w jednostkach trytowych - T.U. (tritium units), definiowanych jako 1 atom trytu przypadający na 10^{18} atomów wodoru zwykłego. Nuklid ten powstaje w sposób naturalny w górnych częściach atmosfery w wyniku reakcji jądrowych pomiędzy neutronami będącymi produktem promieniowania kosmicznego a azotem i wchodzi w skład wody, tworząc jej cząsteczki poprzez łączenie się z tlenem (produkcja kosmiczna).

W latach 1952-1954 w atmosferze bardzo wzrosło stężenie trytu będącego produktem eksperymentalnych wybuchów termojądrowych. W początkowym okresie wprowadzony do atmosfery tryt spowodował, że jego stężenie w opadach wzrosło do kilkuset jednostek. Drugie

maksimum stężenia tego składnika przypadło na lata 1962-1964, kiedy to prowadzono testy bomb wodorowych na dużych wysokościach, a w opadach notowano zawartości tego składnika rzędu tysięcy jednostek trytowych (w pojedynczych pomiarach sięgały 10 tys. T.U.). Impulsowe wprowadzenie przez wybuchy dużych ilości tego składnika do atmosfery spowodowało pojawienie się go w wodach podziemnych, co dało możliwość określenia czasu przejścia jego stężeń w systemach wodonośnych. Obecnie zawartość trytu w wodach podziemnych zasilanych przed rozpoczęciem wybuchów jest już praktycznie niemierzalna. Brak trytu cechuje więc wodę zasilaną całkowicie przed 1952 r., a pojawienie się tego izotopu oznacza obecność wód z okresu późniejszego, tj. zawierających tryt pochodzenia bombowego lub ze współczesnych opadów. Obecnie średnia zawartość tego składnika w opadach wynosi ok. 14 T.U., przy czym zaznacza się zróżnicowanie sezonowe. Na terenie Polski maksymalne stężenia przypadają na okres wiosenno-letni (do 16 T.U.), zaś minimalne na jesienno-zimowy (ca 6 T.U.).

Pomiary stężenia trytu w wodach podziemnych stosowane są również do oceny występowania zagrożeń pochodzenia antropogenicznego. Obecność tego izotopu w wodach wskazuje na dopływ współczesnych wód infiltracyjnych, a tym samym na możliwość przedostawania się zanieczyszczeń z powierzchni terenu. Osobnym zagadnieniem jest określenie tzw. czasu krytycznego, którego wartość stanowiłaby pewnego rodzaju granicę pozwalającą na wydzielenie zagrożonych i niezagrożonych wód podziemnych.

Metoda trytowa znajduje zastosowanie w określaniu „wieku” wód zasilanych po roku 1952, tj. zawierających tryt pochodzenia bombowego i ze współczesnych opadów. W celu przeprowadzenia właściwego wnioskowania dotyczącego datowania tego rodzaju wód niezbędne są co najmniej kilkukrotne pomiary zawartości trytu rozłożone w czasie co najmniej kilku lat. Materiałem podstawowym jest znajomość wartości wejściowych trytu w opadach obejmująca okres maksymalnych stężeń wynikających z wybuchów oraz danych z okresu przejścia wysokich stężeń w wodach podziemnych. „Wiek” wód podziemnych jest określany metodą trytową na podstawie metody dopasowania krzywych (przypadek znacznikowy) opisujących funkcję wejścia (zmiennosc trytu w opadach w Krakowie) i funkcję końcową (obserwowaną) przy zmiennych udziałach poszczególnych typów wód w ogólnej mieszaninie. W większości punktów obserwacyjnych dostępne są jedynie fragmenty krzywych dopasowania, dla których możliwe jest wykonanie obliczeń.

Dla wód zmineralizowanych występujących w regionie karpackim, które są niemal zawsze mieszaninami dwu-, trzy- lub czteroskładnikowymi, gdzie w strefie przypowierzchniowej mogą również występować infiltracyjne wody jednoskładnikowe, przyjęto, że głównymi składowymi mieszanin są:

- wody infiltrujące współcześnie (markerem był tryt);
- wody infiltrujące przed okresem prób z bronią jądrową, tzn. przed 1952 r. (markerami były brak trytu i chlorków oraz delty izotopów stabilnych tlenu i wodoru na poziomie współczesnych wód infiltracyjnych);
- wody sedymentacyjne (markerem była zawartość chlorków);
- wody dehydratacyjne (markerami były delty izotopów stabilnych tlenu i wodoru).

W przypadku leczniczych i termalnych wód regionu sudeckiego przyjęto, że są one mieszaninami dwuskładnikowymi, złożonymi z wód infiltrujących współcześnie oraz przed okresem prób z bronią jądrową. Zmineralizowane i termalne wody ujęć zlokalizowanych w niżowej części kraju są wodami dwu- lub trzyskładnikowymi (niezawierającymi składowej dehydratacyjnej).

Przedstawione w dalszych częściach opracowania oszacowania „wieku” wód podziemnych dotyczą wyłącznie **składowej wód współcześnie infiltrujących** i tylko ta składowa może być przedmiotem interpretacji z wykorzystaniem metody trytowej.

Do wstępnego ustalenia udziału poszczególnych typów wód wykorzystywano markery wskazujące na najbardziej prawdopodobne proporcje mieszania. Kolejne iteracje, aż do uzyskania najlepszego dopasowania fragmentów krzywych obserwacyjnych do krzywej opisującej funkcję wejścia, pozwoliły na precyzyjniejsze określenie proporcji mieszania.

Możliwe jest również wnioskowanie dotyczące „wieku” wody w przypadku pojedynczego oznaczenia trytu. Ogranicza się ono jednak zazwyczaj do stwierdzenia, że jej infiltracja miała miejsce po pierwszym okresie prowadzenia prób z bronią jądrową, a więc nie dawniej niż ok. 65 lat temu. Brak trytu (0 T.U., woda beztrytowa) oznacza, że czas dopływu wody do miejsca poboru próbki z warstwy wodonośnej wynosi ponad 65 lat.

W niektórych przypadkach można zastosować metodę odpowiadającą modelowi znacznikowemu dla iniekcji ze stałą wydajnością w czasie do systemu o nieznanach parametrach hydrogeologicznych (Nowicki i in., 2016) będącemu hydrogeologicznym odpowiednikiem modelu stosowanemu w inżynierii chemicznej pod nazwą CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor).

Średni czas pobytu wód w zlewni w tym przypadku można łatwo policzyć na podstawie równania:

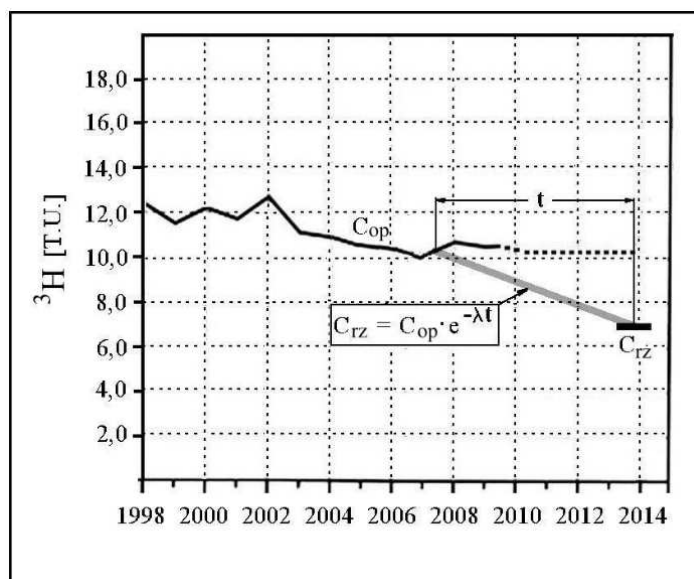
$$C_{rz} = C_{op} e^{-\lambda \tau} \quad \text{skąd} \quad \tau = 17,94 \cdot \ln(C_{op}/C_{rz})$$

gdzie: C_{op} – średnie stężenie trytu w opadach

C_{rz} – średnie stężenie trytu w odpływie, np. w rzece

stała 17,94 reprezentuje $T_{1/2}/\ln 2$ - czas połowicznego rozpadu trytu.

Powyższy wzór jest identyczny ze wzorem odpowiadającym modelowi przepływu tłokowego, ale opisuje odmienną sytuację fizyczną (Zuber, 2007), przy czym podstawowa różnica polega na tym, że w modelu tłokowym zakłada się całkowity brak mieszania w trakcie przepływu, natomiast w modelu przedstawionym powyżej przyjmuje się pełne mieszanie. W warunkach ustalonych model taki (rys. 3.1) zachowuje się stabilnie, tzn. na wypływie (np. w rzece) powinno występować stałe stężenie trytu.



Rys. 3.1. Model pełnego mieszania dla systemu zlewniowego w wersji graficznej

3.2. Tryt jako wskaźnik podatności wód na antropogeniczne zagrożenia jakości i zasobów

Pojawienie się trytu w wodach podziemnych świadczy o możliwości występowania istotnych zagrożeń typu antropogenicznego, wynikających z doływu zanieczyszczeń z powierzchni terenu. W związku z powyższym w poprzednich etapach realizacji zadania wprowadzono skalę stopniującą wielkość zagrożenia jakości wód opartą na zakresach zawartości trytu w wodach, zgodnie z podziałem podanym w tabeli 3.1.

Klasyfikacja ma zastosowanie do oznaczeń trytu w wodach podziemnych wykonanych po 2012 r. W tym czasie średnia zawartość tego nuklidu w opadach wynosi ok. 10 T.U. i jest to wartość, która utrzymuje się na zbliżonym poziomie od kilkunastu lat. Zawartości te związane są z resztkowym wymywaniem trytu pochodzącego z próbných wybuchów ładunków jądrowych.

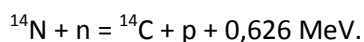
Tab. 3.1. Kryteria oceny stopnia zagrożenia wód leczniczych zmianami jakości

Stężenie trytu [T.U.]	Stopień zagrożenia wód
0	niski
0-1	średni
1-5	wysoki
>5	bardzo wysoki

Na podstawie zawartości trytu, oraz z uwzględnieniem danych hydrochemicznych, wnioskować można o występowaniu zjawisk faktycznie lub potencjalnie zagrażających jakości i zasobom wód podziemnych. Skokowa zmienność zawartości tego nuklidu towarzysząca eksploatacji lub stała jego wysoka zawartość przy znacznej zmienności parametrów hydrochemicznych wody świadczą o naruszeniu lub o małej stabilności równowagi hydrodynamicznej pomiędzy wodami leczniczymi a współwystępującymi w środowisku hydrogeologicznym wodami pochodzącymi z bezpośredniego zasilania atmosferycznego. Zbyt intensywna eksploatacja ujęć, szczególnie zlokalizowanych w obrębie zbiorników szczelinowych lub szczelinowo-porowych o małej pojemności, wpływa na zmianę dróg przepływu (wymuszenie zwiększonego dopływu wód zwykłych) i nierzadko prowadzi do zmian parametrów fizyczno-chemicznych wydobywanych wód przejawiających się spadkiem mineralizacji, zawartości składników swoistych oraz temperatury na wypływie, a także do zmian wydajności ujęć, ciśnienia złożowego oraz głębokości położenia zwierciadła wody. W skrajnych przypadkach powodować może nieodwracalne zmiany nie tylko w ujęciu, lecz również w złożu.

3.3. Szacowanie „wieku” wód metodą radiowęglową

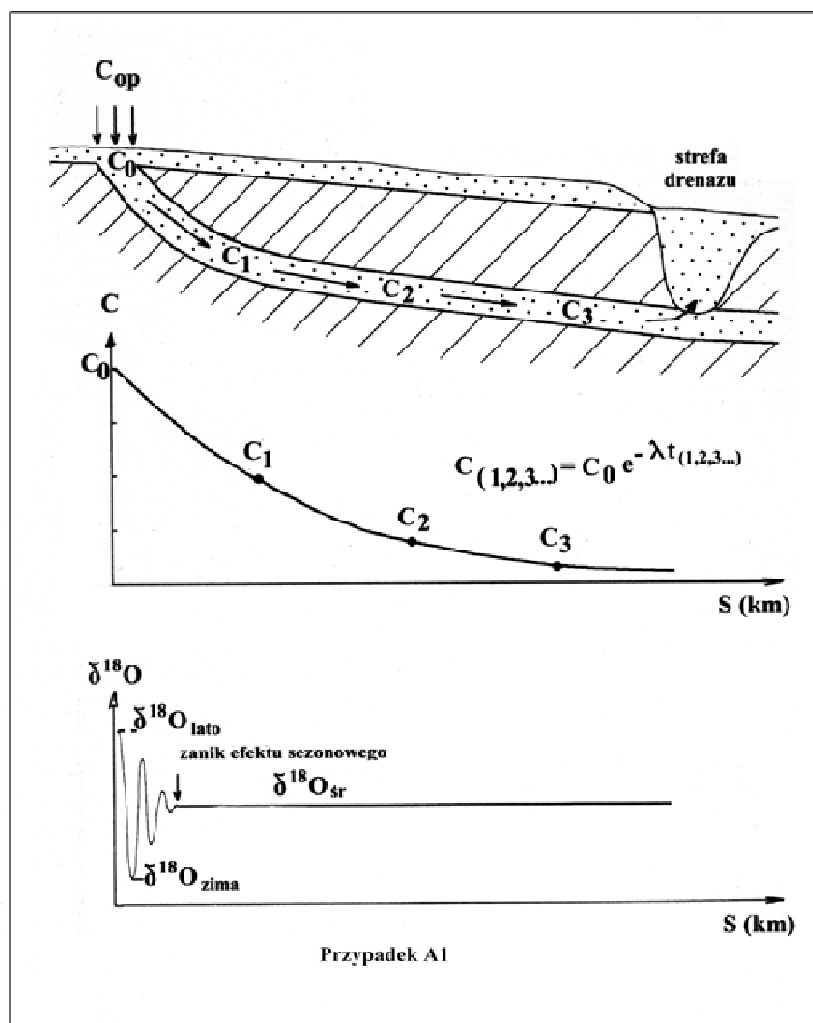
Izotop ^{14}C powstaje głównie w atmosferze w wyniku oddziaływania wtórnych neutronów (generowanych przez cząstki promieniowania kosmicznego) na atomy azotu wg schematu:



Powstały izotop zostaje w ciągu kilku godzin utleniony, tworząc CO_2 , przy czym mimo wyraźnego różnicowania w wielkości strumienia neutronów wtórnych w zależności od szerokości geograficznej (ok. 3,5 razy większej w rejonie równika w stosunku do okolic biegunowych) rozkład ^{14}C w atmosferze ziemskiej jest dość równomierny, a obserwowane różnice nie przekraczają 5%. Okres półtrwania ^{14}C wynosi 5730 lat; w wyniku przemiany β^- tworzy się ponownie ^{14}N . Średni czas przebywania ^{14}C w atmosferze wynosi ok. 10 lat. Jednostką, w której wyraża się stężenie ^{14}C , jest pmc (percentage of modern carbon), przy czym jako stężenie odniesienia (100%) przyjmuje się zawartość ^{14}C w drewnie, które rośnie w 1890 r.

Radiowęgiel utworzony w atmosferze, a następnie utleniony do postaci $^{14}\text{CO}_2$, zostaje włączony do obiegu geochemicznego i wykorzystywany jest w hydrogeologii do „datowania” wód podziemnych.

Wyznaczanie „wieku” wód podziemnych metodą radiowęglą opiera się na założeniu, że od momentu przerwania kontaktu dowolnego systemu wód podziemnych z atmosferycznym dwutlenkiem węgla ilość zawartego w tych wodach izotopu ^{14}C będzie się zmniejszała na drodze przepływu jedynie w wyniku rozpadu promieniotwórczego (rys. 3.2). Jeżeli jednak w systemie zachodzą dodatkowe procesy - np. wymiana izotopowa pomiędzy systemem węglanowym a skałami lub doływ wgłębny dwutlenku węgla pozbawionego ^{14}C - wówczas datowanie jest praktycznie niemożliwe.



Rys. 3.2. Zmiany ilościowe ^{14}C i $\delta^{18}\text{O}$ na drodze przepływu wód podziemnych

„Datowanie” wód podziemnych przeprowadzono z wykorzystaniem wzoru rozpadowego (model tłokowy) z poprawką Pearsona:

$$t = 8033 [\ln(C_0/C_t) + \ln(\delta^{13}C_t - \delta^{13}C_{(w\acute{e}gl)}) / (\delta^{13}C_{dw} - \delta^{13}C_{(w\acute{e}gl)})]$$

gdzie:

C_0 - zawartość ^{14}C w glebowym CO_2 (pmc)

C_t - zawartość ^{14}C w badanej próbce (pmc)

$\delta^{13}C_t$ - skład izotopowy węgla w badanej próbce (‰)

$\delta^{13}C_{(w\acute{e}gl)}$ - skład izotopowy węgla w glebowym węglanie wapnia (‰)

$\delta^{13}C_{dw}$ - skład izotopowy węgla w CO_2 w powietrzu glebowym (‰)

Jako wartości stałe przyjmuje się następujące parametry:

$$C_0 = 100 \text{ pmc}, \delta^{13}C_{(w\acute{e}gl)} \cong 0\text{‰}, \delta^{13}C_{dw} \cong -25\text{‰}$$

Pozwala to uprościć powyższe równanie do postaci:

$$t = 8033 [\ln(100/C_t) + \ln(\delta^{13}C_t/-25)]$$

„Datowanie” wód podziemnych metodą radiowęglą umożliwia określenie „wieku” wód podziemnych w przedziale od ok. 500 do 30 000 lat. Przedział ten obejmuje dwa okresy całkowicie odmienne pod względem klimatycznym: schyłek ostatniego zlodowacenia plejstoceniowego oraz stosunkowo ciepły holocen.

W warunkach paleoklimatycznych panujących na obszarze Polski bardzo istotnym czynnikiem, który był brany pod uwagę przy analizie paleohydrogeologicznej zbiorników wód podziemnych występujących na głębokości do kilkuset metrów, jest możliwość występowania wiecznej zmarzliny. Uwzględnienie jej roli jest niezwykle istotne zwłaszcza przy próbach „datowania” wód podziemnych metodą węglową w przedziale wieku 12 000 – 30 000 lat.

Na obszarze Polski występuje dużo zbiorników wód podziemnych o znaczeniu regionalnym, które podczas ostatniego zlodowacenia mogły mieć w istotny sposób zmienione warunki przepływu w wyniku występowania wiecznej zmarzliny. Przerwa w zasilaniu wielu zbiorników wód podziemnych, aż do końca plejstocenu spowodowana występowaniem zlodowacenia podziemnego, sprawia, że w przypadku stosowania metody ^{14}C do wyznaczania „wieku” wód niespełnione jest podstawowe założenie metodyczne (Dowgiałło i Nowicki, 1999) dotyczące ciągłości iniekcji w czasie (stałego dopływu kosmogenicznego ^{14}C wraz z wodami zasilającymi). Niezbędne jest wówczas wykonanie w badanych wodach oznaczeń składu izotopów stabilnych tlenu i wodoru, które pozwalają zidentyfikować wody infiltrujące w klimacie zimnym (Nowicki, 1999). W przypadku uzyskania wyników $\delta^{18}O$ i δ^2H charakterystycznych dla klimatu zbliżonego do współczesnego, oznaczenia węgla

promieniotwórczego mają wartość jedynie wskaźnikową. Nawet bardzo niskie wartości ^{14}C świadczą wówczas o bardzo słabym zasilaniu w holocenie (niskim module odnawialności), a nie o dużym „wieku” wód podziemnych.

Obliczenia „wieku” metodą węglową wykonano w przypadku tych wód podziemnych, w których $\delta^{13}\text{C}$ wynosiła $>10,0\%$, co oznaczało, że wymiana izotopowa typu woda-skała nie miała istotnego wpływu na zawartość radiowęglu w wodzie. W przypadku uzyskania wyniku powyżej 10 000 lat sprawdzano, czy wartość $\delta^{18}\text{O}$ jest odpowiednia dla infiltracji w warunkach glacialnych.

Interpretację własnych i wcześniejszych danych izotopowych przeprowadzano w oparciu o modele hydrodynamiczne i pojęciowe odpowiadające poszczególnym analizowanym obszarom.

3.4. Określanie genezy wód metodą izotopów trwałych tlenu i wodoru

Izotopy trwałe tlenu ($\delta^{18}\text{O}$) i wodoru ($\delta^2\text{H}$ lub δD) obecne są w cząsteczkach wody i stanowią naturalny środowiskowy znacznik idealny. Ich udział w cząsteczkach wody wyrażany jest w postaci względnych odchyień od wzorca o składzie izotopowym odpowiadającym wodzie oceanicznej (SMOW - Standard Mean Ocean Water) i podawany w ‰ jako $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$.

Skład izotopowy zależy od procesów przemian, jakie zachodzą w atmosferze, a dokładnie w wodach atmosferycznych przed ich opadem na powierzchnię Ziemi i infiltracją (Craig, 1961). Znajomość skutków przemian międzyfazowych tych izotopów stanowi podstawę do określania pochodzenia wody. Na podstawie składu izotopowego wód możliwe jest wyodrębnienie wód różnego pochodzenia, co jest szczególnie przydatne w przypadku wód zaliczanych do kopalin, a zwłaszcza wód zmineralizowanych, których zasilanie odbywało się na ogół w odmiennych niż obecnie warunkach klimatycznych.

Przyczyną powstawania różnic w składzie izotopowym wody jest frakcjonowanie izotopów przy przejściach międzyfazowych. Zjawisko to wynika z różnicy ciśnień pary wodnej pomiędzy cząsteczkami wody ciężkiej typu H_2^{18}O , $\text{H}^2\text{H}^{18}\text{O}$ (ciśnienie niższe) a cząsteczkami wody „lekkiej” typu H_2^{16}O (ciśnienie wyższe przy tej samej temperaturze). Różnica ta powoduje następujące zjawiska w trakcie zmiany fazy:

- **parowanie (P)** – wzrost $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ (δD) w fazie ciekłej (FC) oraz zubożenie fazy gazowej (FG) w ^{18}O i D. Można zatem zapisać, że: $\delta_p^{18}\text{O}_{\text{FC}} > \delta_p^{18}\text{O}_{\text{FG}}$ oraz $\delta_p^2\text{H}_{\text{FC}} > \delta_p^2\text{H}_{\text{FG}}$
- **kondensacja (K)** – wzrost $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ w fazie ciekłej oraz zubożenie pary rezydualnej w ^{18}O i ^2H .
Wówczas: $\delta_K^{18}\text{O}_{\text{FC}} < \delta_K^{18}\text{O}_{\text{FG}}$ oraz $\delta_K^2\text{H}_{\text{FC}} < \delta_K^2\text{H}_{\text{FG}}$

Skala zjawiska frakcjonowania izotopowego przy przejściach międzyfazowych uzależniona jest od temperatury, przy czym stopień rozdzielania izotopowego zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury. W przypadku kondensacji można to zapisać w następujący sposób:

$$\delta_K^{18}\text{O}_{\text{FC}}(0^\circ\text{C}) > \delta_K^{18}\text{O}_{\text{FC}}(5^\circ\text{C}) > \delta_K^{18}\text{O}_{\text{FC}}(10^\circ\text{C}) \dots \text{itd.}$$

i odpowiednio dla parowania (przy identycznej wartości początkowej $\delta_p^{18}\text{O}_{\text{FC}} > \delta_p^{18}\text{O}_{\text{FG}}$):

$$\delta_p^{18}\text{O}_{\text{FC}}(0^\circ\text{C}) > \delta_p^{18}\text{O}_{\text{FC}}(5^\circ) > \delta_p^{18}\text{O}_{\text{FC}}(10^\circ) \dots \text{itd.}$$

Powyższy zapis odnosi się również do wartości $\delta^2\text{H}$.

Istotnym czynnikiem mającym również wpływ na skład izotopowy wód naturalnych jest szybkość zachodzenia powyższych procesów, czyli tzw. kinetyka przemian fazowych. Dotyczy to zwłaszcza szybkiego parowania, podczas którego dochodzi do szybszego wzbogacenia fazy ciekłej w ^{18}O niż w ^2H (D - deuter). Podobny efekt może wystąpić również w obrębie warstwy wodonośnej podczas wymiany izotopowej wody z minerałami wzbogaconymi w ^{18}O .

Wymienione czynniki powodują występowanie w globalnym obiegu wody różnych efektów mających wpływ na skład izotopów stabilnych tlenu i wodoru w opadach atmosferycznych. Najważniejszymi z nich są:

Efekt kontynentalny – polega na zmniejszaniu się wartości $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ w opadach atmosferycznych wraz ze wzrostem odległości od oceanu. Efekt ten przebiega trójstopniowo:

- podczas parowania wód oceanicznych zachodzi proces frakcjonowania izotopowego powodującego, że: $\delta^{18}\text{O}_{\text{FG}} < \delta^{18}\text{O}_{\text{OCEAN}}$ oraz $\delta^2\text{H}_{\text{FG}} < \delta^2\text{H}_{\text{OCEAN}}$;
- w trakcie przesuwania się wilgotnych mas powietrza w głąb kontynentów następuje ich zubożenie w ^{18}O i ^2H (kondensacja), co powoduje, że powstające z nich opady mają coraz niższe wartości $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$;
- parowanie wód powierzchniowych, które niemal zawsze odznaczają się ujemnymi wartościami $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$, dodatkowo obniża wartość tych parametrów w fazie gazowej.

Wielkość wpływu efektu kontynentalnego wynosi średnio:

$$0,3 - 0,4 \text{ ‰ na } 100 \text{ km dla } \delta^{18}\text{O} \text{ oraz } 2 - 3 \text{ ‰ dla } \delta^2\text{H}$$

Na obszarze Polski wpływ efektu kontynentalnego na wartość $\delta^{18}\text{O}$ w wodach infiltrujących został przedstawiony na mapach d'Obyrna i in. (1997).

Efekt temperaturowy – dotyczy wpływu średniej temperatury rocznej na skład izotopowy w wodach opadowych. Efekt ten został wyznaczony przez Dansgaard (1964) i opisany następującymi zależnościami:

$$\delta^{18}\text{O} = 0,7t - 13,6 \quad \text{oraz} \quad \delta^2\text{H} = 5,6t - 100$$

gdzie t – średnia temperatura roczna w badanym rejonie.

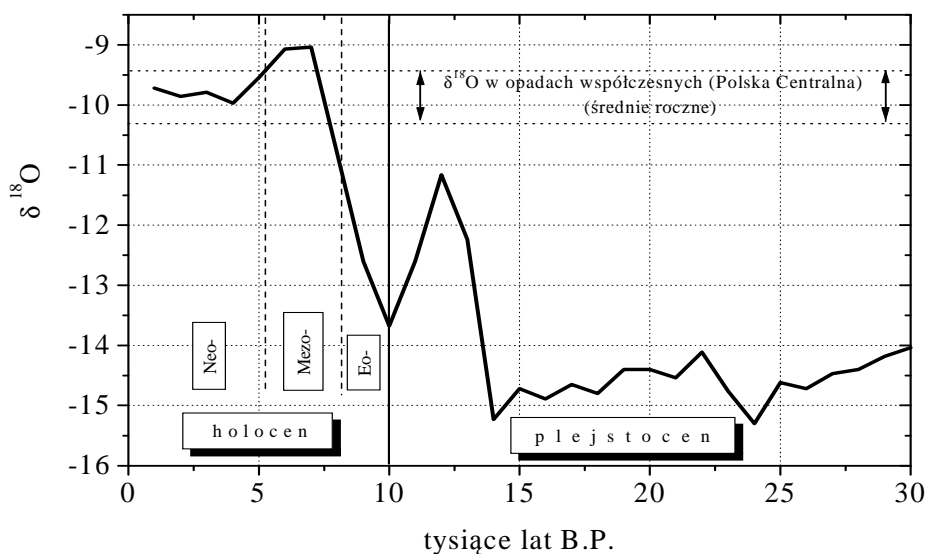
Należy przy tym jednak zaznaczyć, że tak wyznaczone wartości $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ określają średni roczny skład izotopowy opadów atmosferycznych, natomiast nie odnoszą się do wód infiltrujących, w których parametry te mogą być zmienione (z reguły nieco wyższe) w wyniku występowania parowania na powierzchni Ziemi.

Bezpośrednio z efektem temperaturowym związane są:

- **efekt sezonowy** – który w odniesieniu do wód opadowych można przedstawić jako:
 $\delta^{18}\text{O}_{\text{ZIMA}} < \delta^{18}\text{O}_{\text{ŚR. ROCZNA}} < \delta^{18}\text{O}_{\text{LATO}}$ i odpowiednio dla deuteru
- **efekt wysokościowy** – większym wysokościami odpowiadają wartości bardziej ujemne $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$.

Ponadto w niektórych przypadkach pewne znaczenie może mieć tzw. efekt ilościowy zależny od długości trwania opadu.

Późniejsze badania wykazały, że przedstawione przez Dansgaarda zależności mają jedynie charakter ogólny. W celu wyznaczenia rzeczywistych funkcji $(\delta^{18}\text{O}, \delta^2\text{H}) = f(T)$ charakterystycznych dla poszczególnych regionów (obszary w strefach wybrzeży oceanicznych i morskich, wyspy, obszary kontynentalne, górskie itd.) powinno się korzystać z wyników pomiarów i oznaczeń wykonywanych w stacjach lokalnych położonych na obszarze badanego regionu. Autorzy niniejszego opracowania przyjmują, że charakterystyczną dla Polski (poza obszarami górskimi) jest funkcja $\delta^{18}\text{O} = 0,36 T - 12,6$, która została wyznaczona metodą pośrednią (Nowicki, 1999). Była ona następnie podstawą próby rekonstrukcji zmian $\delta^{18}\text{O}$ w opadach w okresie od 500 do 30 000 lat, a więc w przedziale „datowania” metodą radiowęglą (rys. 3.3).



Rys. 3.3. Zmiany $\delta^{18}\text{O}$ w opadach atmosferycznych na terenie Polski centralnej w ciągu ostatnich 30 000 lat

Wartość $\delta^{18}\text{O}$ w opadach atmosferycznych zbliżona do obecnej występuje w okresie od czasów współczesnych do ok. 8000 lat temu, tj. w neo- i mezoholocene. W eoholocene wartość ta gwałtownie spada do $-13,5\text{‰}$. W końcowej części plejstocenu, z wyjątkiem maksimum występującego ok. 12 000 lat temu, średnia wartość $\delta^{18}\text{O}$ wynosiła ok. $-14,6\text{‰}$.

Na podstawie powyższych ustaleń autorzy przyjmują, że pod koniec plejstocenu na obszarze Polski występowały następujące typy wód infiltracyjnych:

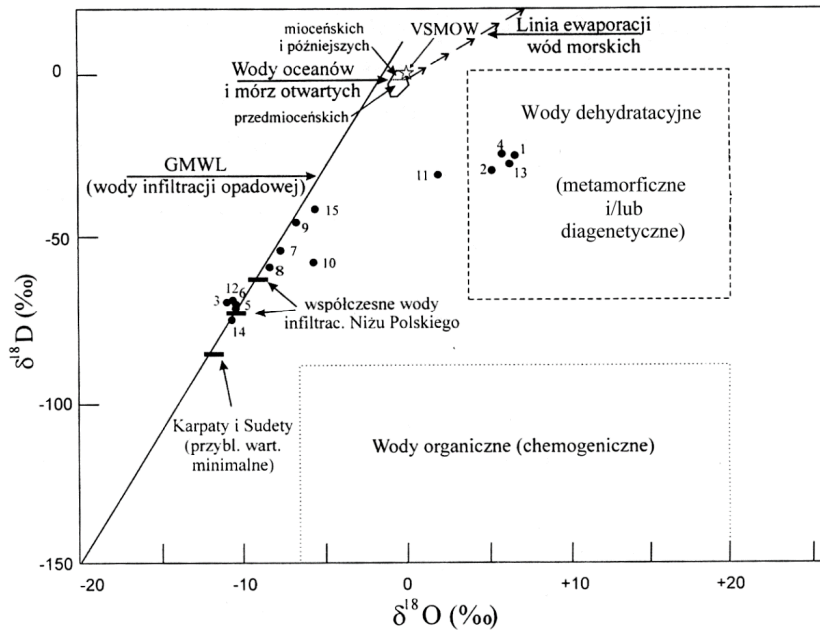
- wody glacialne ostatniego zlodowacenia (rozumiane jako wody z topniejącego lodowca) – $\delta^{18}\text{O}$ w tych wodach powinna wynosić poniżej -29‰ ;
- wody pochodzące z infiltracji opadów atmosferycznych w okresie od 14 000 do 70 000 lat temu – $\delta^{18}\text{O}$ powinna w nich wynosić średnio $-14,6\text{‰}$ (od $-12,5$ do $-15,3\text{‰}$);
- wody stanowiące mieszaninę wód glacialnych i wód opadowych - wartość $\delta^{18}\text{O}$, w zależności od proporcji mieszania, powinna wynosić od $-14,5$ do $<-29\text{‰}$.

Wyżej wymienione typy wód, o ile występują na terenie Polski, wchodzą obecnie najprawdopodobniej w skład mieszanin zawierających również wody starsze lub/i z infiltracji holocenijskiej.

Ważnym zagadnieniem z punktu widzenia rozwoju metod interpretacyjnych z wykorzystaniem oznaczeń składu izotopów stabilnych było stwierdzenie przez Craiga (1961) zależności liniowej pomiędzy wartościami $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ w opadach atmosferycznych. Badacz ten sformułował następujące równanie:

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$$

Zależność ta zwana prostą Craig'a lub linią meteoryczną (GMWL - Global Meteoric Water Line, WMWL – World Meteoric Water Line) odnosi się do półkuli północnej (z wyjątkiem obszaru śródziemnomorskiego) i jest podstawą interpretacyjną metody (rys. 3.4).



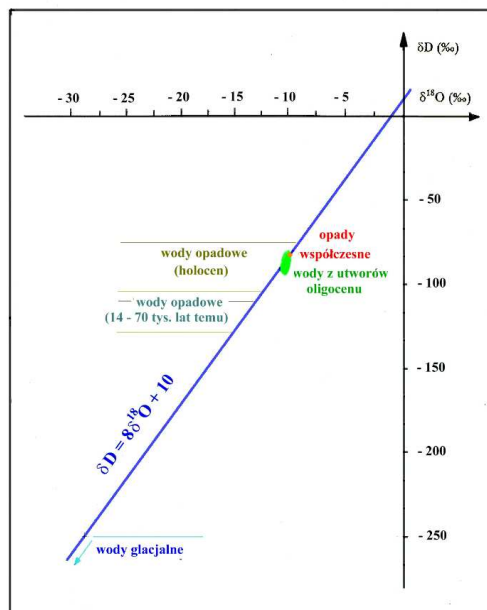
Rys. 3.4. Skład izotopowy niektórych typów genetycznych wód podziemnych i wybranych wód leczniczych Polski (Sheppard, 1986, z modyfikacjami Dowgiałły i Nowickiego, 2007)

1. Wysowa (odw. „Aleksandra”), 2. Szczawnica („Magdalena”), 3. Szczawno (Mieszko”), 4. Rabka (odw. R-18), 5. Nałęczów („Miłość”), 6. Łądek (odw. L-2), 7. Krynica („Zuber III”), 8. Ciechocinek („Grzybek”), 9. Busko (odw. B-15), 10. Rymanów („Tytus”), 11. Rymanów (odw. R-11), 12. Duszniki („Pieniawa Chopina”), 13. Szczawa („Szczawa II”), Cieplice (odw. C-1), 15. Kołobrzeg (odw. B-1); współczesne wody infiltracyjne z obszaru Nizy Polskiego wg d’Obyrna i in. (1997).

Na podstawie usytuowania punktów odpowiadających wartościom $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ w stosunku do WMWL wyciągane są wnioski interpretacyjne (związane z rekonstrukcją procesów fizycznych, które doprowadziły do wystąpienia tych wartości) dotyczące genezy tych wód (rys. 3.5):

- punkty położone na linii WMWL lub w jej pobliżu świadczą o tym, że badane wody to infiltracyjne wody opadowe;
- punkty położone na linii WMWL lub w jej pobliżu, ale poniżej punktu odpowiadającego opadom lokalnym, dotyczą wód podziemnych, które infiltrowały w warunkach klimatu chłodniejszego (okres glacialny, mała epoka lodowa, opad zimowy);
- jeśli punkt położony jest w pobliżu lub poniżej wartości -29‰ dla $\delta^{18}\text{O}$ oznacza to, że mamy do czynienia z wodami glacialnymi (rys. 3.5) rozumianymi jako wody z topniejącego lodowca (znane w Europie jedynie z okolic Tallina);
- punkty położone na linii WMWL lub w jej pobliżu, ale powyżej punktu odpowiadającego opadom lokalnym, dotyczą wód podziemnych, które infiltrowały w warunkach klimatu cieplejszego (lub jest to opad letni). Możliwy jest tu również inny przypadek, świadczący o tym, że są to wody mieszane: opadowe i morskie;

- punkt położony jest w pobliżu punktu SMOW (Standard Mean Ocean Water) oznacza, że mamy do czynienia z wodami morskimi lub morskimi synsedymencyjnymi;
- punkty położone na prawo od linii WMWL dotyczą wód dehydratacyjnych lub chemicznych czy organicznych;
- punkty położone na lewo od linii WMWL oznaczają, że mogą one pochodzić z szybko parujących zbiorników (w warunkach klimatu ciepłego).



Rys. 3.5. Wartości $\delta^{18}\text{O}$ i δD ($\delta^2\text{H}$) w historycznych opadach i w wodach glacialnych na tle prostej Craig'a

4. PRACE ZREALIZOWANE W RAMACH ZADANIA

Trzeci etap realizacji zadania pn. *Geneza i „wiek” wód podziemnych zaliczonych do kopalin* obejmował wytypowanie ujęć wód leczniczych i termalnych do opróbowania izotopowego, pobór próbek wód i wykonanie laboratoryjnych analiz zawartości izotopów stabilnych tlenu i wodoru, trytu oraz radiowęgla, a także interpretację uzyskanych wyników oznaczeń izotopowych w celu określenia „wieku” i genezy wód występujących w wytypowanych ujęciach.

Oznaczenia radiowęgla umożliwiające datowanie wód głębokich systemów przepływu nie były dotychczas wykonywane w poprzednich etapach realizacji zadania. W ramach wcześniejszych etapów prac zakres badań laboratoryjnych obejmował oznaczenia izotopów stabilnych tlenu i wodoru oraz

trytu w ujęciach wód leczniczych. Do opróbowania wybrano wówczas źródła i otwory eksploatacyjne, w których istniało prawdopodobieństwo występowania wód współczesnych, tj. zawierających mierzalne stężenia trytu. Jako kryteria selekcji przyjęto niewielką głębokość ujęć, mineralizację wód, intensywność eksploatacji oraz, w przypadku dostępności, archiwalne wyniki oznaczeń izotopowych.

Badania wód leczniczych występujących w płytkich ujęciach i naturalnych wyływach kontynuowano w III etapie realizacji zadania, nie mniej rozszerzenie zakresu badań laboratoryjnych o radiowęgiel umożliwiło przeprowadzenie badań wód, głównie termalnych, ujętych otworami o głębokości sięgającej nawet 2000 m.

4.1. Wytypowanie ujęć wód podziemnych zaliczonych do kopalin do opróbowania izotopowego

Badaniami izotopowymi prowadzonymi w poprzednich etapach prac objęto znaczną część złóż wód leczniczych udokumentowanych na obszarze kraju, w tym niemal wszystkie położone w obrębie Karpat i Sudetów wraz z ich przedgórzami. Kontynuując te bardzo zaawansowane już prace, w latach 2015-2018 wytypowano do opróbowania ujęcia wód leczniczych w Karpatach wschodnich, gdzie dotychczas nie prowadzono badań. Do grupy włączono źródła wód siarczkowych, w Lesku (nr 1) i Nieborowie Małym (nr 1), ujęcie zmineralizowanych szczaw w Rabem (Rabe 1) oraz głęboki otwór służący obecnie do eksploatacji leczniczych wód zmineralizowanych w uzdrowisku Polańczyk (IG-1). Ponadto do grupy ujęć wytypowanych do badań izotopowych włączono ujęcia szczaw w Jedlinie-Zdroju (J-300) i w Szczawie (Szczawa II), z uwagi na dość wyraźną zmienność składu chemicznego występujących w nich wód. W raportowanym etapie prac przewidziano również opróbowanie otworów o większej głębokości, ujmujących głównie wody termalne.

Z uwagi na przewidziane badania zawartości radiowęgla przy typowaniu do opróbowania brano pod uwagę ujęcia o znacznej głębokości, zlokalizowane w strukturach geologicznych, w których czas przebywania wód w systemie hydrogeologicznym jest odpowiednio długi i dzięki temu istnieje potencjalnie możliwość określenia „wieku” wód za pomocą tego znacznika. Biorąc pod uwagę ograniczenia metody radiowęglowej związane z wymianą węglanów rozpuszczonych w wodzie oraz pochodzących z matrycy skalnej wybierano przede wszystkim ujęcia wód zafiltrowane w utworach innych niż węglanowe. Ponadto przyjęto założenie, że badania izotopowe zostaną wykonane głównie dla ujęć wód, w których tego rodzaju badań dotychczas nie prowadzono lub, jeśli prowadzono, to ich wyniki pochodzą z okresu przed rozpoczęciem eksploatacji, tj. z okresu dokumentowania ujęć. Brak danych archiwalnych utrudnia wprawdzie interpretację wyników, lecz wyniki dla dotychczas nieobjętych badaniami ujęć mają istotną wartość poznawczą.

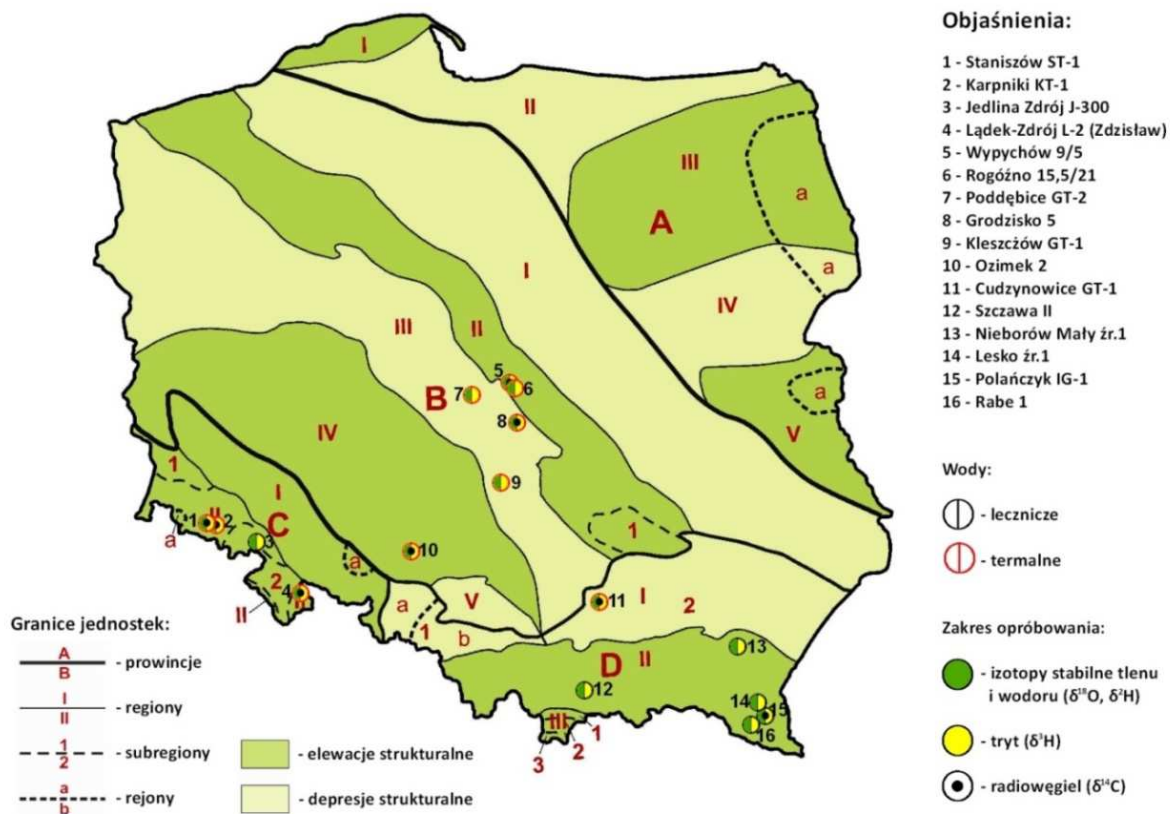
Wybrano zatem otwory ujmujące wody termalne i lecznicze termalne eksploatowane w sposób ciągły, w tym eksploatowane samoczynnie zlokalizowane w obrębie jednostek geologicznych o zróżnicowanych warunkach geologicznych i stopniu rozpoznania występowania tego rodzaju wód. Do badań wytypowano trzy ujęcia z obszaru Sudetów (Sudecki Region Geotermiczny wg Dowgiałty, 2001) – KT-1 w Karpnikach, L-2 w Łądku-Zdroju oraz ST-1 w Staniszowie, pięć z regionu niecki szczecińsko-łódzko-miechowskiej i sąsiadującego z nią wału kujawsko-pomorskiego (odcinek kutnowski) – Grodzisko nr 5, Kleszczów GT-1, Poddębice GT-2, Rogóźno 15,5/21 oraz Wypychów 9/5, a także po jednym ujęciu z obszaru monokliny przedsudeckiej – Ozimek nr 2 i zapadliska przedkarpackiego – Cudzynowice GT-1. Wśród wytypowanych ujęć jedynie w przypadku L-2 w Łądku-Zdroju istnieje dość liczny zbiór izotopowych danych archiwalnych.

Ostatecznie do badań izotopowych przewidzianych do przeprowadzenia w III etapie prac związanych z określaniem „wieku” i pochodzenia wód podziemnych zaliczonych do kopalin wytypowano 6 obiektów ujmujących wody lecznicze (chłodne) oraz 10 ujmujących wody termalne lub lecznicze wody termalne (Łądek-Zdrój L-2, Cudzynowice GT-1; tab. 4.1, rys. 4.1).

Tab. 4.1. Podstawowe informacje o obiektach hydrogeologicznych wytypowanych do badań izotopowych

Nr na mapie	Nazwa obiektu	Rodzaj obiektu	Poziom wodonośny		Charakterystyka wody	
			Gł. [m]	Stratygrafia	SSR [g/dm ³]	Typ chemiczny
1	Staniszów ST-1	otwór eksploat. ----- wody termalne	1360,0	karbon górny	0,5	SO ₄ -HCO ₃ -Cl-Na,F,Rn,S
2	Karpniki KT-1	otwór eksploat. ----- wody termalne	1793,5	karbon górny	0,5	HCO ₃ -SO ₄ -Na,F,Rn
3	Jedlina-Zdrój J-300	otwór eksploat. ----- wody lecznicze	298,8	karbon górny	0,8	HCO ₃ -Na-Ca-Mg,F,Fe,Rn,CO ₂
4	Łądek Zdrój L-2 (Zdzisław)	otwór eksploat. ----- termalne wody lecznicze	586,6	prekambr	0,2	HCO ₃ -(SO ₄)-Na,F,Rn,S
5	Wypychów 9/5	otwór badawczy ----- wody termalne	242,2	jura górna	1,5	Cl-SO ₄ -Na-Ca
6	Rogóźno 15,5/21	otwór badawczy ----- wody termalne	89,0	jura	0,4	HCO ₃ -Ca-Na
7	Poddębice GT-2	otwór eksploat. ----- wody termalne	1962,0	kreda dolna	0,3	HCO ₃ -Cl-Na-Ca
8	Grodzisko 5	otwór eksploat. ----- wody termalne	759,0	kreda dolna	0,3	HCO ₃ -Ca
9	Kleszczów GT-1	otwór eksploat. ----- wody termalne	1484,0	jura-trias	8,0	Cl-Na
10	Ozimek 2	otwór eksploat. ----- wody termalne	547,0	trias-perm	0,5	HCO ₃ -Ca
11	Cudzynowice GT-1	otwór eksploat. ----- termalne wody lecznicze	667,0	kreda górna	15,1	Cl-SO ₄ -Na,I,S
12	Szczawa II	otwór eksploat. ----- wody lecznicze	72,5	paleogen	23,8	HCO ₃ -Cl-Na,I,CO ₂

13	Nieborów Mały źr.1	źródło ----- wody lecznicze	0,0	paleogen- eocen	2,5	HCO ₃ -Cl-Na-Ca,S
14	Lesko źr.1	źródło ----- wody lecznicze	0,0	paleogen	0,5	HCO ₃ -Ca-Mg,S
15	Polańczyk IG-1	otwór eksploat. ----- wody lecznicze	710,0	paleogen	2,4	Cl-HCO ₃ -Na,I
16	Rabe 1	otwór eksploat. ----- wody lecznicze	35,4	paleogen- kreda	4,8	HCO ₃ -Cl-Na,CO ₂



Prowincja	Region	Subregion – 1 rejon – a
A – platformy prekambryjskiej	I – wyniesienia Leby	–
	II – basenu bałtyckiego	–
	III – wyniesienia mazursko-suwalskiego	a – augustowski
	IV – zapadliska podlaskiego	a – białowiecki
	V – wyniesienia lubelskiego	a – wisznicki
B – platformy paleozoicznej	I – niecka brzeźnego	–
	II – wał środkowopolskiego	1 – świętokrzyski
	III – niecka szczecińsko-miechowskiego	–
	IV – monokliny przedsudeckiej	–
	V – zapadliska górnośląskiego	–
C – sudecka	I – bloku przedsudeckiego	a – niemodliński
	II – Sudetów	1 – zewnątrzsudecki
		2 – śródsudecki
		a – izerski
D – karpacka	I – zapadliska przedkarpackiego	1 – zachodni
		a – kędzierzyński
		b – oświęcimski
		2 – wschodni
	II – Karpat zewnętrznych	–
	III – Karpat wewnętrznych	1 – pieniński
		2 – podhalański
3 – tatrzański		

Rys. 4.1. Lokalizacja ujęć wód podziemnych zaliczonych do kopaliny wytypowanych do badań izotopowych na tle regionalizacji hydrogeologicznej (Dowgiało i Paczyński, 2002)

4.2. Pobór próbek wód z wytypowanych ujęć

Prace terenowe polegające na poborze próbek wód w celu wykonania oznaczeń laboratoryjnych zawartości radiowęglu i trytu oraz oznaczenia składu izotopowego tlenu i wodoru zrealizowano w kilku etapach, w okresie od października 2015 r. do sierpnia 2017 r. W okresie tym pobrano łącznie 40 próbek wód termalnych i leczniczych:

- 8 próbek do oznaczeń radiowęglu – próbki o pojemności 60 l pobierane do pojemników z tworzywa HDPE (3 x 20 l);
- 16 próbek do oznaczeń trytu – próbki o pojemności 1,5 l pobierane do butelek z polietylenu;
- 16 próbek do oznaczeń składu izotopów stabilnych tlenu i wodoru – próbki o pojemności 0,5 l pobierane do butelek szklanych.

Ostateczny zakres opróbowania izotopowego wytypowanych obiektów hydrogeologicznych ustalany był podczas wizji lokalnych, w zależności od możliwości właściwego poboru próbek. Podczas planowania prac przyjęto założenie, że zostanie wykonanych 8 kompletów oznaczeń obejmujących wszystkie wymienione znaczniki izotopowe, łącznie z oznaczeniami trytu, w celach kontrolnych. Komplet próbek pobrano dla 7 ujęć wód termalnych i 1 ujęcia wód leczniczych. Dla pozostałych ujęć pobrano jedynie próbki do oznaczeń trytu oraz izotopów stabilnych tlenu i wodoru.

Przed pobraniem próbek wód wykonywano pomiary podstawowych właściwości fizykochemicznych, w tym przewodności elektrolitycznej właściwej, zasolenia, temperatury, a w przypadku wód kwasowęglowych i szczaw – zawartości rozpuszczonego CO₂.

Pobrane próbki wód zostały przekazane protokolarnie do laboratorium wykonawcy badań izotopowych - Towarzystwa Badania Przemian Środowiska Geosfera w Krakowie

4.3. Laboratoryjne badania izotopowe wód

Analizy laboratoryjne składu izotopowego wód oraz zawartości trytu i radiowęgla zostały wykonane w ramach prac kooperacyjnych przez Towarzystwo Badania Przemian Środowiska Geosfera w Krakowie, w laboratorium Katedry Zastosowań Fizyki Jądrowej Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie. Pracami kierował Marek Duliński. Zgodnie z zawartą umową wykonano 8 oznaczeń radiowęgla, 16 oznaczeń stężenia trytu oraz 16 oznaczeń składu izotopowego tlenu i wodoru (w przypadku $\delta^2\text{H}$ dla niektórych próbek wykonano podwójne oznaczenia), które zostały zestawione w tabeli 4.2.

Wartości opisujące skład izotopowy wód opróbowanych ujęć mieszczą się w zakresie:

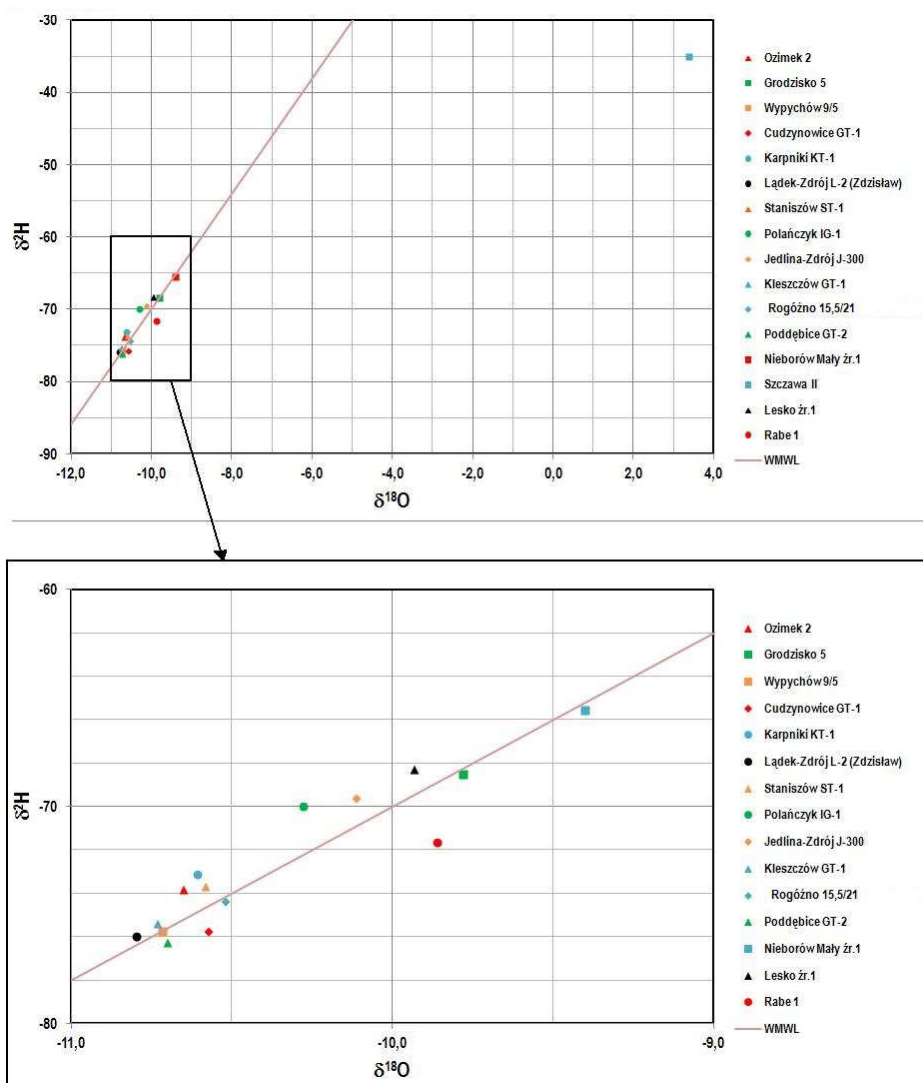
- dla trytu od $0 \pm 0,4$ do $7,0 \pm 0,5$ T.U., przy czym większość oznaczeń mieści się w zakresie od $0 \pm 0,4$ do $0,3 \pm 0,4$ T.U., więc jeśli uwzględnić błąd oznaczenia, można przyjąć, iż zawartość trytu jest równa zero (wody beztrytowe);
- dla ^{14}C od $0,6 \pm 1,0$ do $34,9 \pm 1,5$ pmc, przy czym w jednym wypadku (Polańczyk IG-1) wartość $\delta^{13}\text{C}$ wyklucza możliwość wyznaczenia „wieku”, a w 4 innych zaznacza się obecność wymiany izotopowej rozpuszczonych węglanów z matrycą skalną;
- dla $\delta^{18}\text{O}$ od $-10,81$ do $3,39\text{‰}$, przy niepewności pojedynczego pomiaru wynoszącej $\pm 0,1\text{‰}$, przy czym wszystkie oznaczenia z wyjątkiem wykonanego dla ujęcia Szczawa II układają się wzdłuż linii WMWL w zakresie wartości od $-10,81$ do $-9,40\text{‰}$ (rys. 4.2);
- dla $\delta^2\text{H}$ od $-35,1\text{‰}$ do $-76,6\text{‰}$, przy niepewności pojedynczego pomiaru rzędu $\pm 1\text{‰}$. Podobnie jak w przypadku $\delta^{18}\text{O}$ wszystkie oznaczenia z wyjątkiem wykonanego dla ujęcia Szczawa II układają się wzdłuż linii WMWL w zakresie wartości od $-65,6\text{‰}$ do $-76,6\text{‰}$ (rys. 4.2).

Tab. 4.2. Zestawienie wyników oznaczeń izotopowych wód termalnych i leczniczych wykonanych w ramach raportowanego zadania

Nr na mapie	Nazwa ujęcia	Data poboru	$\delta^{18}\text{O}$ [‰] V-SMOW	$\delta^2\text{H}$ [‰] V-SMOW	Tryt [T.U.]	$\delta^{13}\text{C}$ [‰] V-PDB	^{14}C [pmc]
1	Staniszów ST-1	21.06.2016	-10,55 -10,61	-74,4 -73,0	0,3 ±0,4	-9,7	10,5 ±1,0
2	Karpniki KT-1	30.10.2015	-10,61 -10,60	-73,9 -72,4	0,7 ±0,4	-8,7	2,5 ±1,0
3	Jedlina-Zdrój J-300	21.06.2016	-10,08 -10,14	-69,1 -70,2	7,0 ±0,5	-	-
4	Lądek-Zdrój L-2	20.06.2016	-10,78 -10,81	-76,6 -75,4	0,3 ±0,4	-13,3	20,5 ±1,5
5	Wypychów 9/5	27.10.2015	-10,72 -10,71	-75,8 -75,8	0,1 ±0,4	-9,4	0,6 ±1,5
6	Rogóżno 15,5/21	14.11.2016	-10,52	-74,4	0,8 ±0,3	-	-
7	Poddebice GT-2	14.11.2016	-10,70	-76,3	0,1 ±0,4	-	-
8	Grodzisko nr 5	26.10.2015	-9,80 -9,76	-68,5 -68,6	0,0 ±0,4	-12,0	34,9 ±1,5
9	Kleszczów GT-1	14.11.2016	-10,73	-75,4	2,2 ±0,3	-	-
10	Ozimek nr 2	26.10.2015	-10,67 -10,63	-73,9 -73,8	0,0 ±0,4	-11,9	1,2 ±1,5
11	Cudzynowice GT-1	30.10.2015	-10,58 -10,56	-76,2 -75,4	0,0 ±0,4	-5,9	3,0 ±1,5
12	Szczawa II	16.08.2017	3,39	-35,1	1,1 ±0,3	-	-
13	Nieborów Mały, źr. 1	8.08.2017	-9,40	-65,6	1,4 ±0,3	-	-
14	Lesko, źr. 1	9.08.2017	-9,93	-68,3	3,0 ±0,4	-	-
15	Polańczyk IG-1	16.06.2016	-10,24 -10,31	-69,8 -70,2	0,1 ±0,4	+18,8	0,6 ±1,0
16	Rabe 1	9.08.2017	-9,86	-71,7	0,0 ±0,3	-	-

Niepewność pomiaru składu izotopów trwałych wynosi $\pm 0,1\text{‰}$, $\pm 1\text{‰}$ odpowiednio dla $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ oraz $\pm 0,2\text{‰}$ dla $\delta^{13}\text{C}$

Uzyskane wartości oznaczeń laboratoryjnych wskazują na znaczne zróżnicowanie „wieku” oraz, w mniejszym stopniu, genezy wód pochodzących z opróbowanych ujęć. Skład izotopowy tych wód, poza przypadkiem Szczawy II, wskazuje na dominujące znaczenie komponenty infiltracyjnej. Brak jest widocznego zróżnicowania regionalnego wyników w odniesieniu do składu izotopowego, w tym wynikającego z oddziaływania efektu kontynentalnego lub wysokościowego.



Rys. 4.2. Skład izotopowy tlenu i wodoru w opróbowanych ujęciach wód leczniczych i termalnych na tle światowej linii opadów WWL ($\delta^2H = 8\delta^{18}O + 10$)

Relatywnie najcięższym składem izotopowym odznaczają się wody słabo zmineralizowanych źródeł w Lesku i Nieborowie (Karpaty wschodnie) oraz ujęcia wód termalnych w Grodzisku (niecka łódzka), najlżejszym zaś wody Łądka-Zdroju (Sudety), Poddębic, Kleszczowa i Wypychowa (niecka łódzka). We wspomnianym ujęciu Szczawa II występują typowe dla Karpat zewnętrznych i przejściowej strefy hydrochemicznej czteroskładnikowe wody z komponentą dehydratacyjną, decydującą o ciężkim izotopowo składzie tych wód.

W pracach związanych z określaniem „wieku” i genezy wód wykorzystano, w miarę dostępności, oznaczenia archiwalne dostępne w opracowaniach publikowanych i archiwalnych oraz w Bazie Danych Znaczników Środowiskowych prowadzonej w ramach zadań PSH w Oddziale Karpackim PIG-PIB.

5. INTERPRETACJA WYNIKÓW OZNACZEŃ IZOTOPOWYCH

Z uwagi na znaczne zróżnicowanie warunków występowania wód podziemnych zaliczonych do kopalin w ujęciach objętych badaniami opis uzyskanych wyników oznaczeń izotopowych i ich interpretacja zostały przedstawione w podziale na regiony hydrogeologiczne odpowiadające regionalizacji wód leczniczych i zmineralizowanych Dowgiałły i Paczyńskiego (2002).

5.1. Niecka szczecińsko-miechowska

Niecka szczecińsko-miechowska jest asymetryczną strukturą o charakterze synklinalnym o kierunku NW–SE, uformowaną na skraju prekambryjskiej platformy wschodnioeuropejskiej oraz skłonu platformy waryscyjskiej obszaru przedsudeckiego na przełomie mezozoiku i kenozoiku w wyniku ruchów laramijskich orogenezy alpejskiej, odpowiadających za inwersję permsko-mezozoicznego basenu sedymentacyjnego. Jednostka dzieli się na mniejsze struktury hydrogeologiczne - niecki szczecińską, mogileńską, łódzką i miechowską.

Ujęcia wytypowane do badań izotopowych zlokalizowane w Grodzisku, Kleszczowie i Poddębicach znajdują się w obrębie niecki łódzkiej. Nieckę tę wypełniają osady permsko-mezozoiczne, zalegające na starszych osadach paleozoicznych. Charakteryzuje się ona znacznymi deniwelacjami stropu osadów kredy. Istotną cechą budowy jednostki jest występowanie w głębokim synklinalnym obniżeniu antyklinalnych wypiętrzeń związanych z cechsztyńskimi wysadami solnymi, rozdzielonych synklinami. Powstanie struktur salinarnych – poduszek i wysadów – jest wynikiem ruchów mas solnych, które zachodziły pod wpływem ciśnienia nadkładu oraz ciśnień tektonicznych.

Niecka łódzka stanowi jeden z najcenniejszych w kraju zbiorników wód podziemnych. Z uwagi na zasobność zarówno w wody zwykłe, jak i w wody termalne znaczenie gospodarcze tego zbiornika można określić mianem strategicznego. W obrębie niecki łódzkiej znajduje się najgłębsza w skali kraju strefa wystodzenia wód podziemnych sięgająca utworów kredy dolnej, do głębokości dochodzącej do 2000 m, z wyraźnie zaznaczoną inwersją hydrochemiczną. Zbiorniki kredy dolnej oraz dolnej jury zaliczane są do bardzo perspektywicznych dla ujmowania wód termalnych.

Obszar niecki łódzkiej charakteryzuje się również złożoną historią eksploatacji wód podziemnych. W aglomeracji łódzkiej prowadzona od XIX w. intensywna eksploatacja wód podziemnych z poziomów kredy górnej i dolnej doprowadziła do istotnego naruszenia warunków

hydrodynamicznych, hydrochemicznych oraz przypuszczalnie termicznych. Zmniejszenie wielkości wydobycia w końcu XX w. doprowadziło do częściowej odbudowy zwierciadła wód oraz ich zasobów.

W ciągu ostatnich kilkunastu lat powstało kilka regionalnych opracowań hydrogeologicznych dotyczących wód pitnych - warunków hydrochemicznych oraz hydrodynamicznych. Prowadzone badania uzupełniane były badaniami izotopowymi, które w przypadku warunków hydrochemicznych potwierdziły wyniki otrzymane innymi metodami. Liczba oznaczeń izotopowych w wodach występujących w zbiornikach geotermalnych niecki łódzkiej jest jednak niewielka. Dostępne wyniki pochodzą z archiwalnych i publikowanych opracowań oraz bieżących badań PIG-PIB.

5.1.1. Wody termalne

GRODZISKO 5

Informacje o położeniu obiektu:			
<u>miejsowość:</u>	<u>gmina:</u>	<u>powiat:</u>	<u>województwo:</u>
Grodzisko	Rzgów (gm. miejsko-wiejska)	łódzki wschodni	łódzkie

Informacje o obiekcie:			
<u>typ obiektu:</u>		otwór eksploatacyjny	
<u>rodzaj ujętej wody:</u>		woda termalna	
<u>rzędna terenu</u> <u>(m n.p.m.):</u>	<u>głębokość całkowita</u> <u>(m):</u>	<u>rok wykonania:</u>	<u>stan obiektu:</u>
192,84	901,0	1960	czynny
<u>cel wykorzystania:</u>		gospodarka komunalna	
<u>użytkownik:</u>		Zakład Wodociągów i Kanalizacji Sp. z o.o. w Łodzi	

Informacje o ujętym poziomie wodonośnym:			
<u>wiek poziomu wodonośnego:</u>		kreda dolna	
<u>poziom wodonośny (m p.p.t.):</u>		<u>zwierciadło (m p.p.t.):</u>	
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>nawiercone:</u>	<u>ustabilizowane:</u>
759,0	894,0	759,0	24,6
<u>zafiltrowanie (m p.p.t.):</u>		<u>zasoby eksploatacyjne</u>	<u>depresja (m):</u>
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>(m³/h):</u>	
757,0	810,0	270,00	38,00

Właściwości fizykochemiczne wody:		
<u>mineralizacja (g/dm³):</u>	<u>temperatura (°C):</u>	<u>typ chemiczny wody:</u>
0,3	23	HCO ₃ -Ca

Wyniki oznaczeń izotopowych:					
<u>Data poboru</u>	<u>δ¹⁸O</u> [‰] V-SMOW	<u>δ²H</u> [‰] V-SMOW	<u>Tryt</u> [T.U.]	<u>δ¹³C</u> [‰] V-PDB	<u>¹⁴C</u> [pmc]
26.10.2015	-9,80 -9,76	-68,5 -68,6	0,0 ±0,4	-12,0	34,9 ±1,5

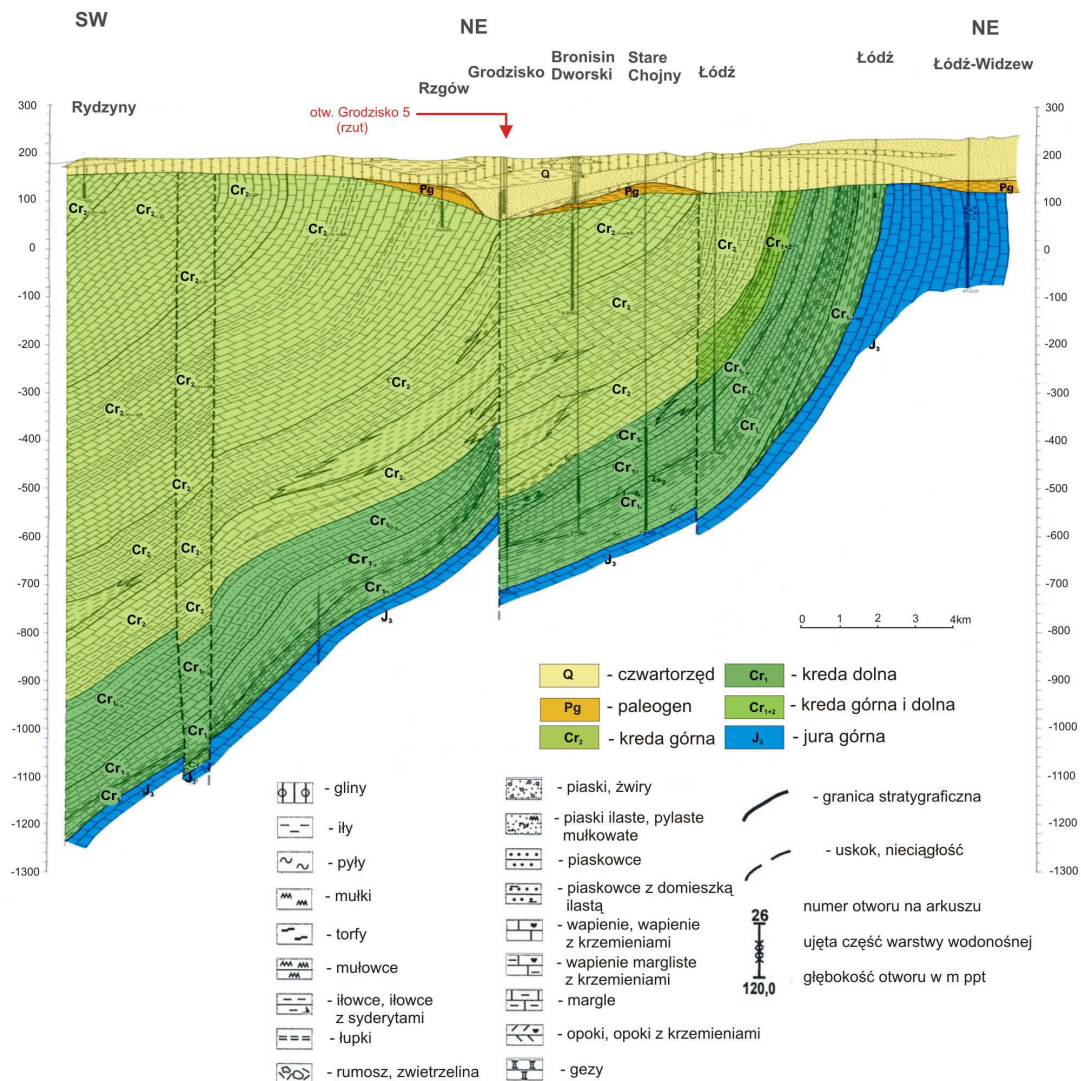
Niepewność pomiaru składu izotopów trwałych wynosi ±0,1‰, ±1‰ odpowiednio dla δ¹⁸O, δ²H oraz ±0,2‰ dla δ¹³C

Miejscowość Grodzisko, granicząca od NW z Łodzią, położona jest w obrębie wschodniego skrzydła niecki łódzkiej, w sąsiedztwie wału kujawsko-pomorskiego. Struktury rozdziela umowna granica przebiegająca wzdłuż podkenozoicznych wychodni utworów kredy górnej (rys. 5.1). Utwory te w rejonie ujęcia zapadają w kierunku południowo-zachodnim (Rodzoch i in., 2013). Kąt nachylenia wschodniego skrzydła niecki wynosi 3-5°. Grodzisko położone jest w strefie głębokiego wysłodzenia wód podziemnych sięgającego utworów jury górnej oraz wyraźnie zaznaczającej się inwersji hydrochemicznej. W rejonie Grodziska w profilu pionowym, od utworów czwartorzędu przez kredę dolną, obserwowany jest spadek mineralizacji wraz z głębokością. Przeprowadzone w obrębie aglomeracji łódzkiej na przełomie XX i XXI w. kompleksowe badania hydrochemiczne (Ziułkiewicz, 2003) wskazują, iż przyczyny występowania wyższej mineralizacji wód w piętrze czwartorzędowym wynikają z antropopresji (zanieczyszczenia i zasolenia), zaś w głębszych poziomach w kształtowaniu się warunków hydrochemicznych dominują procesy geogeniczne, na które nakładają się procesy antropogeniczne (intensywna eksploatacja wód poziomów wodonośnych kredy). Dodać należy, że obszar Grodziska znajduje się poza regionalnym lejem depresji wytworzonym w obrębie aglomeracji łódzkiej w kredowym piętrze wodonośnym.

W otworze Grodzisko 5 o głębokości 901 m odwierconym głównie w utworach kredy, wykształconych jako wapienie, iłotłupki, iły i piaskowce, ujęto poziom wodonośny występujący w spągowej części kredy dolnej na pograniczu z utworami jury (rys. 5.1). Poziom ten zbudowany jest głównie z piaskowców gruboziarnistych, przechodzących ku górze w piaskowce drobnoziarniste. Filtr posadowiono na głębokości od 757 do 810 m. Ujęte wody są głównie typu $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, charakteryzują się niewysoką mineralizacją wynoszącą ok. $0,3 \text{ g/dm}^3$ i temperaturą na wypływie rzędu 23°C . Obszarami alimentacyjnymi dla geotermalnego zbiornika kredy dolnej w rejonie Łodzi i położonego nieopodal Grodziska są jej podczwartorzędowe wychodnie zlokalizowane wzdłuż wału kujawsko-pomorskiego oraz w obrzeżeniu gór Świętokrzyskich. Przepływ wód w obrębie regionalnego systemu krążenia w tym rejonie odbywa się w kierunku NW-SE. Ujęcie Grodzisko 5 jest wykorzystywane do zaopatrzenia sieci wodociągowej Łodzi i aglomeracji łódzkiej.

Badania izotopowe wykonane w 2015 r. w ramach raportowanego zadania, obejmujące oznaczenia izotopów stabilnych tlenu i wodoru oraz oznaczenia trytu i radiowęglą, są pierwszymi tego rodzaju badaniami przeprowadzonymi dla wód ujmowanych otworem Grodzisko 5. Uzyskane wyniki wskazują, że ujęte wody pozbawione są domieszki trytu (nie zawierają składowej zasilania po 1952 r.), zatem ich stopień zagrożenia zanieczyszczeniami pochodzącymi z powierzchni terenu jest niski. Skład izotopowy tlenu i wodoru jest typowy dla wód infiltracyjnych zasilanych w warunkach klimatycznych identycznych lub niemal identycznych jak panujące współcześnie. „Wiek” tych wód obliczony na podstawie zawartości radiowęglą wynosi ok. 3700 lat, co potwierdza zasilanie wód

w holocenie, w klimacie zbliżonym do panującego obecnie, oraz położenie ujęcia w relatywnie niedużej odległości od strefy zasilania. Zmianę „wieku” wód wraz z odległością od strefy zasilania potwierdzają wyniki oznaczeń izotopowych uzyskiwane dla ujęć na obszarze łodzi. „Wiek” wód występujących w utworach kredy dolnej w ujęciu Teofilów zlokalizowanym w bezpośrednim sąsiedztwie strefy zasilania i w odległości ok. 15 km na NW od Grodziska określony został na nieco ponad 400 lat ($^{14}\text{C} = 46,4 \pm 1,5 \text{ pmc}$; Ziulkiewicz, 2003).



Rys. 5.1. Przekrój geologiczny przez nieckę łódzką w rejonie Grodziska (Rodzoch i in., 2013)

KLESZCZÓW GT-1

Informacje o położeniu obiektu:			
<u>miejsowość:</u>	<u>gmina:</u>	<u>powiat:</u>	<u>województwo:</u>
Kleszczów	Kleszczów (gm. wiejska)	betchatowski	łódzkie

Informacje o obiekcie:			
<u>typ obiektu:</u>		otwór eksploatacyjny	
<u>rodzaj ujętej wody:</u>		woda termalna	
<u>rzędna terenu</u> <u>(m n.p.m.):</u>	<u>głębokość całkowita</u> <u>(m):</u>	<u>rok wykonania:</u>	<u>stan obiektu:</u>
214,10	1620,0	2009	czynny
<u>cel wykorzystania:</u>		ciepłownictwo	
<u>użytkownik:</u>		Zakład Komunalny Kleszczów Sp. z o.o.	

Informacje o ujętym poziomie wodonośnym:			
<u>wiek poziomu wodonośnego:</u>		jura dolna-trias	
<u>poziom wodonośny (m p.p.t.):</u>		<u>zwierciadło (m p.p.t.):</u>	
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>nawiercone:</u>	<u>ustabilizowane:</u>
1484,0	1620,0	1484,0	49,2
<u>zafiltrowanie (m p.p.t.):</u>		<u>zasoby eksploatacyjne</u>	<u>depresja (m):</u>
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>(m³/h):</u>	
1484,0	1620,0	150,00	-

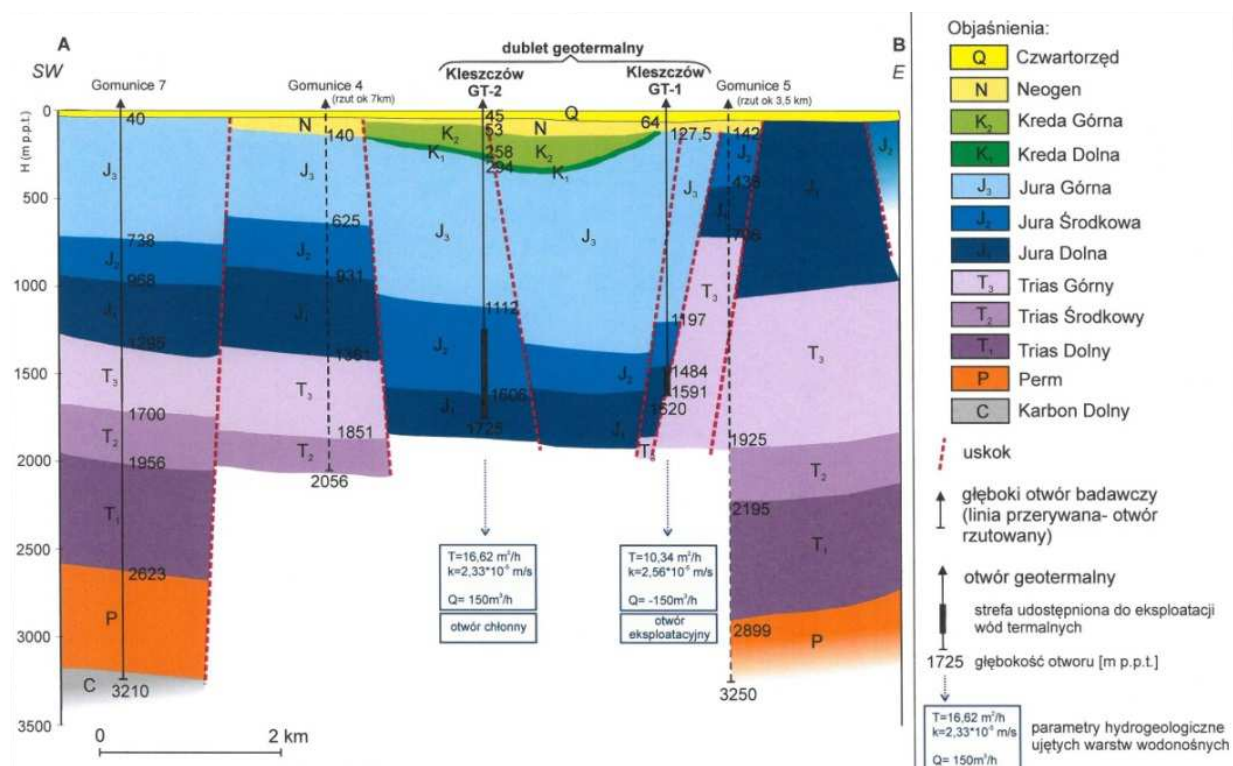
Właściwości fizykochemiczne wody:		
<u>mineralizacja (g/dm³):</u>	<u>temperatura (°C):</u>	<u>typ chemiczny wody:</u>
8,0 (2011 r.)	52	Cl-Na

Wyniki oznaczeń izotopowych:					
Data poboru	$\delta^{18}\text{O}$ [‰] V-SMOW	$\delta^2\text{H}$ [‰] V-SMOW	Tryt [T.U.]	$\delta^{13}\text{C}$ [‰] V-PDB	^{14}C [pmc]
2.11.2009 ¹⁾	-10,70	-75,1 -76,2	0,0 ±0,4	-13,7	0,0 ±1,0
14.11.2016	-10,73	-75,4	2,2 ±0,3	-	-

Niepewność pomiaru składu izotopów trwałych wynosi ±0,1‰, ±1‰ odpowiednio dla $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ oraz ±0,2‰ dla $\delta^{13}\text{C}$

¹⁾ Biernat i in. (2011)

Obszar Kleszczowa położony jest na pograniczu niecki łódzkiej i miechowskiej, w obrębie rozdzielającej je elewacji radomszczańskiej. Elewacja ta składa się z szeregu brachyantyklin powstałych na skutek tektoniki salinarnej, poprzecinanych uskokami o przebiegu NW-SE i ENE-WSW (Biernat i in., 2011). Dyslokacje spowodowały powstanie w jej obrębie szeregu rowów tektonicznych, w tym rowu Kleszczowa, będącego najgłębszym rowem neotektonicznym na obszarze niżowej części Polski (rys. 5.2).



Rys. 5.2. Przekrój geologiczny przez rejon Kleszczowa (Biernat i in., 2011)

W otworze GT-1 ujęto wody termalne z piętra wodonośnego występującego w piaskowcach z przewarstwieniami iłowców i mułowców jury dolnej i triasu górnego, z głębokości 1484-1620 m. W trakcie dokumentowania ujęcia (2010 r.) zwierciadło piezometryczne nawierconego poziomu wodonośnego stabilizowało się na głębokości ponad 49 m p.p.t. Uzyskano z niego wody o mineralizacji ok. 8 g/dm³, typie chemicznym Cl-Na, temperaturze na wypływie ok. 52°C i zasobach eksploatacyjnych wynoszących 150 m³/h. Obszar alimentacyjny ujęcia znajduje się na południe od Kleszczowa. Zasilanie odbywa się na drodze infiltracji wód poprzez wyżej ległe utwory (Górecki, 1995; Biernat i in., 2011). Z uwagi na zróżnicowanie własności filtracyjnych w obrębie nadkładu czas przebywania wód w środowisku skalnym jest długi. Odptyw wód odbywa się głównie w kierunku północnym.

Otwór Kleszczów GT-1 położony jest w odległości ok. 2 km od południowej skarpy odkrywki węgla brunatnego Bełchatów. Odkrywka ta jest intensywnie odwadniana (180-200 mln m³/rok), w związku z czym w jej otoczeniu stosunki wodne są znacznie zaburzone (Biernat i in., 2011).

Eksploatację ujęcia rozpoczęto w 2015 r. Według uzyskanych informacji w 2016 r. zwierciadło piezometryczne w otworze Kleszczów GT-1 układało się ponad 5 m niżej niż w trakcie dokumentowania. Z dostępnych analiz właściwości fizyczno-chemicznych ujętych wód wynika, że spada również ich mineralizacja. W 2009 r. sucha pozostałość wynosiła ok. 6,0 g/dm³, zaś w 2015 r. ok. 4,5 g/dm³.

Badania izotopowe wód ujęcia GT-1 zostały wykonane w 2009 r. w trakcie jego dokumentowania i obejmowały izotopy stabilne tlenu i wodoru, tryt oraz radiowęgiel. Badania powtórzono w 2016 r. w ramach raportowanego zadania. Ograniczono je jednak do wykonania oznaczeń składu izotopów stabilnych oraz kontrolnie trytu.

Skład izotopów stabilnych w analizach z 2009 r. i 2016 r. wskazuje, iż ujęte wody termalne są wodami pochodzenia infiltracyjnego zasilanymi w klimacie nieco chłodniejszym niż współcześnie panujący. Wynik oznaczenia węgla ¹⁴C uzyskany w 2009 r. wynosił 0 pmc, co oznacza, że „wiek” tych wód jest poza zasięgiem metody oznaczenia, tj. wody są starsze niż 30 000 lat. Zupełnie zaskakujące jest pojawienie się w badaniach wykonanych w 2016 r. trytu na poziomie 2,2 T.U., chociaż w 2009 r. tryt w wodach nie występował. Z uwagi na uzyskany wynik oznaczenie nuklidu w próbce pobranej w 2016 r. zostało powtórzone i potwierdziło jego prawidłowość. Może to świadczyć o uruchomieniu dopływu wód pochodzenia atmosferycznego zasilanych po 1952 r., co zważywszy na głębokość występowania ujętego pietra wodonośnego, położenie ujęcia w osiowej części niecki łódzkiej w znacznej odległości od obszarów zasilania i długi czas dopływu wód zasilających ujęcie wydaje się być mało prawdopodobne. Na tej głębokości i w podobnych warunkach geologicznych nie stwierdzono dotychczas występowania trytu pochodzenia kosmogenicznego ani antropogenicznego. Jego obecność nie może być również efektem tzw. produkcji podziemnej, bowiem obserwowane stężenie trytu jest tu zbyt wysokie. Nie uzasadnia jej również bliskie położenie intensywnie odwadnianej odkrywki w Bełchatowie, której wpływ na warunki hydrogeologiczne ograniczony jest w zasadzie do pietra czwartorzędowego i górnokredowego. Oznaczenie trytu powinno zostać zatem powtórzone. Wskazane jest również powtórne wykonanie oznaczenia węgla ¹⁴C.

Przyjmując za prawidłową wartość oznaczenia trytu, stopień zagrożenia wód ujęcia zanieczyszczeniami pochodzenia antropogenicznego należałoby określić jako wysoki.

PODDĘBICE GT-2

Informacje o położeniu obiektu:			
<u>miejsowość:</u>	<u>gmina:</u>	<u>powiat:</u>	<u>województwo:</u>
Poddębice	Poddębice (gm. miejsko- wiejska)	Poddębicki	łódzkie

Informacje o obiekcie:			
<u>typ obiektu:</u>		otwór eksploatacyjny	
<u>rodzaj ujętej wody:</u>		woda termalna	
<u>rzędna terenu</u> <u>(m n.p.m.):</u>	<u>głębokość całkowita</u> <u>(m):</u>	<u>rok wykonania:</u>	<u>stan obiektu:</u>
119,50	2101,0	2010	czynny
<u>cel wykorzystania:</u>		ciepłownictwo, rekreacja	
<u>użytkownik:</u>		Geotermia Poddębice Sp. z o.o.	

Informacje o ujętym poziomie wodonośnym:			
<u>wiek poziomu wodonośnego:</u>		kreda dolna	
<u>poziom wodonośny (m p.p.t.):</u>		<u>zwierciadło (m p.p.t.):</u>	
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>nawiercone:</u>	<u>ustabilizowane:</u>
1962,0	2065,0	1962,0	+26,0 (samowypływ)
<u>zafiltrowanie (m p.p.t.):</u>		<u>zasoby eksploatacyjne</u> <u>(m³/h):</u>	<u>depresja (m):</u>
<u>od:</u>	<u>do:</u>	252,00	85,30
1962,0	2059,0		

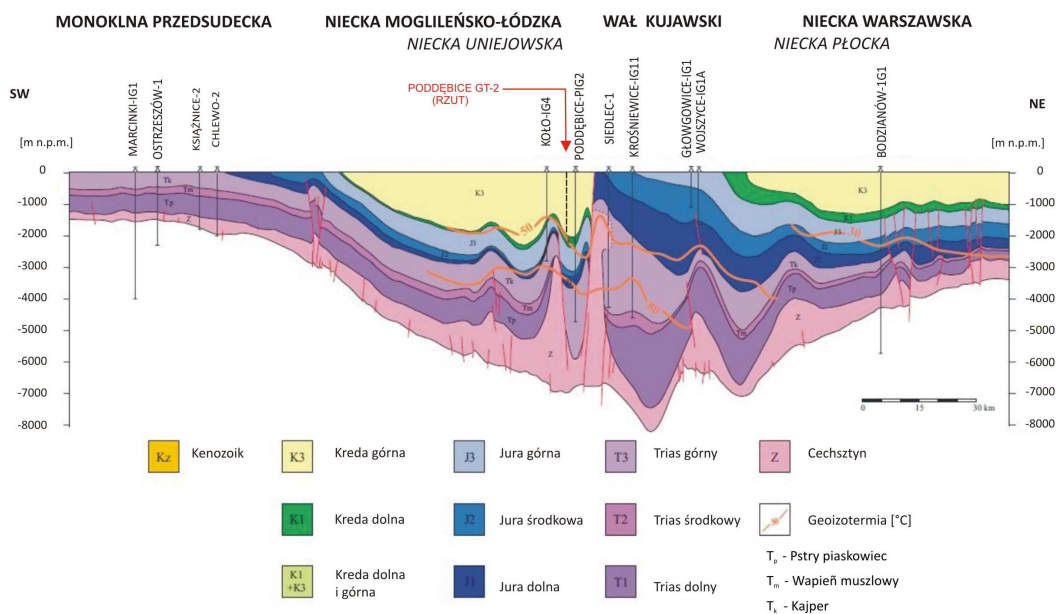
Właściwości fizykochemiczne wody:		
<u>mineralizacja (g/dm³):</u>	<u>temperatura (°C):</u>	<u>typ chemiczny wody:</u>
0,3	71	HCO ₃ -Cl-Na-Ca

Wyniki oznaczeń izotopowych:					
<u>Data poboru</u>	<u>δ¹⁸O</u> <u>[‰]</u> <u>V-SMOW</u>	<u>δ²H</u> <u>[‰]</u> <u>V-SMOW</u>	<u>Tryt</u> <u>[T.U.]</u>	<u>δ¹³C</u> <u>[‰]</u> <u>V-PDB</u>	<u>¹⁴C</u> <u>[pmc]</u>
10.02.2010 ¹⁾	-10,66	-77,05	0,0 ±0,3	-12,4	2,0 ±0,5
14.11.2016	-10,7	-76,3	0,1 ±0,4		

Niepewność pomiaru składu izotopów trwałych wynosi ±0,1‰, ±1‰ odpowiednio dla δ¹⁸O, δ²H oraz ±0,2‰ dla δ¹³C

¹⁾ Tadych i in. (2010)

Miejscowość Poddębice położona jest w centralnej części niecki łódzkiej (rys. 5.3), przez którą przebiegała oś maksymalnej subsydencji w basenie sedimentacyjnym kredy górnej. Sumaryczna miąższość osadów kredy w tym rejonie przekracza 2000 m. Otworem GT-2 zakończonym w utworach jury górnej ujęto wody występujące w artezyjskim dolnokredowym zbiorniku geotermalnym, w przedziale głębokości 1960 – 2063 m (Tadych i in., 2010). Zbiornik ten tworzą piaskowce o na ogół korzystnych własnościach kolektorskich.



Rys. 5.3. Przekrój geologiczny przez utwory Niżu Polskiego w rejonie Poddębic (Górecki, 2006, zmienione)

Przepływ wód w rejonie Poddębic odbywa się w kierunku E-W. Zasilanie zbiornika odbywa się w obrębie podkenozoicznych wychodni piaskowców zlokalizowanych przede wszystkim wzdłuż granicy z wałem kujawsko-pomorskim oraz przez lateralny dopływ z utworów jury od strony wału środkowopolskiego. Przyjmuje się, iż brak jest dopływu z piętra kredy górnej, z uwagi na zaciskanie się wraz z głębokością występujących w nim szczelin prowadzących wody (Ziułkiewicz, 2003). Podczas przepływu ku centralnym partiom struktury następuje różnicowanie mineralizacji i typów hydrochemicznych wód termalnych (strefowość hydrochemiczna), które należy wiązać głównie z intensywnością oddziaływania temperatura-woda-skała oraz z czasem tego oddziaływania. Niecka łódzka, a dokładnie jej wschodnia i centralna część wraz z rejonem Poddębic, jest obszarem o najgłębiej występującej strefie wystodzenia wód w skali całego kraju. Zjawisko to ma związek z szybkim przepływem wód od obszarów zasilania ku osi struktury (Ziułkiewicz, 2003) oraz z litologią osadów wodonośnych (Rodzoch i Karwacka, 2015).

Mineralizacja wód termalnych ujętych w otworze Poddębice GT-2 wynosi zaledwie $0,3 \text{ g/dm}^3$, a temperatura na wypływie z ujęcia sięga 71°C . Reprezentują one typ chemiczny $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na-Ca}$. Zasoby eksploatacyjne ujęcia przekraczają $250 \text{ m}^3/\text{h}$.

Badania izotopowe wód ujęcia wykonano w trakcie dokumentowania otworu w 2010 r. Badania przeprowadzone w 2016 r. w ramach raportowanego zadania stanowiły kontrolną serię badawczą. Na podstawie uzyskanych wyników należy stwierdzić, że wody ujęte w otworze Poddębice GT-2 są wodami beztrytowymi (pozbawionymi komponenty zasilania współczesnego), co potwierdza rezultat oznaczenia wykonanego kilka lat wcześniej, nienarażonymi na oddziaływanie antropogenicznych czynników pochodzących z powierzchni. Skład izotopów stabilnych tlenu i wodoru nie uległ zmianie i wskazuje na infiltrację w klimacie nieco chłodniejszym od obecnie panującego. Archiwalne wyniki oznaczenia zawartości ($^{14}\text{C} = 2 \pm 0,5 \text{ pmc}$) sugerują, że mogą to być wody o wieku ok. 24 000 lat, jednak skład izotopowy tlenu i wodoru wyklucza taką możliwość. W opinii autorów są to wody interglacjalne z domieszką wód z infiltracji holocenijskiej.

Podsumowując, badaniami izotopowymi objęto trzy głębokie otwory eksploatacyjne, w których ujęto wody termalne pochodzenia infiltracyjnego. Dwa z nich – Grodzisko 5 i Poddębice GT-2 – położone są na obszarze rozległej strefy głębokiego wystódzenia wód podziemnych obejmującej kredowe piętro wodonośne i sięgającej głębokości do 2000 m. Uzyskane wyniki oznaczeń odpowiadają położeniu ujęć względem obszaru zasilania, który stanowią podczwartorzędowe wychodnie utworów kredy występujące wzdłuż granicy niecki łódzkiej i wału kujawsko-pomorskiego. Wody ujęcia Grodzisko 5 położonego w bezpośrednim sąsiedztwie strefy alimentacji cechuje skład izotopowy tlenu i wodoru właściwy dla wód pochodzących ze współczesnej infiltracji i, jak wynika z archiwalnych oznaczeń radiowęglu, są one wyraźnie młodsze od występujących w otworze Poddębice GT-2 zlokalizowanym w części osiowej niecki łódzkiej. „Wiek” wód ujętych w Poddębicach określony na podstawie radiowęglu wskazuje na dominujący udział wód zasilanych w interglacjale oraz udział komponenty wód młodszych, prawdopodobnie holocenijskich. Podobnym składem izotopowym charakteryzują się zmineralizowane wody termalne ujęte z utworów jury dolnej i triasu otworem Kleszczów GT-1. Archiwalne oznaczenie wskazuje, że wody tego ujęcia są pozbawione radiowęglu, a więc nie zawierają komponenty o wieku młodszym niż 30 000 lat, tymczasem w najnowszym oznaczeniu stwierdzono obecność trytu, która świadczyłaby o dopływie wód o wieku rzędu kilku lub kilkunastu lat. Warunki występowania wód w opróbowanym poziomie wodonośnym wskazują na brak możliwości dopływu wód pochodzących z współczesnej infiltracji, nie mniej komplet oznaczeń izotopowych powinien zostać powtórzony, a ujęcie objęte systematycznymi badaniami z uwagi na zmiany hydrodynamiczne (obniżenie zwierciadła piezometrycznego) oraz hydrochemiczne (spadek wartości suchej pozostałości).

5.2. Wał środkowopolski

Wał środkowopolski jest obszarem platformowym zbudowanym ze skał prekambryjskiego podłoża krystalicznego, sfałdowanych utworów paleozoicznych oraz grubej cechsztyńsko-mezozoiczno-kenozoicznej pokrywy platformowej, stanowiącej kompleks skał osadowych o miąższości sięgającej do 7000 m. Osady te zostały wypiętrzone w efekcie wielkopromiennych fałdowań podczas starszych faz orogenezy alpejskiej oraz halotektoniki. Ruchy dźwigające przyczyniły się do ukształtowania struktury o charakterze antyklinorium, z którym związane są formacje salinarne. Występują one w południowo-zachodnim skrzydle wału, które jest pocięte licznymi dyslokacjami. W wyniku ruchów halotektonicznych powstały deformacje pokładów soli cechsztyńskich i powstanie struktur o formie wysadów i poduszek solnych.

Otwory badawcze – Rogóźno 15,5/21 i Wypychów 9/5 – objęte badaniami izotopowymi w ramach raportowanego zadania zlokalizowane są w rejonie wysadu solnego Rogóźno, w części struktury określanej mianem wału kujawskiego, na pograniczu z synklinorium szczecińsko-łódzko-miechowskim (niecka łódzka). Rozdziela je umowna granica przebiegająca wzdłuż podkenozoicznych wychodni utworów kredy górnej. Wysad solny Rogóźno jest jądrem struktury antyklinalnej, graniczącej od wschodu z utworami jury, a od zachodu z osadami kredy. Budowa geologiczna rejonu jest dobrze rozpoznana z uwagi na liczne prace związane z dokumentowaniem złoża węgla brunatnego i soli kamiennej na obszarze wysadu solnego Rogóźno. Wysad Rogóźno wznosi się z głębokości ok. 6 km i należy do największych struktur wysadowych w Polsce. Jego powierzchnia to ok. 21 km². Czapą gipsowa wysadu występuje na głębokości 55-330 m. Nad czapą, w utworach neogenu i paleogenu, występują dwa pokłady węgla brunatnego o łącznej miąższości ok. 60 m. W nadkładzie brak jest praktycznie osadów starszych od paleogenu. Osłonę wysadu stanowią utwory mezozoiczne – jurajskie, reprezentowane głównie przez węglanowe osady malmu, oraz kredowe. Kontakt z utworami cechsztyńskimi ma charakter tektoniczny.

Wody zmineralizowane na obszarze wału kujawskiego występują na zróżnicowanej głębokości – nad wysadami i w bezpośrednim ich sąsiedztwie mogą występować już w utworach neogenu lub czwartorzędu, na ogół jednak pojawiają się w utworach jury, na głębokości 200-500 m. Ze zbiornikiem tym związana jest również obecność wód termalnych, występujących lokalnie na niewielkich głębokościach, szczególnie w sąsiedztwie wysadów solnych. Utwory te zostały silnie zaburzone tektonicznie i spękane w wyniku procesów tektonicznych i halokinetycznych. Strefy tektoniczne umożliwiają migrację ogrzanych wód z dużych głębokości ku powierzchni Ziemi. Zasilanie zbiornika odbywa się w wyniku infiltracji na obszarach podczwartorzędowych wychodni oraz przesączania z poziomów wyżej leżących. Istotną rolę odgrywa również dopływ lateralny z różnowiekowych pięter wodonośnych, w tym z zasolonych wód cechsztyńskich.

5.2.1. Wody termalne

ROGÓŻNO 15,5/21

Informacje o położeniu obiektu:			
<u>miejsowość:</u>	<u>gmina:</u>	<u>powiat:</u>	<u>województwo:</u>
Kębliny	Zgierz (gm. wiejska)	zgierski	łódzkie

Informacje o obiekcie:			
<u>typ obiektu:</u>		otwór badawczy	
<u>rodzaj ujętej wody:</u>		woda termalna	
<u>rzędna terenu (m n.p.m.):</u>	<u>głębokość całkowita (m):</u>	<u>rok wykonania:</u>	<u>stan obiektu:</u>
133,00	89,1	1980	eksploatacja samoczynna
<u>cel wykorzystania:</u>		otwór niezagospodarowany	
<u>użytkownik:</u>		brak	

Informacje o ujętym poziomie wodonośnym:			
<u>wiek poziomu wodonośnego:</u>		jura	
<u>poziom wodonośny (m p.p.t.):</u>		<u>zwierciadło (m p.p.t.):</u>	
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>nawiercone:</u>	<u>ustabilizowane:</u>
89,0	89,1	89,0	(samowypływ)
<u>zafiltrowanie (m p.p.t.):</u>		<u>zasoby eksploatacyjne</u>	<u>depresja (m):</u>
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>(m³/h):</u>	
89,0	89,1	-	-

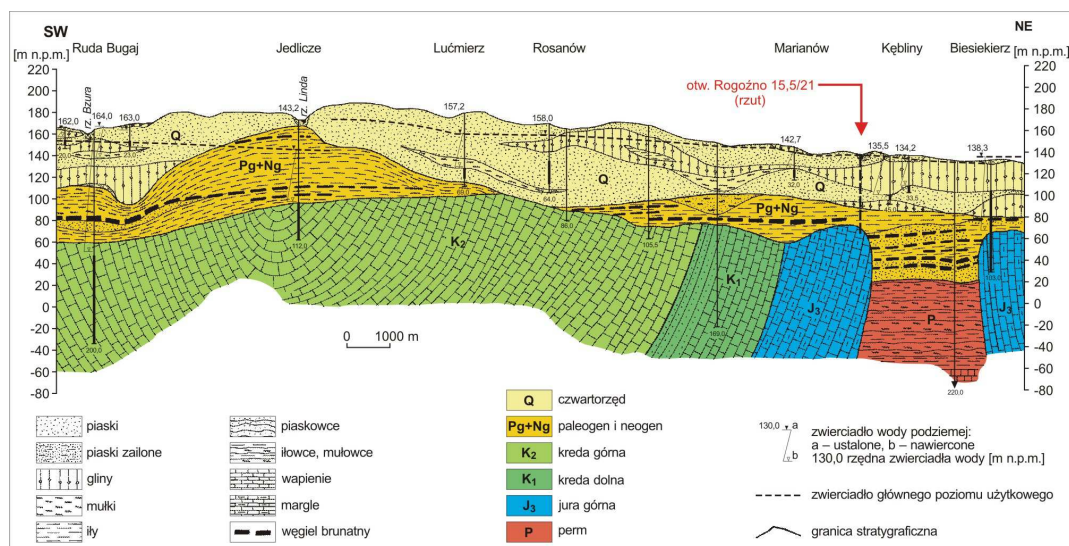
Właściwości fizykochemiczne wody:		
<u>mineralizacja (g/dm³):</u>	<u>temperatura (°C):</u>	<u>typ chemiczny wody:</u>
0,4	25	HCO ₃ -Ca-Na

Wyniki oznaczeń izotopowych:					
Data Poboru	$\delta^{18}\text{O}$ [‰] V-SMOW	$\delta^2\text{H}$ [‰] V-SMOW	Tryt [T.U.]	$\delta^{13}\text{C}$ [‰] V-PDB	^{14}C [pmc]
14.11.2016	-10,52	-74,4	0,8 ±0,3	-	-

Niepewność pomiaru składu izotopów trwałych wynosi ±0,1‰, ±1‰ odpowiednio dla $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$

Miejscowość Kębliny, w której zlokalizowany jest otwór Rogóżno 15,5/21, położona jest na SE od pnia wysadu solnego, na obszarze występowania osadów jury górnej wykształconej w postaci

wapieni, przykrytych utworami paleogenu z pokładem węgla brunatnego oraz miększymi osadami czwartorzędowymi w strefie granicznej z niecką szczecińsko-tódzko-miechowską (rys. 5.4). Obszar znajdował się pod oddziaływaniem procesów tektonicznych różnego typu związanych z powstaniem wału kujawsko-pomorskiego i niecki szczecińsko-tódzko-miechowskiej, wypiętrzaniem wysadu solnego oraz glącitektoniką.



Rys. 5.4. Przekrój hydrogeologiczny przez rejon Kęblin (Meszczynski i Szczerbicka, 2002)

W rejonie Kęblin w obrębie jurajskiego piętra wodonośnego występują wody o mineralizacji nieprzekraczającej $0,5 \text{ g/dm}^3$. W otworze Rogoźno 15,5/21 wykonanym w ramach dokumentowania złóż węgla brunatnego w rejonie wysadu Rogoźno (Kasiński i in., 2010), na głębokości 89 m p.p.t., w szczelinowatych wapieniach jury górnej nawiercono horyzont wód termalnych występujących pod ciśnieniem artezyjskim. W 1980 r. wypływ z otworu wynosił ok. $90 \text{ m}^3/\text{h}$, obecnie szacowany jest na $2\text{-}3 \text{ m}^3/\text{h}$. Wody wypływające z otworu charakteryzują się temperaturą wynoszącą $23\text{-}26^\circ\text{C}$, mineralizacją niespełna $0,4 \text{ g/dm}^3$ i typem chemicznym $\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$. Obecność jonów sodu może świadczyć o długim okresie przebywania wód w górotworze, natomiast niska mineralizacja o braku kontaktu z wodami występującymi wokół wysadu solnego. Obszar alimentacyjny położony jest na wschód od ujęcia i stanowią go wychodnie utworów jury górnej.

Wyniki oznaczeń izotopowych w próbce wody pochodzącej z objętego badaniami otworu wskazują, że reprezentuje ona wody podziemne, które infiltrowały w klimacie nieco chłodniejszym niż obecnie, na co wskazują wartości $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$, o małym udziale trytowych wód współczesnych w stosunku do beztrytowych wód infiltracyjnych głębszego systemu krążenia. Według skali oceny stopnia zagrożenia wód zanieczyszczeniami pochodzenia antropogenicznego przyjętej w opracowaniu wody ujęcia w Kęblinach cechują się średnim stopniem zagrożenia.

WYPYCHÓW 9/5

Informacje o położeniu obiektu:			
<u>miejsowość:</u>	<u>gmina:</u>	<u>powiat:</u>	<u>województwo:</u>
Wypychów	Zgierz (gm. wiejska)	zgierski	łódzkie

Informacje o obiekcie:			
<u>typ obiektu:</u>		otwór badawczy	
<u>rodzaj ujętej wody:</u>		woda termalna	
<u>rzędna terenu</u> <u>(m n.p.m.):</u>	<u>głębokość całkowita</u> <u>(m):</u>	<u>rok wykonania:</u>	<u>stan obiektu:</u>
121,22	264,8	1961	eksploatacja samoczynna
<u>cel wykorzystania:</u>		otwór niezagospodarowany	
<u>użytkownik:</u>		brak	

Informacje o ujętym poziomie wodonośnym:			
<u>wiek poziomu wodonośnego:</u>		jura górna	
<u>poziom wodonośny (m p.p.t.):</u>		<u>zwierciadło (m p.p.t.):</u>	
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>nawiercone:</u>	<u>ustabilizowane:</u>
242,2	264,8	242,2	(samowypływ)
<u>zafiltrowanie (m p.p.t.):</u>		<u>zasoby eksploatacyjne</u>	<u>depresja (m):</u>
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>(m³/h):</u>	
242,2	264,8	-	-

Właściwości fizykochemiczne wody:		
<u>mineralizacja (g/dm³):</u>	<u>temperatura (°C):</u>	<u>typ chemiczny wody:</u>
1,0	25	SO ₄ -HCO ₃ -Ca

Wyniki oznaczeń izotopowych:					
<u>Data poboru</u>	<u>δ¹⁸O</u> [‰] <u>V-SMOW</u>	<u>δ²H</u> [‰] <u>V-SMOW</u>	<u>Tryt</u> [T.U.]	<u>δ¹³C</u> [‰] <u>V-PDB</u>	<u>¹⁴C</u> [pmc]
27.10.2015	-10,72 -10,71	-75,8 -75,8	0,1 ±0,4	-9,4	0,6 ±1,5

Niepewność pomiaru składu izotopów trwałych wynosi ±0,1‰, ±1‰ odpowiednio dla δ¹⁸O, δ²H oraz ±0,2‰ dla δ¹³C

Miejscowość Wypychów, wraz ze zlokalizowanym na jej obszarze otworem nr 9/5, położona jest w północno-zachodniej części wysadu solnego Rogóżno, w odległości ok. 6 km na NW od ujęcia Rogóżno 15,5/21 (po przeciwnej stronie wysadu). W otworze Wypychów 9/5 udokumentowano istnienie przewieszenia czapy wysadu solnego leżącej na podgiętych ku górze osadach kredy i jury górnej (malm; Werner i Jaworski, 1962). W jurajskich wapieniach występujących na głębokości 242,2 m, pod osadami kredy górnej wykształconej w postaci iłów przewarstwionych wapieniami oraz cechsztyńskich gipsów i iłów z gipsami (czapa wysadu), nawiercono horyzont wód termalnych występujących pod ciśnieniem artezyjskim. Po zakończeniu wiercenia (1961) ciśnienie wód na głowicy wynosiło 30 atm., wydajność sięgała 16 m³/h, a temperatura na wypływie 32°C. Według pomiarów wykonanych w okresie opróbowania w trakcie prac objętych niniejszym raportem (2015 r.), temperatura wód na wypływie wynosi ok. 25°C. Zmianie uległy mineralizacja wód, która w 1962 r. wynosiła 1,5 g/dm³, zaś w 2013 r. 1,0 g/dm³, oraz typ chemiczny wody z Cl-SO₄-Na-Ca (1962 r.) na SO₄-HCO₃-Ca (2013 r.; Werner i Jaworski, 1962; Wiktorowicz, 2014). Zaobserwowana zmiana mineralizacji oraz typu chemicznego w czasie świadczy o zmniejszeniu udziału wód głębszego systemu krążenia o długim czasie przebywania w systemie (lub niewielkich ilości wód dopływających z bezpośredniego otoczenia wysadu), na co wskazywała zawartość chlorków i sodu, na rzecz wód płytszego systemu krążenia. Pośrednim dowodem na to jest również spadek temperatury wód na wypływie. Zasilanie poziome wodonośnego ma miejsce w obrębie podczwartorzędowych wychodni utworów jury górnej na wschód od miejscowości.

Badania izotopowe przeprowadzone w ramach raportowanego zadania były pierwszymi tego rodzaju wykonanymi dla otworu. Na ich podstawie stwierdzono, że wody pochodzące z ujęcia Wypychów 9/5 nie zawierają trytu. Wynik oznaczenia radiowęglą ¹⁴C jest również w granicach błędu równy zeru, czyli wiek wód przekracza prawdopodobnie 30 000 lat. Wartości δ¹⁸O i δ²H świadczą, że infiltracja wód zachodziła w warunkach klimatu tylko nieco chłodniejszego niż obecnie panujący, prawdopodobnie w ostatnim interglacjale, a biorąc pod uwagę wartość δ¹³C wskazującą na proces wymiany węgla pomiędzy węglanami rozpuszczonymi w wodzie a matrycą skalną, nie można wykluczyć pewnej niewielkiej domieszki wód holocenijskich.

Podsumowując, objęte badaniami izotopowymi otwory wiertnicze zlokalizowane w rejonie wysadu Rogóżno ujmują wody pochodzenia infiltracyjnego. Wody te w przypadku otworu Rogóżno 15,5/21 zawierają niewielkie stężenia trytu wskazujące na obecność domieszki wód ze współczesnego zasilania (zasilanych po 1952 r.). Oznaczenie radiowęglą, które wykonane zostało w próbce pobranej z otworu Wypychów 9/5, wskazuje na infiltrację w ostatnim interglacjale z możliwością niewielkiego udziału wód holocenijskich.

5.3. Monoklina przedsudecka

Monoklinę przedsudecką, stanowiącą rozległą jednostkę geologiczno-hydrogeologiczną Polski perspektywiczną dla ujmowania wód leczniczych, termalnych oraz solanek, budują osady permsko-mezozoiczne zapadające w kierunku północnym i północno-wschodnim pod kątem kilku stopni. Jej podłoże stanowią sfałdowane skały paleozoiczne, zaś pokrywą utwory późnomezozoiczne i kenozoiczne. Wody zmineralizowane występują na zróżnicowanej głębokości, przeważnie 200-500 m p.p.t.

Miejscowość Ozimek, w której zlokalizowany jest otwór nr 2, objęty badaniami izotopowymi przeprowadzonymi w ramach raportowanego zadania, położona jest w odległości 20 km na zachód od Opola w południowo-wschodniej części monokliny przedsudeckiej, w jej fragmencie określanym mianem monokliny opolskiej. W tym rejonie w podłożu występują sfałdowane skały karbonu, a utwory permu (czerwonego spągowca) wykształcone są w postaci piaskowców z wkładkami tufitów. Na utworach tych zalegają niezgodnie (przekraczająco) osady dolnego i środkowego triasu (pstręgo piaskowca) reprezentowane przez piaskowce z wkładkami łołupków i wapieni oraz utwory triasu górnego, którego profil charakteryzuje się dominacją łupków wapnistrych i łołupków. Łączna miąższość osadów triasu w rejonie Ozimka wynosi ponad 600 m. Utwory triasu przykrywają osady czwartorzędowe o miąższości od kilku do kilkudziesięciu metrów. Obszar pocięty jest uskokami dwóch systemów, o kierunkach NNE-SSW i W-E.

Ozimek położony jest w rozległej strefie głębokiego wysłodzenia wód podziemnych. Wody zwykłe, o mineralizacji nie przekraczającej na ogół $0,5 \text{ g/dm}^3$, występują poza poziomem czwartorzędowym w również wodonośnym piętrze triasowym oraz w stropowej części permu, tj. do głębokości przekraczającej 700 m.

Kompleksowe badania izotopowe wód podziemnych monokliny opolskiej i sąsiadującej z nią niecki opolskiej przeprowadzone zostały w latach 80. XX w. (Ciężkowski i in., 1989). Ich wyniki uzupełniane są podczas prac związanych z dokumentowaniem zasobów dyspozycyjnych wód zwykłych oraz zadań państwowej służby hydrogeologicznej.

5.3.1. Wody termalne

OZIMEK 2

Informacje o położeniu obiektu:			
<u>miejsowość:</u>	<u>gmina:</u>	<u>powiat:</u>	<u>województwo:</u>
Ozimek	Ozimek (gm. miejsko-wiejska)	opolski	opolskie

Informacje o obiekcie:			
<u>typ obiektu:</u>		otwór eksploatacyjny	
<u>rodzaj ujętej wody:</u>		woda termalna	
<u>rzędna terenu</u> <u>(m n.p.m.):</u>	<u>głębokość całkowita</u> <u>(m):</u>	<u>rok wykonania:</u>	<u>stan obiektu:</u>
182,20	700,0	2004	czynny
<u>cel wykorzystania:</u>		gospodarka komunalna	
<u>użytkownik:</u>		Przedsiębiorstwo Gospodarki Komunalnej i Mieszkaniowej Sp. z o. o.	

Informacje o ujętym poziomie wodonośnym:			
<u>wiek poziomu wodonośnego:</u>		trias-perm	
<u>poziom wodonośny (m p.p.t.):</u>		<u>zwierciadło (m p.p.t.):</u>	
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>nawiercone:</u>	<u>ustabilizowane:</u>
547,0	700,0	547,0	17,9
<u>zafiltrowanie (m p.p.t.):</u>		<u>zasoby eksploatacyjne</u>	<u>depresja (m):</u>
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>(m³/h):</u>	
560,0	670,0	100,00	143,00

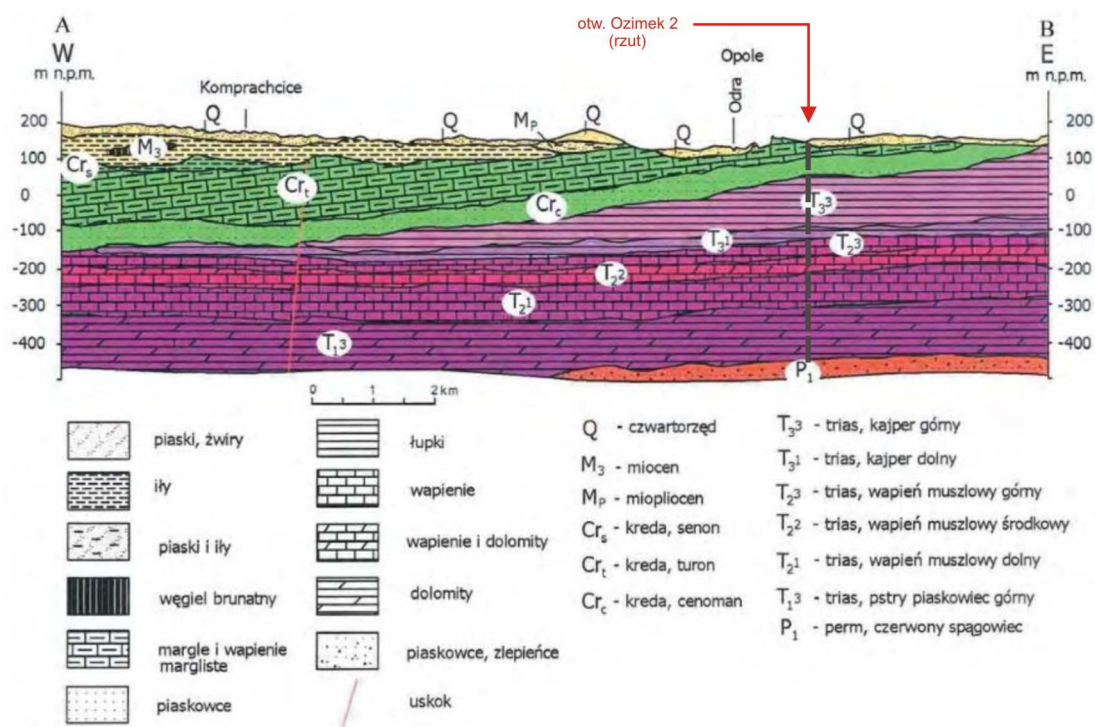
Właściwości fizykochemiczne wody:		
<u>mineralizacja (g/dm³):</u>	<u>temperatura (°C):</u>	<u>typ chemiczny wody:</u>
0,5	26	HCO ₃ -Ca

Wyniki oznaczeń izotopowych:					
<u>Data poboru</u>	<u>δ¹⁸O</u> <u>[‰]</u> <u>V-SMOW</u>	<u>δ²H</u> <u>[‰]</u> <u>V-SMOW</u>	<u>Tryt</u> <u>[T.U.]</u>	<u>δ¹³C</u> <u>[‰]</u> <u>V-PDB</u>	<u>¹⁴C</u> <u>[pmc]</u>
26.10.2015	-10,67 -10,63	-73,9 -73,8	0,0 ±0,4	-11,9	1,2 ±1,5

Niepewność pomiaru składu izotopów trwałych wynosi ±0,1‰, ±1‰ odpowiednio dla δ¹⁸O, δ²H oraz ±0,2‰ dla δ¹³C

Występowanie wód termalnych w Ozimku związane jest z triasem dolnym (retem) oraz permem. Utwory te oddzielone są od wyżej występującego piętra wodonośnego środkowego triasu

(wapień muszlowy) słabo przepuszczalnymi warstwami gogolińskimi (wapień margliste i margle oraz ility). Stropowe partie triasu dolnego są reprezentowane przez wapień i dolomity tworzące poziom szczelinowo-krasowy (ret), niższe zaś przez utwory piaskowcowe (pstry piaskowiec), tworzące zbiornik GZWP nr 335 Krapkowice-Strzelce Opolskie. Występująca w bezpośrednim kontakcie hydraulicznym stropowa część permu wykształcona jest również w facji piaskowcowo-piaszczystej (rys. 5.5). Zwierciadło triasowo-permskiego zbiornika, w obrębie którego w rejonie Ozimka występują niskozmineralizowane termalne wody, ma charakter naporowy - artezyjski lub subartezyjski. Długotrwała eksploatacja prowadzona od XIX w. w rejonie Opola przyczyniła się do obniżenia zwierciadła (do 50 m) i powstania rozległego leja depresji (40 km). Wskutek ochrony zbiornika doszło do częściowego odtworzenia naturalnych warunków hydrogeologicznych.



Rys. 5.5. Przekrój przez rejon Opola (wg Biernata, 1956)

Zasilanie poziomu wodonośnego odbywa się poprzez infiltrację lub przesączenie wód w obrębie podczwartorzędowych wychodni pstręgo piaskowca w rejonie Krapkowic i Strzelc Opolskich, na południe od Ozimka (Krawczyk i in., 2013).

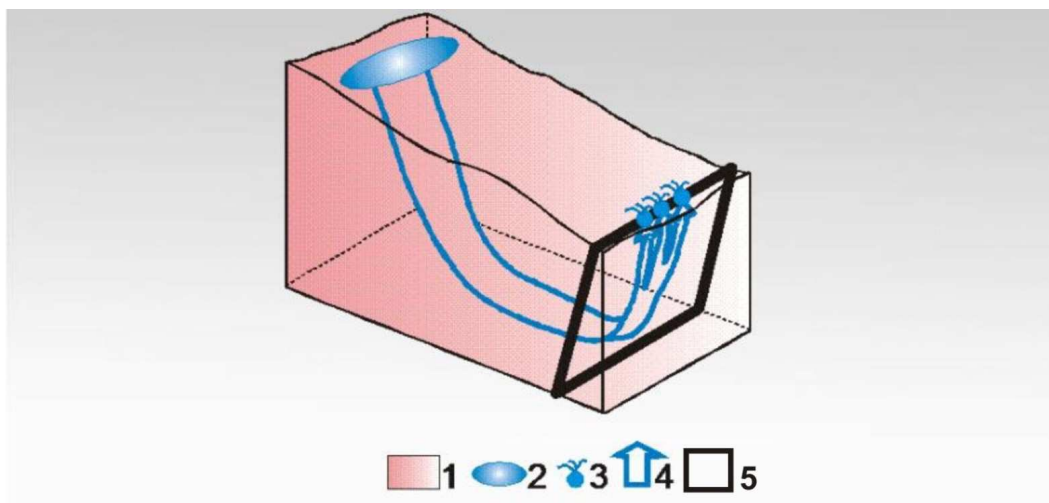
Otwór nr 2 w Ozimku został odwiercony do głębokości 700 m. Z dwóch poziomów wodonośnych rozpoznanych w trakcie wiercenia zafiltrowany został poziom dolny – jego zwierciadło stabilizowało się na głębokości 17,9 m powyżej powierzchni terenu. Zastosowano filtr

trzysegmentowy i ujęto wody z głębokości od 560 do 670 m występujące w piaskowcach triasu i permu. Łączna miąższość zawodnionych utworów przekracza 130 m. Poziom wodonośny jest izolowany warstwami gogolińskimi.

Ujęte wody charakteryzują się niską mineralizacją rzędu $0,5 \text{ g/dm}^3$ i reprezentują typ chemiczny $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, typowy dla wód strefy aktywnej wymiany. Jednocześnie wody te nie zawierają trytu, co oznacza brak składowej z zasilania współczesnego i niski stopień zagrożenia zanieczyszczeniami pochodzenia antropogenicznego. Stężenie radiowęgla jest znikome ($1,2 \text{ pmc}$), mieszczące się w granicach błędu pomiarowego ($\pm 1,5 \text{ pmc}$), co może oznaczać, że nuklid ten w ogóle nie występuje. Pozwala to jedynie na stwierdzenie, iż są to prawdopodobnie wody starsze niż 30 000 lat. Ponieważ wartości $\delta^{18}\text{O}$ są nieco bardziej ujemne od tych, które są charakterystyczne dla klimatu współczesnego, infiltracja tych wód zachodziła w warunkach trochę chłodniejszych niż obecnie, ale nie w klimacie odpowiadającym ostatniemu zlodowaceniu. Przypuszczalnie proces ten miał miejsce podczas ostatniego interglacjału.

5.4. Sudety

Region Sudetów jest dobrze zarysowaną jednostką geologiczną zbudowaną ze skał prekambryjskich i staropaleozoicznych, które w obrębie depresji tektonicznych są pokryte osadowymi utworami mezozoicznymi. Budowa geologiczna obszaru jest wynikiem wielokrotnych przeobrażeń tektonicznych, które doprowadziły do powstania sieci dyslokacji. Uskoki, czy raczej strefy uskokowe o zasadniczym znaczeniu, których szerokość może osiągać nawet 10 km, przebiegają w kierunkach N-S (kierunek kruszcogórski) i z NW–SE (kierunek sudecki) i odgrywają decydującą rolę w przepływie wód podziemnych oraz w transporcie dwutlenku węgla (Dowgiałło i Fistek, 2007; Ciężkowski i in., 2011). W wyniku głębokiej infiltracji (2000-3000 m), wynikającej zarówno z istnienia drożnych dróg przepływu, jak i ze znacznych deniwelacji terenu, wody ulegają ogrzaniu w ośrodku skalnym i przenoszą ciepło ku powierzchni (rys. 5.6). Napotykają na drodze przepływu migrujący ku powierzchni dwutlenek węgla i są nim nasycane, lokalnie tworząc naturalne wypływy szczaw i wód kwasowęglowych. Poza szczawami i wodami termalnymi występują tu niespotykane w innych regionach kraju wody radonowe.



Objaśnienia: 1 - skały szczelinowate, 2 - obszar zasilania, 3 - źródło, 4 - przepływ wód podziemnych, 5 - uskoki.

Rys. 5.6. Schemat złoża wód szczelinowych bardzo głębokiego krążenia (Liber, 2001; Kiełczawa i Liber-Makowska, 2017)

Skomplikowana budowa geologiczna sprawia, że w niewielkich odległościach występują wody różniące się w sposób zasadniczy składem chemicznym i temperaturą. Te same względy sprawiają, że wody różnych typów i o różnej temperaturze mieszają się ze sobą, tworząc wody o złożonym składzie i na ogół niskiej mineralizacji (od 0,1 do 3,0 g/dm³), odznaczające się kilkoma cechami decydującymi o ich właściwościach leczniczych. Występują one na ogół w systemach szczelinowych lub szczelinowo-warstwowych o dość ograniczonej pojemności.

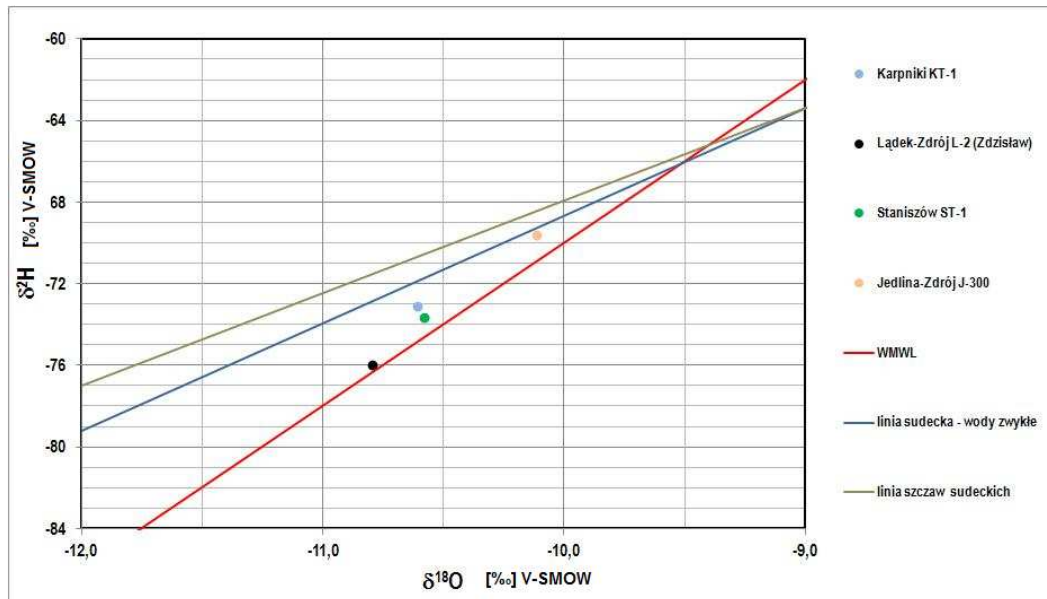
Sudety wraz z blokiem przedsudeckim zlokalizowane są w obrębie Sudeckiego Regionu Geotermicznego stanowiącego jednostkę bilansową (Dowgiałło, 2001). Za szczególnie perspektywiczne dla występowania wód termalnych uznane zostały obszary jeleniogórski oraz świdnicko-niemodliński.

Badania izotopowe wód podziemnych, w szczególności leczniczych i termalnych, występujących na obszarze Sudetów mają historię sięgającą przełomu lat 60. i 70. XX w., kiedy to prowadzone były przez Jana Dowgiałłę, następnie od 1983 r. kontynuowane przez Wojciecha Ciężkowskiego (Ciężkowski, 1990). W 2011 r. rozpoczęto badania w ramach przedsięwzięcia *Prowadzenie Banku Danych Wód Podziemnych Zaliczonych do Kopalin* (Nowicki i in., 2013, 2015). Zbiór danych izotopowych powiększony został w trakcie dokumentowania zasobów dyspozycyjnych wód leczniczych (Kapuściński i in., 2010).

W ramach raportowanego zadania badaniami objęto:

- wody lecznicze ujęcia w J-300 w Jedlinie-Zdroju;
- lecznicze wody termalne ujęcia L-2 w Łądku-Zdroju (wyniki omówione w części poświęconej wodom termalnym);
- wody termalne ujęcia KT-1 w Karpnikach i ST-1 w Staniszowie.

Ich skład izotopowy wskazuje na typowe dla wód sudeckich lekkie przesunięcie wartości na lewo od linii Craiga (Ciężkowski, 1990; rys. 5.7).



Rys. 5.7. Stabilne izotopy tlenu i wodoru w wodach leczniczych i termalnych Sudetów

5.4.1. Wody lecznicze

JEDLINA J-300 (ŹRÓDŁO CHARLOTTY)

Informacje o położeniu obiektu:			
<u>miejsowość:</u>	<u>gmina:</u>	<u>powiat:</u>	<u>województwo:</u>
Jedlina-Zdrój	Jedlina-Zdrój (gm. miejska)	wałbrzyski	dolnośląskie

Informacje o obiekcie:			
<u>typ obiektu:</u>		otwór eksploatacyjny	
<u>rodzaj ujętej wody:</u>		woda lecznicza	
<u>rzędna terenu (m n.p.m.):</u>	<u>głębokość całkowita (m):</u>	<u>rok wykonania:</u>	<u>stan obiektu:</u>
479,85	449,0	1939	czynny
<u>cel wykorzystania:</u>		balneoterapia	
<u>użytkownik:</u>		Uzdrowisko Szczawno-Jedlina S.A.	

Informacje o ujętym poziomie wodonośnym:			
<u>wiek poziomu wodonośnego:</u>		karbon górny	
<u>poziom wodonośny (m p.p.t.):</u>		<u>zwierciadło (m p.p.t.):</u>	
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>nawiercone:</u>	<u>ustabilizowane:</u>
298,8	315,0	298,8	7,6
<u>zafiltrowanie (m p.p.t.):</u>		<u>zasoby eksploatacyjne (m³/h):</u>	<u>depresja (m):</u>
<u>od:</u>	<u>do:</u>	5,00	95,20
298,0	308,0		

Właściwości fizykochemiczne wody:		
<u>mineralizacja (g/dm³):</u>	<u>temperatura (°C):</u>	<u>typ chemiczny wody:</u>
0,8-1,6	-	HCO ₃ -Na-Ca-Mg,F,Fe,Rn,CO ₂

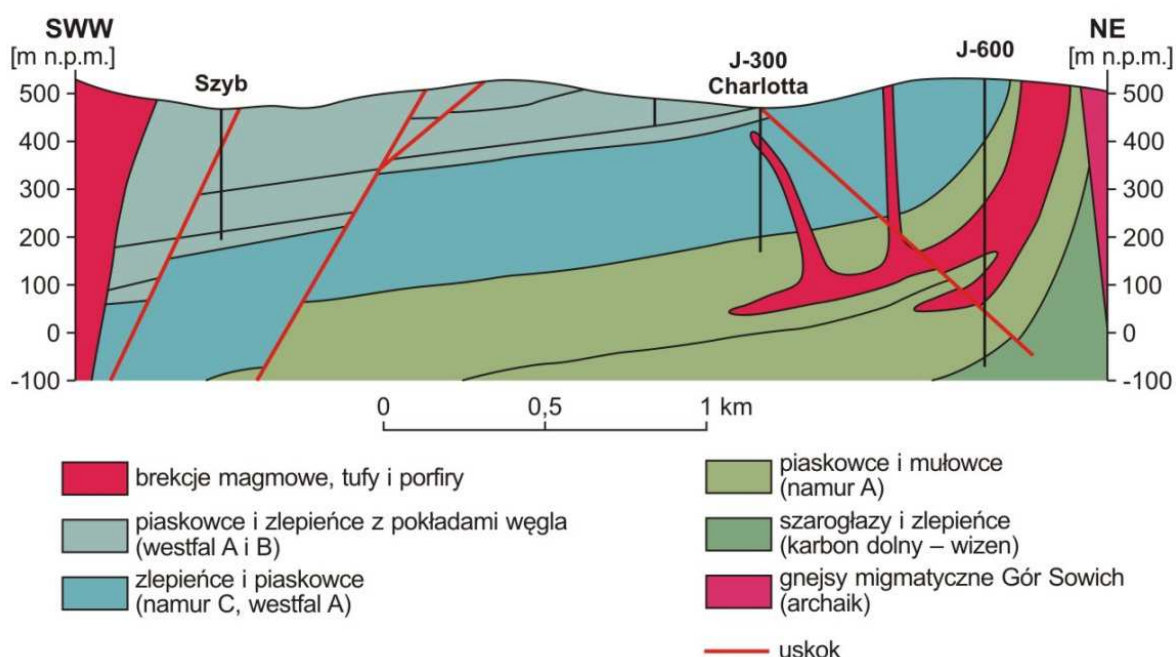
Wyniki oznaczeń izotopowych:					
<u>Data poboru</u>	<u>δ¹⁸O [‰] V-SMOW</u>	<u>δ²H [‰] V-SMOW</u>	<u>Tryt [T.U.]</u>	<u>δ¹³C [‰] V-PDB</u>	<u>¹⁴C [pmc]</u>
29.12.1995 ¹⁾	-10,29	-72,2	19,5 ±0,9	-	-
06.08.1996 ¹⁾	-10,33	-72,4	19,5 ±1,0	-	-
29.11.1996 ¹⁾	-10,26	-70,6	18,7 ±0,9	-	-
1.12.2003 ²⁾	-9,94	-	-	-2,73	-
19.01.2004 ²⁾	-10,87	-	-	-2,83	-
21.06.2016	-10,08 -10,14	-69,1 -70,2	7,0 ±0,5	-	-

Niepewność pomiaru składu izotopów trwałych wynosi ±0,1‰, ±1‰ odpowiednio dla δ¹⁸O, δ²H oraz ±0,2‰ dla δ¹³C
¹⁾ Ciężkowski i in. (1996), ²⁾ Zaleska i in. (2004)

Uzdrowisko Jedlina-Zdrój położone jest w północno-wschodniej części niecki wałbrzyskiej stanowiącej fragment większej struktury - niecki śródsudeckiej, w strefie kontaktu z blokiem krystalicznym Gór Sowich. Jednostki oddzielone są dyslokacją Szczawno-Głuszyca, której towarzyszy system mniejszych nieciągłości o zróżnicowanych kierunkach. Z dyslokacjami tymi związane były naturalne wypływy zmineralizowanych szczaw, o charakterze leczniczym (Poprawski i Filbier, 1997). Obszar zbudowany jest z prekambryjskich skał krystalicznych gnejsowego bloku sowiogórskiego oraz karbońskich skał osadowych i wylewnych niecki śródsudeckiej, wykształconych w postaci piaskowców i zlepieńców z wkładkami łupków i mułków oraz występujących w ich obrębie intruzji porfirowych. Porfiry dzięki gęstej sieci spękań są drogami infiltracji wód opadowych w głąb górotworu. W obrębie karbońskich warstw żaclerskich i wałbrzyskich występują pokłady węgla kamiennego, które były eksploatowane. W skutek odwadniania górotworu w rejonie Wałbrzyskiego Zagłębia Węglowego wystąpiły zmiany warunków hydrogeologicznych – spadek wydajności, demineralizacja i ograniczenie dopływu CO₂ do źródeł, a następnie zanik ich wypływów. Przyczyną było naruszenie sieci spękań odpowiedzialnych za transport CO₂ i nasyconych nim wód ku powierzchni terenu (Poprawski i Filbier, 1997).

Styl budowy okolic Jedliny-Zdroju prezentuje rys. 5.8. Pod względem litologicznym utwory przewiercone w otworze J-300 w Jedlinie to głównie piaskowce i zlepieńce, a podrzędnie również mułowce, iłowce i węgle wieku karbońskiego. Występują one do głębokości ok. 300 m nad ryolitami również wieku karbońskiego. Na głębokości 298 – 308 m ujęto szczawy lecznicze reprezentujące typ chemiczny HCO₃-Na-Ca-Mg,F,Fe,Rn. Ich mineralizacja odznacza się dużą zmiennością w czasie. W 2015 r. kształtowała się na poziomie 0,85 g/dm³.

Zaprzestanie eksploatacji węgla kamiennego, ograniczenie odwadniania kopalń i odbudowa wytworzonego już w II poł. XIX w. leja depresji sprzyjały decyzji o podjęciu eksploatacji wód leczniczych w Jedlinie-Zdroju, której zaprzestano kilkadziesiąt lat wcześniej. W związku z niezbyt fortunnym usytuowaniem otworu, który ujmuje wody poza strefą uskokową, w wyniku przeprowadzonych badań ustalono, iż dopływ do otworu leczniczych szczaw radonowych, fluorkowych następuje w wyniku długotrwałego pompowania i wytworzenia głębokiego leja depresji. Utrzymanie właściwych parametrów fizyczno-chemicznych wody wymaga ciągłej eksploatacji ze stałą wydajnością. Zmiany warunków eksploatacji powodują ich wahania, a proces powtórnego osiągnięcia ich stabilizacji jest długotrwały (Starzyńska, 1996).



Rys. 5.8. Przekrój geologiczny przez okolice Jedliny-Zdroju (Poprawski i Filbier, 1997)

Skład izotopów stabilnych tlenu i wodoru wód ujęcia wskazuje, iż są to typowe wody pochodzące z infiltracji współczesnej. Zwraca uwagę wysoka w odniesieniu do charakterystycznej dla współczesnych opadów (5-16 T.U.) zawartość trytu (7 T.U.), która pozornie świadczy o tym, że infiltracja wód nastąpiła 40-50 lat temu, a tryt obecny w wodzie jest pozostałością bardzo wysokich stężeń tego nuklidu z okresu piku „bombowego” z lat 60. XX w. Tego typu scenariusz wykluczają jednak dość wysoka, choć zmieniająca się w bardzo dużym zakresie mineralizacja wód oraz zawartość dwutlenku węgla, który transportowany jest z głębokich warstw skorupy ziemskiej na ogół razem z wodami głębszego systemu przepływu, co wskazuje na udział beztrytowej komponenty wód.

Stwierdzona wysoka zawartość trytu w wodach ujęcia J-300 występujących na głębokości niemal 300 m wymaga krótkiego komentarza. Wykonane w ostatnich kilkunastu latach w ramach prac państwowej służby hydrogeologicznej badania trytowe w ponad tysiącu studzien należących do krajowej sieci obserwacji hydrogeologicznych wykazały, że zasięg głębokościowy występowania trytu w wodach podziemnych w warunkach naturalnych (bez eksploatacji) w Polsce nie przekracza 50-60 m. (Nowicki i in., 2015). Oczywiście występowanie trytu stwierdzano również na znacznie większych głębokościach, ale tylko w warunkach intensywnej eksploatacji w otworze lub w wyniku prac odwodnieniowych prowadzonych w pobliżu.

Jak wspomniano, ujęcie jest eksploatowane w sposób stały z wytworzeniem dużej depresji. Pojawienie się trytu w wodach ujęcia następuje na skutek „ściągnięcia” (wymuszonego eksploatacją uruchomienia dopływu) współczesnych wód infiltracyjnych zawierających tryt. Sytuacja tego rodzaju

nie pozwala na datowanie wód na podstawie oznaczenia trytu, natomiast umożliwia wnioskowanie na temat stosunkowo niewielkiej objętości systemu wodonośnego. Lecznicze wody ujęcia J-300 w Jedlinie-Zdroju są prawdopodobnie dwu- lub trzyskładnikową mieszaniną, której komponentami są wody systemu głębokiego przepływu oraz wody współczesne zawierające tryt i prawdopodobnie wody beztrytowe. O istotnym udziale komponenty wód głębszego przepływu świadczą obecność jonów sodu, skokowo zmieniająca się mineralizacja wód oraz znaczne stężenie rozpuszczonego dwutlenku węgla sięgające 2 g/dm^3 .

Zawartość trytu w wodach leczniczych ujęcia J-300 w Jedlinie-Zdroju wskazuje na bardzo wysoki stopień zagrożenia zanieczyszczeniami pochodzenia antropogenicznego, szczególnie z uwagi na nieustalony sposób zasilania ujęcia. Z tego względu niezwykle istotne jest prowadzenie systematycznych badań wód w zakresie parametrów hydrochemicznych oraz kontrolnie składu izotopowego i zawartości trytu. Nieustalone warunki zasilania ujęcia mogą bowiem prowadzić do zmian właściwości fizyczno-chemicznych, które zgodnie z ustawą z 9.06.2011 r. *Prawo geologiczne i górnicze* mogą zmieniać się jedynie w naturalnym zakresie.

5.4.2. Wody termalne

KARPNIKI KT-1

Informacje o położeniu obiektu:			
<u>miejsowość:</u>	<u>gmina:</u>	<u>powiat:</u>	<u>województwo:</u>
Karpniki	Mysłakowice (gm. wiejska)	jeleniogórski	dolnośląskie

Informacje o obiekcie:			
<u>typ obiektu:</u>		otwór eksploatacyjny	
<u>rodzaj ujętej wody:</u>		woda termalna, swoista	
<u>rzędna terenu (m n.p.m.):</u>	<u>głębokość całkowita (m):</u>	<u>rok wykonania:</u>	<u>stan obiektu:</u>
372,11	2010,0	2014	czynny
<u>cel wykorzystania:</u>		ciepłownictwo	
<u>użytkownik:</u>		Termy Zamek Karpniki Sp. z o.o.	

Informacje o ujętym poziomie wodonośnym:			
<u>wiek poziomu wodonośnego:</u>		karbon górny	
<u>poziom wodonośny (m p.p.t.):</u>		<u>zwierciadło (m p.p.t.):</u>	
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>nawiercone:</u>	<u>ustabilizowane:</u>
1793,5	2010,0	1793,5	+3,1 (samowypływ)
<u>zafiltrowanie (m p.p.t.):</u>		<u>zasoby eksploatacyjne (m³/h):</u>	<u>depresja (m):</u>
<u>od:</u>	<u>do:</u>	44,00	3,20
1793,5	2010,0		

Właściwości fizykochemiczne wody:		
<u>mineralizacja (g/dm³):</u>	<u>temperatura (°C):</u>	<u>typ chemiczny wody:</u>
0,5	54,0	HCO ₃ -SO ₄ -Na,F,Rn

Wyniki oznaczeń izotopowych:					
<u>Data poboru</u>	<u>δ¹⁸O [‰] V-SMOW</u>	<u>δ²H [‰] V-SMOW</u>	<u>Tryt [T.U.]</u>	<u>δ¹³C [‰] V-PDB</u>	<u>¹⁴C [pmc]</u>
25.06.2013 ¹⁾	-10,52	-75,7	0,0 ±0,3	-8,3	0,0
30.10.2015	-10,61	-73,9	0,7 ±0,4	-8,7	2,5 ±1,0
	-10,60	-72,4	-	-	-

Niepewność pomiaru składu izotopów trwałych wynosi ±0,1‰, ±1‰ odpowiednio dla δ¹⁸O, δ²H oraz ±0,2‰ dla δ¹³C¹⁾ Łukaczyński i Polaczek (2014a)

Karpniki położone są w obrębie bloku karkonosko-izerskiego, we wschodniej części waryscyjskiej intruzji granitu karkonoskiego, w pobliżu granicy z otaczającym go od wschodu pasmem Rudaw Janowickich. Intruzja ta rozciąga się równoleżnikowo w obrębie skał metamorficznych Sudetów Zachodnich. Karbońskie granity pokrywa warstwa czwartorzędowych zwietrzelin o charakterze rumoszy skalnych.

Skały masywu granitowego poprzecinane są licznymi dyslokacjami o różnych kierunkach przebiegu i zasięgu głębokościowym. Dominują trzy główne systemy prostopadłych do siebie spękań syngenetycznych: poprzecznych Q, podłużnych S i poziomych L (pokładowych), nadających charakterystycznej blokowej oddzielności (Mierzejewski i in., 1983).

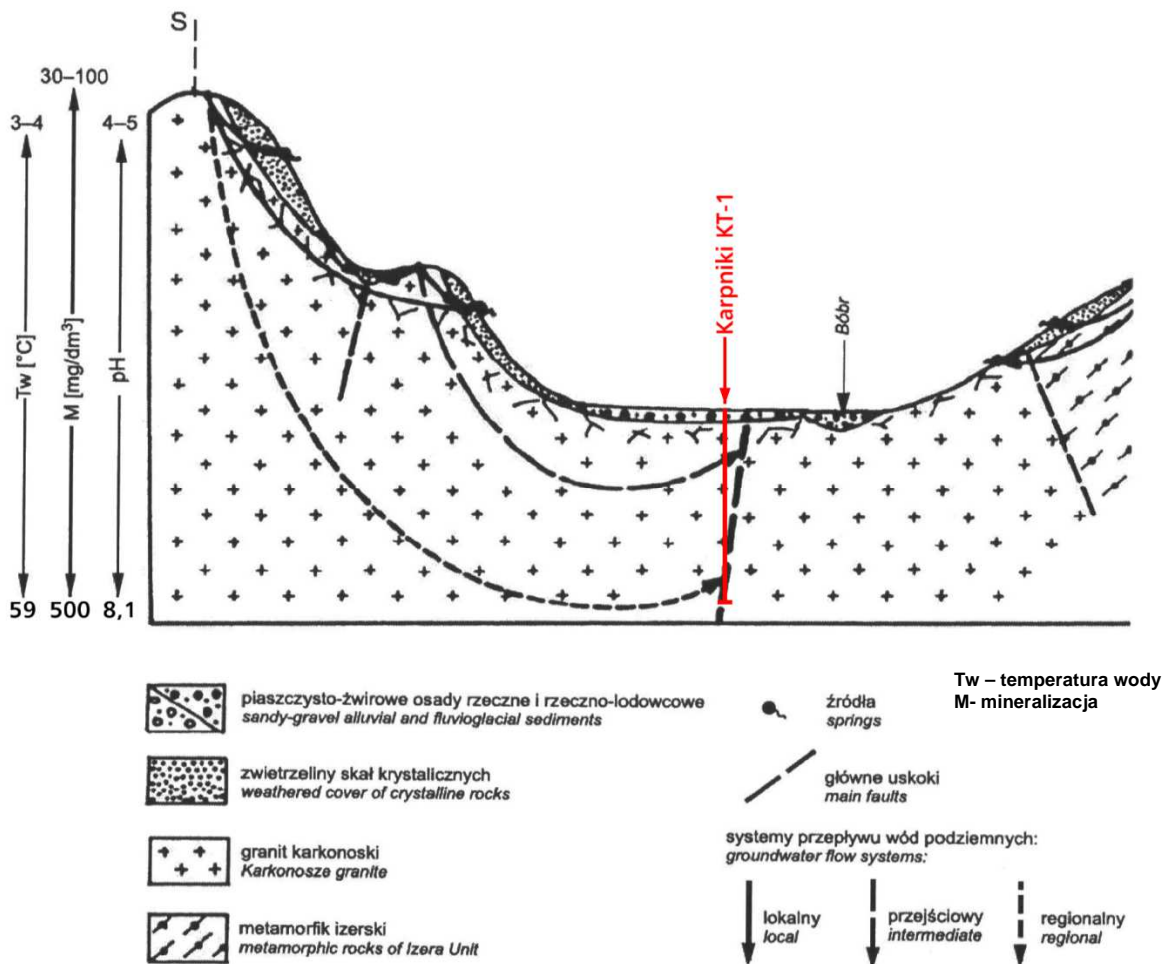
W rejonie Karpnik główną strefą dyslokacyjną jest uskoki śródsudecki o przebiegu NW-SE, oddzielający blok karkonosko-izerski od metamorfiku kaczawskiego oraz uskoki brzeżny Karkonoszy oddzielający masyw karkonoski od Kotliny Jeleniogórskiej. Występowanie wód głębokiego krążenia związane jest ze strefami nieciągłości tektonicznych i miejscami krzyżowania się struktur liniowych. Istotne znaczenie ma lineament przebiegający wzdłuż potoku Czerwień od Przełęcz Karkonoskiej, w kierunku Cieplic, aż poza granicę uskoku brzeżnego, oraz drugi przebiegający wzdłuż Rudaw Janowickich (Mroczkowski, 1993; Łukaczyński i Polaczek, 2014a). Umożliwiają one przepływ wód ku powierzchni terenu, a w uzdrowisku Cieplice również ascenzyjny wypływ na powierzchnię. Zasilanie wód systemu głębokiego krążenia odbywa się poprzez dopływ wód infiltracyjnych strefami spękań na znaczne głębokości. Wody te podczas przepływu w ośrodku skalnym podlegają zmianom właściwości fizyczno-chemicznych, w tym ogrzaniu, po czym wypływają w strefach drenażu jako wody termalne fluorkowe, radonowe. Głębokość systemu krążenia wód termalnych została oszacowana na 2600-2700 m (Dowgiałło, 1998). Schemat systemu hydrogeologicznego rejonu Karpnik prezentuje rys. 5.9.

Otwór KT-1 w Karpnikach znajduje się w odległości ok. 12 km na ESE od uzdrowiska Cieplice Śląskie-Zdrój. Został odwiercony niemal w całości w karbońskich granitach do głębokości 2010 m. W otworze ujęto dopływy wód termalnych występujące od głębokości 1793,5 m. W ujętym horyzoncie wodonośnym występują ciśnienia artezyjskie. Eksploatacja otworu odbywa się w sposób samoczynny.

W ujętym poziomie wodonośnym występują wody o typie chemicznym $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na,F,Rn}$, o mineralizacji rzędu $0,5 \text{ g/dm}^3$ i temperaturze na wypływie do 54°C . Skład chemiczny ujętych wód odbiega od typowego dla wód termalnych występujących w rejonie jeleniogórskim. Zazwyczaj są to bowiem wody typu $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Na}$.

Zawartość ^{14}C , równa 2,5 pmc, uzyskana w 2015 r. sugeruje, że są to wody o wieku ok. 23 000 lat, lecz na infiltrację w okresie lodowcowym wykluczają wartości $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$, które są zbliżone do obserwowanych współcześnie (uwzględniając efekt wysokościowy wynikający z położenia strefy

zasilania). Wartość $\delta^{13}\text{C}$ wskazuje na obecność zjawiska wymiany izotopowej rozpuszczonych węglanów z matrycą skalną, co pozwala wnioskować, że faktyczny „wiek” tych wód jest młodszy. Dodatkowo na zawartość radiowęglą wpływać może kontakt z geogenicznym dwutlenkiem węgla pozbawionym tego izotopu (Łukaczyński i Polaczek, 2014a). Porównanie wyniku oznaczenia z 2015 r. z wynikami uzyskanymi w 2013 r. ($^{14}\text{C} = 0$ pmc), które świadczyły o „wieku” wód powyżej 30 000 lat, wskazuje na proces uruchomienia dopływu wód młodszych (zawierających ^{14}C) najprawdopodobniej w wyniku rozpoczęcia eksploatacji ujęcia. Biorąc pod uwagę powyższe zjawiska należy stwierdzić, iż brak jest możliwości oszacowania „wieku” wód na podstawie oznaczenia zawartości tego nuklidu w wodzie. Stanowi ona bowiem mieszaninę wód o różnym „wieku” i w nieznanych proporcjach.



Rys. 5.9. Schemat ideowy systemu hydrogeologicznego Kotliny Jeleniogórskiej z jej górskim obramowaniem (Łukaczyński i Polaczek, 2014a za Marszałkiem, 2010)

Zaskakujące jest również pojawienie się trytu na tak dużej głębokości, wprawdzie w ilościach nieznacznych (0,7 T.U.), lecz jednak poza błędem pomiaru ($\pm 0,4$ T.U.). Jeśli tryt nie pochodzi z naturalnej produkcji podziemnej, co zdają się wykluczać wyniki oznaczenia tego nuklidu uzyskane w 2013 r., wskazuje on na uruchomienie dopływu wód infiltrujących po 1952 r. Oznacza to niezwykle małą pojemność całego systemu wodonośnego mogącą mieć kluczowe znaczenie dla warunków eksploatacji ujęcia oraz stabilności właściwości fizyczno-chemicznych wydobywanych wód. Według skali oceny stopnia zagrożenia wód zanieczyszczeniami pochodzenia antropogenicznego przyjętej w opracowaniu wody ujęcia w Karpnikach cechują się średnim stopniem zagrożenia.

W przypadku tego ujęcia badania izotopowe powinny zostać z całą pewnością powtórzone. Powinno również zostać ono objęte systematycznymi obserwacjami parametrów eksploatacyjnych.

STANISZÓW ST-1

Informacje o położeniu obiektu:			
<u>miejsowość:</u>	<u>gmina:</u>	<u>powiat:</u>	<u>województwo:</u>
Staniszów	Podgórzyn (gm. wiejska)	jeleniogórski	dolnośląskie

Informacje o obiekcie:			
<u>typ obiektu:</u>		otwór eksploatacyjny	
<u>rodzaj ujętej wody:</u>		woda termalna, swoista	
<u>rzędna terenu (m n.p.m.):</u>	<u>głębokość całkowita (m):</u>	<u>rok wykonania:</u>	<u>stan obiektu:</u>
362,30	1581,0	2014	czynny
<u>cel wykorzystania:</u>		ciepłownictwo	
<u>użytkownik:</u>		Termy Staniszków Sp. z o.o.	

Informacje o ujętym poziomie wodonośnym:			
<u>wiek poziomu wodonośnego:</u>		karbon górny	
<u>poziom wodonośny (m p.p.t.):</u>		<u>zwierciadło (m p.p.t.):</u>	
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>nawiercone:</u>	<u>ustabilizowane:</u>
1360,0	1405,0	1360,0	16,0
<u>zafiltrowanie (m p.p.t.):</u>		<u>zasoby eksploatacyjne</u>	<u>depresja (m):</u>
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>(m³/h):</u>	
1360,0	1405,0	20,50	-

Właściwości fizykochemiczne wody:		
<u>mineralizacja (g/dm³):</u>	<u>temperatura (°C):</u>	<u>typ chemiczny wody:</u>
0,5	37	SO ₄ -HCO ₃ -Cl-Na,F,Rn,S

Wyniki oznaczeń izotopowych:					
<u>Data poboru</u>	<u>δ¹⁸O [‰] V-SMOW</u>	<u>δ²H [‰] V-SMOW</u>	<u>Tryt [T.U.]</u>	<u>δ¹³C [‰] V-PDB</u>	<u>¹⁴C [pmc]</u>
25.11.2013 ¹⁾	-10,43	-74,1	0,0 ±0,3	-10,5	5,5
21.06.2016	-10,55	-74,4	0,3 ±0,4	-9,7	10,5 ±1,0

Niepewność pomiaru składu izotopów trwałych wynosi ±0,1‰, ±1‰ odpowiednio dla δ¹⁸O, δ²H oraz ±0,2‰ dla δ¹³C

¹⁾ Łukaczyński i Polaczek (2014b)

Staniszów położony jest w obrębie bloku karkonosko-izerskiego, w centralnej części waryscyjskiej intruzji granitu karkonoskiego. Budowa geologiczna i warunki występowania wód podziemnych, w tym wód termalnych systemu głębokiego krążenia, są zbliżone do charakteryzujących rejon Karpnik, omówionych we wcześniejszej części niniejszego opracowania. Taki sam jest również ogólny schemat przepływu wód (rys. 5.8).

W rejonie Staniszowa główną strefą dyslokacyjną jest uskoki śródsudecki o przebiegu NW-SE oddzielający blok karkonosko-izerski od metamorfiku kaczańskiego oraz uskoki brzeżny Karkonoszy oddzielający masyw karkonoski od Kotliny Jeleniogórskiej. Istotne znaczenie dla występowania wód podziemnych, w tym wód termalnych głębokiego systemu krążenia w tym rejonie, mają mniejsze uskoki o przebiegu NNE-SSW lub N-S, zwykle wykorzystywane przez doliny rzek i potoków (m.in. Kamiennej, Małej Kamiennej, Wrzosówki), umożliwiające tym wodom przepływ ku powierzchni terenu (Łukaczyński i Polaczek, 2014b). Głębokość systemu krążenia wód termalnych została oszacowana na 2600-2700 m (Dowgiałło, 1998).

Zasadnicze znaczenie dla detekcji uskoków ma obraz satelitarny przebiegu fotolineamentów. W obrazie Kotliny Jeleniogórskiej uwidacznia się szereg struktur liniowych o kierunkach zgodnych z kierunkami uskoków (Marszałek, 2007). Możliwość ujęcia wód termalnych głębokiego krążenia istnieje w miejscach krzyżowania się struktur liniowych. Tego rodzaju sytuacja występuje w rejonie Cieplic i Staniszowa.

Otwór ST-1 w Staniszowie zlokalizowany został w odległości ok. 3 km na E od uzdrowiska Cieplice. W otworze tym ujęto wody na głębokości od 1360,0 do 1405,0 m ze skał granitowych występujących na całym przelocie wiercenia (szczelinowy poziom wodonośny). W ujętym poziomie wodonośnym występują wody o typie chemicznym $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Cl-Na,F,Rn,S}$, mineralizacji rzędu 0,47 g/dm³ i temperaturze na wypływie do 37°C. Wyniki badań izotopowych (Ciężkowski i in. 1996) oraz modelowych (Kapuściński in., 2010) przeprowadzone dla pobliskiego uzdrowiska Cieplice wskazują, że obszarem zasilania wód o składzie odpowiadającym typowym wodom głębokiego krążenia, które występują zarówno w otworze Staniszów ST-1, jak również w niemal wszystkich ujęciach wód leczniczych w Cieplicach, jest pasmo Rudaw Janowickich, położone na wschód od obydwu miejscowości. Wody termalne do strefy drenażu dopływają prawdopodobnie poprzez uskoki brzeżny Karkonoszy o przebiegu zbliżonym do W-E.

W pobranej w 2016 r. próbce wody nie stwierdzono występowania trytu, co wskazuje na brak udziału wód zasilanych współcześnie (po 1952 r.) i potwierdza wynik uzyskany w 2013 r., kiedy to wody ujęcia zostały opróbowane izotopowo podczas prac związanych z jego dokumentowaniem (Łukaczyński i Polaczek, 2014b). W pobranych próbkach wykonano oznaczenia izotopowe o podobnym zakresie jak w trakcie raportowanych prac. Stwierdzono wówczas, że zawartość ¹⁴C

wynosi 5,5 pmc. Szacowany „wiek” wód (ok. 16 000 lat) wskazywałby na infiltrację plejstoceniową, a więc zachodzącą w klimacie wyraźnie chłodniejszym niż obecnie. Infiltrację wód w okresie o niższych niż obecnie temperaturach wykluczają jednak wyniki oznaczeń składu izotopów tlenu i wodoru. Wartość $\delta^{18}\text{O}$ wynosząca $-10,43\text{‰}$ świadczy o infiltracji w klimacie zbliżonym do współczesnego, z uwzględnieniem efektu wysokościowego wynikającego z położenia obszaru zasilania na wysokości 800-900 m n.p.m. Badania wykonane w 2016 r. wykazały, iż po rozpoczęciu eksploatacji ujęcia zawartość radiowęglu w wodach zwiększyła się do 10,5 pmc, przy zbliżonych wartościach izotopów stabilnych. Jednocześnie wartość $\delta^{13}\text{C}$ jest nieco mniej ujemna niż w poprzednim badaniu, co może wskazywać na obecność zjawiska wymiany izotopowej rozpuszczonych węglanów z matrycą skalną. Zatem faktyczny „wiek” tych wód byłby nieco młodszy, prawdopodobnie holoceni. Istotne znaczenie ma jednak wyraźny wzrost zawartości radiowęglu, który świadczy o zmianie sposobu zasilania ujęcia i dopływie wód zawierających ten izotop, wymuszonym w wyniku eksploatacji. Zjawisko to świadczy o bardzo małej pojemności systemu szczelinowego występującego w skałach krystalicznych w rejonie ujęcia ST-1 w Stanisławowie, biorąc pod uwagę dotychczas niewielkie wydobycie wód.

W związku z powyższym brak jest możliwości określenia „wieku” wód przy wykorzystaniu wyników oznaczeń ^{14}C , stanowią one bowiem mieszaninę wód pochodzących z różnych systemów krążenia, o nieznanym udziale poszczególnych składowych.

Według skali oceny stopnia zagrożenia wód zanieczyszczeniami pochodzenia antropogenicznego przyjętej w opracowaniu wody ujęcia w Stanisławowie cechują się niskim stopniem zagrożenia. Należy jednak zwrócić uwagę na dynamiczne zmiany zawartości radiowęglu, świadczące o zmianach sposobu zasilania ujęcia, a pośrednio wskazujące na istnienie zagrożenia zasobów i jakości ujętych wód w wyniku eksploatacji. Zmianom sposobu zasilania ujęcia mogą bowiem towarzyszyć zmiany właściwości fizyczno-chemicznych wód, w tym ich temperatury, która ma istotne znaczenie dla możliwości gospodarczego wykorzystania tych wód.

LĄDEK L-2 (ZDZISŁAW)

Informacje o położeniu obiektu:			
<u>miejsowość:</u>	<u>gmina:</u>	<u>powiat:</u>	<u>województwo:</u>
Lądek-Zdrój	Lądek-Zdrój (gm. miejsko-wiejska)	Kłodzki	dolnośląskie

Informacje o obiekcie:			
<u>typ obiektu:</u>		otwór eksploatacyjny	
<u>rodzaj ujętej wody:</u>		termalna woda lecznicza	
<u>rzędna terenu (m n.p.m.):</u>	<u>głębokość całkowita (m):</u>	<u>rok wykonania:</u>	<u>stan obiektu:</u>
467,35	700,5	1973	czynny
<u>cel wykorzystania:</u>		balneoterapia	
<u>użytkownik:</u>		Uzdrowisko Lądek-Długopole Sp. z o.o.	

Informacje o ujętym poziomie wodonośnym:			
<u>wiek poziomu wodonośnego:</u>		prekambr	
<u>poziom wodonośny (m p.p.t.):</u>		<u>zwierciadło (m p.p.t.):</u>	
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>nawiercone:</u>	<u>ustabilizowane:</u>
586,6	700,5	586,6	+8,8 (samowypływ)
<u>zafiltrowanie (m p.p.t.):</u>		<u>zasoby eksploatacyjne (m³/h):</u>	<u>depresja (m):</u>
<u>od:</u>	<u>do:</u>	30,00	-
586,6	700,5		

Właściwości fizykochemiczne wody:		
<u>mineralizacja (g/dm³):</u>	<u>temperatura (°C):</u>	<u>typ chemiczny wody:</u>
0,2	44	HCO ₃ ⁻ -(SO ₄)-Na,F,Rn,S

Wyniki oznaczeń izotopowych:					
<u>Data poboru</u>	<u>δ¹⁸O [‰] V-SMOW</u>	<u>δ²H [‰] V-SMOW</u>	<u>Tryt [T.U.]</u>	<u>δ¹³C [‰] V-PDB</u>	<u>¹⁴C [pmc]</u>
28.03.1985 ¹⁾	-9,8	-68,5	0,7 ±1,5	-	-
22.01.1987 ¹⁾	-10,79	-70,7	-	-	-
1993 ²⁾	-	-	0,0 ±0,5	-13,2	17,8
20.06.2016	-10,78	-76,6	0,3 ±0,4	-13,3	20,5 ±1,5

Niepewność pomiaru składu izotopów trwałych wynosi ±0,1‰, ±1‰ odpowiednio dla δ¹⁸O, δ²H oraz ±0,2‰ dla δ¹³C
¹⁾ Ciężkowski (1990); ²⁾ Ciężkowski i in. (1996)

Uzdrowisko Łądek-Zdrój położone jest we wschodniej części Ziemi Kłodzkiej, w obrębie jednostki geologicznej metamorfiku Łądka-Śnieżnika. Występujące tam utwory - łupki oraz wapienie krystaliczne (seria strońska), gnejsy gierałtowskie i śnieżnickie (seria gierałtowska), wśród których pojawiają się skały bazaltowe oraz żyłowe - porozcinane są licznymi krzyżującymi się rozłamami i uskoki. Do najważniejszych, również z hydrogeologicznego punktu widzenia, należą uskoki o przebiegu NW-SE (Łądek-Orłowiec-Karpno i Łądek-Gierałtów) oraz prostopadły do nich uskok Łądka-Zdroju, rozdzielający zbudowane z gnejsów gierałtowskich i śnieżnickich antyklinorium Gierałtowa od synklinorium Łądka, budowanego przez kompleks łupków oraz wapieni.

Wody termalne Łądka-Zdroju to wody szczelinowe bardzo głębokiego krążenia, których wypływy są związane z głębokimi rozłamami (Kiełczawa i Liber-Makowska, 2017). Wody te na skutek przepływu w skałach metamorficznych charakteryzują się niską mineralizacją oraz zawartością składników swoistych - fluoru, radonu, a także siarczków. Obszar zasilania tych wód termalnych jest zlokalizowany na południe i południowy wschód od uzdrowiska, w Górach Złoty i Białskich, na wysokości od 700 do ponad 1000 m n.p.m. (Ciężkowski i in., 1996; Kapuściński i in., 2010). Przyjmuje się, że wody tam infiltrujące przedostają się szczelinami na głębokość 2000 - 3000 m (Ciężkowski, 1990; Liber, 2001), ulegają ogrzaniu i modyfikacji składu chemicznego, a następnie wypływają w miejscu drenażu wzdłuż uskoku poprzecznego Łądka-Zdroju, mieszając się z chłodnymi wodami zawierającymi radon, występującymi w płytszej części systemu wodonośnego. Sposób formowania się złóż wód termalnych systemów tzw. bardzo głębokiego krążenia prezentuje rys. 5.6.

Próbka wody do oznaczeń izotopowych została pobrana z otworu L-2 (Zdzisław) z głębokości 586,6-700,5 m. W profilu wiercenia, którego głębokość wyniosła 700,5 m, niemal na całej długości występują prekambryjskie gnejsy. W trakcie wiercenia stwierdzono w tych utworach trzy poziomy wodonośne związane ze strefami zeszcelinowaceń. Pierwszy z nich występował na głębokości 106,6 m – wody podziemne ustabilizowały się na głębokości 4,9 m, drugi na głębokości 461,0 m ze stabilizacją wody na wysokości 1,2 m n.p.t., natomiast trzeci na głębokości 586,6 m ze stabilizacją wody na wysokości 8,8 m n.p.t. Zróznicowane poziomy stabilizacji zwierciadła wód świadczą o braku łączności hydraulicznej pomiędzy poszczególnymi poziomami wodonośnymi, jak również o różnych strefach zasilania. Ujęte wody charakteryzują się niską mineralizacją wynoszącą 0,2 g/dm³, typem chemicznym HCO₃-(SO₄)-Na,F,Rn, S i temperaturą na wypływie sięgającą 44°C.

Wody występujące w otworze są wodami beztrytowymi – wyniki oznaczeń tego nuklidu z lat 1985-2016 mieszczą się w granicach błędów oznaczenia. Brak jest zatem istotnej domieszki wód zasilanych po 1952 r., a stopień zagrożenia zanieczyszczeniami pochodzącymi z powierzchni jest niski.

Wartość $\delta^{13}\text{C}$ wskazuje na brak wymiany izotopowej węgla w układzie skała-roztwór (wodorowęglany) na drodze podziemnego przepływu ze stref zasilania, co potwierdzają również

wyniki z 1993 r. Pozwala to na oszacowanie „wieku” tych wód, tj. czasu, jaki upłynął od momentu infiltracji, na podstawie zawartości ^{14}C .

Stosując wzór przedstawiony we wcześniejszej części tekstu obliczono, że „wiek” tych wód wynosi ok. 9000 lat, co wskazuje na infiltrację wczesnooloceniową (eoholocen). Okres ten był chłodniejszy od klimatu współczesnego co widoczne jest w wynikach oznaczeń składu izotopów stabilnych tlenu i wodoru, które są nieco bardziej ujemne od charakterystycznych dla czasów obecnych. Wpływ na wartości $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ ma również położenie Łądko-Zdroju oraz obszarów zasilania badanego poziomu wodonośnego, czyli efekt wysokościowy, który został wyznaczony dla Sudetów (Ciężkowski, 1990). Skład izotopowy tlenu i wodoru odpowiada górnym partiom obszaru zasilania wyznaczonego w Górach Bialskich na wysokości od 700 do ponad 1000 m n.p.m. (Ciężkowski i in., 1996). Uwagę zwraca niewielki (ok. 3 pmc) wzrost zawartości radiowęglu w wodach obserwowany między 1993 i 2016 r. Biorąc pod uwagę wielkość błędu oznaczeń ($\pm 1,5$ pmc), różnica między uzyskanymi wartościami może mieć charakter pozorny. Natomiast jeśli uznać ją za rzeczywistą, świadczyłaby o zmianie w systemie zasilania ujęcia i uruchomieniu dopływu komponenty o niższym „wieku”.

O stosunkowo długim czasie pobytu wód ujętych otworem L-2 w środowisku podziemnym świadczy ich chemizm, a zwłaszcza dominująca wśród kationów ilość sodu przy niewielkiej ilości chlorków wśród anionów.

Podsumowując, wody termalne występujące w trzech ujęciach sudeckich objętych badaniami izotopowymi w ramach raportowanego zadania są wodami pochodzenia infiltracyjnego, zasilanymi na znacznych wysokościach. Ich skład izotopowy odwzorowuje położenie stref alimentacyjnych. Wody ujęć w Łądko-Zdroju i Stanisławowie należy uznać za beztrytowe (oznaczenia w granicach błędu pomiarowego), a więc zasilane całkowicie przed 1952 r., natomiast w ujęciu w Karpnikach położonych w Kotlinie Jeleniogórskiej stwierdzono pojawienie się niewielkiej ilości trytu (0,7 T.U.), który wcześniej w nim nie występował. Ujęcie jest eksploatowane od 2015 r. z niewielką, w stosunku do zatwierdzonych zasobów, wydajnością. Obserwowana zmiana wskazuje na modyfikację sposobu zasilania ujęcia i uruchomienie dopływu wód zasilanych współcześnie. Pojawieniu się trytu w wodach ujęcia towarzyszyło pojawienie się również wcześniej niewystępującego w nich radiowęglu (0 pmc w 2014 r. i 2,5 pmc w 2015 r.), co potwierdza pojawienie się komponenty o młodszym „wieku”. Również w otworze ST-1 w Stanisławowie położonym w odległości ok. 7 km od Karpnik badania izotopowe wskazały na wzrost zawartości radiowęglu (5,5 pmc w 2014 r. i 10,5 pmc w 2016 r.). Skokowe zmiany zawartości nuklidu w wodach związane z uruchomieniem dopływu wód młodszych uniemożliwiają ocenę „wieku” wód, świadczą jednak o bardzo małej zasobności geotermalnego

systemu wodonośnego w południowej części Kotliny Jeleniogórskiej oraz o konieczności racjonalnej gospodarki jego zasobami.

5.5. Zapadlisko przedkarpackie

Zapadlisko przedkarpackie jest strukturą geologiczną o charakterze rowu przedgórskiego, wypełnionego morskimi osadami miocenu autochtonicznego o miąższości od ok. 100 m w północnej brzeżnej strefie do 3000 m na południu przy granicy z nasunięciem Karpat. W obrębie utworów miocenu wydziela się tzw. serię chemiczną zbudowaną m.in. z ewaporatów gipsowo-solnych, soli kamiennych oraz utworów siarczanowych z anhydrytami, z którą genetycznie związane jest występowanie wód siarczanowych oraz siarczkowych. W podłożu struktury, pod morskimi osadami miocenu, występują skały różnego wieku od prekambryjskich skał krystalicznych po utwory kredy górnej.

Cechą charakterystyczną tego regionu jest niewielka miąższość strefy wód słodkich oraz występowanie w osadach miocenu i kredy górnej (cenoman) rozległych stref wód siarczanowych i siarczkowych, nierzadko o udokumentowanych właściwościach leczniczych. Powszechnie występujące wody chlorkowe zawierają na ogół jod, nierzadko w dużym stężeniu, umożliwiającym pozyskiwanie tego pierwiastka w skali przemysłowej (Paczyński i Płochniewski, 1996).

W części północno-zachodniej i centralnej zapadliska osady rowu przedgórskiego zalegają na utworach niecki miechowskiej będącej południową częścią niecki szczecińsko-miechowskiej zaliczanej do struktur platformy paleozoicznej, stanowiącej jeden z najbardziej zasobnych regionów występowania wód termalnych. Na obszarze zapadliska przedkarpackiego, w obrębie niecki miechowskiej, udokumentowano występowanie w utworach kredy górnej (cenoman) wód termalnych o temperaturze na wypływie 25-29°C (Busko-Zdrój oraz Cudzynowice).

Badaniami izotopowymi przeprowadzonymi w ramach raportowanego zadania objęto ujęcie wód termalnych GT-1 w Cudzynowicach, dla którego tego rodzaju badania nie były dotąd prowadzone.

5.5.1. Wody termalne

CUDZYNOWICE GT-1

Informacje o położeniu obiektu:			
<u>miejsowość:</u>	<u>gmina:</u>	<u>powiat:</u>	<u>województwo:</u>
Cudzynowice	Kazimierza Wielka (gm. miejsko-wiejska)	kazimierski	świętokrzyskie

Informacje o obiekcie:			
<u>typ obiektu:</u>		otwór eksploatacyjny	
<u>rodzaj ujętej wody:</u>		termalna woda lecznicza	
<u>rzędna terenu (m n.p.m.):</u>	<u>głębokość całkowita (m):</u>	<u>rok wykonania:</u>	<u>stan obiektu:</u>
191,0	750,0	2015	czynny
<u>cel wykorzystania:</u>		ciepłownictwo	
<u>użytkownik:</u>		Kazimierskie Wody Lecznicze i Termalne Sp. z o.o.	

Informacje o ujętym poziomie wodonośnym:			
<u>wiek poziomu wodonośnego:</u>		kreda górna	
<u>poziom wodonośny (m p.p.t.):</u>		<u>zwierciadło (m p.p.t.):</u>	
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>nawiercone:</u>	<u>ustabilizowane:</u>
667,0	730,0	667,0	62,2
<u>zafiltrowanie (m p.p.t.):</u>		<u>zasoby eksploatacyjne (m³/h):</u>	<u>depresja (m):</u>
<u>od:</u>	<u>do:</u>	82,00	16,30
667,0	730,0		

Właściwości fizykochemiczne wody:		
<u>mineralizacja (g/dm³):</u>	<u>temperatura (°C):</u>	<u>typ chemiczny wody:</u>
15,1	28,5	Cl-SO ₄ -Na,I,S

Wyniki oznaczeń izotopowych:					
<u>Data poboru</u>	<u>δ¹⁸O [‰] V-SMOW</u>	<u>δ²H [‰] V-SMOW</u>	<u>Tryt [T.U.]</u>	<u>δ¹³C [‰] V-PDB</u>	<u>¹⁴C [pmc]</u>
30.10.2015	-10,58 -10,56	-76,2 -75,4	0,0 ±0,4	-5,9	3,0 ±1,5

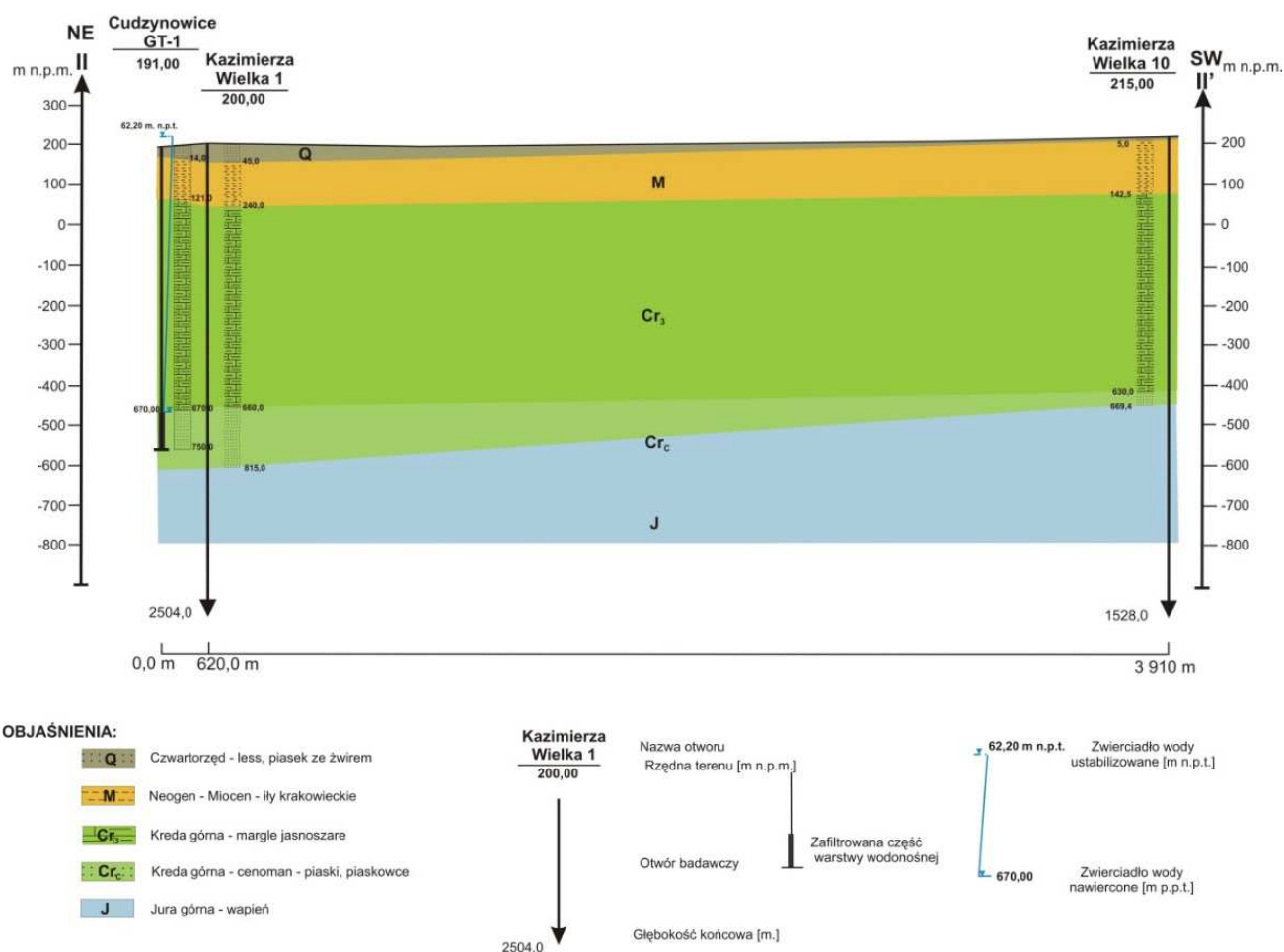
Niepewność pomiaru składu izotopów trwałych wynosi ±0,1‰, ±1‰ odpowiednio dla δ¹⁸O, δ²H oraz ±0,2‰ dla δ¹³C

Cudzynowice położone są w południowej części niecki miechowskiej. Niecka ta stanowi rozległą brachysynklinę wypełnioną osadami mezozoiku - głównie kredy dolnej i górnej oraz niewielkiej miąższości osadami triasu, jury środkowej i dolnej (rys. 5.10). Sumaryczna miąższość osadów kredy w strefie osiowej struktury osiąga od 800 do 1000 m. W spągu osadów kredy górnej występują utwory cenomanu, wykształcone w facji piaszczystej, a podrzędnie również węglanowej i zlepieńcowatej, stanowiące zasobny zbiornik wód termalnych. Miąższość utworów zbiornika cenomańskiego sięga miejscami ponad 120 m. Wyraźnie zaznacza się prawidłowość, że wraz ze wzrostem miąższości tych osadów wzrasta stopień ich zapiaszczenia, a tym samym polepszają się parametry kolektorskie (Barbacki i Kazanowska, 2001). Lokalnie utwory cenomanu tworzą wspólny kompleks wodonośny z niżej leżącymi piaszczystymi osadami dolnej kredy. Zasilanie zbiornika następuje przy południowo-zachodnim obrzeżeniu Gór Świętokrzyskich oraz w obrębie monokliny śląsko-krakowskiej, gdzie infiltrujące wody wykorzystują liczne dyslokacje oraz szczeliny krasowe w obrębie rozległych wychodni górnej jury. Główny kierunek przepływu wód termalnych jest zgodny z osią niecki miechowskiej. Zbiornik wód podziemnych charakteryzuje się na ogół warunkami naporowymi. Najwyższe ciśnienia panują w północnej i centralnej części zbiornika, natomiast najmniejsze w strefach brzeżnych i w strefie południowej. Stosunkowo płytkie występowanie utworów wodonośnych determinuje niskie temperatury wód w tym zbiorniku. W obszarze rozciągającym się na północ od nasunięcia Karpat temperatury w stropie utworów cenomanu kształtują się na poziomie 30–40°C.

Rejon Cudzynowic zbudowany jest z tektonicznych bloków o schodowym układzie obniżających się ku osi synkliny. Wyróżnić tu można dwa generalne systemy uskoków (Oszczypko, 2006) - o przebiegu NE-SW i NW-SE, równoległym do osi synklinorium. Z uwagi na położenie w osiowej części zbiornika geotermalnego występują tu maksymalne miąższości utworów cenomanu oraz warunki (ciśnienia) artezyjskie.

W otworze Cudzynowice GT-1 utwory zbiornikowe zostały przewiercone na głębokości od 667 do 730 m p.p.t. Uzyskano wydajność przekraczającą 80 m³/h przy ciśnieniu na głowicy rzędu 6 barów. Mineralizacja ujętych wód reprezentujących typ chemiczny Cl-SO₄-Na,I,S sięga 15,1 g/dm³, a temperatura na wypływie z ujęcia wynosi niespełna 29°C.

Z wyników badań izotopowych uzyskanych w ramach raportowanego zadania wynika, że wody ujęcia Cudzynowice GT-1 są pozbawione trytu, a tym samym składowej zasilania współczesnego. Dlatego też ich zagrożenie zanieczyszczeniami pochodzenia antropogenicznego należy uznać za niskie.



Rys. 5.10. Schematyczny przekrój geologiczny przez rejon Cudzynowice (Pacholewski i in., 2015).

Wartość $\delta^{13}\text{C} = -5,9\text{‰}$ wskazuje na obecność procesów wymiany izotopowej pomiędzy rozpuszczonymi węglanami występującymi w wodach ujęcia a ośrodkiem skalnym. Z uwagi na skalę tej wymiany „wiek” wynikający z zawartości radiowęglu $^{14}\text{C} = 3,0 \pm 1,5$ pmc (ok. 18 000 lat) nie odpowiada rzeczywistości (jest zawyżony). Można jedynie oszacować, że „wiek” tych wód wynosi ok. 6000 – 7000 lat. Taki wynik pozostaje w zgodności z wynikami oznaczeń składu izotopów stabilnych tlenu i wodoru, które są nieco bardziej ujemne niż charakteryzujące współczesne wody pochodzenia atmosferycznego. Wskazują one na zasilanie infiltracyjne wód w klimacie nieco chłodniejszym niż panujący obecnie. Biorąc pod uwagę budowę geologiczną obszaru, wysoką mineralizację wód, ich temperaturę na wypływie oraz położenie obszaru alimentacyjnego, nie można wykluczyć, że wody ujęte otworem Cudzynowice GT-1 stanowią mieszaninę wód płytszego systemu krążenia (zawierającą radiowęgiel) oraz systemu głębszego.

Jak już wspomniano, badania izotopowe wód ujętych w otworze Cudzynowice GT-1 nie były wcześniej wykonywane. Ich wyniki odbiegają od uzyskanych w ujęciach leczniczych wód siarczkowych rejonu Buska-Zdroju, zlokalizowanego w obrębie tej samej struktury geologicznej. Skład izotopowy buskich wód leczniczych ujmowanych z utworów kredy jest nieco mniej ujemny ($\delta^{18}\text{O}$ od -9,3 do -9,7‰; Nowicki i in., 2013), jednocześnie wody te pozbawione są radiowęglą (w granicach błędu oznaczenia). Oznacza to, że w całości zasilane były ponad 30 000 lat temu, w warunkach klimatycznych identycznych lub zbliżonych do obecnie panujących.

5.6. Karpaty zewnętrzne

Region Karpat zewnętrznych charakteryzuje się występowaniem mięszkiego kompleksu fliszu łupkowo-piaskowcowego (paleogeńsko-neogeńsko-kredowego), stanowiącego główne piętro wodonośne wód zmineralizowanych i swoistych. Tego rodzaju wody zostały również rozpoznane w podłożu utworów nasunięcia Karpat, w autochtonicznych osadach paleozoiku. Obydwa piętra cechują się słabymi parametrami hydrogeologicznymi.

W obrębie fliszu najlepszymi właściwościami hydrogeologicznymi cechują się utwory o znacznym udziale piaskowców, nie mniej zasadnicze role w przypadku stopnia zawodnienia odgrywają szczelinowatość oraz obecność nieciągłych zaburzeń tektonicznych. Strefa aktywnej wymiany wód, związana z obecnością otwartych spękań, sięga do 60-100 m (Kleczkowski, 1979). Poniżej tej głębokości przepływ wód zachodzi w obrębie stref nieciągłości tektonicznych sięgających niekiedy do znacznych głębokości. Strefy te stanowią również drogi migracji dwutlenku węgla z głębokich warstw skorupy Ziemi ku jej powierzchni.

Obecność nasyconych dwutlenkiem węgla szczaw i wód kwasowęglowych, obok powszechnie występujących wód chlorkowych, jest charakterystyczna dla Karpat zewnętrznych. Szczawy i wody kwasowęglowe występują na ograniczonych obszarach i cechują się strefowością hydrochemiczną wynikającą z ich genezy (Węclawik, 1991). W centralnej strefie hydrochemicznej obejmującej dolinę Popradu dominują szczawy wodorowęglanowe pochodzenia infiltracyjnego typu $\text{HCO}_3\text{-Ca-(Mg),CO}_2$ (tzw. szczawy proste), o stosunkowo niskiej mineralizacji (do 6 g/dm^3). Szczawy chlorkowe typu $\text{HCO}_3\text{-(Cl)-Na-(Ca),CO}_2\text{(I)}$, o na ogół dość wysokiej mineralizacji (do 28 g/dm^3), udokumentowane m.in. w Szczawnicy, Szczawie i Wysowej-Zdroju, stanowiące mieszaninę wód infiltracyjnych z wodami dehydratacyjnymi, zostały zaliczone do przejściowej strefy hydrochemicznej. Do trzeciej z wydzielonych stref hydrochemicznych - strefy zewnętrznej, w której dominują wody chlorkowe o zróżnicowanej mineralizacji, z uwagi na obecność bituminów i niższą zawartość CO_2 zaliczone zostały również chlorkowe wody kwasowęglowe i szczawy Iwonicza-Zdroju, Rymanowa-Zdroju i Rabego (Chowaniec i in.,

2007; Chowaniec, 2009).

Cechą charakterystyczną Karpat fliszowych jest również występowanie w zewnętrznej strefie hydrochemicznej zmineralizowanych wód typu Cl-HCO₃ i HCO₃-Cl pozbawionych dwutlenku węgla. Wody tego rodzaju ujmowane są w uzdrowiskach wschodniej części Karpat.

Na obszarze Karpat zewnętrznych we wszystkich strefach hydrochemicznych obecne są liczne przejawy wód siarczkowych, wypływających w źródłach lub ujętych płytkimi na ogół otworami wiertniczymi. Są to na ogół wody słabo zmineralizowane lub o mineralizacji nieco powyżej 1 g/dm³. Łączna liczba zanotowanych źródeł tego rodzaju wód przekracza 100 (Rajchel, 2000).

Użytkowane do celów gospodarczych, w szczególności zlokalizowane w uzdrowiskach ujęcia wód leczniczych z obszaru Karpat fliszowych posiadają na ogół zbiory różnoczasowych wyników badań izotopowych. Badania tego rodzaju prowadzone są od wielu lat w ramach prac naukowych, badań stacjonarnych lub prac geologicznych związanych z dokumentowaniem zasobów eksploatacyjnych i dyspozycyjnych wód, w szczególności szczaw i wód kwasowęglowych (m.in. Ciężkowski i Zuber, 1995, 1997; Ciężkowski i in., 1996; Porwisz i Kowalski, 2002; Chowaniec i in., 2014, 2015; Operacz i in, 2015; Gorczyca i in., 2016).

W ramach raportowanego zadania badaniami izotopowymi o zróżnicowanym zakresie objęto 5 ujęć wód leczniczych zlokalizowanych na obszarze Karpat zewnętrznych, w tym:

- szczawy chlorkowe występujące w ujęciach Szczawie i Rabem;
- wody siarczkowe występujące w źródłach w Lesku i Nieborowie Małym;
- jodkowe wody chlorkowe ujęte w Polańczyku.

5.6.1. Wody lecznicze

SZCZAWA II

Informacje o położeniu obiektu:			
<u>miejsowość:</u>	<u>gmina:</u>	<u>powiat:</u>	<u>województwo:</u>
Szczawa	Kamienica (gm. wiejska)	limanowski	małopolskie

Informacje o obiekcie:			
<u>typ obiektu:</u>		otwór eksploatacyjny	
<u>rodzaj ujętej wody:</u>		woda lecznicza	
<u>rzędna terenu (m n.p.m.):</u>	<u>głębokość całkowita (m):</u>	<u>rok wykonania:</u>	<u>stan obiektu:</u>
523,90	100,0	1976	czynny
<u>cel wykorzystania:</u>		wytwarzanie produktów zdrojowych	
<u>użytkownik:</u>		EURO-CODE sp. j. K.J. Morzywołek	

Informacje o ujętym poziomie wodonośnym:			
<u>wiek poziomu wodonośnego:</u>		paleogen	
<u>poziom wodonośny (m p.p.t.):</u>		<u>zwierciadło (m p.p.t.):</u>	
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>nawiercone:</u>	<u>ustabilizowane:</u>
72,5	100,0	72,5	5,8
<u>zafiltrowanie (m p.p.t.):</u>		<u>zasoby eksploatacyjne (m³/h):</u>	<u>depresja (m):</u>
<u>od:</u>	<u>do:</u>	0,20	34,00
72,5	95,0		

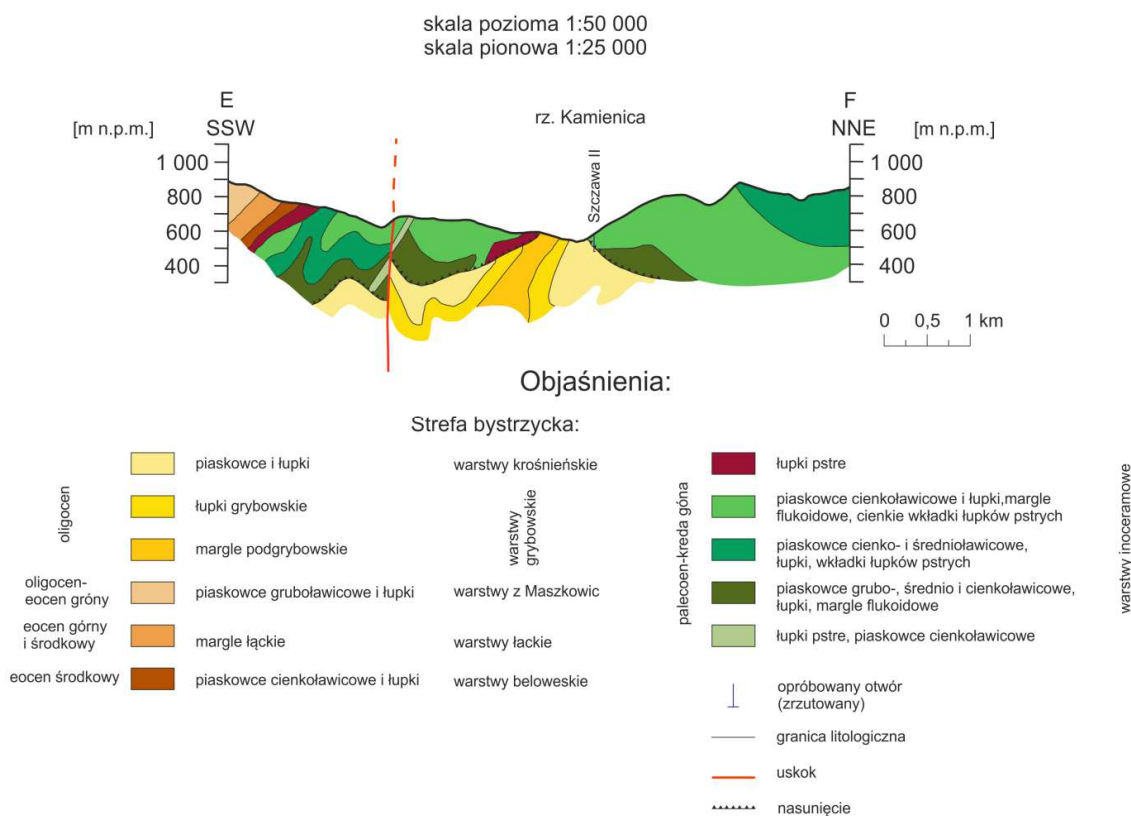
Właściwości fizykochemiczne wody:		
<u>mineralizacja (g/dm³):</u>	<u>temperatura (°C):</u>	<u>typ chemiczny wody:</u>
23,8	9,9	HCO ₃ -Cl-Na,I,CO ₂

Wyniki oznaczeń izotopowych:					
<u>Data poboru</u>	<u>δ¹⁸O [‰] V-SMOW</u>	<u>δ²H [‰] V-SMOW</u>	<u>Tryt [T.U.]</u>	<u>δ¹³C [‰] V-PDB</u>	<u>¹⁴C [pmc]</u>
02.02.1995 ¹⁾	6,60	-33,0	0,0 ±0,5	-	-
13.12.1995 ¹⁾	6,80	-31,0	-	-	-
24.09.1998 ²⁾	6,40	-29,0	0,1 ±0,5	-	-
16.08.2017	3,39	-35,1	1,1 ±0,3	-	-

Niepewność pomiaru składu izotopów trwałych wynosi ±0,1‰, ±1‰ odpowiednio dla δ¹⁸O, δ²H

¹⁾ Ciężkowski i in. (1996); ²⁾ Ciężkowski (baza znaczników środowiska PIG-PIB)

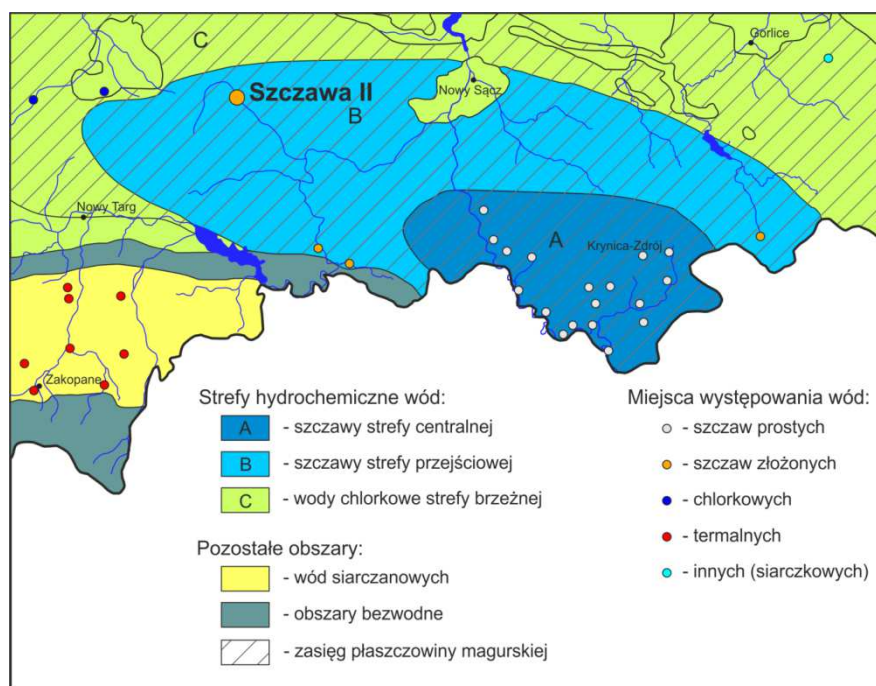
Występowanie wód nasyconych CO₂ w rejonie Szczawy jest związane z warstwami górnopaleogeńskich piaskowców płaszczowiny dukielskiej odślaniających się w oknie tektonicznym (okno tektoniczne Szczawy; rys. 5.11). Wodonośność tych utworów jest zależna od szczelinowatości, która sprawia, że poziomy wodonośne poszczególnych ogniw stratygraficzno-facjalnych łączą się ze sobą (Porwisi i Kowalski, 2002).



Rys. 5.11. Schematyczny przekrój geologiczny przez okolice Szczawy (Porwisi i Kowalski, 2002, zmodyfikowany)

Występowanie wód nasyconych CO₂ związane jest ze strefami uskokowymi, które umożliwiają transport tego gazu oraz wód ku powierzchni Ziemi. W Szczawie naturalne wypływy tego rodzaju wód udokumentowano w dolinach rzeki Kamienicy oraz jej dopływów – Szczawy i Głębieńca, którego koryto wykorzystuje strefę uskokową. Wody te należą do tzw. szczaw chlorkowych przejściowej strefy hydrochemicznej Karpat zewnętrznych (rys. 5.12). Charakteryzują się złożonymi typami chemicznymi oraz relatywnie wysoką mineralizacją wynoszącą od kilku do niemal 30 g/dm³. Złożoność składu chemicznego szczaw chlorkowych wynika z ich skomplikowanej genezy. Są one wodami wieloskładnikowymi, których komponentami są wody infiltracyjne (współczesne i holocenijskie), wody reliktove (syndementacyjne wody morskie zmienione diagenetycznie) oraz wody dehydratacyjne (wody metamorficzne) powstałe w wyniku illityzacji smektytów (transformacji

pod wpływem temperatury i ciśnienia z uwolnieniem wody; Leśniak, 1980) lub uwalniania w procesie diagenety kompacyjnej przy tworzeniu się łupków fliszowych (Zuber i Chowaniec, 2009).



Rys. 5.12. Występowanie i strefowość hydrochemiczna wód zmineralizowanych i swoistych na obszarze Karpat polskich między Zakopanem i Gorlicami (Węćławik, 1991, zmodyfikowany)

W mieszaninach takich zachodzi rozcieńczanie reliktowych solanek (skład izotopowy odpowiadający punktowi SMOW) wodami dehydratacyjnymi o wyraźnie cięższym składzie izotopowym. Uzyskiwane w nich wartości $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ są mniej ujemne lub w przypadku $\delta^{18}\text{O}$ dodatnie i odbiegają od najczęściej spotykanych w wodach leczniczych i zwykłych na terenie Polski, przy czym stanowią charakterystyczny marker wód dehydratacyjnych. O zawartości chlorków w tych wodach decyduje natomiast składowa wód reliktowych. Mieszaniny wód reliktowych z wodami dehydratacyjnymi przemieszczają się ku górze, mieszają z wodami infiltracyjnymi i są nasycane dwutlenkiem węgla.

Do badań izotopowych w ramach raportowanego zadania wytypowano ujęcie Szczawa II będące najgłębszym otworem ujmującym wody lecznicze w Szczawie. Otwór ten został odwiercony w utworach paleogeńskich (iłowupki i piaskowce). Zafiltrowano w nim utwory wodonośne na głębokości 72,5 – 100,0 m i ujęto niższy poziom wodonośny, którego zwierciadło stabilizowało się na głębokości 5,8 m. Ujęte szczawy chlorkowe charakteryzowały się mineralizacją wynoszącą niemal 24 g/dm³ i typem chemicznym HCO₃-Cl-Na, I, CO₂.

W latach 1980-2006 przeprowadzono 5 serii badań izotopowych wód tego ujęcia obejmujących oznaczenia trytu oraz izotopów stabilnych tlenu i wodoru. Badania o tym samym zakresie przeprowadzono w ramach raportowanego zadania w 2017 r.

Wszystkie wyniki pomiarów składu izotopowego wodoru i tlenu z ujętych wód wskazują na znaczne odchylenie od światowej linii opadów (WMWL), a wartości znajdują się poniżej tej linii. Według badań izotopowych wykonanych w 1995 i 1998 r. $\delta^{18}\text{O}$ wynosiła od 6,4 do 6,8‰, przy czym wody nie zawierały trytu, co świadczyło o braku zasilania współczesnego. Wyniki badań z 2017 r. wskazują, że wartość $\delta^{18}\text{O}$ wyraźnie przesunęła się w kierunku wartości mniej dodatnich, tj. do 3,39‰, co wskazuje na zakłócenie systemu formowania tych wód i zwiększenie udziału wód infiltracyjnych. Szczególnie niepokojące jest pojawienie się trytu, którego obecność w ilościach powyżej granicy błędu oznaczenia została stwierdzona w próbkach wód z 2006 i 2017 r. (odpowiednio 0,8 i 1,1 T.U.) i świadczy o istotnym dopływie wód współczesnych zasilanych po 1952 r. Stwarza to realne zagrożenie nie tylko zanieczyszczenia wód leczniczych, ale również istotnych zmian ich właściwości fizycznych i składu chemicznego. Według skali przyjętej w opracowaniu wody są zagrożone wpływem czynników antropogenicznych pochodzących z powierzchni terenu w stopniu wysokim. Dostępne wyniki laboratoryjnych badań właściwości fizyczno-chemicznych wód ujęcia Szczawa II jak dotychczas nie wykazują zmian wynikających z dopływu zanieczyszczeń ale tendencja zmian składu izotopowego jest bardzo wyraźna i problem ten należy traktować bardzo poważnie. Ujęcie powinno zostać objęte cyklicznymi badaniami izotopowymi.

Na podstawie badań przeprowadzonych w I etapie prac, w latach 2009-2013, podobne zmiany składu izotopowego stwierdzono również w wodach ujęć Hanna i Dziedzilla oraz otworze wiertniczym Krystyna w Szczawie (Nowicki i in., 2013).

Tendencja zmian składu izotopowego wód w kierunku wartości mniej dodatnich oznacza stopniowy spadek udziału wód reliktowych na rzecz wzrostu udziału wód infiltracyjnych i jest związana prawdopodobnie z długotrwałą, choć obecnie niezbyt intensywną, eksploatacją złoża.

RABE 1 (ŹRÓDŁO RABSKIE)

Informacje o położeniu obiektu:			
<u>miejsowość:</u>	<u>gmina:</u>	<u>powiat:</u>	<u>województwo:</u>
Rabe	Baligród (gm. wiejska)	leski	podkarpackie

Informacje o obiekcie:			
<u>typ obiektu:</u>		otwór eksploatacyjny	
<u>rodzaj ujętej wody:</u>		woda lecznicza	
<u>rzędna terenu (m n.p.m.):</u>	<u>głębokość całkowita (m):</u>	<u>rok wykonania:</u>	<u>stan obiektu:</u>
660,00	70,0	1966	czynny okresowo
<u>cel wykorzystania:</u>		punkt czerpalny	
<u>użytkownik:</u>		Lasy Państwowe	

Informacje o ujętym poziomie wodonośnym:			
<u>wiek poziomu wodonośnego:</u>		paleogen-kreda	
<u>poziom wodonośny (m p.p.t.):</u>		<u>zwierciadło (m p.p.t.):</u>	
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>nawiercone:</u>	<u>ustabilizowane:</u>
35,4	70,0	35,4	1,9
<u>zafiltrowanie (m p.p.t.):</u>		<u>zasoby eksploatacyjne</u>	<u>depresja (m):</u>
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>(m³/h):</u>	
50,0	60,0	6,00	1,70

Właściwości fizykochemiczne wody:		
<u>mineralizacja (g/dm³):</u>	<u>temperatura (°C):</u>	<u>typ chemiczny wody:</u>
4,8	9,5	HCO ₃ -Cl-Na,CO ₂

Wyniki oznaczeń izotopowych:					
<u>Data poboru</u>	<u>δ¹⁸O [‰] V-SMOW</u>	<u>δ²H [‰] V-SMOW</u>	<u>Tryt [T.U.]</u>	<u>δ¹³C [‰] V-PDB</u>	<u>¹⁴C [pmc]</u>
9.08.2017	-9,86	-71,7	0,0 ±0,3	-	-

Niepewność pomiaru składu izotopów trwałych wynosi ±0,1‰, ±1‰ odpowiednio dla δ¹⁸O, δ²H

Rejon miejscowości Rabe położony jest na obszarze tzw. łuski Bystrego w fliszowych Karpatkach zewnętrznych (Karpaty Wschodnie). Łuska stanowi wydłużoną strukturę o rozciągłości SE-

NW, tj. o kierunku zgodnym z przebiegiem głównych jednostek i struktur geologicznych Karpat. W jej obrębie obserwuje się pełen profil kredy (Rajchel, 2013). Wśród osadów dominują piaskowce przewarstwione łupkami. Budowa łuski związana jest z nasunięciem strefy przeddukielskiej na jednostkę śląską. Od strony północnej łuska nasuwa się na oligoceńskie osady piaskowcowo-łupkowe warstw krośnieńskich (jednostka śląska), a od południa przykryta jest nasunięciem eoceńsko-oligocześskich łupków menilitowych z rogowcami fałdów dukielsko-miechowskich (Kawalec i Mioduszewski, 1963). W obrębie kredowo-paleogeńskich piaskowców i łupków piaszczystych Łuski Bystrego występują strefy mineralizacji kwarcytowej i kruszcowej (piryt, realgar, aury pigment, blenda cynkowa, galena), związane ze strefami uskokowymi o głębszych założeniach, którymi migrowały roztwory hydrotermalne. Rozłamy i szczeliny tektoniczne są również obecnie drogami przepływu wód podziemnych oraz migracji ku powierzchni dwutlenku węgla

Rabe położone jest w hydrochemicznej strefie zewnętrznej charakteryzującej się dominacją wód chlorkowych, w obrębie której szczawy chlorkowe tworzą niewielkie enklawy (Węćławik, 1991). Z uwagi na rozpoznanie w miejscowości szczaw chlorkowych wydzielony został w regionalizacji wód mineralnych i leczniczych rejon bieszczadzki (Paczyński i Płochniewski, 1996). Wody mineralne, które współwystępują ze zwykłymi w obrębie piaskowców kredy, tworzą naturalne wypływy w korycie potoku Rabskiego, przepływającego przez miejscowość. Wody te poza dwutlenkiem węgla zawierają siarkowodór oraz związki żelaza i arsenu.

W opróbowanym izotopowo w ramach raportowanego zadania otworze Rabe 1 (Źródło Rabskie) o głębokości 70 m, odwierconym w piaskowcach różnoziarnistych, udokumentowano występowanie horyzontu wodonośnego na głębokości 35,4 m, który został zafiltrowany na głębokości 50,0-60,0 m. Ujęte wody to szczawy typu $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$ o mineralizacji $4,8 \text{ g/dm}^3$, zawierające związki arsenu, które w przeszłości uznawane były za składnik swoisty wód leczniczych. Badania izotopowe przeprowadzone w 2017 r. wykazały, że wody ujęcia Rabe 1 nie zawierają trytu, co świadczy o ich braku kontaktu z współczesnymi wodami pochodzenia atmosferycznego zasilanymi po 1952 r., a tym samym o niskim stopniu zagrożenia zasobów i jakości. Skład izotopów stabilnych tlenu i wodoru wskazuje, że infiltracja tych wód nastąpiła w warunkach klimatu zbliżonego do współczesnego. Na podstawie uzyskanych wyników badań izotopowych i składu chemicznego wód, a także warunków ich występowania można przyjąć, że są to prawdopodobnie kilkuskładnikowe mieszaniny o dominującym udziale beztrytowych wód infiltracyjnych z domieszką wód sedymentacyjnych, których markerem są chlorki. Z uwagi na charakter wód nie można wykluczyć również udziału niewielkiej komponenty wód dehydratacyjnych o zdecydowanie cięższym składzie izotopowym (Chowaniec, 2004). Jej obecność, nawet przy niewielkim objętościowym udziale, modyfikowałaby skład izotopowy wód ujęcia i wpływała na interpretację uzyskanych wyników.

LESKO ŹRÓDŁO nr 1

Informacje o położeniu obiektu:			
<u>miejsowość:</u>	<u>gmina:</u>	<u>powiat:</u>	<u>województwo:</u>
Lesko	Lesko (gm. miejsko-wiejska)	leski	podkarpackie

Informacje o obiekcie:			
<u>typ obiektu:</u>		źródło	
<u>rodzaj ujętej wody:</u>		woda lecznicza	
<u>rzędna terenu</u> <u>(m n.p.m.):</u>	<u>głębokość całkowita</u> <u>(m):</u>	<u>rok wykonania:</u>	<u>stan obiektu:</u>
360,00	-	1977 (obudowa)	(samowypływ)
<u>cel wykorzystania:</u>		punkt czerpalny	
<u>użytkownik:</u>		-	

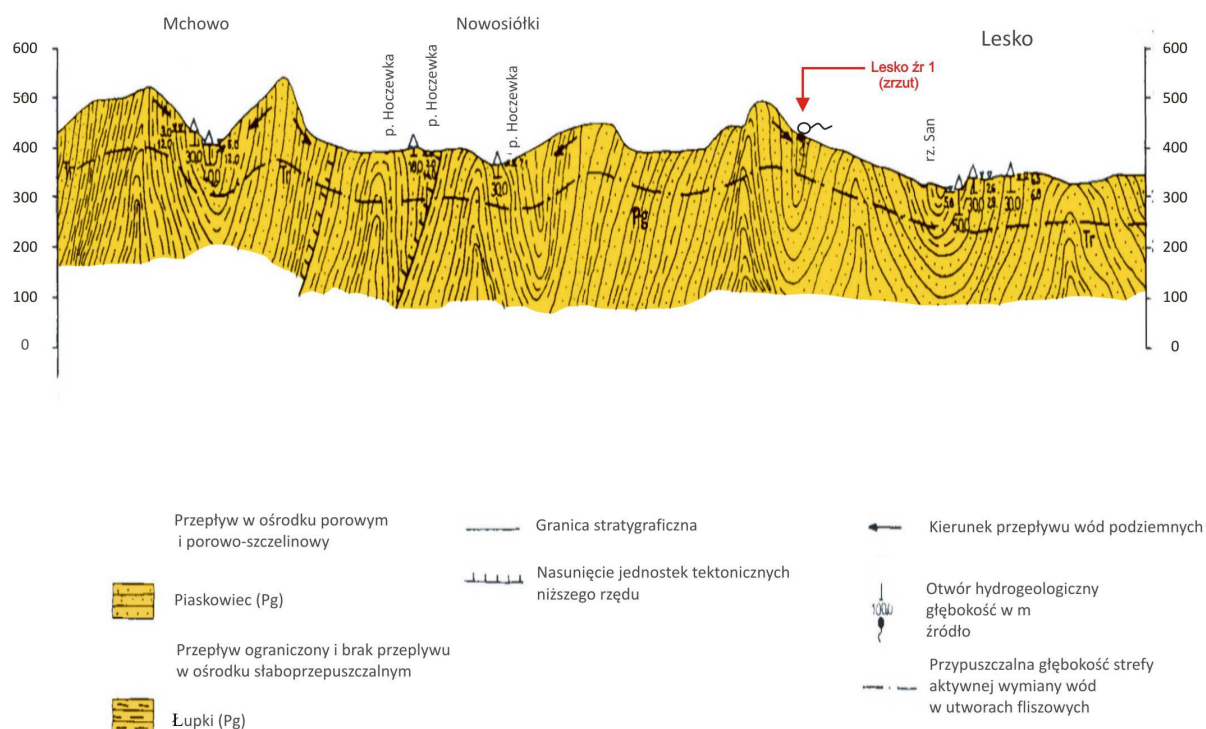
Informacje o ujętym poziomie wodonośnym:			
<u>wiek poziomu wodonośnego:</u>		paleogen	
<u>poziom wodonośny (m p.p.t.):</u>		<u>zwierciadło (m p.p.t.):</u>	
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>nawiercone:</u>	<u>ustabilizowane:</u>
-	-	-	(samowypływ)
<u>zafiltrowanie (m p.p.t.):</u>		<u>zasoby eksploatacyjne</u> <u>(m³/h):</u>	<u>depresja (m):</u>
<u>od:</u>	<u>do:</u>	0,18	0,63
-	-		

Właściwości fizykochemiczne wody:		
<u>mineralizacja (g/dm³):</u>	<u>temperatura (°C):</u>	<u>typ chemiczny wody:</u>
0,5	8,7	HCO ₃ -Ca-Mg,S

Wyniki oznaczeń izotopowych:					
<u>Data poboru</u>	<u>δ¹⁸O</u> <u>[‰]</u> <u>V-SMOW</u>	<u>δ²H</u> <u>[‰]</u> <u>V-SMOW</u>	<u>Tryt</u> <u>[T.U.]</u>	<u>δ¹³C</u> <u>[‰]</u> <u>V-PDB</u>	<u>¹⁴C</u> <u>[pmc]</u>
9.08.2017	-9,93	-68,3	3,0 ±0,4	-	-

Niepewność pomiaru składu izotopów trwałych wynosi ±0,1‰, ±1‰ odpowiednio dla δ¹⁸O, δ²H

Lesko położone jest w obrębie centralnej depresji karpackiej, stanowiącej część jednostki śląskiej. W rejonie miejscowości wyróżnia się dwie jednostki niższego rzędu - antyklinę Uherzec i synklinę Czulni-Zabrodzia. Pierwsza z nich odznacza się obecnością stojących niemal pionowo warstw, druga zaś lokalnym występowaniem stromych wtórnych zafałdowań. Styl budowy rejonu Leska prezentuje rys. 5.13.



Rys. 5.13. Przekrój geologiczny w rejonie Leska (Chowanec i Witek, 1998)

W utworach fliszowych w rejonie Leska występuje sieć spękań i szczelin w obrębie warstw krośnieńskich dolnych i środkowych oraz rozdzielających je piaskowców glaukonitowych. Od gęstości i wielkości szczelin zależne jest występowanie wód podziemnych, dlatego też uprzywilejowane strefy przepływu związane są z rejonami o większym zaangażowaniu tektonicznym. Zasięg pionowy strefy zawodnionej nie przekracza na ogół 80-100 m. Zasilanie poziome fliszowego odbywa się poprzez bezpośrednią infiltrację wód opadowych lub na drodze przesączania z utworów czwartorzędowych.

W Lesku siarczkowe wody lecznicze wypływają ze źródeł nr 1 i 4. W odróżnieniu od pozostałych źródeł wypływających w ich okolicy cechują się, poza zawartością siarkowodoru, nieco wyższą mineralizacją, co pozwala przypuszczać, że drenowane przez nie wody są dwuskładnikowymi mieszaninami wód pochodzących z bezpośredniej infiltracji z wodami głębszego krążenia.

Wytypowane do badań izotopowych przeprowadzonych w ramach zadania objętego niniejszym sprawozdaniem źródło nr 1 wypływa w obrębie piaskowców warstw krośnieńskich

dolnych, z którymi genetycznie związane są wody siarczkowe. Prowadzi ono wody typu $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg,S}$ o mineralizacji $0,5 \text{ g/dm}^3$. Ich skład chemiczny jest typowy dla strefy płytkiego krążenia, i wskazuje na udział bardzo niewielkiej domieszki ascenzyjnych wód chlorkowych lub zanieczyszczonych. Przyjmowano, że siarkowódór stanowiący leczniczy składnik swoisty wód źródła nr 1 powstał w wyniku redukcji siarczanów przy współudziale węgla pierwiastkowego zawartego w węglowodorach (Sokołowski, 1977). Szczegółowe badania hydrochemiczne, izotopowe oraz mikrobiologiczne i mineralogiczne wskazują, że siarkowódór może pochodzić z płaszczu Ziemi lub z wód siarczanowych związanych z utworami mioceńskimi (Rajchel, 2000; Rajchel i in., 2005).

Skład izotopów stabilnych tlenu uzyskany podczas badań przeprowadzonych w 2017 r. potwierdza tezę o genezie związanej ze współczesną infiltracją. Zawartość trytu wynosząca 3,0 T.U. pozwala wnioskować, że średni „wiek” wód infiltracyjnych drenowanych przez źródło jest rzędu kilkunastu lat. Brak jest archiwalnych oznaczeń izotopowych, które pozwoliłyby na bardziej precyzyjne określenie „wieku” wód i potwierdzenie obecności beztrytowej komponenty wód głębszego krążenia.

Według skali oceny stopnia zagrożenia wód zanieczyszczeniami pochodzenia antropogenicznego zastosowanej w opracowaniu wody źródła nr 1 w Lesku cechują się wysokim stopniem zagrożenia.

NIEBORÓW MAŁY źródło nr 1

Informacje o położeniu obiektu:			
<u>miejsowość:</u>	<u>gmina:</u>	<u>powiat:</u>	<u>województwo:</u>
Nieborów Mały	Hyżne (gm. wiejska)	rzeszowski	podkarpackie

Informacje o obiekcie:			
<u>typ obiektu:</u>		źródło	
<u>rodzaj ujętej wody:</u>		woda lecznicza	
<u>rzędna terenu</u> <u>(m n.p.m.):</u>	<u>głębokość całkowita</u> <u>(m):</u>	<u>rok wykonania:</u>	<u>stan obiektu:</u>
264,40	-	1981 (obudowa)	czynny
<u>cel wykorzystania:</u>		punkt czerpalny	
<u>użytkownik:</u>		-	

Informacje o ujętym poziomie wodonośnym:			
<u>wiek poziomu wodonośnego:</u>		paleogen-eocen	
<u>poziom wodonośny (m p.p.t.):</u>		<u>zwierciadło (m p.p.t.):</u>	
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>nawiercone:</u>	<u>ustabilizowane:</u>
-	-	-	0,5
<u>zafiltrowanie (m p.p.t.):</u>		<u>zasoby eksploatacyjne</u> <u>(m³/h):</u>	<u>depresja (m):</u>
<u>od:</u>	<u>do:</u>	0,36	2,70
-	-		

Właściwości fizykochemiczne wody:		
<u>mineralizacja (g/dm³):</u>	<u>temperatura (°C):</u>	<u>typ chemiczny wody:</u>
2,5	9,5	HCO ₃ -Cl-Na-Ca,S

Wyniki oznaczeń izotopowych:					
<u>Data poboru</u>	<u>δ¹⁸O</u> <u>[‰]</u> <u>V-SMOW</u>	<u>δ²H</u> <u>[‰]</u> <u>V-SMOW</u>	<u>Tryt</u> <u>[T.U.]</u>	<u>δ¹³C</u> <u>[‰]</u> <u>V-PDB</u>	<u>¹⁴C</u> <u>[pmc]</u>
3.12.2000 ¹⁾	-9,59	-67,2	5,1 ±0,6	-	-
19.10.2001 ¹⁾	-9,58	-67,2	4,5 ±0,7	-	-
29.07.2003 ¹⁾	-9,47	-67,0	3,8 ±0,4	-	-
8.08.2017	-9,40	-65,5	1,4 ±0,3	-	-

Niepewność pomiaru składu izotopów trwałych wynosi ±0,1‰, ±1‰ odpowiednio dla δ¹⁸O, δ²H

¹⁾ Rajchel i in. (2005)

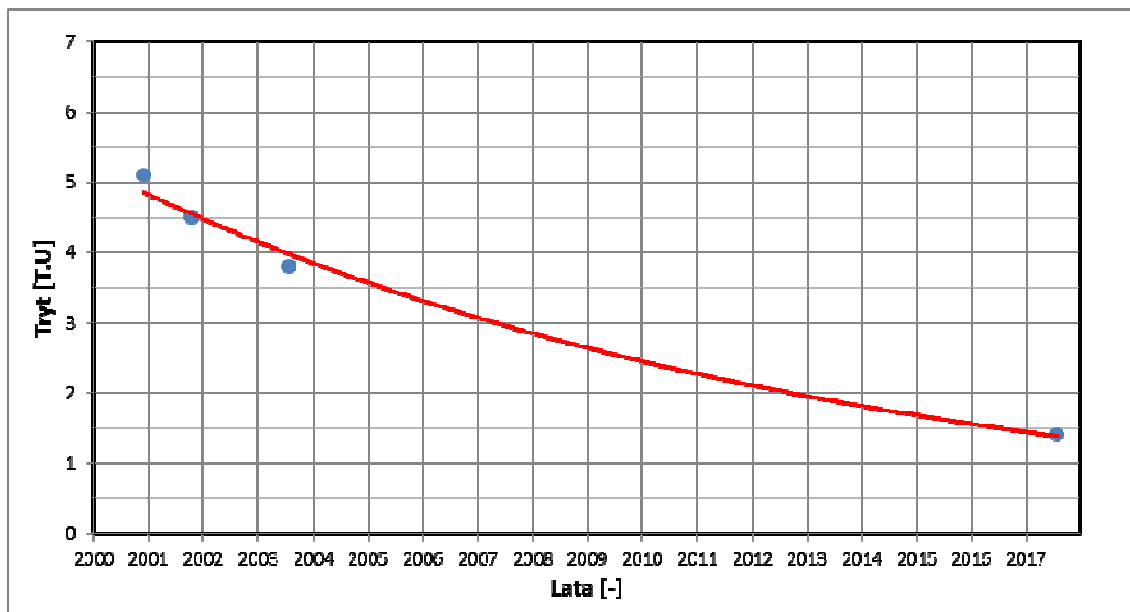
Nieborów położony jest w obrębie płaszczowiny skolskiej. Wśród skał występujących w rejonie miejscowości wyróżnić można górnokredową serię inoceramową, na którą składają się naprzemianległe piaskowce i łupki, eoceńskie pstre łupki, piaskowce warstw hieroglifowych i łupki menilitowe, oligoceńskie piaskowce i łupki warstw krośnieńskich oraz eluwia i zwietrzliny czwartorzędowe.

W miejscowości tej znajduje się pięć źródeł siarczkowych wód mineralnych, z których cztery prowadzą wody uznane za lecznicze. Ich występowanie związane jest z obecnością nieciągłości tektonicznych – spękań, uskoków i dyslokacji podłoża. Stopień mineralizacji wód zależy od warunków lokalnych.

Geneza siarkowodoru występującego w wodach źródeł jest złożona. Przyjmowano, że występowanie wód siarczkowych związane jest z obecnością w strefie hipergenicznej rozproszonych w skałach siarczków, które są utleniane do siarczanów, transportowane z wodami w głąb górotworu, gdzie w warunkach redukcyjnych, w obecności substancji bitumicznych i przy udziale bakterii redukujących, powstaje siarkowodór (Sokołowski, 1982). Szczegółowe badania hydrochemiczne, izotopowe oraz mikrobiologiczne i mineralogiczne wykazały, że siarkowodór może pochodzić z płaszcz Ziemi lub z wód siarczanowych związanych z utworami mioceńskimi (Rajchel, 2000; Rajchel i in., 2005).

Źródło nr 1 w Nieborowie Małym, które włączono do grupy obiektów przeznaczonych do opróbowania izotopowego w ramach raportowanego zadania, wypływa z piaskowców stanowiących przewarstwienie w serii łupków menilitowych, przykrytych utworami aluwialnymi potoku. Zostało ono pogłębione szybem wykutym w skale, o głębokości 5,2 m, i ujęte w betonowej obudowie (Sokołowski, 1982). Udokumentowano w nim wody czterojonowe typu $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na-Ca,S}$ o mineralizacji $2,5 \text{ g/dm}^3$. Z danych pochodzących z lat 1958-1980 wynika, że mineralizacja wód wykazywała zmienność w zakresie do 20%, w zależności od udziału infiltrujących wód pochodzenia atmosferycznego. Podobna zależność dotyczyła zawartości siarkowodoru. W trakcie opróbowania izotopowego przeprowadzonego w sierpniu 2017 r. zmierzono przewodność elektrolityczną wody ($1587,3 \mu\text{S/cm}^2$), która po przeliczeniu odpowiada mineralizacji rzędu 1 g/dm^3 , co wskazuje na większy niż w trakcie wspomnianych badań udział wód pochodzących z bezpośredniej infiltracji. Zwierciadło wody układało się wówczas na głębokości 0,8 m p.p.t.

W przeszłości badania izotopowe wód źródła nr 1 w Nieborowie Małym prowadzone były w latach 2000-2003. Trzy serie pomiarowe obejmowały izotopy stabilne tlenu i wodoru oraz tryt. Badania o tym samym zakresie przeprowadzono w 2017 r. w ramach raportowanego zadania.



Rys. 5.14. Zmiany zawartości trytu w wodach leczniczych ze źródła nr 1 w Nieborowie Małym

Na podstawie wyników oznaczeń izotopowych, składu chemicznego oraz warunków występowania wód uznać należy, że wody te są mieszaniną trójskładnikową złożoną z wód pochodzących ze współczesnej infiltracji zawierających tryt, z infiltracyjnymi wód beztrytowymi oraz z ascendującymi wód chlorkowymi (sedymencyjnymi).

Zgromadzone dane dotyczące stężeń trytu pochodzące z lat 2000-2017 tworzą fragment krzywej przejścia „piku” bombowego tego nuklidu w wodach podziemnych (rys. 5.14). Na podstawie dopasowania posiadanych wyników do krzywej uśrednionych zawartości trytu w wodach podziemnych można przyjąć, że współczesna składowa infiltracyjna o „wieku” rzędu 10-12 lat stanowi 25-30% objętości wód, natomiast wartości $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ wskazują na infiltrację w klimacie takim jak panujący obecnie.

Według skali oceny zagrożenia wód zanieczyszczeniami pochodzenia antropogenicznego przyjętej w opracowaniu wody źródła nr 1 w Nieborowie Małym cechują się wysokim stopniem zagrożenia.

POLAŃCZYK IG-1

Informacje o położeniu obiektu:			
<u>miejsowość:</u>	<u>gmina:</u>	<u>powiat:</u>	<u>województwo:</u>
Polańczyk	Solina (gm. wiejska)	leski	podkarpackie

Informacje o obiekcie:			
<u>typ obiektu:</u>		otwór eksploatacyjny	
<u>rodzaj ujętej wody:</u>		woda lecznicza	
<u>rzędna terenu</u> <u>(m n.p.m.):</u>	<u>głębokość całkowita</u> <u>(m):</u>	<u>rok wykonania:</u>	<u>stan obiektu:</u>
469,4	1144,0	1972	czynny
<u>cel wykorzystania:</u>		balneoterapia	
<u>użytkownik:</u>		Gminny Zakład Komunalny Sp. z o.o.	

Informacje o ujętym poziomie wodonośnym:			
<u>wiek poziomu wodonośnego:</u>		paleogen	
<u>poziom wodonośny (m p.p.t.):</u>		<u>zwierciadło (m p.p.t.):</u>	
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>nawiercone:</u>	<u>ustabilizowane:</u>
710,0	840,0	710,0	77,0
<u>zafiltrowanie (m p.p.t.):</u>		<u>zasoby eksploatacyjne</u>	<u>depresja (m):</u>
<u>od:</u>	<u>do:</u>	<u>(m³/h):</u>	
710,0	840,0	0,5	420

Właściwości fizykochemiczne wody:		
<u>mineralizacja (g/dm³):</u>	<u>temperatura (°C):</u>	<u>typ chemiczny wody:</u>
2,4	-	Cl-HCO ₃ -Na,I

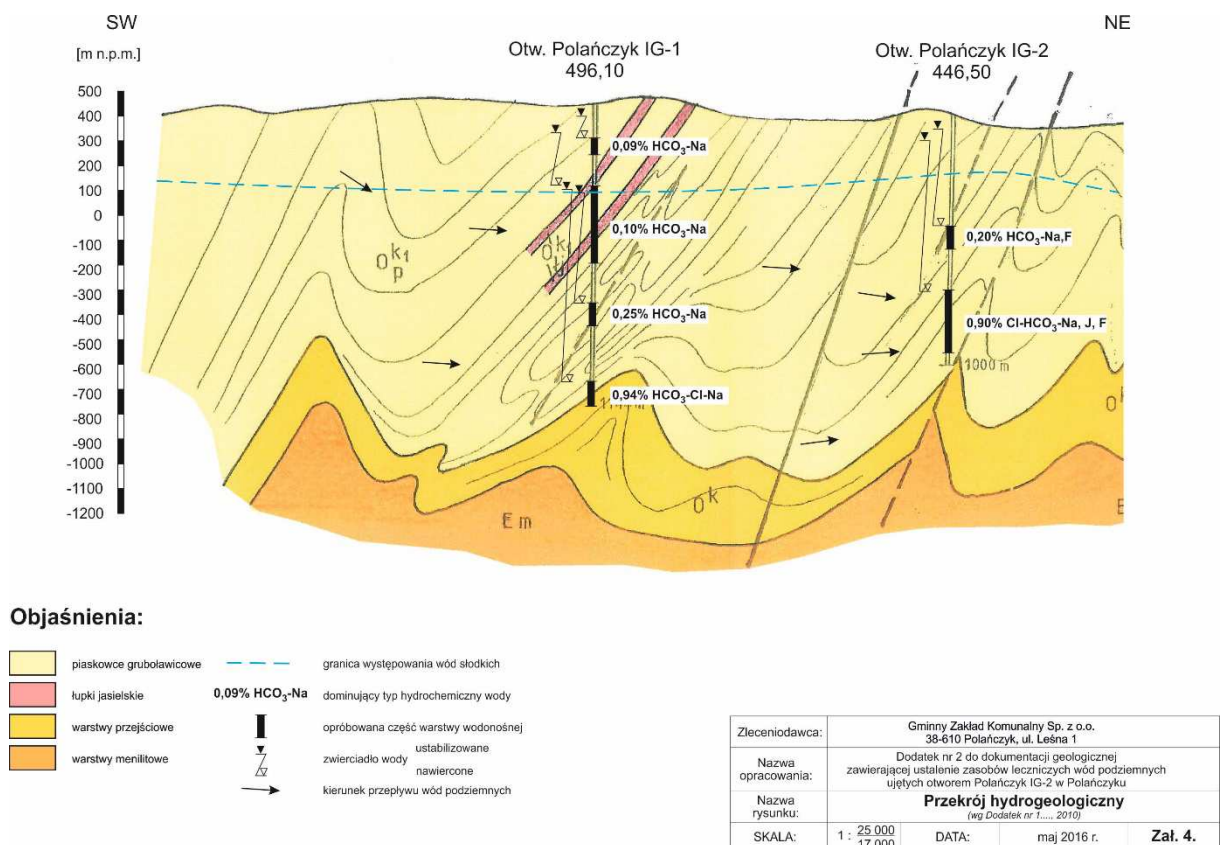
Wyniki oznaczeń izotopowych:					
<u>Data poboru</u>	<u>δ¹⁸O</u> [‰] V-SMOW	<u>δ²H</u> [‰] V-SMOW	<u>Tryt</u> [T.U.]	<u>δ¹³C</u> [‰] V-PDB	<u>¹⁴C</u> [pmc]
16.06.2016	-10,24 -10,31	-69,8 -70,2	0,1 ±0,4	+18,8	0,6 ±1,0

Niepewność pomiaru składu izotopów trwałych wynosi ±0,1‰, ±1‰ odpowiednio dla δ¹⁸O, δ²H oraz ±0,2‰ dla δ¹³C

Uzdrowisko Polańczyk położone jest na obszarze zewnętrznych Karpat fliszowych, w obrębie centralnej depresji karpackiej, stanowiącej część jednostki śląskiej. Rejon Polańczyka zbudowany jest z trójdzielnych oligoceńskich warstw krośnieńskich, na które składają się piaskowce oraz łupki. Warstwy krośnieńskie dolne charakteryzują się występowaniem piaskowców gruboławicowych, płytowych i skorupowych z wkładkami łupków o niewielkiej miąższości. W stropie występują charakterystyczne piaskowce glaukonitowe. Górnooligocieńskie warstwy krośnieńskie środkowe zbudowane są z naprzemianległych warstw piaskowców i łupków oraz rzadziej zlepieńców. Warstwy krośnieńskie górne wykształcone z dominacją łupków w rejonie Polańczyka nie występują. Utwory fliszowe przykrywają czwartorzędowe pokrywy zwietrzelinowe i aluwia.

W rejonie Polańczyka występuje kilka jednostek tektonicznych - łuska Myczkowa-Polańczyka, wypiętrzenie południowe i synklina Myczkowców. Wszystkie wymienione struktury mają przebieg NW-SE i występują w nich liczne uskoki i przesunięcia (Bielec, 2016).

Ze strefami uskokowymi związana jest wodonośność utworów fliszowych, w obrębie których występują zarówno wody słodkie, jak i wody zmineralizowane. Obecność i warunki występowania wód zmineralizowanych udokumentowano otworami badawczymi IG-1 i IG-2 zlokalizowanymi w Polańczyku (rys. 5.15). Na podstawie przeprowadzonych badań ujęte w nich wody uznane zostały za lecznicze i są obecnie wykorzystywane do celów balneoterapeutycznych.



Rys. 5.15. Przekrój geologiczny przez rejon Polańczyka (Sokołowski, 2010)

W ujęciu Polańczyk IG-1 wytypowanym do opróbowania izotopowego w ramach raportowanego zadania zbadano trzy horyzonty wód mineralnych występujące na głębokości 312-594 m, 710-840 m i 1050-1144 m. Stwierdzono, iż mineralizacja wód wzrastała wraz z głębokością od 1,0 do 9,4 g/dm³. Zmieniał się również typ chemiczny wody z HCO₃-Na, poprzez HCO₃-Na,I, do HCO₃-Cl-Na,I,Fe i ulegał ograniczeniu dopływ wód do otworu. Ostatecznie ujęto wody lecznicze środkowego horyzontu wodonośnego o mineralizacji 2,4 g/dm³. Jego zwierciadło stabilizowało się na głębokości 349 m, co świadczy o ich całkowitej izolacji wód od powierzchni terenu. Ustalona depresja eksploatacyjna przy wydajności 0,5 m³/h sięga aż 420 m, gdyż horyzont wodonośny zasilany jest wodami przepływającymi w mikroszczelinach. Niewielkie wydajności otworów, nieprzekraczające 1 m³/h, są typowe dla tej części Karpat (Bielec, 2016).

Przeprowadzone w 2016 r. laboratoryjne badania izotopowe wykazały, że wody ujęcia Polańczyk IG-1 nie zawierają trytu, co oznacza, że nie ma w nich składowej zasilania współczesnego i potwierdza, że nie są narażone na oddziaływanie pochodzących z powierzchni terenu czynników antropogenicznych (wg klasyfikacji stosowanej w opracowaniu – niski stopień zagrożenia). Zwraca uwagę wartość $\delta^{13}\text{C}$, wynosząca aż +18,8‰, która wskazuje, że węgiel w wodorowęglanach rozpuszczonych w wodzie uległ wymianie z węglem z CO₂. Dwutlenek węgla powstający w głębokich partiach skorupy ziemskiej zawiera węgiel pozbawiony ¹⁴C, który powstał jako efekt metanogenezy. Wyklucza to możliwość wykorzystania metody węglowej do datowania wód podziemnych.

Skład izotopów stabilnych tlenu i wodoru wskazuje, że infiltracja wód musiała następować w warunkach klimatycznych niemal identycznych jak współczesne. Biorąc pod uwagę wszystkie powyższe czynniki oraz warunki występowania, mineralizację i skład chemiczny tych wód (HCO₃-Na), można postawić tezę, iż są to wody stare, które infiltrowały przypuszczalnie w ostatnim interglacjale i których zasoby są prawdopodobnie nieodnawialne lub bardzo słabo odnawialne. Eksploatacja wód odbywa się przy bardzo dużej depresji, co dodatkowo wskazuje na niską zasobność horyzontu wodonośnego.

Podsumowując, w ramach raportowanego zadania badaniami izotopowymi objęto pięć ujęć wód leczniczych zlokalizowanych na obszarze Karpat zewnętrznych – trzy otwory wiertnicze i dwa źródła. Obiekty te reprezentują zróżnicowane typy wód – szczawy chlorkowe (ujęcia Szczawa II i Rabe 1), wody siarczkowe (źródła w Lesku i Nieborowie) oraz inne zmineralizowane wody swoiste (otwór Polańczyk IG-1). Wśród uzyskanych wyników w grupie opróbowanych ujęć odmiennym, wyraźnie cięższym składem izotopowym tlenu i wodoru wyróżniają się wody ujęcia w Szczawie, przy czym jest to skład typowy dla szczaw chlorkowych przejściowej strefy hydrochemicznej Karpat zewnętrznych.

Wody tego ujęcia są czteroskładnikową mieszaniną wód dehydratacyjnych, których obecność decyduje o zdecydowanie cięższym składzie izotopowym, wód sedimentacyjnych odznaczających się wysoką zawartością chlorków i ogólnie wysoką mineralizacją oraz wód pochodzących ze współczesnej infiltracji (trytowych i beztrytowych). Drugi z otworów ujmujących szczawy chlorkowe - Rabe 1 - położony jest w zewnętrznej strefie hydrochemicznej, w której dominują wody chlorkowe. Wody z tego ujęcia charakteryzują się składem izotopowym charakterystycznym dla wód zasilanych w warunkach klimatycznych zbliżonych do obecnie panujących, co wskazuje pośrednio na brak lub skrajnie mały udział komponenty dehydratacyjnej właściwej dla szczaw chlorkowych strefy przejściowej. Skład izotopowy wód z objętych badaniami źródeł siarczkowych w Nieborowie i Lesku jest również typowy dla wód zasilanych współcześnie, a w przypadku otworu Polańczyk IG-1 nieco bardziej ujemny, co wskazuje, że zasilanie odbywało się w warunkach klimatycznych chłodniejszych niż obecnie panujące. Trzy wymienione ujęcia położone są w zewnętrznej strefie hydrochemicznej Karpat zewnętrznych, lecz występujące w nich wody nie są typowe pod względem składu chemicznego dla tej strefy. Wody siarczkowe wypływające na ogół w źródłach lub ujmowane płytkimi otworami zostały rozpoznane w ponad stu lokalizacjach na obszarze całych Karpat (Rajchel, 2000).

Przeprowadzone oznaczenia trytu wskazują, że wody ujęć w Rabem i Polańczyku pozbawione są składowej zasilania po 1952 r., a zatem cechuje je wysoka odporność na zanieczyszczenia pochodzenia antropogenicznego. W pozostałych ujęciach tryt jest obecny i wskazuje na wysoki stopień zagrożenia. Dotyczy to w szczególności ujęcia w Szczawie, w wodach którego obserwowany jest niewielki, lecz zauważalny wzrost tego nuklidu (0 T.U. w 1995 r., 1,1 T.U. w 2017 r.), świadczący o uruchomieniu nowych dróg dopływu do ujęcia i zmianie sposobu formowania się wód. Na istnienie tego procesu wskazują również wyraźne zmiany składu izotopowego wód ujęcia ($\delta^{18}\text{O}$ wynosiła 6,6‰ w 1995 r. i 3,39‰ w 2017 r.). Powyższe zjawiska wskazują na możliwość wystąpienia istotnych zmian właściwości fizyczno-chemicznych wód z ujęcia Szczawa II, które mogą zagrozić ich leczniczemu charakterowi.

W przypadku ujęcia w Nieborowie obserwowany jest stopniowy spadek zawartości trytu odpowiadający fragmentowi krzywej przejścia przez system wodonośny maksimum z okresu bombowego. Na tej podstawie udział składowej współczesnego zasilania został określony w objętości 25-30% wód o „wieku” 10-12 lat. Pojedynczy pomiar w wodach źródła w Lesku pozwala na określenie średniego „wieku” wód na kilkanaście lat.

Pomiar zawartości radiowęglu przeprowadzony w ujęciu Polańczyk IG-1 nie pozwala na oszacowanie „wieku” wód ze względu na zaistniałą wymianę węgla obecnego w węglanach rozpuszczonych w wodzie z pozbawionym radiowęglu węglem z CO_2 powstałym w trakcie metanogenezy.

6. PODSUMOWANIE

W ramach raportowanego przedsięwzięcia, zgodnie z przyjętym zakresem i harmonogramem, zrealizowano prace obejmujące:

- wytypowanie ujęć do opróbowania izotopowego (liczba wytypowanych ujęć – 16);
- pobór próbek wód do badań laboratoryjnych z wytypowanych ujęć (liczba pobranych próbek – 40);
- wykonanie oznaczeń laboratoryjnych trytu (^3H), składu izotopowego tlenu i wodoru ($\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$) oraz radiowęglu (^{14}C). Liczba wykonanych analiz – 16 oznaczeń trytu, 16 oznaczeń składu izotopowego tlenu i wodoru i 8 oznaczeń radiowęglu. Wykonawca oznaczeń – Towarzystwo Badania Przemian Środowiska Geosfera w Krakowie;
- interpretację uzyskanych wyników izotopowych oznaczeń laboratoryjnych – szacowanie „wieku” wód, określenie ich genezy (pochodzenia) i ocena zagrożenia wód czynnikami pochodzenia antropogenicznego (podatność wód). Przy interpretacji wyników wzięto pod uwagę właściwości fizyczno-chemiczne wód, konstrukcję ujęć oraz sposób, intensywność i przebieg ich eksploatacji. Do określenia „wieku” wód podziemnych wykorzystywano wyniki oznaczeń trytu i radiowęglu, natomiast do określania genezy - skład izotopowy tlenu i wodoru. Ocena zagrożenia wód wykonywana była przede wszystkim na podstawie zawartości trytu, który jest bardzo czułym wskaźnikiem wrażliwości wód. Przesłankami do wnioskowania na temat zagrożenia były również skokowe zmiany zawartości badanych izotopów w wodach wytypowanych ujęć.

W wyniku analizy i interpretacji danych stwierdzono, iż:

- w wodach niemal połowy z opróbowanych ujęć obecna jest składowa trytowa. W drugiej połowie ujęć uzyskano zerową zawartość tego nuklidu lub zawartość mieszczącą się w granicach błędu wynoszącego $\pm 0,3$ T.U., co wskazuje na brak zasilania współczesnymi wodami infiltrującymi po 1952 r. Maksymalną zawartość trytu stwierdzono w ujęciu leczniczych szczaw w Jedlinie-Zdroju i wynosi ona $7,0 \pm 0,5$ T.U.;
- zastosowanie metody dopasowania krzywych zawartości trytu w wodach ujęć i w opadach atmosferycznych możliwe było tylko w jednym ujęciu – źródło nr 1 w Nieborowie. W przypadku pozostałych ujęć z niezerowym trytem nuklid ten wykazywał skokową zmienność (Jedlina-Zdrój) wskazującą na dużą zmienność sposobu zasilania ujęcia, pojawiał

się po raz pierwszy w ujęciu (Karpniki, Kleszczów, Szczawa) lub był oznaczany po raz pierwszy (Lesko, Rogóźno 15,5/21);

- skład izotopowy tlenu i wodoru wód opróbowanych ujęć nie wskazuje na istotne zróżnicowanie, które mogłoby wynikać z efektu kontynentalnego lub wysokościowego. Wyjątek stanowi ujęcie Szczawa II o zdecydowanie „cięższym” składzie izotopowym wynikającym z obecności w jego wodach składowej dehydratacyjnej, której markerem są małe ujemne wartości tych składników;
- wody wszystkich ujęć są pochodzenia infiltracyjnego lub zawierają komponentę wód pochodzenia infiltracyjnego. W większości przypadków wartości $\delta^{18}\text{O}$ i $\delta^2\text{H}$ odpowiadają właściwym dla wód współczesnego zasilania (wartości położone wzdłuż światowej linii opadów (World Meteoric Water Line) lub są nieco bardziej ujemne (wartości położone powyżej linii);
- obliczenie „wieku” na podstawie stężenia radiowęglu możliwe było jedynie w przypadku dwóch ujęć (Grodzisko – 3700 lat i Łądek-Zdrój – 9000 lat). W dwóch przypadkach stwierdzono, że „wiek” wód jest starszy niż zakres metody, tj. przekracza 30 000 lat (Wypychów, Ozimek). W Cudzynowicach ze względu na wymianę izotopową pomiędzy wodami i matrycą skalną możliwe było jedynie przybliżone oszacowanie „wieku”. W przypadku Karpnik i Stanisłowa stwierdzono skokowe zmiany zawartości nuklidu, które wskazywały na nieustalone warunki zasilania oraz związek podwyższonych zawartości nuklidu z jedną składową wód. W ujęciu w Polańczyku stwierdzono wymianę izotopową pomiędzy wodami a dwutlenkiem węgla pozbawionym radiowęglu;
- stopień zagrożenia wód zanieczyszczeniami pochodzenia antropogenicznego lub inaczej podatność wód na zagrożenia, zostanie określony na podstawie zawartości trytu w wodach. W celu bardziej precyzyjnego scharakteryzowania tego zjawiska przyjęto czterostopniową skalę. Na jej podstawie 2 ujęcia sklasyfikowano jako średnio zagrożone oddziaływaniem zanieczyszczeń pochodzenia antropogenicznego (zawartość trytu od >0 do 1 T.U.), 5 zaliczono do grupy wysokiego stopnia zagrożenia (zawartość trytu od >1 do 5 T.U.), a 1 do grupy o najwyższym stopniu zagrożenia (zawartość trytu >5 T.U.). Pozostałe ujęcia znalazły się w grupie o niskim stopniu zagrożenia;
- wśród uzyskanych wyników oznaczeń izotopowych zwraca uwagę:
 - pojawienie się trytu w poziomie wodonośnym ujętym od głębokości niemal 1500 m w ujęciu Kleszczów GT-1 zlokalizowanym w niecce łódzkiej. Ponieważ na głębokościach tego rzędu tryt praktycznie nie występuje, Badanie należy powtórzyć w celu weryfikacji wyniku.;

- pojawienie się trytu oraz radiowęglu w ujęciu Staniszków ST-1 oraz dwukrotny wzrost zawartości radiowęglu ujęciu Karpniki KT-1. Obydwa ujęcia położone są w niewielkiej odległości od siebie w Kotlinie Jeleniogórskiej. Wymienione zjawiska wskazują na skrajnie małą pojemność systemu wodonośnego (ujęcia eksploatowane z wydajnością poniżej 10% ustalonych zasobów). Parametry eksploatacyjne ujęć powinny być systematycznie kontrolowane;
- pojawienie się trytu oraz zmiana składu izotopowego tlenu i wodoru (w kierunku bardziej ujemnym) w ujęciu wód leczniczych Szczawa II. Utrzymywanie się zaobserwowanej tendencji zmian może prowadzić do utraty stabilności chemicznej składu wód będącej warunkiem zaliczenia ich do kopaliny;
- skokowo zmieniająca się zawartość trytu w ujęciu wód leczniczych J-300 w Jedlinie-Zdroju wskazująca na nieustalone warunki dopływu. Utrzymywanie się zjawiska może prowadzić do utraty stabilności chemicznej składu wód będącej warunkiem zaliczenia ich do kopaliny.

7. LITERATURA

- Aggarwal P.K., Araguas-Araguas L.J., Groening M., Kulkarni K.M., Kurtast T., Newman B., Vitvart T., 2010** - Global hydrologic isotope data and data networks, Isoscapes — Understanding movement, pattern and process on Earth through isotope mapping (West J.B., Bowen G.J., Dawson T.E., T.U. K.P., Eds) Springer.
- Barbacki A., Kazanowska A., 2001** - Cenomańskie wody geotermalne zapadliska przedkarpackiego i obszarów przyległych. Przegląd Geologiczny, vol. 9 nr 6.
- Bielec B., 2016** - Dodatek nr 2 do dokumentacji geologicznej zawierającej ustalenia zasobów leczniczych wód podziemnych dla otworu Polańczyk IG-2 w Polańczyku.
- Biernat H. Kapuściński J. Niewiarowicz J. Martyka P., 2011** - Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby eksploatacyjne ujęcia wód termalnych w Kleszczowie wraz z określeniem warunków wtlaczania wód wykorzystanych do górotworu.
- Biernat S., 1956** - Budowa geologiczna kredy opolskiej. Biul. Geol. nr 152. IG, Warszawa
- Calmon P., Garnier-Laplace J., 2006** - Tritium and the environment. IRSN. 26.
- Chowaniec J., 2004** - Wody podziemne wschodniej części Karpat i Zapadliska Przedkarpackiego oraz ich ochrona. LXXV Zj. Nauk. PTG, 22-25.09.2004 r., Iwonicz-Zdrój.
- Chowaniec J., 2009** – Studium hydrogeologii zachodniej części Karpat polskich. Biul. Państw. Inst. Geol., 734. Warszawa
- Chowaniec J., Gorczyca G., Gągulski T., Patorski R., 2015** - Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby dyspozycyjne wód leczniczych antykliny Iwonicza-Zdroju - Rudawki Rymanowskiej, woj. podkarpackie.
- Chowaniec J., Freiwald P., Gągulski T., Gorczyca G., Michalski A., Operacz T., Patorski R., Szklarczyk T., 2014** – Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby dyspozycyjne wód podziemnych (leczniczych i zwykłych) w obrębie zlewni potoków Milik i Andrzejówka w miejsc. Andrzejówka, Milik, gm. Muszyna, pow. nowosądecki, woj. małopolskie.
- Chowaniec J., Witek K., 1998** – Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000. Ark. Lesko (1058).
- Chowaniec J., Zuber A., Ciężkowski W., 2007** - Prowincja karpacka. [w:] Sadurski A., Paczyński B. (red.), Hydrogeologia regionalna Polski, t. II: Wody mineralne, lecznicze i termalne oraz kopalniane. PiG, Warszawa.
- Ciężkowski W., 1990** – Studium hydrogeochemii wód leczniczych Sudetów polskich. Pr. Nauk. Inst. Geotech. Pol. Wr., nr 60, seria Monografie, nr 19. Wyd. Pol. Wr., Wrocław.

- Ciężkowski W., Grabczak J., Kryza J., Poprawski L., Zuber A., 1989** – Izotopowe badania wieku i cyrkulacji wód monokliny i depresji opolskiej. Prace Nauk. Inst. Geotechn. Polit. Wrocł. 58/29. Wrocław.
- Ciężkowski W., Doktor S., Graniczny M., Izydorska A., Józefko I., Kozłowski J., Liber-Madziarz E., Mateńko T., Porwisz B., Przylibski T., Teisseyre B., Wiśniewska M., Zuber A., 1996** - Próba określenia obszarów zasilania wód leczniczych pochodzenia infiltracyjnego w Polsce na podstawie badań izotopowych. Zakł. Bad.-Usł. Zdroje, Wrocław.
- Ciężkowski W., Liber-Makowska E., Ciekot B., Ogórek A., 2011** - Charakterystyka warunków występowania i eksploatacji wód termalnych Łądko-Zdroju. Technika Poszukiwań Geologicznych. 2011, R. 50, z. 1-2.
- Ciężkowski W., Zuber A., 1995** - Stabilne izotopy tlenu i wodoru w zwykłych wodach podziemnych centralnej części Karpat polskich. [w:] Współczesne problemy hydrogeologii, t. 7. Wyd. PROFIL, Kraków.
- Ciężkowski W., Zuber A., 1997** - Wstępne dane o wodach glacialnych w niektórych ujęciach wód leczniczych Beskidu Sądeckiego. [w:] Współczesne problemy hydrogeologii, t.8. Wyd. J. Wojewoda, Wrocław.
- Clark I.D., Fritz P., 1997** – Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis Publishers. New York.
- Cook P.G., Herczeg A.I. (red.), 2000** – Environmental Tracers in Subsurface Hydrology. Kluwer Acad. Publ.
- Craig H., 1961** – Isotopic variations in meteoric waters, Science 133.
- d’Obyrn K., Grabczak J., Zuber A., 1997** - Mapy składów izotopowych infiltracji holocenijskiej na obszarze Polski [w:] Współczesne problemy hydrogeologii. T VIII. Kiekrz k/Poznań.
- Dansgaard W., 1964** - Stable isotopes in precipitation. Tellus, 16: 436-468.
- Dowgiałło J., 1998** - Geotermometryczne prognozy temperatury a wyniki poszukiwań wód termalnych w Jeleniej Górze-Cieplicach. Pr. Nauk. Uniw. Śl., 1718.
- Dowgiałło J., 2001** - Sudecki region geotermalny – określenie, podział, perspektywy poszukiwawcze. Współczesne Problemy Hydrogeologii Vol. 10.
- Dowgiałło J., Fistek J., 2007** – Prowincja sudecka. [w:] Paczyński B, Sadurski A. (red.), Hydrogeologia regionalna Polski, t. II. PIG, Warszawa.
- Dowgiałło J., Nowicki Z., 1999** – Ocena „wieku” wód podziemnych na podstawie wybranych metod izotopowych, Biul. PIG, Hydrogeologia, 388.

- Dowgiałło J., Nowicki Z., 2007** – Typy genetyczne i chemiczne wód podziemnych. Poglądy ośrodka warszawskiego. [w:] Paczyński B, Sadurski A. (red.), Hydrogeologia regionalna Polski, t. I. PIG, Warszawa.
- Dowgiałło J., Paczyński B., 2002** - Podział regionalny wód leczniczych Polski. [w:] Paczyński B. (red.), Ocena zasobów dyspozycyjnych wód potencjalnie leczniczych. Poradnik metodyczny. PIG, Warszawa.
- Fritz P., Fontes J.C. (red.), 1980** – Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Vol. 1. The Terrestrial Environment A, Elsevier, Amsterdam.
- Gorczyca G., Bielec B., Krawczyk J., 2016** - Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby dyspozycyjne wód leczniczych zlewni Wilgi-rejon Mateczny, pow. krakowski, woj. małopolskie.
- Górecki (red.), 1995** – Atlas zasobów energii geotermalnej na Niżu Polskim. AGH, Kraków.
- Górecki (red.), 2006** – Atlas zasobów geotermalnych na Nożu Polskim. Formacja mezozoiku. Kraków.
- Kapuściński J., Szymańska E., Hulboj A., Połujan-Kowalczyk M., Kubiczek I., Niewiarowicz J., Pijewski G., Krawczyk J., Gągulski T., Gorczyca G., Tott M., Kos J., Fiszer J., Kondel G., Pytel A., 2010** - Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby dyspozycyjne wód leczniczych i potencjalnie leczniczych Ziemi Kłodzkiej i obszaru jeleniogórskiego. Przed. Geol. POLGEOL S.A., Warszawa.
- Kasiński J., Saternus A., Sawicka K., Urbański P., 2010** – Dodatek nr 1 do dokumentacji geologicznej złoża węgla brunatnego Rogóźno w kategorii C2.
- Kawalec B., Mioduszewski E., 1963** – Dokumentacja hydrogeologiczna wód leczniczych w kategorii C z utworów kredowych wraz z projektem badań geologicznych dla udokumentowania zasobów w kategorii B w rejonie Rabe k/Baligrodu, powiat Lesko woj. rzeszowskie.
- Kiełczawa B., Liber-Makowska E., 2017** – Warunki geotermiczne rejonu Łądko-Zdroju. Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój 2/2017.
- Kleczkowski A.S., 1979** - Hydrogeologia ziem wokół Polski. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Krawczyk J., Życzkowska M., Turek K., i in., 2013** - Dokumentacja hydrogeologiczna określająca warunki hydrogeologiczne w związku z ustanawianiem obszarów ochronnych Głównego Zbiornika Wód Podziemnych nr 335 "Zbiornik Krapkowice - Strzelce Opolskie".

- Leśniak P., 1980** - The origin of the chloride waters at Wysowa, West Carpathians - chemical and isotope approach. *Acta Geol. Pol.*, 30.
- Liber E., 2001** - Zmienność wydajności ujęć wód leczniczych eksploatowanych samoczynnie ze złóż sudeckich. Praca doktorska. Raporty Inst. Gór. Ser. PRE nr 3, Polit. Wrocław. Wrocław.
- Łukaczyński I., Polaczek P., 2014a** – Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby eksploatacyjne ujęcia wód termalnych otworem KT-1 w Karpnikach k/Jeleniej Góry. Przedsiębiorstwo Geologiczne s.c., Częstochowa.
- Łukaczyński I., Polaczek P., 2014b** – Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby eksploatacyjne ujęcia wód termalnych otworem ST-1 w Staniszowie k/Jeleniej Góry. Przedsiębiorstwo Geologiczne s.c., Częstochowa.
- Marszałek H., 2007** - Kształtowanie zasobów wód podziemnych Kotliny Jeleniogórskiej. *Acta Universitatis Wratislaviensis No 2993, seria: Hydrogeologia*, Wyd. Uniw. Wrocław.
- Meszczyński J., Szczerbicka M., 2002** – Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000. Ark. Zgierz (590).
- Mierzejewski M.P., Majerowicz A., Czerwieński J., 1983** - Objasnienia do Szczegółowej mapy geologicznej Sudetów 1:25 000, Arkusz Szklarska Poręba. Wyd. Geol., Warszawa.
- Mook W.G., 2005** – Introduction to isotope hydrology: stable and radioactive isotopes of hydrogen, carbon and oxygen. Taylor and Francis, The Netherlands.
- Mroczkowski J., 1993** - Fotolineamenty i dyslokacje tektoniczne w Karkonoszach i na obszarach sąsiednich. *Mat. Konf.: Geoekologiczne Problemy Karkonoszy*. Wyd. U. Wr., Wrocław
- Nowicki Z., 1999** – Skład izotopów trwałych wód infiltrujących w późnym plejstocenie i holocenie na obszarze Polski centralnej. (w) *Współczesne Problemy Hydrogeologii*. T. IX 259-266, (red. Krajewski S., Sadurski A.). PIG, Warszawa.
- Nowicki Z., Felter A., Stożek J., 2013** - Szacowanie "wieku" i określenie genezy eksploatowanych wód podziemnych zaliczonych do kopalin na podstawie ich składu izotopowego.
- Nowicki Z., Felter A., Stożek J., Socha M., Sokolowski J., Michalska K., 2015a** - Szacowanie "wieku" i określenie genezy eksploatowanych wód podziemnych zaliczonych do kopalin wraz z oceną ich podatności na zagrożenia pochodzenia antropogenicznego.
- Nowicki Z., Leśniak P., Wilamowski A., 2015b** – Zawartość trytu i skład izotopowy tlenu w płytkich wodach podziemnych w punktach badawczych krajowej sieci monitoringu. *Przegląd Geologiczny*.

- Nowicki Z., Leśniak P., Wilamowski A., 2016** – Średni czas pobytu (MRT) wód podziemnych w zlewniach Wisły i Narwi na podstawie oznaczeń trytu. *Przegląd Geologiczny*
- Operacz T., Bielec B., Krawczyk J., 2015** - Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby dyspozycyjne wód leczniczych zlewni Wilgi-rejon Swoszowice, gm. Kraków, pow. krakowski, woj. małopolskie.
- Oszczypko N., 2006** - Powstanie i rozwój polskiej części zapadliska przedkarpackiego. *Przegląd Geologiczny* vol. 54 nr 4.
- Pacholewski A., Wiktorowicz B., Kos M., Młyńczak T., Lipiec I., Felter A., Socha M., 2015** - Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby eksploatacyjne ujęcia wód termalnych i leczniczych Cudzynowice GT-1 z utworów górnej kredy.
- Paczyński B., Płochniewski Z., 1996** — Wody mineralne i lecznicze Polski. Wyd. PIG, Warszawa
- Poprawski L., Filbier P., 1997** – Analiza możliwości eksploatacji wód leczniczych w uzdrowisku Jedlina w świetle nowych badań hydrogeologicznych. _VIII Symp. Współ. Probl. Hydrogeol.
- Porwisz B., Kowalski J., 2002** - Dokumentacja hydrogeologiczna zasobów dyspozycyjnych wód leczniczych i towarzyszących im lub występujących odrębnie wód potencjalnie leczniczych na obszarze Karpat i zapadliska przedkarpackiego.
- Rajchel L., 2000** – Źródła wód siarczkowych w Karpatach polskich. *Geologia* 26(3).
- Rajchel L., 2013** – Udokumentowane występowanie wód mineralnych, leczniczych oraz swoistych na obszarze Karpat wschodnich. [w:] Górecki (red.), *Atlas Geotermalny Karpat Wschodnich*. AGH, Kraków.
- Rajchel L., Zuber A., Duliński M., Rajchel J., 2005** – Składy izotopowe i chemiczne oraz wieki wody ze źródeł siarczkowych w polskich Karpatach. *Mat. konf. XII Współcz. Probl. Hydrogeol.*, Toruń.
- Rodzoch A., Karwacka K., 2015** - Inwersja hydrochemiczna i wiekowa wód podziemnych na obszarze GZWP nr 401 (Zbiornik Niecka Łódzka). *Przegląd Geologiczny* vol.63, nr 10/2, 2015.
- Rodzoch A., Muter K., Manuszak M., Szymonik A., Urszula M., Sziło J., Pazio-Urbanowicz K., 2013** - Dokumentacja hydrogeologiczna określająca warunki hydrogeologiczne w związku z ustanawianiem obszarów ochronnych Głównego Zbiornika Wód Podziemnych nr 401 (Niecka Łódzka)
- Sheppard S.M.F., 1986** – Characterization and isotopic variations in natural waters. [w:] Valley J.V., Taylor Jr H.P., O’Neil J.R. (red.), *Stable Isotopes in High Temperature*

Geological Processes. Reviews in Mineralogy, Vol. 16. Mineralogical Society of America, Book Crafters Inc., Chelsea, Michigan.

- Sokołowski A., 1977** - Dokumentacja Hydrogeologiczna wód siarczkowych występujących w Lesku, woj. krośnieńskie.
- Sokołowski A., 1982** – Dokumentacja hydrogeologiczna wód leczniczych Nieborowa k. Rzeszowa.
- Sokołowski A., 2010** – Dodatek nr 1 do dokumentacji geologicznej zawierającej ustalenia zasobów leczniczych wód podziemnych dla otworu Polańczyk IG-2 w Polańczyku.
- Starzyńska D., 1996** – Aneks do dokumentacji hydrogeologicznej zasobów wód podziemnych odwiertu J-300 w Jedlinie-Zdroju. Balneoprojekt, Warszawa
- Tadych J., Rasała M., Tadych A., 2010** - Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby eksploatacyjne ujęcia wód termalnych Poddębice GT-2.
- Werner Z., Jaworski A., 1962** – O odkryciu artezyjskiej termalnej wody siarkowodorowej koło Łodzi. Przegl. Geol. T. 10 nr 10.
- Węclawik S., 1991** - Kompleksowa metodyka badań ochrony surowców balneologicznych przed oddziaływaniem przemysłu. Studia i Rozpr., 11. Wyd. CPPGSMiE PAN, Kraków.
- Wiktorowicz B., 2014** – Wody termalne niecki łódzkiej – zielona energia z wnętrza Ziemi. Alestudio, Kielce.
- Zaleska M., Zieliński W., Borysewicz P., 2004** - Dodatek nr 1 do dokumentacji hydrogeologicznej wód podziemnych odwiertu J-300 Jedlina-Zdrój.
- Ziułkiewicz M., 2003** – Zmienność chemizmu wód podziemnych na obszarze Łodzi. Przegląd Geologiczny, vol. 51 nr 4.
- Zuber A. (red.), 2007** - Metody znacznikowe w badaniach hydrogeologicznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław.
- Zuber A., Chowaniec J., 2009** - Ultrafiltracja i diagenaza jako ważne procesy formujące skład izotopowy i chemiczny wody w niektórych basenach sedymentacyjnych. Biuletyn PIG 436.
- 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.